

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA
KONSTRUKCIJSKA SMER

Kandidat:

DAMIR KOVAČEVIĆ

PREDNAPETE MEMBRANSKE KONSTRUKCIJE

Diplomska naloga št.: 3207/KS

PRESTRESSED MEMBRANE STRUCTURES

Graduation thesis No.: 3207/KS

Mentor:

prof. dr. Boštjan Brank

Somentor:

izr. prof. Andrej Demšar

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Janko Logar

Ljubljana, 2012

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisani DAMIR KOVAČEVIĆ izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom
»PREDNAPETE MEMBRANSKE KONSTRUKCIJE«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana,

(podpis)

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	69:624.074.4(043.2)
Avtor:	Damir Kovačević
Mentor:	prof. dr. Boštjan Brank
Somentor:	izr. prof. dr. Andrej Demšar
Naslov:	Prednapete membranske konstrukcije
Tip dokumenta:	diplomska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema:	221 str., 11 pregl., 217 sl., 18 en.
Ključne besede:	prednapete membranske konstrukcije, kompozitne membrane, PVC membrane, PTFE membrane, iskanje oblike, metoda gostota sile, nelinearna statična analiza, krojenje membrane

Izvleček

V diplomski nalogi so celovito obravnavane prednapete membranske konstrukcije. Na začetku je podan zgodovinski pregled predhodnikov prednapetih membranskih konstrukcij, nato pa je ilustrativno predstavljeno obnašanje dvojno ukrivljenih antiklastičnih prednapetih membran. Podrobno je opisana odvisnost med zunanjo obtežbo, prednapetjem in ukrivljenostjo membran. Predstavljene so tri osnovne oblike prednapetih membran, s pomočjo katerih se lahko kombinira ostale možne oblike. Obravnavane so komponente prednapetih membranskih konstrukcij in njihovi materiali, s poudarkom na membranah. Podrobno so opisane proizvodnja ter mehanske in ostale lastnosti različnih membran. Predstavljeni so tudi preizkusi in metode za ugotavljanje mehanskih karakteristik kompozitnih membran. V okviru naloge je bil izvedeno enoosno natezno testiranje različnih kompozitnih membran proizvajalcev Verseidag in Ferrari (9 različnih membran, za vsako po trije preizkusi v smeri osnove in trije v smeri votka), kjer so se določevale togost, nepovratne deformacije in natezna trdnost. V nadaljevanju naloge so obravnavane tri glavne faze pri projektiranju prednapetih membranskih konstrukcij – iskanje oblike, nelinearna statična analiza in izračun krojev. Vzporedno s tem so predstavljene metode na podlagi katerih te tri faze izvede program Easy. Na koncu prvega dela diplomske naloge so predstavljeni še različni priključni detajli na robovih ter v ogliščih na membrane, procesa izdelave in postavitve konstrukcije ter postopki napenjanja membrane. V drugem delu diplomske naloge so s programom Easy, ki so mi ga za to diplomsko nalogo posodili pri podjetju Technet iz Štutgarta, narejeni trije projekti prednapetih membranskih konstrukcij. Pri vsakem primeru so izvedene vse tri glavne faze projektiranja, prikazana je določitev mehanskih karakteristik membrane iz diagramov dvoosnega testiranja, dimenzionirane so membranske in jeklene komponente konstrukcije, predlagani so možni membranski spojni detajli, na koncu pa je predlagan še postopek postavitve konstrukcije ter napenjanja membrane.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC:	69:624.074.4(043.2)
Author:	Damir Kovačević
Supervisor:	prof. dr. Boštjan Brank
Cosupervisor:	izr. prof. dr. Andrej Demšar
Title:	Prestressed membrane structures
Document type:	graduation Thesis – University studies
Scope and tools:	221 p., 11 tab., 217 fig., 18 eq.
Keywords:	prestressed membrane structures, composite membranes, PVC membranes, PTFE membranes, formfinding, nonlinear analysis, cutting pattern, biaxial tensile test

Abstract

Graduation thesis presents the entire issue of prestressed membrane structures. At the beginning a historical overview of prestressed membrane structures predecessors is given and then the behavior of prestressed double curved membranes is described. Dependence of the external load, prestress and curvature is discussed. It also presents three basic forms of prestressed membranes which are the basis of all other forms. The components and materials of prestressed membrane structures are discussed, with emphasis on the membranes. Manufacturing and mechanical and nonmechanical properties of different membranes are described. It also presents the methods for determining the mechanical characteristics of composite membranes. Uniaxial tensile testing of different composite membranes of manufacturers Verseidag and Ferrari was carried out (9 different membranes, three specimens in the warp and three in the weft direction for each) where stiffness, irreversible deformation and tensile strength are determined. Furthermore, three major phases in the design of prestressed membrane structures are discussed – formfinding, statical analysis and cutting pattern; methods and working of Easy software were presented simultaneously. At the end of the first part of the thesis connection edge and corner details, the process of membrane prefabrication, installation and tensioning are presented. In the second part three projects of prestressed membrane structures are designed with software Easy which was lent to me by Technet. For each example the three major phases of design are made, determination of membrane mechanical properties from biaxial test diagrams are shown, structure components are dimensioned, possible details, erection and tensioning process are proposed.

ZAHVALA

Za pomoč in podporo pri nastajanju diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju prof. dr. Boštjanu Branku in somentorju izr. prof. dr. Andreju Demšarju. Zahvaljujem se tudi podjetju Technet, kjer so mi posodili program Easy in zanj nudili tehnično podporo. Posebna zahvala gre staršema Ankici in Ivanu za podporo in vzpodbudo na moji življenjski poti. Na koncu se zahvaljujem še vsem, ki so mi v času študija kakorkoli pomagali ali me razveseljevali.

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE	II
IZJAVE	III
BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	IV
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	V
1 UVOD	1
1.1 Prednosti prednapetih membranskih konstrukcij	1
1.2 Motivacija ob izbiri teme diplomske naloge	3
1.3 Zgradba diplomske naloge	4
2 ZGODOVINSKI PREGLED	6
2.1 Šotori, kot prve membranske konstrukcije.....	6
2.2 Viseči mostovi, mreže kablov in pnevmatske konstrukcije	8
2.3 Od prednapetih kabelskih do prednapetih membranskih konstrukcij	9
2.4 Primeri izjemnih sodobnih prednapetih membranskih konstrukcij.....	11
2.4.1 Strehe na letališčih	11
2.4.2 Strehe na štadionih	12
2.4.3 Strehe razstavišč.....	13
3 OSNOVNI PRINCIPI OBNAŠANJA IN OBLIKOVANJA PREDNAPETIH MEMBRAN	14
3.1 Delovanje kabelskih konstrukcij in podobnost s prednapeto membrano	14
3.2 Prednapetje v membranah	16
3.3 Igra med obliko in prednapetjem	17
3.4. Osnovne oblike prednapetih membran.....	19
3.4.1 Sedlaste membrane.....	20
3.4.2 Konusne membrane.....	21
3.4.3 Valovite membrane	22
3.4.4 Kupolaste membrane.....	23
4 KONSTRUKCIJSKI DELI IN MATERIALI	24
4.1 Razdelitev konstrukcijskih elementov na fleksibilne in toge.....	24

4.2 Membrana	25
4.2.1 Polietilenteraftalat/polivinilklorid (PET/PVC) membrana.....	31
4.2.2 Steklana vlakna/politertafluoretilen (FG/PTFE) membrana	34
4.2.3 Steklana vlakna/silikon (FG/SI) membrana	37
4.2.4 Etilen Tetrafluoroetilen (ETFE) membrana	38
4.3 Fleksibilni linijski elementi	40
4.4 Podporna konstrukcija.....	42
5 DOLOČANJE MEHANSKIH LASTNOSTI KOMPOZITNIH MEMBRAN	44
5.1 Določanje natezne trdnosti	44
5.2 Določanje obnašanja	45
5.2.1 Določitev elastičnih modulov in Poissonovih koeficientov	45
5.2.2 Določitev kompenzacijskih faktorjev.....	48
5.2.2 Določitev strižnega modula.....	49
5.3 Natezni enoosni laboratorijski preizkus membranskih vzorcev	50
5.3.1 PET/PVC membrane Verseidag.....	53
5.3.2 FG/PTFE membrane Verseidag	54
5.3.3 PET/PVC membrane Ferrari:	55
5.3.4 Primerjava PET/PVC in FG/PTFE membran podjetja Verseidag.....	56
5.3.5 Primerjava PET/PVC membran podjetja Verseidag in Ferrari	57
6 PROCES NAČRTOVANJA PREDNAPETIH MEMBRANSKIH KONSTRUKCIJ	58
6.1 Iskanje oblike	58
6.1.1 Eksperimentalno iskanje oblike.....	59
6.1.2 Računalniško iskanje oblike.....	61
6.2 Statična analiza.....	63
6.2.1 Statična analiza s programom Easy.....	65
6.2.2 Varnostni faktorji po različnih standardih in priporočilih	68
6.3 Krojenje membrane	72
6.3.1 Izbira krojev	73
6.3.2 Kompenzacija krojev.....	76

6.3.3 Računanje krojev s programom Easy	76
7 DETAJLI	78
7.1 Detajli na membranskem robu	79
7.1.1 Fleksibilni robni detajli	79
7.1.2 Togi robni detajli	81
7.2 Detajli v ogliščih membrane – kotni detajli	82
7.3 Detajli podpor znotraj membrane.....	85
8 GRADNJA PREDNAPETE MEMBRANSKE KONSTRUKCIJE	87
8.1 Prefabrikacija membrane.....	88
8.2 Oprema za postavljanje prednapetih membranskih konstrukcij.....	93
8.3 Postavitev membrane	95
8.4 Napenjanje membrane.....	98
8.4.1 Linearno porazdeljeno napenjanje.....	98
8.4.2 Točkovno napenjanje	99
8.5 Kontrola.....	100
9 PRIMERI PROJEKTOV	102
9.1 Nadstrešek v Ljubljani	105
9.1.1 Zasnova	105
9.1.2 Iskanje oblike	106
9.1.3 Statična analiza.....	107
9.1.4 Dimenzioniranje	118
9.1.5 Detajli	120
9.1.6 Krojenje membrane	121
9.1.7 Postavitev	123
9.2 Nadkritje odprtega gledališča v Mariboru.....	125
9.2.1 Zasnova	125
9.2.2 Iskanje oblike	126
9.2.3 Statična analiza.....	127
9.2.4 Dimenzioniranje	152

9.2.5 Detajli	155
9.2.6 Krojenje membrane	155
9.2.7 Postavitev	158
9.3 Nadkritje tržnice na Primorskem.....	160
9.3.1 Zasnova	160
9.3.2 Iskanje oblike	161
9.3.3 Statična analiza.....	162
9.3.4 Dimenzioniranje	179
9.3.5 Detajli	185
9.3.6 Krojenje membrane	186
9.3.7 Postavitev	189
10 ZAKLJUČEK	191
VIRI.....	195

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Primerjava različnih požarnih klasifikacij (Hajdukovič, 2011), (Forster in sod., 2004)	31
Preglednica 2: Rezultati nateznega poizkusa PET/PVC membran Verseidag	53
Preglednica 3: Rezultati nateznega poizkusa FG/PTFE membran Verseidag.....	54
Preglednica 4: Rezultati nateznega poizkusa PET/PVC membran Ferrari	55
Preglednica 5: Minimalno prednapetje PET/PVC membran (Forster in sod., 2004).....	64
Preglednica 6: Kritični rezultati statične analize po posameznih elementih in maks. pomik	118
Preglednica 7: Kritični rezultati statične analize po posameznih elementih in maks. pomik	151
Preglednica 8: Kritični rezultati statične analize po posameznih osno obremenjenih elementih in maks. pomik.....	177
Preglednica 9: Kritične notranje količine v spodnjem delu lebdečega jambora ob različnih obt. kombinacijah	178
Preglednica 10: Kritične notranje količine v zgornjem delu lebdečega jambora ob različnih obt. kombinacijah	178
Preglednica 11: Kritične notranje količine v nateznem obroču lebdečega jambora ob različnih obt. kombinacijah	178

KAZALO SLIK

Slika 1: Levo: Ameriški tipiji (Curtis, 1908); Desno: Črni šotor (Moore, 2012).....	7
Slika 2: Levo: Premična platnena streha nad rimskimi amfiteatri (Berger, 1996); Desno: Vrvni viseči most (Q'eswachaka ..., 2012).....	8
Slika 3: Levo: Raleigh Arena v Severni Karolini (J. S. Dorton ..., 2012); Desno: Ameriški paviljon – EXPO 1970 v Osaki (Geiger, 1975).....	9
Slika 4: Levo: Paviljon za vrtno razstavo (Frei, 1955); Desno: Olimpijski park v Münchnu (München ..., 1999)	10
Slika 5: Letališče Jeddah (Hajj Terminal), Savdska Arabija (The King ..., 2012; Berger, 1996).....	11
Slika 6: Letališče Denver, Kolorado, ZDA (Denver ..., 2012; Schierle, 2009).....	11
Slika 7: Letališče Suvarnabhumi Bangkok, Kitajska (Hightex, 2012; Why ..., 2010).....	11
Slika 8: Mercedes – Benz Arena, Stuttgart, Nemčija (World ..., 2012; Gottlieb ..., 2005).....	12
Slika 9: Stadion kralja Fahda, Rijad, Savdska Arabija (Husain, 2008; King ..., 2012).....	12
Slika 10: Olimpijski stadion, Kijev, Ukrajina (GMP, 2012).....	12
Slika 11: Razstavišče, Milano, Italija (Fiera ..., 2012).....	13
Slika 12: O2 Arena, London, Velika Britanija (O2 Arena, 2012; Overview ..., 2012).....	13
Slika 13: Kitajski paviljon – EXPO 2010, Šanghaj, Kitajska (EXPO ..., 2010; Zou, 2010).....	13
Slika 14: Različni načini stabilizacije vrvi za obešanje perila (Berger, 1996).....	15
Slika 15: Evolucija prednapete membranske konstrukcije (Berger, 1996).....	15
Slika 16: Idealiziran model prednapete in nenapete membranske konstrukcije (Schierle in sod., 1993).....	17
Slika 17: Antiklastična, sinklastična ter enojno ukrivljena oblika (Bechthold, 2008).....	17
Slika 18: Levo: Infinitezimalen del antiklastične površine prednapete membrane (Wagner, 2011); Desno: Sile v ukrivljenem kablu (Huntington, 2004)	19
Slika 19: Levo: Model preproste sedlaste konstrukcije (Bechthold, 2008); Desno: Primer preproste sedlaste konstrukcije (Armijos, 2010a).....	20
Slika 20: Levo: Model ločno podprte sedlaste konstrukcije (Bechthold, 2008); Desno: Primer ločno podprte sedlaste konstrukcije (M&G ..., 2012).....	20
Slika 21: Levo: Model konusne konstrukcije (Bechthold, 2008); Desno: Primer konusne konstrukcije (Giugliano, 2009)	21
Slika 22: Levo: Model valovite konstrukcije (Bechthold, 2008); Desno: Primer valovite konstrukcije (Canada ..., 2012)	22
Slika 23: Levo: Shema membranske kupole (Sebestyen, 2003); Desno: Primer membranske kupole (Georgia ..., 2012)	23
Slika 24: Membranske napetosti v sedlasti in konusni membranski konstrukciji (Bechthold, 2008).....	25
Slika 25: Levo: Prerez kompozitne membrane; Desno: Prerez filmske membrane (Seidel, 2009)	26

Slika 26: Levo: Platno vezava; Desno: Panama vezava (Forster in sod., 2004)	27
Slika 27: Levo: Prepletenost niti v nosilni tkanini membrane (modro – osnova, rdeče – votek); Desno: Nateg votkovne smeri povzroči skrček tkanine v osnovni smeri (Bridgens in sod., 2004)	28
Slika 28: Deformacijsko obnašanje kompozitne membrane v različnih smereh (Seidel, 2009)	28
Slika 29: Pri nategu membrane se pojavijo nepovrate deformacije (Seidel, 2009).....	28
Slika 30: Graf relaksacije PET/PVC membran (Hegyí in sod., 2004)	29
Slika 31: Levo: Poškodbe membrane zaradi vdora vode do nosilne tkanine; Desno: Poškodba membrane zaradi razvoja plesni (Seidel, 2009)	30
Slika 32: Levo: Avtomatske statve; Desno: Nanašanje PVC matrice z zračnim nožem (Seidel, 2009)	32
Slika 33: Sestava PET/PVC membrane (Supartono in sod., 2011).....	33
Slika 34: Levo: Shema FG/PTFE membrane (Supartono in sod., 2011); Desno: Steklena nit, steklena tkanina in steklena tkanina s PTFE nanosom (Seidel, 2009)	35
Slika 35: Levo: FG/SI membrana; Desno: Proizvodnja FG/SI membran (Seidel, 2009).....	38
Slika 36: Levo: Proizvodnja EFTE folije z ekstruzijo skozi ploščato režo (Seidel, 2009); Desno: Primer enoslojne EFTE membranske konstrukcije ojačane s kabli (ETFE foil, 2011).....	39
Slika 37: Sestava jeklene vrvi (Composition ..., 2012)	40
Slika 38: Prerez žičnega spleta, zaprte jeklene vrvi in odprte jeklene vrvi (Seidel, 2009)	41
Slika 39: Primeri podpornih konstrukcij iz različnih materialov (Armijos, 2011; Janberg, 2010; Europlast, 2012; Schierle, 2009)	43
Slika 40: Levo: Enosni natezni preizkus; Desno: Dvoosni natezni preizkus (Seidel, 2009).....	45
Slika 41: Potek obremenjevanja membrane v dvoosnem nateznem stroju (rdeča – osnova, modra – votek) (Forster in sod., 2004).....	46
Slika 42: Deformacije membrane ob natezanju v dvoosnem nateznem stroju (rdeča – osnova, modra – votek) (Forster in sod., 2004).....	47
Slika 43: Rezultati dvoosnega nateznega preizkusa z napetostnim razmerjem 2:1 (Calculating ..., 2011)	49
Slika 44: Potek obremenjevanja membrane v dvoosnem nateznem stroju pri določanju strižnega modula (Forster in sod., 2004)	50
Slika 45: Levo: Vzorci različnih membran z izrezanimi tračnimi preizkušanci; Desno: Aparat za natezno preizkušanje v laboratoriju Oddelkaza tekstilsvo, NTF.....	51
Slika 46: Potek obremenjevanja preizkušancev	52
Slika 47: Grafi obnašanja raznovrstnih primerljivih kompozitnih membran v smeri osnove.....	52
Slika 48: Levo: Obnašanje PET/PVC membrane Verseidag B4617 Tip IV; Desno: Obnašanje FG/PTFE membrane Verseidag B18089 Tip III	56
Slika 49: Izdelava fizičnega modela sedlaste prednapete membranske konstrukcije z milnično opno (Seidel, 2009).....	59

Slika 50: Levo: Fizični modeli prednapetih membranskih konstrukcij iz najlona, ki so jih izdelali udeleženci konference Textile Roofs 2011 v Berlinu; Desno: Natančen fizični model iz najlona	60
Slika 51: Vozlišče i s sosednjimi vozlišči v mreži linijskih elementov (Easy training ..., 2010).....	62
Slika 52: Levo: Testiranje modela prednapete membranske konstrukcije v vetrnem tunelu (Nagai in sod., 2011); Desno: Analitične metode za izračun napetosti in sil v prednapetih membranskih konstrukcijah (Schierle, 2009)	65
Slika 53: Levo: Ločena analiza fleksibilne (zračno podprte) membrane in podporne konstrukcije (maks. pomik podp. konstr. je 0,5 m, maks. moment v podp. konstr. je 30000 kNm); Desno: Analiza fleksibilne (zračno podprte) membrane in podporne konstrukcije skupaj (maks. pomik podp. konstr. je 0,25 m, maks. moment v podp. konstr. je 18000 kNm) (Holl in sod., 2011).....	68
Slika 54: Test odpornosti na širjenje raztrganin v dvoosnem nateznem aparatu (Seidel, 2009).....	71
Slika 55: Levo: Razdeljena površina prednapete membrane; Sredina: Načrt krojev; Desno: Izrez kroja iz membranske pole (Seidel, 2009)	72
Slika 56: Levo: Potek glavnih napetosti v membranski strehi; Desno: Razpored krojev po površini (Seidel, 2009).....	73
Slika 57: Levo: Kroji, dobljeni s presekom površine z vertikalnimi ravninami; Desno: Kroji, dobljeni z razdelitvijo površine z geodetskimi črtami (Gründig, 1996).....	74
Slika 58: Levo: Projekcija, kjer se ohranjajo dolžine; Desno: Projekcija, kjer se ohranjajo pravi koti (Seidel, 2009)	74
Slika 59: Pri bolj razdeljeni površini je popačenje v kotih posameznih krojev manjše (Seidel, 2009)..	75
Slika 60: Kompenziran membranski kroj pred vnosom napetosti (črtkano je označena oblika ob nastopu predvidenega nivoja napetosti) (Seidel, 2009).....	76
Slika 61: Normalne in tangencialne napetosti na robu membrane	79
Slika 62: Fleksibilen robni membranski detajl s kablom v membranskem zavihku (Seidel, 2009).....	80
Slika 63: Fleksibilen robni membranski detajl s ploščicami, pritrjenimi na kabel (Seidel, 2009).....	81
Slika 64: Fleksibilen robni membranski detajl s tekstilnim pasom (Seidel, 2009)	81
Slika 65: Tog robni membranski detajl pritrjen s ploščicami (Seidel, 2009).....	81
Slika 66: Različni tipi robnih membranskih spojev (Seidel, 2009).....	82
Slika 67: Levo: Kotni detajl pri fleksibilnih robovih; Desno: Kotni detajl pri togih robovih (Seidel, 2009)	83
Slika 68: Zgoraj: skice različnih tipov kotnih detajlov; Spodaj: Primeri različnih kotnih detajlov (Tension ...,2010; How ..., 2011; Data ..., 2011; Seidel, 2009).....	84
Slika 69: Primera kotnih detajlov s sedlastimi ploščicami (Data ..., 2011; Connections ..., 2000).....	84
Slika 70: Primera tekstilnih kotnih detajlov (Seidel, 2009)	85
Slika 71: Različni primeri notranjih točkovnih podpor z nateznimi obroči (How ..., 2011; Data ..., 2011)	86

Slika 72: Levo: Skici notranjih točkovnih podpor s kabelskimi zankami (Wehdorn-Roithmayr, 2011); Desno: Primer notranje točkovne podpore s kabelskimi zankami (Forster in sod., 2004).....	86
Slika 73: Levo: Primer načrta krojev (Knowledge ..., 2011); Desno: Izrez krojev z računalniško nadziranim rezalnim strojem (How ..., 2011).....	88
Slika 74: Levo: Prenos napetosti v varjenjem spoju kompozitnih membran preko striga matrice (Forster in sod., 2004); Desno: Različni tipi varjenega spoja (preklopni, z enim ali dvema dodatnima trakovoma membrane) (Seal ..., 2012).....	89
Slika 75: Levo: Dogajanje pri visokofrekvenčnem varjenju membran (High ..., 2012); Desno: Razpored temperature po membranah pri visokofrekvenčnem varjenju (Seidel, 2009).....	89
Slika 76: Levo: Brušenje PVF površinske prevleke; Desno: Varjenje PET/PVC membran (Seidel, 2009).....	89
Slika 77: Levo: Varjenje FG/PTFE membran; Desno: Varjenje ETFE folij (Seidel, 2009).....	90
Slika 78: Levo: Varjenje dodatkov (PET/PVC) za odvodnjavanje z pištolo na vroči zrak; Desno: Varjenje FG/PTFE membran na gradbišču (Seidel, 2009).....	91
Slika 79: Zgoraj levo: Montažni spoj s ploščicami (Forster in sod., 2004); Zgoraj desno: Membrana s keder robom v keder tračnici (Knowledge ..., 2011); Spodaj levo: Vezani montažni spoj (Seidel, 2009); Spodaj desno: Vrvni zankast spoj (Forster in sod., 2004).....	92
Slika 80: Levo: Zvijanje končane membrane v delavnici; Desno: Zvite membrane v transportnem zaboju (Seidel, 2009).....	92
Slika 81: Levo: Električno vitlo s sistemom škripecev za natezanje kablov; Sredina: Natezanje in priključevanje stabilizacijskih kablov na temelj s hidravličnimi cilindri; Desno: Natezne naprave za dviganje in natezanje kablov (Seidel, 2009).....	94
Slika 82: Levo: Viseči delovni oder; Sredina: Členkasta in teleskopska delovna platforma; Desno: Delavec pripet na varnostne vrvi.....	94
Slika 83: Levo: Pritrjevanje membrane na stabilno konstrukcijo marele; Desno: Dvigovanje ločnega nosilca skupaj z membrano (Seidel, 2009).....	95
Slika 84: Levo: Transport jambora; Sredina: Dvigovanje jamborov O2 Arene; Desno: Montaža jeklene strešne konstrukcije stadiona (Seidel, 2009).....	96
Slika 85: Levo: Razvijanje kablov iz bobnov na gradbišču; Desno: Dvigovanje kablov (Seidel, 2009)...	97
Slika 86: Levo: Dostava in razlaganje prefabriciranih membran; Sredina: Montaža kotnega spojnega detajla membrane; Desno: Dvigovanje razprte prefabricirane membrane (Seidel, 2009).....	97
Slika 87: Levo: Napenjanje membrane preko robnih ploščic; Sredina: Napenjanje membrane vzporedno z robom pred pritrditvijo robnih ploščic; Desno: Natezanje membrane z zasukom jeklenega podpornega loka (Seidel, 2009).....	99
Slika 88: Levo: Napenjanje membrane s premikanjem kotne plošče z mehanskimi zategovalci; Sredina: Napenjanje membrane z natezanjem stabilizacijskih kablov z ročnimi zategovalci (Seidel,	

2009); Desno: Napenjanje membrane z dviganjem notranjega obroča z električnim vitlom (Benson, 2010)	100
Slika 89: Levo: Naprava za merjenje sile v kablu na frekvenčni osnovi; Sredina: Tritočkovna upogibna naprava za merjenje sile v kablu; Desno: Naprava za merjenje napetosti v membrani z vtisnim batom (Seidel, 2009)	101
Slika 90: Seznam galvaniziranih kablov proizvajalca Nobles (Membranes, 2011)	103
Slika 91: Trenutno stanje terase	105
Slika 92: Shema predvidenega nadkritja terase	105
Slika 93: Podana geometrija fiksnih točk in vmesnih robnih elementov	106
Slika 94: Iskanje ravnotežne oblike	106
Slika 95: Končni model nadstreška za statično analizo	107
Slika 96: Potek obremenjevanja preizkušanca Precontraint 702 T2 v dvoosnem nateznem stroju	108
Slika 97: Deformacijsko obnašanje preizkušanca Precontraint 702 T2	108
Slika 98: Napetosti v membrani in sile v kablilih v stanju prednapetja	109
Slika 99: Razpored obtežbe snega in vetra (srk) – enakomerno po celotni površini; Desno: Koeficienti razporeditve obtežbe vetra za sedlasto prednapeto membransko konstrukcijo z ravnimi togimi robovi (rezultati testiranj v vetrnem tunelu (Fang-hui in sod., 2009))	110
Slika 100: Levo: Razpored obtežbe veter X; Desno: Razpored obtežbe veter Y	111
Slika 101: Primerjava začetne oblike in deformirane oblike zaradi obtežbe snega	112
Slika 102: Potek napetosti v membrani in sil v kablilih zaradi obtežbe snega	112
Slika 103: Primerjava začetne oblike in deformirane oblike zaradi obtežbe vetra (srk)	113
Slika 104: Potek napetosti v membrani in sil v kablilih zaradi obtežbe vetra (srk)	113
Slika 105: Primerjava začetne oblike in deformirane oblike zaradi obtežbe vetra X	114
Slika 106: Potek napetosti v membrani in sil v kablilih zaradi obtežbe vetra X	114
Slika 107: Primerjava začetne oblike in deformirane oblike zaradi obtežbe vetra Y	115
Slika 108: Potek napetosti v membrani in sil v kablilih zaradi obtežbe vetra Y	115
Slika 109: Primerjava začetne oblike in deformirane oblike zaradi kombinacije obtežbe snega in vetra X	116
Slika 110: Potek napetosti v membrani in sil v kablilih zaradi kombinacije obtežbe snega in vetra X	116
Slika 111: Potek napetosti v membrani in sil v kablilih zaradi kombinacije obtežbe snega in vetra Y	117
Slika 112: Potek napetosti v membrani in sil v kablilih zaradi kombinacije obtežbe snega in vetra Y	117
Slika 113: Robni fleksibilni detajl s kablom v membranskem zavihku (Seidel, 2009; Data ..., 2011)	120
Slika 114: Različni primeri ogljiščnih detajlov (Tension ..., 2010; Armijos, 2010b; How ..., 2011)	120
Slika 115: Levo: Kreiranje geodetskih črt po površini membrane; Desno: Razdeljena površina membrane	121
Slika 116: Deformacijsko obnašanje preizkušanca Precontraint 702 T2 – določitev kompenzacijskih faktorjev	122

Slika 117: Kroji membrane za nadstrešek.....	122
Slika 118: Primer načrta za izdelavo enega izmed krojev membrane za nadstrešek (rdeče črte po robovih kroja kažejo , koliko se je krajšal zaradi kompenzacije).....	123
Slika 119: Postopek postavitve in prednapenjanja nadstreška	124
Slika 120: Terasa z nadstreškom.....	124
Slika 121: Trenutno stanje odprtega gledališča.....	125
Slika 122: Shema predvidenega nadkritja amfiteatra.....	125
Slika 123: Shema sil in napetosti, ki delujejo na glavni kabel	126
Slika 124: Podana geometrija fiksnih točk in vmesnih fleksibilnih elementov	126
Slika 125: Iskanje ravnotežne oblike	127
Slika 126: Končni model nadkritja odprtega gledališča za statično analizo	127
Slika 127: Obnašanje preizkušanca B4951 ob raztezanju – določitev elastičnih modulov.....	129
Slika 128: Razpored sil po elementih mreže membrane v stanju prednapetja.....	130
Slika 129: Napetosti v membrani v stanju prednapetja.....	130
Slika 130: Sile v kablji in jamborih v stanju prednapetja.....	131
Slika 131: Vektorski prikaz obtežbe snega v vozliščih mreže membrane	132
Slika 132: Vektorski prikaz obtežbe vetra (srk) v vozliščih mreže membrane	132
Slika 133: Vektorski prikaz obtežbe vetra X v vozliščih mreže membrane.....	133
Slika 134: Vektorski prikaz obtežbe vetra Y v vozliščih mreže membrane.....	133
Slika 135: Vektorski prikaz obtežbe vetra –Y v vozliščih mreže membrane.....	134
Slika 136: Primerjava začetne oblike in deformirane oblike zaradi obtežbe snega	135
Slika 137: Razpored sil po elementih mreže membrane zaradi obtežbe snega.....	135
Slika 138: Potek napetosti v membrani zaradi obtežbe snega.....	136
Slika 139: Sile v kablji in jamborih zaradi obtežbe snega.....	136
Slika 140: Primerjava začetne oblike in deformirane oblike zaradi obtežbe vetra (srk).....	137
Slika 141: Razpored sil po elementih mreže membrane zaradi obtežbe vetra (srk).....	137
Slika 142: Potek napetosti v membrani zaradi obtežbe vetra (srk)	138
Slika 143: Sile v kablji in jamborih zaradi obtežbe vetra (srk)	138
Slika 144: Primerjava začetne oblike in deformirane oblike zaradi obtežbe vetra X.....	139
Slika 145: Razpored sil po elementih mreže membrane zaradi obtežbe vetra X	139
Slika 146: Potek napetosti v membrani zaradi obtežbe vetra X.....	140
Slika 147: Sile v kablji in jamborih zaradi obtežbe vetra X.....	140
Slika 148: Primerjava začetne oblike in deformirane oblike zaradi obtežbe vetra Y.....	141
Slika 149: Razpored sil po elementih mreže membrane zaradi obtežbe vetra Y	141
Slika 150: Potek napetosti v membrani zaradi obtežbe vetra Y	142
Slika 151: Sile v kablji in jamborih zaradi obtežbe vetra Y	142
Slika 152: Primerjava začetne oblike in deformirane oblike zaradi obtežbe vetra –Y.....	143

Slika 153: Razpored sil po elementih mreže membrane zaradi obtežbe vetra –Y	143
Slika 154: Potek napetosti v membrani zaradi obtežbe vetra –Y	144
Slika 155: Sile v kablji in jamborih zaradi obtežbe vetra –Y	144
Slika 156: Primerjava začetne oblike in deformirane oblike zaradi kombinacije obtežbe snega in vetra X	145
Slika 157: Razpored sil po elementih mreže membrane zaradi kombinacije obtežbe snega in vetra X	145
Slika 158: Potek napetosti v membrani zaradi kombinacije obtežbe snega in vetra X	146
Slika 159: Sile v kablji in jamborih zaradi kombinacije obtežbe snega in vetra X	146
Slika 160: Primerjava začetne oblike in deformirane oblike zaradi kombinacije obtežbe snega in vetra Y	147
Slika 161: Razpored sil po elementih mreže membrane zaradi kombinacije obtežbe snega in vetra Y	147
Slika 162: Potek napetosti v membrani zaradi kombinacije obtežbe snega in vetra Y	148
Slika 163: Sile v kablji in jamborih zaradi kombinacije obtežbe snega in vetra Y	148
Slika 164: Primerjava začetne oblike in deformirane oblike zaradi kombinacije obtežbe snega in vetra –Y	149
Slika 165: Razpored sil po elementih mreže membrane zaradi kombinacije obtežbe snega in vetra –Y	149
Slika 166: Potek napetosti v membrani zaradi kombinacije obtežbe snega in vetra –Y	150
Slika 167: Sile v kablji in jamborih zaradi kombinacije obtežbe snega in vetra –Y	150
Slika 168: Detajl priključitve membrane na robne, grebenske in dolinske kable (Galerías ..., 2012; Javaharlal ..., 2010)	155
Slika 169: Primera možnih ogliščnih detajlov (Data ..., 2011; Tesion structures ..., 2012)	155
Slika 170: Kreiranje geodetskih črt po površini enega polja membrane; Desno: Razdeljena površina enega polja membrane	156
Slika 171: Obnašanje preizkušanca B4951 - določitev kompenzacijskih faktorjev	157
Slika 172: Kroji enega polja membrane za nadkritje	157
Slika 173: Primer načrta za izdelavo enega izmed krojev membrane nadkritja	158
Slika 174: Prednapenjanje membrane z napenjanjem dolinskega kabla	159
Slika 175: Tribune odprtega gledališča z nadkritjem	159
Slika 176: Trenutno stanje tržničnega platoja	160
Slika 177: Shema predvidenega nadkritja tržnice	160
Slika 178: Podana geometrija fiksnih točk in vmesnih robnih elementov	161
Slika 179: Iskanje ravnotežne oblike	161
Slika 180: Napetosti v membrani in sile v kablji v stanju prednapetja	162
Slika 181: Rast napetosti v membrani proti notranji visoki podpori v stanju prednapetja	163

Slika 182: Model podporne konstrukcije	163
Slika 183: Obnašanje preizkušanca B 18089 ob raztezanju – določitev elastičnih modulov	165
Slika 184: Primerjava predhodno poiskane oblike membrane in oblike membrane v končnem celovitem modelu	165
Slika 185: Potek napetosti v membrani v stanju prednapetja.....	166
Slika 186: Koeficienti razporeditve obtežbe vetra za konusno prednapeto membransko konstrukcijo z ravnimi togimi robovi (rezultati testiranja v vetrnem tunelu (Nagai in sod., 2011))	166
Slika 187: Razpored obtežbe nakopičenega snega.....	167
Slika 188: Razpored obtežbe vetra X in vetra X (srk)	168
Slika 189: Razpored obtežbe vetra Y in vetra Y (srk)	169
Slika 190: Primerjava začetne oblike in deformirane oblike zaradi obtežbe nakopičenega snega	170
Slika 191: Potek napetosti v membrani zaradi obtežbe nakopičenega snega.....	170
Slika 192: Primerjava začetne oblike in deformirane oblike zaradi obtežbe vetra X.....	171
Slika 193: Potek napetosti v membrani zaradi obtežbe vetra X.....	171
Slika 194: Primerjava začetne oblike in deformirane oblike zaradi obtežbe vetra X (srk).....	172
Slika 195: Potek napetosti v membrani zaradi obtežbe vetra X (srk)	172
Slika 196: Primerjava začetne oblike in deformirane oblike zaradi kombinacije obtežbe snega in vetra X.....	173
Slika 197: Potek napetosti v membrani zaradi kombinacije obtežbe snega in vetra X.....	173
Slika 198: Primerjava začetne oblike in deformirane oblike zaradi obtežbe vetra Y.....	174
Slika 199: Potek napetosti v membrani zaradi obtežbe vetra Y.....	174
Slika 200: Primerjava začetne oblike in deformirane oblike zaradi obtežbe vetra Y (srk).....	175
Slika 201: Potek napetosti v membrani zaradi obtežbe vetra Y (srk)	175
Slika 202: Primerjava začetne oblike in deformirane oblike zaradi kombinacije obtežbe snega in vetra Y	176
Slika 203: Potek napetosti v membrani zaradi kombinacije obtežbe snega in vetra Y	176
Slika 204: Razdelitev lebdečega jambora	177
Slika 205: Kritična točka v cevi	183
Slika 206: Levo: Model lebdečega jambora z nateznim obročem in prekrivno kapo (Data ..., 2011); Sredina: Detajl pritrditve membrane na obroč (Design ..., 2011); Desno: Mehanski sistem za dviganje lebdečega jambora (How ..., 2011)	185
Slika 207: Levo: Fleksibilni robni detajl z zunanjim kablom (Design ..., 2011); Desno: Primer konstrukcije s fleksibilnim robnim detajlom (Benson, 2010)	185
Slika 208: Primer detajla mehanskega spoja membran z vmesnim kablom (Huntington, 2004; Membrane ..., 2012)	185
Slika 209: Možna ogljiščna detajla (Data ..., 2011)	186
Slika 210: Možni detajli sistema za odvodnjavanje (How ..., 2010; Knowledge ..., 2011)	186

Slika 211: Razdelitev enega polja membrane	186
Slika 212: Obnašanje preizkušanca B18089 - določitev kompenzacijskih faktorjev za različna napetostna razmerja.....	187
Slika 213: Aproksimacija kompenzacijskih faktorjev za predvideno napetostno razmerje.....	188
Slika 214: Kroji enega dela membrane za nadkritje tržnice.....	188
Slika 215: Primer načrta za izdelavo enega polja membrane za nadkritje tržnice	189
Slika 216: Postopek dviganja in napenjanja membrane.....	190
Slika 217: Tržnični plato z nadkritjem.....	190

1 UVOD

Le kdo lahko ostane brezbrizen ob pogledu na nenavadno oblikovano belo konstrukcijo, umeščeno v naselje klasičnih stavb ali stolpnic ali v naravno okolje? Takšen prizor lahko danes vidimo na raznih lokacijah po vsem svetu. Govorim o modernih prednapetih membranskih konstrukcijah, ki so se v svoji relativno kratki zgodovini razširile po vseh kontinentih. Prekrivajo številne športne dvorane, stadione, letališča, sejemske površine, trgovska središča, železniške in avtobusne postaje, množično pa se jih uporablja za preprosta nadkritja, ki ščitijo pred soncem in dežjem. Najbolj privlači njihova oblika. Tu ne najdemo ravnih linij, ampak lepo zaokrožene, od katerih so ene konkavne (ukrivljene navzdol) in druge konveksne (ukrivljene navzgor), skupaj pa tvorijo t. i. antiklastično površino. Dvojno ukrivljena antiklastična oblika v povezavi s prednapetjem daje tem konstrukcijam togost, saj membrana sama nima nikakršne tlačne ali upogibne togosti, prevzame lahko le nateg. Iskanje primerne oblike prednapete membranske konstrukcije je zato poglobljena naloga pri njihovem načrtovanju (Berger, 1996). Čeprav je danes oblikovanje objektov prvenstveno v domeni arhitektov, je pri obravnavanih konstrukcijah potrebno intenzivno sodelovanje med arhitektom in inženirjem, saj oblika ni poljubna, ampak jo je potrebno poiskati glede na vrsto, obliko in postavitev podpornih elementov in glede na predvideno prednapetje.

Za navidezno preprostostjo prednapetih membranskih struktur se skriva veliko znanja in le dobro poznavanje osnovnih principov obnašanja teh konstrukcij omogoča njihovo učinkovito projektiranje, s katerim se izognemo kasnejšim problemom.

1.1 Prednosti prednapetih membranskih konstrukcij

Prednapete membranske konstrukcije so izredno učinkovite, tj. imajo zmožnost prenašanja velikih obtežb ob majhni masi. Oblika membrane sledi ravnotežju sil, zato se obtežba na najefektivnejši možen način prenese do podpornih elementov, pri tem pa membrana zavzame minimalno površino med njimi. Ves material je v nategu in je povsem izkoriščen, kar omogoča, da je materiala le toliko, kolikor ga je minimalno potrebno. Membrane (sploh sodobne) so izjemno nosilne, hkrati pa zelo lahke (cca. 1 kg/m^2) in nekaj milimetrov debela membrana lahko premošča ogromne razpone. (Popolno nasprotje temu so masivne okvirne konstrukcije. Oblika teh ne sledi toku sil, zato material ni popolnoma izkoriščen, hkrati pa je težak, zato so masivne okvirne konstrukcije precej manj učinkovite.) Pozitivna posledica majhne mase prednapetih membranskih konstrukcij je tudi to, da so neobčutljive na potresno obtežbo, zato so primerne za potresna območja. Nasploh so primerne pri raznih naravnih katastrofah, saj se jih hitro postavi, omogočajo primerno zaščito, poleg tega pa s svojo lepo obliko ljudi bodrijo (za razliko od vojaških šotorov).

Specifičnost membranskih konstrukcij je tudi velika fleksibilnost oz. podajnost. Ob nastopu določene obtežbe se že ukrivljena površina dodano ukrivi, kar vpliva na nivo membranskih napetosti. Pomiki so lahko zelo veliki in za marsikoga je lahko sprva to zelo moteče. Vendar to ni nič kritičnega, ravno nasprotno, konstrukcija je varna prav zaradi svoje fleksibilnosti. Veliki pomiki in geometrijsko kompleksne oblike so povzročali preglavice konstrukcijskim inženirjem v 50ih, 60ih in 70ih letih prejšnjega stoletja, saj so bile takratne računske in eksperimentalne metode neučinkovite za natančno projektiranje in proizvodnjo prednapetih membranskih konstrukcij. Potrebno je bilo razviti algoritme za analizo nelinearnega obnašanja konstrukcij, vendar brez računalniške podpore to ni šlo. Tehnološki razvoj je omogočil razvoj prednapetih membranskih konstrukcij, saj je z računalniško podporo mogoče najti primerno obliko membrane, jo analizirati na razne vplive, nato pa še natančno skrojiti membrano z računalniško vodenimi stroji. Velik prispevek je dodal tudi razvoj novih materialov, ki imajo vedno večje natezne trdnosti in vedno daljšo življenjsko dobo. Današnje prednapete membrane imajo življenjsko dobo trideset let in več. Še vedno jih izboljšujejo in razvijajo nove materiale.

Prednapeta membrana je ena sama čista in gola oblika. Celotna konstrukcija z vsemi detajli je vidna. Tanka prednapeta membrana in podpore nadomeščajo zidove, strešno konstrukcijo, okna, hidro in toplotno izolacijo, omete, fasado ter strešno kritino. Klasična gradnja je danes ozko specializirana, pri njej sodeluje veliko ljudi, ki nimajo istih vrednot in interesov. Pri prednapetih membranskih konstrukcijah pa se približamo delovanju nekdanjega stavbarja, t.j. mojstra, ki je bil vsestranski in je bil arhitekt, inženir in obrtnik v eni osebi (Berger, 1996).

V zadnjem desetletju se veliko govori o klimatskih spremembah, ki so posledica človekovega neodgovornega ravnanja z naravo in njenimi viri, zato se veliko truda in finančnih sredstev vloga v ekologijo in spremembe razmišljanja ljudi, tudi na področju gradnje objektov. V okviru t. i. trajnostnega razvoja se pri gradnji in uporabi objektov stremi k čim nižji porabi neobnovljivih naravnih virov in čim manjšem vplivu na okolje. Prednapete membranske konstrukcije spadajo med trajnostno naravnane konstrukcije. Zaradi svoje minimalistične zasnove porabijo malo materiala za prekrivanje velikih površin, hkrati pa zaradi majhne teže potrebujejo manjše tlačne elemente, manjše temelje, posledično je tudi manj transporta materiala, gradnja pa je hitrejša. Zaradi zadostne prosojnosti membrane ni potrebno dnevno osvetljevanje notranjih površin, hkrati pa membrana z veliko odbojno sposobnostjo preprečuje prekomerno segrevanje notranje prostornine in s tem vpliva na zmanjšanje stroškov hlajenja. Za še bolj okoljsko učinkovito konstrukcijo pa lahko na membrano namestimo fotovoltaične celice in uredimo sistem zbiranja deževnice.

Prednapete membranske konstrukcije so torej, glede na svoje številne dobre lastnosti, vsaj na nekaterih področjih resen tekmeč današnjim klasičnim (armiranobetonskim in jeklenim) konstrukcijam.

1.2 Motivacija ob izbiri teme diplomske naloge

Na izbiro teme moje diplomske naloge je vplivalo več razlogov. Fascinirala me je nenavadna oblika prednapetih membranskih konstrukcij in njihova konstrukcijska učinkovitost, predvsem zmožnost doseganja izjemnih razponov brez vmesnih podpor. Po kratki raziskavi na svetovnem spletu, sem spoznal, da so tovrstne konstrukcije že močno razširjene po celotnem svetu. Znanje o načrtovanju tovrstnih konstrukcij je že precej dodelano, dostopno je precej strokovnega gradiva in na mnogih priznanih univerzah se načrtovanje prednapetih membranskih konstrukcij že predava kot samostojen predmet ali celo kot smer podiplomskega študija.

Po drugi strani pa v Sloveniji in nekaterih bližnjih državah praktično ni podjetja, ki bi se ukvarjalo z načrtovanjem in izdelavo takšnih konstrukcij, postavljenih primerkov pa je le za vzorec. Glede na razširjenost prednapetih konstrukcij v mnogih drugih državah, dvomim, da pri nas ni potreb in interesa za tovrstnimi konstrukcijami. Zdi se, da pri nas ni dovolj znanja o njihovem načrtovanju, čemur pritrdi tudi dejstvo, da se v okviru študija na ljubljanski Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo o prednapetih membranskih konstrukcijah ne predava. Izziv, da pridobim znanje o načrtovanju prednapetih membranskih konstrukcij, je bil glavni razlog za izbor teme. Dodatni motiv mi predstavlja dejstvo, da trenutno še ni slovenske strokovne literature s tega področja, zato bi se lahko, s pomočjo moje diplomske naloge, zainteresirani bralec seznanil o prednapetih membranskih konstrukcijah, njihovem načrtovanju, izdelavi in postavitvi.

Teme nisem želel obdelati le teoretično s predstavitvijo znanja iz različnih strokovnih virov, temveč sem želel vključiti tudi praktično načrtovanje prednapetih membranskih konstrukcij. Tu se je pojavila težava, saj s konvencionalnimi računalniškimi programi za analizo konstrukcij, ki so dostopni na naši fakulteti, ni mogoča učinkovita analiza membranskih konstrukcij. Tu so mi šli naproti pri nemškem podjetju Technet, kjer razvijajo in tržijo program za celostno načrtovanje membranskih konstrukcij Easy. S pomočjo tega programa so projektirane številne znamenite svetovne membranske in kabelske konstrukcije. Za potrebe diplomske naloge so mi posodili omenjeni program in mi nudili sprotne tehnične pomoči ob raznih nastalih težavah pri usvajanju programa. Možnost naučiti se uporabe programa Easy in samostojno načrtovati razne realne primere konstrukcij sta me še dodatno motivirala za izbiro te teme.

Podjetje Technet mi je tudi omogočilo udeležbo konference Textile Roofs 2011 v Berlinu. Konferenca, namenjena predstavitvi novih znanj in novih dosežkov na področju membranskih konstrukcij. V treh dneh predavanj in delavnic sem se imel možnost družiti in pogovarjati s številnimi ljudmi (iz 16ih svetovnih nacij), ki se profesionalno ukvarjajo z membranskimi konstrukcijami (proizvajalci membran, arhitekti, gradbeni inženirji ter postavljalci in izdelovalci konstrukcij). Ta

izkušnja je samo še utrdila mojo željo po poglobljenem znanju o prednapetih membranskih konstrukcijah.

1.3 Zgradba diplomske naloge

Diplomska naloga je sestavljena iz dveh delov. Prvi del, ki obsega poglavja od 2 do 8, je teoretično naravnano. Na začetku (v drugem poglavju) se bralec vpelje v svet prednapetih membranskih konstrukcij skozi kratek pregled zgodovine konstrukcij v nategu, ki jih imamo za predhodnike današnjih prednapetih membranskih konstrukcij. Pregled sega od prazgodovine, ko si je človek začel ustvarjati prva bivališča, pa vse do 70ih let prejšnjega stoletja, ko sta se tehnologija in znanje razvilo do te mere, da sta omogočilo nagel razmah prednapetih membranskih konstrukcij. Na koncu poglavja je prikazanih še nekaj različnih sodobnih primerov tovrstnih konstrukcij.

Dvojno ukrivljena oblika in prednapetje dajeta membranam stabilnost ter zmanjšujeta pomike, njihova fleksibilnost pa zmanjšuje napetosti. V tretjem poglavju so na preprost način opisani glavni principi obnašanja prednapetih membranskih konstrukcij. Opisane so tudi njihove osnovne oblike.

V četrtem poglavju so predstavljeni sestavni deli (glavni konstrukcijski elementi) prednapetih membranskih konstrukcije in njihovi materiali. Poudarek je na membrani. Opisane so izdelava, značilnosti ter mehanske in ostale pomembne lastnosti materialov, ki se najpogosteje uporabljajo za membrane. Ostali konstrukcijski elementi in njihovi materiali so obravnavani manj podrobno.

Peto poglavje opisuje laboratorijske preizkuse in postopke s katerimi določamo najpomembnejše mehanske lastnosti membrane. Opisan je laboratorijski natezni preizkus, ki sem ga izvajal na membranah različnih trdnosti in različnih proizvajalcev. Iz rezultatov so jasno vidne značilnosti posameznih membran in razlike med njimi.

Načrtovanje prednapetih membranskih konstrukcij se razlikuje od načrtovanja konvencionalnih konstrukcij. V šestem poglavju so natančno opisane tri najpomembnejše faze v procesu načrtovanja: iskanje oblike, statična analiza in določitev krojev membrane. Opisane so različne metode za iskanje oblike, še posebej podrobno je opisana metoda gostote sil. Pri statični analizi prednapetih membranskih konstrukcij so predstavljene značilne obtežbe ter različni postopki analize. Podrobno je predstavljen postopek analize za računalniške modele iz linijskih elementov. Predstavljeni so tudi povzetki različnih svetovnih standardov in priporočil za dimenzioniranje prednapetih membran. Membrane je potrebno skrojiti iz manjših kosov. Razpored in oblika krojev močno vpliva na obnašanje membrane, zato jih je treba pazljivo določiti. Opisane so pomembne značilnosti v postopku določanja krojev.

Sedmo poglavje je namenjeno značilnim spojem med membrano in ostalo konstrukcijo. Spoji so zelo pomemben del membranske konstrukcije, saj morajo omogočati fleksibilno obnašanje in prenašanje obremenitve iz membrane v ostale dele konstrukcije. Opisana je zgradba različnih značilnih spojev na robovih in v ogliščih membrane.

Ko imamo izdelane načrte za prednapeto membransko konstrukcijo, lahko začnemo z njeno gradnjo. Večina konstrukcijskih elementov je prefabriciranih in nato sestavljenih na gradbišču. Osmo poglavje predstavi izdelavo membrane. Izdelava ostalih komponent, ki so značilne tudi za konvencionalne konstrukcije, pa ni podrobneje obravnavana. Predstavljena je tudi oprema, ki se uporablja pri postavitvi, postopek priprave in dvigovanja različnih konstrukcijskih elementov ter postopek vnašanja prednapetja v membrano. Na koncu so opisani še možni načini kontrole napetosti in sil v konstrukciji.

Drugi del diplomske naloge obsega deveto poglavje in je bolj praktično naravnano. Tu je predstavljen celoten postopek načrtovanja treh primerov. Primeri so izbrani tako, da so kar najbolj raznovrstni po obliki, materialu in lokaciji. Za vsak posamezen primer je s programom Easy (ki sem ga posebej za izdelavo diplomske naloge dobil na posodo od podjetja Technet iz Stuttgarta) izveden postopek iskanja oblike, statične analize in določitve krojev. Dimenzionirani so osnovni konstrukcijski elementi (membrana, kabli, podporna konstrukcija) ter predlagani možni detajli in postopek postavitve.

2 ZGODOVINSKI PREGLED

Predhodniki modernih prednapetih membranskih konstrukcij so razne šotorske konstrukcije, ki jih človeštvo uporablja že precej tisočletij. Naši predniki so gradili preproste šotore že dolgo preden so začeli graditi bivališča iz togih materialov. Bili so idealni za nomadska ljudstva, saj so zaradi preproste in hitre postavitve in razstavitve omogočali neprestane selitve. Sprva so bili šotori prekriti z živalskimi kožami, kasneje pa s tkaninami, spletenimi iz živalske dlake. Po različnih delih sveta so se razvili različni tipi šotorov.

2.1 Šotori, kot prve membranske konstrukcije

Tuaregi v zahodni Sahari ter Tataři in Mongoli iz srednje Azije in Mongolije so gradili podobna bivališča. Iz ločno ukrivljenih palic so naredili okvir, ki so ga nato obložili z živalskimi kožami. Število palic je bilo zmanjšano na minimum, da so bili kar najbolj mobilni. Kot zanimivost naj omenim, da je takšne šotore uporabljal slavni mongolski vladar Džingiskan na svojih osvajalskih pohodih. Ljudstva, ki so živela na mrzlih severnih območjih Sibirije, Laponske, Islandije in Aljaske so za gradnjo bivališč uporabljala kar kosti in kožuhe živali, ki so jim sledili in jih lovili za preživetje (Berger, 1996).

Ameriški Indijanci so uporabljali znamenite tipije (slika 1 levo). Najprej so iz treh malo pod vrhom skupaj zvezanih kolov tvorili osnovni okvir, nato pa nanj naslonili ostale palice, da so dobili stožčasto obliko. Na privetni strani je bil stožec položnejši. Okvir so ovili v sešite živalske kože ali platno. Ovoj je bil polkrožne oblike, da se je lepo prilegal stožčasti obliki. Znotraj šotora so napeli še eno plast in s tem tvorili vmesni izolacijski prostor, poleg tega se je dalo kontrolirati bivalne razmere še z dviganjem spodnjega in odprtjem zgornjega roba zunanega ovoja, kar je omogočilo kroženje zraka. Pri selitvah so dolge kole zvezali v snope, katerih lažji konec so naložili na pse ali konje, drugi konec pa se je vlekel po tleh. Kljub preprosti in relativno lahki konstrukciji, pa je bila selitev naporno in nadležno delo (Berger, 1996).

Nomadska plemena bližnjega vzhoda in severne Afrike, ki so živela v aridnih območjih, so se bila primorana pogosto seliti in premagovati velike razdalje, zato so razvili poseben tip šotora, t. i. črni šotor (slika 1 desno), ki je izredno lahek in se ga je dalo postaviti v nekaj minutah. Palice so na vrhu povezali z vrvmi in čez njih položili blago. Blago so sešili iz dolgih pravokotnih kosov tkanine. Te so stkali iz živalske dlake, od tu tudi značilna temna barva. Ves sestav so nato dvignili, da je dobil zeleno obliko. Palice so bile na robu in v središču šotora, z vrvmi pa so jih stabilizirali v tla. Na koncu so še napeli krovno blago in ga zasidrali, da je bilo valovanje ob močnem vetru manjše. Ti šotori so dosegali

razpone do 10 m, trajnost blaga pa je bila približno 5 let. Ta konstrukcijski princip je še najbližji današnjim modernim prednapetim membranskim konstrukcijam (Bechthold, 2008).



Slika 1: Levo: Ameriški tipiji (Curtis, 1908); Desno: Črni šotor (Moore, 2012)

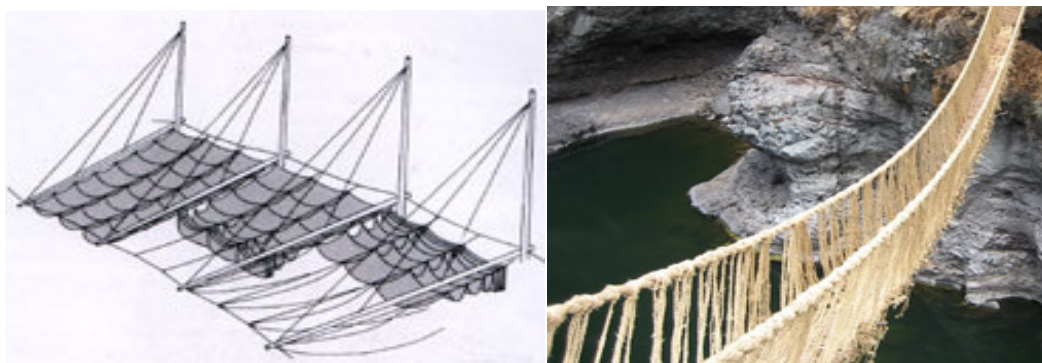
Kasneje so se ljudje ustalili in se začeli ukvarjati s poljedelstvom in obrtništvom. Hiše, vasi in mesta so gradili iz trdnejših materialov, kot so les, opeka in kamen, medtem ko so imeli šotori sekundaren pomen. Uporabljali so jih začasne objekte in preprosta nadkritja. Vojaki so jih na svojih pohodih uporabljali še dolga stoletja; uporabljajo jih še danes. Za prenočevanje so jih pridoma uporabljali tudi romarji in umetniki na svojih potovanjih. Ti šotori so ohranili svojo izvorno obliko. Njihova površina ni postala ukrivljena in konstrukcijsko niso napredovali.

Jadra pri plovilih so predstavljala pomembno tehnološko uporabo tkanin. Pomorščaki so hitro spoznali, da je plovilo hitrejše, če je jadro ukrivljene oblike. Hkrati so izpopolnili tudi mehanizem za dviganje in spuščanje jader. Rimljani so podoben mehanizem uporabili za nadkritje velikih aren, da so bili gledalci zaščiteni pred soncem (slika 2 levo). Jambori so se raztezati v horizontalni smeri, vpeti so bili v kamnite stene po obodu amfiteatra. Prefinjen sistem vrvi in škripccev, s katerim so upravljali upokojeni mornarji, je omogočal raztezanje in zlaganje platnene strehe. To je bila verjetno prva uporaba tkanin na trajnih objektih, vsaj v takšnem obsegu (Berger, 1996).

Pomemben mejnik predstavljajo tudi cirkuški šotori, ki so se pojavili v 19. stoletju. Te velike platnene konstrukcije so cirkusantom omogočale mobilnost, hkrati pa velik pokrit prostor za nastope. Tradicija cirkuških šotorov je še vedno prisotna. Ti šotori imajo več jamborov (navadno so to paličja) na katerih visijo obroči, na teh pa je pritrjeno platno, ki se v stožčasti obliki spušča proti tlam. Platno je pritrjeno na tla z vrvmi, spodnji robovi pa so privzdignjeni z železnimi drogovi. Na koncu še na te robne droge ovijejo v platno, da je notranjost povsem zaprta (Drew, 2008).

2.2 Viseči mostovi, mreže kablov in pnevmatske konstrukcije

Pri zgoraj omenjenih konstrukcijah je bil zunanji ovoj iz kož ali tkanine uporabljen, ker je zaradi majhne teže omogočal mobilnost, a hkrati tudi ponujal zadostno zaščito pred različnimi vplivi. Misel na nateg, kot na učinkovit način prenosa obtežbe, tu ni bila bistvena, kar pa ne velja za viseče mostove. Moderne viseče mostove z visokimi piloni so začeli znanstveno raziskovati in graditi v začetku 19. stoletja, toda preproste in učinkovite viseče mostove so gradili že nekaj tisoč let nazaj na daljnem vzhodu in Južni Ameriki (slika 2 desno). Uporabljali so vrvi spletene iz drevesnih vlaken, npr. iz bambusa, ki je bil močan in široko dostopen. Vrvi so zasidrali na obeh straneh rečne doline ali gorske soteske. Preprosti mostovi so imeli le nekaj visečih vrvi po katerih so ljudje drseli na drugo stran, pomembnejši pa so imeli pohodno površino, narejeno iz desk položenih na vzporedne vrvi. Ti preprosti sistemi so dosegali velike razpone, po nadomestitvi vrvi s kovanimi verigami pa razpone čez 130 m (Berger, 1996).

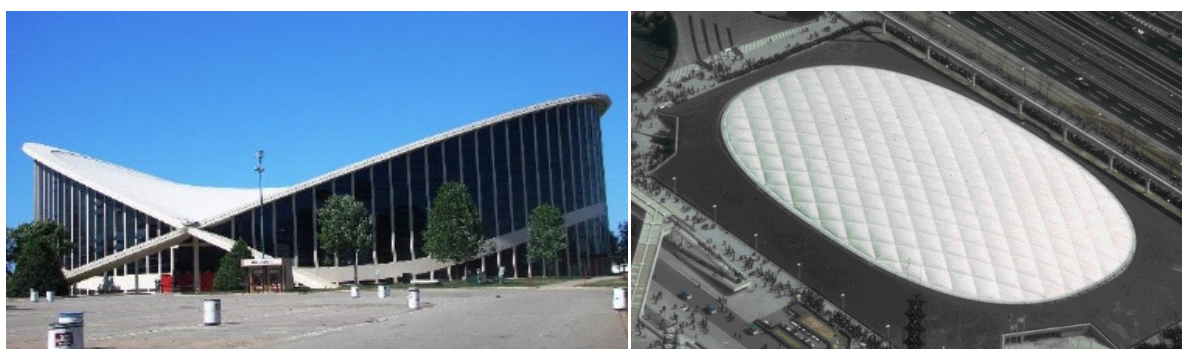


Slika 2: Levo: Premična platnena streha nad rimskimi amfiteatri (Berger, 1996); Desno: Vrvni viseči most (Q'eshwachaka ..., 2012)

Prvi moderni viseči most razpona 177 m so po načrtih Thomasa Telforda zgradili v Walesu leta 1826. Za natezni lok je uporabil verigo iz ploščatih kosov železa, med seboj spojenih z zatiči. To tehnologijo so uporabljali čez celotno 19. stoletje do izuma kablov iz visokotrčnih jekel. To jeklo je bilo do 10-krat močnejše od kovanega, poleg tega pa ni bilo več stikov med členi verige, ki so predstavljali šibke točke (Berger, 1996). Dva izmed množice izjemnih visečih mostov sta Brooklyn Bridge (John Roebling, 1883, razpon 486 m) in Golden Gate Bridge (Joseph B. Strauss, 1937, razpon 1280 m), oba sta bila svoj čas prva na svetu po razponu. Trenutno največji razpon ima japonski most Akashi-Kaikyō Bridge, in sicer 1991 m (Suspension bridge, 2011). Pri gradnji stavb se tehnologija visečih mostov ni direktno uveljavila. Eno redkih takih stavb je leta 1962 sprojektiral inženir Pier Luigi Nervi v Mantui (Italija). Šlo je za obrat proizvodnje papirja, ki pa je bil bolj podoben mostu kot stavbi (Berger, 1996). Po 2. sv. vojni je ves svet zajel val novega zagona in gospodarskega razcveta, kar se je poznalo tudi pri gradnji objektov. Predvsem v 50ih in 60ih letih prejšnjega stoletja so veliko vlagali v raziskave novih konstrukcijskih sistemov, med katerimi so bile tudi konstrukcije v nategu. Prvi večji objekt z dvojno

ukrivljeno streho iz mreže jeklenih kablov je bila Raleigh Arena v Severni Karolini (slika 3 levo). Mrežo so prekrivali jekleni paneli, obešena pa je bila na dva velika nasprotno nagnjena betonska loka. Zgrajena je bila leta 1952 po ideji arhitekta Matthewa Novickega in inženirski podpori biroja Severud Associates. Ta znani projektivni biro je dal kasneje pečat številnih konstrukcijam v nategu, ena izmed teh je tudi dvorana Yale Hockey Rink, zgrajena leta 1958. Jekleni mreži, vsaka na svoji strani, visita z velikega betonskega loka do betonskih obodnih sten. Mrežna konstrukcija je pokrita z lesenim slojem. Podobno konstrukcijo je za olimpijske igre v Tokiu leta 1964 oblikoval Kenzo Tange za pokritje plavalnega bazena in košarkarske dvorane. Med viseče kable, podprte z visokimi betonskimi oporniki, in spodnji betonski obroč je obesil elegantno ukrivljeno streho. Ta je poltoga, sestavljajo jo ukrivljeni jekleni nosilci na katere so privarjeni strešni paneli (Berger, 1996).

Razvoj kemične industrije v začetku 20. stoletja in s tem močnih, trajnih in zrakotesnih umetnih tkanin in folij je omogočil velik razmah membranskih konstrukcij. V 2. sv. vojni so Američani za učinkovito vremensko zaščito radarskih sistemov uporabljali zračno (z nadtlakom) podprte membranske kupole. Membrana je bila stkana iz polimernih vlaken, obdanih z zaščitno plastjo iz sintetičnih mas, kar je omogočalo nemoten prehod radarskih žarkov. V 60ih letih se je začelo zračno podprte membrane (t. i. pnevmatske konstrukcije) uporabljati tudi za civilne namene. Ena izmed prvih trajnih membranskih konstrukcij je bila streha ameriškega paviljona na svetovni razstavi v Osaki leta 1970 (slika 3 desno). Nizkoprofilna kupola arhitekta in inženirja Davida Geigerja je imela membrano ojačano s kabli. Gradnja je bila veliko hitrejša in cenejša od dotedanjih kupol. Ta objekt je navdušil številne inženirje, ki so ta koncept kasneje uporabili za prekrivanje mnogih velikih objektov (Bechthold, 2008). Pri nas se pnevmatske konstrukcije množično uporabljajo za nadkritje teniških igrišč.



Slika 3: Levo: Raleigh Arena v Severni Karolini (J. S. Dorton ..., 2012); Desno: Ameriški paviljon – EXPO 1970 v Osaki (Geiger, 1975)

2.3 Od prednapetih kabelskih do prednapetih membranskih konstrukcij

Medtem ko so bile raziskave in začetki pnevmatskih membranskih konstrukcij vezani na ZDA, so bile prednapete membranske konstrukcije v domeni Evrope, predvsem Nemčije. Začetnik modernih

prednapetih membranskih konstrukcij je Berlinčan Otto Frei. Kot mlad kiparski vajenec je bil vpoklican v vojsko ter postal vojni pilot. Na koncu vojne je bil tudi zaprt v francoskem ujetniškem taboru, nato pa je odšel v Ameriko, kjer je končal študij arhitekture. Podprt z znanjem letalskega inženirstva se je že zgodaj navdušil nad prednapetimi konstrukcijami. Ob obisku Severudove pisarne v New Yorku ga je še posebej navdušil projekt Raleigh Arene. Prva njegova prava prednapeta membranska konstrukcija je bil paviljon za vrtno razstavo leta 1955 v Kasslu (slika 4 levo), objekt je bil deležen velike pozornosti. Leta 1964 je ustanovil Inštitut za lahke konstrukcije v okviru stuttgartske univerze, ki ga je vodil vse do upokojitve. Delal je številne eksperimente in objavil mnogo knjig in strokovnih člankov, ki so še vedno osnovna literatura za inženirje in arhitekte. Iznal je metodo iskanja minimalne oblike z milnico. Kot predstavnik inštituta je imel možnost sodelovati pri številnih dejanskih projektih. Prva velika konstrukcija iz mreže prednapetih kablov je bil nemški paviljon na svetovni razstavi 1967 v Montrealu. Na visoke jambore obešena mrežna konstrukcija je pokrivala površino 8000m². Pod primarno nosilno mrežo je bila pritrjena membrana, ki ni imela nosilne funkcije, saj tedanji materiali tega niso omogočali. Šibka točka te konstrukcije je bilo nabiranje snega med mrežo. Po petih letih se je konstrukcija zrušila v snežni nevihti (Berger, 1996).

Freijeva največja mojstrovina in vrhunec prednapetih kabelskih konstrukcij je olimpijski kompleks v Münchnu iz leta 1972 (slika 4 desno). Ta objekt je bil simbol nove, demokratične Nemčije. Jekleno mrežno ukrivljeno konstrukcijo podpirajo visoki jambori, kratki »leteči« oporniki, podprti s kabli, in dolg ukrivljen natezni robni kabel. Konstrukcija je pokrita s ploščami iz akrilnega stekla (Berger, 1996). Projekt je spodbudil raziskave novih metod računalniškega iskanja oblike in analize prednapetih kabelskih in prednapetih membranskih konstrukcij. Tedaj so bili postavljeni temelji današnje programske opreme za projektiranje prednapetih membranskih konstrukcij (Huntington, 2004).



Slika 4: Levo: Paviljon za vrtno razstavo (Frei, 1955); Desno: Olimpijski park v Münchnu (München ..., 1999)

2.4 Primeri izjemnih sodobnih prednapetih membranskih konstrukcij

2.4.1 Strehe na letališčih



Slika 5: Letališče Jeddah (Hajj Terminal), Savdska Arabija (The King ..., 2012; Berger, 1996)



Slika 6: Letališče Denver, Kolorado, ZDA (Denver ..., 2012; Schierle, 2009)



Slika 7: Letališče Suvarnabhumi Bangkok, Kitajska (Hightex, 2012; Why ..., 2010)

2.4.2 Strehe na štabionih



Slika 8: Mercedes – Benz Arena, Stuttgart, Nemčija (World ..., 2012; Gottlieb ..., 2005)



Slika 9: Stadion kralja Fahda, Rijad, Savdska Arabija (Husain, 2008; King ..., 2012)

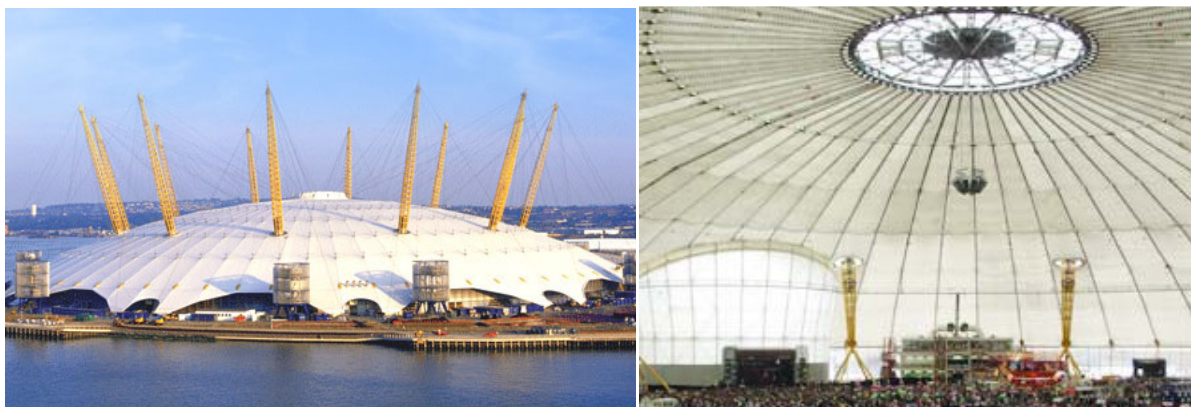


Slika 10: Olimpijski stadion, Kijev, Ukrajina (GMP, 2012)

2.4.3 Strehe razstavišč



Slika 11: Razstavišče, Milano, Italija (Fiera ..., 2012)



Slika 12: O2 Arena, London, Velika Britanija (O2 Arena, 2012; Overview ..., 2012)



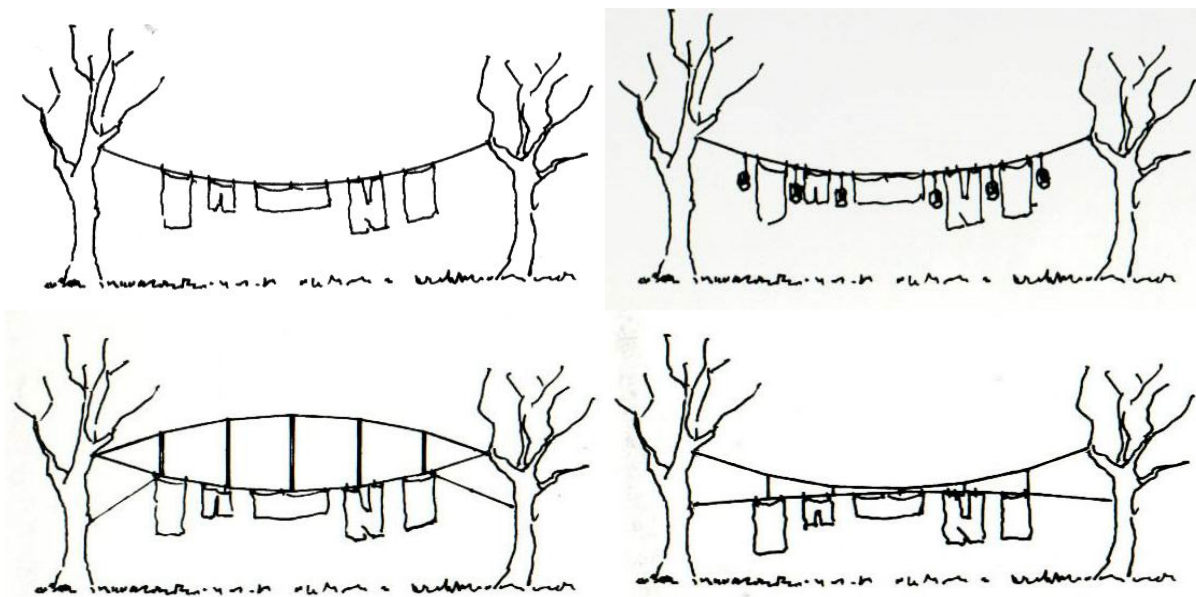
Slika 13: Kitajski paviljon – EXPO 2010, Šanghaj, Kitajska (EXPO ..., 2010; Zou, 2010)

3 OSNOVNI PRINCIPI OBNAŠANJA IN OBLIKOVANJA PREDNAPETIH MEMBRAN

Poznavanje osnovnih principov obnašanja in oblikovanja prednapetih membranskih konstrukcij je poglobitnega pomena za njihovo zanesljivo in ekonomično projektiranje. Pri razmisleku o njihovem obnašanju si pomagajmo na naslednji način. Zamislimo si, da so niti membranske tkanine zelo široki trakovi (npr. nekaj decimetrov), nato pa vsak trak »pretvorimo« v vrv ali kabel. Dobimo mrežo kablov. Kaj hitro lahko ugotovimo, da je osnovni princip delovanja takih kabelskih konstrukcij identičen delovanju membranskih konstrukcij. Osnovni gradnik omenjenih konstrukcij je torej nit ali kabel, za katera je jasno, da ju ne moremo tlačiti, temveč ju lahko le nategujemo. Nit in kabel prav tako tudi nimata upogibne togosti. Obtežbo izven svoje ravnine lahko prevzameta le, če sta v nategu, pri tem pa se dodatno ukrivita.

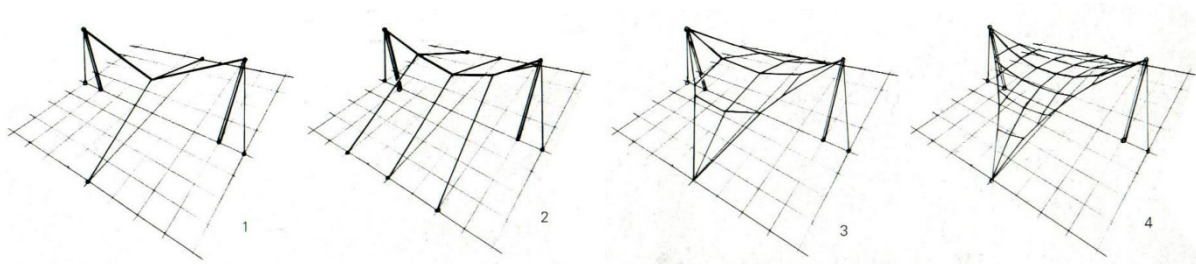
3.1 Delovanje kabelskih konstrukcij in podobnost s prednapeto membrano

Poglejmo si preprost primer vrvi za obešanje perila, ki ga v svoji knjigi predstavi Berger (1996). Na vrv, ki je na obeh straneh pritrjena, obesimo perilo. Pod težo perila se vrv upogne in ukrivi. Vse je lepo in prav, dokler ne zapiha močan veter. Tedaj vrv s perilom valovi, ob konstantnem močnem vetru pa se usloči. Kaj lahko storimo, da stabiliziramo obnašanje vrvi? Prva rešitev bi bila, da na vrv obesimo dodatne obteži, da bi bila celotna teža večja kot nasprotno delujoča obtežba vetra. Drugo rešitev bi predstavljala dodatna zgornja nasprotno upognjena vrv, ki bi glavno vrv s (tlačnimi) palicami potiskala navzdol. Tu se pojavi problem zvrnitve celotnega sklopa iz svoje ravnine, zato bi ga bilo potrebno dodatno stabilizirati z vrvmi. Tretja rešitev, ki je hkrati tudi najelegantnejša, pa je prav tako dodatna nasprotno upognjena vrv, vendar tokrat pod glavno, medsebojno pa bi bile povezane z vrvmi. V tem primeru ni pojava nestabilnosti. Če vrv za perilo valovi v vetru ni nič narobe, kar pa ne velja za kable gradbenih konstrukcij. Pri teh je treba preprečiti vsakršne nekontrolirane deformacije in vibracije. Prva zgoraj omenjena rešitev se v gradbeni praksi uporablja pri visečih mostovih. Lastna teža voziščne ploskve je večja od dvizne obtežbe vetra, zato je v glavnih kabliah vedno nateg. Pri membranskih konstrukcijah se uporablja rešitev z nasprotno ukrivljenostjo, tu imamo podobnost s tretjo zgoraj omenjeno rešitvijo. Razlika je le v tem, da nasprotno upognjene niti membranske tkanine ne ležijo v isti ravnini, temveč so pravokotne med seboj (slika 14).



Slika 14: Različni načini stabilizacije vrvi za obešanje perila (Berger, 1996)

Primer enostavne mrežne kabelske prednapete konstrukcije dobro prikaže osnovni princip obnašanja prednapetih membran (Berger, 1996). Imamo glavni kabel, ki ga podpirata dva jambora in je na robovih sidran v tla. Preko tega kabla na sredini, v pravokotni smeri, napnemo drugi kabel, ki ga potem na obeh koncih sidramo v tla. V presečišču obeh kablov so sile v kablju uravnotežene. Kabla sta napeta, čeprav še nismo uvedli zunanjih vplivov. Če na presečiščno točko deluje točkovna obtežba navpično navzdol, se bo ta premaknila navzdol, sila v visečem kablju se bo povečala, v stoječem pa zmanjšala. V primeru, da uporabimo višje jambore, se bo tudi presečišče prestavilo, sile v obeh kablju pa povečale. Torej za določene robne pogoje obstaja natanko ena pozicija presečiščne točke, da je sistem dveh kablov v ravnotežju. Z večanjem števila kablov v obeh smereh dobimo vedno več takšnih ravnotežnih točk. Če sistem zgoščujemo, med podprtimi točkami pa napnemo robne kable, dobimo najpreprostejšo prednapeto kabelsko konstrukcijo, ki jo lahko primerjamo s prednapeto membransko konstrukcijo. Torej je v vsaki točki pravilno projektirane prednapete membranske konstrukcije doseženo ravnotežje sil prednapetja. Iz gornjega primera je razvidno, da sta oblika (ukrivljenost) in prednapetje medsebojno povezana in odvisna (slika 15).



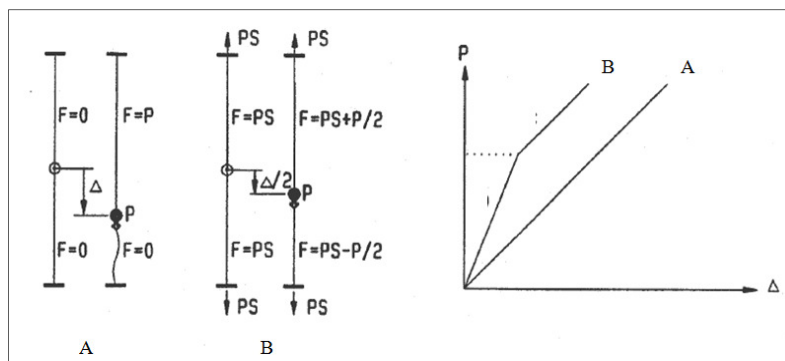
Slika 15: Evolucija prednapete membranske konstrukcije (Berger, 1996)

3.2 Prednapetje v membranah

Površina prednapete membrane je v eni smeri konkavno ukrivljena, v drugi (pravokotni) smeri pa konveksno ukrivljena. Pravimo, da ima membrana antiklastično obliko. V prvi smeri niti membrane tvorijo viseče krivulje, pravokotne niti pa stoječe krivulje. Viseče niti prevzemajo obtežbe v smeri gravitacije. Najpomembnejša obtežba te vrste je sneg, lastna teža pa je zanemarljiva. Pod snegom se napetosti v visečih nitih povečajo, v pravokotnih stoječih pa zmanjšajo. Stoječe niti delujejo kot stabilizatorji, zato je dobro, da ves čas ohranjajo vsaj minimalen nateg. Pri obtežbi vetra, ki deluje v nasprotni smeri, se vlogi zamenjata. Tu obtežbo prevzamejo stoječe niti, viseče pa jih bočno stabilizirajo. Iz te stabilizacijske vloge vidimo, kako pomemben faktor pri obravnavanih konstrukcijah je prednapetje.

Funkcija prednapetja v membranah je v zmanjševanje deformacij membrane in v zagotavljanje njene stabilnosti. Učinek prednapetja si pogledjmo na idealiziranem modelu membranske konstrukcije – na obeh koncih pritrjenem elastičnem traku, ki ga predstavlja Schierle in Yin (1993). Zunanja obtežba membranske konstrukcije je modelirana kot točkovna obtežba P na sredini traku. Polovica traku predstavlja niti z konkavno ukrivljenostjo, druga polovica pa niti z nasprotno, konveksno ukrivljenostjo. V primeru (A) je trak na začetku nenapet. Ob nastopu obtežbe se sredinska točka pomakne navzdol. Vso obtežbo prevzame zgornji del elastičnega traku, spodnji del ostane nenapet in se naguba. Sistem postane nestabilen. V drugem primeru (B) trak na začetku prednapnemo. Tokrat se obtežba enakomerno porazdeli na oba dela traku. Vsaka polovica traku prevzame pol obtežbe, zato je pomik srednje točke za polovico manjši glede na prvi primer. V zgornji polovici traku se sili prednapetja prišteva polovica sile zunanje obtežbe, v spodnji pa ravno obratno. Z večanjem obtežbe se prednapetje zmanjšuje. Takšno obnašanje traja vse dokler obtežba v spodnjem delu ne izniči prednapetja. Takrat celoten sistem preide v nestabilno stanje, identično prvemu primeru. Togost sistema se prepolovi; pomik sredinske točke z večanjem obtežbe raste s podvojeno hitrostjo glede na prejšnje stanje (slika 16).

Membranska konstrukcija brez prednapetja bi navzdol delujoče obtežbe prevzela le z visečimi nitmi, medtem ko bi v pravokotni smeri membrana ostala nenapeta in bi se nagubala. V primeru začetnega prednapetja bi se membrana mnogo bolje obnašala. Membrana bi obtežbo prevzela z nitmi v obeh smereh, konstrukcija bi ostala brez gub, deformacije pa bi bile pol manjše. Ob izgubi prednapetja bi se membrana gubala, zato je potrebno membrano na začetku dovolj prednapeti, da ob kritičnih obtežnih kombinacijah povsod ali vsaj v večjem delu ohrani vsaj minimalno natezno napetost v obeh smereh, ter da niso deformacije membrane prevelike. Pri določanju prednapetja moramo upoštevati tehnične in ekonomske omejitve, ter najti optimalno rešitev.



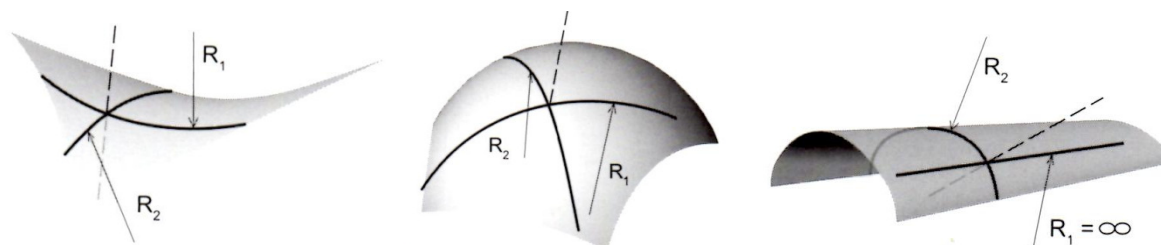
Slika 16: Idealiziran model prednapete in nenapete membranske konstrukcije (Schierle in sod., 1993)

3.3 Igra med obliko in prednapetjem

Omenil sem že, da imajo prednapete membrane antiklastično površino. Kaj to pomeni? Zamislimo si normalo v poljubni točki na površini membrane. Skozi njo lahko položimo neskončno število ravnin in presečišče vsake izmed njih s površino membrane je neka krivulja, ki gre skozi izbrano točko. Med vsemi krivuljami obstajata dve, ki imata v izbrani točki ekstremna radija ukrivljenosti (R_1 in R_2). To sta glavna radija ukrivljenosti, ki sta povezana z glavnimi ukrivljenostmi površine v tej točki. Mera ukrivljenost ploskve ali Gaussova ukrivljenost ploskve (po Karlu Friedrichu Gaussu, ki se je ukvarjal s teorijo ukrivljenih ploskev) v določeni točki ploskve je produkt glavnih ukrivljenosti:

$$K = K_1 * K_2 = \frac{1}{R_1} * \frac{1}{R_2} \quad (1)$$

Antiklastične površine imajo v vsaki točki negativno Gaussovo ukrivljenost. Torej imata glavna radija nasprotni predznak. Površine s pozitivno Gaussovo ukrivljenostjo so sinklastične (npr. pnevmatske membrane), enojno ukrivljene površine pa imajo Gaussovo ukrivljenost nič (slika 17) (Bechthold, 2008).



Slika 17: Antiklastična, sinklastična ter enojno ukrivljena oblika (Bechthold, 2008)

Za stabilnost membrane sta najpomembnejša njena oblika in velikost prednapetja. Obliko prednapete membrane v poljubni točki opišemo z glavnima radijema ukrivljenosti v tej točki. Pri antiklastičnih

površinah sta ta radija nasprotno usmerjena. Membrana v prednapeti membranski konstrukciji mora biti oblikovana tako, da se niti membrane ujemajo z glavnima smerema ukrivljenosti. Medsebojna odvisnost oblike membrane in njenega prednapetja v obeh glavnih smereh je razvidna iz osnovne enačbe ravnovesja prednapetih antiklastičnih membran (Wikipedia, 2011):

$$\frac{n_1}{R_1} + \frac{n_2}{R_2} = 0 \quad (2)$$

V primeru enakega nivoja prednapetja v obeh smereh ($n_1 = n_2$), je membrana v obeh smereh enako ukrivljena ($R_1 = R_2$). Povečanje prednapetja v eni smeri ima za posledico povečanje radija oz. manjšo ukrivljenost v tej isti smeri. Velja tudi obratno, torej sprememba ukrivljenosti v eni smeri, npr. zaradi pomika podpor, povzroči povečanje napetosti v tej smeri. V primeru, ko ni zunanje obtežbe, so pomembna le razmerja med glavnimi ukrivljenostmi oz. prednapetjem v glavnih smereh. Ob vpeljavi površinske zunanje obtežbe (w) pa postanejo pomembne absolutne vrednosti. Velja naslednja enačba (Wikipedia, 2011):

$$w = \frac{n_1}{R_1} + \frac{n_2}{R_2} \quad (3)$$

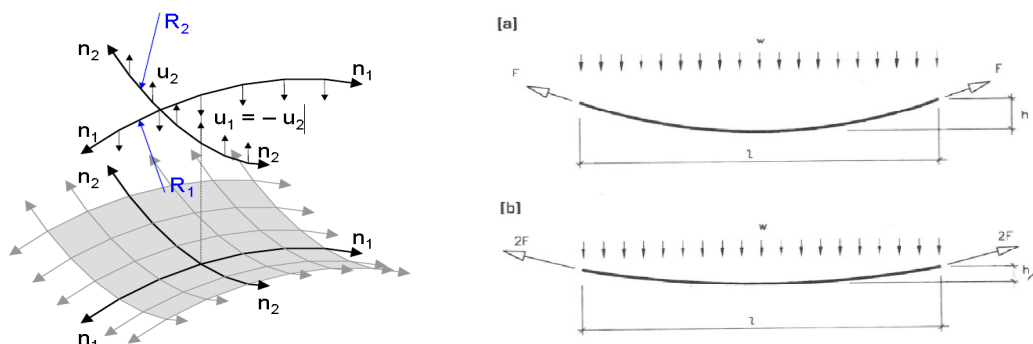
Večja ko je ukrivljenost oz. manjši ko je ukrivljenostni radij ter večje ko je prednapetje, večja bo nosilnost konstrukcije. Tudi površinska togost prednapete membranske konstrukcije je v pretežni meri odvisna od istih parametrov (ukrivljenosti in prednapetja). Evropski vodič za prednapete membranske konstrukcije (Forster in sod., 2004) navaja spodnjo enačbo za površinsko togost membrane:

$$D \approx \frac{n_1}{R_1} + \frac{n_2}{R_2} \quad (4)$$

Dobro oblikovane prednapete membrane dosegajo vrednosti $D > 0,3 \text{ kN/m}^2$. Pri vrednosti $D < 0,15 \text{ kN/m}^2$ oz. $D < 0,2 \text{ kN/m}^2$ (za večja območja) je velika možnost pojava občutljivega obnašanja (valovanje, gubanje) ob obtežbi vetra.

Pomemben vidik obnašanja, ki ga mora upoštevati projektant prednapetih membranskih konstrukcij, je njihovo prilagodljivo obnašanje ob obremenitvah. Pri delovanju zunanje obtežbe se membrana dodatno ukrivi v smeri obtežbe, s tem pa se poveča njena nosilnost in s tem varnost. To izhaja iz dejstva, da je natezna sila v kablju (ali membrani) odvisna od ukrivljenosti. Kabel, ki je 2-krat manj povešen, ima približno 2-krat večjo natezno silo (če ne upoštevamo osne deformacije kabla, $F \approx wl^2/8h$) (slika 18 desno). Torej, večja ko je ukrivljenost, bolj varna je konstrukcija. To dejstvo je pomembno imeti v mislih tudi pri podporni konstrukciji prednapete membrane. Deformacija oz.

deformacija podporne konstrukcije, ki bo nastala zaradi povečanih napetosti v membrani ob zunanjih obtežbah, bo povečala ukrivljenost membrane. To bo ugodno vplivalo na zmanjšanje membranskih napetosti in s tem tudi na zmanjšanje notranjih količin v podporni konstrukciji.



Slika 18: Levo: Infinitezimalen del antiklastične površine prednapete membrane (Wagner, 2011); Desno: Sile v ukrivljenem kablu (Huntington, 2004)

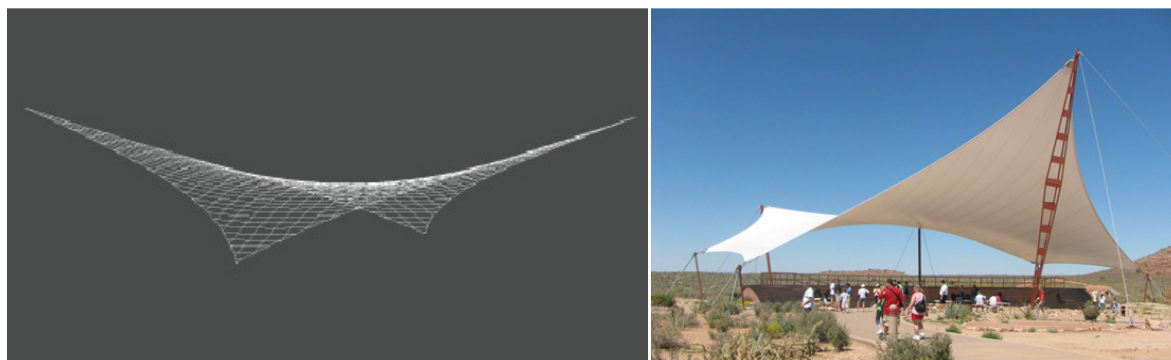
3.4. Osnovne oblike prednapetih membran

Obliko prednapete membranske konstrukcije prvenstveno določamo z izbiro in pozicioniranjem podpor, nato pa so možne še dodatne modifikacije z določanjem razmerja prednapetij v glavnih smereh membrane. Stabilnost teh konstrukcij je močno odvisna od oblike, zato je to najpomembnejši korak v procesu načrtovanja. Treba je poznati obnašanje in osnovne principe prednapetih membranskih konstrukcij. Pozorni moramo biti na primerne proporce. Ena dimenzija ne sme biti veliko večja ali veliko manjša od ostalih ali prednapetje v eni smeri ne sme močno odstopati od prednapetja v drugi smeri, saj konstrukcija ne bo ne učinkovita ne ekonomična. Tudi sama dimenzija objekta je bistvena pri izbiri oblike. Tako so enostavne sedlaste konstrukcije primerne za razpone od 15 m do 20 m, pri večjih pa je že smiselno dodati notranje podpore, npr. kable ali lokove (Forster in sod., 2004). Zelo učinkovit način je analiza že zgrajenih konstrukcij. Njihove oblike lahko uporabimo kot osnovo za izbiro primerne oblike. Na koncu je treba preveriti še ukrivljenosti izbrane opcije. Če imamo velika skoraj ravna območja bo tu problem z odtekanjem vode, poleg tega pa se bodo pojavile velike deformacije in vibracije ob nastopu obtežb. Navadno se izkaže, da so najpreprostejše oblike tudi najefektivnejše.

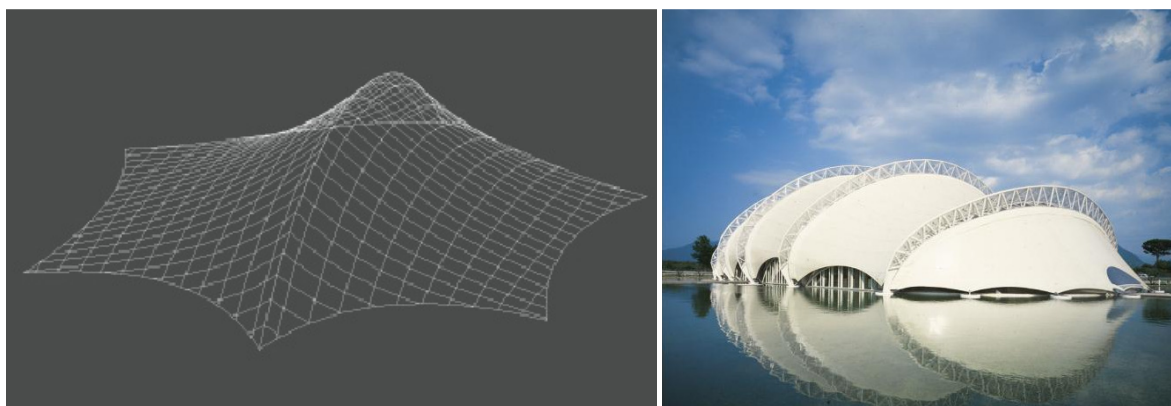
Številne nenavadne in izvirne oblike obstoječih prednapetih membranskih konstrukcij je možno razčleniti na nekaj osnovnih. Torej so vse le kombinacija ene ali večjih osnovnih oblik. Med osnovne oblike spadajo sedlaste, konusne in valovite oblike (Bechthold, 2008). Posebna kategorija, ki jo bom tudi omenil, pa so kupolaste membranske konstrukcije.

3.4.1 Sedlaste membrane

Sedlasto obliko tvorimo z izmenjavanjem visokih in nizkih robnih točk (slika 19) ali tako, da membrano na robu ali v notranjosti podpremo s konveksno ukrivljenim tlačnim elementom (slika 20). Robovi so lahko podprti togo (z elementi, ki morajo prenesti momente in tlačne sile) ali s kabli (Bechthold, 2008). Sedlaste membrane imajo tipično dvojno ukrivljenost, njihova velikost pa je odvisna od višinske razlike med robnimi točkami. Za sedlasto konstrukcijo so potrebne vsaj štiri fiksne robne točke, ki ne ležijo v isti ravnini. Tri točke niso dovolj, saj se med njimi tvori ravna površina. Visoke robne točkovne podpore so lahko pritrjene na obstoječe objekte ali pa se tvorijo s postavitvijo jamborov ali kakšnega drugega podpornega elementa, ki mora biti ali dovolj tog, da prevzame vse nastale sile ali pa je dodatno stabiliziran s kabli, kar je bolj ekonomično. Podobno je pri ločno podprti konstrukciji. Sredinski lok je obremenjen z obeh strani, zato se horizontalni akciji na lok izničita. Bolj problematičen je zunanji lok. Ta mora biti dovolj tog ali pa dodatno stabiliziran s kabli ali dodatno krajno membrano sedlaste oblike. Smer zvarov med kosi membrane praviloma sledi krivuljam z največjo predvideno napetostjo. Torej, če je prevladujoča obtežba sneg, zavzamejo zvari smer visečih krivulj, če pa prevladuje veter, pa smer stoječih krivulj.



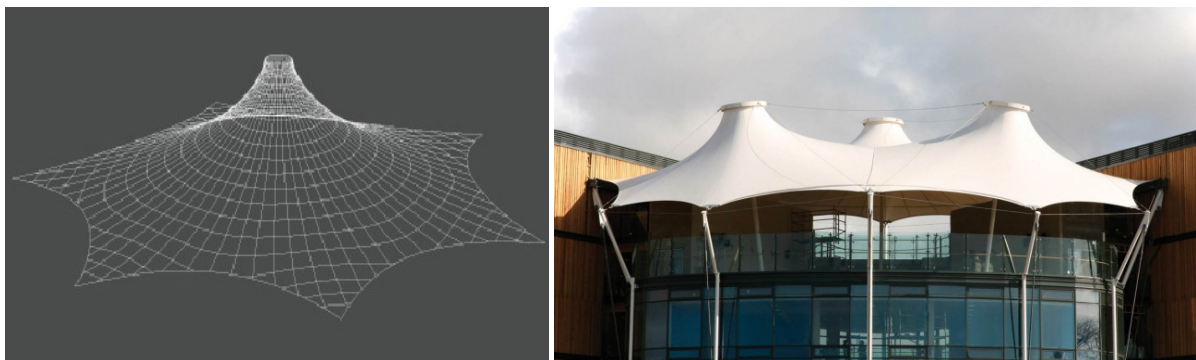
Slika 19: Levo: Model preproste sedlaste konstrukcije (Bechthold, 2008); Desno: Primer preproste sedlaste konstrukcije (Armijos, 2010a)



Slika 20: Levo: Model ločno podprte sedlaste konstrukcije (Bechthold, 2008); Desno: Primer ločno podprte sedlaste konstrukcije (M&G ..., 2012)

3.4.2 Konusne membrane

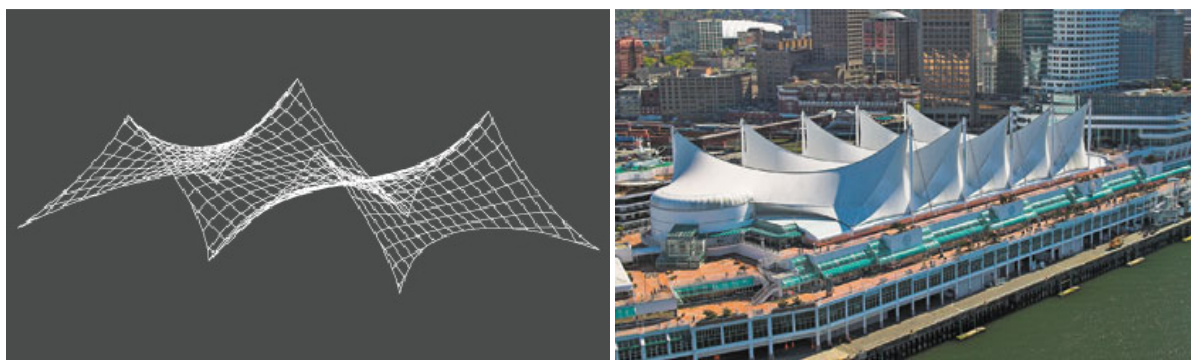
Konusne membrane imajo obodne fiksne točke, običajno v horizontalni ravnini, v sredini membrane pa je ena podporna točka izven te ravnine (slika 21). Ta je lahko višja ali nižja. Gre za zelo pogosto obliko, ki se uporablja za posamične nadstreške, modularne enote ali marele, če pa več konusnih oblik kombiniramo dobimo unikatne atraktivne konstrukcije. Tudi pri tej obliki imamo antiklastično oblikovano površino. Pri navzgor obrnjenih konusnih konstrukcijah viseče krivulje predstavljajo niti, ki potekajo radialno iz sredinske točke, vlogo stoječih krivulj pa horizontalne krožne niti. Za navzdol obrnjene konusne konstrukcije velja ravno obratno. Slednje se pogosto uporabljajo, sploh kot manjši nadstreški, saj je mogoče zelo preprosto urediti odvodnjavanje. Če bi bila celotna membrana sredinsko podprta v eni sami točki, bi to pomenilo ekstremno velike napetosti v membrani. Da bi jih zmanjšali, se v teh visokih oz. nizkih podporah najpogosteje uporabljajo natezni obroči, na katere je membrana pritrjena (možne so tudi druge rešitve, npr. z visečimi kabli). Z zelo preprosto izpeljavo (Huntington, 2004) je možno določiti približni minimalno potrebni radij nateznega obroča $d_t = d_b * (\sin\theta_b / \sin\theta_t)$, kjer je d_t premer notranjega obroča, d_b premer spodnjega dela konstrukcije, θ_t kot med membrano in horizontalo ob notranji podpori ter θ_b kot med membrano in horizontalo na spodnjem robu. Če pa uporabimo manjši obroč, je potrebno membrano v tem delu ojačati z dodatnimi sloji membrane ali pa z radialnimi kabli. Na spodnjih robovih je lahko membrana napeta z robnimi kabli ali pa je pripeta na tog okvir. Najenostavnejši način za podprtje visoke sredinske točke je sredinski jambor, obstajajo pa tudi druge možnosti, kot so lebdeči jambor, na kablích obešen natezni obroč in zunanji tog okvir. Pri konusno oblikovanih membranskih konstrukcijah je ukrivljenost zelo izražena, njihova slaba lastnost pa je velika poraba materiala glede na tlorisno površino in precejšnja energijska poraba pri ogrevanju ali hlajenju velikega volumna zraka pod njimi.



Slika 21: Levo: Model konusne konstrukcije (Bechthold, 2008); Desno: Primer konusne konstrukcije (Giugliano, 2009)

3.4.3 Valovite membrane

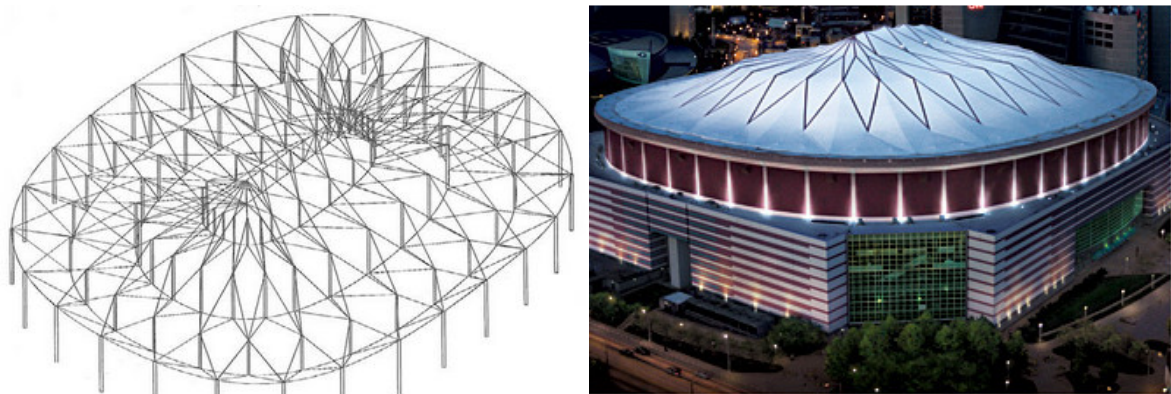
Valovite oblike ali t. i. oblike »greben – dolina« (slika 22) bi lahko imeli za zelo podolgovate sedlaste oblike. Membranske konstrukcije valovite oblike podpirajo vzporedni ali radialni kabli. Izmenjujejo se zgornji ali grebenski in spodnji ali dolinski kabli. Zgornji so ukrivljeni navzdol, torej tvorijo visečo krivuljo. Za spodnje kable pa velja ravno obratno. Ukrivljeni so navzgor in tvorijo stoječo krivuljo. Zgornji kabli prevzemajo gravitacijske obtežbe, spodnji kabli pa navzgor delujoče obtežbe (Bechthold, 2008). Med kabli je napeta membrana. Valovita oblika s svojimi ponavljajočimi se vzorci je zelo primerna za nadkritje podolgovatih ravnih prostorov. Možno je tudi, da namesto enega spodnjega ali zgornjega kabla namestimo dva kabla. Na vsakega je pripet svoj kos membrane, nastali prostor med kabloma pa lahko zasteklamo in dobimo več direktne svetlobe (Bechthold, 2008). Na robovih je lahko membrana podprta s kablom ali pa je pritrjena na tog konstrukcijski element. Zgornji kabli so navadno podprti samo na robovih konstrukcije, lahko pa tudi vmes (npr. z lebdečim jamborom). Na robovih so pritrjeni na visok jambor ali pa na tog okvir. Spodnji kabel je sidran izključno na robovih. Za to uporabljamo jambore ali tog okvir, lahko pa se kabel nadaljuje vse do tal. Pri tem sistemu ne gre za tipično dvojno ukrivljeno membrano. Primarni nosilec obtežbe je kabel, membrana pa predstavlja vmesni polnilni medij. Membrana je minimalno ukrivljena, zato morajo biti razdalje med kabli relativno majhne. Tudi glavni kabli so zelo malo ukrivljeni, zato je treba biti pozoren na ogromne sile v njih. Zvari v membrani navadno potekajo prečno na kable (Bechthold, 2008).



Slika 22: Levo: Model valovite konstrukcije (Bechthold, 2008); Desno: Primer valovite konstrukcije (Canada ... , 2012)

3.4.4 Kupolaste membrane

Na prvi pogled je nemogoče s prednapeto membrano izdelati kupolo, saj ima ta izrazito sinklastično obliko. Skrivnost je v tem, da je globalna oblika res sinklastična, vendar pa so posamezni deli površine tvorijo manjše sedlaste strukture, torej je površina lokalno antiklastična (Bechthold, 2008). Globalno obliko tvorijo radialni prednapeti kabli, ki so podprti tako, da tvorijo obliko kupole. Te glavne kable lahko podpirajo dodatni kabli, ki visijo z visokih jamborov (slika 12), drug način podpiranja pa je s t. i. »tensegrity« sistemom (kombinacija prednapetih kablov in lebdečih jamborov) (slika 23).



Slika 23: Levo: Shema membranske kupole (Sebestyen, 2003); Desno: Primer membranske kupole (Georgia ..., 2012)

4 KONSTRUKCIJSKI DELI IN MATERIALI

Prednapete membranske konstrukcije so sestavljene iz različnih konstrukcijskih elementov, ki jih lahko delimo na toge in fleksibilne ter na linijske in ploskovne. Celotno konstrukcijo lahko razdelimo na togi del in na fleksibilni del. Slednji daje značaj prednapetim membranskim konstrukcijam: to je njihova geometrijska prilagodljivost ob delovanju zunanjih obtežb in zmožnost prevzema obtežb le v nategu. Ti lastnosti omogočata, da so prerezi fleksibilnih elementov optimizirani. Izkoriščenost materiala teh elementov je izjemno visoka.

4.1 Razdelitev konstrukcijskih elementov na fleksibilne in toge

Najbolj karakterističen in viden del prednapetih membranskih konstrukcij je fleksibilna membrana. Gre za izrazito dvodimenzionalen ukrivljen ploskovni konstrukcijski element, saj je debelina tehničnih membran zanemarljiva (približno 1 mm), zato se mehanske materialne lastnosti membran podajajo na meter dolžine.

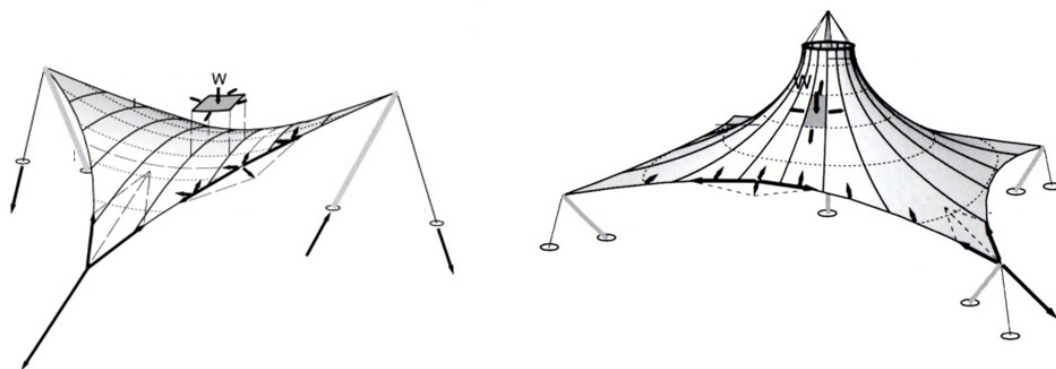
V fleksibilni del konstrukcije štejemo še fleksibilne linijske elemente, kamor spadajo jekleni kabli in tekstilni trakovi. Podobno kot membrana nimajo tlačne ali upogibne togosti, torej lahko nosijo le v nategu. Obremenjeni so lahko osno in prečno. V primeru obremenitve prečno na os se morajo (vsaj malo) prečno deformirati, da lahko prevzamejo obtežbo z nategom. V primeru točkovnih prečnih sil ima element lomljeno obliko, pri porazdeljenih prečnih silah pa ukrivljeno obliko. Fleksibilni linijski elementi so tipično na robu membrane, lahko pa so tudi ojačitev znotraj membrane (v primeru, da je nosilnost same membrane premajhna ali pa so njene deformacije prevelike). Fleksibilni robni in vmesni linijski elementi predstavljajo sekundarno nosilno konstrukcijo.

Fleksibilne robne elemente lahko nadomesti tog robni element. Membrana potrebuje robne linijske elemente (fleksibilne ali toge), saj bi prenos membranskih napetosti preko oglišč membranske površine povzročil izjemne lokalne napetosti v njihovi bližini, napetosti pa ne bi bile ustrezno razporejene. Robni elementi omogočajo enakomernost prednapetja v obeh smereh po celotni membrani in boljše razporeditev membranskih napetosti ob zunanjih obtežbah (What is ..., 2011).

Jasno je, da z izključno nateznimi konstrukcijskimi elementi ne moremo prenesti obremenitve v podlago. Potrebujemo še upogibne, ali pa vsaj tlačne elemente, kot neko protiutež membranskim in kabelskim nategom. To vlogo prevzame togi del konstrukcije – primarna nosilna oz. podporna konstrukcija. Ta predstavlja skupni imenovalac med konvencionalnimi konstrukcijami in prednapetimi membranskimi konstrukcijami. Elementi podporne konstrukcije morajo prevzeti tlačne, natezne ali upogibne obremenitve, zato so zanje uporabljeni klasični togi materiali. Čim bolj moramo stremeti k

izključno osno obremenjenim podpornim elementom (tlačnim ali nateznim), ki omogočajo bolj optimalno konstrukcijo. Zelo učinkovite so ustrezno nagnjene in vrtljivo podprte podporne konstrukcije (jambori, lokovi), ki so dodatno stabilizirane s kabli. Navadno so minimalni in preprosti konstrukcijski sistemi tudi najefektivnejši.

Zunanja obremenitev deluje neposredno na prednapeto membrano. Preko membranskih napetosti se obremenitev v obliki linijske obtežbe prenesejo na sekundarne nosilne kable, od tu pa v obliki natezne osne sile na podporno konstrukcijo ali kar direktno v temeljna tla (slika 24). V primeru, da ni sekundarne konstrukcije, se membranske napetosti prenesejo kar v primarno nosilno konstrukcijo. Obremenitev se nato, odvisno od zasnove podporne konstrukcije, preko kombinacije nategov in tlakov oz. nategov, tlakov in upogibnih momentov, prenese v temelje.



Slika 24: Membranske napetosti v sedlasti in konusni membranski konstrukciji (Bechthold, 2008)

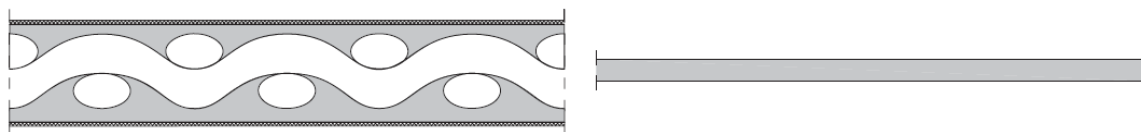
4.2 Membrana

Tankemu konstrukcijskemu materialu, ki opravlja nosilno in zaščitno funkcijo pravimo membrana oz. tehnična membrana. V zadnjih petih desetletjih smo bili priča razvoju številnih novih membranskih materialov, kar je tudi poglavito pripomoglo k hitremu razvoju tehnologije prednapetih membranskih konstrukcij. Tehnične membrane, ki se uporabljajo za membranske konstrukcije, lahko razdelimo na tehnične tkanine in na tehnične folije (Seidel, 2009).

Tehnične tkanine, ki se uporabljajo za membranske konstrukcije, so kompozitne ploskovne tvorbe, sestavljene iz tkanine (kot nosilnega materiala) in matrice (kot zaščitne plasti) (slika 25 levo). Daleč najbolj razširjena predstavnika kompozitnih ploskovnih tvorb – membran namenjenih za prednapete membranske konstrukcije – sta PET/PVC (polietilen tereftalatna (PET) tkanina in polivinil kloridna (PVC) matrica) in FG/PTFE (tkanina iz steklenih vlaken (FG) in politetrafluoretilenska (PTFE) matrica) kompozita. Razvita sta bila v 60ih oz. 70ih letih prejšnjega stoletja in se do danes nista bistveno spremenila (le manjše modifikacije) (Huntington, 2004). V omejenem obsegu se uporablja

tudi kompozit iz tkanine iz steklenih vlaken in silikonske matrice. Obstajajo tudi druge kombinacije materialov, kot je npr. PTFE/PTFE kompozit, vendar niso najbolj primerne za prednapete konstrukcije (zaradi nezadovoljivih mehanskih lastnosti, občutljivosti na okolje ali previsoke cene). Osnovni namen tkanine v kompozitu je prevzem vseh mehanskih obremenitev, matrica (zaščitna plast) pa zagotavlja vodotesnost. Poleg tega zaščitna plast varuje tkanino pred številnimi neugodnimi zunanji vplivi, ki lahko poslabšajo mehanske lastnosti tkanine, s tem pa tudi trajnost celotne membrane. To so vplivi podnebja (vlaga, UV žarki), kemični vplivi (kisel dež, ptičji iztrebki), biološki vplivi (rast plesni in alg) ter vplivi onesnaženosti zraka (usedline, madeži) (Huntington, 2004).

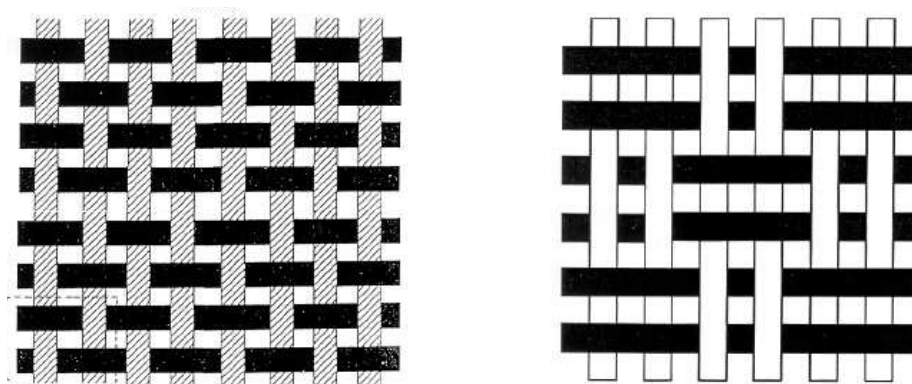
Tehnične folije niso kompoziti, ampak so iz enega samega sloja oz. filma, ki opravlja tako nosilno kot zaščitno funkcijo (slika 25 desno). Za prednapete membranske konstrukcije se uporablja ETFE (etilen tetra fluoroetilen) folija. Razvili so jo že v 70ih letih, vendar se je resna konstrukcijska uporaba razširila šele v zadnjem desetletju. Uporabljajo se predvsem zaradi svoje velike prepustnosti za svetlobo, medtem ko pa je njihova slabost nizka natezna nosilnost v primerjavi s tehničnimi tkaninami, kar posledično pomeni omejen razpon (Bechthold, 2008).



Slika 25: Levo: Prerez kompozitne membrane; Desno: Prerez filmske membrane (Seidel, 2009)

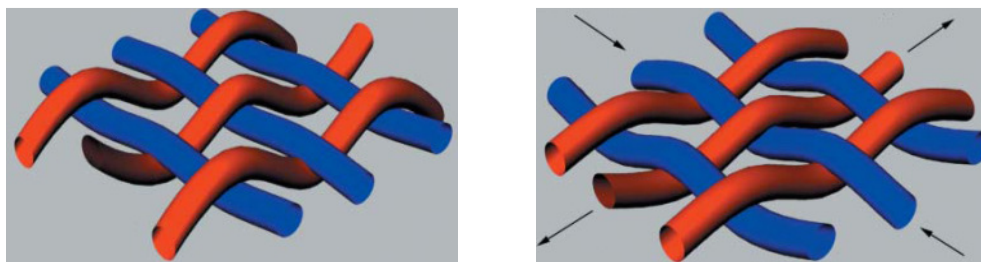
Nosilno tkanino kompozitne membrane sestavljajo medsebojno stekane osnovne in votkovne niti. Tkanje poteka na avtomatiziranih statvah. Zaradi različnih lastnosti osnovnih in votkovnih niti, vezave med nitmi in pogojev tkanja imajo tkanine ter s tem membrane v različnih smereh različne mehanske lastnosti, kar je zelo neugodno. Nekateri proizvajalci pa so patentirali različne postopke s katerimi so želeli doseči podobne lastnosti tkanin ter s tem membran v obeh med seboj pravokotnih smereh (osnovni in votkovni). Francoski Ferarri je patentiral tehnologijo izdelave nosilne tkanine, kjer so tudi prečne votkovne niti napete. Ameriški Seaman pa le položi prečne niti na vzdolžne, ter jih nato z dodatnimi nitmi poveže (Huntington, 2004). Pri tkanju tehničnih tkanin se najpogosteje uporabljata dve vezavi, in sicer platno in panama vezava (slika 26) (Seidel, 2009). Pri platno vezavi poteka vsaka nit izmenjujoče nad in pod nitmi, ki potekajo pravokotno na njo in je njen potek ravno nasproten poteku sosednjih vzporednih niti. Panama vezava je izpeljanka vezave platno kjer namesto ene niti, kot pri platno vezavi, potekata dve (tudi tri ali več) sosednji niti izmenjujoče enkrat nad in enkrat pod dvema (trema ali več) nitima, ki potekata pravokotno na ta par niti. Pri panama vezavi so niti manj ukrivljene v primerjavi z enostavno platno vezavo. Na tkanino se nato nanese zaščitni nanos. Sestavlja

ga več plasti osnovne zaščite in končni vrhni sloj. Končni izdelek se dobi v obliki zvitka, širine 2 m do 2,5 m (PET/PVC) oziroma do 5 m (FG/PTFE) (Seidel, 2009).

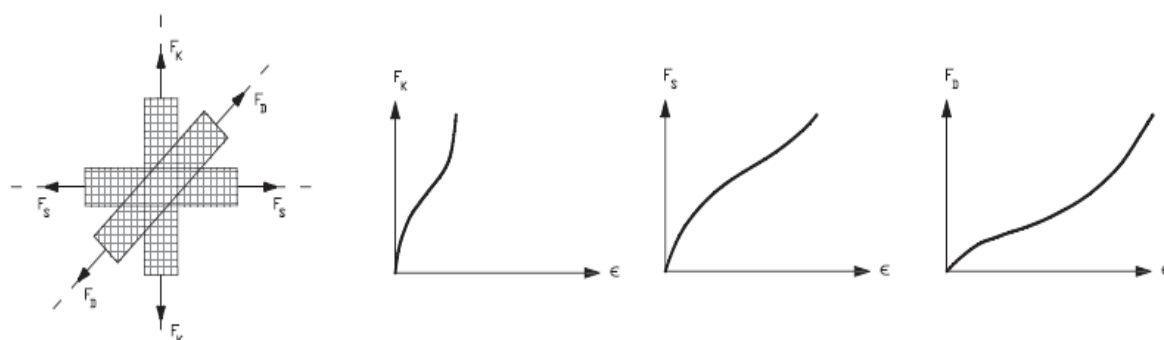


Slika 26: Levo: Platno vezava; Desno: Panama vezava (Forster in sod., 2004)

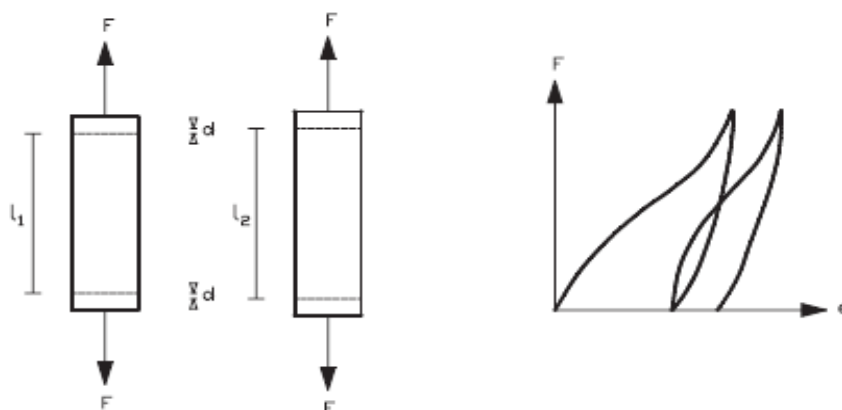
Membrana je med uporabo izpostavljena raznim ekstremnim obtežbam, in če upoštevamo še velike razpone, ki jih pokriva, je jasno, da mora imeti izjemne mehanske lastnosti. Tkanine kot nosilni element kompozitnih membran kažejo, zaradi že omenjenih različnih lastnosti v vzdolžni in prečni smeri ter načina tkanja in medsebojne vezave, izrazito nelinearno in neelastično obnašanje. Obnašanje je zelo kompleksno, sploh v primerjavi s Hookovim zakonom, ki velja pri klasičnih elastičnih konstrukcijah. Pri raziskavah osnovnih mehanskih lastnosti membran se izvajajo eno in dvoosni natezni preizkusi. Izkaže se, da se krivulji obremenjevanja in razbremenjevanja ne ujemata, torej imamo prisotne neelastične deformacije. Vsak naslednji cikel da drugačne rezultate (slika 29), kar da slutiti, da so deformacije močno odvisne od zgodovine obremenjevanja, ki ji je bil material izpostavljen. Maksimalna predvidena napetost v membrani mora biti nižja od maksimalne dovoljene za izbrano membrano. Obnašanje membrane je izrazito anizotropno oziroma, zaradi pravokotnih glavnih smeri, ortotropno. Votkovne niti imajo večjo začetno nagubanost, zato se veliko bolj raztegnejo in imajo manjšo togost kot osnovne niti (slika 28). Izrednega pomena za določitev lastnosti membrane je razmerje med silami v obeh glavnih smereh. Če raztegnemo membrano v prečni smeri, se nagubanost votkovnih niti zmanjša, hkrati pa se osnovne niti nagubajo, membrana pa se v vzdolžni smeri skrči (slika 27). Če v vzdolžni smeri vzpostavimo neko napetost, se odpor v prečni smeri poveča, torej se v omenjeni smeri poveča togost. Elastični modul ni konstanta ali preprosto določljiva spremenljivka, temveč je zelo kompleksen in se ga da dobiti z dvoosnimi testiranjmi ob točno določenih razmerjih napetosti. Deformacija ene smeri povzroči transversalne deformacije v drugi smeri zaradi spremembe v nagubanosti niti v membranski tkanini. To lastnost opišemo s Poissonovim koeficientom. Tudi ta koeficient ni konstanta, ampak je odvisen od samega materiala, smeri in razmerja napetosti med glavnima smerema (Seidel, 2009).



Slika 27: Levo: Prepletenost niti v nosilni tkanini membrane (modro- osnovne niti, rdeče – votkovne niti);
Desno: Nateg votkovne smeri povzroči skrček tkanine v osnovni smeri (Bridgens in sod., 2004)



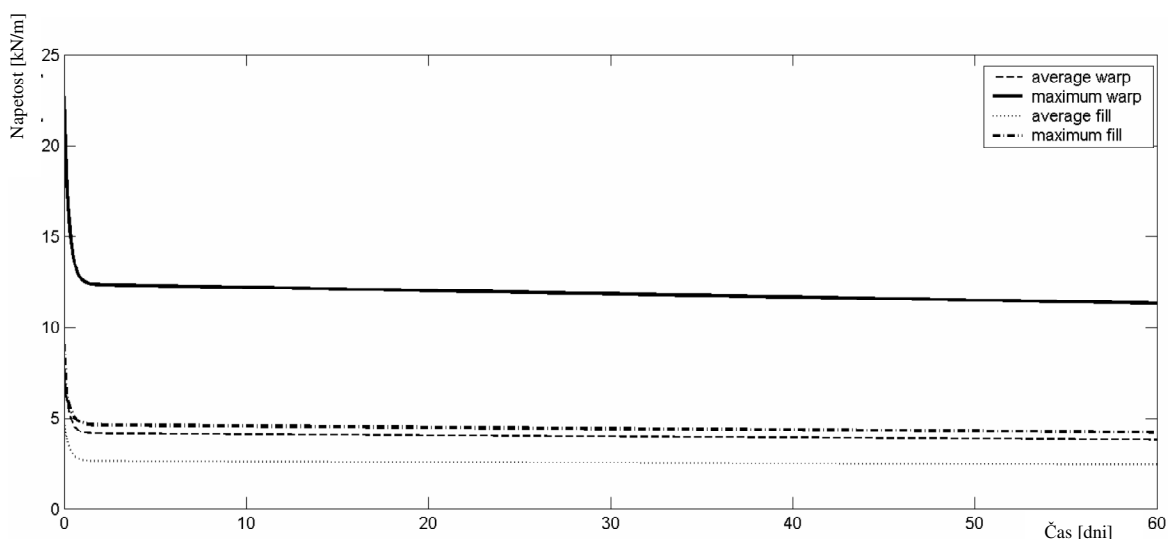
Slika 28: Deformacijsko obnašanje kompozitne membrane v različnih smereh (Seidel, 2009)



Slika 29: Pri nategu membrane se pojavijo nepovratne deformacije (Seidel, 2009)

Poglejmo si še druge pomembne mehanske lastnosti. Ena izmed teh je občutljivost membrane na trajanje obtežbe. Nosilnosti na dolgotrajno obtežbo so precej manjše od nosilnosti na kratkotrajno. Poleg tega membrana izkazuje izrazito lezenje in relaksacijo pri dolgotrajni napetosti oz. deformaciji (slika 30). Prav tako so membrane občutljive na zunanjo temperaturo. Pri nizkih temperaturah se skrčijo, postanejo bolj toge, hkrati tudi bolj krhke. Postavitev same membrane je treba pazljivo načrtovati, da bodo temperaturni pogoji ustrezni. Npr. pri kompozitih FG/PTFE se material pod $19\text{ }^{\circ}\text{C}$ močno skrči, zato je potrebna kar 2-krat večja sila za isto deformacijo (Seidel, 2009). Zelo

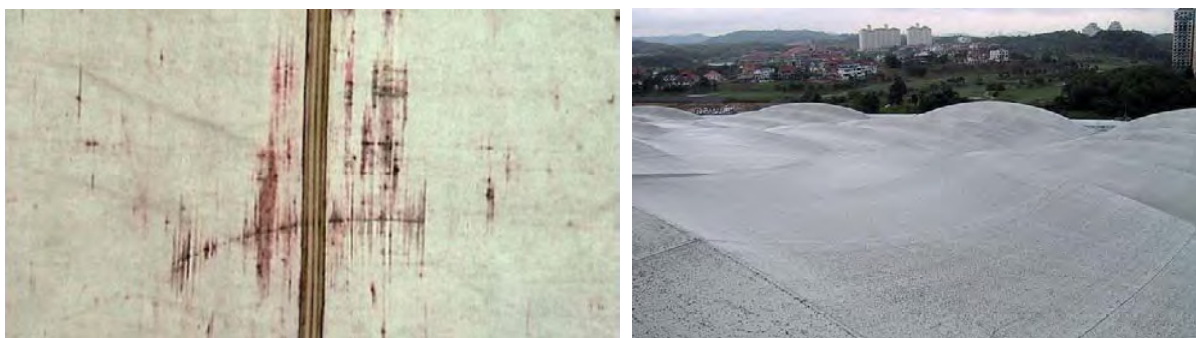
problematičen za membrano je pojav raztrganine, ki se lahko pojavi zaradi vandalizma ali neustreznih detajlov na robu. To je bil razlog kar številnih porušitev prednapetih membran (Seidel, 2009). Odpornost membrane na širjenje razpok se raziskuje na eno in dvoosnih eksperimentih. Tudi strig se lahko pojavi v membranah. Sicer stremimo temu, da sile delujejo v glavnih smereh, toda razni robni detajli in velika ukrivljenost površine lahko povzročijo strižne napetosti in deformacije. Tkanina se lahko strižno deformira brez večjega odpora vse dokler se glavne niti ne začnejo motiti pri zdrsu. Do te točke nudi minimalen strižni odpor le zaščitni nanos, od tu pa se odpor naglo poveča. Pri tkaninah iz steklenih vlaken je mejna sprememba kota 8° , pri poliestrskih tkaninah pa približno 12° (Seidel, 2009). Želimo si, da bi strižne deformacije v naši konstrukciji ostale znotraj prvega območja. Tudi strižne lastnosti se na ustreznem vzorcu lahko testirajo eno ali dvoosno. Zadnja mehanska lastnost, ki bi jo omenil, je občutljivost na prepogibanje in zlaganje. Ta problem je izrazit pri steklenih vlaknih s PTFE zaščitnim slojem. Ker je PTFE zelo tog in krhek material, se pri ostrem prepogibanju lahko poškodujejo steklena vlakna. S tovrstnimi kompoziti je treba ravnati izjemno pazljivo, medtem ko drugi materiali ne kažejo tovrstne občutljivosti (Huntington, 2004).



Slika 30: Graf relaksacije PET/PVC membran (Hegyí in sod., 2004)

Poleg mehanskih lastnosti so pomembne tudi druge karakteristike, ki so pripomogle k izjemni priljubljenosti prednapetih membranskih konstrukcij. Ena izmed njih je trajnost. Pri najpogosteje običajno uporabljenih materialih je ta od 10 let pa tudi do 30 let in več, odvisna pa je od številnih dejavnikov, ki škodljivo vplivajo na membrano. Eden izmed vzrokov za omejeno trajnost je UV svetloba. Ta še posebno pri poliestrskih vlaknih močno vpliva na nosilnost. Drugi vzrok je vdor vlage do osnovnih vlaken. To je idealno okolje za razvoj plesni (slika 31 desno), pozimi pa se tekočina razširi in razdvoji zaščitni nanos od tkanine. Vizualno je to vidno v obliki temnejših linij na membrani (slika 31 levo). Tudi na območju zvarov je treba biti pazljiv. Višji kosi membrane morajo nalegati na nižje, da lahko padavinska voda nemoteno odteka in se umazanija ne nabira v zobu ob stiku. Ostali

vzroki so še vandalizem, kemični in biološki vplivi okolja, zmanjšanje prosojnosti zaradi sprejemanja umazanije, ...itd. Najboljša referenca za določanje trajnosti materialov so že obstoječe konstrukcije. Nekatere od njih so še po treh desetletjih v dobrem stanju. Izvajajo se pa tudi pospešeni testi, kjer v laboratoriju priredijo razmere, ki ustrezajo dolgotrajni izpostavljenosti realnim pogojem (Huntington, 2004).



Slika 31: Levo: Poškodbe membrane zaradi vdora vode do nosilne tkanine; Desno: Poškodba membrane zaradi razvoja plesni (Seidel, 2009)

Pomembna lastnost je tudi prepustnost membrane za vidno svetlobo. Je razmerje med prepuščeno svetlobo in svetlobo, ki sije na membrano, in se izraža v odstotkih. Glavni omejevalec prosojnosti je osnovna tkanina, ki je skoraj neprozorna, veliko pa je odvisno od zaščitne plasti (Huntington, 2004). Obstajajo tudi tkanine, ki imajo med vlakni več prostora, s tem pa večjo prepustnost. Če membrani dodamo barvni pigment, lahko prepustnost povsem izgubimo. Največjo prepustnost dosežejo tehnične folije, saj gre le za en sloj, brez tkanine. Prepustnost nad 35% je že dovolj, da lahko večina rastlin normalno uspeva pod membrano (Huntington, 2004), 5% pa že zadošča za normalo delo (npr. branje) (Giugliano, 2009).

Membrane, kot trajno vgrajen gradbeni proizvod, morajo izpolnjevati bistvene zahteve glede požarne varnosti. Obnašanje vseh vrst membran (pri prednapetih membranskih konstrukcijah) v primeru notranjega požara je podobno. Visoka temperatura povzroči odpoved membranskega zvara ali stalitev same membrane na mestu, ki je požaru najbolj izpostavljen. Skozi nastalo odprtino v membranski površini začneta izhajati vročina in dim. Hitrost nastanka odprtine je odvisna od materiala membrane, oblike membranske površine, moči požara in razdalje med ognjem in membrano. Ko začne izhajati vročina, se temperatura v prostoru zniža in preostali del membrane ni več izpostavljen. Zaradi velike višine in notranjega volumna membranskih konstrukcij se dim in vročina dvigata visoko, pri tleh pa so razmere ugodnejše za evakuacijo ljudi in gašenje. Klasifikacija materiala glede odziva na ogenj se izvaja po standardu SIST EN 13501-1. Ker za membrane prednapetih membranskih konstrukcij še ni obvezna pridobitev CE certifikata, so s strani proizvajalcev večkrat podani klasifikacijski razredi po nacionalnih standardih (Forster in sod., 2004).

Preglednica 1: Primerjava različnih požarnih klasifikacij (Hajdukovič, 2011), (Forster in sod., 2004)

Prispevek k požaru	EN 13501-1	DIN 4102 (Nemčija)	NPF 92-505 (Francija)
Minimalen; negorljivi materiali	A1	A1	M0
	A2	A2	
Majhen; težko gorljivi materiali	B	B1	M1
	C		M2
Normalen; normalno gorljivi materiali	D	B2	M3 (M4)
	E		M4
Velik; lahko gorljivi materiali	F	B3	/

Eden izmed odločilnih podatkov za investitorja, ko se odloča za gradnjo, je cena konstrukcije. Res je tudi, da ne moremo gledati le na ceno, če ima konstrukcija poleg funkcionalne tudi neko estetsko in simbolno vrednost, kar za mnoge prednapete membranske konstrukcije nedvomno drži. Cena konstrukcije je odvisna od kompleksnosti in uporabljenih detajlov. Nesimetrične oblike, male dimenzije, nestandardni detajli seveda močno dvignejo ceno. Za lažjo primerjavo se ceno navadno navaja na m² tlorisne površine. Sam inženirski del, torej načrtovanje in dokumentacija, je dražji kot pri klasičnih konstrukcijah, saj je bolj zahteven kot pri klasičnih objektih, medtem ko pa je sama izdelava in postavitve konstrukcije hitrejša in cenejša (Huntington, 2004).

4.2.1 Polietilenteraftalat/polivinilklorid (PET/PVC) membrana

Od 60ih let prejšnjega stoletja, ko je nastal, je polietilenteraftalat/polivinilklorid kompozitna membrana (slika 33) (v nadaljevanju: PET/PVC membrana) najbolj priljubljen in največkrat uporabljen membranski material pri prednapetih membranskih konstrukcijah. Njegova fleksibilnost in nizka cena ga postavljata za prvo izbiro pri premičnih konstrukcijah, ni pa najprimernejši za večje trajne konstrukcije. Ima izjemne mehanske lastnosti, vendar je njegova šibka točka življenjska doba, saj je ta med vsemi običajnimi membranskimi materiali najkrajša. Čeprav navadno doseže vse protipožarne standarde, je tudi njegova odpornost na požar najnižja med običajnimi membranskimi materiali, ki se uporabljajo pri prednapetih membranskih konstrukcijah.

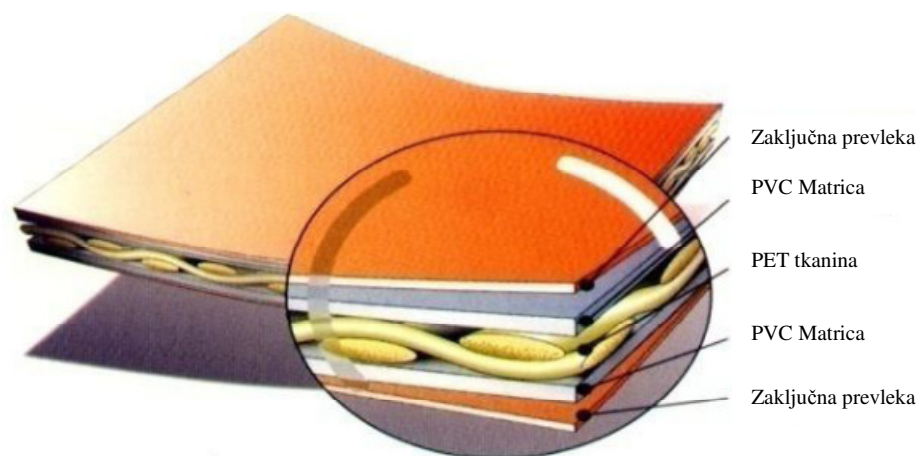
Iz polietilenteraftalata (PET), ki ga velikokrat imenujemo kar poliester, izdelamo filamentno prejo, primerno za uporabo v kompozitnih membranah. Izdelamo jo v postopku predenja iz taline, kjer vhodni material, polimerni granulati, stalimo (pri temperaturah nad 265 °C) in ekstrudiramo skozi ustrezen šobni paket z določenim številom luknjic, čemur sledi še raztezanje in navijanje. Značilnost tako izdelane filamentne preje je, da je orientacija makromolekul v teh filamentih izrazito usmerjena v smeri osi filamenta. Niti imajo zato ustrezno natezno trdnost in dimenzijsko stabilnost. Iz teh niti se v

postopku tkanja na statvah (slika 32 levo) izdelata nosilna tkanina na katero se nanese zaščitna plast (matrica) iz polivinilklorida (PVC) z dodanimi plastifikatorji, aditivi, pigmenti in različnimi stabilizatorji. Matrica je v obliki paste nanesena na tkanino po sistemu zračnega noža (zrak pod določenim kotom in visokim tlakom piha na tkanino in s tem odpihne odvečno pasto, na tkanini pa ostane le tanek sloj – slika 32 desno), nato sledi segrevanje na 180°C, pri čemer se plastifikatorji vežejo s PVC-jem. Na koncu se kompozit s prehodom skozi hladilne valje ohladi. Osnovne niti so ves čas v nategu. Ta proces se ponovi dvakrat, s to razliko, da je v prvem koraku pasti dodana adhezivna komponenta, ki ustvari boljšo vezavo med tkanino in matrico. Debelina zaščitnega nanosa oz. matrice je neposredno povezana s trajnostjo membrane, večja kot je, boljša je zaščita in s tem membrana dlje časa ohrani prvotne karakteristike. Običajna debelina je med 0,08 mm in 0,25 mm, kar pomeni približno 500 g/m² (200 g/m² na notranjo stran, 300 g/m² na zunanjo stran). Na koncu se nanese še zaključna prevleka. Ta poveča zaščito pred nabiranjem umazanije na površju membrane, pred vdorom vlage, pred UV žarki in hkrati omeji uhajanje plastifikatorjev iz membrane. Obstajata dva načina izvedbe zaključne prevleke. Prvi je v obliki nanosa tekoče mase oz. laka iz polivinilidenfluorida (PVDF), akrilatov ali njune kombinacije na površino membrane, drugi način pa je s polaganjem tankih in togih polivinilfluoridnih (PVF) filmov na membrano. PVF filmska zaključna prevleka je debelejša (30 µm – 80 µm) od PVDF oz. akrilatnih nanosov (5 µm – 10 µm). Bolje odbija UV žarke in ohranja ves pigment v membrani, kar dolgotrajno ohrani lep videz membrane, njena slabost pa je zmanjševanje fleksibilnosti membrane (predvsem strižne) in onemogočanje varjenja s preklopom, zato kroje membrane zvarimo z dodatnim trakom membrane na spodnji strani, ki nima površinske prevleke. Pri zaključnih prevlekah, ki se lakirajo na površino, se lahko prevleka nanaša na obe strani, zunanja stran pa ima navadno dvojni nanos. Pri tovrstnih zaključnih prevlekah se fleksibilnost membrane ne zmanjša. Čista PVDF prevleka nudi boljšo zaščito membrane kot akrilatna prevleka, vendar je njegova velika slabost, da onemogoča varjenje membran, zato jo je treba na mestu zvara odbrusiti (Seidel, 2009).



Slika 32: Levo: Avtomatske statve; Desno: Nanašanje PVC matrice z zračnim nožem (Seidel, 2009)

Poliestrska tkanina daje PET/PVC membrani sposobnost prevzemanja velikih nateznih napetosti. Membrana ima izrazite razlike v mehanskih lastnostih med vzdolžno in prečno smerjo, kar se najbolj vidi pri togosti, ki je lahko v normalnih razmerah v votkovni smeri tudi do 2-krat nižja. Material izkazuje tudi precejšnjo stopnjo lezenja (Hegyí in sod., 2004), zato se lahko zgodi, da bo po nekem času potrebno naknadno napenjanje, da ne izgubimo začetnega prednapetja. Membrana ima relativno majhno togost, sploh v primerjavi s FG/PTFE membrano, kar ima za posledico velike kompenzacijske faktorje pri krojenju membrane, kar pa omogoča, da razne nenatančnosti pri načrtovanju ali izdelavi ostanejo neopažene, brez gub. Tudi ekstremne napetostne konice se, zaradi lezenja materiala, po nekem času poležejo (Huntington, 2004). Mehka PVC matrica učinkovito ščiti tkanino, ne le pred okoljskimi vplivi, ampak tudi pred mehanskimi poškodbami. To omogoča, da lahko izvedemo robni detajl, kjer jekleni kabel leži znotraj membranskega žepa in se neposredno dotika membrane. PET/PVC membrana je torej zelo hvaležen in prilagodljiv konstrukcijski element.



Slika 33: Sestava PET/PVC membrane (Supartono in sod., 2011)

Najbolj negativen vpliv na trajnost PET tkanine ima UV svetloba. Če ji je tkanina izpostavljena, začne hitro izgubljati nosilnost. Z nanosom zaščitnih plasti, ki vsebujejo UV stabilizatorje, se podaljša življenjska doba membrane. Ta je pri tovrstnih membranah 10 do 15 let v najbolj izpostavljenih pogojih. Zaključna prevleka je tu izrednega pomena, zato jo je treba pazljivo nanesti. Če pride do lukenj v plasti ali do delaminacije filmov, lahko pride PVC v neposreden stik z zunanjim okoljem. Na teh mestih plastifikatorji pospešeno izhajajo iz PVC matrice, ki tako postaja vse bolj toga, pospešeno se začne nabirati umazanija, saj jo PVC s številnimi plastifikatorji in ostalimi dodatki privlači, pa še UV zaščita je močno oslABLJENA. To lahko vodi k hitremu propadu membrane. PET/PVC membrane so občutljive tudi na biološke in kemične vplive, preprečiti je potrebno tudi vdor vode. Trajnost PET/PVC membrane je precej odvisna od vrste zaključne prevleke. Če vrhnja plast ni varljiva, jo je

potrebno na območju zvarov z ustreznimi sredstvi odstraniti, saj bo le tako zvar dovolj močan, konstrukcija pa bo dolgo časa služila svojem namenu (Huntington, 2004).

Svetlobna prepustnost, ki jo dosežejo PET/PVC membrane, dosega vrednosti do 22%. To vrednost lahko dosežemo pri membranah bele barve, medtem ko se s pigmenti ta zmanjšuje. Zelo temne barve membran praktično nimajo prepustnosti za vidno svetlobo (Huntington, 2004).

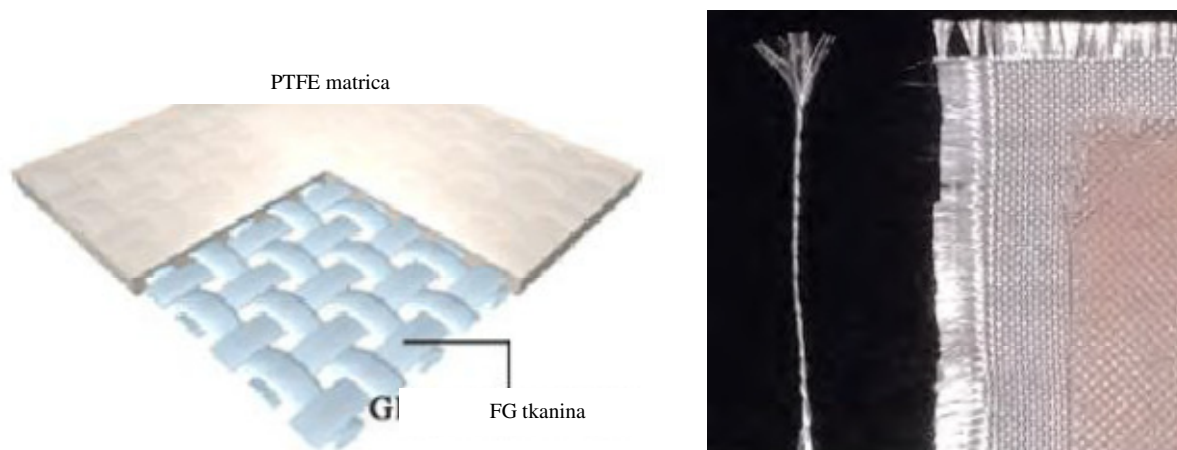
PET/PVC membrana vsebuje zaviralce gorenja in je zato samougasna. Ob dovolj velikem viru toplote zagorijo, ob umiku ali oslavitvi vira pa se pogasijo. Imajo tudi aditive, ki preprečujejo nastanek gorečih kapljic ob gorenju membrane. Pri pribl. 100°C začnejo popuščati membranski zvari, membrana pa se začne topiti pri temperaturi pribl. 250°C. Visoke temperature ob požaru v membranski površini relativno hitro povzročijo odpoved zvara ali vžig membrane in s tem nastanek odprtine v membranski površini. Skoznjo nato izhaja toplota in dim. PET/PVC membrane dosegajo požarne razrede B ali C (EN 13501-1), M2 (NPF 92-505) ter B1 (DIN 4102) (Forster in sod., 2004).

PET/PVC kompozitna membrana je najcenejša kompozitna membrana, ki se uporablja v industriji prednapetih membran. Je relativno enostavna za delo (proizvodnja, prevoz, postavitve) in se preprosto vari, kar pomeni, da je izdelava konstrukcije relativno poceni. Izkušen inženir prednapetih membranskih konstrukcij navaja ceno 12 \$/m² za samo membrano (Huntington, 2004). Če to pretvorimo v domačo valuto (današnji menjalni tečaj je podoben tečaju iz leta 2004), znese to slabih 10 €/m². Avtor navaja tudi ceno prefabricirane membrane, torej izrezane in zvarjene membrane z ustrežno robno obdelavo za priključitev na podpore, 70 \$/m² – 120 €/m² (90 \$/m² – 150 €/m²), ter ceno izdelave in postavitve celotne konstrukcije brez temeljev 300 \$/m² – 550 €/m² (400 \$/m² – 700 €/m²). Slednja cena je na m² tlorisne površine in že upošteva izgube blaga pri rezanju in zvarih, ter razliko med površino membrane in tlorisno površino. Tlorisna površina je okvirno 75 % – 90 % površine membrane.

4.2.2 Steklena vlakna/politertafluoretilen (FG/PTFE) membrana

Kompozitno membrano iz steklenih vlaken in politetrafluoretilena (slika 34) (v nadaljevanju: FG/PTFE membrana) so prvič proizvedli pred štirimi desetletji v ZDA, kasneje pa so jo začela proizvajati različna podjetja po vsem svetu. FG/PTFE membrana je najkvalitetnejša membrana, ki se jo trenutno uporablja v industriji membranskih konstrukcij. Z izjemnimi nateznimi nosilnostmi, negorljivostjo, odpornostjo na umazanijo in dolgo življenjsko dobo je zelo primerna izbira za velike, trajne konstrukcije. Ker idealnega materiala še niso iznašli, ima PTFE membrana seveda tudi slabe strani, in sicer je zelo občutljiva na grobo ravnanje, marsikaterega investitorja pa od izbire odvrne tudi visoka cena napram drugim materialom.

Visoko nosilna steklena vlakna se pridobivajo z vlečenjem iz mase raztopljenih silicijevih, aluminijevih, kalcijevih in manganovih oksidov. Pri pređenju vlaken v niti so ta namočena v posebno lepilo, ki zmanjša začetne napetosti in deluje kot lubrikant, da se vlakna ne poškodujejo, saj so krhka. Steklene niti prenesejo izredno visoke natezne napetosti in so odporne na številne zunanje vplive (UV, ekstremne temperature, kemični vplivi,...). Na tkanino se nato nanese PTFE matrica. Postopek poteka tako, da tkanino namočimo v PTFE emulzijo, nato pa jo izpostavimo IR sevanju, da voda izhlapi. Sledi sintranje pri temperaturi 380 °C. Postopek večkrat ponavljamo (6 do 10-krat), da dosežemo želeno debelino matrice. Ta se pri sintranju karamelizira in spremeni barvo, kar pa izgine po nekaj mesečni izpostavljenosti UV svetlobi. Površina PTFE je po sintranju razpokana, zato je nujno potrebna še tanka zaključna prevleka floroetilen propilena (FEP). Ta zagotavlja dodatno vodotesnost in dobro varljivost, saj ima nižjo talilno temperaturo kot PTFE in se ta med varjenjem ne poškoduje (Seidel, 2009).



Slika 34: Levo: Shema FG/PTFE membrane (Supartono in sod., 2011); Desno: Steklena nit, steklena tkanina in steklena tkanina s PTFE nanosom (Seidel, 2009)

Natezna nosilnost samih steklenih nitov je večja od nosilnosti jekla. V stekani obliki se zaradi valovitosti in interakcije s prečnimi nitmi ta zniža, vendar je še vedno daleč največja med vsemi nosilnimi tkaninami v membranah. To omogoča velike razpone z majhno ukrivljenostjo. Pri nanosu matrice so vzporedne niti v nategu, prečne pa ne, zato se pri hlajenju matrice že tako nagubane niti še dodatno ukrivijo, kar ima za posledico nizko začetno togost membrane v prečni smeri (Huntington, 2004). Ta se pri večanju napetosti poveča, ko pride do interakcije med glavnimi vlakni. PTFE je dokaj tog in nefleksibilen material. Ker je v neposrednem stiku s steklenimi nitmi, ki so tudi krhka je velika nevarnost, da se te poškodujejo. Od tu izhaja velika občutljivost FG/PTFE membran na zlaganje in prepogibanje. Pri izdelavi, transportu in postavitvi je treba biti zelo pazljiv. Na pregibih je treba paziti, da radij ni premajhen, med plasti membrane pa dati sloj pene. Robnim detajlom je potrebno posvetiti veliko pozornosti (Seidel, 2009). Zelo slaba odpornost na širitev raztrganine prav tako izhaja iz togega PTFE nanosa, saj ta ne omogoča povezanega delovanja niti na robu raztrganine, kar bi premostilo

konice napetosti in preprečilo širitev. Tudi FG/PTFE membrane izkazujejo določeno lezenje, vendar je precej manjše kot pri PET/PVC membranah (lezenje FG/PTFE membran predstavlja približno tretjino lezenja PET/PVC membran), pa še to se konča po dveh do treh dneh pod obtežbo in jih tedaj naknadno napnemo (Seidel, 2009). Tudi kompenzacija je pri tem kompozitu precej nižja v primerjavi s PET/PVC membranami, kar pomeni, da je treba biti pri načrtovanju in izdelavi končne membrane zelo pazljiv in natančen (Huntington, 2004).

Za FG/PTFE membrane, lahko resnično trdimo, da gre za trajne konstrukcije. Predvidena življenjska doba je 25 let, vendar pa številni obstoječi objekti pričajo o tem, da tudi po 30 letih membrane zelo dobro služijo svojem namenu. FG/PTFE membrane so neobčutljive na kemijske, temperaturne, vremenske vplive in UV sevanje (Huntington, 2004). Praktično ni učinka staranja ali obrabe materiala. Takšna membrana lahko učinkovito deluje v temperaturnem razponu od $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Seidel, 2009). Še ena izredna lastnost PTFE matrice je ta, da ima nasploh eno najnižjih površinskih energij, saj so molekule PTFE izrazito nepolarne (Forster in sod., 2004). Posledica tega je, da odbija umazanijo in vodo, kar omogoča dolgotrajen čist videz površine. Največji sovražnik steklenih vlaken je vlaga (padavine, topljenje snega in kondenz pri zaprtih ogrevanih prostorih). Ta lahko pride do vlaken, če se v zaščitnem ovoju pojavijo vrzeli, zato mora biti zaščitna matrica enakomerno nanesena po celotni površini (Huntington, 2004). Iz mehanskih lastnosti FG/PTFE membran sledi tudi, da lahko na trajnost teh vpliva neustrezno ravnanje z njimi in nastanek raztrganin (npr. zaradi vandalizma).

Skozi obravnavano membrano lahko prodre med 7 % in 21 % vidne svetlobe, kar omogoča prijetne dnevne razmere pod njo. Praktično vse FG/PTFE membrane so v beli barvi, lahko pa so tudi barvne, vendar tedaj prosojnost pade na 1% – 3 % (Huntington, 2004).

FG/PTFE membrana je praktično negorljiva. Prenese temperaturo do $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ brez vžiga, zvari pa popustijo pri pribl. $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Forster in sod., 2004). Dodatno varnost zagotavlja visoka temperatura razgradnje, saj se tudi pri ekstremnih temperaturah ne tvorijo kapljice. Pri FG/PTFE membranah traja precej dlje časa, da pride do odprtine v membranski površini. Praviloma najprej popustijo zvari. Membrane dosegajo požarne razrede M1 (NPF 92-505) ter B1 in A2 (DIN 4102). FG/PTFE membrana se glede na standardne preizkuse boljše obnaša v primeru požara, zato je marsikje edina dovoljena izbira za pokrivanje velikih zaprtih javnih prostorov. Vprašanje je, ali je res negorljiva FG/PTFE membrana bolj varna od samougasne PET/PVC membrane. Preizkusi v realni velikosti in dejanski primeri požarov kažejo, da je škoda manjša, če čim prej pride do luknje v membrani in s tem odvoda vročine in škodljivih dimov (Forster in sod., 2004).

Dobre lastnosti in trajnost FG/PTFE membran pa niso poceni, saj imajo zelo visoko ceno, sploh v primerjavi s PET/PVC membranami. Sama membrana nas bo stala pribl. 50 €/m^2 – 70 €/m^2 (60 €/m^2 –

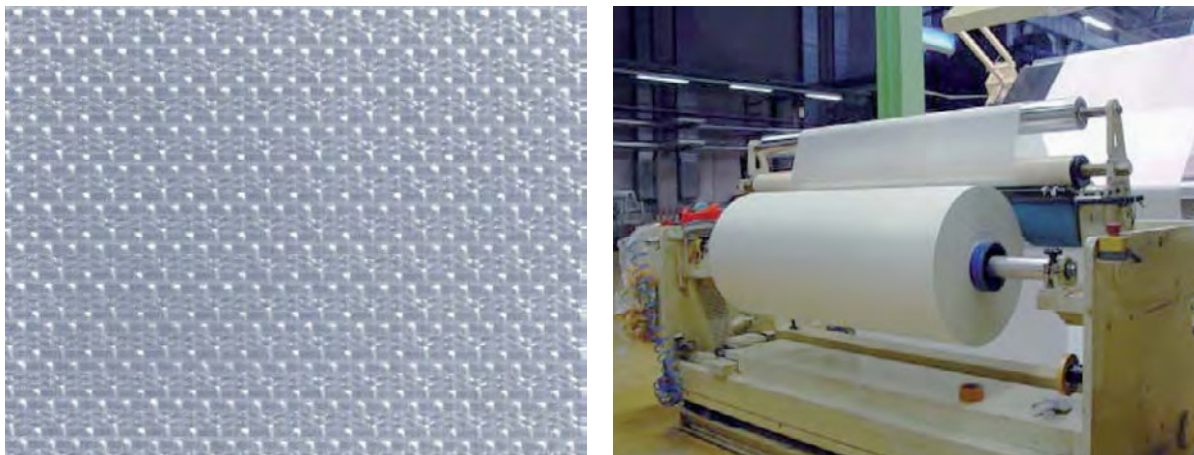
80 \$/m²), celotna konstrukcija brez temeljev pa 400 €/m² – 800 €/m² (500 €/m² – 1000 \$/m²) (Huntington, 2004).

4.2.3 Steklana vlakna/silikon (FG/SI) membrana

Kompozitna membrana iz steklenih vlaken in silikonske matrice (slika 35) (v nadaljevanju: FG/SI membrana) je razmeroma nova kompozitna membrana v industriji membranskih konstrukcij. Ustvarili so jo, ker so želeli izboljšati lastnosti FG/PTFE membran. Uspeli so izboljšati fleksibilnost membran (te niso več občutljive na gubanje), povečali svetlobno prepustnost in znižati ceno, toda pojavili so se novi problemi, in sicer z varjenjem in nabiranjem umazanije. Ta membrana je primerna za aplikacijo v mobilnih konstrukcijah, toda zaenkrat se še ni resno plasirala na trg (Huntington, 2004).

Membrana ima podobne mehanske karakteristike kot predhodno obravnavana PTFE membrana. Na osnovno tkanino iz steklenih vlaken se po sistemu zračnega noža v več plasteh nanese raztopljena silikonska guma. Tudi zaključna prevleka je iz silikonske mešanice. Silikon se strdi v mehek fleksibilen elastomer s prostorsko mrežo molekul, ki objame krhko stekleno tkanino in preprečuje poškodbe pri pregibanju. Tudi sposobnost preprečevanja širjenja raztrganin je tu močno izboljšana, sam mehek silikon omogoča povezano delovanje niti na obeh koncih raztrganine. Zaščitna plast ima pri nanašanju precej nižjo temperaturo kot v primeru PTFE, zato ni tolikšnega dodatnega krčenja v prečni smeri, zato so začetne togosti v glavnih smereh bolj enakomerne. Togost v obeh smereh je velika, zato moramo biti pri načrtovanju in proizvodnji zelo pazljivi, saj material ne dopušča napak. Membran s silikonsko matrico ni mogoče termično variti, zato se uporabljajo sešiti ali speti mehanski stiki oziroma spajanje s postopkom vulkanizacije. Pri tem postopku se med dva kosa vstavi trak iz posebnega sintetičnega polimera, nato pa se ju s prešo stisne skupaj in segreje. Po času 30s do 2min in temperaturi okoli 170 °C reagira polimer s silikonom in se ustvari vez (Seidel, 2009).

SI membrane so odporne na številne kemične vplive, so temperaturno obstojne (od –60 °C do 180 °C) in UV odporne (Seidel, 2009). Največja slabost silikonske matrice je, da hitro postane umazana, saj privlači umazanijo, ki se je ne da preprosto očistiti. Trajnost membran je zelo dolga, vendar je težko obdržati njihovo belino. Glede na PTFE membrane je pri SI membranah dosežena majhna izboljšava pri svetlobni prepustnosti, ta znaša do 25 %, požarna varnost je s pomočjo številnih protipožarnih dodatkov podobna, cena samega materiala pa je nižja, vendar dosti višja od PVC membran (Huntington 2004).



Slika 35: Levo: FG/SI membrana; Desno: Proizvodnja FG/SI membran (Seidel, 2009)

4.2.4 Etilen Tetrafluoroetilen (ETFE) membrana

Etilen Tetrafluoroetilen (ETFE) je termoplastičen kopolimer, ki ga sestavlja pribl. 50 % etilena, 50 % tetrafluoretilena, 3 % – 5 % ogljika (preprečuje trganje pri visokih temperaturah (150 °C – 200 °C)) in ostali dodatki. Razvili so ga pred tremi desetletji za potrebe Nase, v arhitekturi pa se je začel uporabljati nedavno. ETFE folije so priljubljene zaradi velike prosojnosti in dolge življenjske dobe. Uporabljajo se lahko kot enoslojne prednapete membrane, vendar se najbolj množično uporabljajo v obliki pnevmatskih blazin za strehe in fasade. ETFE folije imajo večjo svetlobno prepustnost kot steklo, poleg tega pa so še izredno lahke (1 % teže stekla) in cenejše. Gre torej za racionalen in ekonomičen material. Je tudi zelo ekološki, saj se proizvodnja izvaja kot zaprt proces na vodni osnovi, brez škodljivih topil, material pa je mogoče 100 % reciklirati.

Gradivo za proizvodnjo ETFE membran se dobi z drobljenjem, mešanjem in segrevanjem (na 140 °C) osnovnih polimerov (polietilena (PE) in politetrafluoretilena (PTFE)), grafita, ter ostalih dodatkov. Dobljeno praškasto snov se nato v ekstrudorju stali (pri 265 °C – 285 °C) in ekstrudira skozi matrico v niti in nato naseklja na majhne kose, ki se ohladijo v vodi in nato osušijo. Rezultat tega procesa je ETFE granulati. ETFE folije se proizvede z ekstrudiranjem stopljenega ETFE vhodnega materiala (granulati ali prašek) v ekstrudorju. Poznamo dva postopka ekstruzije ETFE folij, in sicer z ekstruzijskim pihanjem ali ekstruzijo skozi ploščato režo (slika 36 levo). Pri prvem načinu se stopljena masa ekstrudira skozi režo v obliki cevi, nato pa jo zračni tlak razširi. Folije se nato ohladijo na hladilnih valjih. ETFE folije so debele 50 µm – 250 µm. Ekstruzijsko pihane folije izkazujejo večjo nosilnost, medtem ko so folije ekstrudirane skozi ploščato režo bolj prozorne, sijoče, toge, homogene in enakomerno debele (Seidel, 2009).



Slika 36: Levo: Proizvodnja ETFE folije z ekstruzijo skozi ploščato režo (Seidel, 2009); Desno: Primer enoslojne ETFE membranske konstrukcije ojačane s kabli (ETFE foil, 2011)

Natezna trdnost ETFE folij je nizka, doseže do pribl. 10 % trdnosti kompozitnih membran (Bechthold, 2008), odvisna pa je od debeline folije. Posledica tega je, da ni možno dosežati velikih razponov brez podkonstrukcije. Samostojna enojna prednapeta membrana lahko doseže razpone le do pribl. 1,5 m (Bechthold, 2008). Podkonstrukcija je lahko iz togih elementov ali iz fleksibilnih kablov (slika 36 desno). Pri dolgotrajnih obtežbah ETFE folije močno lezejo, zato se lahko skozi čas izgubi vse prednapetje in je potrebno ponovno napenjanje (pri pnevmatskih blazinah tega problema ni). ETFE membrana je tudi precej bolj fleksibilna kot membrane z nosilnimi tkaninami. Pri deformaciji 3 % – 10 % se začne material plastificirati. Ob pretrgu lahko doseže celo 6-kratnik začetne dolžine (Bechthold, 2008). Velika deformacijska kapaciteta omogoča, da se material v okolici morebitne raztrganine oz. razpoke razširi in ustvari se okrogla vrzel, okoli katere se razporedi napetost. V primerjavi s kompozitnimi membranami imajo ETFE membrane večjo odpornost na širjenje raztrganin.

ETFE membrane se ne uporabljajo dovolj dolgo, da bi iz konkretnih primerov lahko sklepali o njihovi življenjski dobi, je pa bilo narejenih precej pospešenih laboratorijskih testov. Material pri teh testih tudi po 50ih letih ne kaže vidnih znakov staranja. ETFE ni občutljiv na UV svetlobo, na vremenske vplive in onesnaženo okolje. Tudi po dolgi izpostavljenosti obdrži nosilnost, fleksibilnost in se ne razbarva. Zaradi gladke in nesprijemljive površine ima veliko samočistilno sposobnost. Največjo nevarnost za ETFE folije predstavlja vandalizem in ptice (kljuvanje), zato je potrebno onemogočiti prost dostop do membran (npr. žične ovire za ptice na robu membrane) (ETFE Foil, 2011).

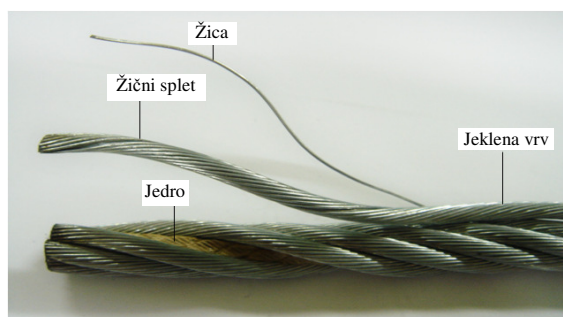
ETFE folije so praktično popolnoma prozorne, prepuščajo do 96 % vidne svetlobe (Bechthold, 2008). Tudi prepustnost za UV svetlobo je velika (83% – 88 %), kar je dobro za rastline. Z ETFE folijo lahko v zaprtem prostoru ustvarimo zunanje razmere. V primeru prevelikega bleščanja lahko membrano potiskamo z različnimi vzorci s tem omejimo prehod svetlobe (ETFE Foil, 2011).

ETFE folije so samougasne. Stopijo se pri pribl. 270 °C. Vročina hitro povzroči nastanek luknje v membrani in s tem odvod vročega dima. ETFE membrane dosegajo požarne razrede B (EN 13501-1), M2 (NPF 92-505) ter B1 (DIN 4102) (ETFF Foil, 2011).

Cena ETFE folije se giblje v razponu 12 €/m² – 20 €/m² (Huntington, 2004). Glede na dolgo življenjsko dobo in nizke stroške vzdrževanja menim, da je cena napram ostalim membranam zelo ugodna. Cena konstrukcije variira glede na konfiguracijo konstrukcije in tehnologijo. Pnevmatске blazine so zaradi več plasti folije in potrebne strojne opreme za vzdrževanje tlaka precej dražje kot enoslojne prednapete membranske konstrukcije. Predvidevam, da je cena celotne enoslojne prednapete ETFE konstrukcije primerljiva s konstrukcijami iz PET/PVC membran.

4.3 Fleksibilni linijski elementi

Najobičajnejši in najpogostejši linijski fleksibilni elementi so jeklene vrvi oz. jekleni kabli. Ti linijski elementi prenašajo nateg iz membrane na nosilno konstrukcijo ali direktno v temelje. Najpogosteje se uporabljajo za ojačitev same membrane ali roba membrane ter za stabilizacijo elementov nosilne konstrukcije. Osnovni gradnik jeklenih vrvi je tanka žica (premera 0,5 mm – 7 mm) iz visokovrednega jekla (do 1,77 N/mm²). Te žice se nato s posebnimi stroji spiralno navijajo okoli sredinske žice in tvorijo jekleni pramen ali splet. Dobljeni pramen se lahko pri novem ciklu uporabi kot jedro okoli katerega se ovije nov sloj žic. Tako lahko dobimo vedno debelejšše splete. Žice lahko navijamo desnosučno (v smeri ure) ali levosučno (v nasprotni smeri ure). Zaradi zaostalih napetosti pri navijanju, nato pa še velike osne obremenitve, se v primeru, da so vsi žični sloji istosučni, pojavi velika torzijska sila. V izogib temu, se žice v vsaki plasti suka v drugo smer, s čimer se nasprotno torzijske sile izničijo (Seidel, 2009). Za navijanje okoli jeklene ali vlaknaste sredice (npr. konopljina vlakna) lahko uporabimo kar že narejene pramene in rezultat je jeklena vrv (slika 37). Sicer pa se izraz jeklena vrv uporablja tudi za večslojne splete žic. Zadnja stopnja so jekleni kabli, ki se uporablja pri velikih razponih, kjer so prisotne velike sile. Jekleni kabel sestavlja snop vzporednih jeklenih vrvi, ki so na določenih intervalih objeti skupaj (Seidel, 2009).



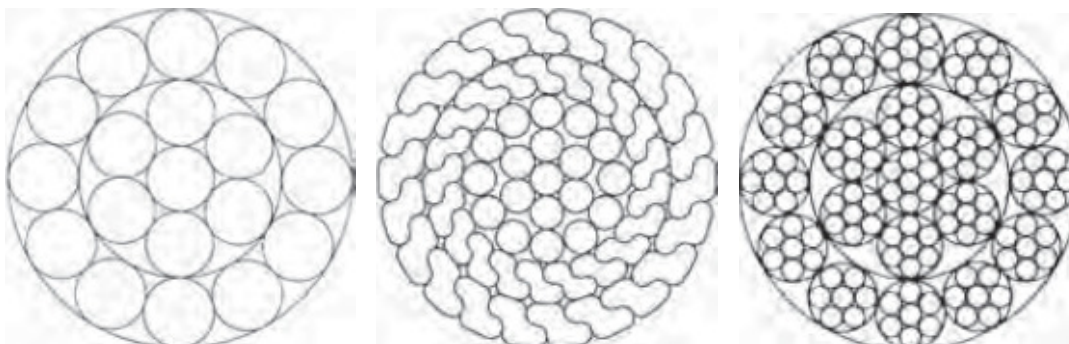
Slika 37: Sestava jeklene vrvi (Composition ..., 2012)

Imamo torej različne tipe jeklenih vrvi, v grobem jih delimo na odprte vrvi, zaprte vrvi in na spiralne konstrukcijske vrvi iz žičnih spletov (slika 38) (Beg in sod., 2011):

Odrpte vrvi so sestavljene iz spleta okroglih žic istih debelin, od katerih je ena uporabljena za jedro, ostale pa v slojih ovite okoli. Smeri navitja vsakega sloja se izmenično spreminjajo. Zaradi geometrijske čvrstosti je vrvi je število žic omejeno na največ 91 (Seidel, 2009). Debeline odprtih vrvi so od 3 mm do 52 mm (Beg, 2011).

Zaprte vrvi so v bistvu nadgradnja odprtih vrvi. Razlika je le v tem, da so pri enem ali več zadnjih slojih namesto okroglih žic uporabljene oblikovane žice, najpogosteje Z oblike. Te zelo kompaktno zaprejo notranjost vrvi in s tem močno izboljšajo korozijsko zaščito, hkrati pa onemogočajo izhajanje zaščitnega lubrikanta iz notranjosti, zato so zelo primerni za zunanjo uporabo. V primeru istega radija imajo zaprte vrvi, zaradi kompaktnega ovoja, večjo površino jekla v prerezu, zato so posledično tudi močnejše kot odprte vrvi (Seidel, 2009).

Spiralne konstrukcijske vrvi iz žičnih spletov so spletene iz enega ali več slojev posameznih žičnih spletov okoli jedra. Jedro, katerega namen je, da podpira splete, je največkrat iz vlaken konoplje, jute, sisala, manile ali umetnih materialov, kot je polipropilen. Takšne konstrukcijske vrvi so zelo fleksibilne in jih lahko zvijamo v majhne radije. Če pa potrebujemo večjo nosilnost in fleksibilnost ni primarnega pomena, lahko uporabimo jekleno jedro (žični splet); posledično so te vrvi težje, bolj toge in rokovanje z njimi je napornejše. Pri vrveh spletenih iz spletov ločimo dve kategoriji vrvi, in sicer glede na smer navijanja žic v spletih in na smer navijanja samih spletov. Če sta smeri nasprotni oziroma nasprotnosučni, imenujemo to regularno navitje, če sta pa enaki oziroma istosučni pa Langovo navitje. Slednje so še posebno močne in fleksibilne in manj občutljive na poškodbe zaradi deformacije in zunanjih vplivov (npr. umazanije) kot vrvi z regularnim navitjem (Seidel, 2009).



Slika 38: Prerez žičnega spleta, zaprte jeklene vrvi in odprte jeklene vrvi (Seidel, 2009)

Jeklene vrvi so zelo občutljive na korozijo, zato morajo biti primerno zaščitene. Zaščita se začne že pri žicah, ki morajo biti galvanizirane. Galvanizacija je proces pri katerem na neko snov nanesem tanko

plast cinka. Če namesto samega cinka uporabimo kombinacijo cinka in aluminija (Galfan®) je zaščita še dolgotrajnejša. Še dodatno korozijsko zaščito omogoča lubrikant (cinkov prah v sintetičnem olju), ki ga nanašamo v notranjost vrvi pri procesu navijanja, poleg tega pa še zmanjša trenje med žicami. Pri vrveh, katerih žice so zaščitene z galfanom, je to že dovolj, medtem ko so navadne vrvi naknadno zaščitene še z več plastmi barve. Če so vrvi ali kabli zelo izpostavljeni, se jih splača obdati v plastični ovoj ali pa uporabiti vrvi iz nerjavečega jekla, ki pa so dražje (Seidel, 2009).

V diplomski nalogi uporabljam za vse vrste jeklenih fleksibilnih elementov (jeklene splete, jeklene vrvi in jeklene kable), podobno kot številni viri, enoten izraz – kabli.

Med fleksibilne linijske elemente spadajo tudi tekstilni pasovi. Izdelani so iz poliestrskih ali poliamidnih vlaken in zaščiteni pred UV žarki, vlago in plesnijo. Ti pasovi so največkrat prišiti ali prilepljeni vzdolž robnega žepa membrane, v katerega je vstavljena robna jeklena vrv. Njihov namen je, da preprečujejo zdrs membrane ob kablju zaradi tangencialnih sil, ki se pojavijo. Pri manjših montažnih konstrukcijah se lahko uporabijo kot samostojen robni element (Seidel, 2009).

4.4 Podporna konstrukcija

Verjetno najznačilnejši podporni element prednapetih konstrukcij je jambor. Jambori so največkrat stabilizirani s kabli. Poznamo robne, notranje, zunanje in lebdeče jambore. Za jambore so najprimernejši elementi s cevastimi profili ali razne palične izvedbe. Drugi, zelo razširjen podporni element, je lok. Največkrat so lokovi v palični izvedbi. Lokove lahko, zaradi večje stabilnosti, nagnemo in medsebojno staknemo ali prekrizamo. Zunanji lokovi morajo biti togo vpeti in ojačani ali pa stabilizirani s kabli. Poznamo še podporne v obliki raznih okvirnih konstrukcij poljubnih oblik. Prednapete membranske konstrukcije lahko pripnemo tudi na obstoječe objekte, vendar se moramo predhodno prepričati, da lahko ti prevzamejo tolikšno dodatno obremenitev. Temelji pod tlačnimi elementi so največkrat armirano betonski, medtem ko pa je natezne sile kablov bolj učinkovito prevzeti z zemeljskimi sidri. Prezem s težo in trenjem betonskega temelja bi pomenil večji poseg v okolje.

Za podporne konstrukcije so uporabljeni klasični materiali kot so jeklo, armirani beton in les (lepljeni nosilci) (slika 39). V veliki večini prevladuje konstrukcijsko jeklo, saj lahko z njim, zaradi velike tlačne in natezne trdnosti, z relativno tankimi prerezi prevzamemo velike obremenitve. Še bolj učinkovito prenašanje obremenitev nam omogoča paličje. Elemente lahko z veliko preciznostjo izdelamo v proizvodnih obratih, na gradbišču pa jih nato hitro postavimo. To se ujema s filozofijo gradnje membranskih konstrukcij, zato je jeklo najprimernejši material za podporne elemente (Huntington, 2004). Je pa potrebno biti pozoren na zaščito jekla pred zunanjimi vplivi, zato so podporni elementi navadno galvanizirani in še dodatno korozijsko zaščiteni z barvno plastjo.

Alternativa jeklu je aluminij. Sicer je dražji, a je korozijsko neobčutljiv. Moderni materiali, kot so steklena in karbonska vlakna pa zaradi visoke cene niso aktualni (Berger, 1996).



Slika 39: Primeri podpornih konstrukcij iz različnih materialov (Armijos, 2011; Janberg, 2010; Europlast, 2012; Schierle, 2009)

5 DOLOČANJE MEHANSKIH LASTNOSTI KOMPOZITNIH MEMBRAN

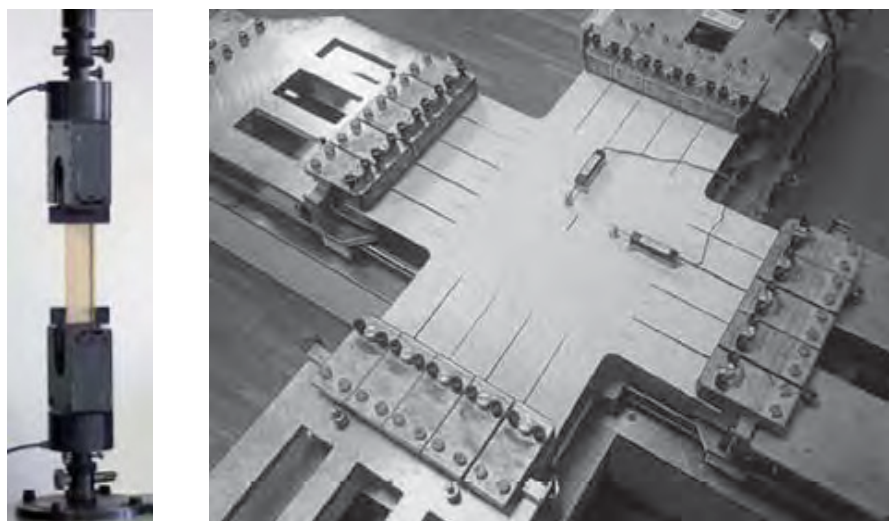
Za načrtovanje učinkovitih in varnih prednapetih membranskih konstrukcij je ključnega pomena poznavanje mehanskih materialnih lastnosti membrane. Vzporedno z razvojem membranskih konstrukcij so se razvile (in se še razvijajo) različne standardizirane metode in postopki za določanje mehanskih lastnosti membran. Za gradbenega inženirja, načrtovalca prednapetih membranskih konstrukcij, so najpomembnejši podatki o natezni trdnosti in deformacijskem obnašanju membrane.

5.1 Določanje natezne trdnosti

Preizkusi za določanje oz. preverjanje natezne trdnosti membrane so največkrat izvedeni kot enoosni natezni preizkusi preizkušanca trakaste oblike, ki se ga z enakomerno hitrostjo obremenjuje do pretrga (slika 40 levo). Testiranje trdnosti v vzdolžni in prečni smeri membrane se izvaja ločeno. Preizkušanec mora biti natančno pripravljen, niti v smeri katerih natezno trdnost merimo, pa vzporedne s smerjo natega. Preizkušance za testiranje je potrebno vzeti iz različnih delov membranskega zvitka, ki ga imamo na voljo, saj bodo tako končni rezultati testiranja bolj reprezentativni. Izkaže se namreč, da imajo preizkušanci, vzeti ob zunanjih robovih zvitka, slabše trdnostne karakteristike, kot preizkušanci iz notranjosti (Forster in sod., 2004). Standardni preizkusi se izvajajo po postopku iz mednarodnih ali nacionalnih standardov kot so EN ISO 1421 (mednarodni in evropski), DIN 53354 (nemški), BS 3424-4 Metoda 6 (britanski), NF G37103 (francoski), ASTM D4851 (ameriški) in JIS L1096 (japonski). Standardi se med seboj razlikujejo v širini in dolžini preizkušanca ter hitrosti obremenjevanja (Forster in sod., 2004). Potrebno se je zavedati, da so dejanske natezne trdnosti membrane v realni konstrukciji precej nižje. Tam je membrana izpostavljena dvoosnem napetostnem stanju, glavne natezne napetosti pa niso vedno vzporedne z nitmi. Votkovne niti so tudi napete in ne omogočajo osnovnim nitim, da se povsem zravnajo in obratno. Pri enoosnih natezних preizkusih so niti prečno na nateg nenapete in kratke, zato ne ovirajo niti v smeri natega. Te niti se lahko povsem zravnajo in zato prevzamejo večjo natezno obtežbo. Poleg tega je glede na velikost preizkušanca malo verjetno, da so v njem prisotne razne napake, nastale pri proizvodnji, ki tudi pomembno zmanjšujejo natezno nosilnost večje membrane v realni konstrukciji (Huntington, 2004). V prejšnjem poglavju sem že omenil, da dolgotrajne obtežbe in izpostavljenost membrane vremenskim vplivom okolice vpliva na mehanske materialne karakteristike membrane. Ravno zato so se vzporedno razvili podobni enoosni natezni preizkusi, kjer membrano pred pretrgom za določen čas (običajno 1000ur) izpostavimo omenjenim degradacijskim vplivom. Vpliv dolgotrajne obtežbe se preverja tako, da preizkušanec najprej napnemo na 10 %, 20 %, 50 % ali 90 % kratkotrajne natezne trdnosti, nato pa po določenem času nadaljujemo z obtežbo do pretrga (Forster in sod., 2004). Vremenske vplive na natezno trdnost testiramo tako, da membrano pred preizkusom izpostavimo naravnemu ali umetnemu staranju (Forster in sod., 2004).

5.2 Določanje obnašanja

Deformacijsko obnašanje membran se določa z dvoosnimi nateznimi preizkusi (slika 40 desno). Z njimi določimo elastični modul, Poissonov količnik, strižni modul in kompenzacijski faktor za vsako od glavni smeri membrane (Forster in sod., 2004). Zaradi veliko dejavnikov, ki vplivajo na deformacijsko obnašanje membrane, predvsem interakcije osnovnih in votkovnih niti, ni mogoče s testi poiskati neke splošno veljavne zakonitosti obnašanja membranskega materiala za aplikacijo v različnih membranskih konstrukcijah. Za dvoosne teste je potrebno predhodno predvideti napetostne razmere, ki se bodo pojavile v membrani realne konstrukcije ob raznih obtežnih kombinacijah. Te so v splošnem različne za vsak individualen primer prednapete membranske konstrukcije in so zato v domeni načrtovalca konstrukcije oz. usposobljenega gradbenega inženirja (Forster in sod., 2004). Ravno to dejstvo je razlog, zakaj dvoosni natezni preizkus deformacijskega obnašanja membran ni vključen v noben standard (Huntington, 2004), najdemo lahko le protokole in priporočila za izvedbo preizkusov in interpretacijo rezultatov, ki so jih razvile razne raziskovalne ustanove (npr. laboratorij Blum (LBV), Mednarodno združenje za lupinaste in prostorske konstrukcije (IASS), Japonsko združenje za membranske konstrukcije (MSAJ)). Dvoosni preizkušaneč križne oblike na vsakem kraku pritrdimo s čeljustmi dvoosne natezne naprave, nato ga obremenjujemo po vnaprej predvidenem postopku in merimo deformacije.

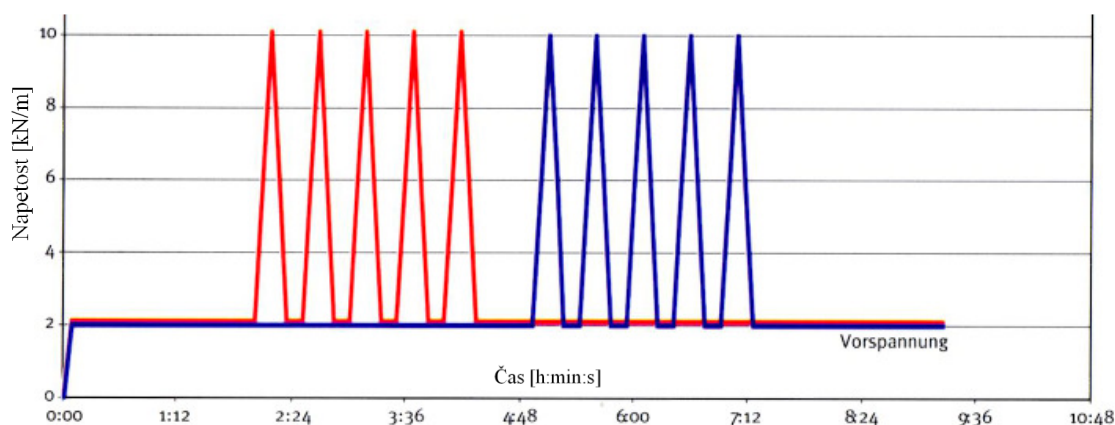


Slika 40: Levo: Enoosni natezni preizkus; Desno: Dvoosni natezni preizkus (Seidel, 2009)

5.2.1 Določitev elastičnih modulov in Poissonovih koeficientov

Diagram na sliki 41 prikazuje preprost postopek dvoosnega obremenjevanja preizkušanca (LBV P1106). Rdeča črta predstavlja vzdolžno oz. glavno smer, modra črta pa prečno oz. votkovno smer. Preizkušaneč najprej napnemo z 2 kN/m v obeh smereh. Po dveh minutah napetost v osnovni smeri v

eni minuti enakomerno povečamo na 10 kN/m, ter nato z enako hitrostjo razbremenimo nazaj v prednapeto stanje. Medtem je votkovna smer vseskozi napeta na 2 kN/m. Po eni minuti postopek ponovimo. Skupaj izvedemo 5 enakih ciklov. Po koncu sledi 30 sekund prednapetega stanja, nato pa ponovno 5 enakih ciklov, le da tokrat dodatno napenjamo preizkušane v votkovni smeri, osnovna smer pa vseskozi ohrani napetost 2 kN/m. Napetost 2 kN/m v obeh smereh simulira prednapetje v membrani. Prvi sklop obtežnih ciklov simulira navzdol delujočo obtežbo snega (predpostavimo, da je vzdolžna smer membrane v smeri konkavne ukrivljenosti), drugi sklop obtežnih ciklov pa dvigajočo obtežbo vetra.



Slika 41: Potek obremenjevanja membrane v dvoosnem nateznem stroju (rdeča – osnova, modra – votek) (Forster in sod., 2004)

Predpostavimo, da je zveza med napetostmi in deformacijami linearna, torej bomo poiskali linearni približek elastičnih modulov. Velja spodnja zveza (Forster in sod., 2004):

$$\begin{bmatrix} n_{11} \\ n_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{1111} & E_{1122} \\ E_{1122} & E_{2222} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \end{bmatrix} \quad (5)$$

oz.

$$\begin{aligned} n_{11} &= E_{1111}\varepsilon_{11} + E_{1122}\varepsilon_{22} = E_{1111}(\varepsilon_{11} + \nu_{12}\varepsilon_{22}) \\ n_{22} &= E_{1122}\varepsilon_{11} + E_{2222}\varepsilon_{22} = E_{2222}(\nu_{21}\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \nu_{12} &= E_{1122}/E_{1111} \\ \nu_{21} &= E_{1122}/E_{2222} \end{aligned} \quad (7)$$

n_{11} – napetost v osnovni smeri

n_{22} – napetost v votkovni smeri

E_{1111} – koeficient togosti v osnovni smeri

E_{2222} – koeficient togosti v votkovni smeri

E_{1122} – interakcijski koeficient togosti

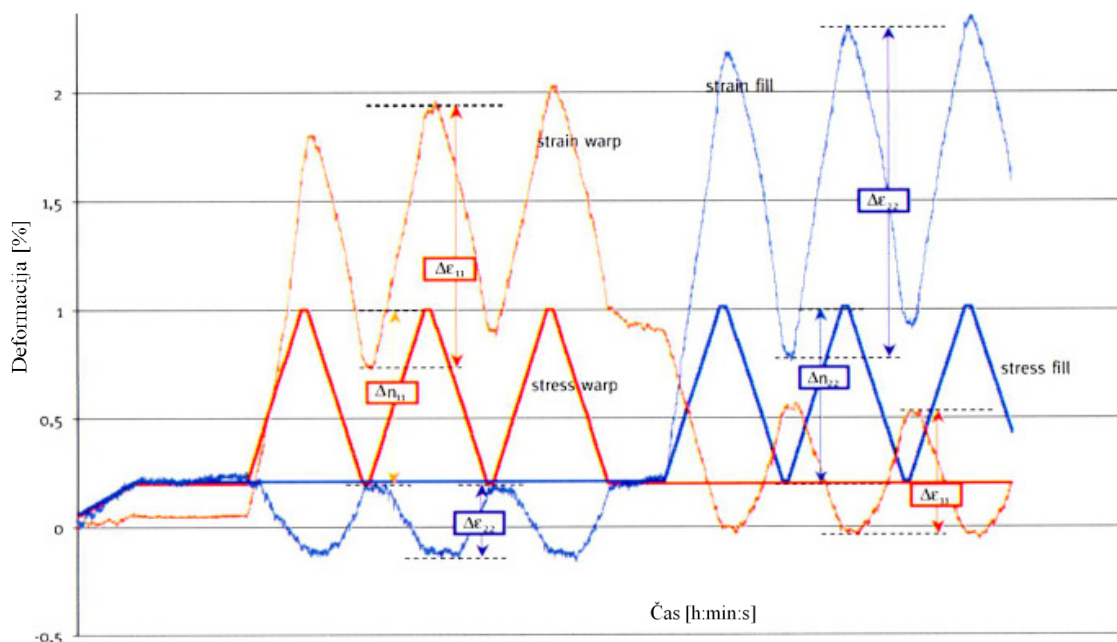
ε_{11} – deformacija v osnovni smeri

ε_{22} – deformacija v votkovni smeri

ν_{12} – Poissonov koeficient za interakcijo med osnovno in votkovno smerjo

ν_{21} – Poissonov koeficient za interakcijo med votkovno in osnovno smerjo

Želimo izračunati koeficiente togosti (E_{1111} , E_{2222} , E_{1122}) membrane za primer predpostavljene obtežne zgodovine. Za oba obtežna cikla (sneg in veter) poznamo napetostne razlike (Δn_{11} , Δn_{22}), iz rezultatov (slika 42) pa lahko razberemo ustrezne deformacijske razlike ($\Delta \varepsilon_{11}$, $\Delta \varepsilon_{22}$).



Slika 42: Deformacije membrane ob natezanju v dvoosnem nateznem stroju (rdeča – osnova, modra – votek) (Forster in sod., 2004)

Za prvi cikel obtežb (snežna obtežba) velja:

$$\begin{aligned} n_{11} &= E_{1111}\Delta\varepsilon_{11} + E_{1122}\Delta\varepsilon_{22} \\ 0 &= E_{1122}\Delta\varepsilon_{11} + E_{2222}\Delta\varepsilon_{22} \end{aligned} \tag{8}$$

Za drugi cikel obtežbe (obtežba vetra) velja:

$$\begin{aligned} 0 &= E_{1111}\Delta\varepsilon_{11} + E_{1122}\Delta\varepsilon_{22} \\ n_{22} &= E_{1122}\Delta\varepsilon_{11} + E_{2222}\Delta\varepsilon_{22} \end{aligned} \tag{9}$$

Imamo torej štiri enačbe in tri neznanke, torej lahko iz zgornjih enačb določimo vse togostne koeficiente in nato oba Poissonova koeficienta iz enačb (7).

Ker imamo predoločen sistem enačb (4 enačbe in 3 neznanke), rešitev ni enolična – imamo eno enačbo preveč. Uporabiti je treba npr. metodo najmanjših kvadratov za izračun treh neznank iz štirih enačb. Iz vrednosti togostnih koeficientov nato lahko izračunamo elastična modula v osnovni in vtokovni smeri (E_1 in E_2), saj za ortotropen material v ravninskem napetostnem stanju velja (Chung, 2007):

$$\begin{aligned} E_{1111} &= \frac{E_1}{(1 - \nu_{12}\nu_{21})} \\ E_{2222} &= \frac{E_2}{(1 - \nu_{12}\nu_{21})} \end{aligned} \quad (10)$$

E_1 – elastični modul v osnovni smeri

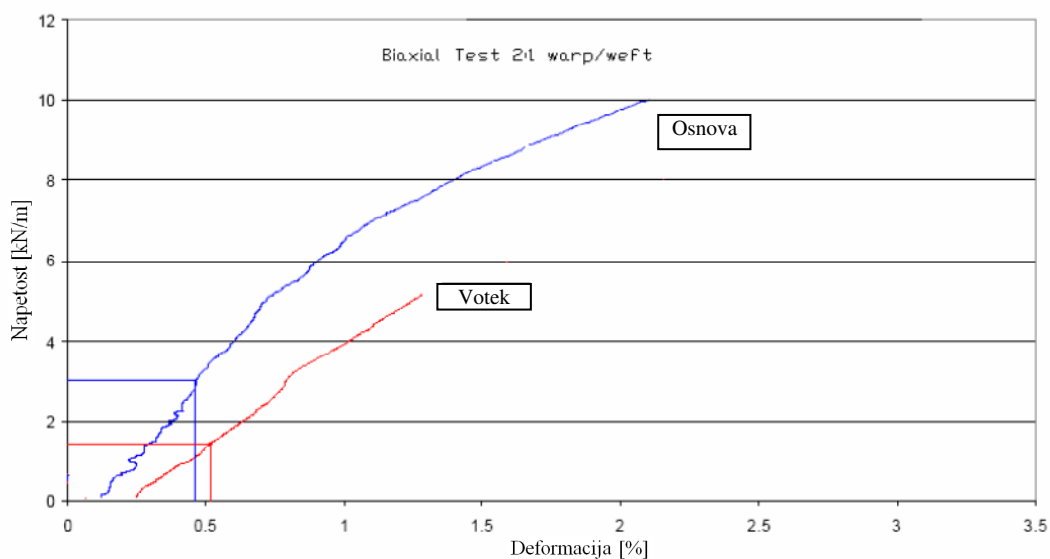
E_2 – elastični modul v vtokovni smer

5.2.2 Določitev kompenzacijskih faktorjev

Kompenzacijski faktor nam pove, za koliko moramo skrajšati oz. zmanjšati vsak posamezen kos membrane v osnovni in vtokovni smeri, da se bo ob raztežku v predvideno končno obliko v njem ustvaril želen nivo prednapetja. Kompenzacijske faktorje določamo z dvoosno natezno napravo. Preizkušanec izpostavimo predvidenemu dvoosnemu prednapetju in odmerimo deformacije v osnovni in vtokovni smeri. Upoštevati moramo tudi izrazito neelastično obnašanje membran, zato preizkušanec predhodno izpostavimo nekaj obtežnim ciklom (predvidenim v življenjski dobi konstrukcije), da se realizirajo nepovratne deformacije. Faktor je sestavljen iz neelastične deformacije membrane, ki nastane ob predvidenih obremenitvah in elastične deformacije zaradi prednapetja.

V navodilih za kompenzacijo membranskih panelov avtorji programa za analizo prednapetih membranskih konstrukcij Mpanel navajajo, da se lahko kompenzacijski faktorji za enake membrane in enake napetostne razmere razlikujejo (zaradi različnih metod testiranja, različnih serij membran in različne interpretacije rezultatov), zato je velika preciznost pri določanju faktorjev nesmiselna (Calculating ..., 2011).

Iz rezultatov dvoosnega nateznega preizkusa v predhodnem poglavju (slika 42) sta kompenzacijska koeficienta za osnovno in vtokovno smeri pribl. 0,9 %. Za membrano, katere rezultati so prikazani na spodnji sliki (slika 43), pa je kompenzacijski faktor v osnovni smeri 0,45 %, v vtokovni smeri pa 0,55 %.



Slika 43: Rezultati dvoosnega nateznega preizkusa z napetostnim razmerjem 2:1 (Calculating ..., 2011)

5.2.2 Določitev strižnega modula

Za določitev strižnega modula z dvoosno natezno napravo (po protokolu LBV 1110) moramo imeti križni preizkušanelec, katerega niti so pod kotom 45° glede na osi natega naprave. V tem primeru veljajo naslednje enačbe (Forster in sod., 2004):

$$n_{12} = G * \varepsilon_{12} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} n_{11} &= \frac{1}{2}(n'_{11} + n'_{22}) \\ n_{22} &= \frac{1}{2}(n'_{11} + n'_{22}) \\ n_{12} &= \frac{1}{2}(n'_{22} - n'_{11}) \end{aligned} \quad (12)$$

G – strižni modul membrane (velja $G = 2E_{1212}$; E_{1212} je standardni strižni modul v ravnini 12)

ε_{12} – strižna deformacija

n_{11} – napetost v osnovni smeri membrane

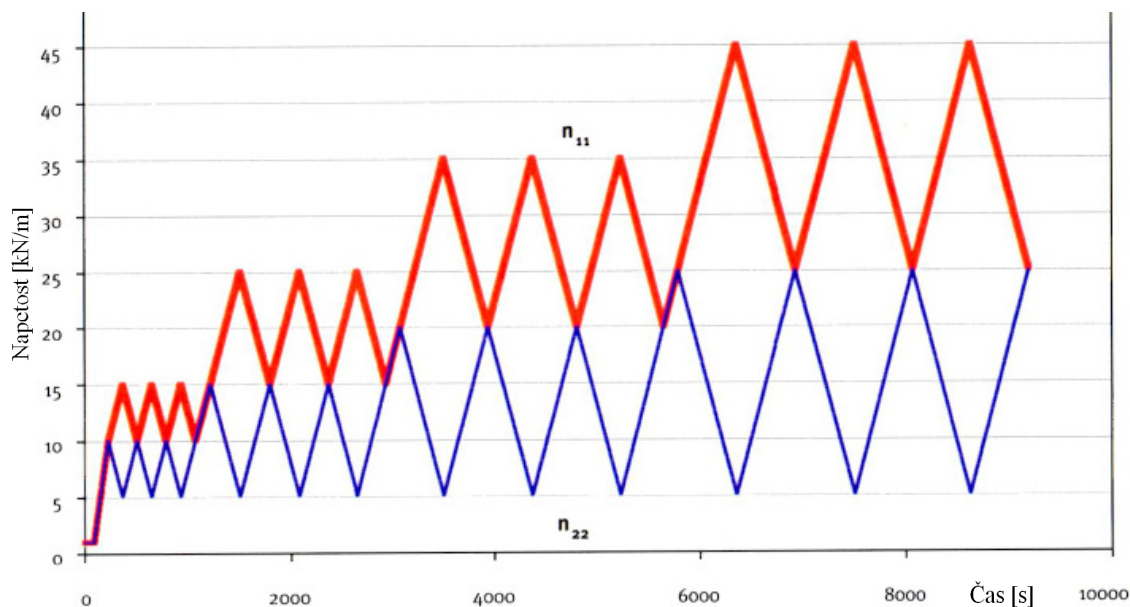
n_{22} – napetost v votkovni smeri membrane

n_{12} – strižna napetost v membrani

n'_{11} – napetost naprave v vzdolžni smeri

n'_{22} – napetost naprave v prečni smeri

Iz enačb (12) lahko razberemo, da moramo za linearno rast strižne napetosti, povečevati razliko med napetostmi med pravokotnima smerema dvoosne natezne naprave. Protokol predvideva naslednji postopek dvoosnega obremenjevanja preizkušanca (slika 44).



Slika 44: Potek obremenjevanja membrane v dvoosnem nateznem stroju pri določanju strižnega modula (Forster in sod., 2004)

Po daljši izpeljavi sledi:

$$\varepsilon_{12} = \frac{\sin \delta}{2} \approx \frac{\delta}{2} \quad (13)$$

δ – sprememba pravega kota med nitmi v membrani

Strižno silo poznamo, strižna deformacija pa je za male kote približno enaka polovičnemu raztezku preizkušanca v vzdolžni smeri dvoosne natezne naprave. Imamo torej dovolj podatkov za izračun modula G .

5.3 Natezni enoosni laboratorijski preizkus membranskih vzorcev

V želji, da bi bolj spoznal nelinearno obnašanje in materialne karakteristike membrane, sem se odločil izvesti preizkuse različnih kompozitnih membran. Na voljo sem imel aparat za enoosno natezno preizkušanje (Instron) na Oddelku za tekstilstvo Naravoslovnotehniške fakultete v Ljubljani (slika 45 desno). V en preizkus sem združil določanje deformacijskega obnašanja in natezne trdnosti različnih membran. Omenil sem že, da se realno deformacijsko obnašanje določa na dvoosnih preizkuševalnih napravah, vendar sem predvideval, da se bodo tudi pri enoosnem preizkusu, videle osnovne razlike v

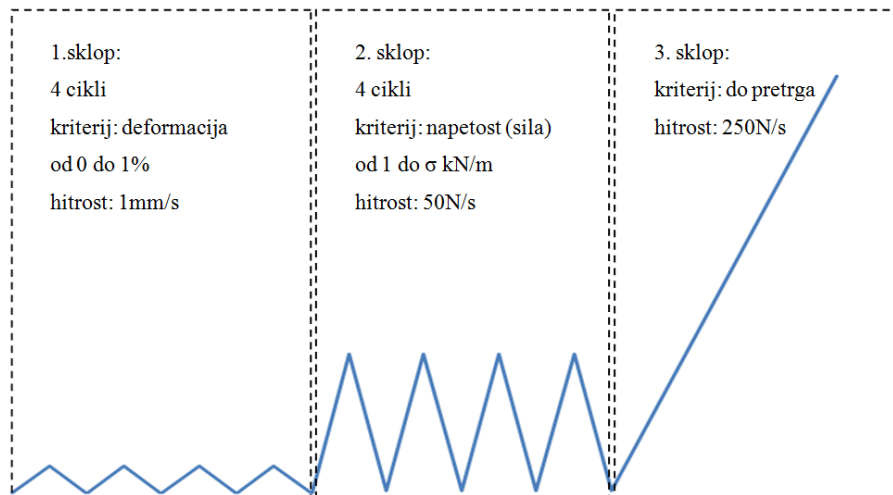
obnašanju različnih kompozitnih membran. Pridobil sem tri vzorce PET/PVC membran (tip 2, tip 3 in tip 4) in tri vzorce FG/PTFE membran (tip 2, tip 3 in tip 4) proizvajalca Verseidag ter tri vzorce PET/PVC membrane (tip 1, tip 2 in tip 3) proizvajalca Ferrari. Od vsakega vzorca sem iz različnih pozicij na vzorcu izrezal tri preizkušance v smeri osnovnih niti in tri v smeri votkovnih niti (slika 45 levo). Tako sem dobil 56 preizkušancev. Ti so bili široki 2,5 cm, njihova merilna dolžina (dolžina med čeljustmi nateznega stroja) pa je bila 10 cm.



Slika 45: Levo: Vzorci različnih membran z izrezanimi tračnimi preizkušanci; Desno: Aparat za natezno preizkušanje v laboratoriju Oddelka za tekstilstvo, NTF

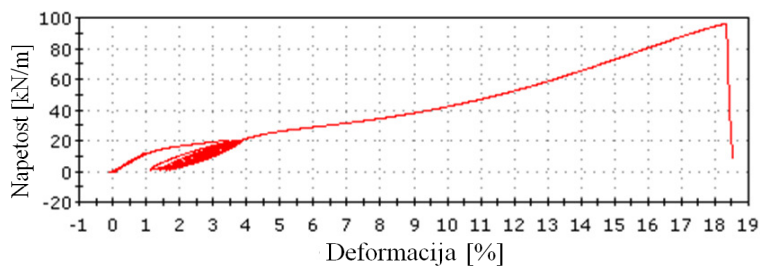
Vsak preizkus je potekal v treh sklopih obremenjevanja (slika 46). Najprej sem preizkušane v štirih zaporednih ciklih in s hitrostjo 1mm/s raztegnil do deformacije 1 % in nato z isto hitrostjo razbremenil. Tu sem želel preveriti ali se material pri majhnih deformacijah obnaša elastično ali pa že kaže znake neelastičnega obnašanja. Sledili so nadaljnji štirje cikli obremenjevanja, kjer sem preizkušane obremenil s hitrostjo 50N/s do napetosti (σ), ki so predstavljale približek največje dovoljene napetosti v membrani v realni konstrukciji (pri varnostnem faktorju 4 – 5). Nato sem preizkušane razbremenil do napetosti 1kN/m. V tem sklopu sem simuliral membrano, ki je v prečni smeri izgubila prednapetje, v vzdolžni pa je napetost narasla do najvišjih dovoljenih vrednosti. Takšne razmere bi lahko nastopile ob izredno veliki obremenitvi prednapete membranske konstrukcije s snegom ali vetrom. Na koncu sem preizkušane obremenjeval s hitrostjo 250N/s do pretrga, kjer sem meril doseženo natezno trdnost (σ_{trg}) in deformacijo ob pretrgu (ε_{trg}). Iz grafa deformacij v odvisnosti od sile v stroju oz. napetosti v preizkušancu sem, na osnovi cikličnega obremenjevanja v drugem obtežnem sklopu, določil povprečni elastični modul membrane (E) v smeri obremenjevanja in nepovratno deformacijo (ε_{pl}), ki je pri tem nastala. Rezultati so prikazani v preglednicah 2, 3 in 4.

Slika 47 prikazuje obnašanje treh različnih primerljivih kompozitnih membran v smeri osnove, ki so bile izpostavljene enakemu postopku obremenjevanja.

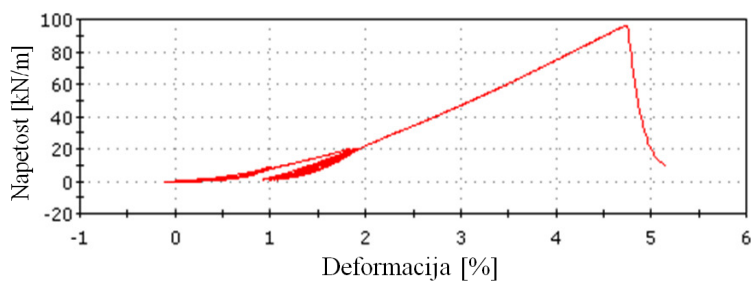


Slika 46: Potek obremenjevanja preizkušancev

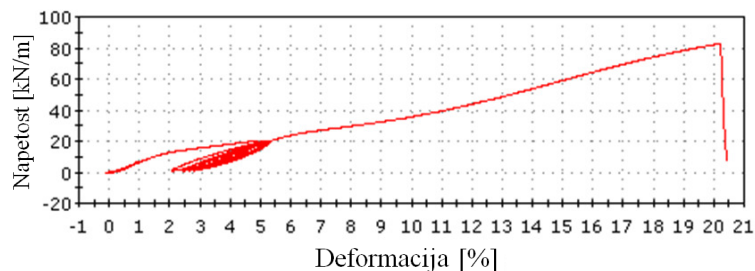
a) Verseidag B4617 Tip II



b) Verseidag B19039 Tip II



c) Ferrari Preconstraint 1002 T2 Tip II



Slika 47: Grafi obnašanja raznovrstnih primerljivih kompozitnih membran v smeri osnove

5.3.1 PET/PVC membrane Verseidag

Preglednica 2: Rezultati nateznega poizkusa PET/PVC membran Verseidag (σ – maks. napetost pri cikličnem obremenjevanju, ε_{pl} – nepovratna deformacija, E – elastični modul, ε_{irg} – nepovratna deformacija, σ_{irg} – napetost ob pretrgu, σ_{pro} – natezna trdnost, ki jo navaja proizvajalec)

Membrana	Št. preizk.	σ [kN/m]	ε_{pl} [%]	E [kN/m]	ε_{irg} [%]	σ_{irg} [%]	σ_{pro} [kN/m]
Verseidag B4617 Tip II osn. smer	1	20	1,4	833	18,3	96	88
	2		2	870	18,5	92	
	3		1,8	816	18,5	92	
Verseidag B4915 Tip II vot. smer	1	20	6,4	625	21,4	68	80
	2		6,4	625	24,2	87	
	3		6,2	656	23,5	87	
Verseidag B4617 Tip III osn. smer	1	25	1,7	1042	19,6	121	115
	2		1,75	980	20,6	124	
	3		1,25	980	20,4	129	
Verseidag B4617 Tip III vot. smer	1	25	6,8	735	26,0	108	102
	2		6,6	714	26,0	108	
	3		6,7	714	25,9	106	
Verseidag B4617 Tip IV osn. smer	1	30	1,6	1154	23,2	150	149
	2		1,8	1200	22,9	146	
	3		1,3	1250	21,7	151	
Verseidag B4617 Tip IV vot. smer	1	30	5,3	882	28,1	148	128
	2		5,1	909	28,3	152	
	3		5,2	909	28,6	154	

Togost membran (v okviru pričakovanih obtežnih nivojev – drugi obtežni sklop) se viša z višanjem trdnostnega razreda oz. tipa membrane. Prirastki elastičnega modula so pribl. 100 kN/m – 200 kN/m za vsak višji tip membrane. Togost v votkovni smeri je nižja kot v osnovni smeri; predstavlja pribl. 75 % togosti v osnovni smeri. Neelastične deformacije, ki bi nastale ob skrajnih pričakovanih obtežbah, so v osnovni smeri precej nižje kot v votkovni smeri (za pribl. 4 % – 5 % manjše). Kljub večjim napetostim pri membranah višjih tipov, se neelastične deformacije ne povečajo, kar dodatno priča o višji togosti pri le-teh. Vsi preizkušanci PET/PVC membrane Verseidag so presegli natezne trdnosti, ki jih navaja proizvajalec. Membrane višjih trdnostnih razredov so se ob pretrgu bolj deformirale, vendar so bile tudi bolj obremenjene. Deformacije ob pretrgu v smeri votka so bile 4 % – 6 % nižje kot v osnovni smeri.

5.3.2 FG/PTFE membrane Verseidag

Preglednica 3: Rezultati nateznega poizkusa FG/PTFE membran Verseidag (σ – maks. napetost pri cikličnem obremenjevanju, ε_{pl} – nepovratna deformacija, E – elastični modul, ε_{trg} – nepovratna deformacija, σ_{trg} – napetost ob pretrgu, σ_{pro} – natezna trdnost, ki jo navaja proizvajalec)

Membrana	Št. preizk.	σ [kN/m]	ε_{pl} [%]	E [kN/m]	ε_{trg} [%]	σ_{trg} [%]	σ_{pro} [kN/m]
Verseidag B19039 Tip II osn. smer	1	20	1,0	2222	4,8	96	84
	2		1,0	2222	5,0	105	
	3		0,9	2353	4,4	90	
Verseidag B18039 Tip II vot. smer	1	20	5,65	1667	9,2	68	80
	2		5,55	1600	9,2	69	
	3		5,65	1600	8,8	58	
Verseidag B18089 Tip III osn. smer	1	30	2,35	2400	7,2	127	140
	2		2,3	2400	7,2	132	
	3		2,35	2500	7,1	127	
Verseidag B18089 Tip III vot. smer	1	30	7,15	2069	12,0	98	120
	2		7,05	2222	12,2	109	
	3		7,0	2222	11,2	90	
Verseidag B18059 Tip IV osn. smer	1	35	2,0	2692	7,5	157	160
	2		1,9	2692	7,1	153	
	3		1,85	2692	7,2	160	
Verseidag B18059 Tip IV vot. smer	1	35	8,85	2059	15,1	134	140
	2		8,95	2000	15,3	133	
	3		9,0	1944	15,1	128	

Tudi pri FG/PTFE membranah se kaže izrazita razlika v mehanskih lastnostih med glavnima smerema. Z višjim trdnostnim razredom praviloma togost raste. Izjema je bila le togost membrane tipa 2 v votkovni smeri, ki je bila višja kot pri membrani tipa 3. Togosti v votkovni smeri so nižje kot v osnovni smeri; predstavljajo pribl. 75 % (v primeru membrane tipa 2 pa 90 %) togosti v osnovni smeri. Neelastične deformacije, ki so nastale ob obremenjevanju preizkušancev do realno pričakovanih napetosti, so v osnovni smeri precej nižje kot v votkovni smeri. Z večjim tipom membrane se razlika večja in znaša med 4 % in 7%. Za deformacije preizkušanca ob pretrgu veljajo podobne značilnosti, le da so tu vrednosti deformacije višje. Natezne trdnosti v osnovni smeri so malce višje kot v votkovni smeri. Zanimivo je, da večina preizkušancev ni dosegla pričakovane natezne trdnosti, kar upravičuje višje varnostne faktorje pri tovrstnih membranah.

5.3.3 PET/PVC membrane Ferrari:

Preglednica 4: Rezultati nateznega poizkusa PET/PVC membran Ferrari (σ – maks. napetost pri cikličnem obremenjevanju, ε_{pl} – nepovratna deformacija, E – elastični modul, ε_{irg} – nepovratna deformacija, σ_{irg} – napetost ob pretrgu, σ_{pro} – natezna trdnost, ki jo navaja proizvajalec)

Membrana	Št. preizk.	σ [kN/m]	ε_{pl} [%]	E [kN/m]	ε_{irg} [%]	σ_{irg} [%]	σ_{pro} [kN/m]
Ferrari Preconstraint 702 T2 Tip I osn. smer	1	15	2,9	556	19,8	61	60
	2		3,2	577	20,0	61	
	3		2,8	556	18,5	58	
Ferrari Preconstraint 702 T2 Tip I vot. smer	1	15	2,5	517	19,0	60	56
	2		2,5	517	19,9	63	
	3		2,7	536	19,7	61	
Ferrari Preconstraint 1002 T2 Tip II osn. smer	1	20	2,0	784	19,7	93	84
	2		2,1	800	20,9	99	
	3		2,2	769	20,6	96	
Ferrari Preconstraint 1002 T2 Tip II vot. smer	1	20	2,5	727	20,2	83	80
	2		2,55	702	23,1	91	
	3		2,5	690	20,7	84	
Ferrari Preconstraint 1202 T2 Tip III osn. smer	1	25	2,2	926	22,5	112	112
	2		2,2	962	22,0	114	
	3		2,6	962	22,4	113	
Ferrari Preconstraint 1202 T2 Tip III vot. smer	1	25	2,6	893	22,4	114	112
	2		2,6	833	22,4	114	
	3		2,6	833	21,9	114	

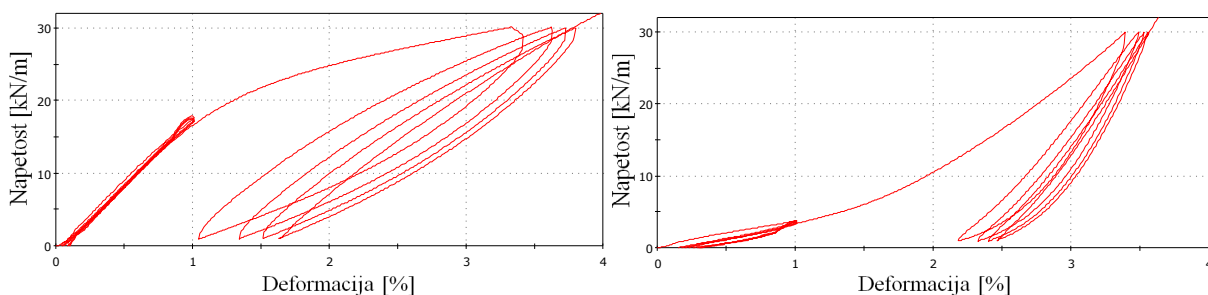
Največja značilnost Ferrari membran so zelo podobne mehanske lastnosti membrane v obeh glavnih smereh, kar se kaže tudi v rezultatih opravljenih preizkusov. Togost membran (v okviru pričakovanih obtežnih nivojev – drugi obtežni sklop) je v osnovni smeri sicer res nekoliko višja, vendar pa togost v votkovni smeri znaša pribl. 90 % osnovne togosti. Z višjim tipom membrane se viša tudi njena togost; prirastek togosti med posameznima razredoma je pribl. 150 kN/m – 200 kN/m. Neelastična deformacija, ki nastane pri najvišjih dovoljenih obtežbah, je zelo podobna pri vseh tipih membrane, znaša med 2 % in 3 %. Največja razlika v omenjeni deformaciji med glavnima smerema istega materiala je 0,4 %. Natezne trdnosti v osnovni smeri so malo višje, ali enake kot v votkovni smeri, dosežene vrednosti pa so zelo podobne tistim, ki jih podaja proizvajalec. Tudi deformacije ob pretrgu so med glavnima smerema podobne, razlika med njimi je do 1 %. Deformacije ob pretrgu so pri

membranah višjih tipov malenkostno večje (pribl. 1 % razlike med različnimi tipi membran), vendar so pri njih napetosti ob pretrgu izrazito višje, kar je dodaten dokaz o njihovi večji togosti.

5.3.4 Primerjava PET/PVC in FG/PTFE membran podjetja Verseidag

Glavna razlika med PET/PVC in FG/PTFE membranami je v togosti, namreč togost FG/PTFE membran je skoraj 3-krat večja. Primerjamo lahko PET/PVC membrano tip 2 in FG/PTFE membrano tip 2. Membrani sta bili v tokratnem testiranju izpostavljeni enaki obtežni zgodovini in imata približno enako natezno trdnost. PET/PVC membrana ima (v okviru 2. obt. sklopa) povprečno togost v osnovni oz. votkovni smeri pribl. 840 kN/m oz. 640 kN/m, primerljiva FG/PTFE membrana pa 2270 kN/m oz. 1620 kN/m. Posledica večje togosti so seveda manjše deformacije. Po ciklični obtežbi 2. obtežnega sklopa ima PET/PVC membrana povprečno neelastično deformacijo 1,7 % oz. 6,3%, medtem ko ima FG/PTFE membrana 1 % oz. 5,6 %. Razlika v deformacijah se še bolj izrazito poveča z večanjem napetosti. Ob pretrgu ta znaša povprečno 18,4 % oz. 23 % (PET/PVC) ter 4,7 % oz. 9,1 % (FG/PTFE).

PET/PVC in FG/PTFE membrane se ob obremenjevanju in razbremenjevanju obnašajo različno. PET/PVC membrane so ob nastopu obremenitve bolj toge, z večanjem le-te pa jim togost pada. Pri razbremenjevanju je ravno obratno. Ob razbremenjevanju, dokler je nivo napetosti še visok, imajo večjo togost kot pri nižjih napetostnih nivojih (slika 48 levo). FG/PTFE membrane se pri obremenjevanju in razbremenjevanju obnašajo podobno, in sicer imajo pri nižjih napetostih manjše togosti, pri višjih pa večje (slika 48 desno).



Slika 48: Levo: Obnašanje PET/PVC membrane Verseidag B4617 Tip IV; Desno: Obnašanje FG/PTFE membrane Verseidag B18089 Tip III

Med pripravo preizkušancev sem se lahko prepričal še o eni, sicer nemehanski, razliki med PET/PVC in FG/PTFE membrano. Na PET/PVC membrano se je dalo normalno pisati z alkoholnim flomastrom, medtem ko se na površino FG/PTFE membrane barva ni prijela. Iz tega sledi, da se bo umazanija težje prijela na površino FG/PTFE membrane, zato bo ta zahtevala manj vzdrževanja in dlje časa ohranila lep videz.

5.3.5 Primerjava PET/PVC membran podjetja Verseidag in Ferrari

PET/PVC membrane Verseidag imajo nosilno tkanino, ki je tkana po klasičnem postopku, medtem ko je pri membranah Ferrari ta stkana po posebnem postopku, tako da so osnovne in votkovne niti približno enako nagubane. Od tu izhaja glavna razlika med membranama. Verseidag membrane imajo precej razlike v mehanskih lastnostih glede na smer membrane, medtem ko so pri membranah Ferrari te bolj izenačene. Primerjamo lahko PET/PVC membrani tipa 2 obeh proizvajalcev, saj sta bili izpostavljeni enaki obtežni zgodovini. Membrana Verseidag ima (v okviru 2. obt. sklopa) povprečno togost v osnovni oz. votkovni smeri pribl. 840 kN/m oz. 640 kN/m, membrana Ferrari pa 780 kN/m oz. 730 kN/m. Povprečne nepovratne deformacije, nastale ob koncu 2. obtežnega sklopa, znašajo pri Verseidag membrani 1,7 % oz. 6,3 %, pri Ferrari membrani pa 2,1 % oz. 2,5 %. Pri deformaciji ob pretrgu razlike med glavnina deformacijama ostajajo podobne, pri Verseidag membrani so 18,4 % oz. 23 %, pri Ferrari membrani pa 20,4 % oz. 21,3 %. Zaradi načina izdelave, so pri Ferrari membrani deformacijske karakteristike v osnovni smeri nekoliko slabše kot pri Verseidag membrani, v votkovni smeri pa so boljše. Trdimo lahko, da gre za pri obeh membranah za podoben kompozit, iz enakih materialov, le začetna konfiguracija niti v nosilni tkanini je različna. Ko se enkrat niti zravnajo (za osnovne niti se pri Verseidag membranah to zgodi prej, pri Ferrari membranah pa kasneje; obratno velja za votkovne niti), je obnašanje praktično identično. Temu pritrjuje zelo podobna oblika grafa (σ - ϵ) in skoraj iste vrednosti natezne trdnosti.

6 PROCES NAČRTOVANJA PREDNAPETIH MEMBRANSKIH KONSTRUKCIJ

Pri načrtovanju prednapete membranske konstrukcije je potrebno najprej najti obliko prednapete membrane (in posledično celotne konstrukcije), ki je v skladu z oblikovnimi in prostorskimi zahtevami, hkrati pa ekonomična in konstrukcijsko učinkovita. Nato je potrebno preveriti odziv in varnost izbrane konstrukcije ob nastopu predvidenih zunanjih obtežb. Velikost in ukrivljenost membranske površine določata, da jo moramo izdelati iz več kosov – moramo jo skrojiti. Vse omenjene naloge so povezane z obnašanjem in varnostjo prednapetih membranskih konstrukcij, zato jih mora izvesti usposobljen inženir. Iskanje oblike, statična analiza in krojenje membrane so trije najpomembnejši koraki v procesu načrtovanja prednapetih membranskih konstrukcij.

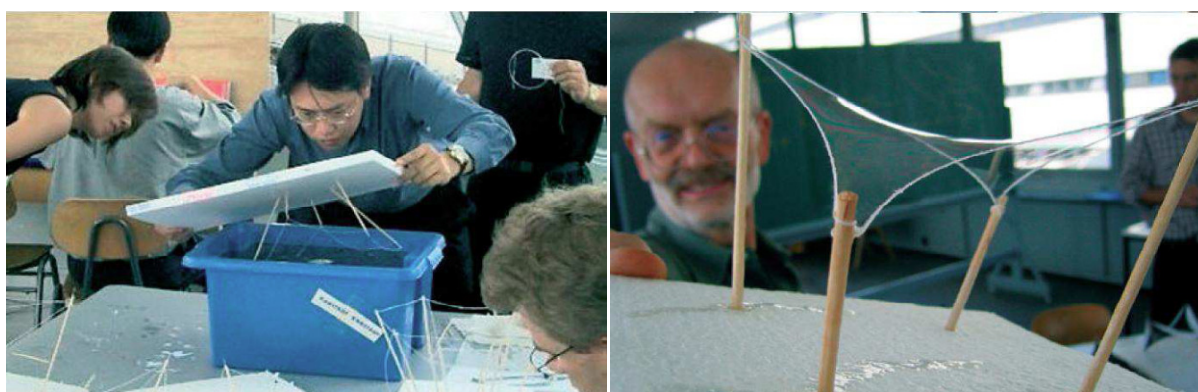
6.1 Iskanje oblike

Pri klasičnih konstrukcijah je lahko zunanja oblika, ki jo določi arhitekt, praktično popolnoma poljubna. Lahko so enostavne kvadraste ali bolj kompleksne. Nosilna konstrukcija iz togih materialov lahko sledi zunanji obliki, vendar je največkrat sestavljena iz ortogonalnih ploskovnih in linijskih elementov, na katere se pritrdi podkonstrukcija razgibane fasade. Pri membranskih konstrukcijah oblika ne more biti poljubna, saj izven svoje ravnine nima togosti in zato sledi naravnemu toku sil. Če želimo dobiti stabilno membransko površino, je treba obliko poiskati; pravzaprav je iskanje oblike najpomembnejši korak pri načrtovanju prednapetih membranskih konstrukcij. Za iskanje dobre in ekonomične oblike je poznavanje obnašanja prednapetih membranskih konstrukcij zelo pomembno, kar pomeni, da je sodelovanje med inženirjem in arhitektom ključnega pomena. Treba je sprejeti kompromise med želenim in konstrukcijsko možnim. Za razliko od klasične gradnje so prednapete membranske konstrukcije minimalistične. Materiala je malo, celotna konstrukcija pa je neposredno vidna, zato tu napake niso dovoljene. Nepravilnosti se takoj poznajo na gubah, prevelikih deformacijah in okrnjeni življenjski dobi (Forster in sod., 2004).

Za modeliranje začetne oblike obstaja več metod fizičnega (eksperimentalnega) ter računalniškega modeliranja. Danes se za načrtovanje tovrstnih konstrukcij uporabljajo skoraj izključno slednje, pred razvojem sodobnih računalnikov, pa so uporabljali fizične modele skupaj z analitičnimi metodami. Vhodni parametri za računalniško modeliranje so geometrija in vrsta podpor (fleksibilne ali toge) ter prednapetje oziroma prednapetostno razmerje v glavnih smereh. Vsaka sprememba teh parametrov rezultira v spremembi oblike površine. Tridimenzionalni modeli so pri načrtovanju teh geometrijsko kompleksnih konstrukcij nujno potrebni, saj omogočajo preprosto prostorsko predstavo, analizo ukrivljenosti in vpogled v obliko prostora pod membransko površino. V dvodimenzionalni risbi bi bilo to zelo oteženo. Vsako dobljeno obliko je treba kritično analizirati preden nadaljujemo s projektiranjem, saj ni nujno, da gre za ustrezen rešitev (Forster in sod., 2004).

6.1.1 Eksperimentalno iskanje oblike

Prvi način fizičnega (eksperimentalnega) iskanja oblike prednapetih membran je z milnično opno. Zelo znani so Freijevi milnični modeli iz 50ih let. Milnična opna tvori med danimi zaprtimi podporami minimalno možno površino. Površinska napetost je povsod ter v vseh smereh enaka. Gladina kapljev in ima vedno izotropno in homogeno površinsko napetost, milnična opna pa je le voda z obeh strani ujeta v molekule milnice (Bechthold, 2008). Opna se bo tvorila le, če bodo podpore zaprte. Te se najpogosteje naredijo iz žice, ki se jo ustrezno oblikuje ali iz vrvic, za primere fleksibilnih robnih podpor. Model s pripravljenimi podporami v celoti namočimo v milnico ter ga nato pazljivo izvlečemo, pri tem pa se med podporami tvori elegantna naravna površina, ki jo je treba vedno kritično oceniti, sploh glede zadostne ukrivljenosti (slika 49). V milničnih opnah se tvori enakomerna napetost v vseh smereh (ne moremo spreminjati razmerja napetosti v različnih smereh), pri realnih konstrukcijah pa ni vedno tako. Tak primer so konusne konstrukcije z visokimi ali nizkimi notranjimi podporami. Natezni obroč je ponavadi premajhen, da bi omogočal enakomerne napetosti, zato v teh primerih dopustimo v radialni smeri zmerno enakomerno rast napetosti v smeri notranjega obroča, v drugi, obodni smeri pa ohranimo enakomerno napetost; tako je konstrukcija bolj varna in bolj ekonomična (Forster in sod., 2004). Največja pomanjkljivost tovrstnih fizičnih modelov je trajnost. Milnične opne zdržijo le kratek čas preden počijo, zato se v tem času posname več fotografij, s pomočjo katerih se analizira oblika. Tudi teža opne je relativno velika glede na napetost v njej, zato ima ta velik vpliv na obliko. Majhni modeli, do 20cm, so dovolj natančni, pri večjih pa je vpliv lastne teže na obliko že prevelik. Pri realnih konstrukcijah je teža membrane, glede na prednapetje, zanemarljiva (Bechthold, 2008).



Slika 49: Izdelava fizičnega modela sedlaste prednapete membranske konstrukcije z milnično opno (Seidel, 2009)

Drugi način fizičnega modeliranja, pri katerem lahko kontroliramo prednapetje in razmerje prednapetja v različnih smereh, je modeliranje z elastičnimi tkaninami, npr. s tkaninami iz sintetičnih polimernih vlaken, kot sta najlon ali spandex. Tkanina je, za razliko od milnične opne, trajna in ima

majhno lastno težo glede na prednapetje, ki je lahko zelo veliko. To omogoča izdelavo večjih modelov. Gradnja modela je preprosta in hitra, zgraditi ga je mogoče v nekaj urah ali še prej, odvisno od kompleksnosti in želene natančnosti (Bechthold, 2008). Za izdelavo preprostega modela (npr. konusne konstrukcije) potrebujemo mehko podlago, na katero narišemo tloris konstrukcije in vanjo zapičimo palice ali žice, ki predstavljajo jambore ali lokove. Notranji jambori morajo biti na vrhu zaobljeni, da se tkanina ne strga. Nato napnemo kos najlona čez podpore in ga na robovih fiksiramo z risalnimi žbljički ali bucikami v podlago. Izvedemo lahko še zadnje popravke pozicij različnih podpor. Sledi izdelava robnih fleksibilnih elementov. Na membrano s flomastrom označimo njihov potek, nato pa po oznaki v tkanino všijemo vrv, jo dobro zategnemo in fiksiramo za ustrezne robne žbljičke ali bucike. Rob lahko ojačamo tudi z nanosom lepila. Posušeno lepilo predstavlja robni fleksibilen element. S škarjami nato odrežemo odvečno blago za robnimi vrvmi. Te zavzamejo končno obliko, ki je v ravnovesju z napetostmi v tkanini. Primeri na ta način izdelanih modelov so prikazani na sliki 50 levo.



Slika 50: Levo: Fizični modeli prednapetih membranskih konstrukcij iz najlona, ki so jih izdelali udeleženci konference Textile Roofs 2011 v Berlinu; Desno: Natančen fizični model iz najlona

V današnjih časih se fizični modeli izdelujejo predvsem za lažjo predstavo o izgledu konstrukcije, za oceno konstrukcije in za potrebe predstavitev, npr. investitorju (slika 50 desno). Njihova natančnost je, zaradi majhnega merila ter nerealnih dimenzij in materialov, zelo omejena, oblike pa niso idealne, zato se jih za resno analizo ne uporablja. Precizna oblika se danes določi z računalniškim modeliranjem, toda ko še ni bilo na razpolago računalnikov in ustreznih programov, so za načrtovanje prednapetih membranskih konstrukcij izdelovali izjemno precizne fizične modele. Natančno so izmerili geometrijo in jo analizirali z različnimi analitičnimi računskimi metodami (Forster in sod., 2004). Fizični modeli so dosegli vrhunec v začetku 70ih pri načrtovanju prednapete kableske strehe za olimpijski park v Münchnu. Žični model strešne konstrukcije je bil, kljub precizni izdelavi, nezadostno natančen. Inženirji so bili primorani poiskati drugo rešitev. S pomočjo analitičnih rešitev so razvili računalniški program, ki je omogočal veliko natančnost (Huntington, 2004). V naslednjih desetletjih so različni avtorji ta program še izpopolnili. Računalniški program Easy, ki ga uporabljam v 9 poglavju za

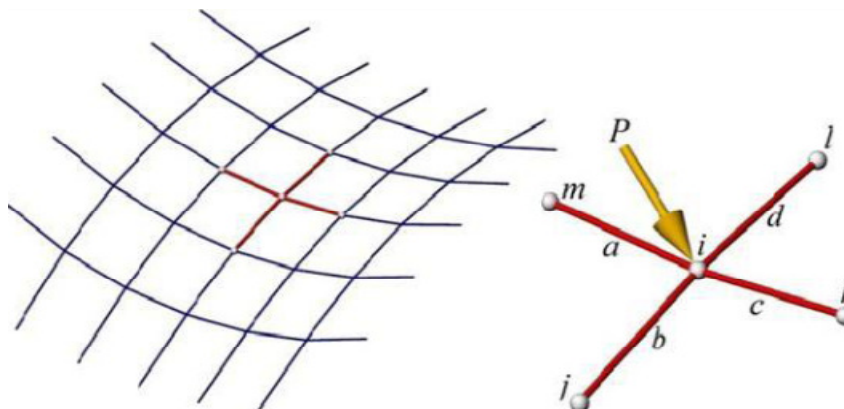
načrtovanje primerov prednapetih membranskih konstrukcij, je naslednik omenjenega programa (Easy training,...2010).

6.1.2 Računalniško iskanje oblike

Pri računalniškem iskanju oblike prednapetih membran se išče takšno obliko, da bo zadoščeno ravnotežju napetosti v membrani. Programu podamo robne pogoje, ta pa nato ustvari neko začetno površino in jo razdeli na manjše diskretne elemente. Algoritmi v programu z iterativnim postopkom poiščejo takšno geometrijo, da so napetosti v celotni membrani v ravnovesju. Pri iskanju optimalne oblike ponavadi zanemarimo lastno težo in ne upoštevamo nobenega zunanjega vpliva, temveč le želeno prednapetje. Ta način posnema obnašanje fizičnega modela, vendar pa je neprimerno hitrejši od izdelave le tega. Razvoj računalniških metod je omogočil dostop in možnost projektiranja prednapetih membranskih konstrukcij večji zainteresirani skupini, vendar pa je še vedno ključno, da dobljeno obliko kritično ocenimo in ne verjamemo slepo računalniku. Med numeričnimi računskimi metodami, ki jih uporabljajo omenjeni programi, sta najbolj razširjeni dve, in sicer metoda gostote sil in metoda dinamične relaksacije. Uporablja se tudi (redkeje) metoda končnih elementov, vendar je ta ni najprimernejša (Bechthold, 2008).

Metoda dinamične relaksacije temelji na principu, da se vsak nihajoči sistem izniha v ravnotežno stanje. Površina membrane med podporami se modelira kot mreža diskretnih palic s členkastimi vozlišči. Vsa dejanska masa (m) je predstavljena v vozlišča (lahko ji je dodana tudi fiktivna masa), vsakemu vozlišču pa je, na osnovi togosti palic, določena še togost (k) in dušenje (c). Prednapetje predstavlja zunanjo silo (F) v vozlišču. Sistem spravimo v nihanje. Po časovnih korakih računamo nove hitrost in nove koordinate vozlišč. Postopek ponavljamo, dokler se sistem ne izniha v ravnotežno lego. Tako po korakih pridemo do faze, ko je dobljena oblika v ravnotežju (Bechthold, 2008).

Metodo gostote sil bom predstavil podrobneje, saj jo uporablja tudi programski paket Easy, ki ga uporabljam v nadaljevanju pri računanju primerov. Tudi pri tej metodi je membrana modelirana iz diskretnih linijskih elementov, ki tvorijo mrežo. Vsa vozlišča so členkasta. Parametri, ki jih podamo, so koordinate fiksnih točk (vzdolž togih podpor ter na začetku in koncu fleksibilnih podpor), sile v fleksibilnih podporah (kabliah) in njihova začetna geometrija ter želeno prednapetje v obeh glavnih smereh posebej. Če želimo ravnotežje, mora biti vsota sil v vsakem vozlišču enaka nič, torej morajo za poljubno vozlišče i (slika 51) veljati ravnotežne enačbe (14) (Easy training..., 2010).

Slika 51: Vozlišče i s sosodnjimi vozlišči v mreži linijskih elementov (Easy training ..., 2010)

$$\begin{aligned}
 x: p_x &= \frac{F_a}{l_a} * (x_m - x_i) + \frac{F_b}{l_b} * (x_j - x_i) + \frac{F_c}{l_c} * (x_k - x_i) + \frac{F_d}{l_d} * (x_l - x_i) \\
 y: p_y &= \frac{F_a}{l_a} * (y_m - y_i) + \frac{F_b}{l_b} * (y_j - y_i) + \frac{F_c}{l_c} * (y_k - y_i) + \frac{F_d}{l_d} * (y_l - y_i) \\
 z: p_z &= \frac{F_a}{l_a} * (z_m - z_i) + \frac{F_b}{l_b} * (z_j - z_i) + \frac{F_c}{l_c} * (z_k - z_i) + \frac{F_d}{l_d} * (z_l - z_i)
 \end{aligned} \tag{14}$$

x_i, y_i, z_i ...koordinate vozlišča i

l_a, l_b, l_c, l_d ...napete dolžine elementov a, b, c, d

F_a, F_b, F_c, F_d ...sile v elementih a, b, c, d

$x_m, y_m, z_m, x_j, y_j, z_j, x_k, y_k, z_k, x_l, y_l, z_l$...koordinate vozlišč m, j, k, l

p_x, p_y, p_z ...zunanja obtežba v vozlišču i

Za lažje delo uvedemo novo količino – gostoto sile. Ta je definirana kot kvocient osne sile v elementu in dolžine linijskega elementa. Nova količina torej v sebi skriva napetosti in geometrijo. Namesto da predpostavimo napetosti v membrani, predpostavimo gostoto sile za vsak element, zunanje obtežbe pa ne upoštevamo. S tem, ko smo predpostavili gostoto sile za vsak element, smo dobili sistem linearnih enačb (15), kjer so neznanke koordinate vozlišč, ki je preprosto rešljiv. Imamo $3n$ enačb za $3n$ neznanek, kjer je n število nepodprtih vozlišč. Ker imajo modeli navadno veliko vozlišč, se v ozadju programa rešujejo veliki sistemi linearnih enačb. Na koncu računskega postopka dobimo koordinate vozlišč iskane oblike, ki so takšne, da je celoten sistem v ravnotežju (Easy training..., 2010).

$$\begin{aligned}x: 0 &= q_a * (x_m - x_i) + q_b * (x_j - x_i) + q_c * (x_k - x_i) + q_d * (x_l - x_i) \\y: 0 &= q_a * (y_m - y_i) + q_b * (y_j - y_i) + q_c * (y_k - y_i) + q_d * (y_l - y_i) \\z: 0 &= q_a * (z_m - z_i) + q_b * (z_j - z_i) + q_c * (z_k - z_i) + q_d * (z_l - z_i)\end{aligned}\tag{15}$$

q_a, q_b, q_c, q_d ...gostote sil elementov a,b,c,d

6.2 Statična analiza

Pri statični analizi prednapetih membranskih konstrukcij je potrebno preveriti njihov odziv na vse vplive, ki jih pričakujemo v življenjski dobi konstrukcije. Preverjamo spremembo notranjih količin in pomike oz. deformacije v membrani, sekundarnih nosilnih kablil in primarni nosilni konstrukciji ter reakcije v podporah. Pri iskanju uravnotežene oblike smo že definirali želeno prednapetje v osnovni in votkovni smeri (dejansko za iskanje oblike potrebujemo le razmerje med njima) in dobili želeno geometrijo. Za popoln model konstrukcije moramo definirati še togosti, tj. materialne lastnosti in karakteristike prerezov posameznih elementov. Najpomembnejši materialni podatek za statično analizo je elastični modul membrane. Proizvajalci membran teh podatkov ne podajajo v katalogih, ampak jih moramo sami določiti. Podatke določimo iz rezultatov dvoosne preiskave materiala.

Stalno obtežbo pri prednapetih konstrukcijah predstavljata prednapetje in lastna teža konstrukcije. Slednja pri tovrstnih konstrukcijah, za razliko od konvencionalnih konstrukcij, ne igra večje vloge in jo lahko zanemarimo. Masa membrane je odvisna od debeline membrane in se giblje med $0,6 \text{ kg/m}^2$ in $1,5 \text{ kg/m}^2$ (Membranes, 2011). V primeru večslojnih sestavov je masa seveda večja, vendar praktično redko presega 5 kg/m^2 (Huntington, 2004). Tudi nosilna konstrukcija, ponavadi jambori s stabilizacijskimi kabli, nosilni dolinski in grebenski kabli ali palični nosilci, je ponavadi minimalistična in so obremenitve zaradi lastne teže zanemarljive v primerjavi z ostalimi. Nekateri programi kot npr. Easybeam omogočajo avtomatsko upoštevanje lastne teže elementov nosilne konstrukcije, kar naredi analizo še bolj natančno. Prednapetje igra pomembno vlogo pri odzivu konstrukcije na zunanje obtežbe. Večje kot bo, večje bodo maksimalne napetosti v membrani, toda manj bo možnosti za pojav nenapetih območij oz. bodo ta manjša. Teoretično bi lahko bilo prednapetje poljubno, vendar obstajajo praktične omejitve zaradi postavitve konstrukcije. Za običajne konstrukcije je to 1 kN/m – 2 kN/m , za večje pa do 3 kN/m . V primeru zelo velikih streh lahko prednapetje doseže tudi do 5 kN/m (vendar zelo redko). Takšno prednapetje so sposobna vnesti v konstrukcijo le redka, zelo izkušena podjetja (Ströbel, osebna komunikacija, oktober 2011). Prednapetje je omejeno tudi navzdol; nenapisano pravilo je, da prednapetje naj ne bi bilo manjše od 1,3% natezne trdnosti membrane (Forster in sod., 2004).

Preglednica 5: Minimalno prednapetje PET/PVC membran (Forster in sod., 2004)

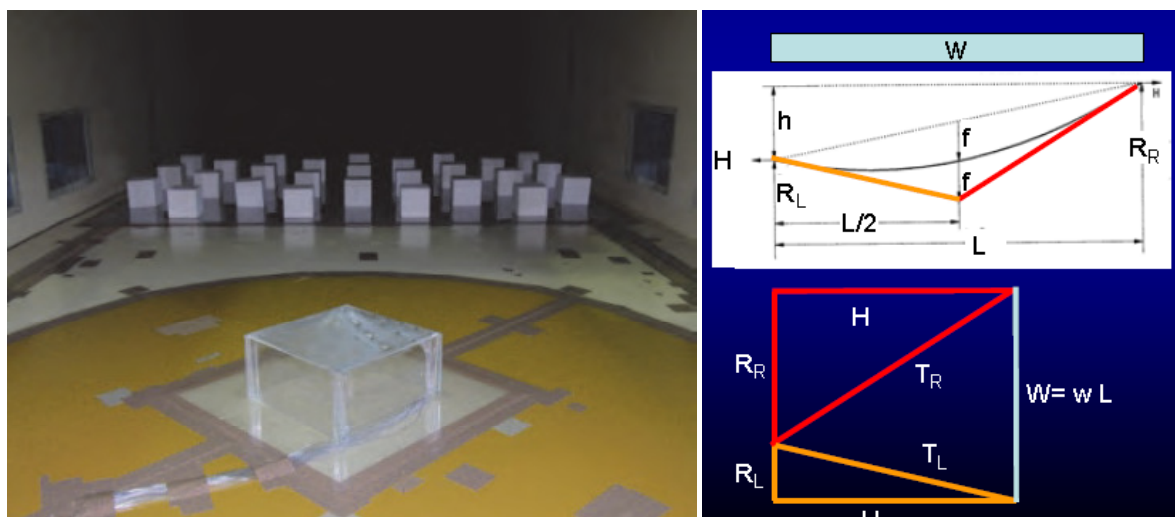
Trdnostni razred	Minimalno prednapetje
Tip 1	0,7kN/m
Tip2	0,9kN/m
Tip 3	1,3kN/m
Tip 4	1,6kN/m
Tip 5	2kN/m

Glede na to, da imajo membranske konstrukcije večinoma vlogo streh, ni predvidena klasična koristna obtežba zaradi človeške dejavnosti, eventualno pa je možno pri velikih konstrukcijah definirati razne dodatne točkovne obtežbe zaradi vzdrževalnih del. Razna oprema, table in drugi sistemi morajo imeti svojo nosilno konstrukcijo. Zaradi majhne mase je potresna obtežba, ki je pri konvencionalnih zgradbah na našem območju največkrat kritična, zanemarljiva in je ne obravnavamo. Izkaže se, da tudi temperaturna obtežba ni problematična. Obtežbi vetra in snega tako predstavljata edina resna zunanja vpliva na prednapete membranske konstrukcije (Huntington, 2004).

Maksimalni pričakovani tlak ob sunkih vetra na določeni lokaciji določimo iz merodajnih pravilnikov oz. standardov za določeno območje, pri nas je to SIST EN 1990-1-4. Težava se pojavi pri določitvi razporeditve koeficientov tlaka po površini membrane, kajti standard predpisuje razpored le za enostavne geometrije stavb, ki jih je težko primerjati s kompleksnimi površinami prednapetih membranskih konstrukcij. Poleg tega je obstaja tudi razlika med razporeditvijo obremenitve vetra na togih in fleksibilnih površinah (Huntington, 2004). Standardov posebej za prednapete membranske konstrukcije v evropskem prostoru še ni oz. so še v razvoju (Huntington, 2004), zato si za zdaj lahko pomagamo s koeficienti iz raznih priročnikov obstoječimi rezultati testov v vetrnem tunelu za podobne konstrukcije. Za velike kompleksne projekte je potrebno izdelati natančen test v vetrnem tunelu (slika 52 levo). Pri snegu večjih težav z razporeditvijo obtežbe ni, največjo pričakovano obtežbo določimo v skladu s standardom SIST EN 1990-1-3.

Prednapete membranske konstrukcije se na razne zunanje obtežbe odzovejo z relativno velikimi pomiki, sploh glede na konvencionalne konstrukcije. Trenutno povečanje ukrivljenosti deluje kot neke vrste blažilec obtežnega šoka. Večja ukrivljenost ob isti obtežbi pomeni manjše napetosti v membrani in s tem večjo varnost. Dejansko različne obtežbe ne delujejo na isto površino in napetosti v konstrukciji se ne povečujejo sorazmerno z obtežbo, torej imamo izrazito nelinearno obnašanje, ki zahteva nelinearno analizo. Ravno to je inženirjem v začetni fazi razvoja prednapetih membranskih konstrukcij povzročalo veliko težav, saj ni bilo ustrezne tehnologije za tako zahtevno analizo (Enos, 2011). Osnovno obliko so poiskali s pomočjo natančnih fizičnih modelov in nato geometrijo izmerili

(ročni merilniki, mehanske naprave za merjenje koordinat, lasersko skeniranje, fotogrametrija), da so imeli osnovo za nadaljnjo obdelavo (Bechthold, 2008). Prve statične analize so delali na osnovi ročnih izračunov z analitičnimi formulami za preproste dvodimenzionalne sisteme (slika 52 desno). Ob podani obtežbi v ukrivljenem elementu naraste natezna napetost, element se podaljša, kar rezultira večjo ukrivljenost. Ob ponovitvi postopka so zaradi večje ukrivljenosti v elementu manjši nategi in zato se ukrivljenost zmanjša. Z nekaj iteracijami je možno priti do zelo dobrih približkov pravemu rezultatu. Prvi poskusi računalniške statične analize s klasičnimi programi na osnovi končnih elementov niso upoštevali fleksibilnosti prednapetih membranskih konstrukcij in zato niso dali realnih rezultatov. Prvi specializirani programi za tovrstne konstrukcije so se začeli razvijati v 70ih letih prejšnjega stoletja (Huntington, 2004). Današnji programi za nelinearno analizo prednapetih membranskih konstrukcij so povsem enakovredni programom za statično analizo konvencionalnih konstrukcij (Enos, 2011).



Slika 52: Levo: Testiranje modela prednapete membranske konstrukcije v vetrnem tunelu (Nagai in sod., 2011); Desno: Analitične metode za izračun napetosti in sil v prednapetih membranskih konstrukcijah (Schierle, 2009)

6.2.1 Statična analiza s programom Easy

V programskem paketu Easy statično analizo izvajamo na modelu prednapete membrane, ki smo ga poiskali v procesu iskanja oblike. Temu lahko dodajamo dodatne linijske elemente (kable in jambore) in tako modeliramo še primarno nosilno konstrukcijo. Pred nadaljevanjem moramo definirati togosti posameznih elementov. Za membranske linijske elemente podamo elastična modula membrane (E) za obe glavni smeri, program pa nato avtomatsko izračuna širino membrane (B), ki jo predstavlja posamezen element in mu določi natezno togost ($E * B$). Trenutno poznamo le napete dolžine posameznih elementov pod vplivom prednapetja. S pomočjo enačbe (16) program izračuna nenapeto dolžino posameznega elementa (Easy training..., 2011). Naslednji korak je definicija zunanjih obtežb. Te se vedno kombinirajo z začetnim prednapetjem. Površinske obtežbe program avtomatsko preračuna

v točkovne sile in jih razporedi po vozliščih mreže elementov. Sedaj imamo vse potrebne podatke za statično analizo konstrukcije, tj. za izračun odziva modelirane konstrukcije na podano zunanjo obtežbo.

$$l_0 = \frac{EA}{(EA + F)} = \frac{EA}{(EA + ql)} \quad (16)$$

l_0 ...nenapeta dolžina elementa

E ...elastični modul elementa

A ...prerez elementa

F ...sila v elementu

q ...gostota sile v elementu

l ...napeta dolžina elementa

Program Easy za izračun uporablja ravnotežne enačbe (14), kompatibilnostne pogoje (17) in materialne enačbe (18). Poznamo komponente zunanje obtežbe v vsakem vozlišču, začetne sile v vseh elementih (izhajajo iz prednapetja) ter začetne koordinate vozlišč, iščemo pa nove koordinate vozlišč. Na podlagi teh sledi izračun novih dolžin elementov in novih sil v njih. Postopek iterativno ponavljamo, dokler sistem ne konvergira, tj. dokler niso spremembe koordinat vozlišč in sil v elementih poljubno majhne (Easy training..., 2011).

$$l_a = \sqrt{(x_m - x_i)^2 + (y_m - y_i)^2 + (z_m - z_i)^2} \quad (17)$$

$$F_a = EA \frac{l_a - l_{0a}}{l_{0a}} \quad (18)$$

x_i, y_i, z_i ...koordinate točke i

x_m, y_m, z_m ...koordinate točke m

l_a ...napeta dolžina elementa a

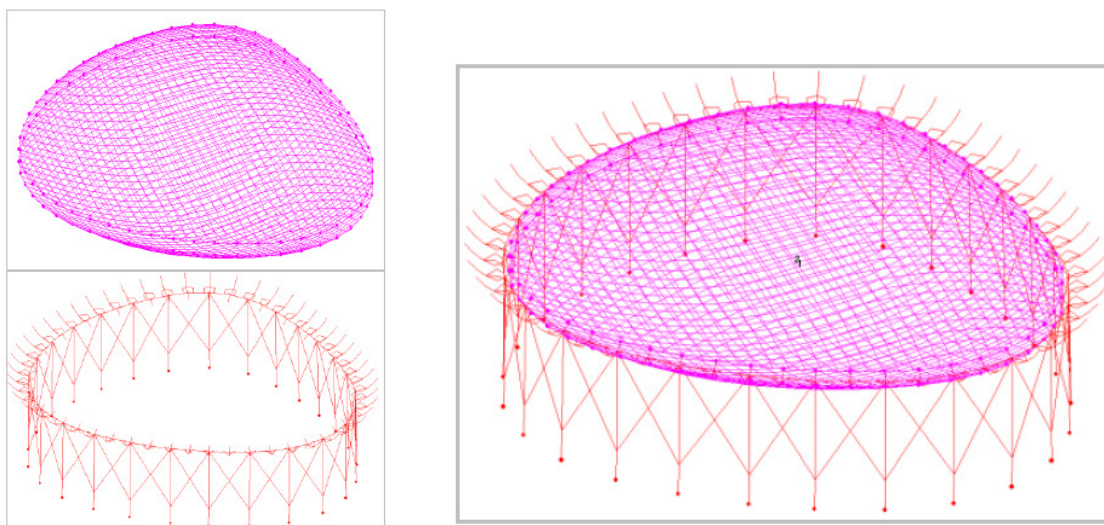
l_{0a} ...nenapeta dolžina elementa a

F_a ...sile v elementu a

Rezultate analize (deformirano obliko, sile v elementih in reakcije v podporah) program grafično prikaže. Za membrano program, poleg sil v elementih, omogoča tudi prikaz membranskih napetosti v glavnih smereh. Ostane nam le še kritična presoja rezultatov za različne možne obtežne kombinacije. Obstajata dva načina analize prednapetih membranskih konstrukcij. V prvem načinu prednapeto membrano in sekundarne robne oz. vmesne kable analiziramo neodvisno od primarne nosilne

konstrukcije z ustreznim programom. Nosilno konstrukcijo nato analiziramo v klasičnem konvencionalnem programu za statično analizo konstrukcij tako, da jo obremenimo z reakcijami iz analize prednapete membrane. Drugi način predvideva t. i. hibridni model celotne konstrukcije, torej prednapeto membrano modeliramo skupaj z nosilno konstrukcijo. Naprednejši programi omogočajo drugi način, ki da realnejše rezultate in omogoča bolj ekonomično konstrukcijo. Nosilna konstrukcija se ob obtežbi tudi nekoliko deformira (pomakne se proti membrani), torej se premaknejo prijemališčne točke membrane, kar povzroči večjo ukrivljenost membrane, ta pa manjše napetosti v membrani in s tem manjšo obremenitev nosilne konstrukcije. Efekt je odvisen od togosti nosilne konstrukcije, ima pa lahko precejšen vpliv na njene dimenzije in s tem na končni strošek celotne konstrukcije (Slika 53) (Holl in sod., 2011).

Program Easy nam omogoča dodajanje elementov (kablov, palic, nosilcev) k osnovni prednapeti membrani in s tem modeliranje nosilne konstrukcije. V primeru, da so dodani le elementi, ki prenesajo samo osne obremenitve (kabli, palice), lahko analizo izvedemo kar v osnovnem modulu za statično analizo, če pa imamo nosilni sistem, ki vključuje še upogibne elemente (nosilce), pa uporabimo kompleksnejši modul za statično analizo EasyBeam. Zaradi prednapetja so v osnovni mreži elementov že neke sile, zato je nosilno konstrukcijo potrebno predhodno načrtovati tako, da bo želena geometrijo dosegla v s prednapetjem obremenjenem stanju. Predvsem je to pomembno pri nosilnih sistemih, ki niso zelo togi in dopuščajo možnost velikih pomikov. V mislih imam predvsem nosilne sisteme s kabli. Slednji se lahko ob obremenitvi zelo raztegnejo. Pri določitvi teh nosilnih elementov je potrebno podati njihovo nenapeto dolžino. To določimo s pomočjo Hookovega zakona in predhodnim izračunom ali predvidevanjem približne sile v določenem elementu. Želimo, da ob obtežbi prednapetja (in lastne teže) membrana vpeta v nosilno konstrukcijo zavzame isto ali zelo podobno obliko kot smo jo določili v fazi iskanja oblike. Za preproste nosilne sisteme v »fiksni« točkah prednapete membrane, kot so samostojni kabli, jambor v kombinaciji s stabilizacijskimi kabli, na jambor obešen natezni obroč pri konusnih oblikah prednapetih membranskih konstrukcij, program omogoča avtomatsko modeliranje in izračun začetnih dolžin elementov, tako da sama oblika prednapete membrane v okviru celotnega modela ostane identična. Ostale zahtevnejše nosilne sisteme je potrebno vnesti ročno.



Slika 53: Levo: Ločena analiza fleksibilne (zračno podprte) membrane in podporne konstrukcije (maks. pomik podp. konstr. je 0,5 m, maks. moment v podp. konstr. je 30000 kNm); Desno: Analiza fleksibilne (zračno podprte) membrane in podporne konstrukcije skupaj (maks. pomik podp. konstr. je 0,25 m, maks. moment v podp. konstr. je 18000 kNm) (Holl in sod., 2011)

Sodobni računalniški programi za analizo prednapetih membranskih konstrukcij so zelo učinkoviti v modeliranju geometrične nelinearnosti. Na podlagi podane geometrije, materialnih lastnosti, prednapetja ter zunanjih obtežb ti natančno prikažejo potek sil in napetosti po konstrukciji ter deformirano obliko. Največja pomanjkljivost teh programov je v modeliranju materialnih lastnosti in deformacijskega obnašanja membrane (Huntington, 2004). Membrane, ki se uporabljajo v prednapetih membranskih konstrukcijah imajo izrazito nelinearno obnašanje, pa še to je odvisno od razmerja napetosti med glavnimi smermi oz. interakcije med pravokotnimi nitmi nosilne tkanine. Pri programih, kjer je membrana modelirana z mrežo linijskih elementov, kot je to v primeru programa Easy, lahko inženir določi le eno vrednost za elastični modul v osnovni in votkovni smeri. Ta vrednost predstavlja nek povprečni modul oz. povprečna togost membrane v njeni življenjski dobi. S tem predpostavimo elastično obnašanje materiala, zraven pa še izključimo interakcijo med pravokotnimi vlakni v membrani. Takšen model materiala je zelo grob približek realnemu obnašanju. Boljši model omogočajo programi, kjer je membrana modelirana s ploskovnimi elementi. Ti poleg elastičnih modulov upoštevajo še Poissonov količnik in s tem do neke mere zajamejo še interakcijo med vlakni. Tak model je boljši, vendar še ne posnema realnega obnašanja.

6.2.2 Varnostni faktorji po različnih standardih in priporočilih

Rezultat statične analize so sile oz. napetosti v elementih konstrukcije. Te vrednosti primerjamo z maksimalnimi dovoljenimi, ki jih določimo v skladu z veljavnimi pravilniki oz. standardi. Membrana lahko prevzame le natezne napetosti, zato tu ni interakcije z drugimi notranjimi količinami. Preveriti je torej treba le, če je maksimalna pričakovana natezna napetost v membrani manjša ali enaka

dovoljenim napetostim v membrani. Danes večina nacionalnih standardov in Evrokod standardi pri projektiranju konstrukcij upoštevata princip mejnih stanj. Pri tem se varnostni faktorji delno porazdelijo na obtežbe kot obtežni faktorji, delno pa na material kot materialni varnostni faktorji. Ta princip je zelo primeren za konvencionalne konstrukcije, medtem ko pa je za prednapete membranske konstrukcije, zaradi izrazite geometrijske nelinearnosti in velikih variacij v materialnih karakteristikah, primernejši princip dovoljenih napetosti, kjer je celotna varnost aplicirana na material preko zmanjšane materialne nosilnosti (Forster in sod., 2004). Pri projektiranju »konvencionalnih« delov prenapetih membranskih konstrukcij je potrebno upoštevati merodajne standarde, pri nas so to evrokodi. V nadaljevanju navajam povzetke različnih standardov oz. priporočil za projektiranje prednapetih (in pnevmatskih) membranskih konstrukcij, ki so jih predstavili Forster in sod. (2004).

Mednarodno združenje za lupinaste in prostorske konstrukcije (IASS) – priporočilo za zračno podprte membrane

Karakteristično natezno trdnost (poda proizvajalec, izkušnje iz prejšnjih projektov ali testi) delimo z varnostnim faktorjem. Končni varnostni faktor dobimo z množenjem naslednjih priporočenih koeficientov:

- neenakost materiala: 1,25 (osnovna smer) oz. 1,43 (votkovna smer)
- natančnost izračuna: 1,0 (podprto z eksperimentom) oz. 1,3
- nezanesljivost obtežbe, uporabe in izvedbe: 1,0
- nezanesljivost materiala oz. rezultatov testiranja: 1,1 – 1,3
- nepredvideni pojavi: 1,2 (min)
- degradacija membrane zaradi okolja: 2,0 – 2,4

Ob zmnožku vseh parcialnih varnostnih faktorjev dobimo končni varnostni (če predpostavimo, da računi niso podprti z eksperimentom) v razponu: 4,2 – 6,0 (osnovna smer) oz. 5,0 – 7,0 (votkovna smer).

Francoski vodič za projektiranje trajno napetih membran

Največja dovoljena napetost je določena z izrazom: $T_p = (K_q * K_e * T_{sm}) / S_f$

- T_p ...dovoljena napetost
- T_{sm} ...karakteristična natezna trdnost membrane
- K_q ...faktor kvalitete membrane: 1,0 (testirana ali certificirana membrana oz. zvar) oz. 0,8
- K_e ...faktor, ki upošteva večjo možnost napak z večanjem površine membrane:
1,0 (< 50 m²) oz. 0,8 (> 1000 m²)
- S_f ...faktor, ki upošteva stopnjo onesnaženosti okolja: 4,0 (nizka) oz. 4,5 (visoka)

Za manjše konstrukcije brez certificirane membrane in zvarov ali za velike konstrukcije s certificiranimi zvari je najmanjši skupni varnostni faktor 5,0. Pri velikih konstrukcijah z necertificiranim materialom ter v onesnaženem okolju ta naraste na 7,0.

DIN 4134 in Mintejeva disertacija: »Mehanično obnašanje spojev in membran«

Največja dovoljena napetost je določena z izrazom: $f_d = f_{tk} / (\gamma_f * \gamma_m * A_i) = f_{tk} / A_{res}$

- f_d ...dovoljena napetost
- f_{tk} ...karakteristična natezna trdnost (določena s standardiziranimi testi)
- γ_f ...obtežni faktor: 1,5 (stalne obtežbe); 1,6 (vetrna obtežba); 1,5 (snežna obtežba)
- γ_m ...materialni varnostni koeficient (za materiale potrjene s strani merodajnih institucij):
- 1,4 (membrana) oz. 1,5 (spoji)
- A_i ...kombinacija redukcijskih faktorjev:

A_0 ...upošteva redukcijo maksimalne napetosti med vzorcem pri enoosnem preizkusu in dvoosnim realnim stanjem: 1,0 – 1,2 (1,2)

A_1 ...upošteva redukcijo zaradi dolgotrajnih obtežb. Pri zvarih je faktor odvisen od njihove širine: 1,6 – 1,7 (1,5 – 3,4)

A_2 ...upošteva redukcijo zaradi onesnaženosti okolja: 1,1 – 1,2 (1,2)

A_3 ...upošteva redukcijo zaradi visokih temperatur: 1,1 – 1,25 (1,4 – 1,95)

(Vrednosti v oklepajih se nanašajo na projektiranje zvarov)

Skupni varnostni faktor je zelo odvisen od tipa obtežbe. Razponi so naslednji:

Stalna obtežba: $A_{res} = \gamma_f * \gamma_m * A_0 * A_1 * A_2 * A_3 = 4,9 – 6,4$ (6,7 – 9,5)

Obtežba vetra: $A_{res} = \gamma_f * \gamma_m * A_0 * A_2 = 2,9 – 3,2$ (3,5)

Obtežba snega: $A_{res} = \gamma_f * \gamma_m * A_0 * A_1 * A_2 = 4,4 – 5,1$ (4,9)

Priporočilo japonskega združenja za projektiranje membranskih konstrukcij (MSAJ)

Karakteristično natezno trdnost materiala delimo z varnostnim faktorjem 8 (dolgotrajne obtežbe) oz. 4 (kratkotrajne obtežbe).

ASCE Standard

Največja dovoljena napetost je določena z izrazom: $T_p = \beta * L_r * T_{sm}$

- T_p ...dovoljena napetost
- T_{sm} ...karakteristična natezna trdnost membrane
- β ...faktor, ki upošteva obtežne kombinacije: 0,27 (za večino obtežnih kombinacij)
- L_r ...faktor življenjskega cikla: 0,75 (membrane in trakovi, ki bodo zadržali vsaj 75% trdnosti skozi življenjsko dobo); 0,6 (mobilne konstrukcije)

Končni varnostni faktor za trajno postavljene konstrukcije znaša 5,0.

Za konstrukcije z izrazito dvoosnim obtežnim stanjem je potrebno preveriti, da je vsota napetosti v obeh smereh manjša kot $0,8 * \beta * L_r * (T_{sw} + T_{sf})$.

- T_{sw} ...karakteristična trgalna napetost membrane v osnovni smeri
- T_{sf} ...karakteristična trgalna napetost membrane v votkovni smeri

Zgornji standardi in priporočila za projektiranje membranskih konstrukcij upoštevajo različne parcialne varnostne faktorje in jim dajejo različno težo, vendar so končni faktorji relativno podobni. Na nosilnost membrane torej vpliva onesnaženost in ostali okoljski vplivi, točnost izračunov, zanesljivosti materiala, velikost konstrukcije, obtežni pogoji in trajanje obtežbe, nikjer pa ni omenjena lastnost širjenja raztrganin. Majhna odpornost na širjenje raztrganin je vzrok za številne porušitve prednapetih membranskih konstrukcij. Na podlagi enoosnih testiranj raznovrstnih membran dimenzije 40 cm x 100 cm (slika 54) je ugotovljeno, da znaša redukcijski faktor nosilnosti, zaradi 4 cm reza pravokotno na obtežbo, 3 do 4 (Forster in sod., 2004). Če upoštevamo negativni vpliv dvoosnega napetostnega stanja in starosti materiala na odpornost proti širjenju raztrganin, je priporočen minimalni faktor 4. Za raztrganine, ki so širše od 4 cm, je potrebno takojšnje popravilo. Nek povprečni varnostni faktor, ki ga predlagajo zgornji standardi oz. priporočila, je okoli 5. Torej, če dovolimo male raztrganine v membrani, bi bil realni varnostni faktor za preostale vplive le še $1/2$, zato je treba biti izjemno previden v ravnanju z membrano. Upoštevati moramo, da je PET/PVC membrana v primerjavi s FG/PTFE membrano bolj odporna na širjenje raztrganin, vendar pa je bolj občutljiva na vplive okolja, pri FG/PTFE membrani je ravno obratno. Varnostna faktorja za omenjana vpliva se lahko kompenzirata (Forster in sod., 2004). Glede na vse napisano predlagam varnostni faktor 5 za PET/PVC membrane in faktor 6 za FG/PTFE membrane, ki so vendarle bolj občutljive na prepogibanje.



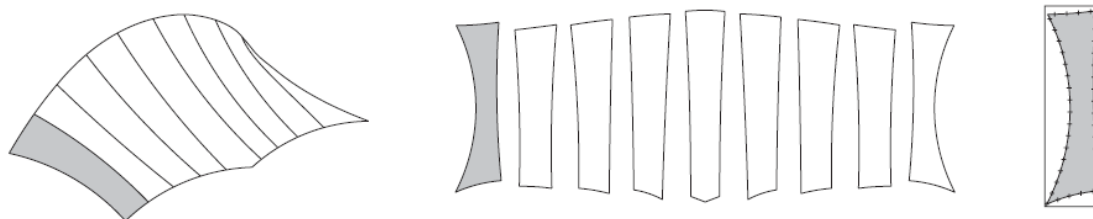
Slika 54: Test odpornosti na širjenje raztrganin v dvoosnem nateznem aparatu (Seidel, 2009)

Osnovni gradnik membranskih prednapetih konstrukcij so tudi kabli. Varnostni faktorji za dovoljene napetosti kablov so obravnavani v številnih svetovnih standardih. Evropski vodič za prednapete membranske konstrukcije priporoča skupni varnostni faktor 2,5 (Forster in sod., 2004).

V primeru, da se v procesu statične analize pojavijo območja v membrani z napetostmi, ki presegajo dovoljene, Huntington (2004) predlaga naslednje rešitve. Prva rešitev je znižanje začetnega prednapetja v smeri niti, kjer želimo znižati napetosti. To bo povzročilo povečanje ukrivljenosti v kritični smeri membrane (v pravokotni smeri se bo ukrivljenost zmanjšala) in s tem nižje napetosti zaradi zunanje obtežbe, končna napetost (vsota prednapetja in napetosti zaradi obtežbe) pa bo nižja. Drugi ukrep predvideva povečanje začetne ukrivljenosti s premikanjem fiksnih točk prednapete membrane. Pozorni moramo biti na to, da višanje teh točk zahteva tudi višje jambore in večji volumen prostora za gretje ali hlajenje, kar precej podraži konstrukcijo. Konstrukcijo podraži tudi izbira močnejšega materiala. Ta rešitev je najmanj elegantna, saj zaradi manjšega kritičnega območja ojačamo celotno membrano. Ojačitev membrane v smeri prevelikih napetosti s kablom, ki prevzame del obremenitve, je tudi ena izmed rešitev. Izbira ene ali kombinacije rešitev nam omogoča, da bo konstrukcija konstruktivno in cenovno optimizirana.

6.3 Krojenje membrane

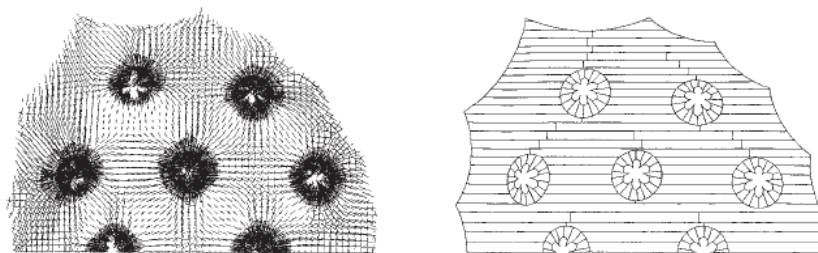
Pri procesu iskanja oblike poiščemo ustrezno obliko površine membrane pri prednapeti membranski konstrukciji, pri statični analizi pa ugotovimo razpored napetosti po konstrukciji ob nastopu raznih predvidenih obtežb. Sedaj imamo vse potrebne informacije za uspešno krojenje membrane. Membrano je potrebno izdelati iz ploskovnega membranskega materiala, kar pomeni, da moramo ukrivljeno površino projicirati na ravnino. Površine obravnavanih konstrukcij imajo negativno Gaussovo ukrivljenost, zato ne morejo biti projicirane na ravnino v enem kosu, poleg tega pa je širina materiala za proizvodnjo membrane relativno majhna in jo dimenzije konstrukcije navadno presegajo. Torej moramo membransko površino razdeliti na manjše dele, ki jih je možno izdelati in jih nato združimo v končno membrano tj. membrano skrojimo (slika 55). Podoben princip najdemo pri izdelavi oblacil. Razdelitev površine ni poljubna, temveč moramo pri tem upoštevati številne dejavnike, kot so tip in velikost oz. geometrija konstrukcije, obnašanje pri obremenitvah, lastnosti materiala, ekonomičnost izdelave in montaže ter vizualni učinek (Seidel, 2009).



Slika 55: Levo: Razdeljena površina prednapete membrane; Sredina: Načrt krojev; Desno: Izrez kroja iz membranske pole (Seidel, 2009)

6.3.1 Izbira krojev

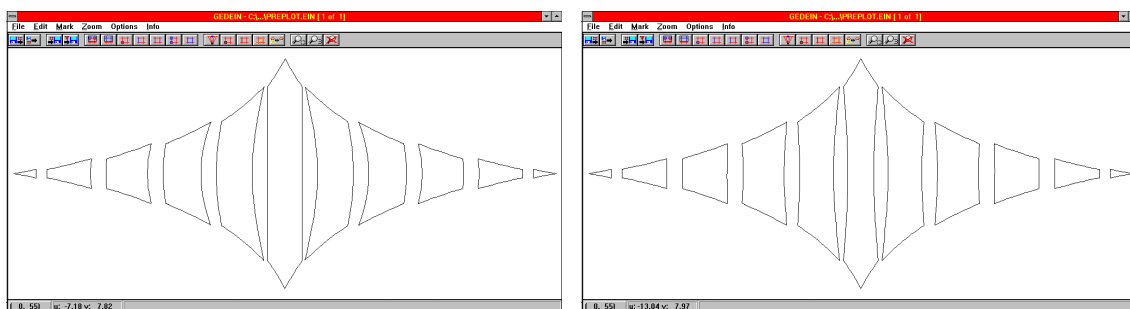
Način razdelitve membrane na posamezne dele, ki ga določi izkušeni konstrukcijski inženir, je potrebno upoštevati že v zgodnji fazi načrtovanja. Vz dolžna oz. osnovna smer posameznih delov se ponavadi ujema z glavno ukrivljenostjo oz. največjimi napetostmi v membrani pri kritičnih obtežbah, saj imajo v tej smeri večjo nosilnost. Material je v osnovni smeri tudi bolj tog, kar omogoča boljšo kontrolo deformacij pri največjih obremenitvah. V drugi smeri, kjer imamo zware med posameznimi kroji, pa imamo manjše obremenitve. Pri konusnih oblikah je tipična radialna razporeditev krojev, pri ostalih pa vzporedna. Slednja omogoča precej večji izkoristek materiala in boljši razpored napetosti kot radialna razporeditev. V določenih primerih s kombinirano obliko površine membrane je možna tudi kombinirana razporeditev (slika 56). S krojenjem določamo razpored glavnih smeri v materialu in s tem razpored togosti membrane, kar vpliva na potek napetosti in deformacij ob raznih vplivih. Glavne smeri se morajo čim bolj ujemati z glavnimi smerni membrane v modelu za statično analizo (Seidel, 2009).



Slika 56: Levo: Potek glavnih napetosti v membranski strehi; Desno: Razpored krojev po površini (Seidel, 2009)

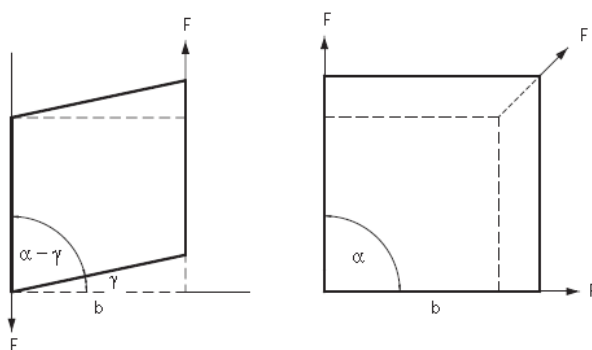
V začetni fazi razvoja prednapetih membranskih konstrukcij so iskanje oblike in krojenje membrane izvajali na fizičnih modelih. Danes si pri krojenju pomagamo z računalniškimi programi, ki delujejo na podlagi zapletenih algoritmov (Gründig, 1996). Razrez ukrivljene površine je možno opraviti na več načinov. Nekateri sistemi uporabljajo črte, ki so presek površine z vertikalno ravnino. Slaba stran tega načina so t. i. banana kroji (slika 57 levo), ki z vidika izkoristka materiala in razporeditve napetosti niso optimalni. V splošnem je najbolj učinkovita in najbolj razširjena metoda razreza po geodetskih črtah (slika 57 desno). Geodetske črte so neke vrste posplošitev pojma premice za ukrivljene prostorske ploskve (Gründig, 1996). V vsaki točki geodetske črte je njen drugi odvod pravokoten pa površino v tej točki, njen prvi odvod pa konstanta (Milin Šipuš, 2011). Geodetska črta predstavlja (vsaj lokalno) najkrajšo razdaljo na ukrivljeni ploskvi med dvema poljubnima točkama. V programu Easy je potrebno določiti dve točki na nasprotnih robovih membrane, program pa nato med njima poišče geodetsko črto. V primerih, ko čista geodetska črta ni najprimernejša izbira (npr. pri sferičnih oblikah pnevmatskih konstrukcij, ker je težko kontrolirati širino kroja v sredini, ali npr.

zaradi posebnih oblikovnih zahtev), jo lahko omejimo z določitvijo vmesne fiksne točke na površini in dobimo t. i. polgeodetsko črto (Gründig, 1996).



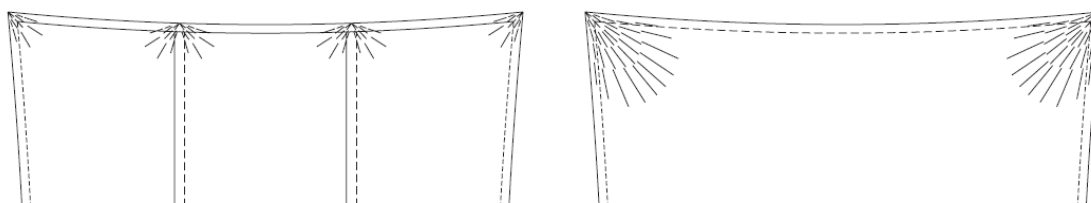
Slika 57: Levo: Kroji, dobljeni s presekom površine z vertikalnimi ravninami; Desno: Kroji, dobljeni z razdelitvijo površine z geodetskimi črtami (Gründig, 1996)

Ko imamo določene posamezne dele površine, je potrebno vsakega izmed njih sploščiti oz. projicirati na ravnino. Seidel (2009) navaja dve vrsti projekcij, ki sta odvisni od materiala. Prva je projekcija, kjer se ohranjajo dolžine, spreminja pa se kot (slika 58 levo). Tu ni dodatnih osnih napetosti (ali so zelo majhne), pojavijo pa se strižne deformacije. Ta projekcija je primerna za tehnične tkanine, ki imajo majhno strižno togost. Paziti moramo le, da so strižne deformacije dovolj majhne, da se med pravokotnimi nitmi ne pojavi večji odpor. Drugi način projekcije, kjer se ohranjajo koti, spreminjajo pa dolžine (slika 58 desno), je primeren za tehnične folije. Tu se pojavijo dodatne nehomogene napetosti v materialu. Pri projekciji dvojno ukrivljene ploskve vedno pride do določenega popačenja. Popačenje materiala se najbolj izrazi v ogliščih kroja, tam se zato pojavijo tudi nezaželene dodatne napetosti. Kritični so široki kroji močno ukrivljenih membran, zato jih je bolj primerno nadomestiti z več ožjimi kroji, da se popačenje razporedi (slika 59). Torej večja kot sta ukrivljenost in relativna širina kroja, večje bo popačenje. Za negativno Gaussovo ukrivljene površine so značilni kroji z navznoter ukrivljenimi robovi oz. konkavnimi robovi (Seidel, 2009). Pri manj ukrivljenih krojih je ekonomično in praktično enega izmed stranskih robov, ponavadi daljšo geodetsko črto, projicirati na ravnino kot premico.



Slika 58: Levo: Projekcija, kjer se ohranjajo dolžine; Desno: Projekcija, kjer se ohranjajo pravi koti (Seidel, 2009)

Tudi lastnost materiala, predvsem njegova togost, igra veliko vlogo pri krojenju membrane. Bolj je membrana prednapete membranske konstrukcije toga, bolj zahteva preciznejše krojenje za doseg enakomerne razporeditve napetosti. V splošnem velja, da je krojenje površine iz FG/PTFE membran mnogo zahtevnejše od krojenja iz PET/PVC membran. Poleg samega materiala pa na togost vpliva tudi ukrivljenost, kajti bolj ukrivljene površine so bolj toge. Pri bolj fleksibilnem materialu se konice napetosti znižajo, pri tem pa nastanejo le manjše deformacije. Torej je tak material manj zahteven za krojenje. Velike prednapete membranske konstrukcije je v splošnem mnogo lažje krojiti, saj je glede na dolžino širina vsakega kroja relativno majhna. Razmerje med dolžino in širino krojev je bolj neugodno, zato se pojavi večja motnja pri projekciji ukrivljene površine na ravnino, s tem pa je oblikovanje krojev težje. Pri manjših konstrukcijah en kroj predstavlja velik del celotne površine. Res pa je, da potrebujejo manjše konstrukcije tudi manj tog material, kar gre v prid pri oblikovanju krojev. V primeru prevelikega popačenja pri projekciji, je potrebno zožiti kroje, kar pa pomeni več rezanja in zvarov, ki pa so dragi in imajo večjo togost, kar predstavlja dodatne komplikacije pri prednapenjanju. Potrebno je najti kompromis (Seidel, 2009).



Slika 59: Pri bolj razdeljeni površini je popačenje v kotih posameznih krojev manjše (Seidel, 2009)

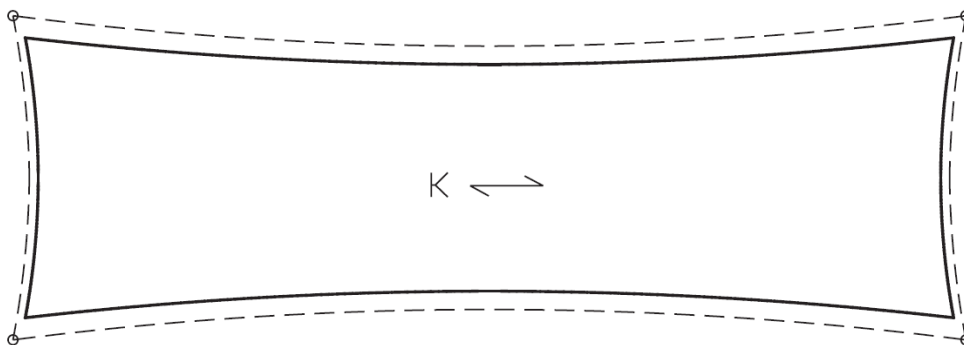
Varjeni preklopni spoji sosednjih krojev membrane so, zaradi zmanjšane svetlobne prepustnosti (večplastni sloji), zelo dobro vidni. Upoštevanje vseh konstruktivnih zahtev ponavadi rezultira v zelo estetski vzorec linij zvarov, ki nakazuje potek napetosti po membrani (Gründig, 1996). V primeru, ko želimo drugačen vizualni učinek (npr. arhitekturna zahteva), je potrebno preveriti ali se napetosti v prednapeti membranski konstrukciji ujemajo z glavnimi smermi tkanine v membrani. V primeru velikega odstopanja dobimo velike strižne deformacije in velike raztezke, kajti membrana je v smeri izven glavnih smeri najmanj toga. Preveriti je treba, če material to prenese.

Pri krojenju je potrebno vseskozi imeti v mislih način montaže in napenjanja membrane. Razporeditev krojev vpliva na proceduro napenjanja, zato je potrebno preveriti potrebno število in kapaciteto opreme ter prostorske danosti za namestitev ustrezne opreme, kar pa močno vpliva na končno ceno konstrukcije, zato je potrebno najti optimalno varianto za čim cenejši končni produkt. Ponavadi gre tu za odločitve, v smeri katere od glavnih ukrivljenosti prednapete membranske konstrukcije bomo postavili osnovno oz. votkovno smer krojev. Pri napenjanju v splošnem prvenstveno raztezamo bolj

kompenzirano votkovno smer, zato je glavna natezna opreme postavljena tako, da razteza to smer (Seidel, 2009).

6.3.2 Kompenzacija krojev

Razdelitev in projekcija tridimenzionalne površine na ravnino pa nista edini problem pri izdelavi krojev membrane, temveč je potrebno upoštevati tudi raztezek tkanine ob nastopu prednapetja. Mi poznamo obliko prednapete membranske konstrukcije le v prednapetem stanju, ne pa v nenapetem. Ob izdelavi moramo torej kroje ustrezno zmanjšati, da bodo ob predvidenem prednapetju imeli želeno obliko, moramo jih kompenzirati (slika 60). Membrane imajo največkrat različne lastnosti v obeh glavnih smereh. Bolj toga osnovna smer se ponavadi ob prednapetju manj raztegne (je manj kompenzirana) kot votkovna smer. Kompenzacijski faktorji se gibljejo do 10 % (Bechthold, 2008), zaradi interakcije med nitmi v tkanini, pa so lahko tudi negativni. V tem primeru govorimo o dekompenzaciji. Na robovih, kjer imamo membrano pritrjeno na kabel ali fiksen rob oz. ojačeno s kablom, trakom ali zvarom, je togost neprimerno večja, zato je v tem delu kompenzacija majhna ali nič, nato pa postopoma raste proti notranjosti kroja. Ob upoštevanju zelo nelinearnega obnašanja membrane, lezenja ter relaksacije, lahko zaključimo, da je kompenzacija krojev zelo kompleksna naloga. Zaradi pomanjkanja materialnih podatkov je ne moremo povsem točno modelirati (Gründig, 1996).



Slika 60: Kompenziran membranski kroj pred vnosom napetosti (črtkano je označena oblika ob nastopu predvidenega nivoja napetosti) (Seidel, 2009)

6.3.3 Računanje krojev s programom Easy

Krojenje membrane se v okviru programa Easy izvaja v posebnem modulu za izdelavo krojev. Kot izhodišče se uporabi struktura (sestav diskretnih točk in vezi, med katerimi so definirane trikotne ploskve), ki smo jo poiskali v okviru iskanja oblike. Definirati moramo geodetske črte po površini membrane, s katerimi razrežemo membrano na več kosov. Določimo dve točki na različnih robovih membrane, nato pa program avtomatsko kreira vmesno geodetsko črto. Določiti moramo še, katera

izmed geodetskih črt bo v projekciji ravna. Program omogoča hiter izračun širine za vsak kraj. Geodetske črte predstavljamo tako dolgo, dokler nismo zadovoljni z njihovim potekom in širino posameznih krojev. Za preproste primere program omogoča samodejno kreiranje geodetskih črt (za radialen razpored in preprost vzporeden razpored). Nastale diskretne površine so modelirane enakovredno osnovi, torej s točkami, vezmi in trikotniki. Naslednji korak je projekcija vsakega dela membrane na ravnino. Vsi trikotniki se preslikajo na osnovi vgrajenih algoritmov. Določimo, ali bo se bo s smerjo osnovnih niti membrane ujemal ravni rob kroja ali sredinska črta med daljšima robovoma. V primeru, da ne želimo ravnega roba, program omogoča združitev dveh sosednih krojev v ravnem robu. Dobljene kroje je potrebno še kompenzirati. Program omogoča konstantno in nekonstantno kompenzacijo. Prva je enostavna, določimo le kompenzacijski vrednosti za obe glavni smeri. Pri nekonstantni kompenzaciji podamo za vsako izmed glavnih smeri različni kompenzacijski vrednosti za rob ob ogliščih in v notranjosti. Kompenzacija se izvede tako, da se v težišče kroja postavi izhodišče ortogonalnega koordinatnega sistema, nato pa se obe koordinati zmanjšata oz. povečata za ustrezen delež kompenzacije v smeri posamezne koordinate (Easy training..., 2010). Program ponuja možnost povečanja ali zmanjšanja materiala pravokotno na rob za potrebe izdelave robnih detajlov. Ko imamo za vsak rob vsakega kroja ustrezno kompenziran, program izriše načrte za vsak posamezen kraj. Vsak dobljeni kraj obdajata dva roba, na osnovi geodetskih črt, ki predstavljata zvar ali kakšen drug stik med sosednimi deli membrane. Ostali robovi so zunanji ali notranji robovi membrane, kateri bodo preko robnega detajla priključeni na nosilno konstrukcijo.

7 DETAJLI

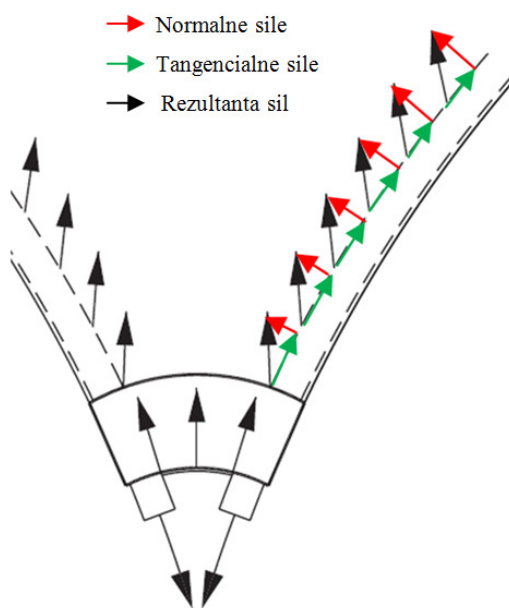
Pri membranskih konstrukcijah srečamo elemente in materiale z različnimi karakteristikami in funkcijami, ki pa morajo delovati skupaj, da tvorijo učinkovito celoto. To jim omogočajo spoji. Čeprav so spoji relativno majhni napram celotni konstrukciji, imajo izredno pomembno vlogo. Dobro premišljen in izveden detajl spoja je osnova za dobro obnašanje konstrukcije skozi celotno življenjsko dobo. Detajle je treba načrtovati sočasno s celotno konstrukcijo (Forster in sod., 2004), že pri računalniškem modelu, kjer so elementi idealizirani (linijski element modeliramo kot os, membrana se razteza neposredno do kabla, robna kabla se stikata v točki,...), je treba imeti v mislih kakšen detajl spoja bi uporabili na določenem mestu. V zadnjih 50ih letih so razvili številne detajle spojev, kljub temu pa je to relativno novo in neraziskano področje, sploh v primerjavi s spoji pri konvencionalnih jeklenih konstrukcijah. Slednji so izpostavljeni neprimerljivo manjšim deformacijam ter največkrat povezujejo elemente pravilne geometrije, kar za spoje prednapetih konstrukcij ne velja (Huntington, 2004). Detajli spojev dejansko predstavljajo del ukrivljene površine, kolikšen del je odvisno od njihove velikosti. Treba je stremeti k temu, da so detajli preprosti in minimalni, ter da se osnovni elementi (membrana, kabli,...) čim bolj približajo sistemski liniji ali točki iz modela. Med življenjsko dobo je membrana izpostavljena raznim zunanjim obtežbam, ki povzročajo velike deformacije in spremembe njene oblike, zato mora spoj prenesti vse nanj delujoče sile in zagotoviti potrebne prostorske stopnje, tj. pomične in rotacijske kapacitete (Forster in sod., 2004). Da bo svojo funkcijo opravljal skozi celotno predvideno dobo, ga je treba ustrezno zaščititi pred vremenskimi vplivi.

Detajli so ključni element v fazi postavitve konstrukcije, saj ponavadi prek njih vnašamo prednapetje v membrano, omogočajo pa tudi fine nastavitve in kasnejše dodatno prednapenjanje. Poleg same funkcije je treba pri načrtovanju detajlov upoštevati še njihovo izvedljivost, vizualno podobo in ceno. Detajl spoja mora biti možno izvesti in ga nato montirati na konstrukcijo. Izgledati mora skladno s celotno konstrukcijo, saj so pri prednapetih membranskih konstrukcijah navadno vidni (Huntington, 2004). Slediti mora filozofiji celotne konstrukcije, torej mora biti minimalen, vsebovati le najnujnejše komponente, in prikazovati tok sil oz. mu slediti. Vse napisano je seveda povezano s stroški. Izdelava detajlov predstavlja precejšen del celotnega stroška, zato jim je smotrno posvetiti veliko časa, vendar pa tudi tukaj velja nenapisano pravilo, da so preprosti detajli navadno najboljši (Forster in sod., 2004).

Pri prednapetih membranskih konstrukcijah ločimo več skupin detajlov. Najosnovnejše skupine so detajli na membranskem robu, detajli v ogliščih membrane, detajli visokih ali nizkih podpor znotraj membrane. Skozi razvoj prednapetih membranskih konstrukcij so se razvili številni tipični detajli, zato je pri načrtovanju detajla spoja zelo dobro pregledati obstoječo paleto detajlov. Navadno imamo za en problem več različnih rešitev med katerimi lahko izbiramo. Poglejmo si tipične detajle za različne skupine detajlov spojev.

7.1 Detajli na membranskem robu

Glede na upogibno togost robnega elementa imamo fleksibilne in toge robne detajle spojev. Pri fleksibilnih gre najpogosteje za pritrjevanje membrane na jekleno vrv ali kabel, pri togem pa na tog element primarne nosilne konstrukcije. Ponavadi se fleksibilen robni spoj pojavlja na robovih membrane odprtih konstrukcij, togi spoj pa pri pokrivanju zaprtih prostorov, vendar to ni pravilo (Huntington, 2004). Fleksibilni robovi se ob nastopu napetosti v membranski površini, zaradi zunanjih vplivov, dodatno ukrivijo in zmanjšajo ekstremske napetosti, kar omogoča izbiro šibkejšega membranskega materiala. Pri spojih s togim elementom prilagajanje ni mogoče, zato je potrebna izbira močnejše membrane, kar ni v skladu z minimalizmom membranskih konstrukcij (Seidel, 2009). V odvisnosti od geometrije roba, smeri niti v membrani in trenutne napetosti v membrani, na rob delujejo normalne in tangencialne sile (slika 61), ki jih mora ta prevzeti in prenesti do naslednjih elementov (Seidel, 2009).

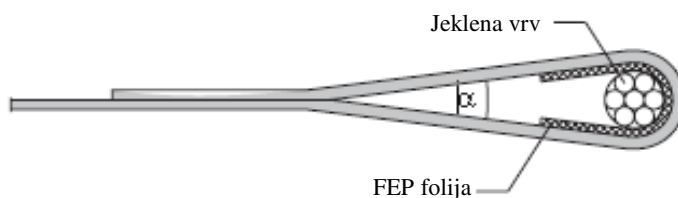


Slika 61: Normalne in tangencialne napetosti na robu membrane

7.1.1 Fleksibilni robni detajli

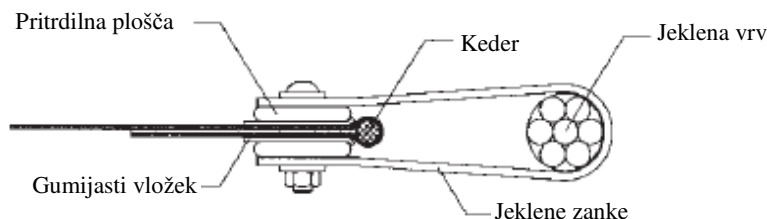
Najenostavnejši detajl fleksibilnega roba je nazaj zavihan in zavarjen rob, skozi katerega se uvleče kabel. V nastali žepek se navadno vstavi tudi zaščitna plast (npr. FEP folija), ki prepreči poškodbe membrane zaradi drgnjenja kabla (slika 62). Možno je tudi izdelati membranski zavihek posebej in ga nato privariti na membrano (Seidel, 2009). Če naredimo enakomeren preprost zavihek vzdolž roba, bi se, zaradi ločne ukrivljenosti kabla, naredile gube. Za ta problem imamo dve rešitvi. Ena so zareze na spodnjem delu zavihka, katerih gostota je odvisna od ukrivljenosti, druga rešitev pa je natančno

oblikovanje in krojenje ukrivljenega zavihka (Forster in sod., 2004). Tangencialne sile, ki se pojavijo vzdolž roba prevzamemo s trenjem med kablom in membrano, toda običajno to ni dovolj, zato ob zavihku ali v zavihku vzdolž celotnega roba navarimo ali prišijemo dodaten poliestrski tekstilni pas, ki prevzame te sile in prepreči zdrs membrane po kablom (Seidel, 2004). Normalne sile v zvaru zavihka povzročajo trenje in cepilne napetosti. Slednje so odvisne od kota pod katerim se zavihku odpira, kot pa določata premer robnega kabla in širina žepka. Testi so pokazali, da mora biti omenjeni kot manjši od 15° za PET/PVC membrane in manjši od 6° za FG/PTFE membrane (Seidel, 2009). Zaradi nevarnosti, da kabel poškoduje površino, ta detajl ni primeren za FG/PTFE membrane, je pa zelo primeren za PET/PVC membranske konstrukcije do razpona 20 m. Pri večjih sistemih so sile za takšno konfiguracijo prevelike (Forster in sod., 2004).



Slika 62: Fleksibilen robni membranski detajl s kablom v membranskem zavihku (Seidel, 2009)

Pri drugem tipičnem spoju kabel ostane izven membrane. Membrana ima prefabriciran rob, t. i. keder zaključek, ki je vpet Pritrdilna plošča med seboj privijačenih togih plošč, te pa so v enakomernih intervalih z zankami pritrjene na kabel (slika 63). Keder zaključek se naredi strojno s tesnim varjenjem roba membrane okoli kedra, tj. linijskega elementa krožnega prereza s premerom 5 mm – 12 mm. Za keder se uporabi gumijast oz. plastičen material ali pa aluminijasta vrv. Napetosti iz membrane se prenašajo delno tudi s trenjem med membrano in ploščami, vendar se večina obremenitve prenese na plošče preko pritiska kedra ob njih, zato mora keder ležati neposredno ob ploščah. Plošče morajo imeti zaobljene robove, da ne poškodujejo membrane, med membrano in ploščami pa se vstavi še zaščitna gumijasta plast. Plošče ne smejo biti prešibke, da se ob pritisku ne zvijejo, keder pa se izvleče. Dolžina plošč je odvisna od ukrivljenosti roba, plošče morajo biti blizu, vendar ne preveč, da se ne bi pri pomikih ovirale. Luknje za vijake morajo biti v membrani že vnaprej izdelane, saj se vijak ne sme dotikati membrane, ker lahko pride do pretrga tkanine. To velja še posebej za krhke FG/PTFE membrane. Še boljše rešitev pa je, da so plošče oblikovane tako, da se keder ujame na začetku znotraj plošč, tako da bi potrebno luknjati membrane. Plošče so lahko med seboj povezane z gibljivim elementom (slika 66 d) ali pa so spodnje plošče zamaknjene glede na zgornje, ta tvorijo gibljiv, vendar osno tog sistem, kar omogoča prevzem tangencialnih sil. Takšen detajl je neprimerno dražji od prej opisanega, uporablja se za FG/PTFE membrane in za PET/PVC membrane z velikimi razponi (Seidel, 2009).



Slika 63: Fleksibilen robni membranski detajl s ploščicami, pritrjenimi na zunanji kabel (Seidel, 2009)

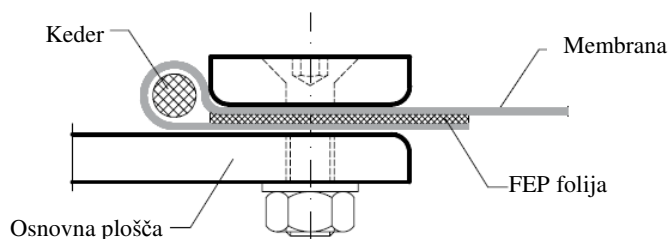
Če so razponi in robne sile majhne, lahko vlogo nateznega robnega elementa namesto kabla prevzame tekstilni pas, ki ga prišijemo ali privarimo na rob membrane (slika 64). Pas je treba dodatno zaščititi pred UV žarki in biološkimi vplivi, saj v osnovi nima dovolj močne zaščite. To storimo z dodatno plastjo membrane, s katero ga prekrijemo ali pa z zaščitnim nanosom. Takšen preprost detajl je rezerviran le za PET/PVC membrane, kajti s šivanje pasu bi lahko poškodovali občutljivo zaščitno plast FG/PTFE membran in omogočili dostop vlage do steklenih vlaken (Forster in sod., 2004).



Slika 64: Fleksibilen robni membranski detajl s tekstilnim pasom (Seidel, 2009)

7.1.2 Togi robni detajli

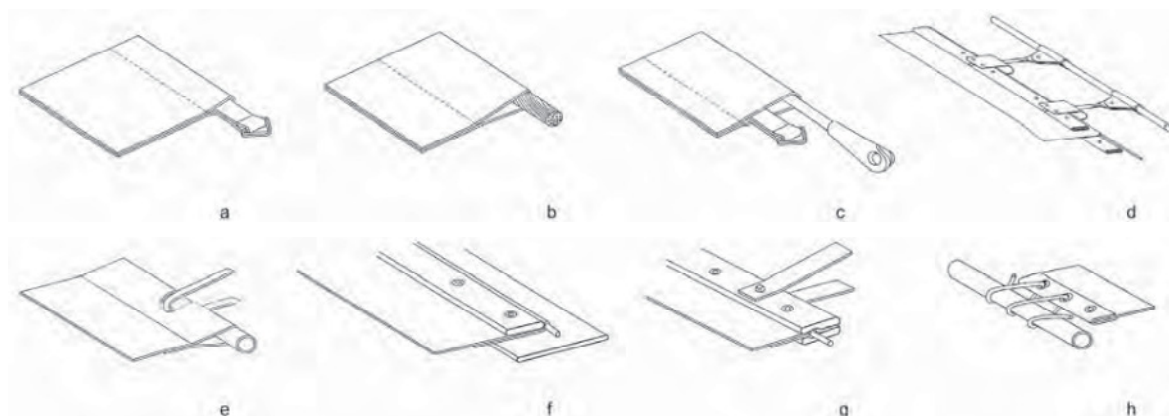
Membrano na nek tog element najenostavneje pritrdimo z uporabo ploščic (slika 65). Membrana mora imeti keder rob. Princip je podoben, kot pri že opisanem fleksibilnem detajlu, le da tu pritrdimo plošče samo enostransko, vlogo druge plošč na drugi strani pa prevzame tog element. Navadno so primarni togi elementi, na katere priključujemo membrano ravni, zato so lahko plošče daljše, tudi do 1 m, če pa temu ni tako, pa dolžino plošč prilagodimo, da lahko tvorimo ustrezno krivuljo. Tak detajl prevzame normalne in tangencialne napetosti. Dražja, vendar bolj elegantna oblika takšnega detajla je, da membrano fiksiramo v posebne keder tirnice, ki so pritrjene na osnovni tog element (Seidel, 2009).



Slika 65: Tog robni membranski detajl pritrjen s ploščicami (Seidel, 2009)

Tudi detajl z zavihkom lahko prištejemo med toge robne detajle, če namesto fleksibilnega kabla v zanko vstavimo togo cev (slika 66 e). Vse ostale značilnosti detajla so enake kot pri fleksibilnem robu s kablom v membranskem zavihku (Forster in sod., 2004).

Zanimiv detajl togega robnega spoja je tudi spoj z vrvjo. Membrano na robu opremimo z obročki, skozi katere membrano enakomerno zvežemo s togim elementom. Pri tem tvorimo »cik-cak« vzorec (slika 66 h). Trikotna oblika vezenja omogoča, poleg normalnih sil, tudi prevzem tangencialnih sil (Forster in sod., 2004).



Slika 66: Različni tipi robnih membranskih spojev: a) s tekstilnim pasom; b) s kablom v zavihku; c) s kablom in tekstilnim pasom v zavihku; d) s ploščicami prilepljenimi na kabel; e) s cevjo v zavihku prilepljeno na podporno konstrukcijo; f) s ploščicami pritrjenimi na tog element; g) s pritrdilnimi profili prilepljenimi na podporno konstrukcijo; h) z vrvjo privezanim na cev (Seidel, 2009)

7.2 Detajli v ogliščih membrane – kotni detajli

V ogliščih membranske površine imamo posebne detajle le pri membranah s fleksibilnimi robovi (slika 67 levo). Na tem mestu se sile iz kablov prek kovinskega kotnega detajla prenesejo v primarno nosilno konstrukcijo ali v tla. Pri togih robovih se vse napetosti iz membrane že sproti prenesejo na toge nosilne elemente, tako da ni posebnega detajla na njihovem stičišču (slika 67 desno). Kotni detajl prevzame sile iz kablov in tudi tangencialne sile, ki delujejo v smeri od vogala in želijo odvléči membrano. Pri računalniškem modelu kotnega detajla ne modeliramo, ampak membrana sledi kabloma do njunega srečanja in ima tam konico. Pri izdelavi detajla je treba biti izjemno natančen, saj mora ta zagotavljati geometrijsko kompatibilnost realne konstrukcije z modelom (Forster in sod., 2004). Torej se morajo kabli ujemati s sistemskimi linijami in imeti stičišče sil v isti točki kot v modelu. Detajl v oglišču membrane ponavadi vključuje tudi elemente za fino nastavljanje geometrije in s tem tudi prednapetja. Nepravilnosti v obliki membrane, dolžini kablov in detajlih se bodo pokazale kot gube na območju vogalov membrane, zato so to zelo problematična mesta. Kotni detajli pa imajo tudi pomembno funkcijo v fazi inštalacije konstrukcije. Med postavljanjem konstrukcije, ko

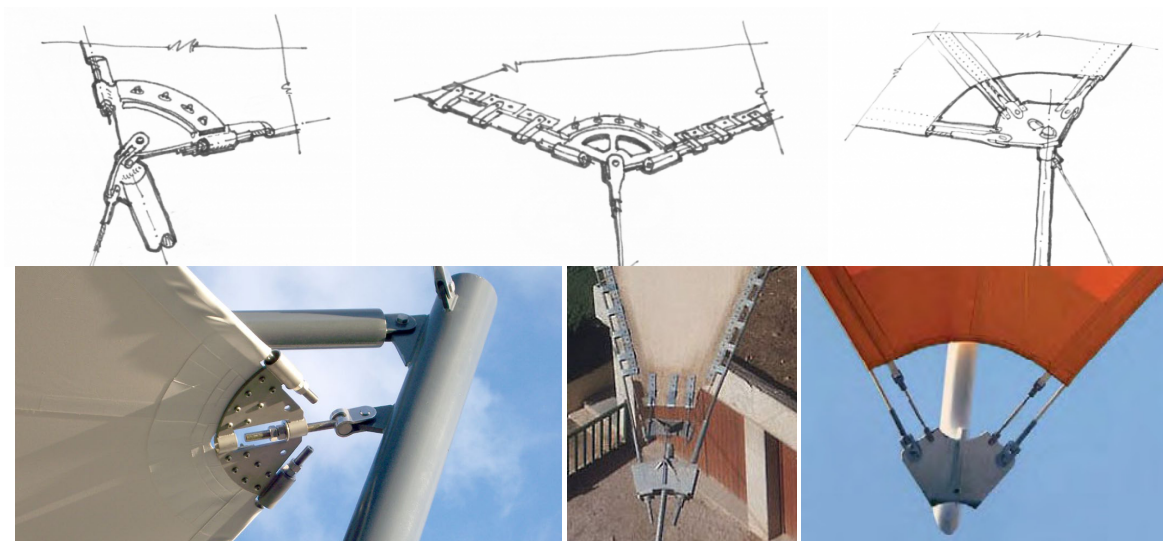
membrana še ni popolnoma prednapeta, vsa njena teža sloni na detajlih v ogliščih, pri tem pa so ti izpostavljeni velikim zasukom, zato morajo biti izdelani tako, da jih omogočajo (Forster in sod., 2004).



Slika 67: Levo: Kotni detajl pri fleksibilnih robovih; Desno: Kotni detajl pri togih robovih (Seidel, 2009)

Najpogostejši kotni spoj predstavlja vogalni element, navadno je to kovinska plošča, direktno ali posredno preko palice ali kabla pripeta na jambor ali kakšen drug tog nosilni element. Na ploščo so pripeti kabli, kar je možno izvesti na več načinov (slika 68). Na ploščo, v kateri je luknja, lahko kabel, ki ima na koncu viličasto spojko, pritrdimo z zatičem. Pritrdimo lahko tudi kabel z zaključno očesno spojko, če vmes namestimo škopec ali pa je vogalni element izdelan tako, da omogoča takšno priključitev. Zelo pogosto se uporabi tudi kabel z zaključnim navojem, ki se ga z matico zasidra na ustrezno izdelan vogalni element (slika 67 levo). Z zategovanjem matice lahko kontroliramo dolžino kabla. Natezne napetosti v membrani vlečejo membrano stran od oglišč, zato jo moramo pritrditi, da ne zdrsne (Huntington, 2004). To lahko preprečimo s pritrditvijo tekstilnih pasov ali verige ploščic, ki poteka vzdolž roba membrane, na vogalno ploščo. Druga oziroma dodatna možnost pa je, da vogalni rob membrane pritrdimo na vogalno ploščo. To lahko storimo podobno kot pri opisanih robnih detajlih, torej s pritrdilnimi ploščami direktno na vogalni element oziroma posredno z zategovalci. Možna je tudi uvedba sekundarnega vogalnega kabla, ki teče skozi vogalni membranski zavihek (Huntington, 2004). Vogalna plošča ima, poleg vseh naštetih priključkov, še glavni priključek, in sicer na primarni nosilni element ali na temelj. Ta povezava je lahko posredna (povezuje ju kabel ali palica) ali pa je vogalni element oblikovan tako, da je direktno pritrjen ali celo privarjen na togo konstrukcijo oziroma temelj. Med inštalacijo konstrukcije in življenjsko dobo je kotni detajl izpostavljen številnim pomikom in zasukom, zato mora imeti dovolj prostostnih stopenj. To dosežemo z omogočanjem rotacij na glavnem priključku in na ostalih priključkih. Pri priključkih kablov na vogalno ploščo je možno vstaviti tudi razne zategovalnike, ki omogočajo fine nastavitve prednapetja v membrani. Kompleksna zgradba vogalnega elementa narekuje, da moramo pri načrtovanju tega biti zelo pozorni, da vse funkcionira, da ni preglomazen, hkrati pa mora celoten detajl ostati urejen in vizualno sprejemljiv, saj so ti detajli pri večini konstrukcij vidni. Detajl naj bi tudi sledil toku sil, zato so vogalni elementi največkrat trikotne ali trapezaste oblike. Namesto navadnega jekla je smotrno

razmisliti o uporabi nerjavečega jekla, ki je sicer malo dražje, vendar zahteva manj kasnejšega vzdrževanja.



Slika 68: Zgoraj: skice različnih tipov kotnih detajlov; Spodaj: Primeri različnih kotnih detajlov (Tension ..., 2010; How ..., 2011; Data ..., 2011; Seidel, 2009)

Pri drugem tipičnem detajlu v oglišču membrane kabla ne priključujemo na ploščo, temveč ta neprekinjeno teče po njenem obodu ter gre nato pod spremenjenim kotom naprej proti naslednjemu oglišču (slika 69). Plošča mora biti na mestih, kjer se stika s kablom, sedlasto oblikovana, da se kabel lepo uleže, in brez ostrih robov. Kablu je treba preprečiti zdrs iz sedla, kar dosežemo s preprostimi objemkam. Radij sedla je odvisen od radija kabla in sile v kablu. Če je ta premajhen, se efektivna nosilnost kabla zmanjša. Možno je, da se v kablu na različnih straneh sedelne plošče pojavijo precej različne sile, kar je odvisno od geometrije robov in od zunanjih obtežb. V tem primeru je treba kabel na območju sedla pričvrstiti. To storimo tako, da s spojko kabel stisnemo ob ploščo. Ostale komponente so na ploščo priključene podobno kot pri predhodnem detajlu. Takšen vogalni detajl je manj kompleksen, saj ima manj priključkov, posledično je vizualno elegantnejša in bolj ekonomična izbira v primerjavi z zgornjim detajlom (Huntington, 2004).



Slika 69: Primera kotnih detajlov s sedlastimi ploščami (Data ..., 2011; Connections ..., 2000)

V primeru manjših konstrukcij, katere imajo na robovih le tekstilne pasove, se izognemo kompleksnim ogliščnim detajlom, saj so lahko ti pasovi pritrjeni na preprosto spojko ali obroč, membrana pa jim sledi. Eventualno lahko v vogalih membrano ojačamo z dodatno plastjo membrane ali tekstilnimi prišitimi ojačitvami (slika 70) (Seidel, 2009).



Slika 70: Primera tekstilnih kotnih detajlov (Seidel, 2009)

7.3 Detajli podpor znotraj membrane

Pri konstrukcijah konusne oblike imamo v notranjem območju membrane visoke ali nizke podpore. Podpiranje v eni točki ni možno, saj bi dobili izredno veliko konico napetosti, ki je ne bi zdržala nobena membrana, zato moramo napetosti prenesti na širšem območju, za kar služijo posebni detajli. Velikokrat napetost v membrano vnašamo ravno z dviganjem oziroma spuščanjem notranjih podpor, zato moramo za te detajle predvideti tudi to možnost.

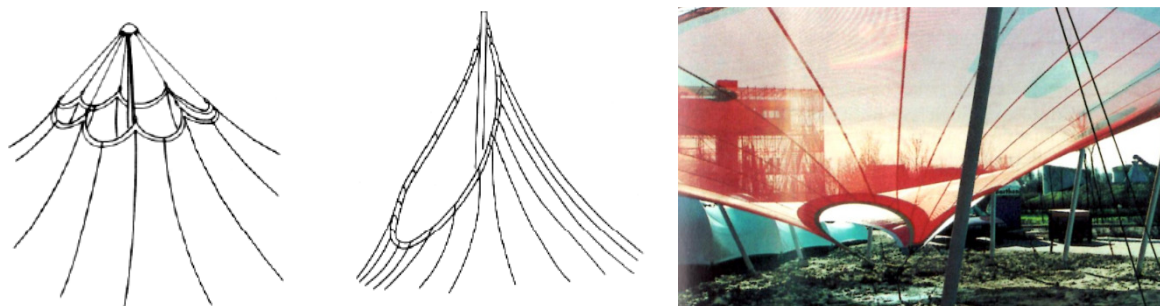
Najbolj razširjen način podpiranja notranjih območij je podpiranje z nateznim obročem (slika 71). Obroč je iz togega materiala, navadno iz jekla, njegov premer pa je odvisen od maksimalnih napetosti, ki jih še lahko prenese membrana. Ta kriterij lahko vodi do prevelikega obroča, zato lahko v tem območju membrani privarimo dodatne membranske plasti ali pa del obremenitve prevzamemo z radialnimi kablji, kar omogoča zmanjšanje obroča (Forster in sod., 2004). Membrano, ta mora imeti keder zaključek, preprosto z enostranskimi ploščami pritrdimo na notranjo ali zunanjo stran obroča. Plošče morajo biti že ustrezno ukrivljene, da se prilegajo obroču, vse ostre dele detajla pa moramo zbrusiti, da ne poškodujejo membrane. Obroč je lahko togo vpet (zvarjen ali privijačen) ali pa obešen s kablji na jambor oziroma na druge nosilne elemente (Huntington, 2004). Napetosti v membrani lahko fino uravnavamo preko zategovalnih spojk, ki jih vgradimo v kable, na katere je obroč obešen, ali pa z dvigovanjem konstrukcije obroča z raznimi vijlačnimi sistemi. Nastalo odprtino v obroču se lahko prekrije z raznimi kapami. Te so lahko narejene iz pločevine, druga možnost pa je, da konstrukcijo

kape pokriva pleksi steklo ali membrana. Odprtino lahko nepredušno zapremo ali pustimo na robu kape možnost prezračevanja (Forster in sod., 2004).



Slika 71: Različni primeri notranjih točkovnih podpor z nateznimi obroči (How ..., 2011; Data ..., 2011)

Druga možnost pritrjevanja znotraj membrane je s kabelskimi zankami (slika 72). Možna je izvedba z eno zanko ali več zankami, ki tvorijo rožnato obliko. Membrana je na kabelske zanke pritrjena na enak način kot pri detajlih pritrjevanja na robni kabel. Pozoren je treba biti na prevzem tangencialnih napetosti (Huntington, 2004). Detajli na vrhu zanke so podobni že opisanim detajlom v oglišču membrane. Odprtino zanke lahko zapremo s stekleno površino, vendar moramo zagotoviti, da deformacije zanke ne bodo vplivale na okvir zasteklitve. Glede na prejšnji detajl je izvedba takšnega sistema precej zahtevnejša in dražja, vendar pa je pravilno izveden detajl vizualno zelo privlačen.



Slika 72: Levo: Skici notranjih točkovnih podpor s kabelskimi zankami (Wehdorn-Roithmayr, 2011); Desno: Primer notranje točkovne podpore s kabelskimi zankami (Forster in sod., 2004)

8 GRADNJA PREDNAPETE MEMBRANSKE KONSTRUKCIJE

Gradnja prednapetih membranskih konstrukcij je v veliki meri povezana s prefabrikacijo. Posamezne komponente so narejene v delavnicah in nato dostavljene na gradbišče. Tu pa se poraja vprašanje; elemente kakšnih dimenzij izdelati? Večja dimenzija komponent pomeni težji transport, potrebo po močnejši in težji opremi, hkrati pa omogoča hitrejši čas gradnje, manj dela na gradbišču ter manj dragih stikov. Treba je upoštevati tudi kapaciteto proizvodnih obratov in določiti optimalno možnost. Najbolj pomembno je, da je vse dostavljeno v dogovorjenih rokih, ter da vsa dela tečejo neprekinjeno (Seidel, 2009).

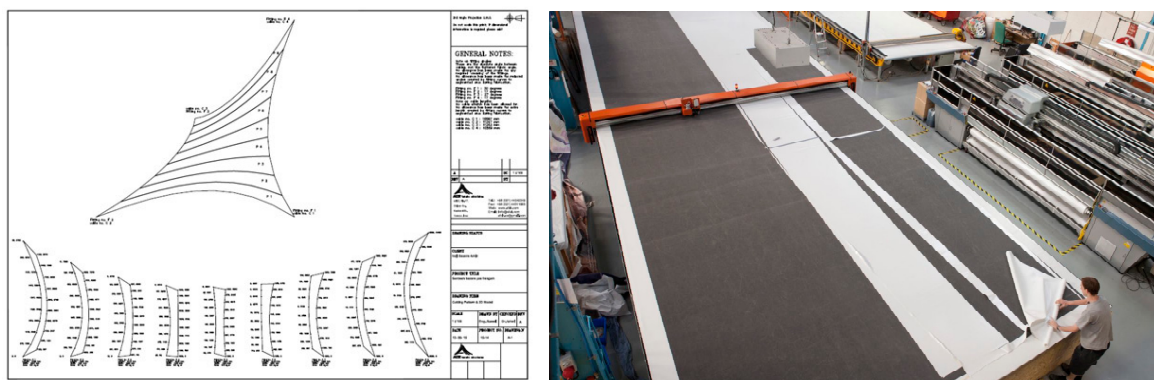
Temelji in talna površina se ne morejo izdelati v delavnici, temveč na sami lokaciji. Izdelajo se v skladu z načrti in so največkrat armiranobetonski, v njih pa vgradimo sidra oz. različne priključke za priključitev nosilne konstrukcije. Za sidranje natezних elementov v temeljna tla se navadno uporabijo različna sidra (pasivna ali aktivna). Ta aktivirajo velik volumen zemljine in so zato bolj ekonomična kot betonski temelji, ki bi bili neprimerno večji. Ostali deli se izdelajo v delavnicah. Podporna konstrukcija se izdelava iz osnovnih komponent (različni jekleni profili, lepljeni nosilci) in nato opremi s spojnimi priključki na predvidenih mestih. Jekleni kabli se natančno narežejo na potrebne dolžine in opremijo z ustreznimi priključki. Omenjeni dve komponenti prednapetih membranskih konstrukcij sta značilni tudi za konvencionalne montažne objekte, kar pa ne velja za membrano. Njeno izdelavo bom podrobneje opisal v nadaljevanju.

Ko imamo izdelane vse komponente (primarna konstrukcija, kabli, membrana, detajli spojev ter ostalo) lahko začnemo s samo gradnjo ali postavitvijo prednapete membranske konstrukcije. Že v sklopu načrtovanja konstrukcijski inženir določi natančno proceduro inštalacije, kateri se tudi podredi načrtovanje detajlov. Pri velikih nenavadnih konstrukcijah, kjer je težko predvideti obnašanje določenih komponent, se izdelava natančen pomanjšan model inštalacije. Navadno konstrukcijski inženir tudi vodi in nadzoruje potek gradnje skozi vse faze. Gradnja je zelo kompleksen proces, vključuje organizacijo gradbišča, izbiro opreme, transport komponent do gradbišča, predpripravo, dviganje komponent, vnos prednapetja in kontrolo izvedenih del. Za gradnjo potrebujemo ustrezno izobraženo delovno silo. Vse aktivnosti vodi in časovno usklajuje vodja gradbišča ali vodstveni tim, ki ga sestavljajo izkušeni strokovnjaki. Ta v skladu z načinom postavitve, časovnimi in finančnimi pogoji ter obstoječimi viri (oprema, delovna sila) izdelava časovni plan gradnje, poskrbi pa tudi, da se vse izvaja v skladu z načrti, skrbi za varnost na gradbišču in vodi potrebno gradbiščno dokumentacijo (Seidel, 2009).

8.1 Prefabrikacija membrane

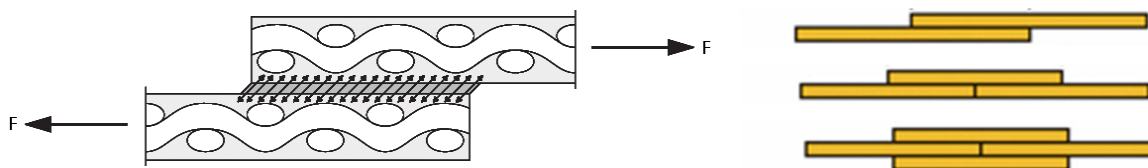
Iz membran, ki jih dobimo od proizvajalca v obliki zvitkov, se izrežejo kroji po načrtu krojev (Slika 73 levo). Načrt naredi gradbeni inženir v soglasju z ostalimi strokovnjaki. Načrt mora vsebovati vrsto materiala, minimalno potrebno širino materiala, predvidene detajle na posameznih robovih, širino zvarov, natančno obliko in smer posameznega kroja. Kroje lahko režemo z ročnimi orodji (npr. s pomočjo kartonastih šablon), vendar pa je najbolj razširjeno rezanje z računalniško vodenimi rezalnimi stroji (slika 73 desno). Ti uporabljajo mehanska rezila različnih oblik. Ostali načini rezanja niso primerni ali pa so predragi. (Npr. pri termičnem rezanju bi se lahko zaradi visokih temperatur kosi medsebojno zlepili). Posamezne dele je nato potrebno spojiti v končno membrano (Seidel, 2009).

Ločimo trajne spoje in začasne oz. montažne spoje. Med trajne spoje spadajo varjeni, šivani ter lepljeni spoji, med montažne pa mehanski spoji s ploščicami, keder tračnicami ali zvezani spoji. Trajni spoji se navadno izdelajo v delavnici, montažni spoji pa ob montaži membranske konstrukcije. Izbira je odvisna od membranskega materiala, konstrukcijskih zahtev in uporabe objekta (Seidel, 2009).



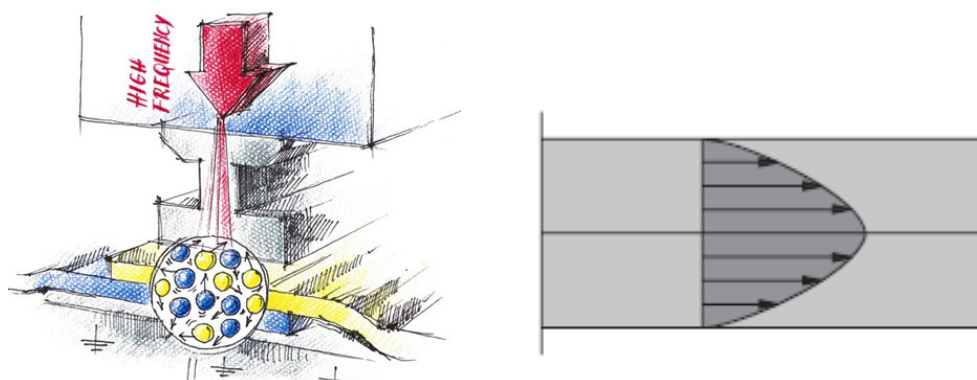
Slika 73: Levo: Primer načrta krojev (Knowledge ..., 2011); Desno: Izrez krojev z računalniško nadzrimim rezalnim strojem (How ..., 2011)

Najobičajnejši način združevanja membranskih kosov je z varjenjem. Na ta način dobimo vodotesen spoj. Najenostavnejši način je s preklopov enega kosa preko drugega, lahko pa tudi s pomočjo dodanih trakov membranskega materiala (slika 74 desno). Z varjenjem pa ne izdelujemo samo spojev dveh membranskih kosov, temveč tudi robne zavihke, keder zaključke, žepe za ojačitvene kable in ostale dodatke. Pri zvarih se nosilnost iz ene nosilne tkanine kompozitne membrane na drugo prenaša preko striga vmesne plasti matričnega nanosa (slika 74 levo). Matrici obeh kosov membrane se med postopkom varjenja stalita in spojita. Natezna trdnost zvara je odvisna od adhezije med nosilno tkanino in matrico kompozitne membrane, širine zvara in postopka varjenja. Natezna trdnost zvarov se preizkuša z eno in dvoosnimi nateznimi preizkusi, običajno pa znaša 60 % – 95% natezne trdnosti same membrane (Seidel, 2009).

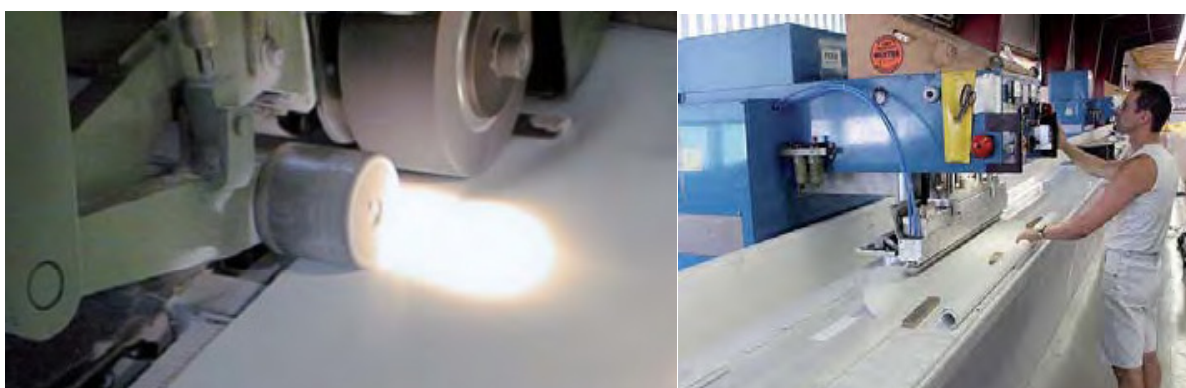


Slika 74: Levo: Prenos napetosti v varjenem spoju kompozitnih membran preko striga matrice (Forster in sod., 2004); Desno: Različni tipi varjenega spoja (preklopni, z enim ali dvema dodatnima trakovoma membrane) (Seal ..., 2012)

Dva najbolj značilna načina varjenja sta visokofrekvenčno in toplotno varjenje. Visokofrekvenčno varjenje je najobičajnejši način varjenja PET/PVC membran (slika 76 desno). Varilni stroj ima dve elektrodi med kateri vstavimo oba kosa membrane. Ploščati elektrodi membrani stisneta, nato pa se med njima za nekaj trenutkov sproži visokofrekvenčno valovanje. Ti valovi povzročijo nihanje molekul PVC (slika 75 levo), ki se zato segrejejo (slika 75 desno) in postanejo viskozne. Pod pritiskom se obe matrici spojita in ohladita. Matrici se povsem integrirata in nastane homogen spoj. V primeru lamelirane PVF površinske prevleke je potrebno to na mestu zvara predhodno odstraniti (slika 76 levo) (Seidel, 2009).



Slika 75: Levo: Dogajanje pri visokofrekvenčnem varjenju membran (High ..., 2012); Desno: Razpored temperature po membranah pri visokofrekvenčnem varjenju (Seidel, 2009)



Slika 76: Levo: Brušenje PVF površinske prevleke; Desno: Varjenje PET/PVC membran (Seidel, 2009)

Za varjenje FG/PTFE membran se uporablja toplotno varjenje (slika 77 levo). Pri tem postopku kosa membran na spoju pritisnemo s segretim nosilcem (do 340 °C) varilnega stroja. Pri tem se FG/PTFE sloj stopi, vendar ne dovolj, da bi se lahko tvorila kvalitetna medsebojna povezava dveh membran. To rešimo s termoplastično folijo, ki jo namestimo med membrani. Membrani ostaneta pod pritiskom (pribl. 50 N/cm²) 30 s – 40 s. Toplotno varjenje je precej dolgotrajnejše od visokofrekvenčnega varjenja. Med hlajenjem se ustvarijo močne kemijske vezi. Natezna trdnost zvarov FG/PTFE membrane znaša 80 % – 90 % natezne trdnosti same membrane (Seidel, 2009).

Tudi ETFE folije se varijo toplotno (slika 77 desno), vendar tu ni potreben visok pritisk. Folije se pri temperaturi nad 230 °C stopijo in medsebojno spojijo. Za močne varjene spoje je ključnega pomena hitro hlajenje zvara. Zvari so tipično široki 0,5 cm – 2 cm, njihova natezna trdnost pa znaša nad 90 % trdnosti folije (Seidel, 2009).



Slika 77: Levo: Varjenje FG/PTFE membran; Desno: Varjenje ETFE folij (Seidel, 2009)

Večkrat se zgodi, da moramo membrane variti tudi na gradbišču, npr. razna zatesnitvena dela okoli stičnih detajlov ali pa popravila poškodovanih membran. Za tovrstne naloge se uporabljajo manjše prenosne varilne naprave. Pri PET/PVC membranah so to pištrole z vročim zrakom (slika 78 levo), s katerimi stični površini membran segrejemo (50 °C – 600 °C), nato pa membrani pritisnemo z ročnimi valjčki. Za FG/PTFE membrane se uporabljajo likalniku podobne naprave (slika 78 desno), s katerimi membrani na stiku segrejemo (360 °C – 420 °C) in močno pritisnemo za 1 min – 2 min (Seidel, 2009).

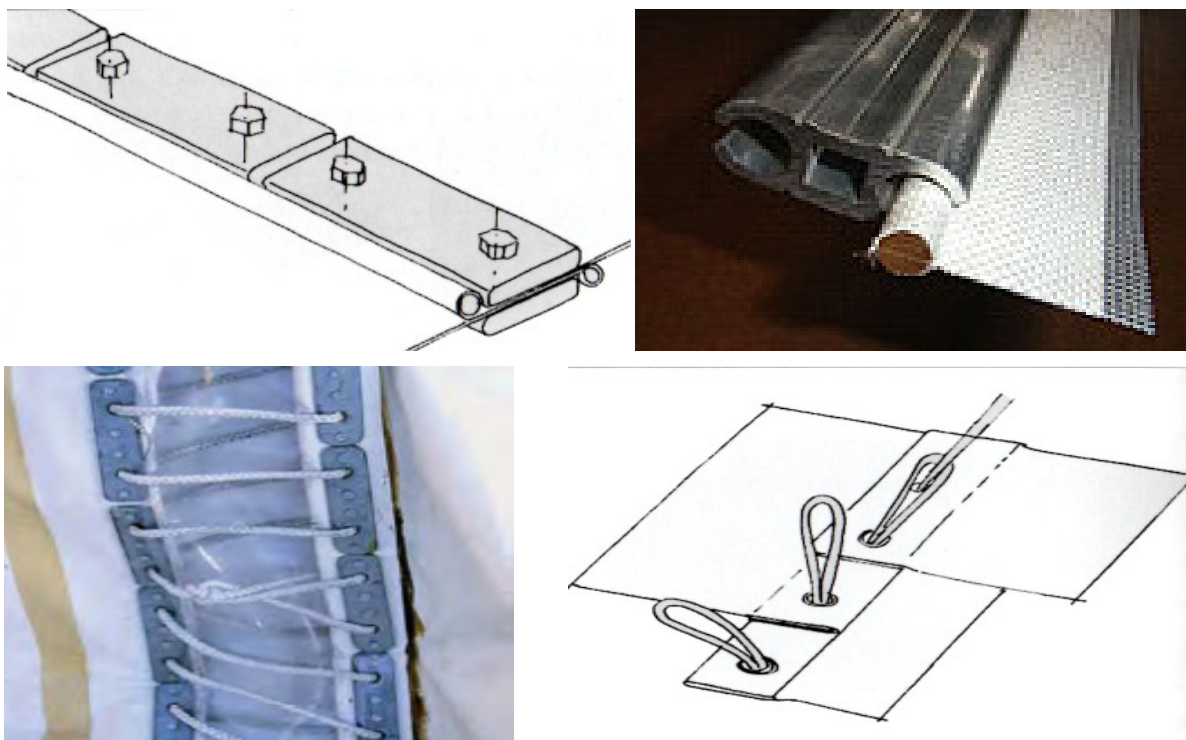


Slika 78: Levo: Varjenje dodatkov (PET/PVC) za odvodnjavanje z pištolo na vroči zrak; Desno: Varjenje FG/PTFE membran na gradbišču (Seidel, 2009)

Šivi predstavljajo najstarejši način spajanja dveh kosov tkanine. Pri sodobnih kompozitnih membranah se redko uporabljajo; največ za razne ojačitve okoli detajlov in v kombinaciji z zvarom. Pogosto se na membrano prišijejo tekstilni pasovi. S šivi se napetosti prenašajo direktno iz ene nosilne tkanine v drugo, vendar pa tudi poškodujejo matrico, ki izgubi vodotesnost. Šivane spoje je potrebno naknadno zaščititi z dodatnim trakom membrane ali z vodotesnim nanosom. Poznamo različne tipe šivanih spojev med kosi membran. Še redkeje se uporabljajo lepljeni stiki. Večinoma pri spajanju membran s silikonsko matrico. Silikon je elastomer, ki ima velike, v mrežo povezane molekule, zato se te ne morejo plastificirati ob visokih temperaturah. Posebna topila na mestu zvara razbijejo vezi med molekulami silikona. Med membrani se doda še adhezivni trak. Pod določenim pritiskom in povišano temperaturo se molekule silikona v obeh membranah medsebojno povežejo. Nastane močan spoj, ki ima primerljivo natezno trdnost kot membrana. Spajanje membran z lepljenjem je zelo dolgotrajno (Seidel, 2009).

Včasih, zaradi omejitev pri transportu, ni možno membrane izdelati v enem kosu, zato jo naredimo v več delih, ki jih z montažnimi spoji združimo na gradbišču. Montažni spoji se uporabljajo tudi za mobilne montažne membranske objekte, saj jih lahko preprosto sestavimo ali razstavimo. V delavnici pripravimo vse potrebno za čim hitrejše delo na gradbišču. Montažni spoji se delijo na vijáčene in vezane. Vijáčene spoje med membranami lahko naredimo s pomočjo ploščic, s katerimi zaobjamemo stik med membranami (slika 79 zgoraj levo), drugi način pa je s keder tračnicami (PCV ali aluminij) (slika 79 zgoraj desno). Robova, ki ju želimo spojiti, morata biti opremljena s keder robom. Večja ko je ukrivljenost spoja, bolj kratke segmente spojnih elementov potrebujemo. Podoben princip se uporablja pri priključevanju roba membrane na kable ali togo nosilno konstrukcijo. Vezani spoji se uporabljajo, kjer ni velikih obremenitev. Rob membrane se opremi z nerjavečimi obročki ali luknjičastimi ploščicami, skozi katere vstavimo poliestrsko vrv (slika 79 spodaj levo). Membrani

lahko preprosto zvežemo ali pa luknje poravnamo in membrani združimo z zaporednimi zankami (slika 79 desno) (Seidel, 2009).



Slika 79: Zgoraj levo: Montažni spoj s ploščicami (Forster in sod., 2004); Zgoraj desno: Membrana s keder robom v keder tračnici (Knowledge ..., 2011); Spodaj levo: Vezani montažni spoj (Seidel, 2009); Spodaj desno: Vrvni zankasti spoj (Forster in sod., 2004)

Po dogovoru s projektantom in izvajalcem postavitve se izdelana membrana zloži ali zviže tako, da je kasneje z njo kar najmanj dela (slika 80 levo). Zaradi zaščite pred poškodbami in vremenskimi vplivi se jo zapakira v zaboj ali ovije v dodaten sloj materiala, ki ga lahko tudi opremimo z nastavki za dviganje le tega (slika 80 desno). Vsak del membrane, ki pride iz delavnice, mora biti natančno označen in opremljen z načrtom zlaganja (Seidel, 2009).



Slika 80: Levo: Zvijanje končane membrane v delavnici; Desno: Zvite membrane v transportnem zaboju (Seidel, 2009)

8.2 Oprema za postavljanje prednapetih membranskih konstrukcij

Gradnja prednapetih membranskih konstrukcij zahteva dvigovanje prefabriciranih komponent in opreme ter delo na višini, zato seveda ne gre brez naprav za dvigovanje. Uporabljajo se razni žerjavi in avtodvigala. Izbira ustrezne naprave je odvisna od velikosti konstrukcije, želene dvižne višine, nosilnosti ter same organizacije gradbišča, ter ima velik vpliv na končni strošek konstrukcije (Seidel, 2009).

Za natezanje kablov se uporabljajo različne električne, hidravlične ali ročne natezne naprave. Električni vitel v kombinaciji s sistemom škripčevja (slika 81 levo) oziroma hidravlična naprava za zategovanje (slika 81 desno) kablov se uporabljata kjer potrebujemo dolgi hod kabla. To je v primeru visečih kablov ali kabelskih mrežnih konstrukcij, kjer z isto napravo kable dvignemo in nato napnemo. Pomožne kable pritrdimo prek posebnih plošč na zaključke kablov, ki jih želimo dvigniti, ter nato počasi vlečemo. Naprave potrebujejo posebne platforme oziroma podkonstrukcije, ki se namestijo nad priključke na katere želimo pritrditi kabel. Poleg tega je treba upoštevati, da gre za precej težko opremo, zato je prestavljanje precej zamudno. Pri kabljih, kjer ni potrebe po dolgem hodu, se lahko uporabi tlačni hidravlični cilindar, ki se ga pritrdi na zaključek kabla in okoli pritrdilnega sidra (npr. v temelju) pritrdi s pomočjo navojnih palic in pomožnih nosilcev (slika 81 sredina). Primer takega napenjanja lahko vidimo pri napenjanju stabilizacijskih kablov. Omenjene naprave so primerne za kable, kjer potrebujemo velike sile (1000kN in več). Za manjše konstrukcije, kjer so v kabljih manjše sile (do 100kN), se uporabijo ročne mehanske zategovalne naprave. Pri teh preko ročice mehansko vlečemo kabel ali verigo, kar omogoča tudi dolge hode. Verigo ali kabel zategovalne naprave pritrdimo na zaključek kabla ali pa preko posebnih ekscentričnih prijemalnikov kar direktno za kabel (Seidel, 2009).

Membrana se prime, vleče in napenja preko robnih plošč, s katerimi na določeni razdalji objamemo keder rob. Na plošče pritrdimo tekstilne trakove, ki so na drugem koncu pritrjeni v konstrukcijo. Pritrditvena mesta moramo že prej predvideti. Vmes je postavljen mehanski zategovalnik, s katerim nato ročno zategujemo membrano. Če so potrebne večje sile, lahko uporabimo tudi električne vitle ali hidravlične cilindre. Ta opcija se uporablja pri membranah, ki jih direktno napenjamo. To so membrane s togimi robovi (Seidel, 2009).



Slika 81: Levo: Električno vitlo s sistemom škripcev za natezanje kablov; Sredina: Natezanje in priključevanje stabilizacijskih kablov na temelj s hidravličnimi cilindri; Desno: Natezne naprave za dviganje in natezanje kablov (Seidel, 2009)

Nujna oprema gradbišča prednapete membranske strukture so tudi začasni delovni odri za delo na višini (slika 82 levo). Običajno se uporabljajo klasični stacionarni delovni odri. Če pa potrebujemo večjo mobilnost, pa uporabimo mobilne delovne košare na teleskopski ali zložljivi roki (slika 82 sredina). Obstajajo tudi t. i. potujoči odri, ki se lahko premikajo po kakšnem nosilcu osnovne konstrukcije. Če drugače ni smotno ali možno, lahko delavec pri delu visi na vrvi, ki je pritrjena na konstrukcijo ali žerjav (slika 82 desno). Ta način je najhitrejši in najcenejši, vendar zahteva ustrezno usposobljen kader. Katerikoli način izberemo, moramo omogočiti varne delovne pogoje (Seidel, 2009).



Slika 82: Levo: Viseči delovni oder; Sredina: Členkasta in teleskopska delovna platforma; Desno: Delavec pripet na varnostne vrvi

Za postavitev konstrukcije imamo na voljo različne tipe dvižne in natezne opreme. Ta se razlikuje v teži, času in prostoru potrebnem za pripravo opreme, v moči ter seveda v stroških upravljanja in najema. Potreben je natančen premislek, kakšno opremo najeti. Ali se bolj splača najeti več kosov opreme za kratek čas, ali pa za daljše obdobje najeti manjše število. Za smotno oceno so potrebne tudi številne izkušnje (Seidel, 2009).

8.3 Postavitev membrane

Za postavitev prednapete membranske konstrukcije imamo na voljo različne možnosti, izbira ustrezne procedure pa je odvisna od uporabljenih materialov, lokalnih pogojev, tipa konstrukcije, uporabljene opreme oziroma tehnologije in logističnih parametrov (Seidel, 2009).

Izbrana procedura, ki jo določi izkušen strokovnjak, mora biti tudi optimalna glede stroškov in porabljenega časa. Izbira materiala vpliva na ravnanje z membrano, izbiro možnih detajlov, smeri in postopnosti vnosa prednapetja. Npr. pri FG/PTFE membrani je, zaradi izjemne občutljivosti, treba biti posebno pazljiv pri zlaganju in transportu, prednapetje je treba vnašati zelo počasi, temperatura ob montaži pa ne sme biti prenizka. Lokalni pogoji na gradbišču močno vplivajo na potek postavitve. Sem spadajo vremenski pogoji, zadostni prostorski pogoji, ustrezne skladiščne in pripravljalne površine, prometna dostopnost do gradbišča, dostopnost do ustrezne opreme in delovne sile ter infrastruktura. V razvijajočih državah tretjega sveta je na voljo veliko poceni neizkušene delavne sile in tudi dostop do sodobne opreme zna biti problematičen, medtem ko lahko v razvitih državah enako delo opravimo z manjšim številom visoko usposobljenih delavcev. Geometrija konstrukcije je pomemben kriterij pri izbiri procesa postavitve membrane. Za vsako od osnovnih oblik konstrukcij obstajajo določene značilnosti in tipični načini postavitve. Pomembno je tudi, kako je membrana podprta. Pri mehansko prednapetih membranah imamo točkovno (visoke in nizke zunanje ter notranje točkovne podpore) in linijsko podprte (togi ločni in ravni nosilci, valovite oblike) membrane. V povezavi z montažo fleksibilnih komponent konstrukcije je pomembno tudi, ali ima primarna konstrukcija sama zadostno stabilnost (slika 83 levo), ali pa jo pridobi v kombinaciji s prednapetimi fleksibilnimi elementi (slika 83 desno). Pri slednjem načinu je potrebna dodatna začasna stabilizacija primarne konstrukcije, večkrat pa jo dvignemo sočasno s fleksibilnimi elementi. Začasnimi vrtljivim detajlom, ki so namenjeni le postavitvi konstrukcije, se je, če se le da, potrebno izogniti, saj so zelo dragi (Seidel, 2009).



Slika 83: Levo: Pritrjevanje membrane na stabilno konstrukcijo marele; Desno: Dvigovanje ločnega nosilca skupaj z membrano (Seidel, 2009)

Preden so komponente konstrukcije sploh pripravljene na dviganje, je potrebno marsikaj postoriti. Tu mislim na sam transport komponent (slika 84 levo), razlaganje in morebitno skladiščenje na gradbišču, predhodna pripravljalna dela na gradbišču in ter priprava kablov in membrane (Seidel, 2009).

Dvigovanje jamborov in ostalih tlačnih elementov lahko poteka na različne načine. Najpreprosteje je dvigniti celoten jambor in ga postaviti na zeleno mesto. To lahko storimo z enim ali več dvigali (slika 84 sredina). Drugi način je, da element vrtljivo podpremo na dnu, nato pa ga samo zasučemo v končni položaj (slika 83 desno). Ekstremno velike elemente, ki so izjemno težki in preveliki, lahko na gradbišču sestavimo iz delov. Pri vseh načinih je treba elemente stabilizirati s kabli, vsaj začasno, če sami nimajo dovolj velike stabilnosti. Na razne načine dvignemo tudi toge nosilce primarne nosilne konstrukcije (slika 84 desno). Če so preveliki, jih sestavimo iz več kosov na končni lokaciji (npr. veliki tlačni obroči) (Seidel, 2009).



Slika 84: Levo: Transport jambora; Sredina: Dvigovanje jamborov O2 Arene; Desno: Montaža jeklene strešne konstrukcije stadiona (Seidel, 2009)

Proizvajalec dobavi kable v obliki zvitkov ali navite na posebne bobne. Površino, na katero položimo kabel, je potrebno očistiti, ostre robove zaščititi (podložiti ali namestiti škripce), saj bi poškodbe zmanjšale nosilnost in korozijsko odpornost. Pri polaganju kabla nikoli ne vlečemo, temveč odvijamo zvitek ali boben (slika 85 levo). Če je tako predvideno, se ležeči kabli med seboj spojijo v mrežo. Na ustrezna mesta je potrebno namestiti opremo za dvigovanje in napenjanje kablov. Kable dvigujemo z že opisanimi napravami. V primeru težke opreme, ta potrebuje posebne podkonstrukcije, na katere je pritrjena, pri lažjih napravah pa je potrebno poskrbeti za ustrezno sidranje. Da skrajšamo hod napenjanja in s tem čas, lahko kabel dvignemo tudi z dvigali. Na različnih mestih vzdolž kabla se pritrdijo objemne spojke, ki jih nato dvignemo (slika 85 desno). Paziti je treba, da kabel znatno ne obremenimo izven končnih detajlov, saj ga lahko s tem poškodujemo. Možnost je tudi, da kable najprej pritrdimo na nagnjene jambore ali druge nosilne elemente in nato vse skupaj dvignemo in napnemo z dvigom in zasukom teh elementov. Enake metode lahko uporabimo tudi za kabelsko konstrukcijo. Slednja je učinkovita strukturna in cenovno ugodna osnova za membrano pri velikih razponih (npr. pri stadionih). Kable na tleh združimo v mrežo, spojimo jih lahko direktno ali preko

povezovalnih (tlačnih ali nateznih) elementov, ter nato dvignemo in napnemo celotno mrežo. Napetost lahko vnašamo preko nateznih naprav, kot pri posameznih kablilih, ali pa s krajšanjem nateznih oziroma daljšanjem tlačnih vmesnih elementov (Seidel, 2009).



Slika 85: Levo: Razvijanje kablov iz bobnov na gradbišču; Desno: Dviganje kablov (Seidel, 2009)

Membrano se s tovornjaki pripelje na gradbišče (slika 86 levo) in se jo razloži na površino, očiščeno kamnov in ostalih ostrih predmetov ter zaščiteno pred umazanijo. Tu se nato začnejo pripravljalna dela, kot npr. vstavljanje robnega kabla, pritrjevanje robnih plošč in kotnih detajlov (slika 86 sredina), pripravi se oprema za dviganje, napenjanje, meritve in kontrolo. Pripravljeno membrano dvignemo do montažne višine, kjer jo preko robnih ali kotnih detajlov pritrdimo na nosilno konstrukcijo. Pri membranah, kjer se pritrjevanje izvaja na tleh, posebno dvigovanje pač ni potrebno. Membrano lahko dvignemo v zloženi, zviti ali razprti obliki. Zložene membrane se postavijo na pripravljeno začasno mrežo ali membrano, na kateri se jo nato ustrezno razpre. Zvite membrane lahko s pomočjo posebnih napravah razvijemo čez konstrukcijo. Če drugače ni možno, se dvigne kar razprta membrana (slika 86 desno) ali pa se jo kar potegne vzdolž linijskih elementov (detajli morajo to omogočati) do ustrezne pritrditvene lokacije. Sploh v razprti obliki je nenapeta membrana zelo izpostavljena vetru in dežju (Seidel, 2009).



Slika 86: Levo: Dostava in razlaganje prefabriciranih membran; Sredina: Montaža kotnega spojnega detajla membrane; Desno: Dviganje razprte prefabricirane membrane (Seidel, 2009)

8.4 Napenjanje membrane

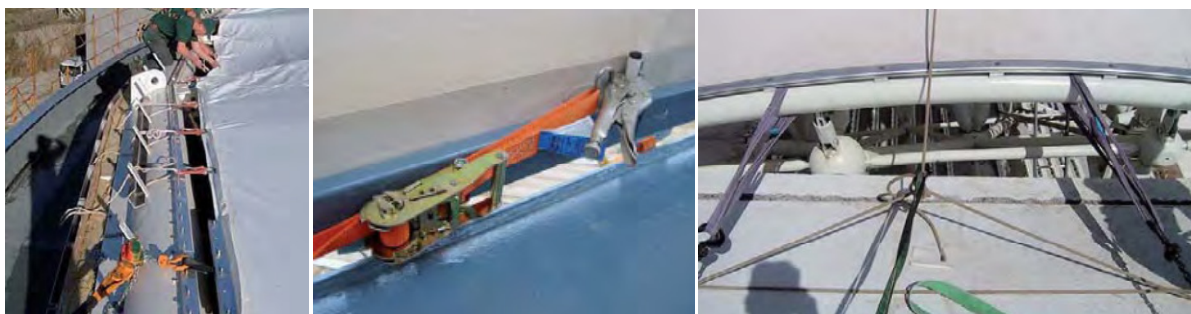
Membrano je treba čim prej prednapeti, saj ji s tem povečamo stabilnost in preprečimo poškodbe. Način vnosa prednapetja je izbran na osnovi materiala, smeri glavnih osi v membrani, tipa konstrukcije, detajlov, opreme in prostorskih pogojev. Materialne lastnosti so zelo pomembne pri napenjanju. Tako lahko npr. pri membrani z neenakimi lastnostmi in togimi robovi izkoristimo lastnost materiala. Z raztežkom in napenjanjem v prečni smeri, tako hkrati vnesemo napetosti v bolj togi vzdolžni smeri. V membrano vnesemo želeno prednapetje tako, da membrano raztegnemo za vnaprej določeno kompenzacijsko dolžino, hkrati pa je potrebno pri tem upoštevati še padec napetosti zaradi relaksacije materiala (ta je odvisna od napetosti, trajanja in temperature). Večja kot je napetost, večja je relaksacija. Membrano napenjamo postopoma, po korakih, in tako preprečimo prevelike napetosti in s tem pretirano relaksacijo. PET/PVC membrane se prednapenjajo nekaj ur, medtem ko pa pri FG/PTFE membranah lahko to traja tudi nekaj dni. Če tega časa nimamo, se lahko napetost vnese tudi hitreje, vendar je treba obnašanje preveriti z natančnimi dvoosnimi preiskavami. Med napenjanjem, ko napetosti še niso enakomerno porazdeljene, se v membrani pojavijo območja brez napetosti in območja, kjer je membrana precej bolj napeta kot bo po zaključku napenjanja. Paziti je treba, da ne presežemo nosilnosti membrane. Te vmesne faze je treba upoštevati pri kontroli nosilnosti in stabilnosti celotne konstrukcije in pri izbiri opreme. Oprema za napenjanje mora biti v določenih primerih zmožna zagotoviti tudi nekajkrat večjo napetost, kot je predvidena na koncu. Na podlagi izkušenj se izbere najlažji možen način prednapenjanja, torej kje, koliko, v kateri smeri bomo vnašali napetost. Predvideti moramo tudi možnost naknadnega prednapenjanja (npr. s krajšanjem robnega kabla, premikanjem kotnega detajla ali robnih togih detajlov) (Seidel, 2009).

Glede na konstrukcijski sistem mehansko prednapetje v membrano vnašamo na več načinov po dveh principih, in sicer linearno porazdeljeno (pri togih robovih) ter točkovno (pri fleksibilnih robovih) (Seidel, 2009).

8.4.1 Linearno porazdeljeno napenjanje

Pri linearni porazdelitvi lahko sile vnašamo neposredno ali posredno preko premikov ali zasukov linijskih elementov. Neposredno se napetost najpogosteje vnaša s pomočjo tekstilnih trakov in zategovalcev. V primerih, kjer je potrebna večja sila, se lahko uporabi hidravlična oprema. Trakove pritrdimo na robne plošče, ki morajo imeti možnost pritrditve traku (slika 87 levo). Prav tako moramo predvideti možnost pritrditve trakov na nosilni konstrukciji; navadno se privijačijo ali privarijo detajli v obliki t. i. ušes. Bolj na gosto ko razporedimo trakove, boljša bo porazdelitev napetosti. Napetost vnašamo postopoma, po korakih. Za kasnejše napenjanje je lahko oprema trajno vgrajena ali pa omogočimo premikanje togih robov. Glede na glavne smeri membrane, je treba določiti katero smer in

za koliko nategniti. Vsakršno napenjanje ene smeri vpliva na napetost in pomike druge smeri. Pri izbiri metode se upošteva, kje bo najlažje raztegniti membrano, ali je dovolj prostora, ter ali imamo kam sidrati opremo. Npr., pri ločnih konstrukcijah navadno razvijemo membrano pravokotno na lokove. Eno stran pripnemo za lok, drugo pa vlečemo in pripnemo na nasprotni lok od sredine loka proti koncema. Nato napnemo in pritrdimo še prečno smer. Zaradi razlike med togostjo robnih plošč in membrane je posebno pozornost potrebno nameniti napetostim, ki so vzporedne z robom. Plošče ne smemo dokončno pritrditi in privijačiti preden ne vnesemo omenjenih napetosti. V nasprotnem primeru se vsa kompenzacija izvrši v vrzelih med ploščami, zaradi česar se pojavijo gube in velika možnost trganja membrane. Vzporedno silo vnašamo po delih ali kar na celotno dolžino (slika 87 sredina). Robni detajl s keder profilom omogoča vzdolžno premikanje roba, dodati moramo le lubrikant ali smukec za lažje drsenje. Linijski vnos prednapetja pa je lahko tudi posreden. V tem primeru membrano najprej pripnemo za tog linijski element, pritrdimo tudi morebitne fleksibilne robove, nato pa element zasučemo ali premaknemo, kar napne membrano (slika 87desno). Membrana se skroji tako, da predviden pomik elementa napne membrano na želeno raven (Seidel, 2009).

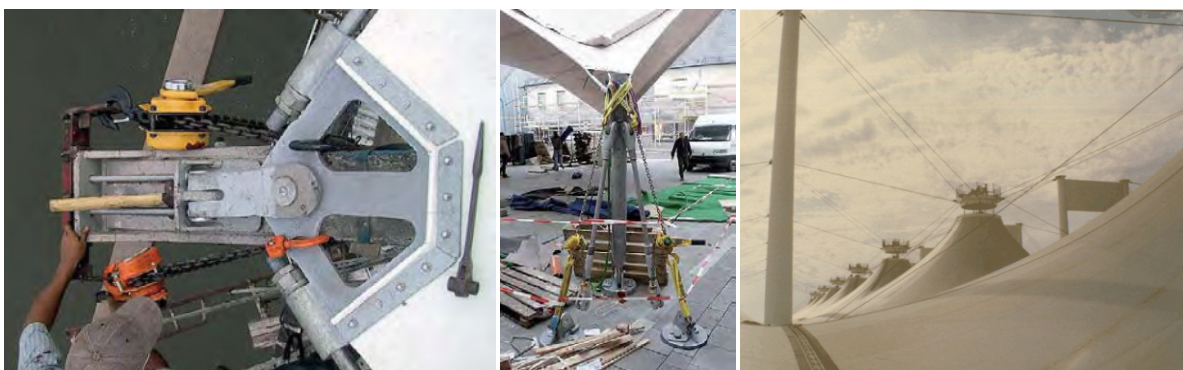


Slika 87: Levo: Napenjanje membrane preko robnih ploščic; Sredina: Napenjanje membrane vzporedno z robom pred pritrjevanjem robnih ploščic; Desno: Natezanje membrane z zasukom jeklenega podpornega loka (Seidel, 2009)

8.4.2 Točkovno napenjanje

Točkovno lahko vnesemo s premikom kotnega detajla. Odvisno od zasnove se lahko premakne sam detajl (slika 88 levo), ali pa premaknemo oziroma zasučemo kar sam primarni nosilni element, na katerega je priključen kotni detajl (najpogosteje je to jambor). Sploh v primeru ostrih kotov, kjer bližina robov, kotne plošče in mala kapaciteta materiala naredijo kotni del membrane bolj tog, je treba paziti na viške napetosti in nastanek gub. Zato je silo potrebno vnašati zelo počasi, dobrodošle pa so tudi ojačitvene plasti. Napenjanje z zasukom jambora se najpogosteje uporablja pri preprostih sedlastih konstrukcijah oz. konstrukcijah z menjavanjem visokih in nizkih zunanjih točk. Jambor najprej dvignemo, nato pa z mehanskimi ali hidravličnimi zategovalci pritrdimo stabilizacijski kabel v pripravljeno sidrišče (slika 88 sredina). V sklopu sidrišča in ostalih detajlov je potrebno pripraviti priključke za natezno opremo. Jambor mora biti med dviganjem začasno bočno stabiliziran.

Napenjanje stabilizacijskih kablov in s tem membrane izvajamo postopoma. Drugi način točkovnega prednapetja je preko notranjih točkovnih podpor. Notranje nizke točke spustimo oziroma visoke točke dvignemo. Notranje natezne obroče dvignemo s podaljšanjem jambora ali lebdečega jambora, ki mora to omogočati (večdelna sestava); ponavadi se uporabi hidravlični mehanizem. Druga možnost je tudi dvig z dvigalom, kjer obroč nato fiksiramo na jambor ali pa s kabli na nosilno konstrukcijo (viseči obroč) (slika 88 desno). Nizko točko lahko potegnemo navzdol z mehanskimi, električnimi ali hidravličnimi napravami, kjer jo nato ustrezno fiksiramo. Pred dviganjem je potrebno togo ali fleksibilno pripeti robove. Ker se vsa napetost vnaša preko ene točke, se lahko na tem delu pojavijo velike napetosti. Boljšo porazdelitev napetosti med napenjanjem dobimo pri vnosu napetosti skozi robove, vendar ta način zahteva več dela in s tem stroškov (Seidel, 2009).



Slika 88: Levo: Napenjanje membrane s premikanjem kotne plošče z mehanskimi zategovalci; Sredina: Napenjanje membrane z natezanjem stabilizacijskih kablov z ročnimi zategovalci (Seidel, 2009); Desno: Napenjanje membrane z dviganjem notranjega obroča z električnim vitlom (Benson, 2010)

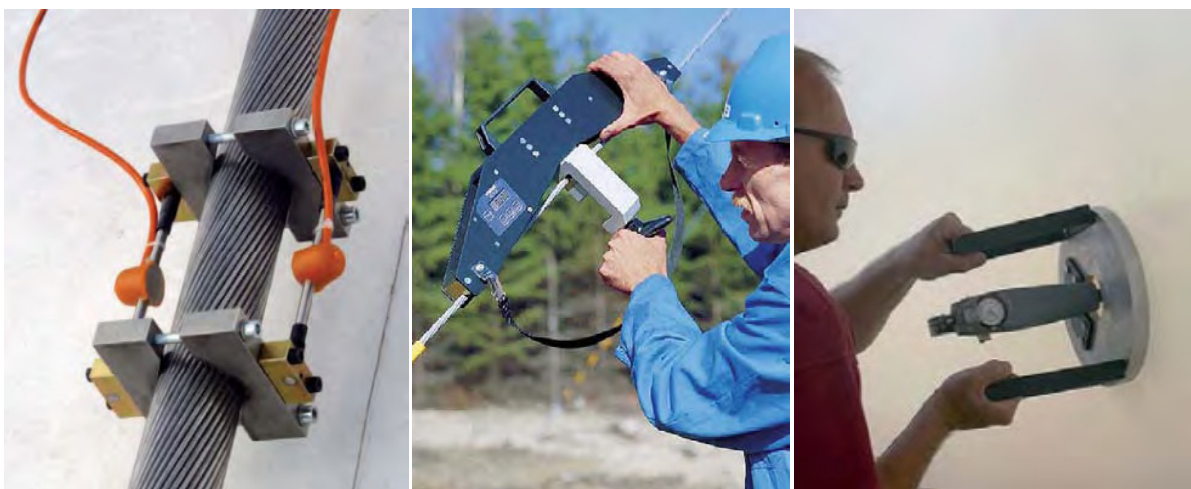
8.5 Kontrola

Že pred montažo je potrebno vse elemente skrbno preveriti glede dimenzijske ustreznosti, saj bo le tako končna konstrukcija pravilna. Najpomembnejša kontrola končne konstrukcije je njena geometrija. Pri manjših konstrukcijah je natančna kontrola geometrije največkrat tudi edini kriterij, medtem ko pa pri večjih konstrukcijah samo to ni dovolj, ampak je potrebno prekontrolirati še sile v kablilih in napetosti v membrani. Npr. pri debelih kablilih vsak milimeter raztezka pomeni veliko spremembo notranje sile, pri čemer pa je sprememba geometrije neznatna. Meritve je potrebno izvajati že med inštalacijo, da preprečimo prevelike sile ali napetosti, ter s tem poškodbe. Sile in napetosti se merijo v kablilih in membranah. Seveda, teh količin ne moremo meriti direktno, temveč posredno preko drugih količin, kot so raztezki, deformacije, tlak ali lastna frekvenca (Seidel, 2009).

Najpogostejša metoda za merjenje sile v kablilu je merjenje elastičnega raztezka določenega odseka kabla. Meritev se izvaja z ekstenziometrom, ki se ga pritrdi na odsek kabla. Merilni lističi, ki se najpogosteje uporabljajo za meritve deformacij, niso najbolj primerni za merjenje deformacij kablov

zaradi njihove neenakomerne površine in še napetost v notranjosti kabla se lahko razlikuje od tiste na površini. Silo lahko merimo tudi z dinamometrom, ki ga vstavimo med kabel in natezno napravo. Če uporabljamo hidravlične naprave se lahko sila preračuna iz pritiska v cilindru. Ponavadi so tovrstne natezne naprave že opremljene z ustreznimi merilci sile. Z natančnimi elektronskimi merilnimi napravami, lahko iz spremembe lastne frekvence odseka kabla pri različnih silah z veliko natančnostjo določimo silo v kablu (slika 89 levo). Naj omenim še mehanske naprave, ki iz odpora na prečen pomik odseka kabla določijo silo v kablu (tritočkovne meritve) (slika 89 sredina). Najbolje je, da zavoljo večje natančnosti, uporabimo različne metode meritve (Seidel, 2009).

Meritve napetosti v membrani so zelo težavne in problematične. Meritve z merilnimi lističi niso primerne, ker je velika možnost, da se ti med dvigom in napenjanjem poškodujejo, poleg tega pa je material viskoelastičen. Obstajajo določene naprave, ki se pritrdijo na membrano in merijo napetosti na osnovi hitrosti valov v membrani ob mehanskem impulzu, na osnovi ukrivljenja membrane pod pritiskom ali na osnovi odpora na vtis bata (slika 89 desno). Velik pomen pri preverjanju napetosti v membrani ima izkušen inštalater membran, saj lahko že na otip približno oceni raven napetja (Seidel, 2009).



Slika 89: Levo: Naprava za merjenje sile v kablu na frekvenčni osnovi; Sredina: Tritočkovna upogibna naprava za merjenje sile v kablu; Desno: Naprava za merjenje napetosti v membrani z vtisnim batom (Seidel, 2009)

9 PRIMERI PROJEKTOV

Za projektiranje prednapetih membranskih konstrukcij potrebujemo specializirano računalniško orodje, s katerim bomo lahko poiskali ravnotežno obliko, izvedli nelinearno statično analizo in skrojili kompleksno membransko površino. Vendar pa sam računalniški program ni dovolj, je le orodje, ki nam olajša delo. Za smiselno delo s takšnim programom je potrebno dobro poznavanje obnašanja prednapetih membranskih konstrukcij in membranskega materiala. Projektant sam, glede na prostorske in oblikovne zahteve in zmožnosti, določi geometrijske in napetostne robne pogoje za iskanje oblike in s tem posledično tudi končno obliko. Nato se kreira natančen model celotne konstrukcije, definirajo predvidene zunanje obtežbe in izvede statična analiza. Projektant mora kritično oceniti rezultate analize in preveriti, ali uporabljeni elementi lahko prenesejo nastale obremenitve. Naslednji korak v projektiranju prednapetih membran je njihovo krojenje. Glede na prostorske, napetostne in oblikovne razmere ter materialne lastnosti membran, se projektant odloči za razdelitev membrane in nato izdelava načrt za izdelavo vsakega posameznega kroja. Projektant prednapetih membranskih konstrukcij mora skozi vse faze projektiranja vedeti, katere detajle spojev bo uporabil med membrano in podporno konstrukcijo ter po katerem postopku bo potekala gradnja celotne konstrukcije, in se temu v vseh fazah projektiranja prilagajati.

S pomočjo programa Easy sem v tem poglavju prikazal postopek načrtovanja prednapetih membranskih konstrukcij na treh različnih primerih. Izbral sem tri različne tipe prednapetih membranskih konstrukcij. Z namenom čim bolj raznolike obravnave, so konstrukcije različnih oblik in velikosti locirane po različnih delih Slovenije, izbrani pa so tudi različni membranski materiali. Da bi čim bolj prikazal fleksibilno obnašanje tovrstnih konstrukcij, so uporabljene membrane s fleksibilnimi robovi, podporno konstrukcijo pa v večini primerov predstavljajo sistemi z vrtljivo vpetim jamborom, stabiliziranim s kablji.

Za vsako konstrukcijo sem najprej določil robne pogoje in poiskal uravnoteženo obliko. Nato sem modeliral še nosilno konstrukcijo in določil togosti oz. materialne lastnosti in potrebne karakteristike prerezov posameznih elementov celotne konstrukcije. Jambore sem izbral s seznama standardnih jeklenih cevi (Beg, 2011), kable oz. žične splete pa s kataloga galvaniziranih žičnih spleto podjetja Nobles (Galvanised..., 2011) (slika 90). Za natančno določitev materialnih lastnosti izbranih membran bi bilo potrebno opraviti dvoosne teste v skladu s predvidenimi obtežbami, vendar ker teh podatkov nisem imel, sem uporabil rezultate testov, ki sem jih pridobil od proizvajalca membrane.

1	2	3	4	5	6
Nominal diameter	Construction*	Minimum Breaking Force Grade 1570	Nominal mass	Nominal area	Young modulus**
mm	(abbreviated form)	kN	kg/100m	mm ²	GPa
10	1x19	88	50.4	60.3	166
12	1x19	126	72.6	87.2	166
14	1x19	172	98.8	119	166
16	1x19	210	129	145	166
18	1x19	265	163	183	166
20	1x19	368	212	254	166
22	1x19	442	255	305	166
24	1x19	518	299	357	166
26	1x37	580	348	400	166
28	1x37	713	427	491	166
32	1x37	897	538	618	166
36	1x61	1150	687	789	166
40	1x61	1420	848	975	166
44	1x61	1800	1080	1240	166
48	1x91	2050	1260	1450	166
52	1x91	2400	1480	1700	166
54	1x91	2610	1610	1850	166
58	1x127	2850	1760	2020	158
64	1x127	3640	2250	2580	158
70	1x189	4450	2750	3150	158
76	1x189	4850	2990	3430	158
82	1x217	5560	3520	4050	158
86	1x217	6040	3830	440	158
90	1x271	6940	4400	5050	158
95	1x271	7550	4790	5500	158
102	1x271	8850	5610	6440	158

Slika 90: Seznam galvaniziranih kablov proizvajalca Nobles (Membranes, 2011)

Kritični zunanji obtežbi, ki delujeta na prednapeto membransko konstrukcijo sta obtežba snega in vetra. Njune vplive sem določil v skladu z standardoma SIST EN 1991-1-3 (sneg) in SIST EN 1991-1-4 (veter). Slednji sicer določa tudi koeficiente za razdelitev obtežbe po površini strehe, vendar le za osnovne oblike streh. Prednapete membranske konstrukcije imajo zelo kompleksne oblike in se fleksibilno obnašajo, zato sem obtežbo vetra razdelil po površini membrane v skladu z priporočili določenih strokovnih del, rezultati testiranj v vetrnem tunelu in lastni kritični presoji. Pri obtežnih kombinacijah z več spremenljivimi obtežbami sem upošteval kombinacijski faktor ψ_0 v skladu s SIST EN 1990.

Sledi dimenzioniranje oz. kontrola nosilnosti vseh elementov konstrukcije. Za dimenzioniranje membrane sem uporabil načelo dovoljenih vrednosti glede na priporočila iz Evropskega vodiča za prednapete membranske konstrukcije (Forster in sod., 2004); dovoljeno vrednost napetosti sem dobil tako, da sem karakteristične vrednosti maksimalnih enosnih napetosti, ki jih podaja proizvajalec, delil z ustreznim varnostnim faktorjem. Za PVC membrane sem uporabil varnostni faktor 5, za PTFE membrane pa 6. Dovoljena napetost mora biti seveda manjša od napetosti, dobljenih pri nelinearni analizi s karakterističnimi vplivi zunanjih obtežb. Preveril sem tudi nosilnost zvarov. Kot kritično napetost za kontrolo zvarov sem upošteval največje napetosti v membrani pravokotno na zvar. Ker nisem izvedel meritev nosilnosti zvarov, sem za nosilnost zvarov upošteval 80 % natezne trdnosti same membrane. Pri določitvi dovoljenih napetosti v zvaru (pravokotno na zvar) sem upošteval enak varnostni faktor, kot za sam material.

Jeklene kable sem dimenzioniral tako, da sem natezne sile, dobljene pri nelinearni analizi s karakteristični vplivi zunanjih obtežb, pomnožil z varnostnim faktorjem 2,5 (Forster in sod., 2004) in jih nato primerjal z minimalno nosilnostjo, ki jo navaja proizvajalec.

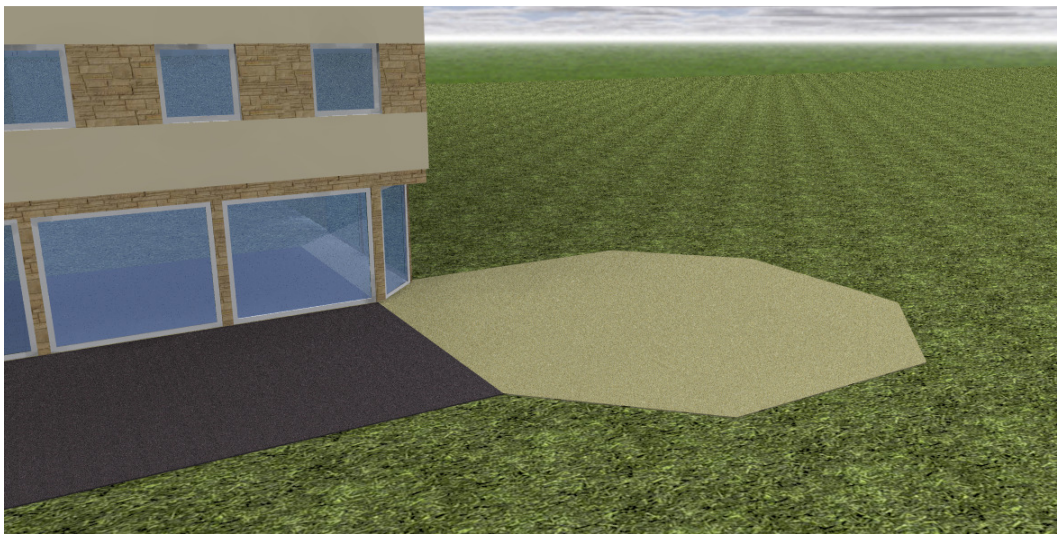
Jeklene dele membranske konstrukcije sem dimenzioniral po pravilih iz Evrokod standarda SIST EN 1993-1-1. Glede na priporočila iz Evropskega vodiča za prednapete membranske konstrukcije (Forster in sod., 2004), sem projektno vrednost notranjih količin dobil tako, da sem vrednosti, dobljene pri nelinearni analizi s karakteristični vplivi zunanjih obtežb, pomnožil z ustreznim varnostnim faktorjem, ki je odvisen od zunanje obtežbe ($\gamma = 1,5$, če prevladuje obtežba snega oz. $\gamma = 1,6$, če prevladuje vpliv vetra).

Detajlov v sklopu te diplomske naloge nisem natančno projektiral in dimenzioniral, temveč sem le predlagal možne rešitve. Detajli (večinoma so jekleni) se sicer dimenzionirajo po pravilih standarda EC 3 na projektne sile oziroma napetosti, ki jih pridobimo na način opisan v prejšnjem odstavku. Detajli in nosilna konstrukcija morajo biti izdelani tako, da kar najbolje sledijo računalniškemu modelu prednapete membranske konstrukcije. Nosilna konstrukcija mora omogočati, da pripeta membrana zavzame takšno obliko, kot smo jo poiskali v procesu iskanja oblike, poleg same geometrije pa moramo z detajli poskrbeti tudi za predvidene prostostne stopnje. Le tako bo naša konstrukcija funkcionalna in estetska.

Sledi projektiranje krojev membrane. Z modulom za krojenje v programu Easy sem, v skladu s potekom največjih napetosti in širino osnovnega membranskega materiala, razdelil membransko površino z geodetskimi črtami. Program v sklopu krojenja avtomatsko izvede tudi kompenzacijo vsakega kosa membrane. Kompenzacijske faktorje sem odčital iz rezultatov dvoosnih nateznih testov, ki sem jih pridobil od proizvajalca membrane. Krojem bi bilo na robovih potrebno dodati ali odvzeti še nekaj materiala za izdelavo stičnih detajlov (fleksibilni robovi, zvari,...), da se bo dejanski rob izdelane membrane ujema z načrtovano sistemsko linijo. Ker nisem natančno dimenzioniral robnih detajlov, sem ta korak izpustil.

Na koncu vsakega posameznega primera sem za na kratko opisal enega izmed možnih postopkov postavitve konstrukcije in napenjanja membrane.

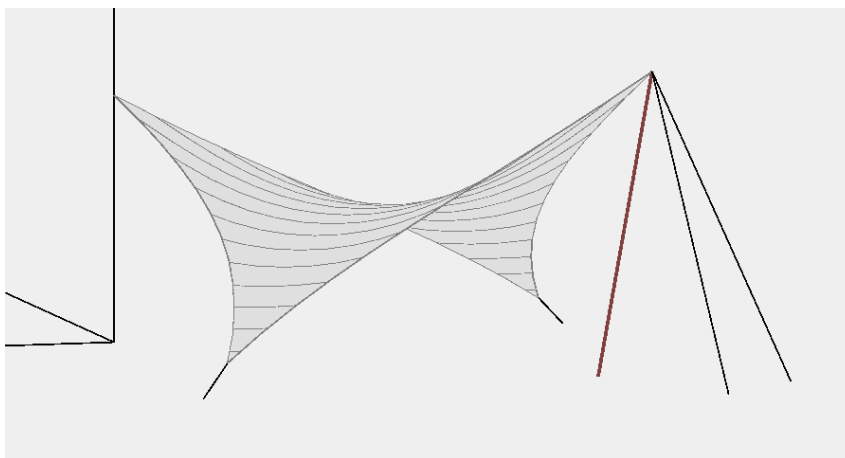
9.1 Nadstrešek v Ljubljani



Slika 91: Trenutno stanje terase

9.1.1 Zasnova

Ob poslovnem objektu želimo izdelati nadstrešek nad teraso gostinskega lokala. Lokal s teraso je umeščen ob vogalu objekta (slika 91). Odločimo se za preprosto štiri točkovno sedlasto obliko s fleksibilnimi robovi. Ogliščne točke tvorijo kvadrat z diagonalo 10 m. Visoka točka na višini 4 m bo pritrjena s kratkim kablom na vogal objekta, druga visoka točka na višini 5 m pa bo podprta z jamborom in dvema stabilizacijskima kabloma. Nizki točki, na višini 0,5 m, bosta s kratkima kabloma pripeti v tla. Zahteva je, da je višina večine pokritega prostora nad 2 m (slika 92).

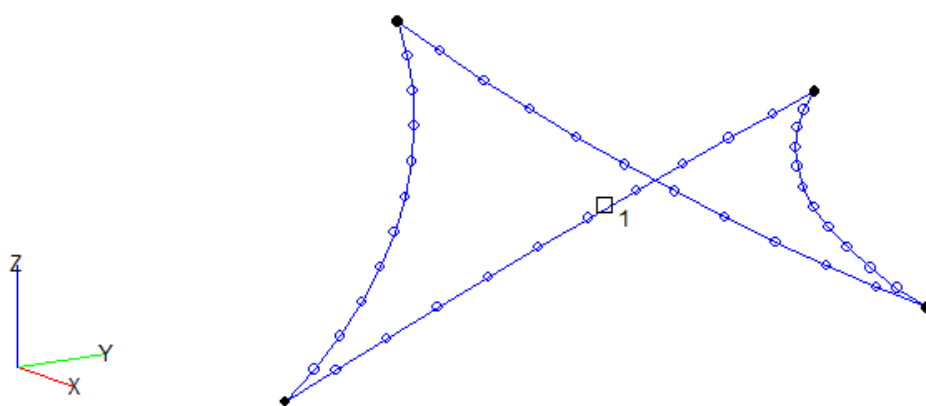


Slika 92: Shema predvidenega nadkritja terase

9.1.2 Iskanje oblike

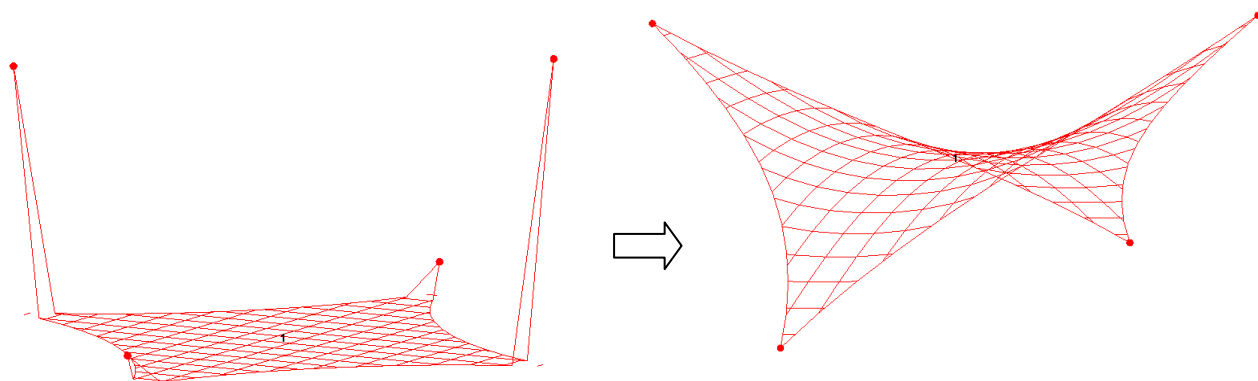
Vhodni podatki:

- Koordinate robnih fiksnih točk ((0,5,4), (5,0,0'5), (10,5,5), (5,10,0'5))
- Prednapetje 1 kN/m v membrani v obeh smereh
- 10 % ukrivljenost robnih kablov (na njih deluje membrana s 1 kN/m): predpostavim, da je tloris kabla v ravnini xy del krožnice ter da je razdalja v ravnini xy med tetivo in vrhom kabla 10 % radija krožnice
- Gostota mreže linijskih elementov membrane je 0,5 m
- Vsak robni kabel se razdeli na 11 enakih elementov



Slika 93: Podana geometrija fiksnih točk in vmesnih robnih elementov

Iz podanih podatkov program tvori začetno mrežo linijskih elementov in v vsakemu elementu določi gostoto sile (upoštevata tlorisne dolžine, slika 94 levo), nato pa poišče ravnovesno obliko za podane robne pogoje in določene gostote sil (slika 94 desno).

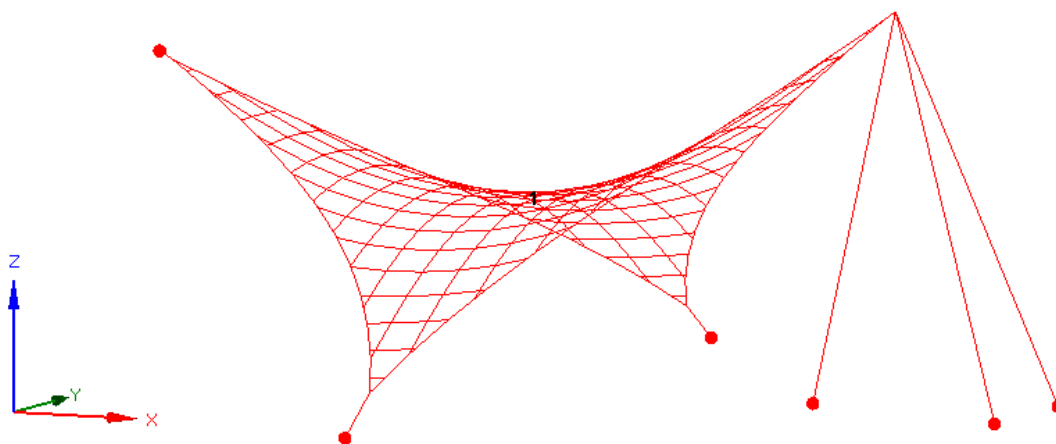


Slika 94: Iskanje ravnotežne oblike

9.1.3 Statična analiza

Pred začetkom statične analize moramo podati togosti (EA) kablov in elastični modul membrane (E) v osnovni in vtokovni smeri. Program, na osnovi geometrije površine membrane, vsakemu linijskemu elementu določi togost. Ker poleg togosti poznamo tudi sile v vseh elementih ($F = q l$), lahko program po Hookovem zakonu izračuna nenapete dolžine posameznih elementov. Če na nenapete elemente vnesemo predvideno silo prednapetja, dobimo seveda identično obliko celotne konstrukcije, kot pri procesu iskanja oblike.

Za enostavne podpore ima program vključen urejevalnik, s katerim določimo vrsto podpore (v našem primeru jambor z dvema stabilizacijskima kabloma oziroma samostojni kabel v smeri rezultante sil) v določeni fiksni točki. Ta nato avtomatsko izračuna začetne dolžine posameznih podpornih elementov tako, da oglišče membrane v stanju prednapetja zadrži predvideno pozicijo.



Slika 95: Končni model nadstreška za statično analizo

Izbira podpornih elementov in materiala membrane:

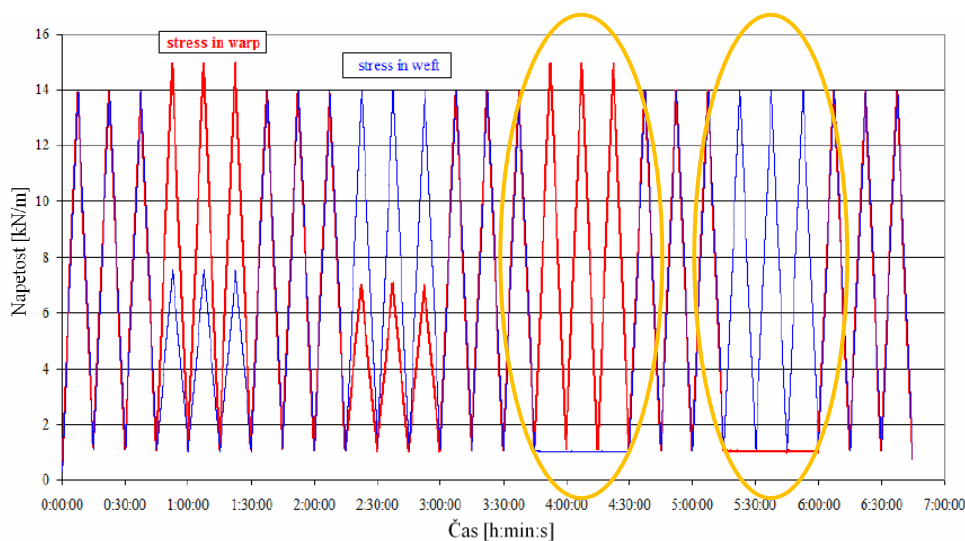
Stabilizacijska kabla jambora: $1 \times 37, d = 28 \text{ mm}; EA = 16600 \text{ kN/cm}^2 * 4,91 \text{ cm}^2 = 81506 \text{ kN}$

Kratka stabilizacijska kabla nizkih točk: $1 \times 19, d = 18 \text{ mm}; EA = 16600 \text{ kN/cm}^2 * 1,83 \text{ cm}^2 = 30378 \text{ kN}$

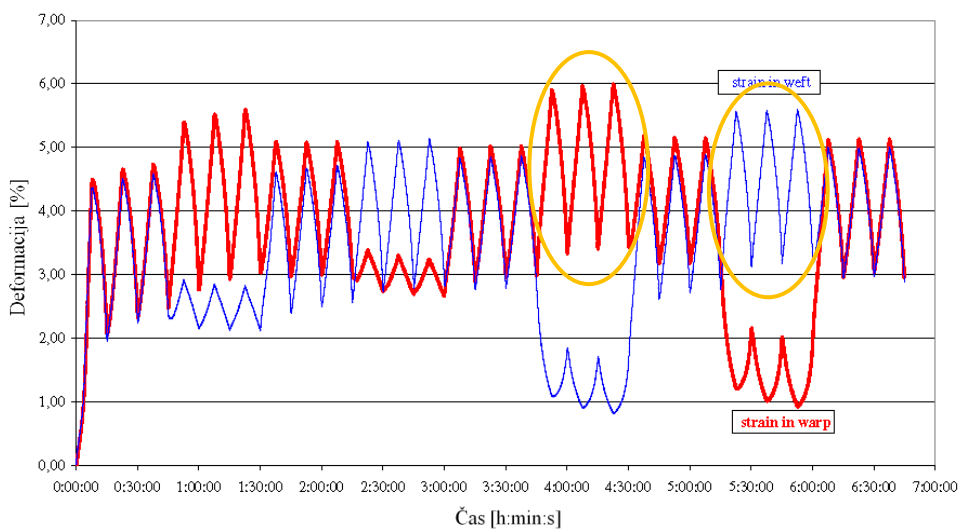
Jambor: cev 216/10; $EA = 21000 \text{ kN/cm}^2 * 64,72 \text{ cm}^2 = 1359120 \text{ kN}$

Membrana: PET/PVC membrana Ferrari Precontraint 702 T2 (Tip I)

Določitev elastičnih modulov membrane:



Slika 96: Potek obremenjevanja preizkušanca Preconstraint 702 T2 v dvoosnem nateznem stroju (rdeča – osnova, modra – votek)



Slika 97: Deformacijsko obnašanje preizkušanca Preconstraint 702 T2 (rdeča – osnova, modra – votek)

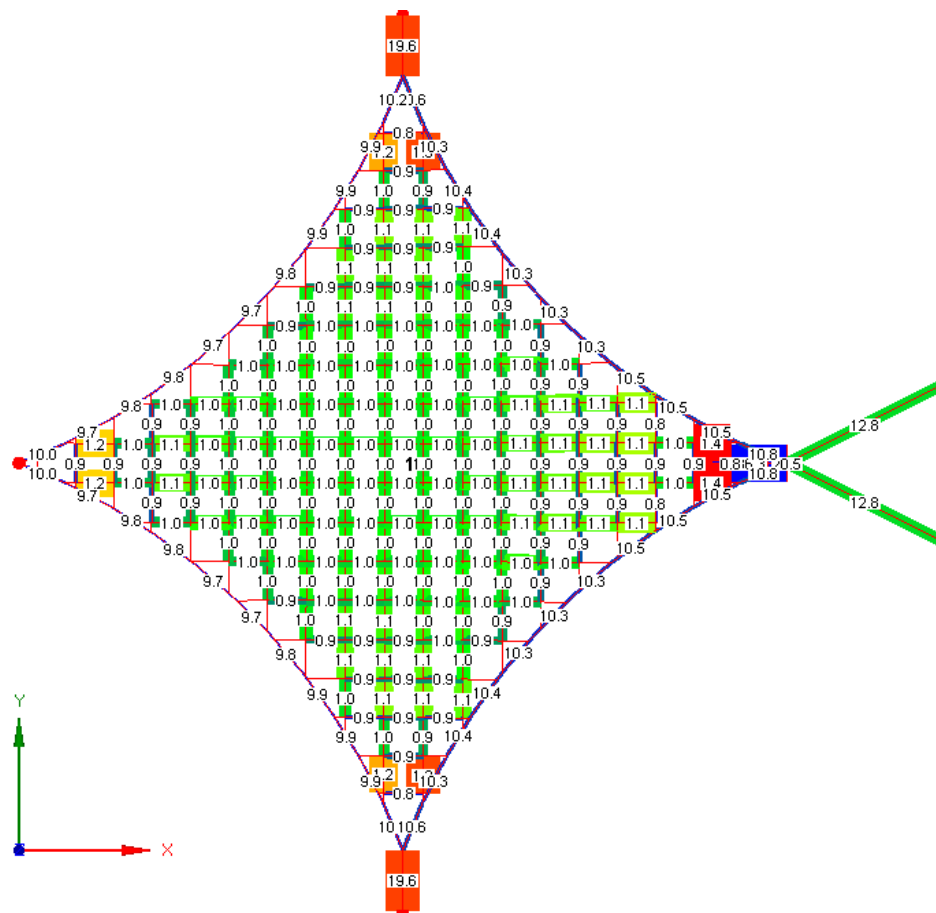
Pri delovanju obtežbe snega se napetost v konkavnih nitih močno poveča, v pravokotni smeri pa močno pade, ali se celo izniči. Pri obtežbi vetra je ravno obratno. Zaradi tega dejstva, bomo materialne lastnosti membrane razbrali iz rezultatov dela testa, kjer opazovano smer nategujemo, druga smer pa ostaja na nivoju prednapetja (obkrožen del na slikah 96 in 97).

$$E_x = \Delta\sigma_x / \Delta\varepsilon_x = 14 \text{ kN} / 0,026 \approx 540 \text{ kN}$$

$$E_y = \Delta\sigma_y / \Delta\varepsilon_y = 13 \text{ kN} / 0,024 \approx 540 \text{ kN}$$

Stanje prednapetja:

Napetosti v membrani in sile v kabljih pri prednapetju so prikazane na sliki 98.



Slika 98: Napetosti v membrani in sile v kabljih v stanju prednapetja

Obtežbe:

Obravnavamo vplive snega in vetra. Obtežbo snega naložimo enakomerno na celotno konstrukcijo (slika 1). Obtežbo vetra bomo upoštevali v treh različicah, in sicer veter, kjer je celotna membranska površina v srku, veter v smeri x (vzdolž visokih točk sedlaste površine) in veter v smeri y (vzdolž nizkih točk sedlaste površine). Obtežbo vetra v srku bomo upoštevali enakomerno po celotni površini (slika 1), ostali obtežbi vetra pa bomo porazdelili po površini. Za veter Y približno upoštevamo oblikovne koeficiente iz testa podobne konstrukcije v vetrnem tunelu (Fang-hui in sod., 2009) (razporeditev: slika 100 desno, test: slika 99 desno), za drugo smer pa razporedimo faktorje v skladu z lastno kritično presojo (slika 100 levo). Lastno težo konstrukcije zanemarimo.

Sneg:

(Cona A2, nadmorska višina 200 m)

$$s_k = 1,293 * [1 + (200/728)^2] = 1,39 \text{ kN/m}^2$$

a) Sneg

$$s_l = \mu_l * s = 0,8 * 1,39 \text{ kN/m}^2 = 1,11 \text{ kN/m}^2$$

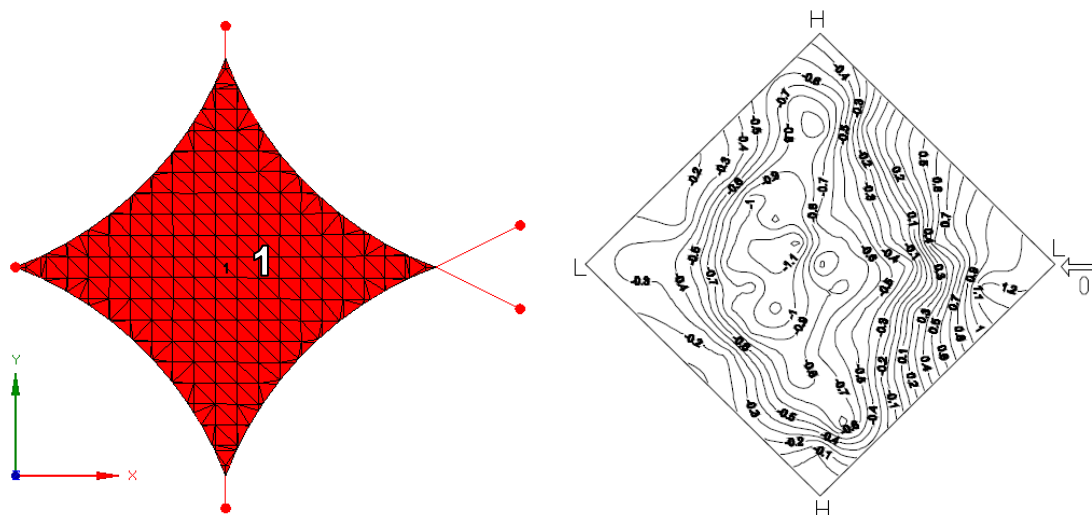
Veter:

(Cona 1, teren II. Kategorije, h=2,5m)

$$v_k = c_e(2,5 \text{ m}) * q_b = 1,51 * 0,25 \text{ kN/m}^2 = 0,38 \text{ kN/m}^2$$

b) Veter (srk)

$$v_l = c_{pl} * v = -1,0 * 0,38 \text{ kN/m}^2 = -1,08 \text{ kN/m}^2$$



Slika 99: Razpored obtežbe snega in vetra (srk) – enakomerno po celotni površini; Desno: Koefficienti razporeditve obtežbe vetra za sedlasto prednapeto membransko konstrukcijo z ravnimi togimi robovi (rezultati testiranj v vetrnem tunelu (Fang-hui in sod., 2009))

c) Veter X

$$v_1 = c_{p1} * v = 1,2 * 0,38 \text{ kN/m}^2 = 0,46 \text{ kN/m}^2$$

$$v_2 = c_{p2} * v = -1,2 * 0,38 \text{ kN/m}^2 = -0,46 \text{ kN/m}^2$$

$$v_3 = c_{p3} * v = -0,9 * 0,38 \text{ kN/m}^2 = -0,34 \text{ kN/m}^2$$

$$v_4 = c_{p4} * v = -0,6 * 0,38 \text{ kN/m}^2 = -0,23 \text{ kN/m}^2$$

d) Veter Y

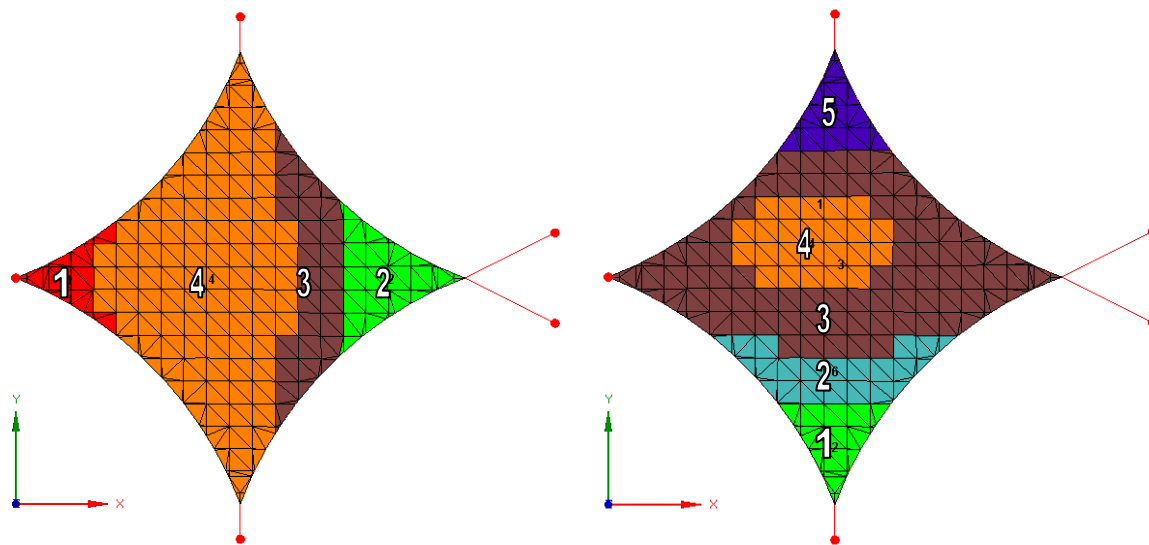
$$v_1 = c_{p1} * v = 1,2 * 0,38 \text{ kN/m}^2 = 0,46 \text{ kN/m}^2$$

$$v_2 = c_{p2} * v = 0,6 * 0,38 \text{ kN/m}^2 = 0,23 \text{ kN/m}^2$$

$$v_3 = c_{p3} * v = -0,9 * 0,38 \text{ kN/m}^2 = -0,34 \text{ kN/m}^2$$

$$v_4 = c_{p4} * v = -1,2 * 0,38 \text{ kN/m}^2 = -0,46 \text{ kN/m}^2$$

$$v_5 = c_{p5} * v = -0,4 * 0,38 \text{ kN/m}^2 = -0,15 \text{ kN/m}^2$$



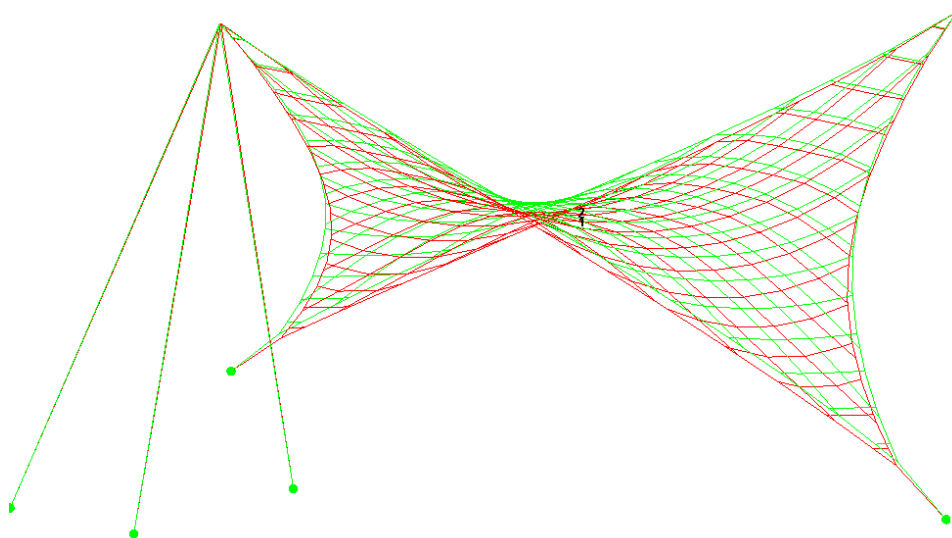
Slika 100: Levo: Razpored obtežbe veter X; Desno: Razpored obtežbe veter Y

Obtežne kombinacije:

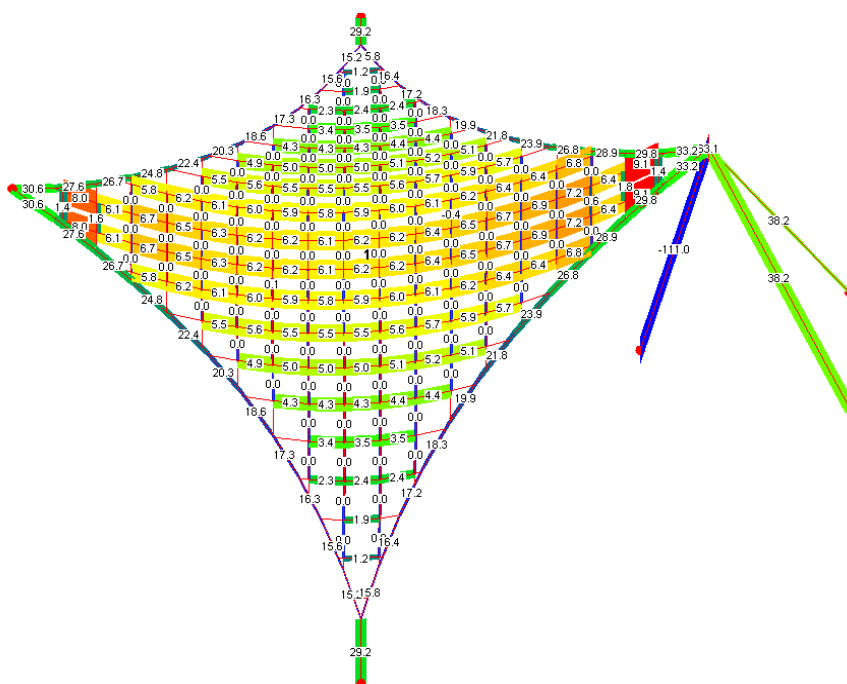
- 1) Prednapetje + sneg
- 2) Prednapetje + veter (srk)
- 3) Prednapetje + veter X
- 4) Prednapetje + veter Y
- 5) Prednapetje + sneg + 0,6 * veter X
- 6) Prednapetje + sneg + 0,6 * veter Y

Rezultati analize

1) Prednapetje + sneg



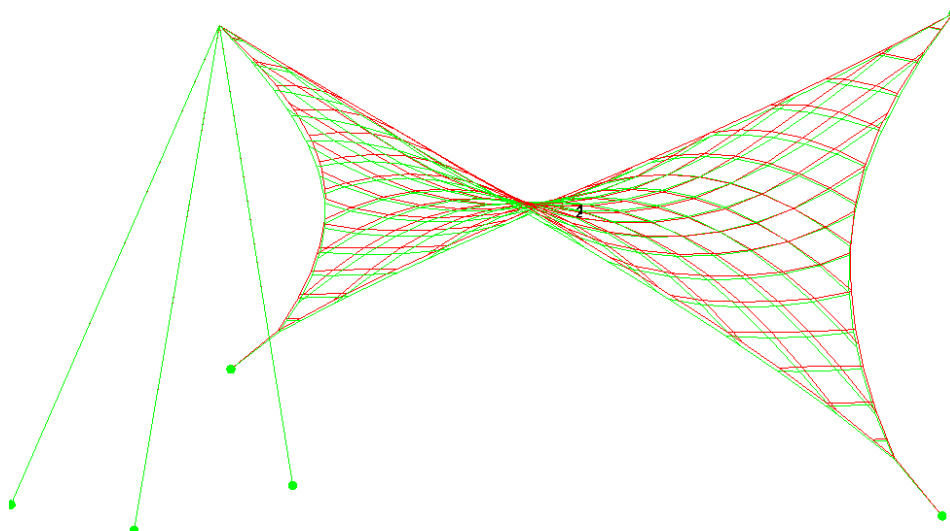
Slika 101: Primerjava začetne oblike in deformirane oblike zaradi obtežbe snega (zeleno – začetna oblika, rdeče – deformirana oblika)



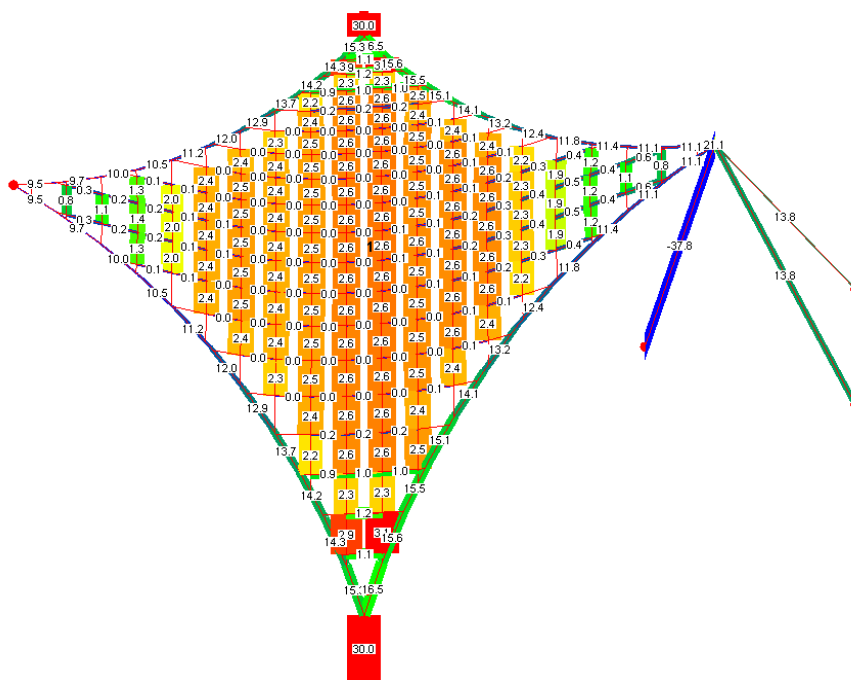
Slika 102: Potek napetosti v membrani in sil v kablju zaradi obtežbe snega

Napetosti v smeri visečega loka se povečajo, večji je razpon, bolj se povečajo. Največjo napetost imamo v oglišču membrane ob najvišji fiksni točki, in sicer pribl. 7,7 kN/m. V smeri stoječega loka po praktično celotni površini izgubimo prednapetje. Na sredini se membrana spusti za 11 cm, ob spodnjih ogliščih pa tudi do 21 cm.

2) Prednapetje + veter (srk)



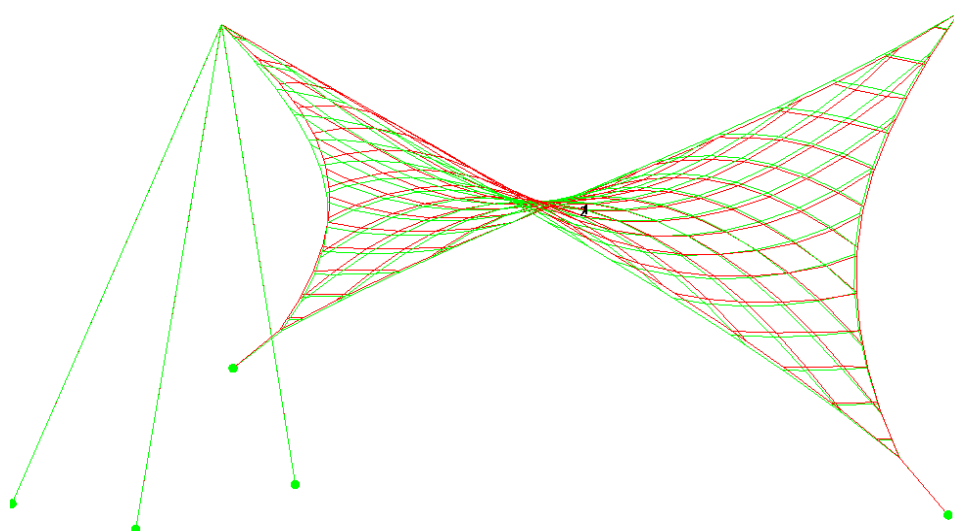
Slika 103: Primerjava začetne oblike in deformirane oblike zaradi obtežbe vetra (srk) (zeleno – začetna oblika, rdeče – deformirana oblika)



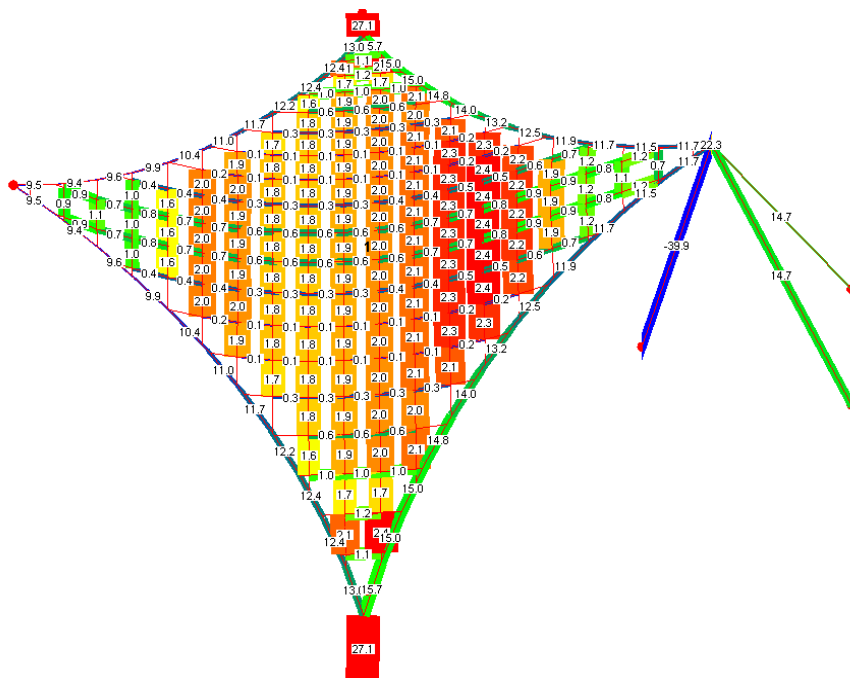
Slika 104: Potek napetosti v membrani in sil v kablju zaradi obtežbe vetra (srk)

Napetosti se povečajo v smeri stoječega loka. Največje so po sredini med nizkima točkama, kjer dosežejo 2,6 kN/m. V drugi smeri prednapetje po večini površine izgubimo. Ob spodnjih ogliščih pride po pomika 7 cm navzgor, od zgornjih pa tudi do 12 cm navzgor. Sredina se spusti za 2 cm.

3) Prednapetje + veter X



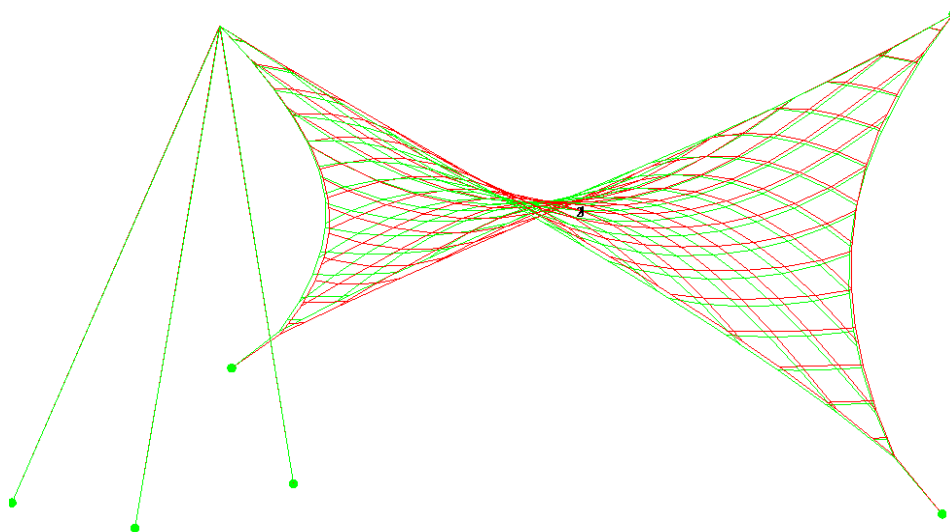
Slika 105: Primerjava začetne oblike in deformirane oblike zaradi obtežbe vetra X (zeleno – začetna oblika, rdeče – deformirana oblika)



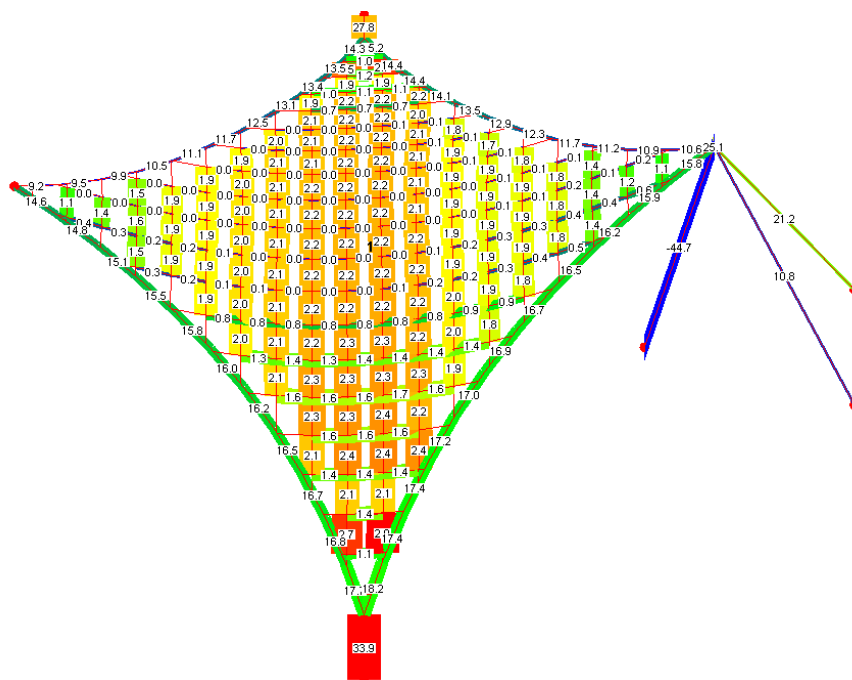
Slika 106: Potek napetosti v membrani in sil v kablju zaradi obtežbe vetra X

Največje natezne napetosti nastanejo na privetrni strani, kjer veter membrano dviga. Največja napetost je v smeri konveksne ukrivljenosti (2,4 kN/m), v drugih območjih je nižja. V smeri konkavne ukrivljenosti so napetosti nižje od prednapetostne ravni, vendar še vedno obdržijo napetje. Največji pomik membrane je na območju največjih napetosti. Tu veter membrano premakne za dobrih 16 cm.

4) Prednapetje + veter Y



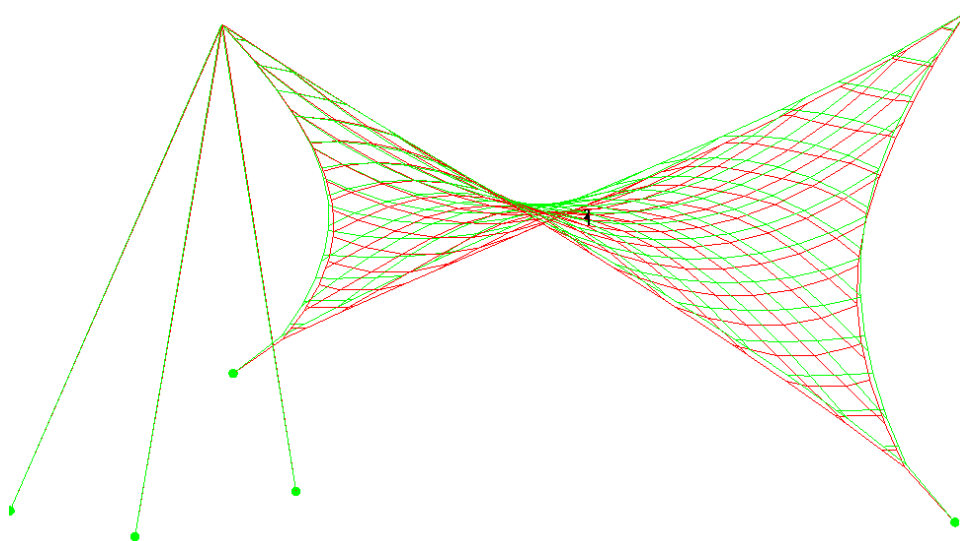
Slika 107: Primerjava začetne oblike in deformirane oblike zaradi obtežbe vetra Y (zeleno – začetna oblika, rdeče – deformirana oblika)



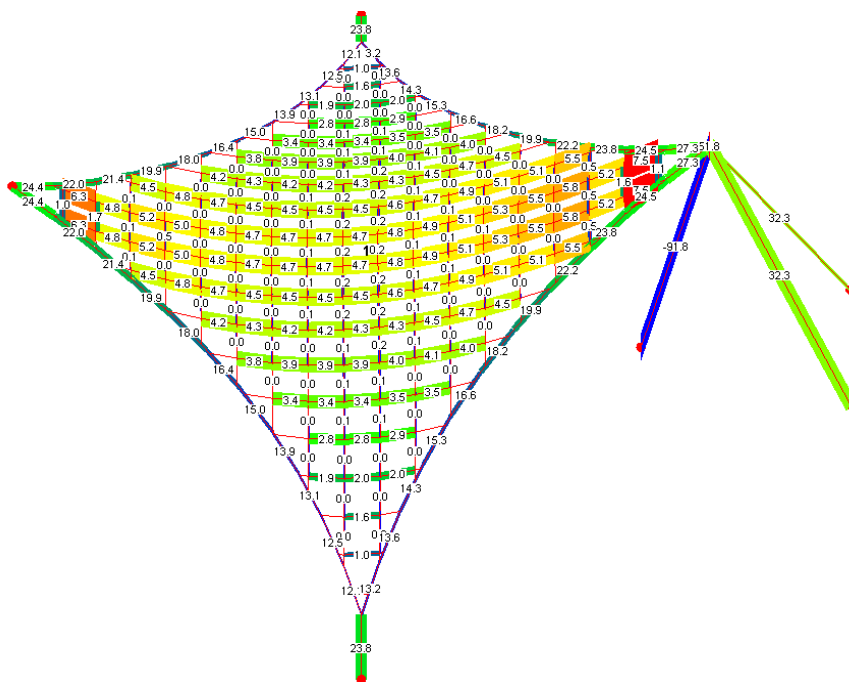
Slika 108: Potek napetosti v membrani in sil v kablju zaradi obtežbe vetra Y

Največje napetosti so, kot je za veter značilno, v smeri konveksne ukrivljenosti in znašajo 2,4 kN/m. Na privetni strani druga smer ostane napeta (do 1,6 kN/m), medtem ko površina, kjer veter deluje navzgor, popolnoma izgubi napetje. Na privetni strani veter membrano potisne navzdol, do 16 cm, na ostalih delih pa jo dvigne. Največji dvig je približno 11 cm.

5) Prednapetje + sneg + 0,6 * veter X



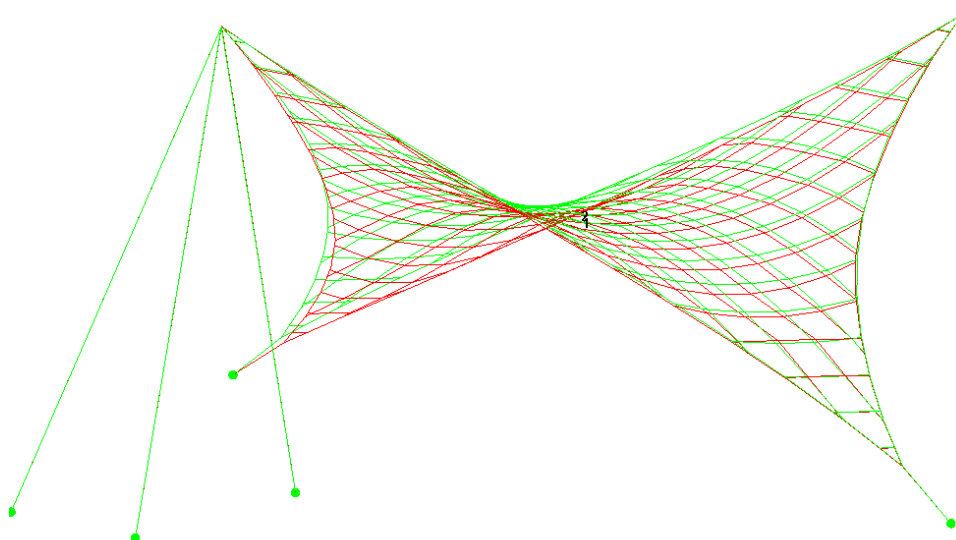
Slika 109: Primerjava začetne oblike in deformirane oblike zaradi kombinacije obtežbe snega in vetra X (zeleno – začetna oblika, rdeče – deformirana oblika)



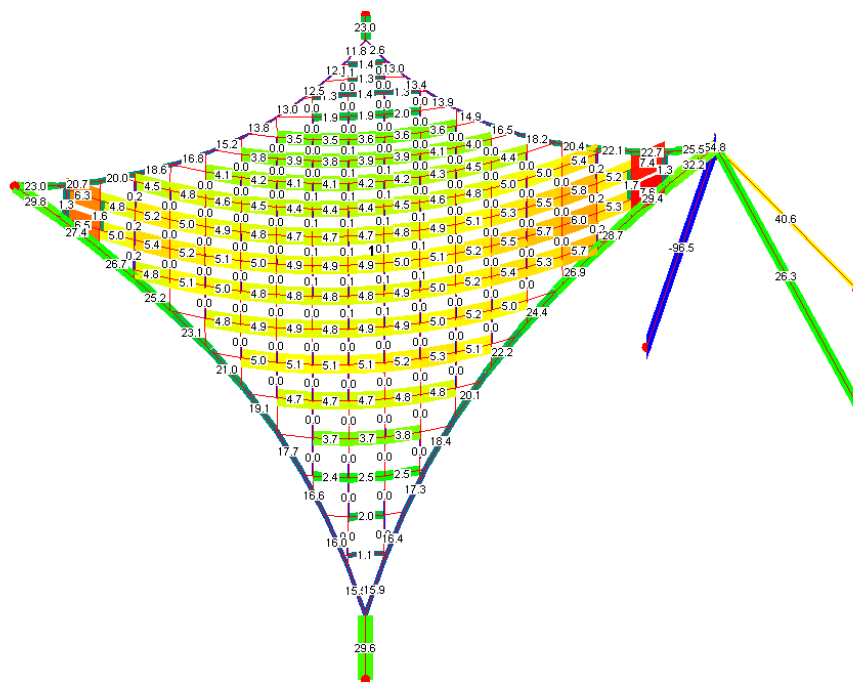
Slika 110: Potek napetosti v membrani in sil v kablju zaradi kombinacije obtežbe snega in vetra X

Pri tej obtežni kombinaciji prevladuje obtežba snega, zato so največje napetosti v konkavni smeri. Ob najvišjem oglišču znašajo do 6,2 kN/m. Vpliv vetra pripomore, da konveksna smer obdrži minimalno prednapetje. Membrana se povsod, razen v priletni konici, premakne navzdol, v nasprotni konici tudi za 13 cm.

6) Prednapetje + sneg + 0,6 * veter Y



Slika 111: Potek napetosti v membrani in sil v kabljih zaradi kombinacije obtežbe snega in vetra Y (zeleno – začetna oblika, rdeče – deformirana oblika)



Slika 112: Potek napetosti v membrani in sil v kabljih zaradi kombinacije obtežbe snega in vetra Y

Tudi v tem primeru je viden poglavitni vpliv obtežbe snega. Največje natezne napetosti so v konkavni smeri, vendar so bližje privetrni strani, kar je posledica vpliva vetra. Največja napetost v membrani je še vedno ob najvišji konici (6,3 kN/m). V drugi smeri središčni (rahlo zavetrni) del obdrži minimalno napetje, robni deli pa niso več napeti. Celotna membrana se pod vplivom snega in vetra premakne navzdol, le zavetrna konica se rahlo dvigne. V centralnem delu membrane je pomik 9 cm, v sredini privetrne konice pa tudi do 26 cm.

Tabela kritičnih rezultatov:Preglednica 6: Kritični rezultati statične analize po posameznih elementih in maks. pomik (p = prednapetje, s = sneg, v = veter (srk), v_x = veter X, v_y = veter Y)

Element \ Obt. komb.	p	s	v	v_x	v_y	s+0,6 v_x	s+0,6 v_y
Membrana [kN/m]	1,1	7,7	2,6*	2,4*	2,4*	6,2	6,3
Robni kabel [kN]	11	33	17	16	18	27	32
Jambor [kN]	36	111	38	40	45	92	97
Stab. kabel jambora [kN]	13	38	14	15	21	32	41
Kratki stab. kabel [kN]	20	29	30	27	34	24	30
Maks. pomik [cm]	/	21	12	16	16	13	26

* kritične vrednosti so v smeri konveksno ukrivljenih niti oz. pravokotno na smer krojev

Iz zgornjih rezultatov vidimo, da je sneg daleč najbolj kritična obtežba, veter v kombinaciji s snegom pa na konstrukcijo največkrat deluje pozitivno. Če medsebojno primerjamo podane vplive vetra, v rezultatih ni velike razlike, vseeno pa lahko zaključimo, da je najneugodnejši veter Y.

Program v robnih delih membrane program poda višje napetosti, kot jih lahko realno pričakujemo. To je zaradi izračuna širine posameznega elementa. Zgornji rezultati za membranske napetosti so napetosti, ki jih lahko realno pričakujemo in sem jih dobil z inženirsko presojo.

Največji pomik dobimo ob združitvi tlačnega vpliva vetra in snega. Pomik 26 cm, glede na razpon 10m, predstavlja 2,6 %, kar ocenjujem za sprejemljivo.

9.1.4 Dimenzioniranje**a) Membrana**

$$\sigma_{Ed} = 7,7 \text{ kN/m}$$

$$\sigma_{Rd} = 12 \text{ kN/m (osnovna smer)}$$

$$7,7 \text{ kN/m} < 12 \text{ kN/m} \quad \checkmark$$

Zvar

$$\sigma_{Ed} = 2,6 \text{ kN/m}$$

$$\sigma_{Rd} = 0,8 * 11,2 \text{ kN/m (votkovna smer)} = 9 \text{ kN/m}$$

$$2,6 \text{ kN/m} < 9 \text{ kN/m} \checkmark$$

b) Jambor

$$F_{Ed} = 111 \text{ kN} * 1,5 = 167 \text{ kN}$$

Izberem cevni profil 133/5 (S 235)

$$A = 20,11 \text{ cm}^2$$

$$i = 4,529 \text{ cm}$$

$$l_u = 510 \text{ cm}$$

$$\lambda = 510 \text{ cm} / (4,529 \text{ cm} * 93,9 * 1,0) = 1,2$$

$$\chi = 0,43 \text{ (uklonska krivulja c)}$$

$$F_{Rd} = 0,43 * 20,11 \text{ cm}^2 * 23,5 \text{ kN/cm}^2 = 203 \text{ kN}$$

$$167 \text{ kN} < 203 \text{ kN} \checkmark$$

c) Kabli

Robni kabli

$$F_{Ed} = 33 \text{ kN} * 2,5 = 83 \text{ kN}$$

$$F_{Rd} = 88 \text{ kN}$$

$$83 \text{ kN} < 88 \text{ kN} \checkmark$$

Stabilizacijska kabla jambora

$$F_{Ed} = 41 \text{ kN} * 2,5 = 103 \text{ kN}$$

$$F_{Rd} = 126 \text{ kN}$$

$$103 \text{ kN} < 126 \text{ kN} \checkmark$$

Kratka stabilizacijska kabla

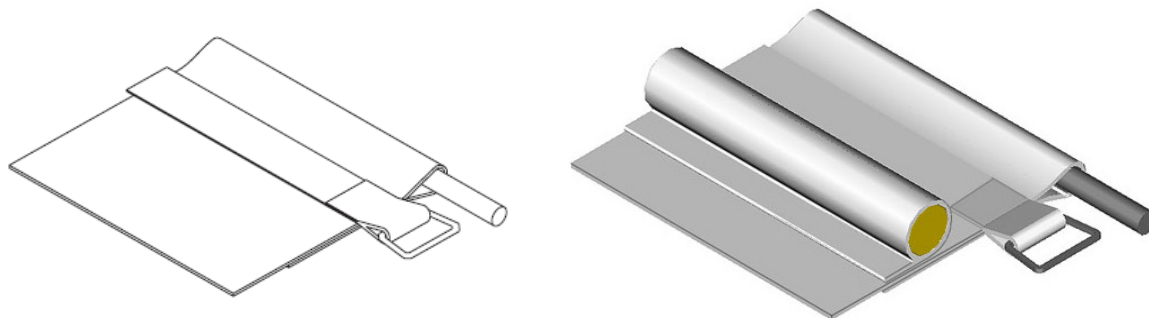
$$F_{Ed} = 34 \text{ kN} * 2,5 = 85 \text{ kN}$$

$$F_{Rd} = 88 \text{ kN}$$

$$85 \text{ kN} < 88 \text{ kN} \checkmark$$

9.1.5 Detajli

Spodnje slike prikazujejo detajle, ki bi jih lahko uporabili pri obravnavani konstrukciji.



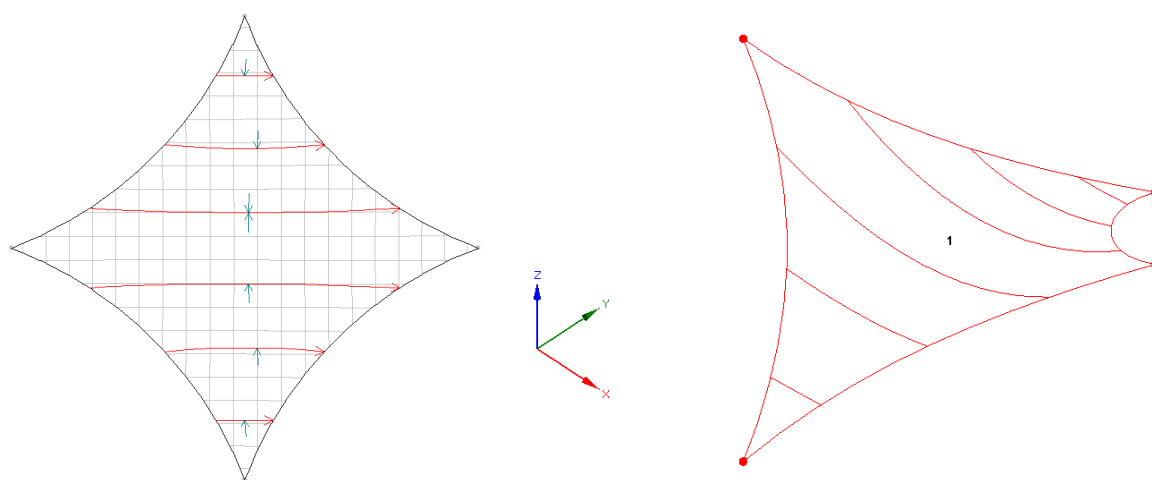
Slika 113: Robni fleksibilni detajl s kablom v membranskem zavihku (Seidel, 2009; Data ..., 2011)



Slika 114: Različni primeri ogliščnih detajlov (Tension ..., 2010; Armijos, 2010b; How ..., 2011)

9.1.6 Krojenje membrane

Glede na to, da so največje napetosti vzdolž visokih točk, bo to osnovna smer materiala membrane. Izbrani material je dobavljiv v širini 178 cm. Paziti moramo, da kroji ne bodo širši. Kompenzacija bo širino kroja zmanjšala, vendar pa moramo imeti v mislih, da bo potrebno še nekaj dodatnega materiala na robu za izdelavo zvarov med kroji. Zaradi izkoristka materiala in želene simetrije bosta začetni in končni kraj ožja. Geodetske črte po površini tvorimo tako, da imata prva in zadnja točka vsake črte enako x koordinato. Izbrana razdelitev membranske površine je prikazana na sliki 115.



Slika 115: Levo: Kreiranje geodetskih črt po površini membrane; Desno: Razdeljena površina membrane

Sledi projekcija vsakega od tridimenzionalnih delov na ravnino. Program s pomočjo zahtevnih algoritmov izvede to operacijo. Določiti moramo katera geodetska črta v kroju naj v projekciji postane ravna linija. Izberemo daljšo črto, pri srednjem kroju, kjer sta ti identični, pa poljubno (slika 15 levo). Izkaže se, da so robovi krojev praktično ravni, zato ta izbira v tokratnem primeru nima velikega pomena.

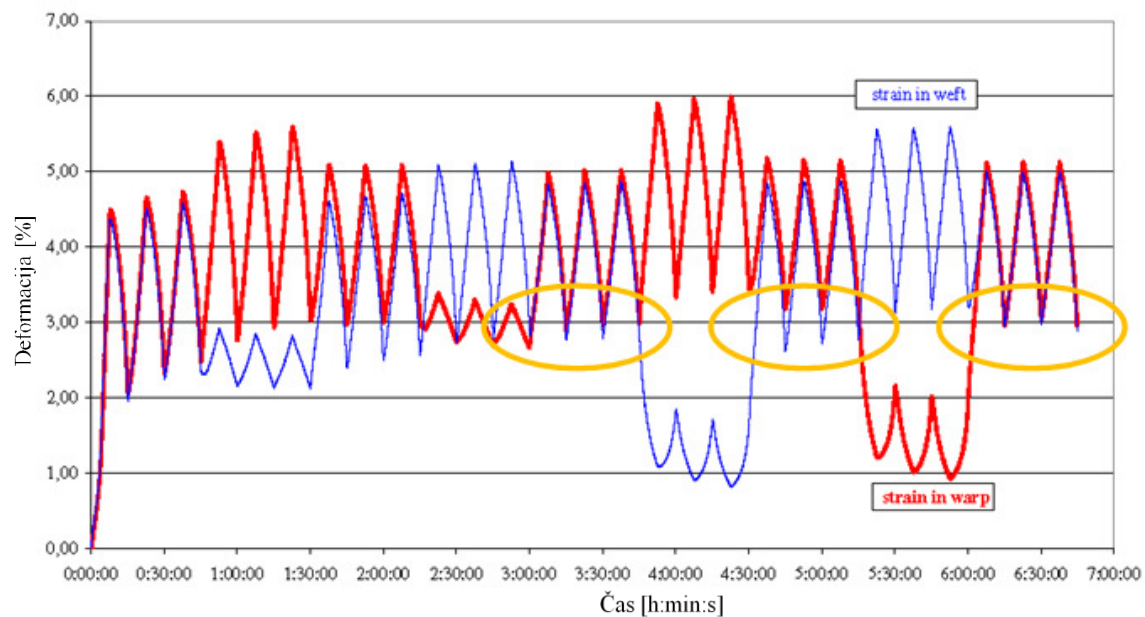
Kompenzacija:

Predpostavljeno prednapetje v osnovni smeri: 1 kN/m

Predpostavljeno prednapetje v votkovni smeri: 1 kN/m

Razmerje prednapetja: 1:1

Ker nimamo rezultatov dvoosnega nateznega testa za konkretno konstrukcijo, bomo kompenzacijske vrednosti poiskali iz podatkov proizvajalca za standardna prednapetostna razmerja (slika 96 in 116) in iz teh predpostavili vrednosti za predvideno prednapetostno razmerje. Kompenzirani kroji nadstreška so prikazani na sliki 117, primer načrta za izdelavo enega izmed krojev pa na sliki 118.

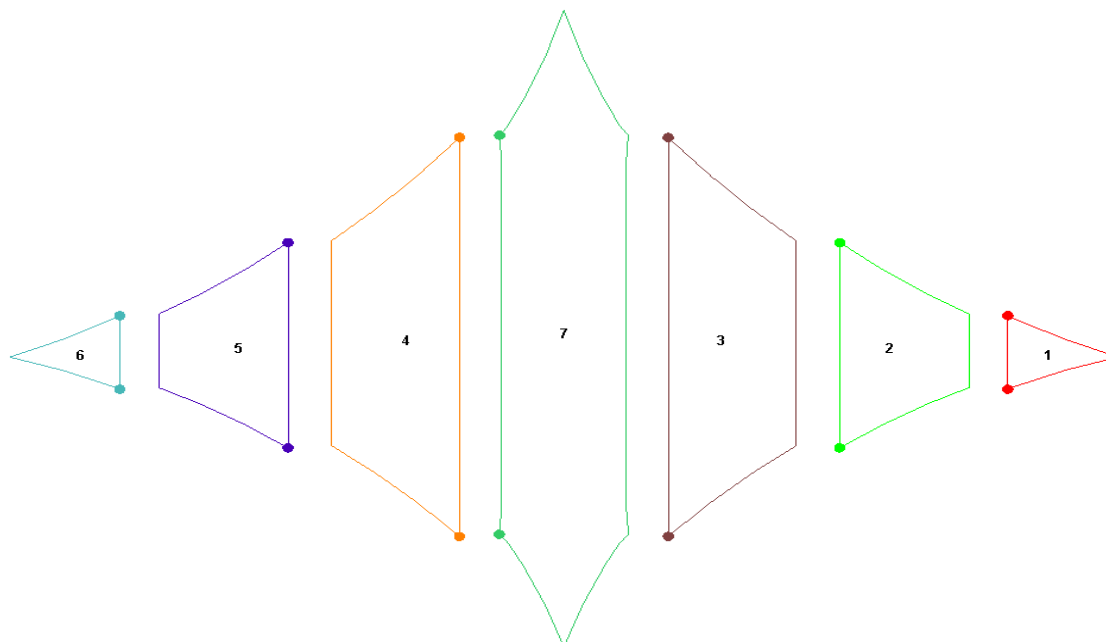


Slika 116: Deformacijsko obnašanje preizkušanca Preconstraint 702 T2 – določitev kompenzacijskih faktorjev (rdeča – osnova, modra – votek)

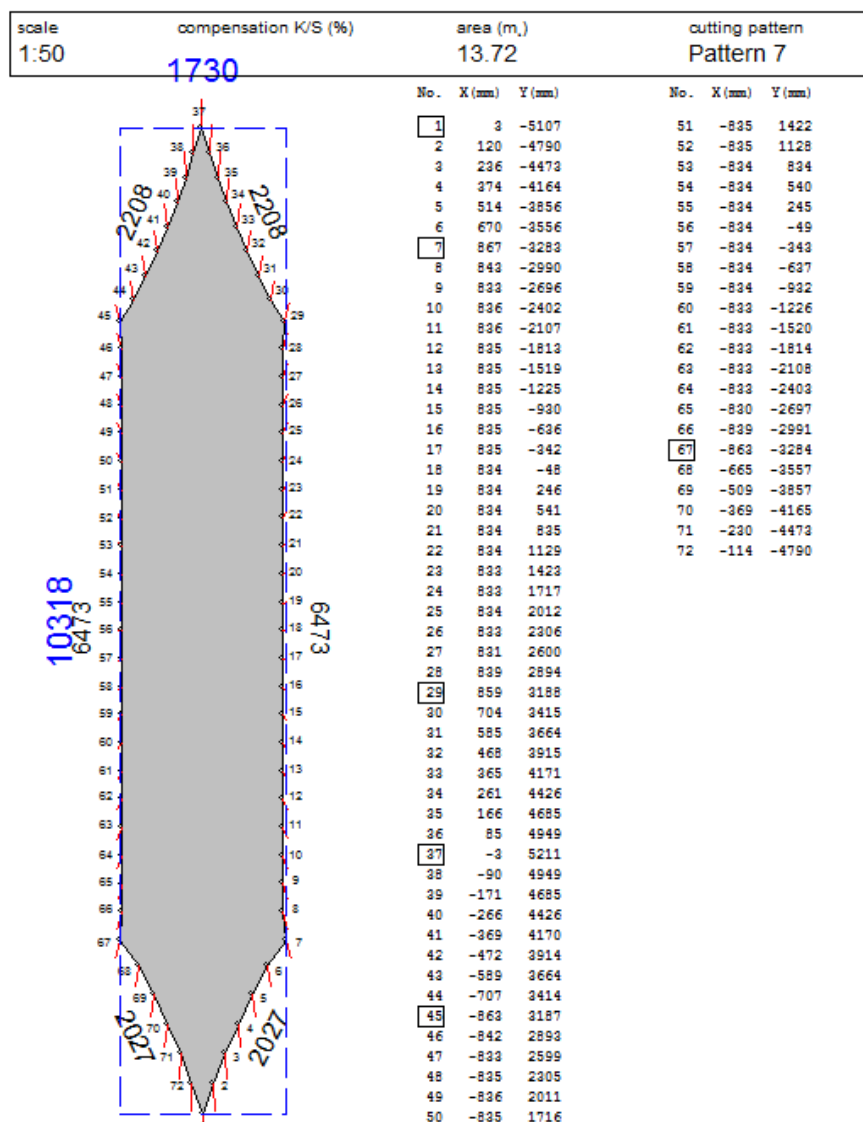
Vrednosti kompenzacije:

Osnovna smer: 3 %

Votkovna smer: 3 %



Slika 117: Kroji membrane za nadstrešek

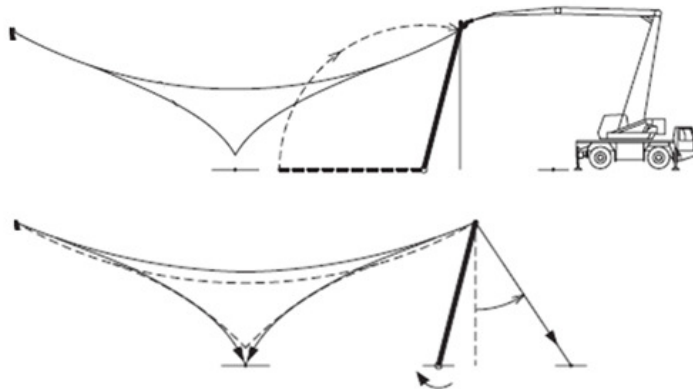


Slika 118: Primer načrta za izdelavo enega izmed krojev membrane za nadstrešek (rdeče črte po robovih kroja kažejo, koliko se je krajšal zaradi kompenzacije)

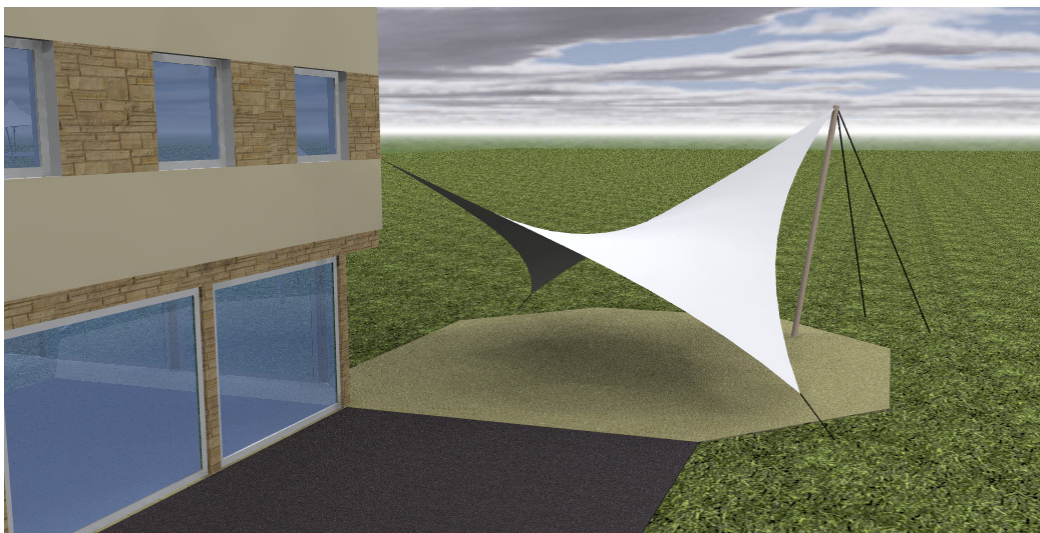
9.1.7 Postavitev

Izdelano membrano položimo na tla in preko spodnjih dveh kotnih plošč s kratkimi stabilizacijskimi kablji povežemo s predhodno pripravljenimi sidri v temeljnih tleh. Eno izmed zgornjih kotnih plošč pritrdimo na pripravljeno sidrišče na objektu, drugo pa na vrh jambora, ki je spodaj vrtljivo podprt in v tej fazi zasukan navzdol oz. položen na tla. Počasi dvigamo jambor (slika 119 zgoraj) in z mehanskimi zategovalci vlečemo stabilizacijska kabla proti njunim sidriščem v tleh, pri tem se v kabljih veča natezna sila (slika 119 spodaj). Ko stabilizacijska kabla pritrdimo v sidrišča je postavitev v večji meri končana, membrana in kabli pa so napeti do predvidenega nivoja (stanje prednapetja). Razne fine nastavitve prednapetja nastavljammo z spreminjanjem dolžine robnih kablov z vijaki v kotnih detajlih. Na koncu natančno preverimo geometrijo konstrukcije in v primeru, da imamo

ustrezne inštrumente, še sile v kabljih oz. napetosti v membrani. Slika 120 prikazuje predvideno končno stanje ob zaključku postavitve nadstreška.



Slika 119: Postopek postavitve in prednapenjanja nadstreška



Slika 120: Terasa z nadstreškom

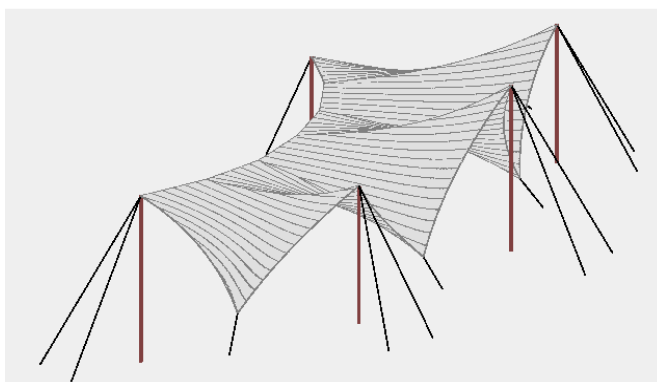
9.2 Nadkritje odprtega gledališča v Mariboru



Slika 121: Trenutno stanje odprtega gledališča

9.2.1 Zasnova

Nad tribunami odprtega gledališča (slika 121) želimo izdelati prednapeto membransko streho, ki bo uporabnike ščitila pred padavinami in sončnim sevanjem. Tribuna, ki je dolga 15,9 m, poteka v loku in ima šest sediščnih stopnic ($v = 50\text{cm}$, $\check{s} = 90\text{ cm}$), kar pomeni širino 5,4 m in višinsko razliko 3 m. Po vzoru številnih obstoječih streh velikih stadionov izberemo valovito obliko z radialnim potekom nosilnih kablov. Funkcijo notranjega nateznega obroča opravlja kabel, ki je na obeh koncih podprt z jamboroma. Poleg glavnega kabla imajo primarno nosilno vlogo še trije grebenski in dva dolinska kabla, ki so na enem koncu pritrjeni na glavni kabel. Drugi konci grebenskih kablov so pritrjeni na jambore, medtem ko so dolinski kabli preko kotnega detajla membrane sidrani direktno v tla. Vsi jambori so stabilizirani z dvema kabloma. Celotna membranska površina je sestavljena iz šestih posameznih enot, ki so pripete na primarne nosilne kable ter na zunanje fleksibilne robne kable. Sprednja jambora sta visoka 6m, zadnja robna 5m in zadnji sredinski 6m, vsi jambori so navpični (slika 122).



Slika 122: Shema predvidenega nadkritja amfiteatra

9.2.2 Iskanje oblike

Da preprečimo prevelike pomike načrtovane konstrukcije, morajo biti napetostne ravni vseh elementov precej velike, hkrati pa večje sile in napetosti pomenijo težjo in dražjo inštalacijo konstrukcije. Izberemo neko optimalno silo za glavni kabel $S = 150$ kN in prednapetje membrane 2 kN/m v obeh smereh. Določiti moramo tudi sile v primarnih radialnih kablji (F) tako, da približno ohranimo želeno geometrijo strehe. Uporabimo kotelno formulo in upoštevamo geometrijo in natezno silo glavnega kabla in vrednost prednapetja membrane.

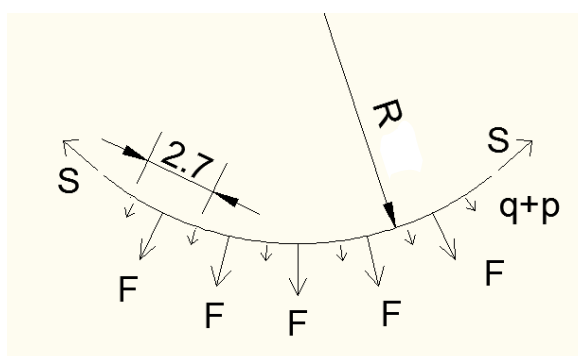
$$R = 12 \text{ m}$$

$$S = 150 \text{ kN}$$

$$p = 2 \text{ kN/m}$$

$$q = S / R = 12,5 \text{ kN/m}$$

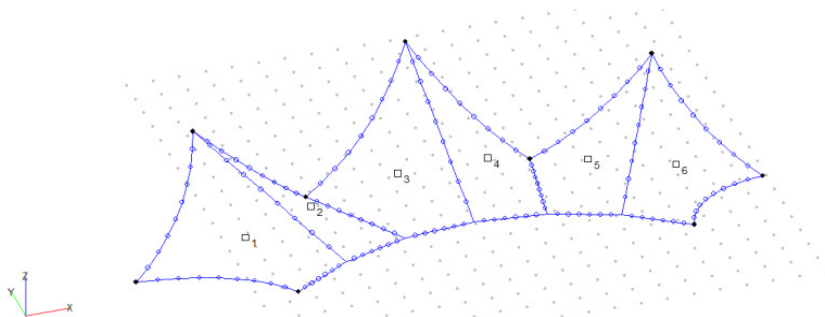
$$F = (q - p) * 2,7 \text{ m} = 28,4 \text{ kN}$$



Slika 123: Shema sil in napetosti, ki delujejo na glavni kabel

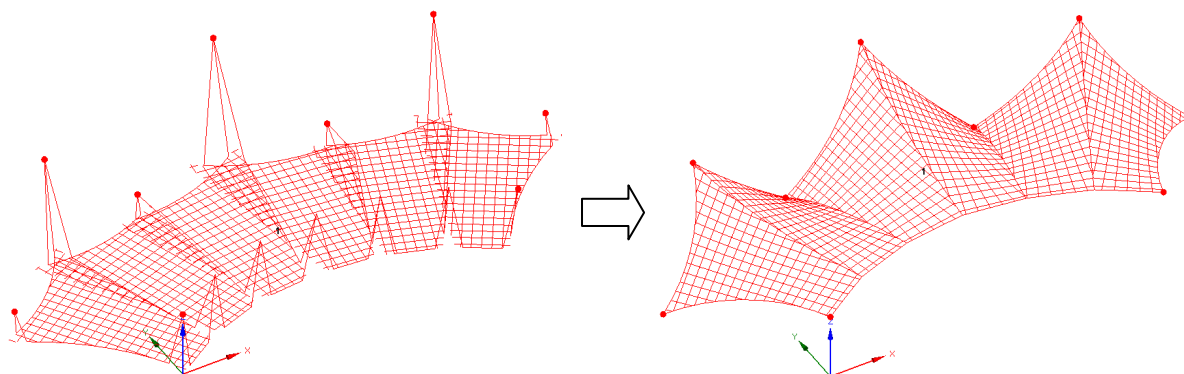
Vhodni podatki:

- Koordinate fiksnih točk (9 točk)
- Koordinate vmesnih fleksibilnih točk glavnega kabla (5 točk)
- Prednapetje 2 kN/m v obeh smereh
- Sila v glavnem kablu je 150 kN, v ostalih petih primarnih radialnih kablji pa $28,4$ kN
- Vsak odsek linearnega kabla razdeli na 7 enakih delov (6×7 delov)
- Vse ostale kable razdeli na 9 enakih delov
- 10% ukrivljenost zunanjih robnih kablov (na njih deluje membrana s 2 kN/m): predpostavim, da je tloris kabla v ravnini xy del krožnice ter da je razdalja v ravnini xy med tetivo in vrhom kabla 10% radija krožnice
- Gostota mreže linijskih elementov za vseh šest enot membrane je $0,4$ m
- Zasuk glavne smeri mreže glede na x -os ($6,5^\circ$ za notranji, $19,5^\circ$ za vmesni, $32,5^\circ$ za zunanji enoti membrane)



Slika 124: Podana geometrija fiksnih točk in vmesnih fleksibilnih elementov

Iz podanih podatkov program tvori začetno mrežo linijskih elementov in v vsakemu elementu določi gostoto sile (upoštevata tlorisne dolžine, slika 25 levo), nato pa poišče ravnovesno obliko za podane robne pogoje in določene gostote sil (slika 125 desno).

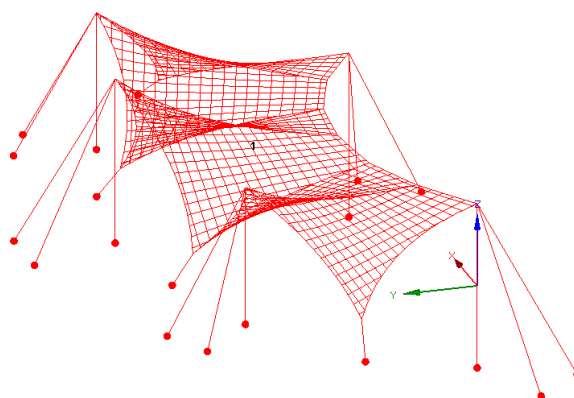


Slika 125: Iskanje ravnotežne oblike

9.2.3 Statična analiza

Pred začetkom statične analize moramo podati togosti (EA) kablov in elastični modul membrane (E) v osnovni in votkovni smeri. Program, na osnovi geometrije površine membrane, vsakemu linijskemu elementu določi togost. Ker poleg togosti poznamo tudi sile v vseh elementih ($F = q * l$), lahko program po Hookovem zakonu izračuna nenapete dolžine posameznih elementov. Če na nenapete elemente vnesemo predvideno silo prednapetja, dobimo seveda identično obliko celotne konstrukcije, kot pri procesu iskanja oblike.

Za enostavne podpore ima program vključen urejevalnik, s katerim določimo vrsto podpore (v našem primeru jambor z dvema stabilizacijskima kabloma oziroma samostojni kabel v smeri rezultante sil) v določeni fiksni točki. Ta nato avtomatsko izračuna začetne dolžine posameznih podpornih elementov tako, da oglišče membrane v stanju prednapetja zadrži predvideno pozicijo.



Slika 126: Končni model nadkritja odprtega gledališča za statično analizo

Izbira podpornih elementov in materiala membrane:

Sprednji (glavni) kabel: $1 \times 37, d = 28 \text{ mm}; EA = 16600 \text{ kN/cm}^2 * 4,91 \text{ cm}^2 = 81506 \text{ kN}$

Sredinski grebenski kabel: $1 \times 19, d = 18 \text{ mm}; EA = 16600 \text{ kN/cm}^2 * 1,83 \text{ cm}^2 = 30378 \text{ kN}$

Stranska grebenska kabla: $1 \times 19, d = 16 \text{ mm}; EA = 16600 \text{ kN/cm}^2 * 1,45 \text{ cm}^2 = 24070 \text{ kN}$

Notranja dolinska kabla: $1 \times 19, d = 14 \text{ mm}; EA = 16600 \text{ kN/cm}^2 * 1,19 \text{ cm}^2 = 19754 \text{ kN}$

Bočna robna kabla: $1 \times 19, d = 12 \text{ mm}; EA = 16600 \text{ kN/cm}^2 * 0,872 \text{ cm}^2 = 14475 \text{ kN}$

Robni kabli zadaj: $1 \times 19, d = 12 \text{ mm}; EA = 16600 \text{ kN/cm}^2 * 0,872 \text{ cm}^2 = 14475 \text{ kN}$

Stabilizacijski kabli zadnjih stranskih jamborov:

$$1 \times 19, d = 20 \text{ mm}; EA = 16600 \text{ kN/cm}^2 * 2,54 \text{ cm}^2 = 42164 \text{ kN}$$

Stabilizacijska kabla zadnjega sredinskega jambora:

$$1 \times 19, d = 20 \text{ mm}; EA = 16600 \text{ kN/cm}^2 * 2,54 \text{ cm}^2 = 42164 \text{ kN}$$

Stabilizacijski kabli sprednjih jamborov:

$$1 \times 37, d = 32 \text{ mm}; EA = 16600 \text{ kN/cm}^2 * 6,18 \text{ cm}^2 = 102588 \text{ kN}$$

Notranja kratka stabilizacijska kabla zadaj:

$$1 \times 19, d = 16 \text{ mm}; EA = 16600 \text{ kN/cm}^2 * 1,45 \text{ cm}^2 = 24070 \text{ kN}$$

Bočna kratka stabilizacijska kabla:

$$1 \times 19, d = 14 \text{ mm}; EA = 16600 \text{ kN/cm}^2 * 1,19 \text{ cm}^2 = 19754 \text{ kN}$$

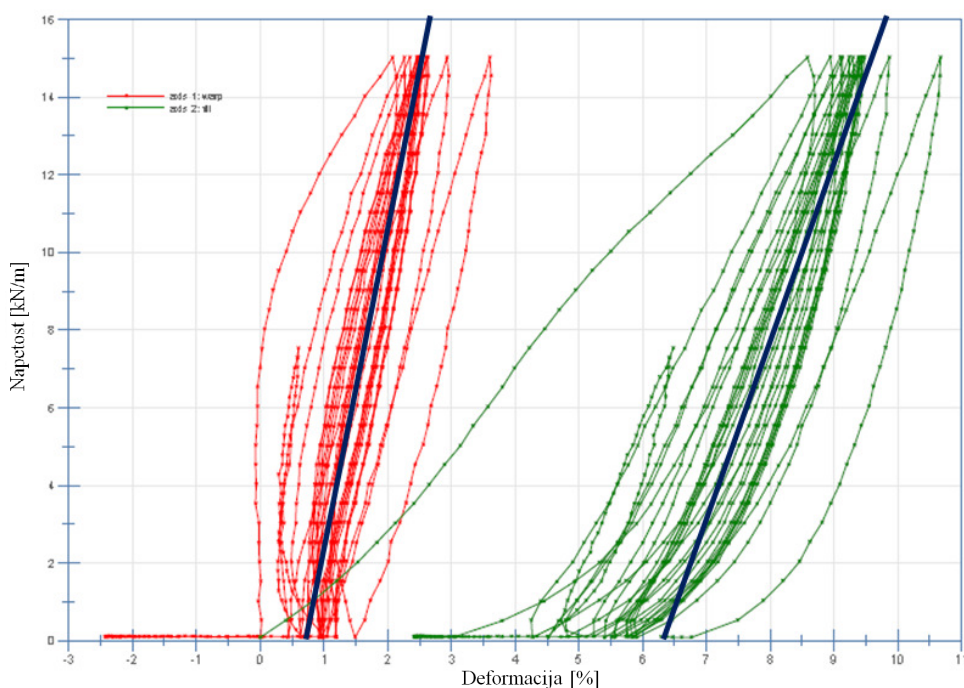
Sprednja jambora: cev 216/10; $EA = 21000 \text{ kN/cm}^2 * 64,72 \text{ cm}^2 = 1359120 \text{ kN}$

Zadnji sredinski jambor: cev 168,3/8; $EA = 21000 \text{ kN/cm}^2 * 40,29 \text{ cm}^2 = 846090 \text{ kN}$

Zadnja stranska jambora: cev 168,3/6,3; $EA = 21000 \text{ kN/cm}^2 * 32,06 \text{ cm}^2 = 673260 \text{ kN}$

Membrana: PET/PVC membrana Verseidag B4951 (Tip I)

Določitev elastičnega modula:



Slika 127: Obnašanje preizkušanca B4951 ob raztezanju – določitev elastičnih modulov (rdeča – osnova, zelena – votek)

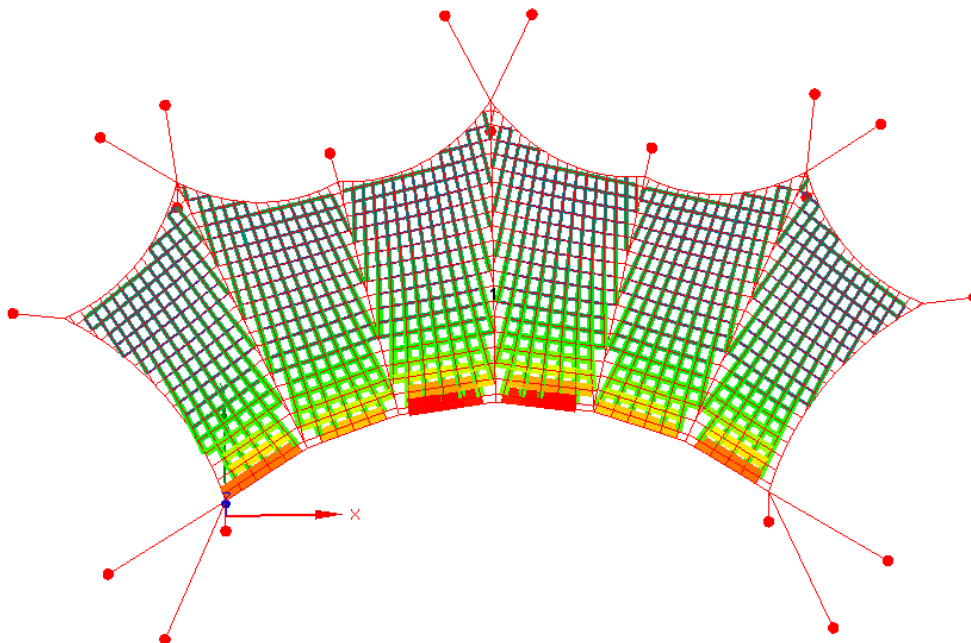
Prednapetostno razmerje je 1:1, poleg tega pa pri večini zunanjih obtežb ostanejo napetosti v osnovni in votkovni smeri v približno enakih razmerjih, zato bom materialne lastnosti membrane razbral iz rezultatov testa z napetostnim razmerjem 1:1 (slika 127).

$$E_x = \Delta\sigma_x / \Delta\varepsilon_x = 16 \text{ kN} / 0,02 = 800 \text{ kN}$$

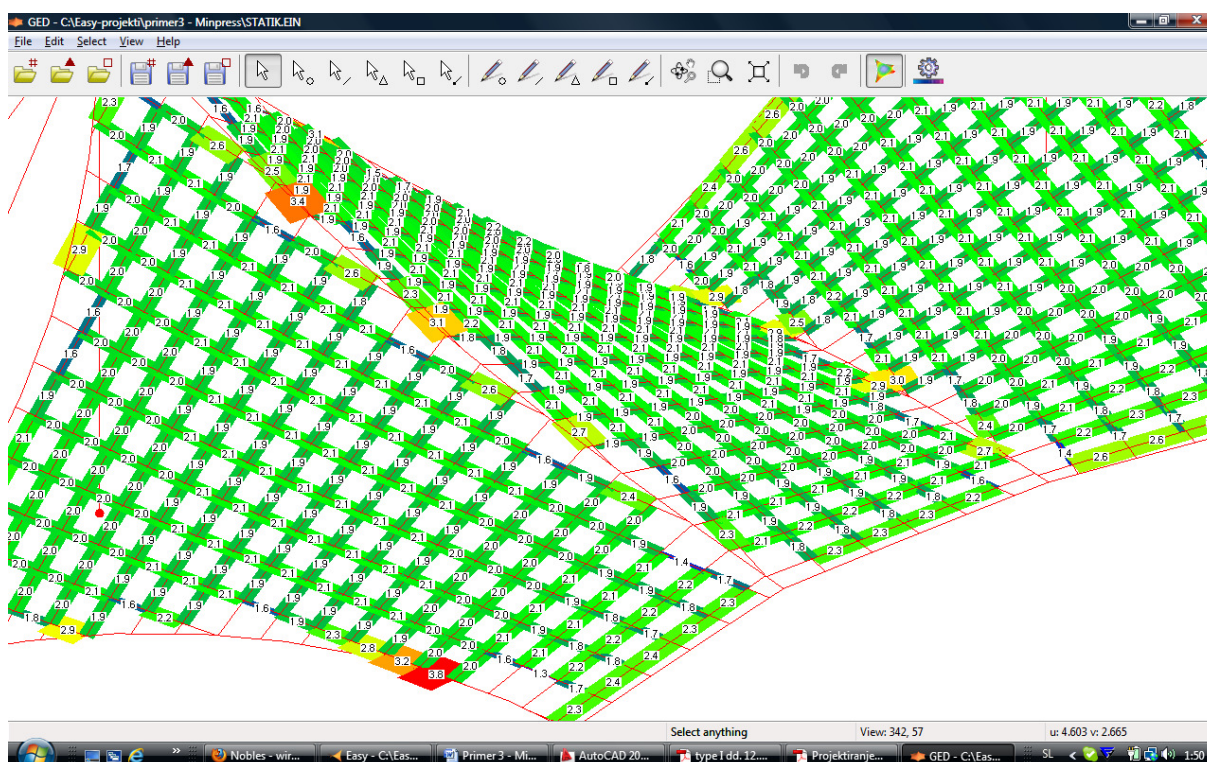
$$E_y = \Delta\sigma_y / \Delta\varepsilon_y = 16 \text{ kN} / 0,035 = 457 \approx 460 \text{ kN}$$

Stanje prednapetja:

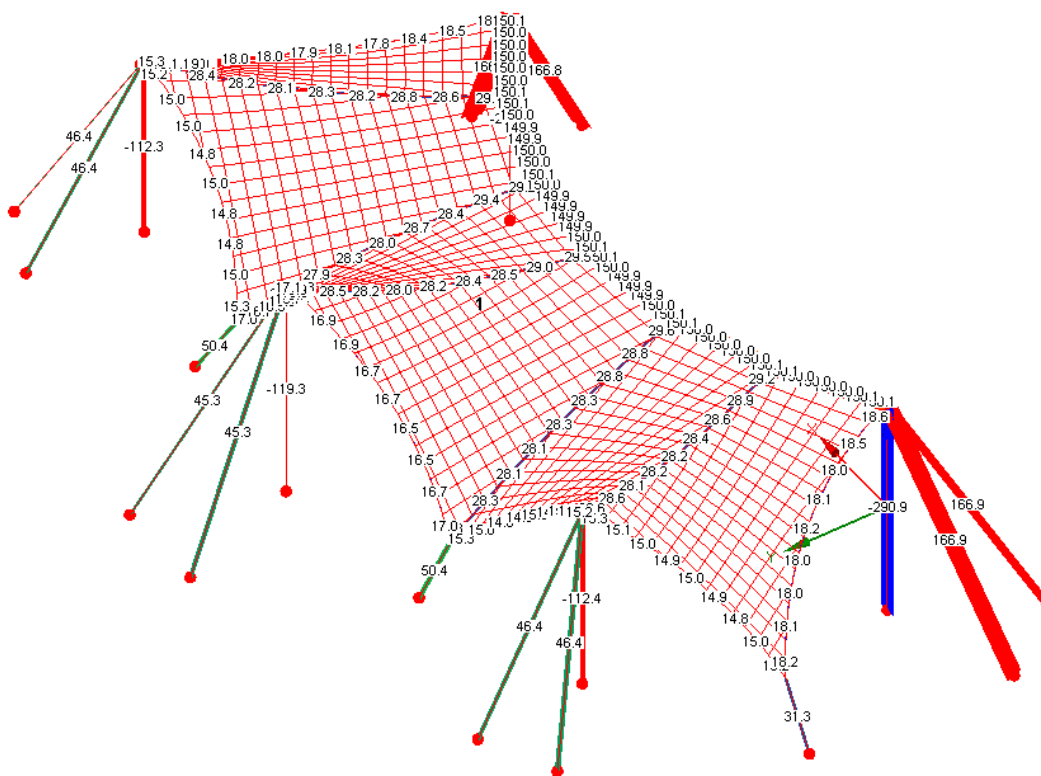
Potek sil po elementih membrane pri prednapetju je prikazan na sliki 128, membranske napetosti na sliki 129, ter sile v kabljih in jamborih na sliki 130.



Slika 128: Razpored sil po elementih mreže membrane v stanju prednapetja (sile gredo od manjših proti večjim po naslednjem barvnem zaporedju: modra – zelena – rumena – oranžna – rdeča)



Slika 129: Napetosti v membrani v stanju prednapetja



Slika 130: Sile v kablilih in jamborih v stanju prednapetja

Obtežbe:

Obravnavam vplive snega in vetra. Obtežbo snega naložim enakomerno na celotno konstrukcijo (slika 131). Obtežbo vetra bom upošteval v različnih smereh, in sicer veter, kjer je celotna membranska površina v srku (slika 132), veter z bočne strani – veter X (slika 133), veter od spredaj – veter Y (Slika 134) in veter od zadaj – veter –Y (slika 135). Za obravnavano kompleksno obliko obravnavane prednapete membranske konstrukcije evrokod standardi ne predpisujejo posebnih koeficientov za razpored obtežbe vetra na površino prednapete membranske strehe, zato upoštevam kar vgrajeno funkcijo, ki za privetne dele površine upošteva faktor $c_p = 1$ (tlak), na zavetrne površine pa faktor $c_p = -1$ (srk). S tem razporedom smo daleč na varni strani (tako sklepam v skladu s faktorji za razporeditev vetra za primer odprte valovite prednapete membranske konstrukcije (Forster in sod., 2004), kjer faktorji ne presegajo vrednosti 0,7), vendar ker obtežba vetra ni kritična, to pretirano ne vpliva na ekonomičnost projekta. Vpliv lastne teže zanemarim.

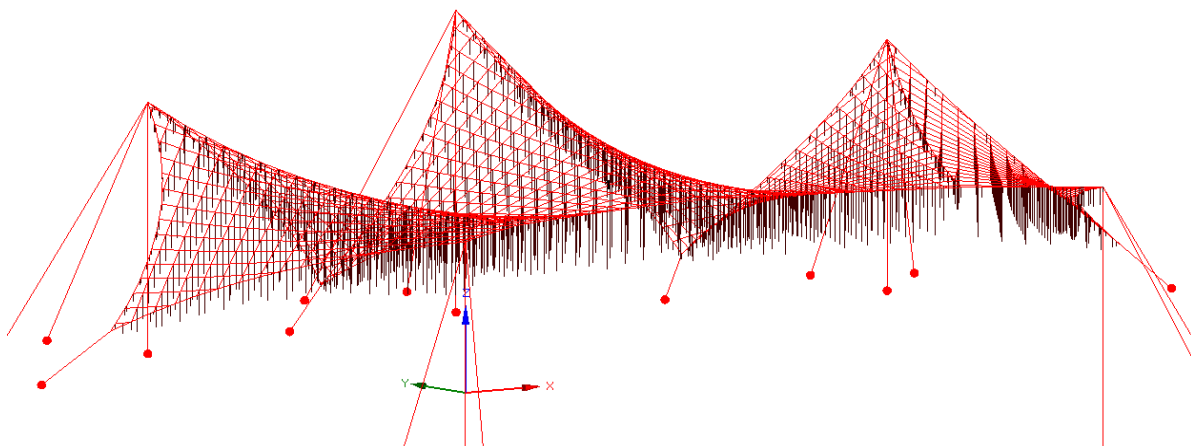
Sneg:

(Cona A2, nadmorska višina 300 m)

$$s_k = 1,293 * [1 + (300/728)^2] = 1,51 \text{ kN/m}^2$$

a) Sneg

$$s = \mu_l * s_k = 0,8 * 1,51 \text{ kN/m}^2 = 1,21 \text{ kN/m}^2$$



Slika 131: Vektorski prikaz obtežbe snega v vozliščih mreže membrane

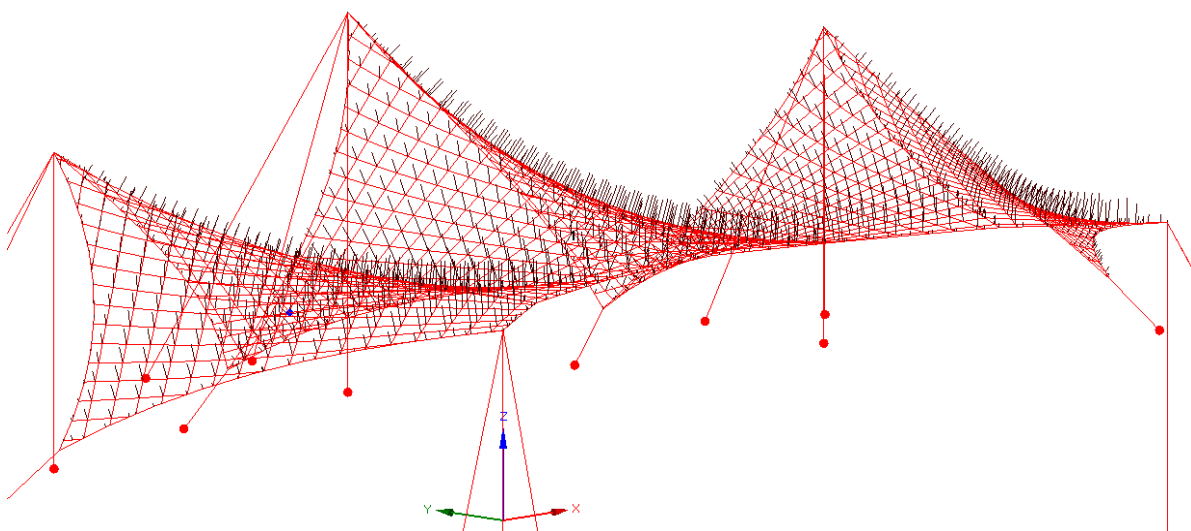
Veter:

(Cona 1, teren II. Kategorije, h = 5 m)

$$v_p = c_e(5 \text{ m}) * q_b = 1,93 * 0,25 \text{ kN/m}^2 = 0,48 \text{ kN/m}^2$$

b) Veter (srk)

$$v = c_p * v_p = -1,0 * 0,48 \text{ kN/m}^2 = -0,48 \text{ kN/m}^2$$

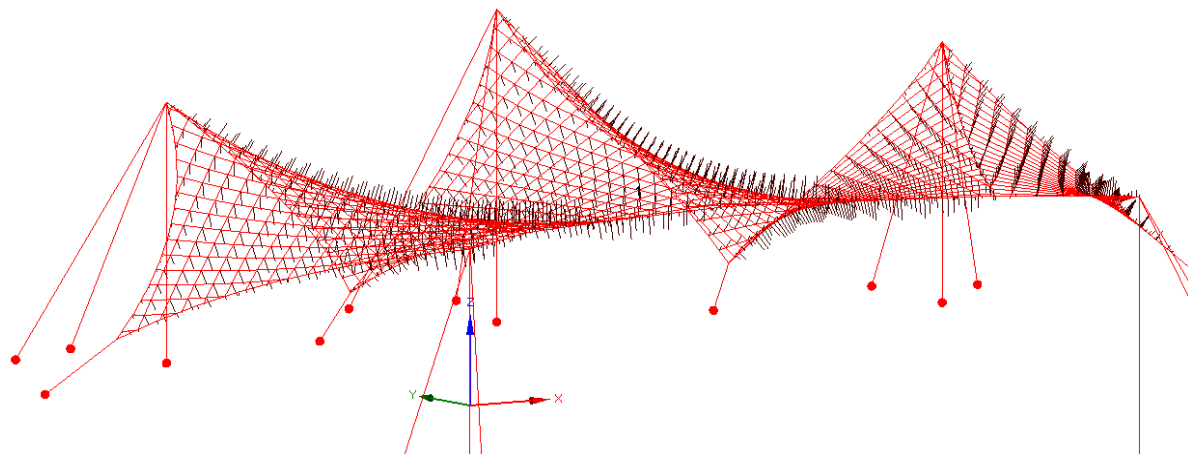


Slika 132: Vektorski prikaz obtežbe vetra (srk) v vozliščih mreže membrane

c) Veter X

$$v_1 = c_{p1} * v_p = 1,0 * 0,48 \text{ kN/m}^2 = 0,48 \text{ kN/m}^2$$

$$v_2 = c_{p2} * v_p = -1,0 * 0,48 \text{ kN/m}^2 = -0,48 \text{ kN/m}^2$$

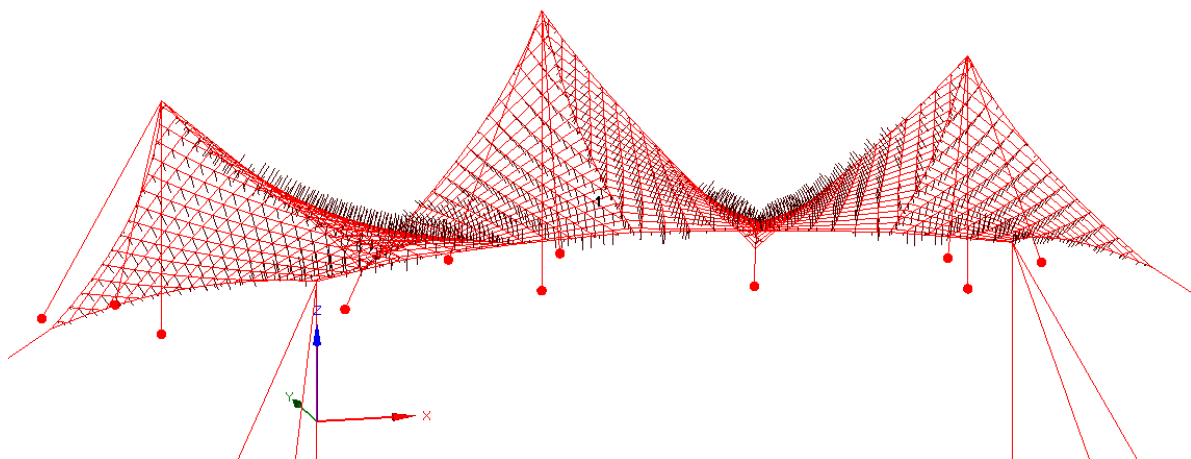


Slika 133: Vektorski prikaz obtežbe vetra X v vozliščih mreže membrane

d) Veter Y

$$v_1 = c_{p1} * v_p = 1,0 * 0,48 \text{ kN/m}^2 = 0,48 \text{ kN/m}^2$$

$$v_2 = c_{p2} * v_p = -1,0 * 0,48 \text{ kN/m}^2 = -0,48 \text{ kN/m}^2$$

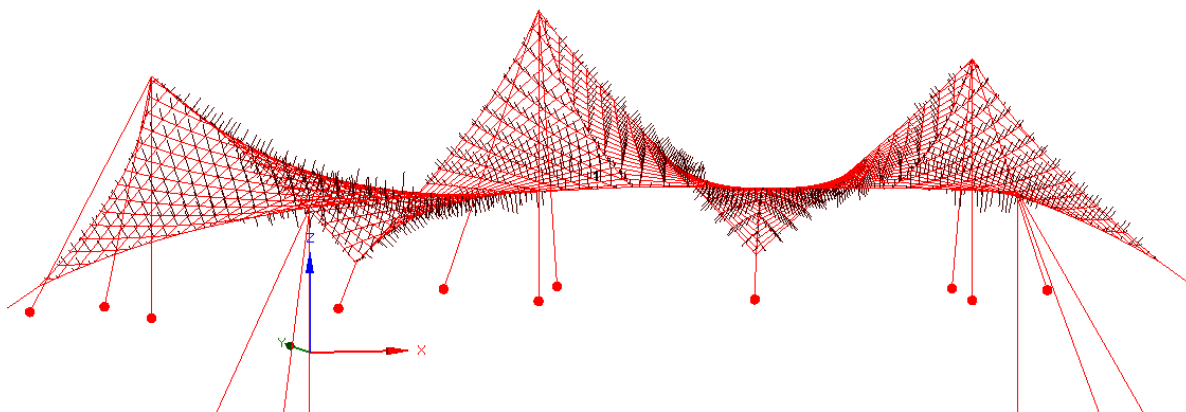


Slika 134: Vektorski prikaz obtežbe vetra Y v vozliščih mreže membrane

e) Veter -Y

$$v_1 = c_{p1} * v_p = 1,0 * 0,48 \text{ kN/m}^2 = 0,48 \text{ kN/m}^2$$

$$v_2 = c_{p2} * v_p = -1,0 * 0,48 \text{ kN/m}^2 = -0,48 \text{ kN/m}^2$$



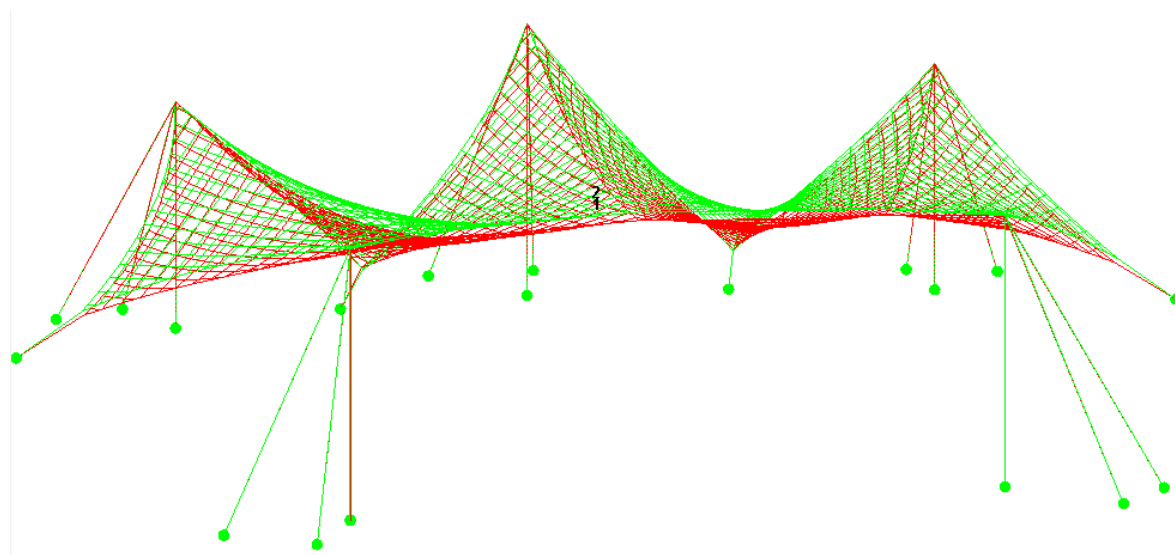
Slika 135: Vektorski prikaz obtežbe vetra -Y v vozliščih mreže membrane

Obtežne kombinacije:

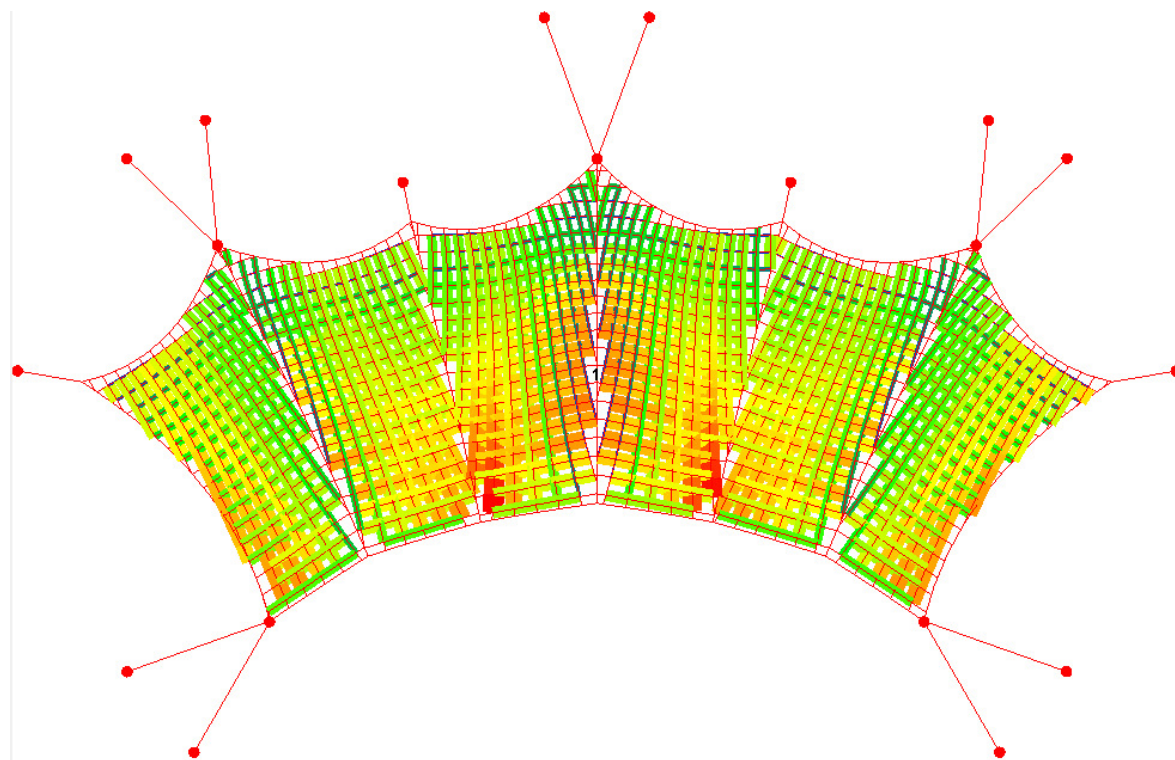
- 1) Prednapetje + sneg
- 2) Prednapetje + veter (srk)
- 3) Prednapetje + veter X
- 4) Prednapetje + veter Y
- 5) Prednapetje + veter -Y
- 6) Prednapetje + sneg + $0,6 * \text{veter X}$
- 7) Prednapetje + sneg + $0,6 * \text{veter Y}$
- 8) Prednapetje + sneg + $0,6 * \text{veter -Y}$

Rezultati analize:

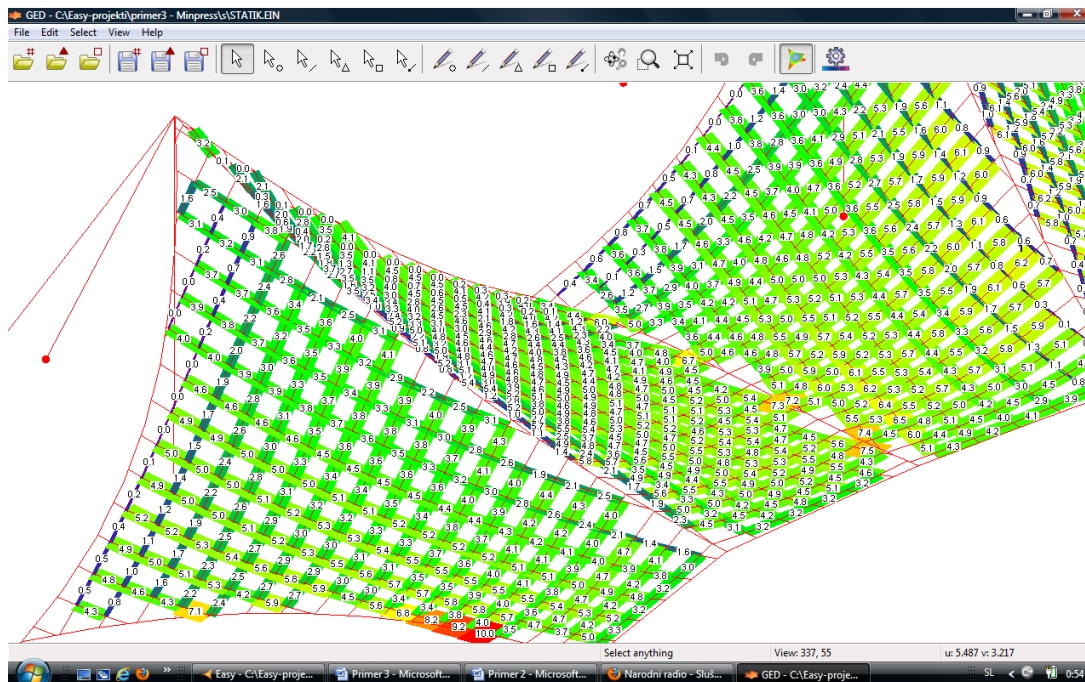
1) Prednapetje + sneg



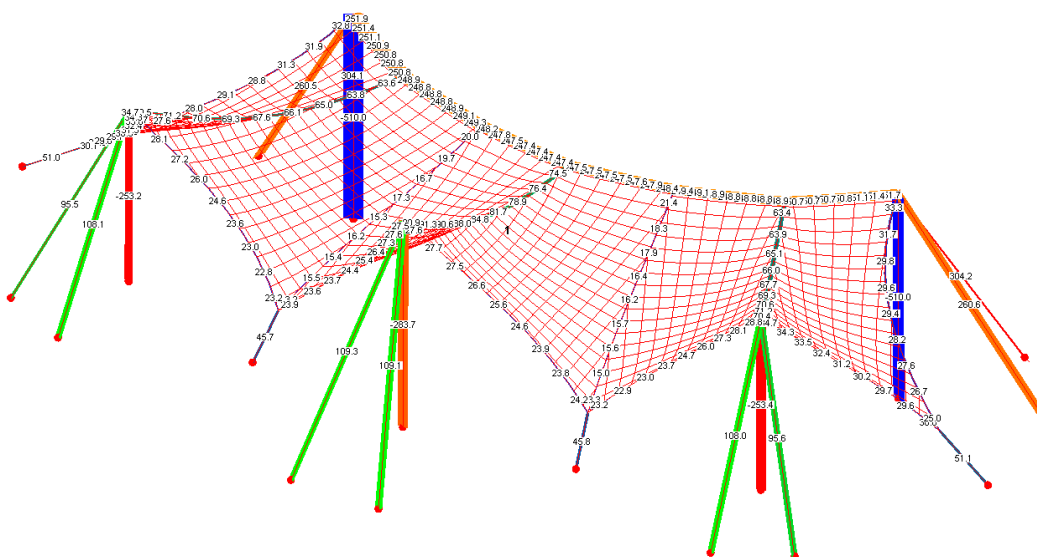
Slika 136: Primerjava začetne oblike in deformirane oblike zaradi obtežbe snega (zeleno – začetna oblika, rdeče – deformirana oblika)



Slika 137: Razpored sil po elementih mreže membrane zaradi obtežbe snega (sile gredo od manjših proti večjim po naslednjem barvnem zaporedju: modra – zelena – rumena – oranžna – rdeča)



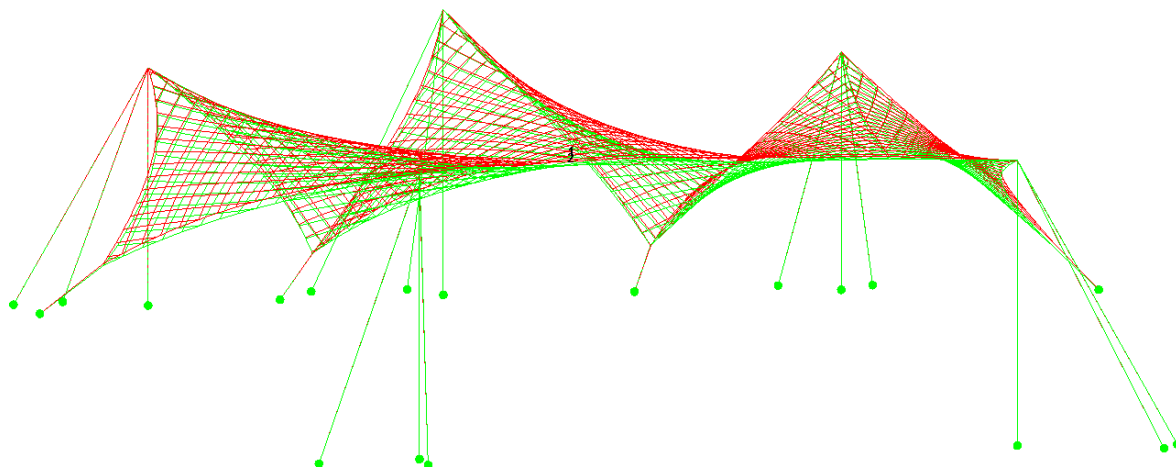
Slika 138: Potek napetosti v membrani zaradi obtežbe snega



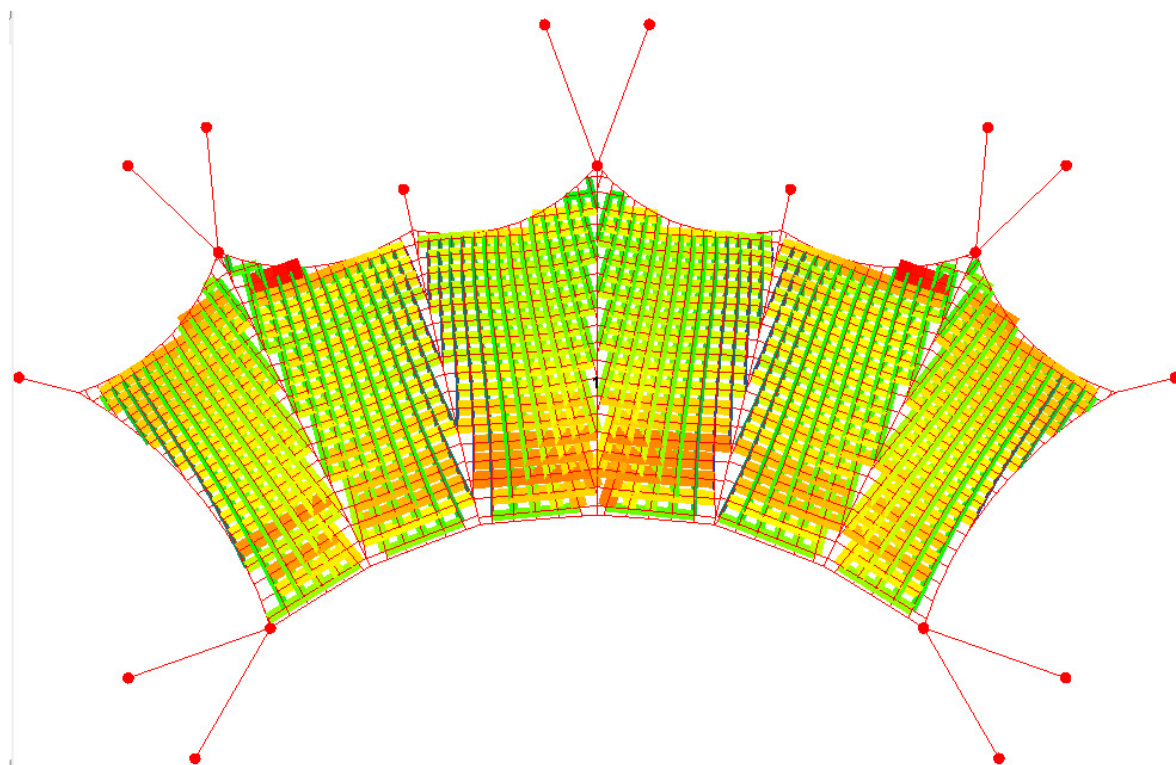
Slika 139: Sile v kablji in jamborih zaradi obtežbe snega

Napetosti po vseh površinah v obeh smereh narastejo na približno $5 \text{ kN/m} - 6 \text{ kN/m}$, le ob v vzdolžni smeri ob grebenih in prečni smeri ob zadnjih robnih kablji napetosti v membrani močno padejo. Zaradi načina izračunavanja širine posameznega elementa, imamo na določenih mestih nerealne skoke napetosti. Najvišja realna napetost v membrani ob obtežbi snega je pribl. $6,7 \text{ kN/m}$. Sile v grebenskih kablji močno narastejo, v dolinskih pa padejo. Vidimo trend padanja napetosti od sprednjega dela, kjer so nosilni kabli bližje skupaj, proti zadnjemu delu, kjer so kabli bolj narazen in je zato konstrukcija manj toga. Sprednji kabel se na sredini pomakne za 10 cm navzdol, medtem ko znotraj membrane pomik doseže do 59 cm .

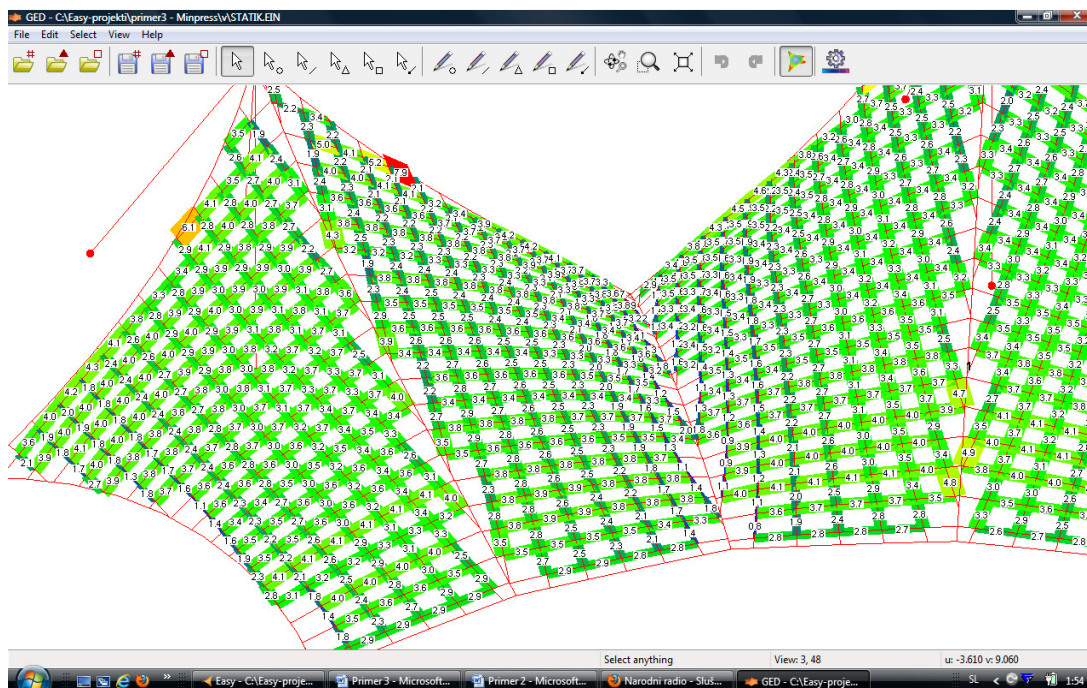
2) Prednapetje + veter (srk)



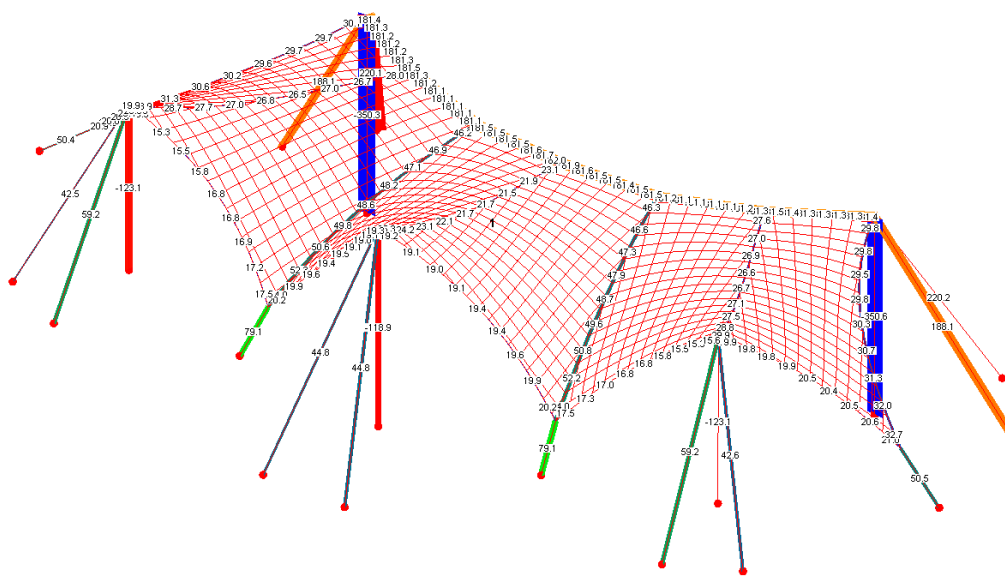
Slika 140: Primerjava začetne oblike in deformirane oblike zaradi obtežbe vetra (srk) (zeleno – začetna oblika, rdeče – deformirana oblika)



Slika 141: Razpored sil po elementih mreže membrane zaradi obtežbe vetra (srk) (sile gredo od manjših proti večjim po naslednjem barvnem zaporedju: modra – zelena – rumena – oranžna – rdeča)



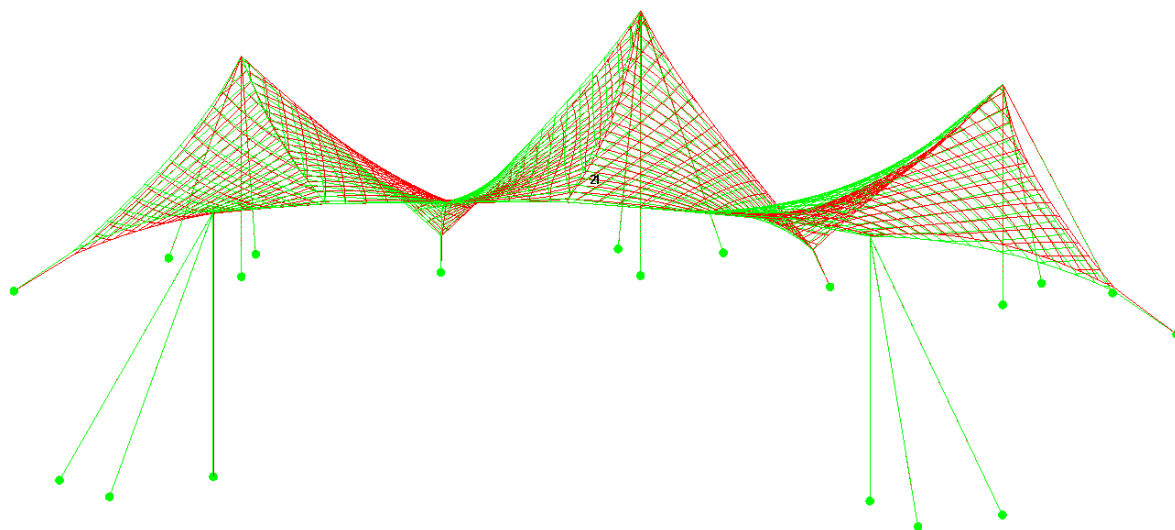
Slika 142: Potek napetosti v membrani zaradi obtežbe vetra (srk)



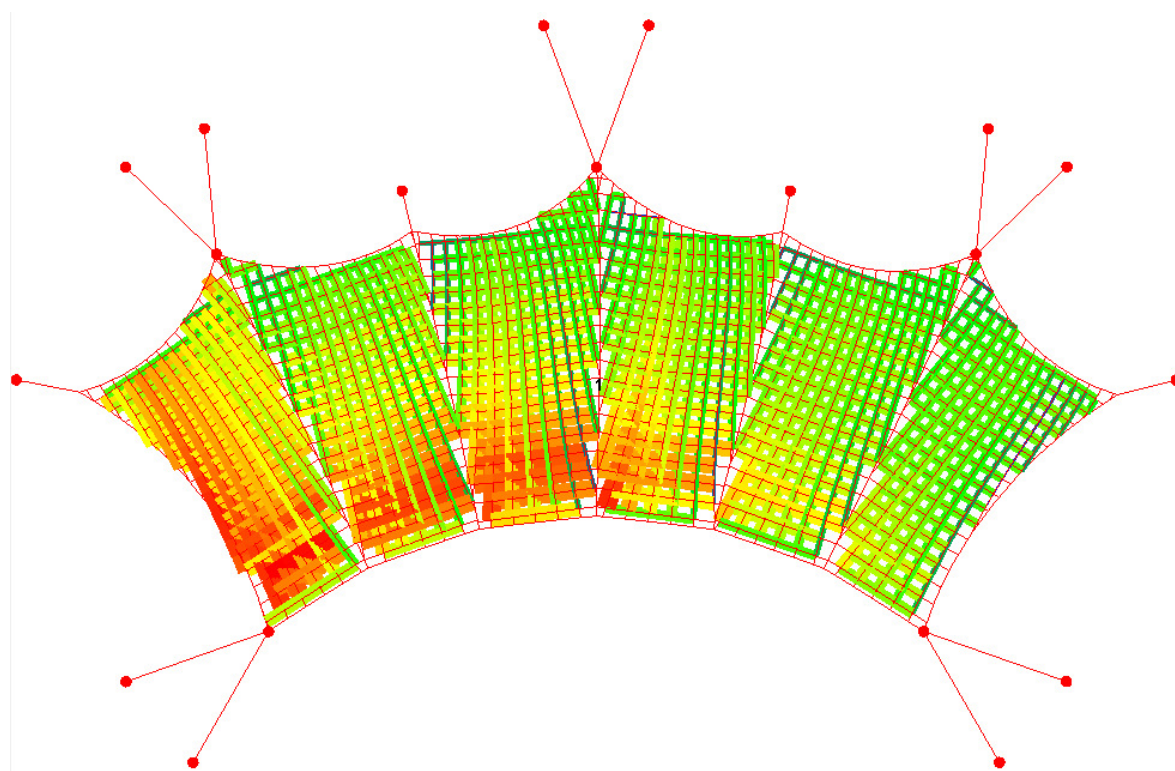
Slika 143: Sile v kablilih in jamborih zaradi obtežbe vetra (srk)

Napetosti v vzdolžni smeri so ob dolinskih kablilih okoli 1 kN/m in proti grebenu naraščajo do 3,5 kN/m, medtem ko je prečna napetost po vsej konstrukciji približno konstantna in zavzema vrednosti 3,5 kN/m – 4kN/m. Sile v dolinskih kablilih se močno povečajo. Največje napetosti se pojavijo v zgornji konici membrane na zadnji strani, in sicer pričakujemo realne vrednosti okoli 5 kN/m. Sprednji kabel se v sredini dvigne za 8cm, membrana v notranjosti pa do 34 cm.

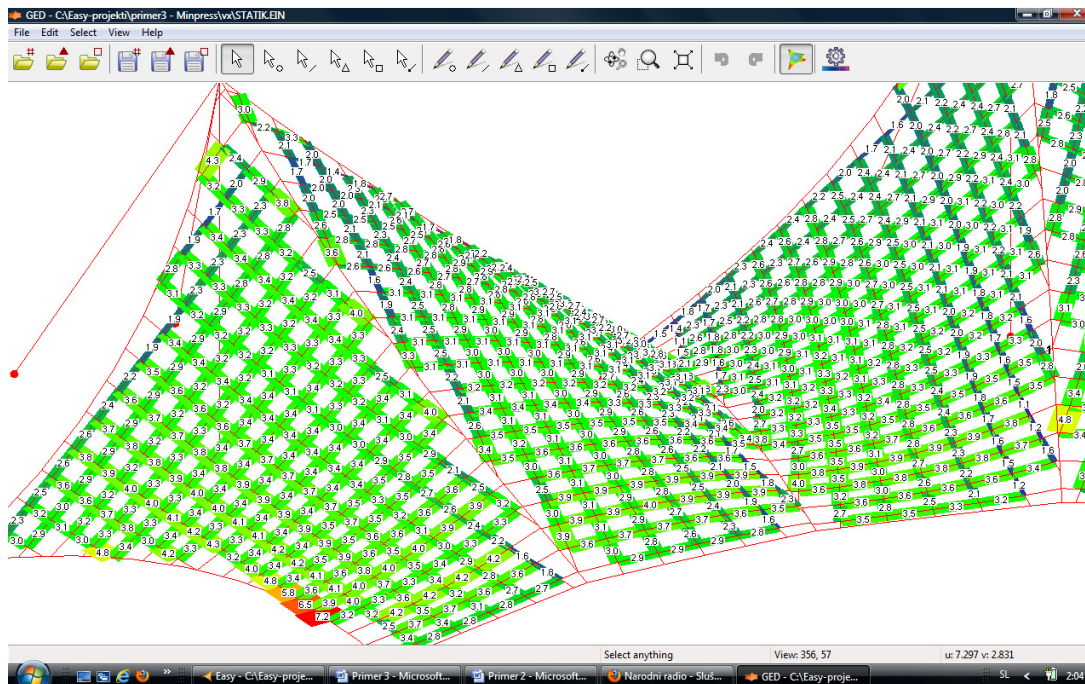
3) Prednapetje + veter X



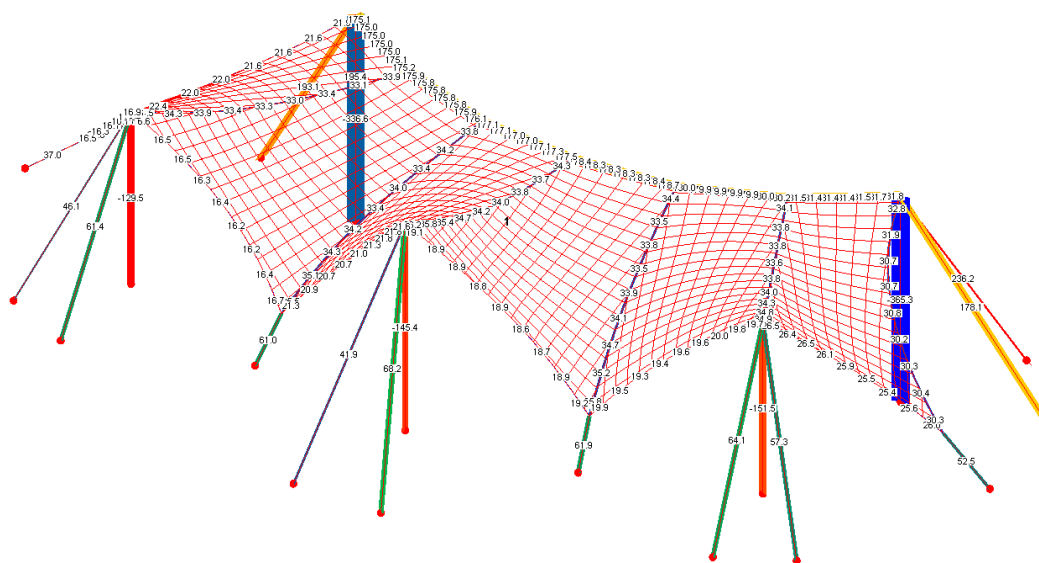
Slika 144: Primerjava začetne oblike in deformirane oblike zaradi obtežbe vetra X (zeleno – začetna oblika, rdeče – deformirana oblika)



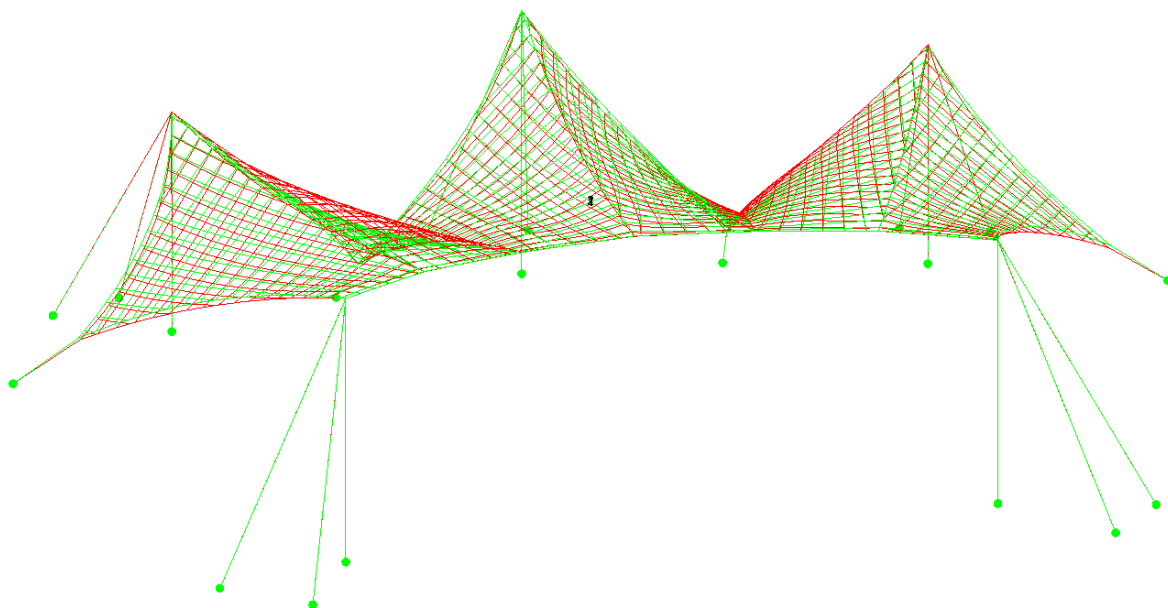
Slika 145: Razpored sil po elementih mreže membrane zaradi obtežbe vetra X (sile gredo od manjših proti večjim po naslednjem barvnem zaporedju: modra – zelena – rumena – oranžna – rdeča)



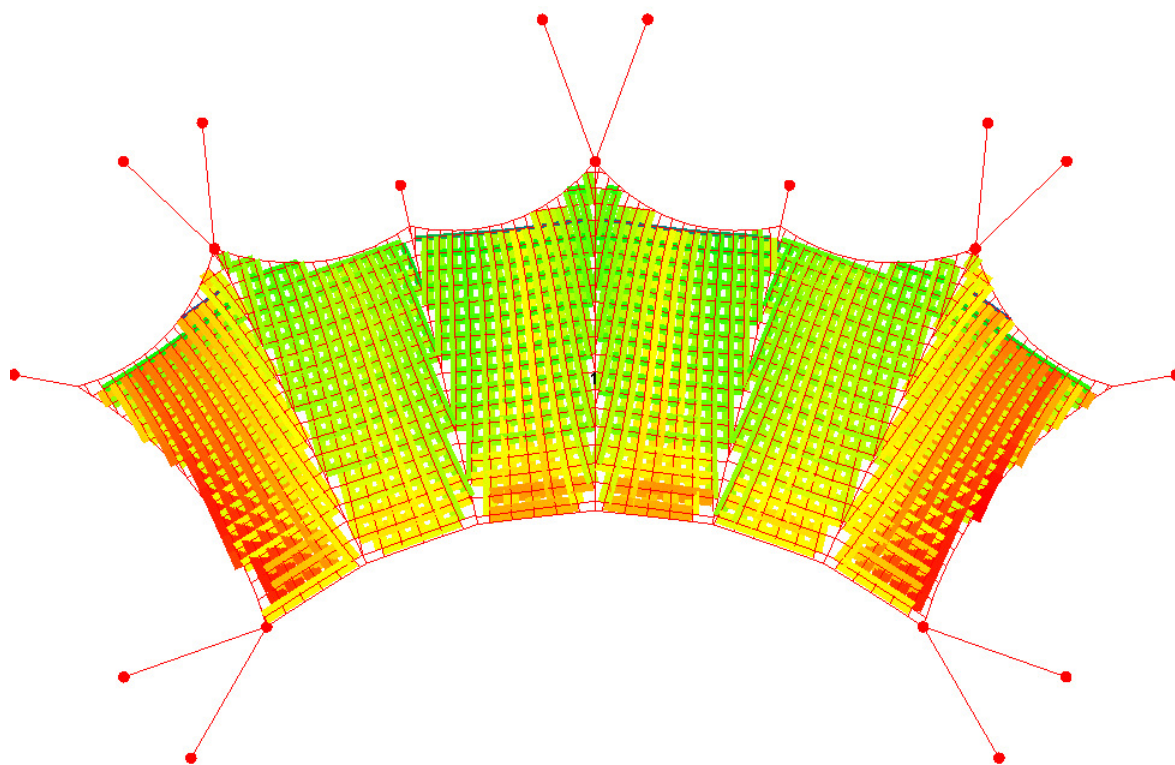
Slika 146: Potek napetosti v membrani zaradi obtežbe vetra X



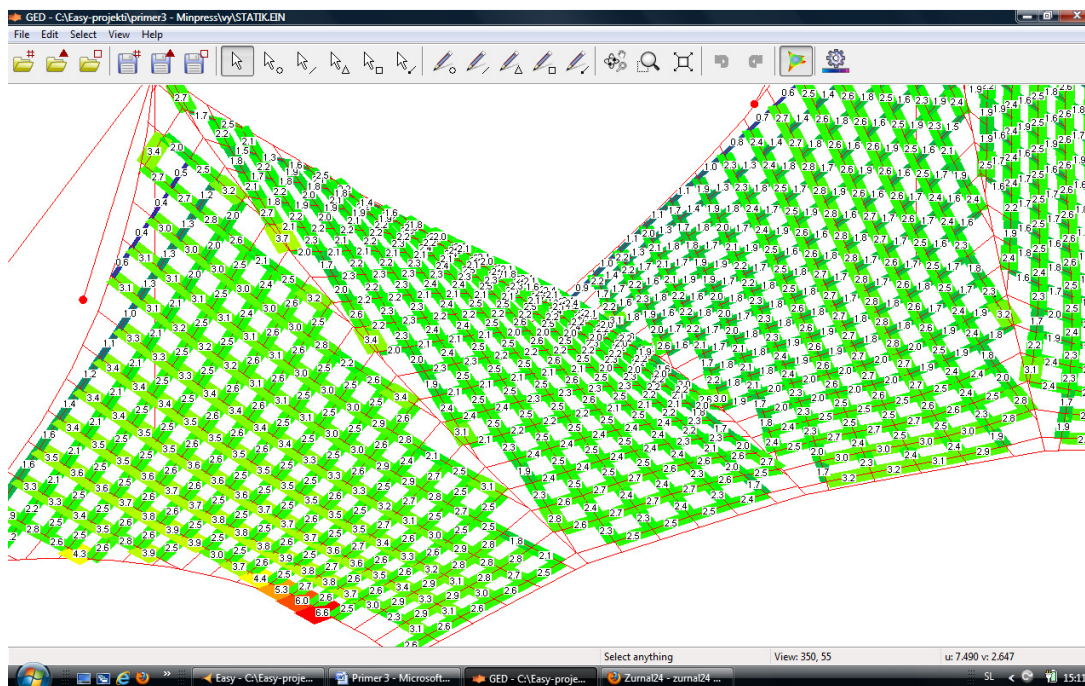
4) Prednapetje + veter Y



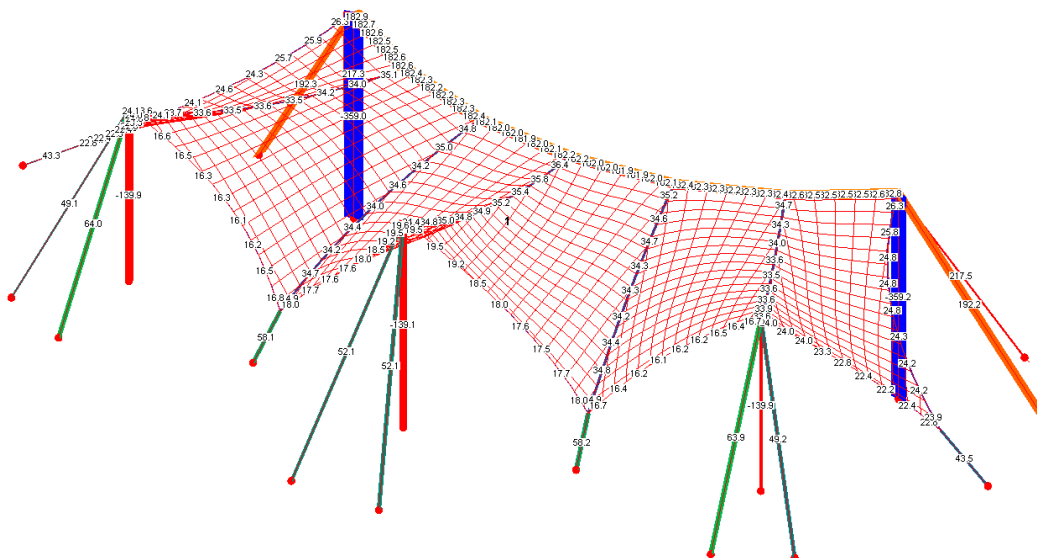
Slika 148: Primerjava začetne oblike in deformirane oblike zaradi obtežbe vetra Y (zeleno – začetna oblika, rdeče – deformirana oblika)



Slika 149: Razpored sil po elementih mreže membrane zaradi obtežbe vetra Y (sile gredo od manjših proti večjim po naslednjem barvnem zaporedju: modra – zelena – rumena – oranžna – rdeča)



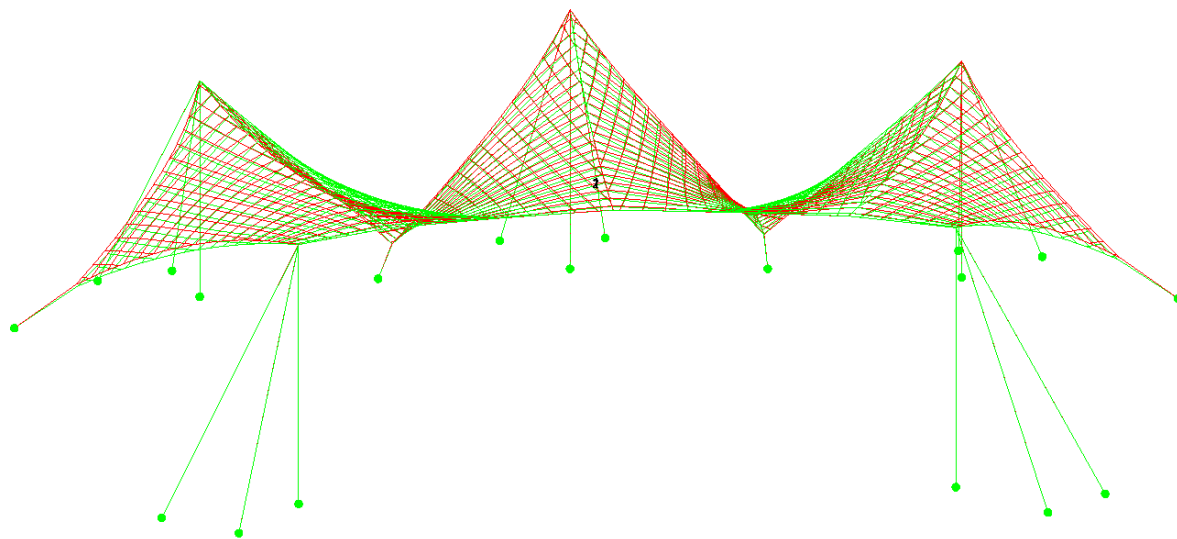
Slika 150: Potek napetosti v membrani zaradi obtežbe vetra Y



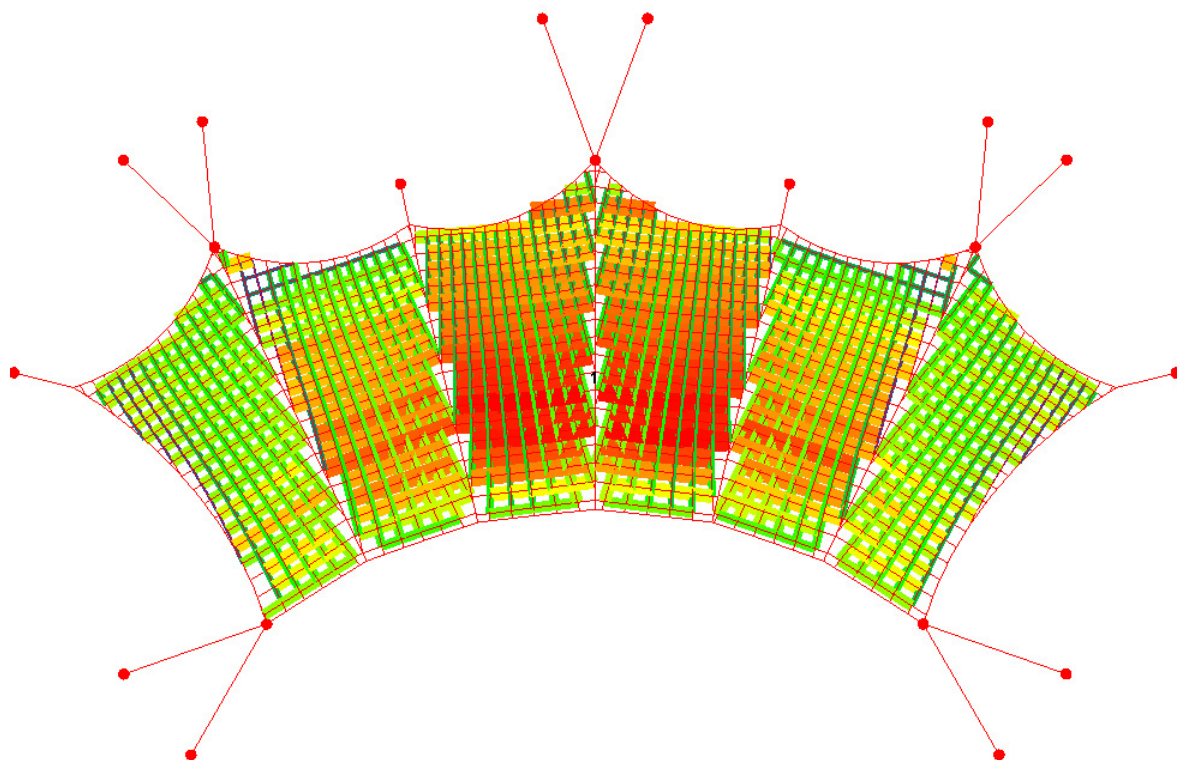
Slika 151: Sile v kablji in jamborih zaradi obtežbe vetra Y

Največje membranske napetosti se pojavijo v krajnih poljih, saj sta ti najbolj obrnjeni proti vetru, ki nanju deluje tlačno. vzdolžne napetosti so v teh dveh poljih približno 3,5 kN/m, dosežejo pa tudi vrednosti do 4 kN/m (realno). Prečne napetosti so nekoliko nižje, približno 2,5 kN/m. V notranjih poljih so napetosti še nižje. Pri sprednjem kablju ni znatnega pomika, membrana v notranjosti pa doseže pomik 33 cm.

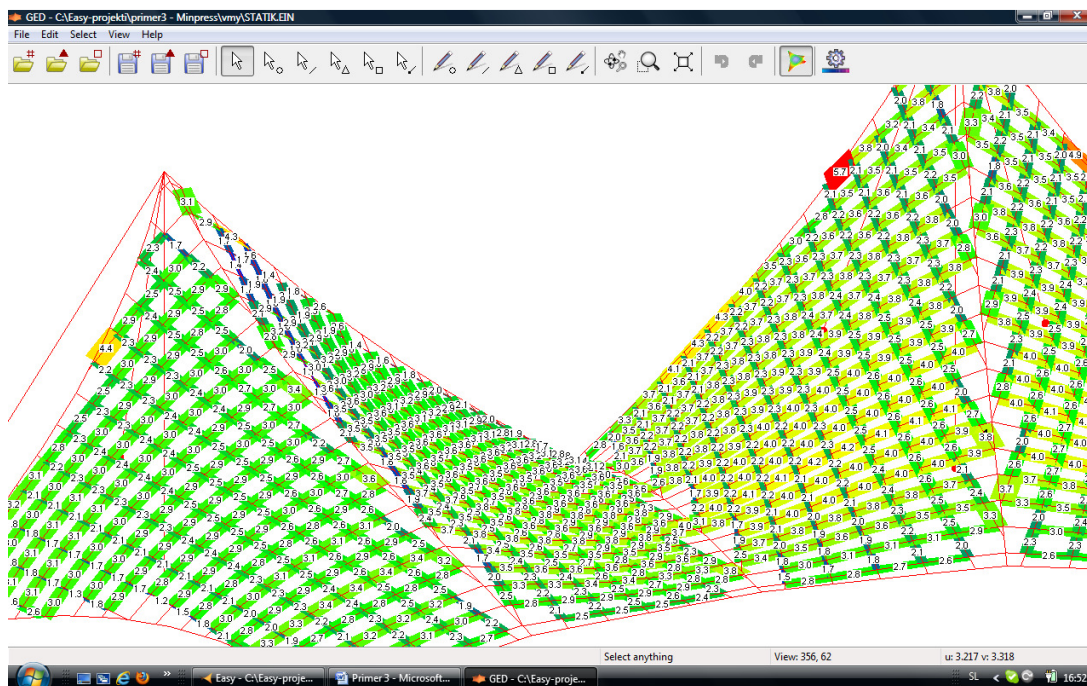
5) Prednapetje + veter -Y



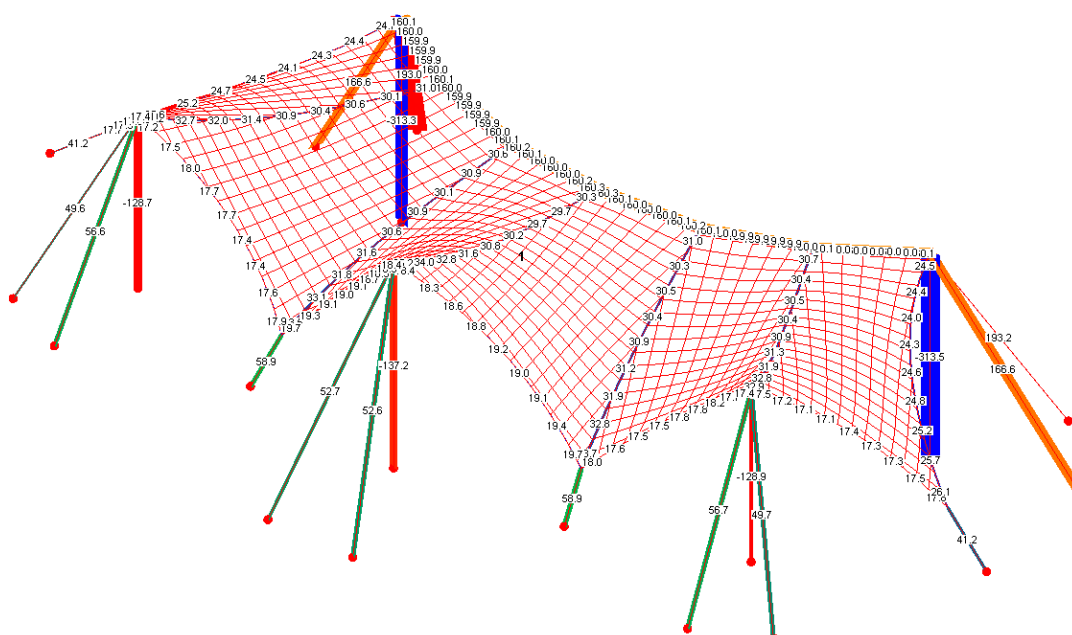
Slika 152: Primerjava začetne oblike in deformirane oblike zaradi obtežbe vetra -Y (zeleno – začetna oblika, rdeče – deformirana oblika)



Slika 153: Razpored sil po elementih mreže membrane zaradi obtežbe vetra -Y (sile gredo od manjših proti večjim po naslednjem barvnem zaporedju: modra – zelena – rumena – oranžna – rdeča)



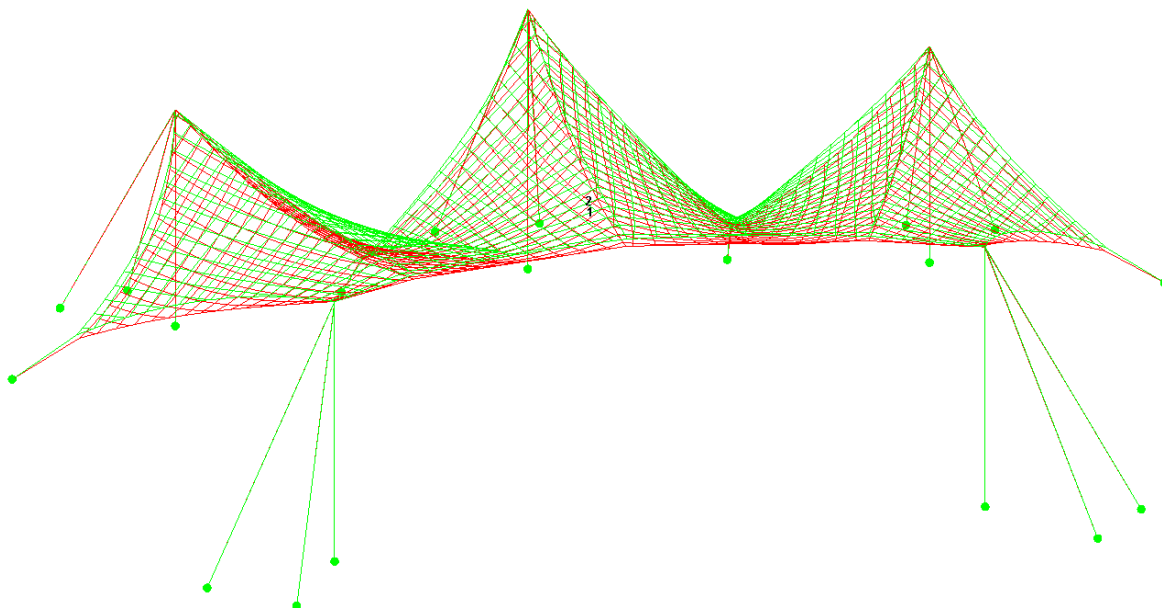
Slika 154: Potek napetosti v membrani zaradi obtežbe vetra -Y



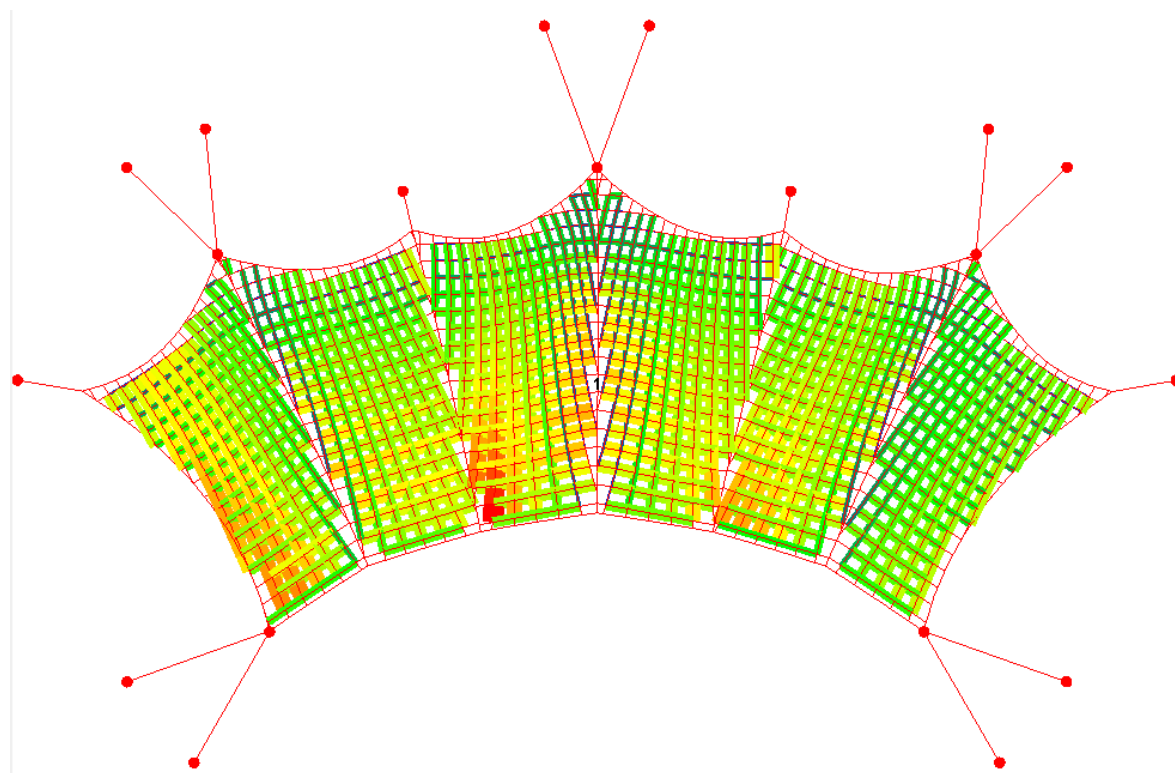
Slika 155: Sile v kablji in jamborih zaradi obtežbe vetra -Y

Rezultati so ravno obratni kot v prejšnjem primeru. Zdaj imamo največje napetosti v srednjih dveh poljih, na kateri deluje srk. Tu so prečne napetosti okoli 4 kN/m, vzdolžne pa 2,5 kN/m. Proti krajnim poljem se napetosti zmanjšujejo. Glavni kabel se praktično ne premakne, največji pomik membrane pa je 27 cm.

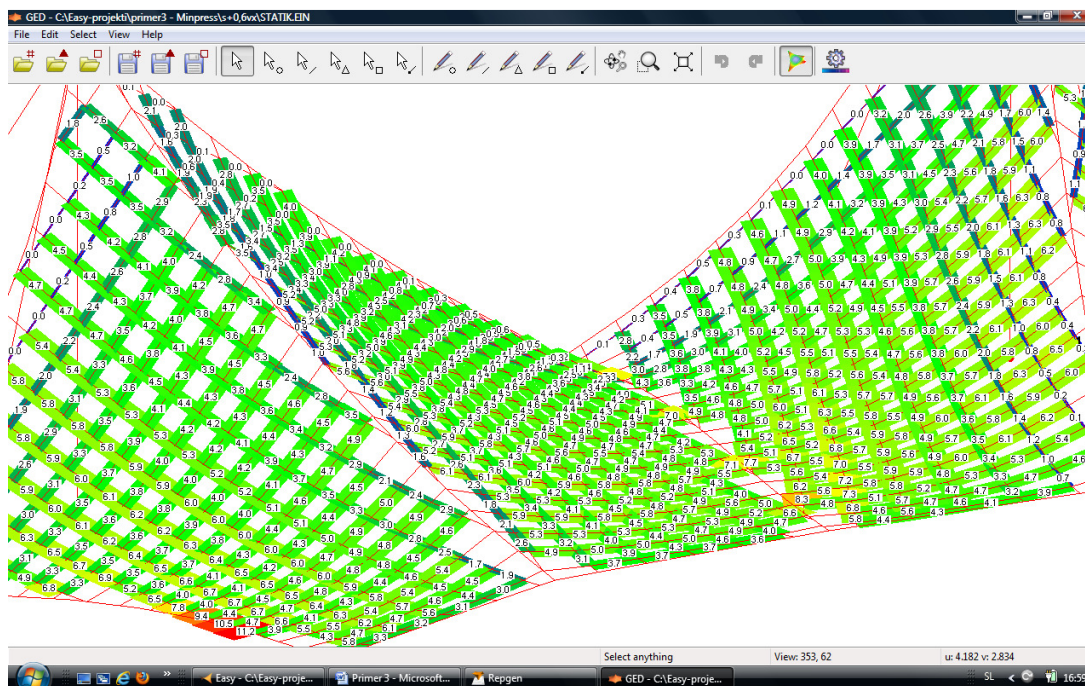
6) Prednapetje + sneg + 0,6 * veter X



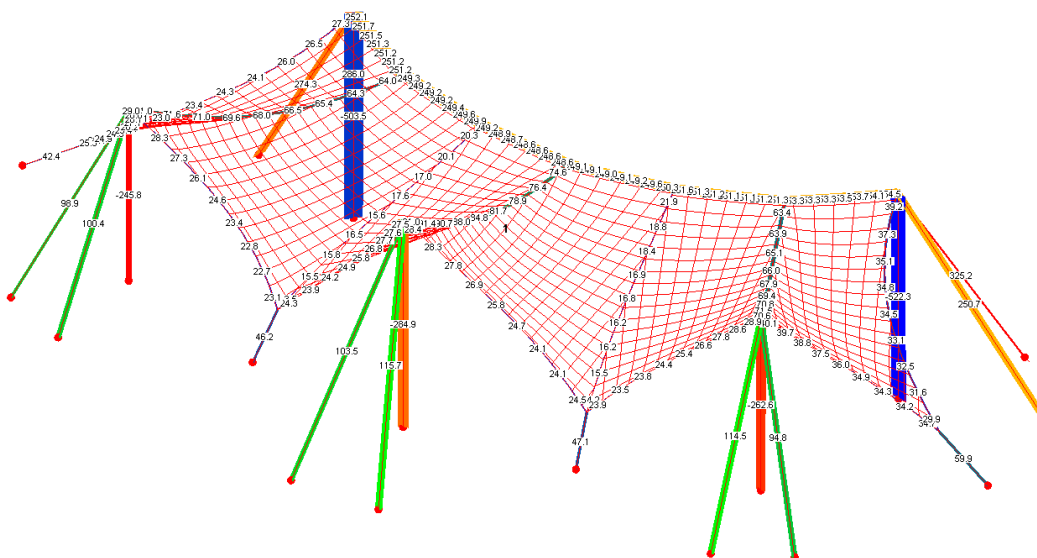
Slika 156: Primerjava začetne oblike in deformirane oblike zaradi kombinacije obtežbe snega in vetra X (zeleno – začetna oblika, rdeče – deformirana oblika)



Slika 157: Razpored sil po elementih mreže membrane zaradi kombinacije obtežbe snega in vetra X (sile gredo od manjših proti večjim po naslednjem barvnem zaporedju: modra – zelena – rumena – oranžna – rdeča)



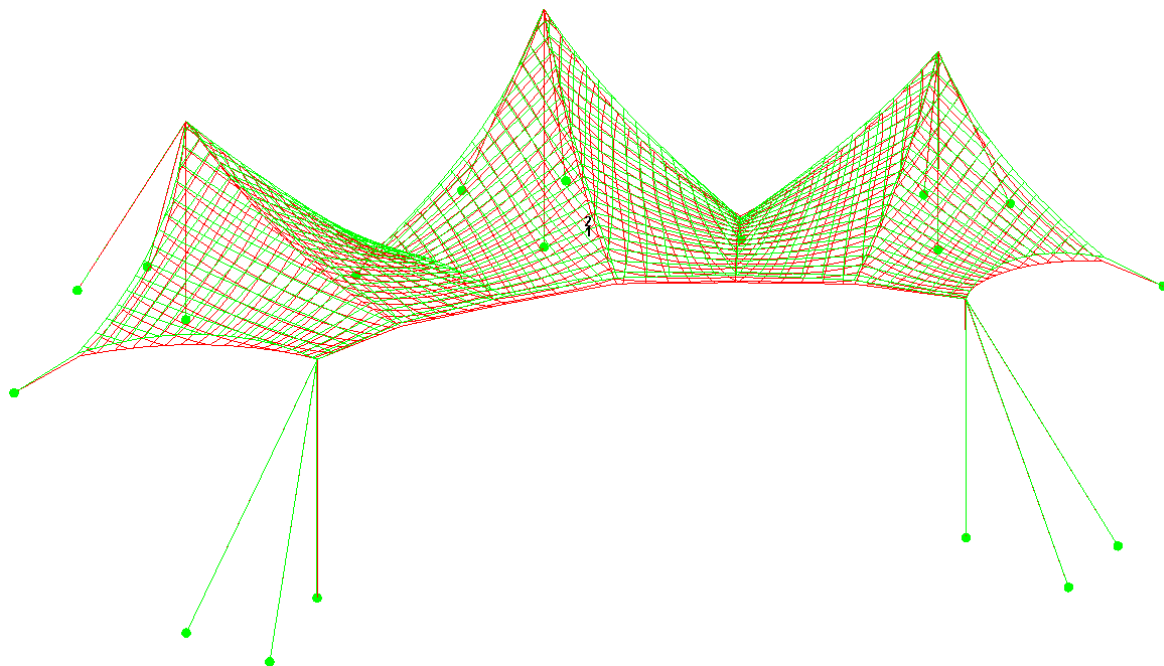
Slika 158: Potek napetosti v membrani zaradi kombinacije obtežbe snega in vetra X



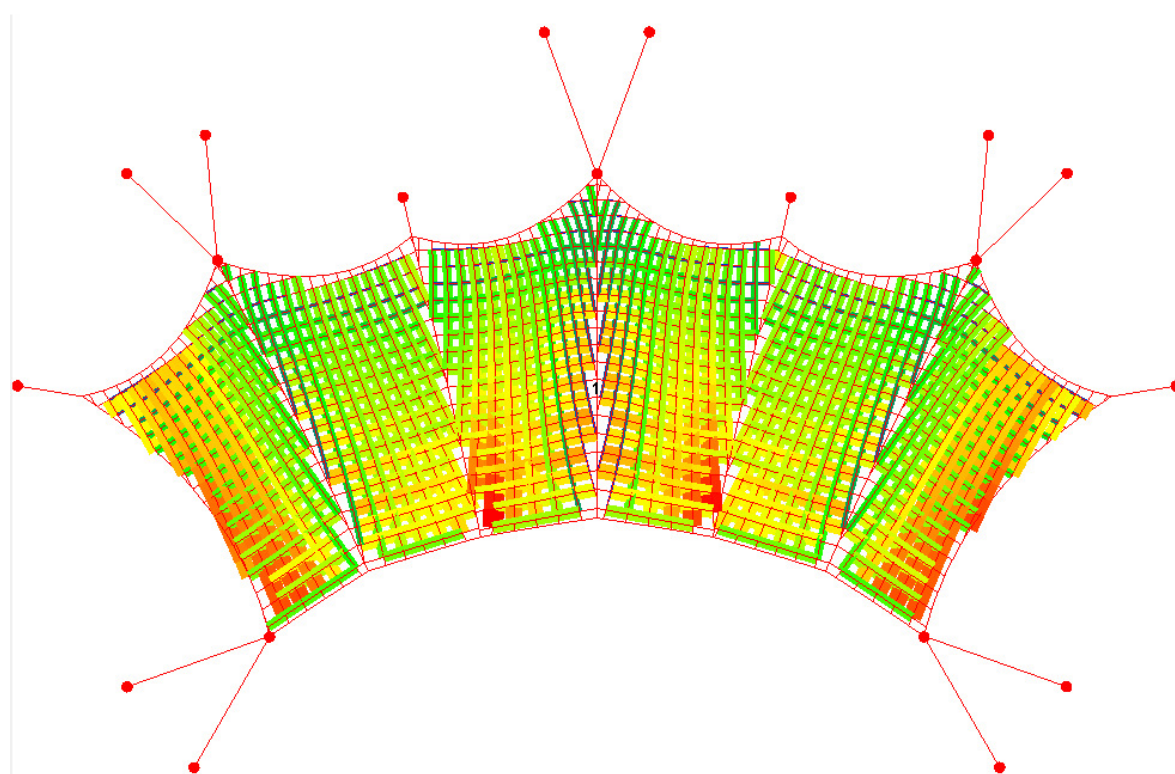
Slika 159: Sile v kablji in jamborih zaradi kombinacije obtežbe snega in vetra X

Vzdolžne napetosti od doline proti grebenu počasi naraščajo, prečne pa so v sprednjem in srednjem delu približno konstantne, v zadnjem delu pa proti robu padajo proti nič. Vzdolžne napetosti v notranjosti privetnih polj se gibljejo od 5 kN/m do 7kN/m, realni maksimum je 7,3 kN/m. Na zavetnih poljih je vzdolžna napetost približno 4 kN/m. Prečne napetosti v notranjosti polj so od 4 kN/m do 6 kN/m. Sprednji kabel se v sredini spusti za 20 cm, pomiki v notranjosti membrane pa dosežejo tudi 65 cm.

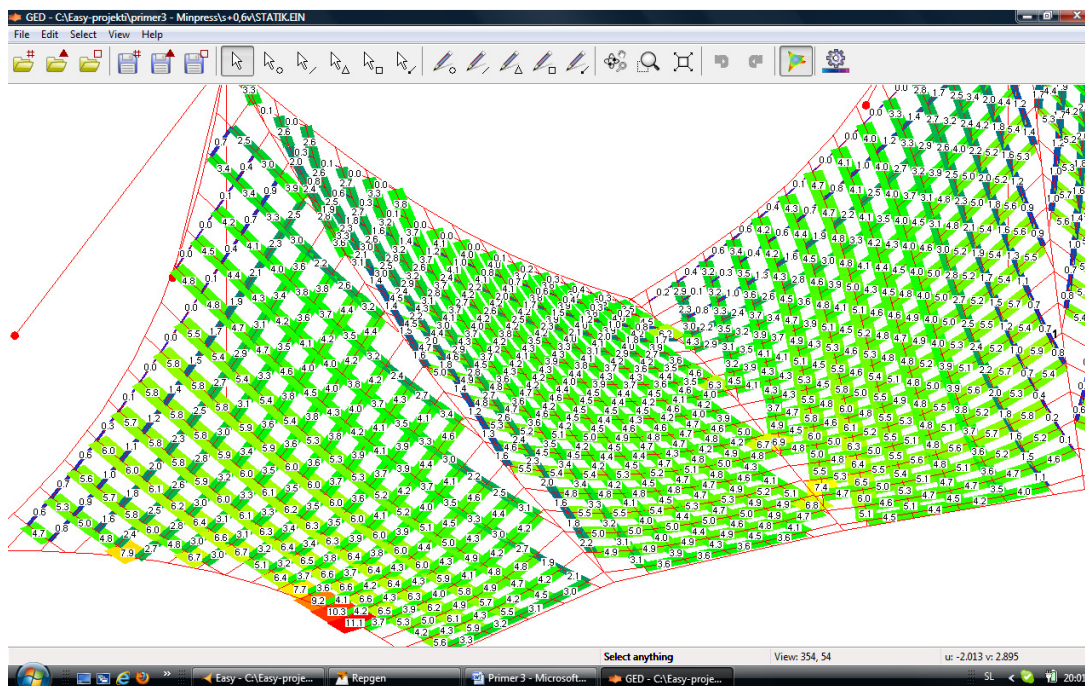
7) Prednapetje + sneg + 0,6 * veter Y



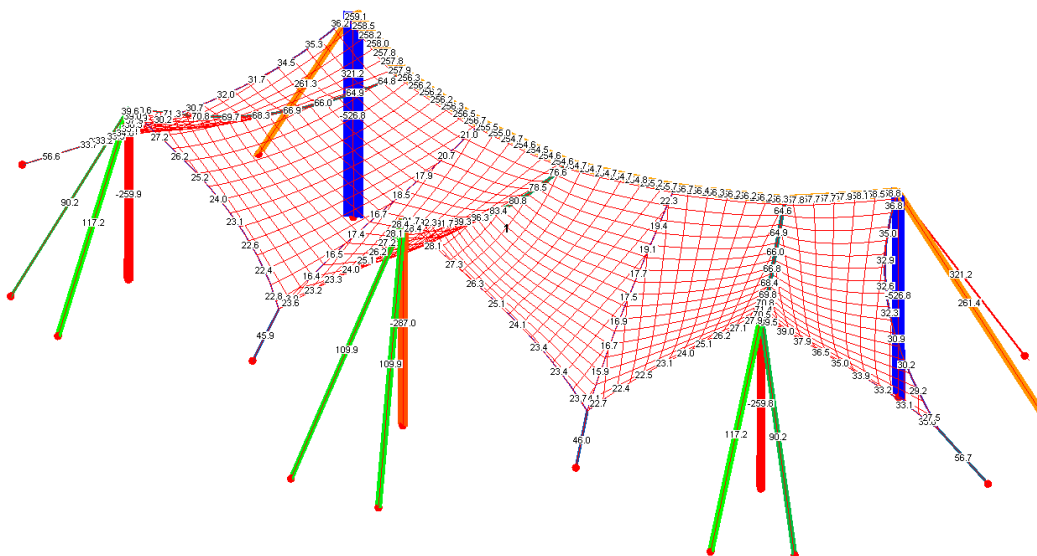
Slika 160: Primerjava začetne oblike in deformirane oblike zaradi kombinacije obtežbe snega in vetra Y (zeleno – začetna oblika, rdeče – deformirana oblika)



Slika 161: Razpored sil po elementih mreže membrane zaradi kombinacije obtežbe snega in vetra Y (sile gredo od manjših proti večjim po naslednjem barvnem zaporedju: modra – zelena – rumena – oranžna – rdeča)



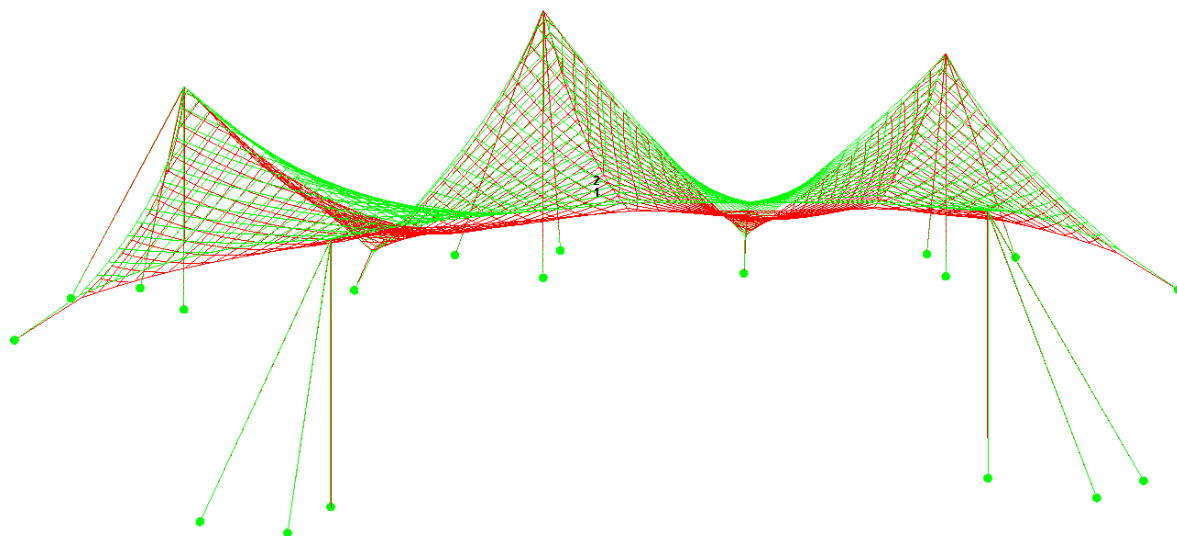
Slika 162: Potek napetosti v membrani zaradi kombinacije obtežbe snega in vetra Y



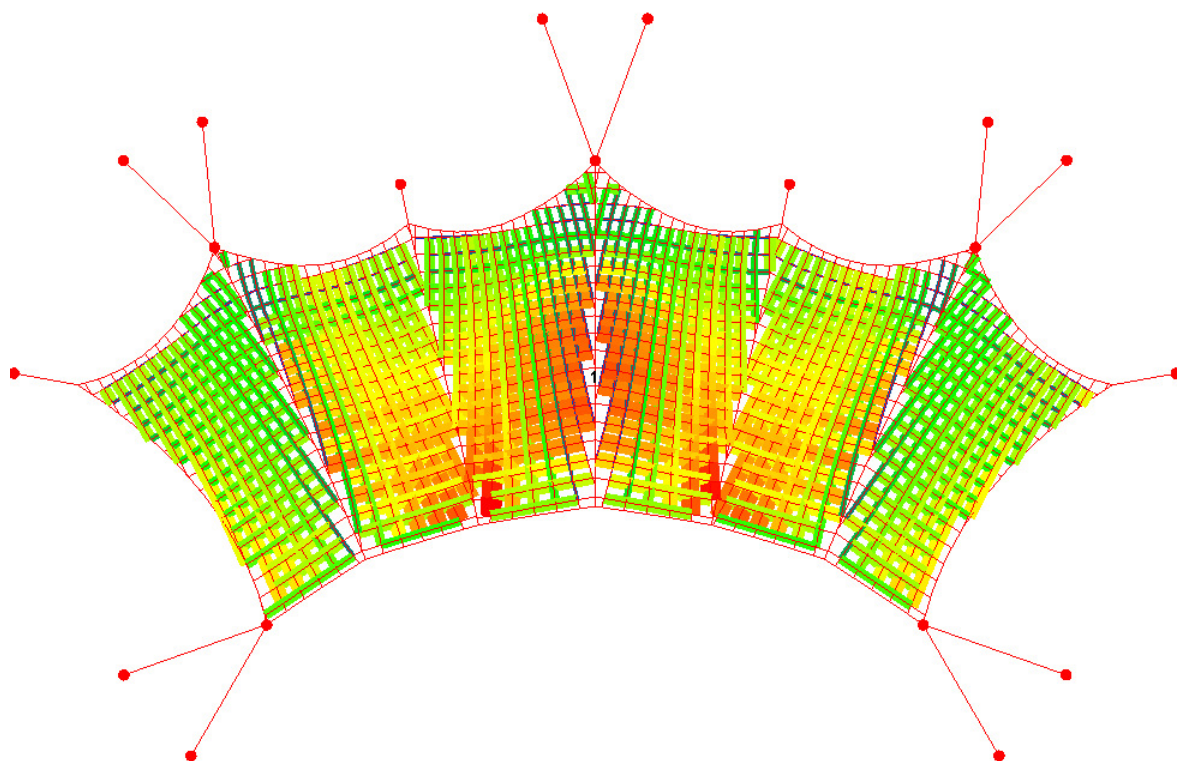
Slika 163: Sile v kablji in jamborih zaradi kombinacije obtežbe snega in vetra Y

Opazi se za obtežbo snega značilno zmanjšanje vzdolžnih napetosti proti grebenu in prečnih napetosti proti zadnjemu delu. Vzdolžne napetosti so v krajnih poljih okoli 6 kN/m, v vmesnih pa okoli 5 kN/m. Realni maksimum je 7 kN/m. Prečne napetosti so v sprednjem in srednjem delu vsakega polja približno 5 kN/m, nato pa v zadnjem delu naglo padejo. Sprednji kabel se spusti za 20 cm, v notranjosti membrane pa zaznamo pomik do 62 cm.

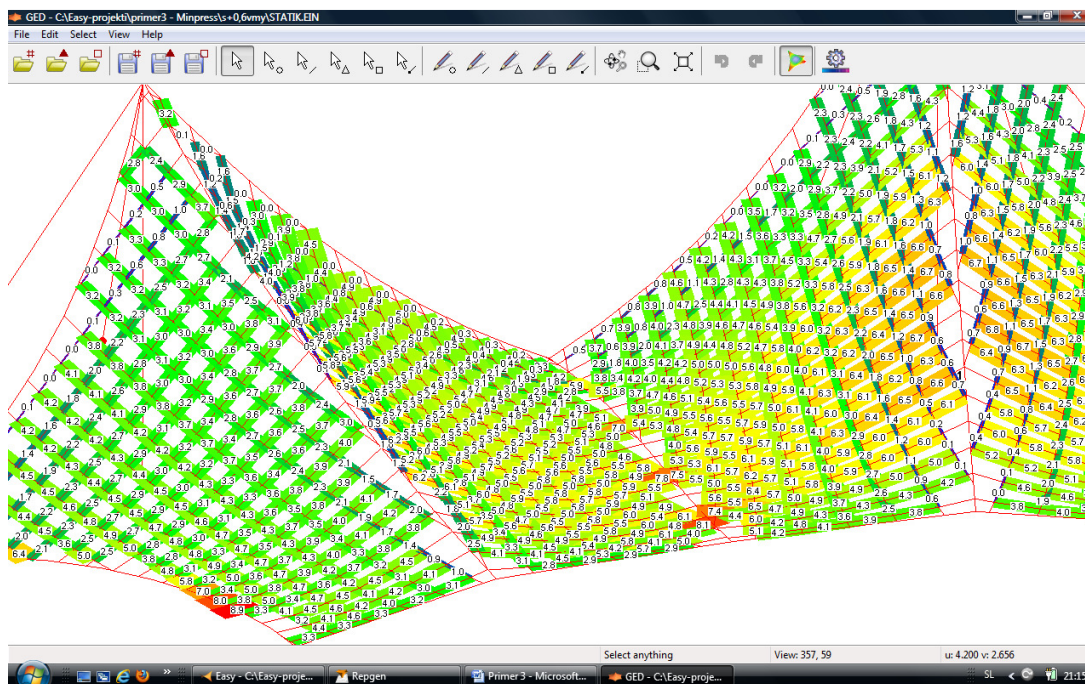
8) Prednapetje + sneg + 0,6 * veter -Y



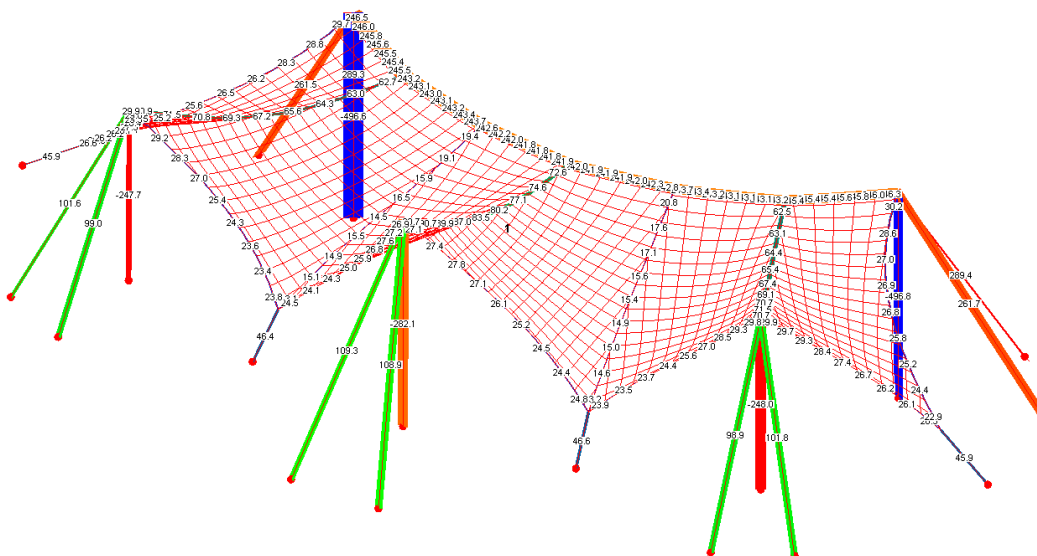
Slika 164: Primerjava začetne oblike in deformirane oblike zaradi kombinacije obtežbe snega in vetra -Y (zeleno – začetna oblika, rdeče – deformirana oblika)



Slika 165: Razpored sil po elementih mreže membrane zaradi kombinacije obtežbe snega in vetra -Y (sile gredo od manjših proti večjim po naslednjem barvnem zaporedju: modra – zelena – rumena – oranžna – rdeča)



Slika 166: Potek napetosti v membrani zaradi kombinacije obtežbe snega in vetra –Y



Slika 167: Sile v kablji in jamborih zaradi kombinacije obtežbe snega in vetra –Y

Najvišje prečne napetosti so ob sredinskem grebenskem kablju in dosegajo vrednosti do 6,7 kN/m. To je tudi najvišja realna membranska napetost ob tej obtežni kombinaciji. Prečne napetosti so najvišje v srednjih poljih, nato pa proti zunanjam, kjer so napetosti okoli 3 kN/m, padajo. V vseh poljih so vzdolžne napetosti približno 5 kN/m, nato pa proti grebenu padajo. Sprednji kabel se pomakne za 20 cm, membrana v notranjosti pa do 63 cm.

Tabela kritičnih rezultatov:

Preglednica 7: Kritični rezultati statične analize po posameznih elementih in maks. pomik (p = prednapetje, s = sneg, v = veter (srk), v_x = veter X, v_y = veter Y, v_{-y} = veter $-Y$)

Element \ Obt. komb.	p	s	v	v_x	v_y	v_{-y}	$s+0,6v_x$	$s+0,6v_y$	$s+0,6v_{-y}$
Membrana [kN/m]	2,4	6,7*	5	4,5	4*	4,2	7,3*	7*	6,7
Sprednji kabel [kN]	150	252	182	182	183	160	255	259	247
Sred. grebenski kabel [kN]	30	91	25	36	36	35	91	92	91
Str. grebenska kabla [kN]	30	71	30	36	35	33	71	71	71
Not. dolinska kabla [kN]	30	22	54	36	35	34	22	22	21
Bočna robna kabla [kN]	19	34	33	33	26	26	39	37	30
Robni kabli zadaj [kN]	17	35	21	27	24	20	40	40	30
Stab. kabli zadnjih str. jamborov [kN]	46	108	56	64	64	57	115	117	102
Stab. kabla zadnjega sred. jambora [kN]	45	109	45	68	52	53	116	110	109
Stab. kabli sprednjih jamborov [kN]	169	304	220	236	218	193	325	321	289
Not. kratka stab. kabla zadaj [kN]	50	46	79	62	58	59	47	46	47
Bočna kratka stab. kabla [kN]	31	51	51	53	44	41	60	57	46
Sprednja jambora [kN]	291	510	351	365	360	314	522	527	497
Zadnji sred. Jambor [kN]	119	284	119	145	139	137	285	287	282
Zadnja str. jambora [kN]	112	253	123	152	140	129	263	269	245
Max. pomik [cm]	/	57	34	34	33	27	65	62	63

* kritične vrednosti so v vzdolžni smeri polja oz. pravokotno na smer krojev

Iz tabele vidimo, da ima obtežba vetra, kljub temu, da smo jo podali v zelo izdatni meri, kritičen vpliv le na dolinski kabel in njegov kratki stabilizacijski kabel zadaj. Najbolj kritično posamično obtežbo predstavlja sneg, katerega vpliv veter na določenih območjih še malenkostno poveča. Tako sta najbolj kritični obtežni kombinaciji sneg v kombinaciji z vetrom v x oziroma v y smeri. V danem primeru bi si lahko olajšali delo in analizirali konstrukcijo le na obtežbo snega in vetra v srku.

Podane posamezne napetosti v membrani, ki jih poda program so glede na okoliške napetosti. To je zaradi metode izračuna širine posameznega elementa. Realni maksimum napetosti, ki ga lahko pričakujemo, je okoli 7,3 kN/m.

Največji pomik membrane za 65 cm predstavlja 9 % širine konstrukcije, če pa upoštevamo. Ob upoštevanju, da nimamo toge nosilne konstrukcije, temveč fleksibilne nosilne kable, se ta delež še dodatno zmanjša na približno 6 %, kar se mi zdi sprejemljivo za fleksibilno prednapeto membransko konstrukcijo.

9.2.4 Dimenzioniranje

a) Membrana

$$\sigma_{Ed} = 6,7 \text{ kN/m}$$

$$\sigma_{Rd} = 12 \text{ kN/m (osnovna smer)}$$

$$7,5 \text{ kN/m} < 12 \text{ kN/m} \quad \checkmark$$

Zvar

$$\sigma_{Ed} = 7,3 \text{ kN/m}$$

$$\sigma_{Rd} = 0,8 * 12 \text{ kN/m (votkovna smer)} = 9,6 \text{ kN/m}$$

$$7,3 \text{ kN/m} < 9,6 \text{ kN/m} \quad \checkmark$$

b) Jambori

Sprednja jambora

$$F_{Ed} = 527 \text{ kN} * 1,5 = 791 \text{ kN}$$

Izberem cevni profil 216/10 (S 235)

$$A = 64,72 \text{ cm}^2$$

$$i = 7,292 \text{ cm}$$

$$l_u = 600 \text{ cm}$$

$$\lambda = 600 \text{ cm} / (7,292 \text{ cm} * 93,9 * 1,0) = 0,88$$

$$\chi = 0,61 \text{ (uklonska krivulja c)}$$

$$F_{Rd} = 0,61 * 64,72 \text{ cm}^2 * 23,5 \text{ kN/cm}^2 = 928 \text{ kN}$$

$$791 \text{ kN} < 928 \text{ kN} \quad \checkmark$$

Zadnji sredinski jambor

$$F_{Ed} = 287 \text{ kN} * 1,5 = 431 \text{ kN}$$

Izberem cevni profil 168,3/8 (S 235)

$$A = 40,29 \text{ cm}^2$$

$$i = 5,675 \text{ cm}$$

$$l_u = 600 \text{ cm}$$

$$\lambda = 600 \text{ cm} / (5,675 \text{ cm} * 93,9 * 1,0) = 1,13$$

$$\chi = 0,52 \text{ (uklonska krivulja c)}$$

$$F_{Rd} = 0,52 * 40,29 \text{ cm}^2 * 23,5 \text{ kN/cm}^2 = 492 \text{ kN}$$

$$431 \text{ kN} < 492 \text{ kN} \checkmark$$

Zadnja stranska jambora

$$F_{Ed} = 263 \text{ kN} * 1,5 = 395 \text{ kN}$$

Izberem cevni profil 168,3/6,3 (S 235)

$$A = 32,06 \text{ cm}^2$$

$$i = 7,732 \text{ cm}$$

$$l_u = 500 \text{ cm}$$

$$\lambda = 500 \text{ cm} / (7,732 \text{ cm} * 93,9 * 1,0) = 0,69$$

$$\chi = 0,73 \text{ (uklonska krivulja c)}$$

$$F_{Rd} = 0,73 * 32,06 \text{ cm}^2 * 23,5 \text{ kN/cm}^2 = 550 \text{ kN}$$

$$395 \text{ kN} < 550 \text{ kN} \checkmark$$

c) **Kabli**

Sprednji (glavni) kabel

$$F_{Ed} = 259 \text{ kN} * 2,5 = 648 \text{ kN}$$

$$F_{Rd} = 713 \text{ kN}$$

$$648 \text{ kN} < 713 \text{ kN} \checkmark$$

Sredinski grebenski kabel

$$F_{Ed} = 92 \text{ kN} * 2,5 = 230 \text{ kN}$$

$$F_{Rd} = 265 \text{ kN}$$

$$230 \text{ kN} < 265 \text{ kN} \checkmark$$

Stranska grebenska kabla

$$F_{Ed} = 72 \text{ kN} * 2,5 = 180 \text{ kN}$$

$$F_{Rd} = 210 \text{ kN}$$

$$180 \text{ kN} < 210 \text{ kN} \checkmark$$

Notranja dolinska kabla

$$F_{Ed} = 54 \text{ kN} * 2,5 = 135 \text{ kN}$$

$$F_{Rd} = 172 \text{ kN}$$

$$135 \text{ kN} < 172 \text{ kN} \checkmark$$

Bočna robna kabla

$$F_{Ed} = 39 \text{ kN} * 2,5 = 98 \text{ kN}$$

$$F_{Rd} = 126 \text{ kN}$$

$$98 \text{ kN} < 126 \text{ kN} \checkmark$$

Robni kabli zadaj

$$F_{Ed} = 40 \text{ kN} * 2,5 = 100 \text{ kN}$$

$$F_{Rd} = 126 \text{ kN}$$

$$100 \text{ kN} < 126 \text{ kN} \checkmark$$

Stabilizacijski kabli zadnjih stranskih jamborov

$$F_{Ed} = 117 \text{ kN} * 2,5 = 293 \text{ kN}$$

$$F_{Rd} = 368 \text{ kN}$$

$$293 \text{ kN} < 368 \text{ kN} \checkmark$$

Stabilizacijska kabla zadnjega sredinskega jambora

$$F_{Ed} = 116 \text{ kN} * 2,5 = 290 \text{ kN}$$

$$F_{Rd} = 368 \text{ kN}$$

$$290 \text{ kN} < 368 \text{ kN} \checkmark$$

Stabilizacijski kabli sprednjih jamborov

$$F_{Ed} = 325 \text{ kN} * 2,5 = 813 \text{ kN}$$

$$F_{Rd} = 897 \text{ kN}$$

$$813 \text{ kN} < 897 \text{ kN} \checkmark$$

Notranja kratka stabilizacijska kabla zadaj

$$F_{Ed} = 79 \text{ kN} * 2,5 = 198 \text{ kN}$$

$$F_{Rd} = 210 \text{ kN}$$

$$198 \text{ kN} < 210 \text{ kN} \checkmark$$

Bočna kratka stabilizacijska kabla

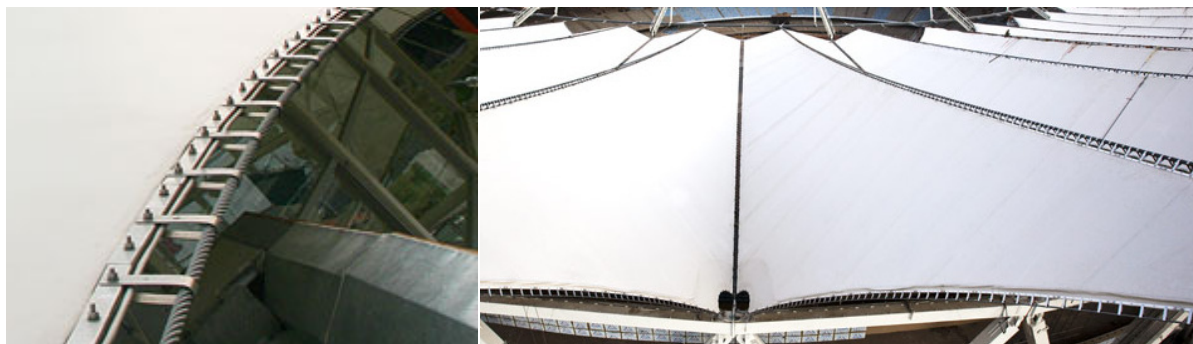
$$F_{Ed} = 60 \text{ kN} * 2,5 = 150 \text{ kN}$$

$$F_{Rd} = 172 \text{ kN}$$

$$150 \text{ kN} < 172 \text{ kN} \checkmark$$

9.2.5 Detajli

Spodnje slike prikazujejo detajle, ki so primerni za vgradnjo pri obravnavani konstrukciji.



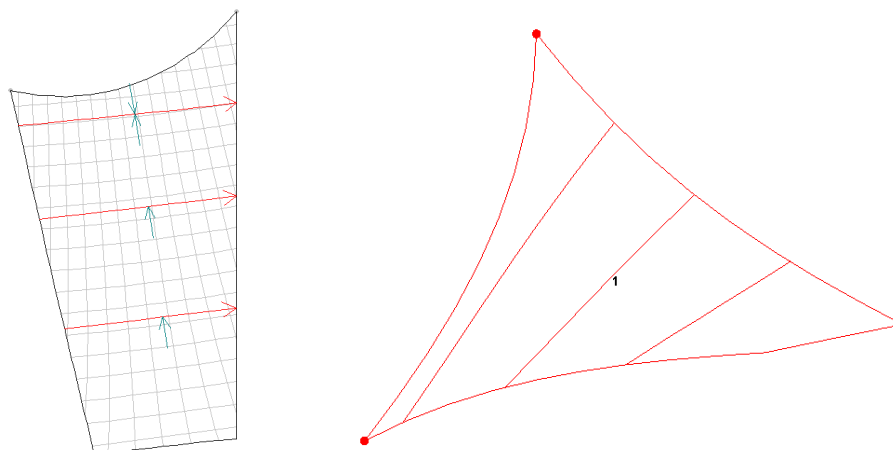
Slika 168: Detajl priključitve membrane na robne, grebenske in dolinske kable (Galerías ..., 2012; Javaharlal ..., 2010)



Slika 169: Primera možnih ogliščnih detajlov (Data ..., 2011; Tension structures ..., 2012)

9.2.6 Krojenje membrane

Celotno površino, ki smo jo določili pri procesu iskanja oblike, razdelim na šest polj, ki so med seboj ločena z dolinskimi ali grebenskimi kable, ter nato vsako polje razrežem na naslednji način. Sprednji kraj bo najširši, torej bo nekaj manj kot 2,5 m (proizvodna širina izbrane membrane je 2,5 m, poleg tega pa moram upoštevati še izdelavo robnih detajlov kroja). Naslednji kraj bo ožji za pribl. 40 cm, še naslednji pa za pribl. 80 cm, zadnji kraj pa kar ostane. Takšen razpored ima, poleg vizualne funkcije (ni naglega skoka v širini), še pozitiven učinek na popačenje in s tem kontrolo striga v krajih. Namreč, bolj ko je površina ukrivljena, ožji so kroji. Pazim, da se stične črte krojev med sosednjimi polji ujemajo. Program med definiranimi točkama ustvari na površini geodetsko linijo, ki predstavlja mejo med kroji. Izbrana razdelitev membranske površine enega izmed polj je prikazana na sliki 170.



Slika 170: Kreiranje geodetskih črt po površini enega polja membrane; Desno: Razdeljena površina enega polja membrane

Sledi projekcija vsakega od tridimenzionalnih delov na ravnino. Program s pomočjo zahtevnih algoritmov izvede to operacijo. Določim naj se kraj tvori tako, da je daljša robna geodetska črta v projekciji ravna linija, razen v zadnjem kroju vsakega polja. Tam izberem notranjo geodetsko linijo za ravno črto v projekciji, saj se v nasprotnem potek glavnih osi materiala ne bi ujemal z modeliranim stanjem (slika 170 levo).

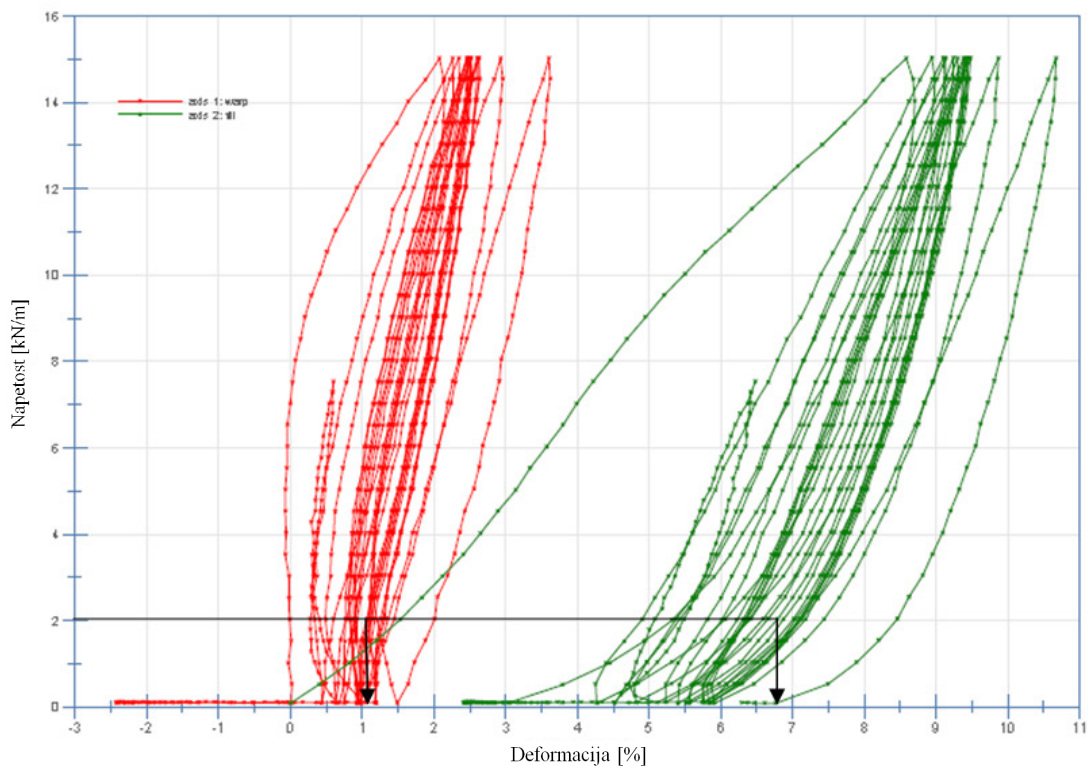
Kompenzacija:

Predpostavljeno prednapetje v osnovni smeri: 2 kN/m

Predpostavljeno prednapetje v votkovni smeri: 2 kN/m

Razmerje prednapetja: 1 : 1

Ker nimam rezultatov dvoosnega nateznega testa za konkretno konstrukcijo, bom kompenzacijske vrednosti poiskal iz podatkov proizvajalca za standardna prednapetostna razmerja (slika 171) in iz teh predpostavil vrednosti za predvideno prednapetostno razmerje. Kompenzirani kroji enega polja membrane so prikazani na sliki 172, primer načrta za izdelavo enega izmed krojev pa na sliki 173.

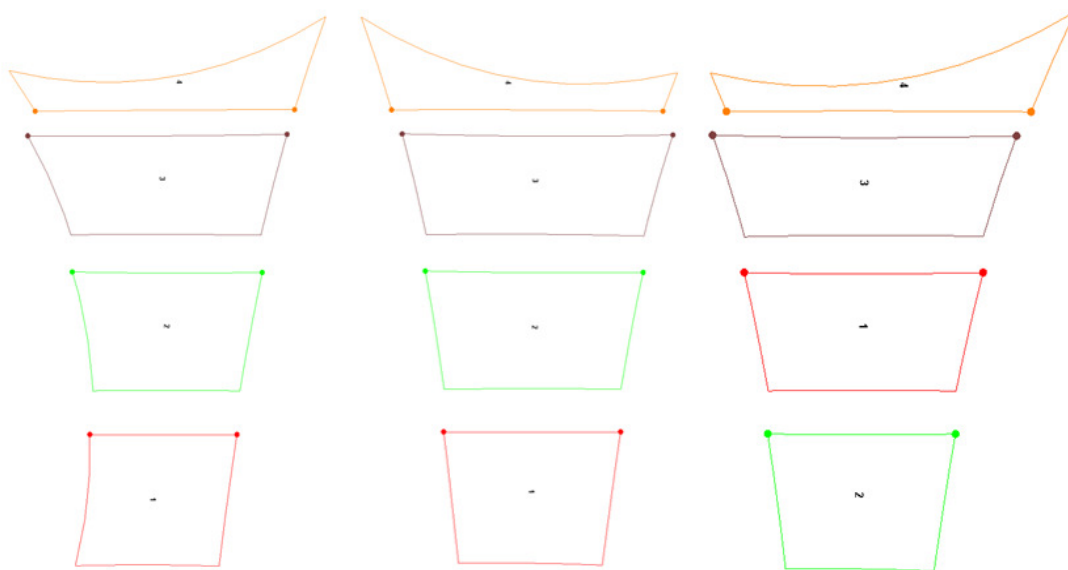


Slika 171: Obnašanje preizkušanca B4951 - določitev kompenzacijskih faktorjev (rdeča – osnova, zelena – votek)

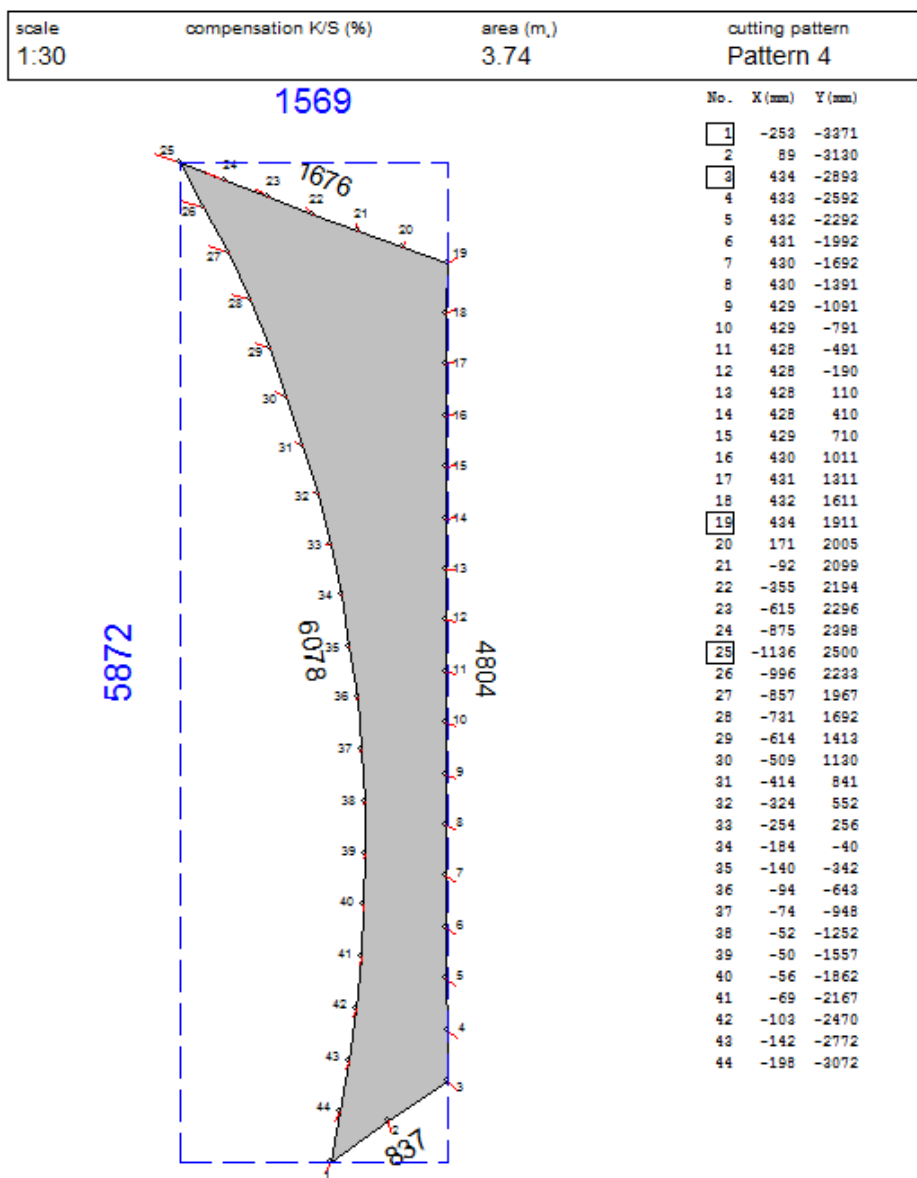
Vrednosti kompenzacije:

Osnovna smer: 1,1 %

Votkovna smer: 6,8 %



Slika 172: Kroji enega polja membrane za nadkritje

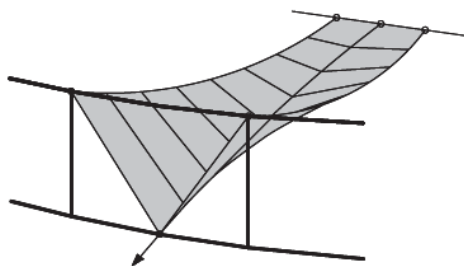


Slika 173: Primer načrta za izdelavo enega izmed krojev membrane nadkritja

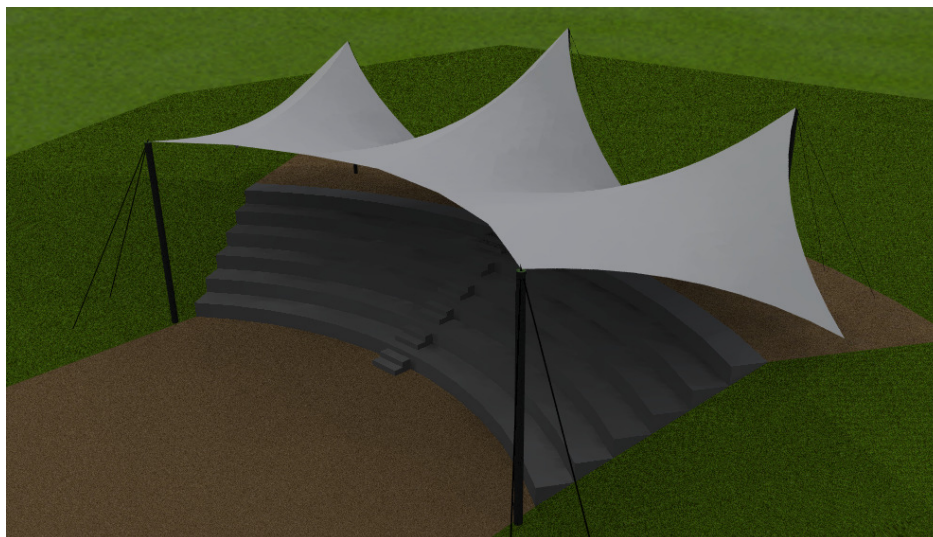
9.2.7 Postavitev

Najprej s tkanino ali folijo prekrijemo ravnino tik za odprtim gledališčem, na katero položimo vseh šest prefabriciranih delov membrane, glavni kabel ter dolinske in grebenske kable. Vse te elemente medsebojno spojimo s predvidenimi mehanskimi spoji. Namestimo tudi vse kotne plošče. Glavna jambora ter stabilizacijske kable namestimo v končno pozicijo in jih začasno dodatno stabiliziramo. Membrano, skupaj z zaščitno podlago, pazljivo povlečemo čez sediščne stopnice. Z avtodvigalom oba konca glavnega kabla dvignemo in pritrdimo na jambore. Sledi postavitev jamborov na zadnji strani in pritrditev grebenskih kablov nanje. Membrana sedaj visi na glavnem in grebenskih kabliah. Prednapenjanje vnesemo tako, da z mehanskimi zategovalci povlečemo preostale kotne plošče nazaj in navzdol (slika 174). Ko dosežemo predvideno končno obliko membrane oz. želeno prednapetje,

omenjene kotne plošče s kratkimi stabilizacijskimi kabli spojimo s sidri v tleh. Fine nastavitve prednapetja lahko nastavljammo z zategovalci, ki so vgrajeni na določenih stabilizacijskih in robnih kabljih. Na koncu natančno preverimo geometrijo konstrukcije in v primeru, da imamo ustrezne inštrumente, še sile v kabljih oz. napetosti v membrani. Slika 175 prikazuje predvideno končno stanje ob zaključku postavitve nadkritja.

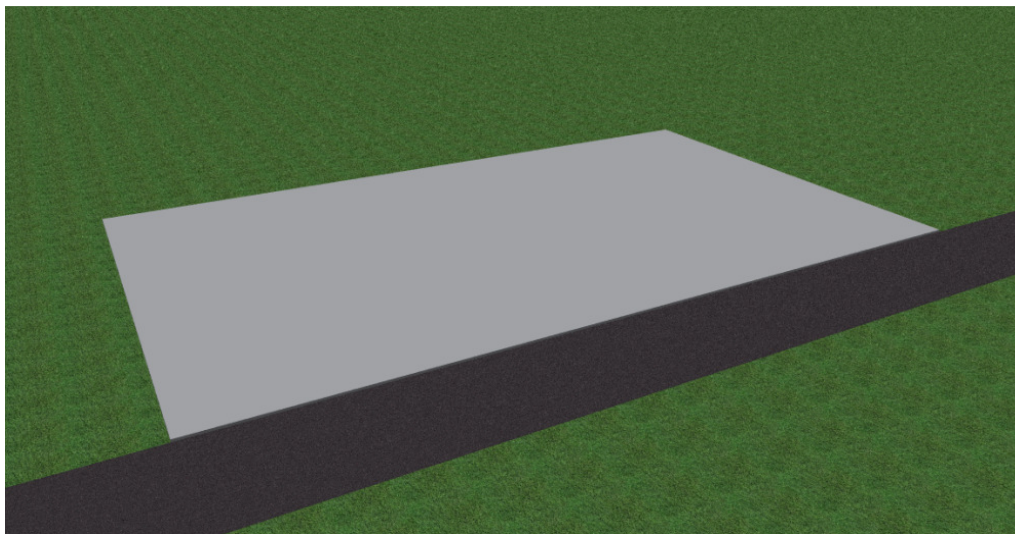


Slika 174: Prednapenjanje membrane z napenjanjem dolinskega kabla



Slika 175: Tribune odprtega gledališča z nadkritjem

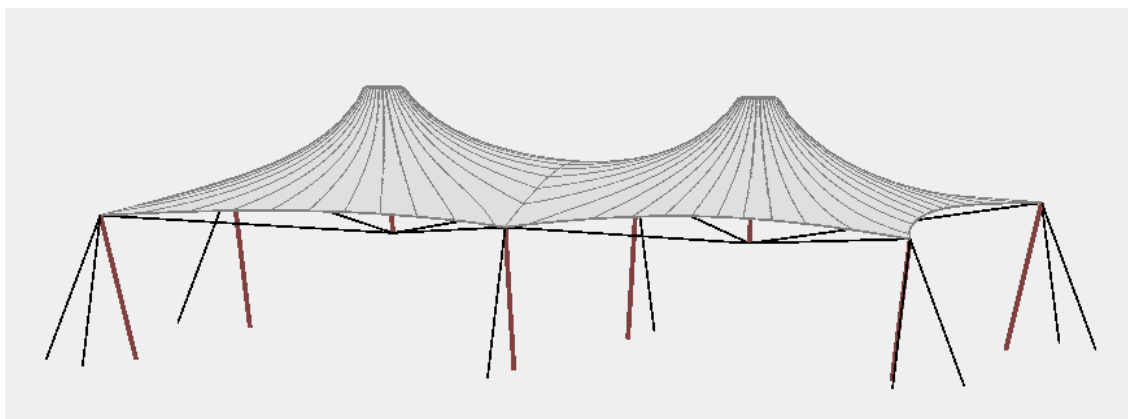
9.3 Nadkritje tržnice na Primorskem



Slika 176: Trenutno stanje tržničnega platoja

9.3.1 Zasnova

Izdelati želimo prednapeto membransko streho nad ravno pravokotno površino velikosti 14 m x 28 m, na kateri je predvidena tržnica oziroma sejemska dejavnost (slika 176). Izberemo obliko, ki je sestavljena iz dveh konusnih struktur z notranjima visokima podporama. Celotna membrana je po robu točkovno pripeta na šest jamborov, vmes pa ima fleksibilne robove. V izogib jamboroma v sredi prostora uporabimo lebdeči jambor, ki se na vrhu konča z nateznim obročem. Ta je na višini 9 m in ima premer 1,4 m. Zunanji jambori so nagnjeni navzven, da pritrdilne točke membrane obdajajo tlorisno površino 15 m x 30 m. Vogalni štirje jambori so stabilizirani z dvema kabloma, ostala dva pa z enim stabilizacijskim kablom. Vrhi vseh zunanjih jamborov bodo na višini 5m, medtem ko se bo viseči jambor spustil na višino 4m od tal (slika 177).

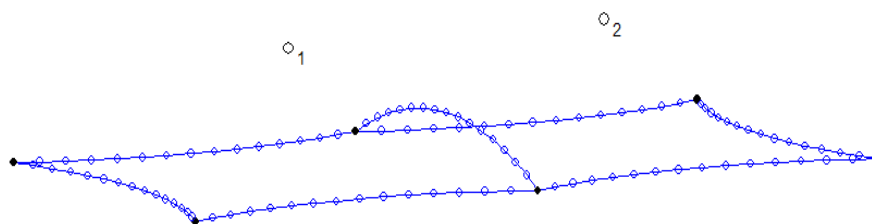


Slika 177: Shema predvidenega nadkritja tržnice

9.3.2 Iskanje oblike

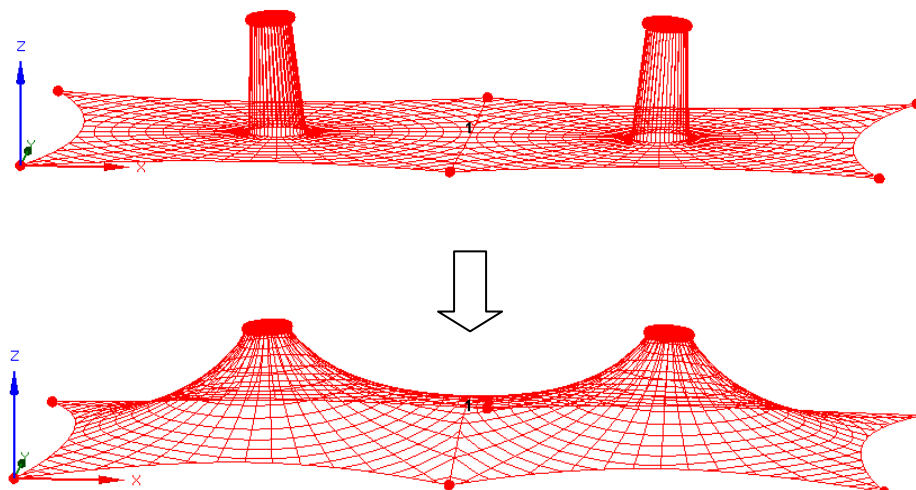
Vhodni podatki:

- Koordinate robnih fiksnih točk ((0,0,0), (15,0,0), (30,0,0), (0,15,0), (15,15,0), (30,15,0))
- Koordinate središča notranjega obroča ((8,069181; 7,5; 4), (21,930819;7,5;4))
- Prednapetje v membrani: 3 kN/m v radialni smeri, 2,4 kN/m v obodni smeri
- Radij nateznih obročev $r = 0,7$ m , nagnjenost $\vec{n} = (-1,0,15)$ oz. $\vec{n} = (1,0,15)$
- 10 % ukrivljenost robnih kablov (na njih deluje membrana s 3 kN/m): predpostavim, da je tloris kabla v ravnini xy del krožnice ter da je razdalja v ravnini xy med tetivo in vrhom kabla 10 % radija krožnice
- Sila 1 kN v vmesnem kablju med membranskima enotama
- Gostota radialne mreže linijskih elementov membrane (radialno na 0,6 m ; tangencialno na 9°)
- Vsakega izmed robnih kablov razdeli na 14 enakih elementov, vmesni kabel pa na 15 enakih elementov.



Slika 178: Podana geometrija fiksnih točk in vmesnih robnih elementov

Iz podanih podatkov program tvori začetno mrežo linijskih elementov in v vsakemu elementu določi gostoto sile (upoštevata tlorisne dolžine, slika 179 zgoraj), nato pa poišče ravnovesno obliko za podane robne pogoje in določene gostote sil (slika 179 spodaj).

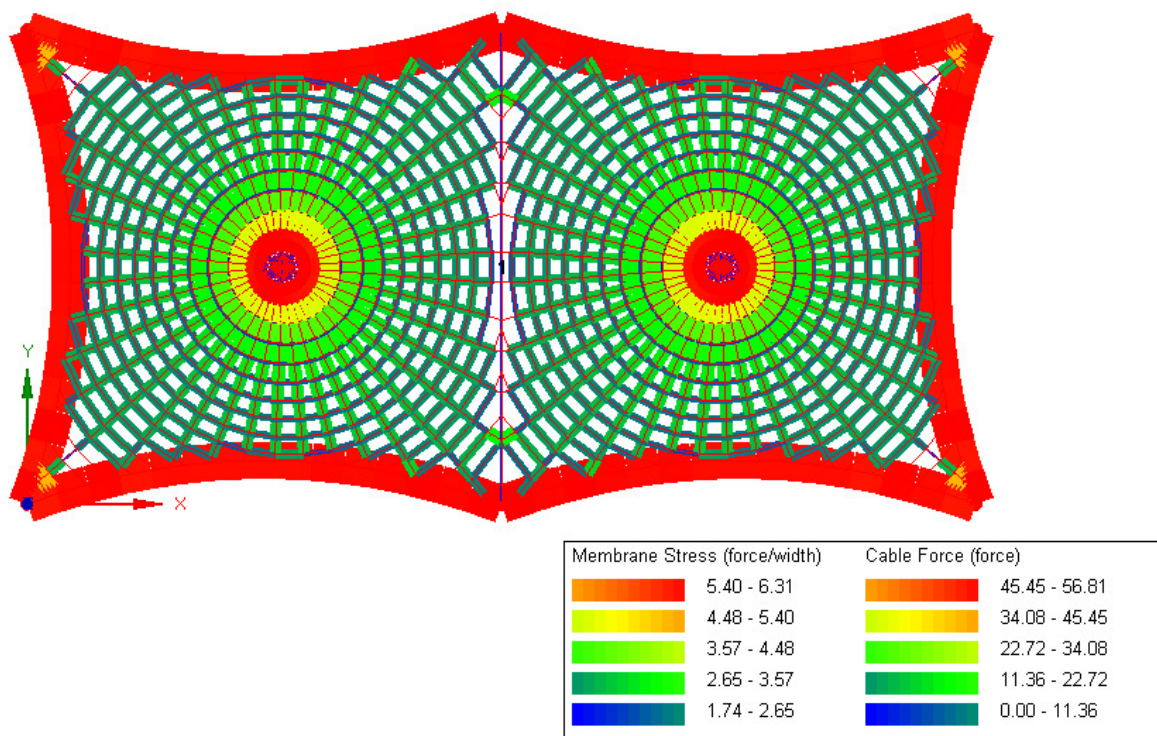


Slika 179: Iskanje ravnotežne oblike

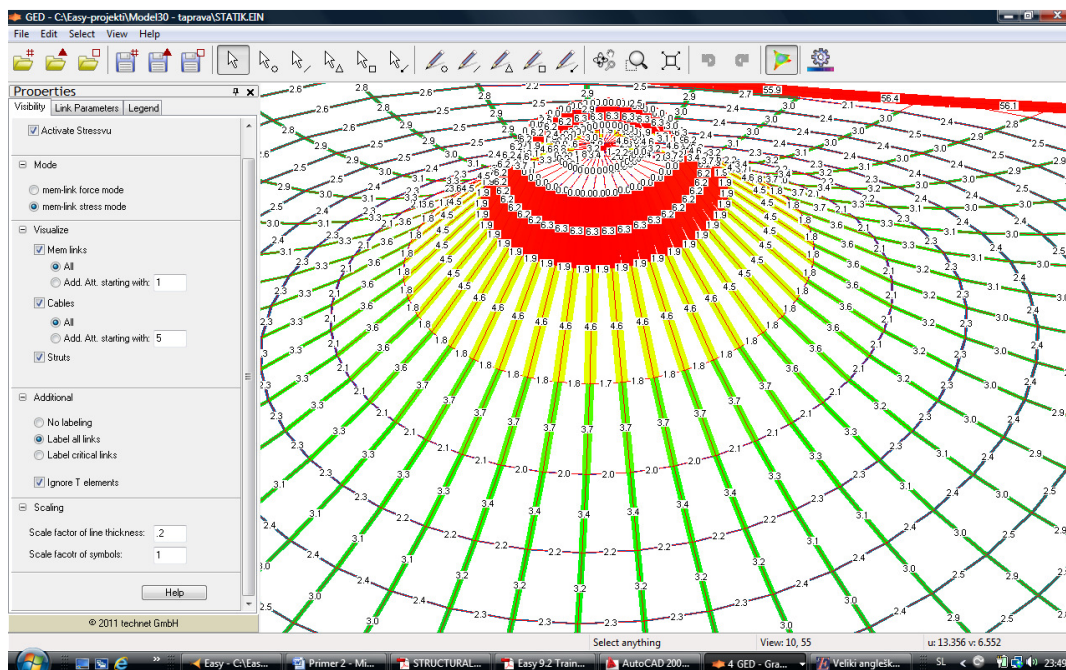
9.3.3 Statična analiza

Določimo togosti kablov (EA) in elastični modul membrane (E) v osnovni in votkovni smeri. Program nato sam, na osnovi geometrije membrane, izračuna togosti posameznih elementov membrane. Zdaj, ko poznamo togosti in sile ($F = q l$) vseh elementov konstrukcije, lahko po Hookovem zakonu izračunamo nenapeto dolžino posameznih elementov. Če na nenapete elemente vnesemo predvidene, dobimo seveda identično geometrijo prednapete membrane kot pri procesu iskanja oblike.

Napetosti v membrani in sile v kablji pri prednapetju so prikazane na sliki 180 in 181.

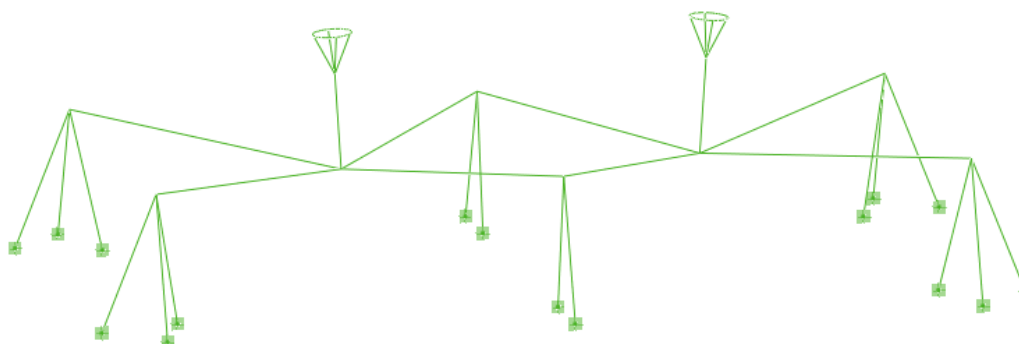


Slika 180: Napetosti v membrani in sile v kablji v stanju prednapetja



Slika 181: Rast napetosti v membrani proti notranji visoki podpori v stanju prednapetja

Sedaj, ko imamo ustrezno obliko membrane in razpored prednapetja v njej, moramo modelirati še ostale dele konstrukcije (slika 182). Glede na sile v podporah zgornje konstrukcije, izračunamo sile v kablh primarne nosilne konstrukcije, ter nato izberemo njihovo togost, ter s Hookovim zakonom določimo začetno nenapeto dolžino. Ogljšča membrane, na koncih robnih kablov, in točke notranjega obroča, ki smo jih v fazi iskanja oblike upoštevali kot nepomične točke, sedaj sprostimo in dobimo realen model konstrukcije. Ob nastopu predvidenega prednapetja mora membrana zavzeti prej določeno obliko (oziroma se ji dovolj približati).



Slika 182: Model podporne konstrukcije

Modul za statično analizo konstrukcije v programu Easy omogoča le delo z osno obremenjenimi elementi, medtem ko pa se v obravnavani konstrukciji (v elementih sestava lebdečega jambora in notranjega obroča) pojavijo še ostale notranje količine, zato bomo konstrukcijo statično analizirali v modulu EasyBeam, ki omogoča analizo takšne hibridne konstrukcije.

Izbira podpornih elementov in materiala membrane:

Robni kabli membrane: $1 \times 19, d = 10 \text{ mm}; EA = 16600 \text{ kN/cm}^2 * 2,54 \text{ cm}^2 = 42164 \text{ kN}$

Stabilizacijski kabli v ogliščih: $1 \times 37, d = 28 \text{ mm}; EA = 16600 \text{ kN/cm}^2 * 4,91 \text{ cm}^2 = 81506 \text{ kN}$

Stabilizacijska kabla ob straneh: $1 \times 61, d = 36 \text{ mm}; EA = 16600 \text{ kN/cm}^2 * 7,89 \text{ cm}^2 = 130974 \text{ kN}$

Obešeni kabli: $1 \times 19, d = 20 \text{ mm}; EA = 16600 \text{ kN/cm}^2 * 2,54 \text{ cm}^2 = 42164 \text{ kN}$

Vmesni kabel: $1 \times 19, d = 20 \text{ mm}; EA = 16600 \text{ kN/cm}^2 * 2,54 \text{ cm}^2 = 42164 \text{ kN}$

Zunanji jambori: cev 177,8/10; $EA = 21000 \text{ kN/cm}^2 * 52,72 \text{ cm}^2 = 1107120 \text{ kN}$

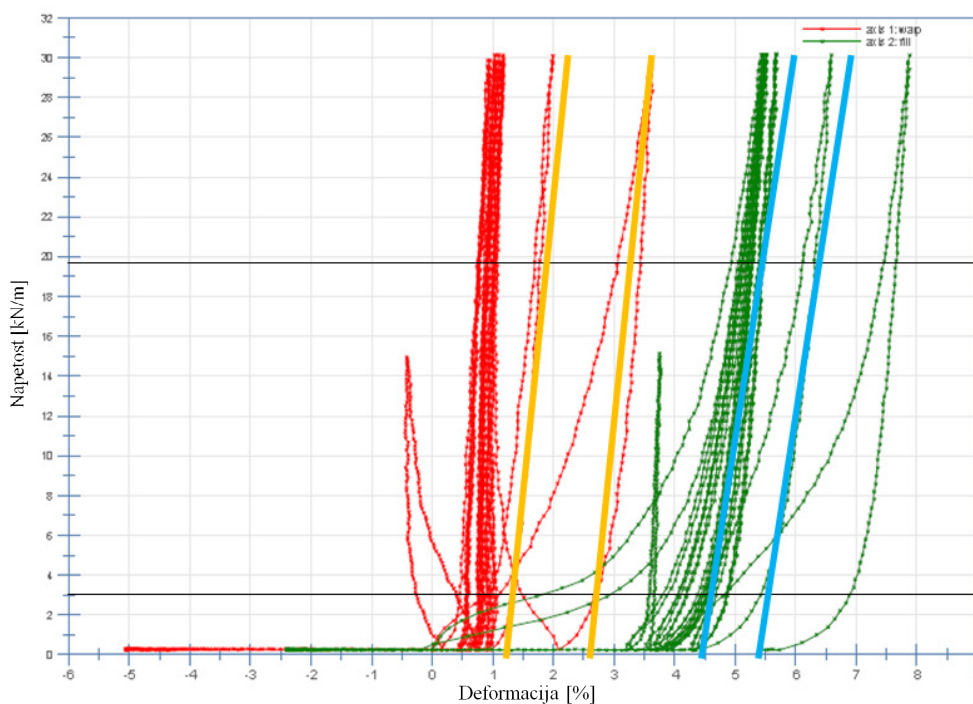
Lebdeči jambor:

- Spodnji del: cev 101,6/4; $A = 12,26 \text{ cm}^2, A_{sy} = A_{sz} = 7,85 \text{ cm}^2; I_t = 292 \text{ cm}^4, I_y = I_z = 146,3 \text{ cm}^4$
- Spodnji del: cev 63,5/4; $A = 7,477 \text{ cm}^2, A_{sy} = A_{sz} = 4,785 \text{ cm}^2; I_t = 22,24 \text{ cm}^4, I_y = I_z = 33,24 \text{ cm}^4$
- Spodnji del: cev 101,6/4; $A = 12,26 \text{ cm}^2, A_{sy} = A_{sz} = 7,85 \text{ cm}^2; I_t = 292 \text{ cm}^4, I_y = I_z = 146,3 \text{ cm}^4$

Membrana: FG/PTFE membrana Verseidag B 18089 (Tip III).

Določitev elastičnega modula:

Izkaže se, da se ob vplivu obtežbe snega napetost v osnovni smeri močno poveča, v votkovni pa praktično izniči, pri vplivu vetra pa prevladuje napetost v votkovni smeri, vendar se napetost v radialni smeri tudi močno poveča. V skladu s tem izberem lastnosti membrane iz rezultatov testa z razmerjem napetosti 1:0 in 2:1 za osnovno smer (oranžni črti na sliki 183) oziroma razmerjem 1:1 in 1:2 za votkovno smer (svetlo modri črti na sliki 183).



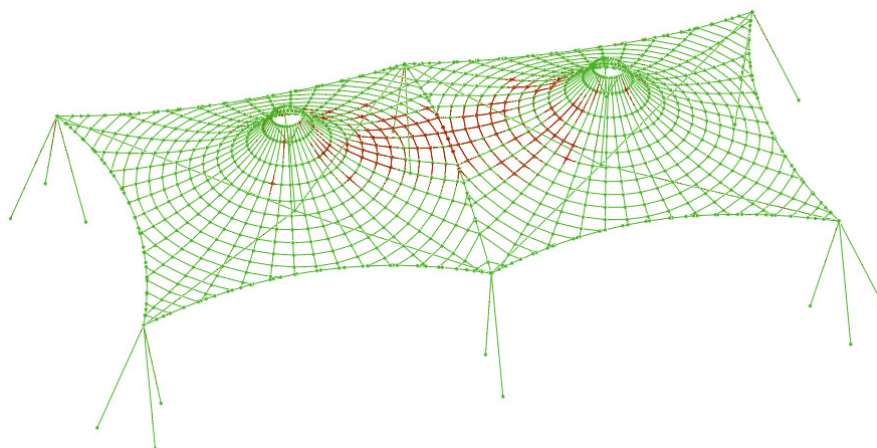
Slika 183: Obnašanje preizkušanca B 18089 ob raztezanju – določitev elastičnih modulov (rdeča – osnova, zelena – votek)

Izračun elastičnega modula:

$$E_x = \Delta\sigma_x / \Delta\varepsilon_x = 30 \text{ kN} / 0,01 = 3000 \text{ kN}$$

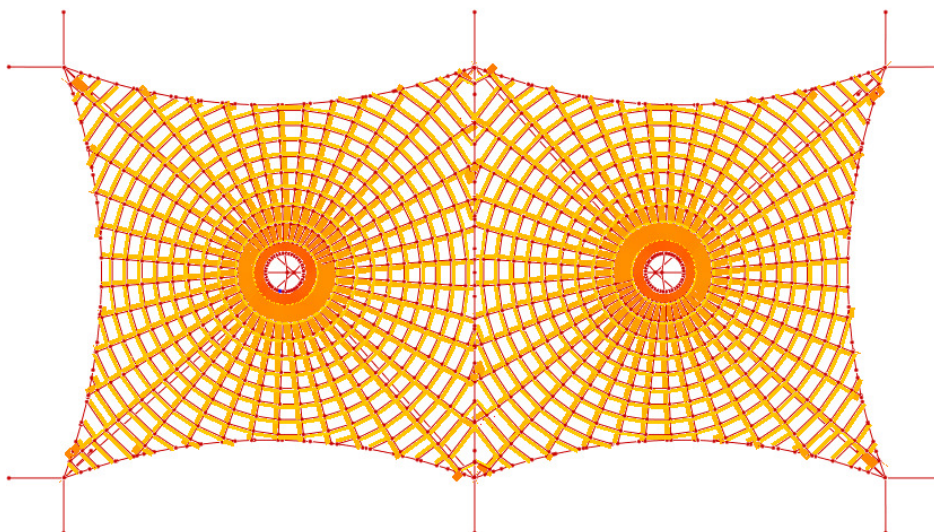
$$E_y = \Delta\sigma_y / \Delta\varepsilon_y = 30 \text{ kN} / 0,015 = 2000 \text{ kN}$$

Stanje prednapetja:



Slika 184: Primerjava predhodno poiskane oblike membrane in oblike membrane v končnem celovitem modelu (zeleno – predhodno poiskana, rdeče – oblika v celovitem modelu)

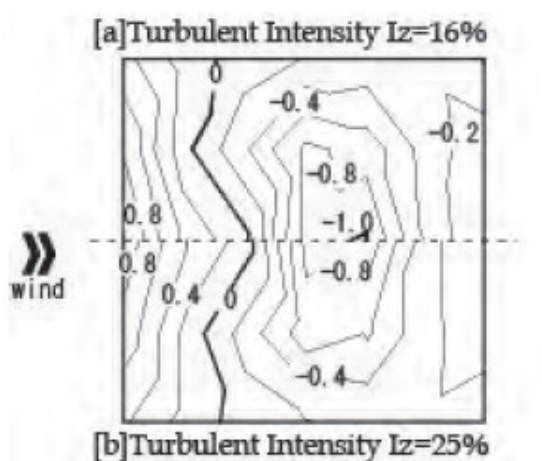
Modelirana konstrukcija se, ob nastopu lastne teže in prednapetja, zelo dobro ujema z obliko membranske površine, ki smo jo predhodno poiskali (slika 184). Tudi vrednosti prednapetja po membrani so praktično identične.



Slika 185: Potek napetosti v membrani v stanju prednapetja (napetosti gredo od manjših proti večjim po naslednjem barvnem zaporedju: rumena – oranžna – rdeča)

Obtežbe:

Obravnavamo vplive snega in vetra. Ker obstaja velika možnost kopičenja snega v ravninskem območju med dvema vrhovoma, bom obtežbo snega podal v nakopičeni obliki (za nakopičen del bom upošteval oblikovni koeficient $\mu_2 = 1,0$) (slika 187). Obtežbo vetra bom porazdelil po površini membrane v skladu z oblikovnimi koeficienti iz testa podobne konstrukcije v vetrnem tunelu (Nagai in sod., 2011) (slika 186). Podal bom obtežbo vetra v dveh smereh - veter X in veter Y, ter za vsako smer še dodatno obtežbo (v skladu s prakso pri SIST EN 1991-1-4, kjer je celotna privetrna stran v določenem srku). Porazdelitev obtežbe po površini za veter X in veter X (srk) je prikazana na sliki 188, za veter Y in veter Y (srk) pa na sliki 189. Upoštevamo tudi lastno težo konstrukcije (za membrano upoštevamo $0,01 \text{ kN/m}^2$).



Slika 186: Koeficienti razporeditve obtežbe vetra za konusno prednapeto membransko konstrukcijo z ravnimi togimi robovi (rezultati testiranja v vetrnem tunelu (Nagai in sod., 2011))

Sneg:

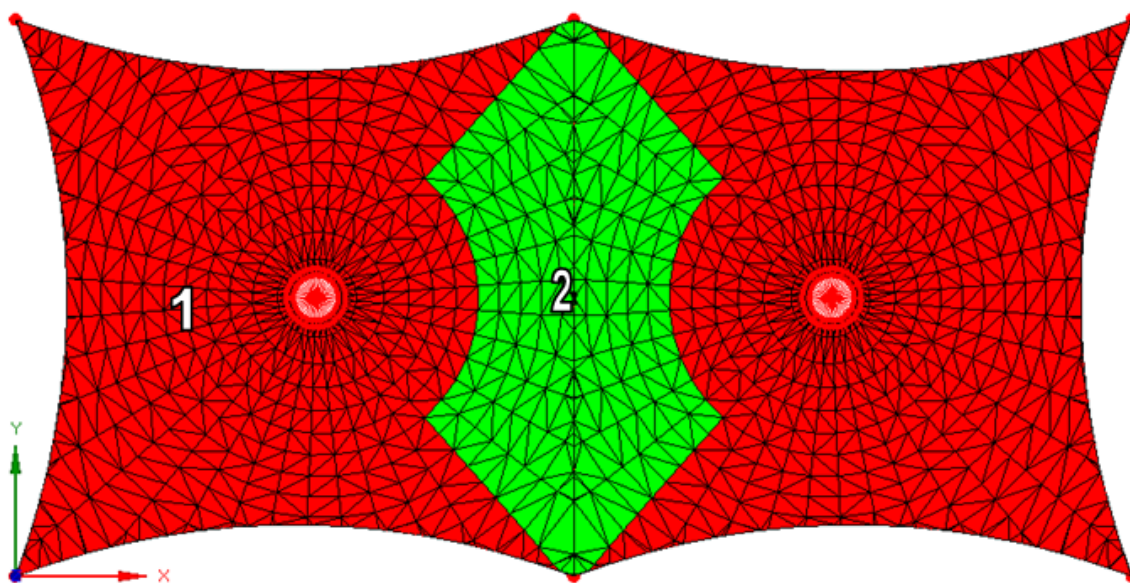
(Cona M1, nadmorska višina 50 m)

$$s = 0,289 * [1 + (50/452)^2] = 0,29 \text{ kN/m}^2$$

a) Sneg (nakopičen)

$$s_1 = \mu_1 * s = 0,8 * 0,29 \text{ kN/m}^2 = 0,23 \text{ kN/m}^2$$

$$s_2 = \mu_2 * s = 1,0 * 0,29 \text{ kN/m}^2 = 0,29 \text{ kN/m}^2$$



Slika 187: Razpored obtežbe nakopičenega snega

Veter:

(Cona 3, teren II. Kategorije, h = 5 m)

$$v = c_e(5 \text{ m}) * q_b = 1,93 * 0,563 \text{ kN/m}^2 = 1,08 \text{ kN/m}^2$$

b) Veter X

$$v_1 = c_{p1} * v = 1,0 * 1,08 \text{ kN/m}^2 = 1,08 \text{ kN/m}^2$$

$$v_2 = c_{p2} * v = 0,6 * 1,08 \text{ kN/m}^2 = 0,65 \text{ kN/m}^2$$

$$v_3 = c_{p3} * v = -1,0 * 1,08 \text{ kN/m}^2 = -1,08 \text{ kN/m}^2$$

$$v_4 = c_{p4} * v = -0,6 * 1,08 \text{ kN/m}^2 = -0,65 \text{ kN/m}^2$$

$$v_5 = c_{p5} * v = -0,4 * 1,08 \text{ kN/m}^2 = -0,43 \text{ kN/m}^2$$

c) Vetr X – srk.

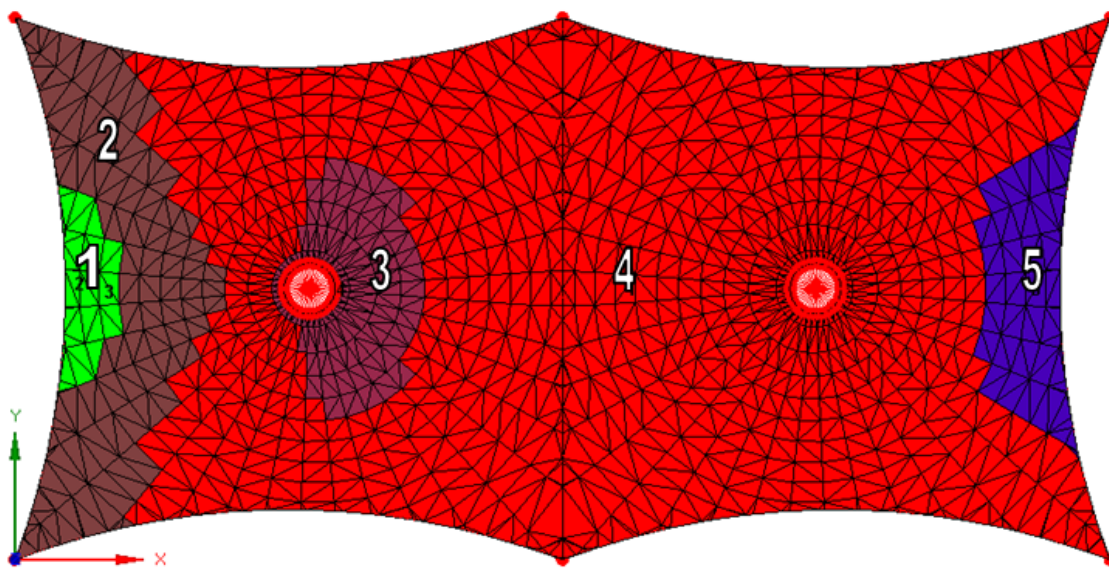
$$v_1 = c_{p1} * v = -0,4 * 1,08 \text{ kN/ m}^2 = -0,43 \text{ kN/m}^2$$

$$v_2 = c_{p2} * v = -0,4 * 1,08 \text{ kN/ m}^2 = -0,43 \text{ kN/m}^2$$

$$v_3 = c_{p3} * v = -1,0 * 1,08 \text{ kN/ m}^2 = -1,08 \text{ kN/m}^2$$

$$v_4 = c_{p4} * v = 0,6 * 1,08 \text{ kN/ m}^2 = -0,65 \text{ kN/m}^2$$

$$v_5 = c_{p5} * v = -0,4 * 1,08 \text{ kN/ m}^2 = -0,43 \text{ kN/m}^2$$



Slika 188: Razpored obtežbe vetra X in vetra X (srk)

d) Vetr Y

$$v_1 = c_{p1} * v = 1,0 * 1,08 \text{ kN/m}^2 = 1,08 \text{ kN/m}^2$$

$$v_2 = c_{p2} * v = 0,6 * 1,08 \text{ kN/m}^2 = 0,65 \text{ kN/m}^2$$

$$v_3 = c_{p3} * v = -1,0 * 1,08 \text{ kN/ m}^2 = -1,08 \text{ kN/m}^2$$

$$v_4 = c_{p4} * v = -0,6 * 1,08 \text{ kN/ m}^2 = -0,65 \text{ kN/m}^2$$

$$v_5 = c_{p5} * v = -0,4 * 1,08 \text{ kN/ m}^2 = -0,43 \text{ kN/m}^2$$

e) Vetr Y (srk)

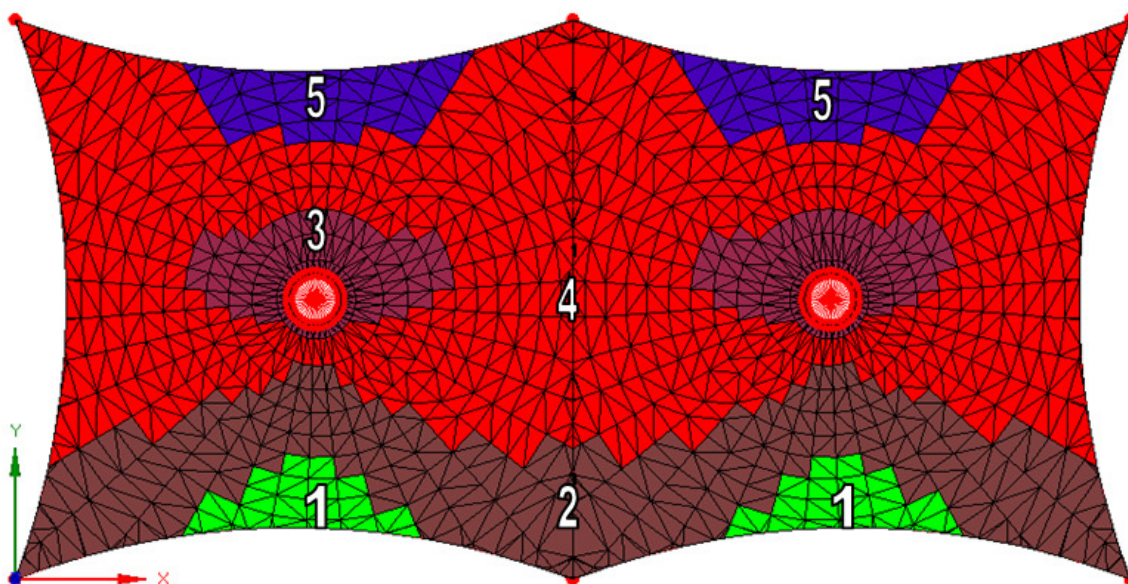
$$v_1 = c_{p1} * v = -0,4 * 1,08 \text{ kN/ m}^2 = -0,43 \text{ kN/m}^2$$

$$v_2 = c_{p2} * v = -0,4 * 1,08 \text{ kN/ m}^2 = -0,43 \text{ kN/m}^2$$

$$v_3 = c_{p3} * v = -1,0 * 1,08 \text{ kN/ m}^2 = -1,08 \text{ kN/m}^2$$

$$v_4 = c_{p4} * v = -0,6 * 1,08 \text{ kN/ m}^2 = -0,65 \text{ kN/m}^2$$

$$v_5 = c_{p5} * v = -0,4 * 1,08 \text{ kN/ m}^2 = -0,43 \text{ kN/m}^2$$



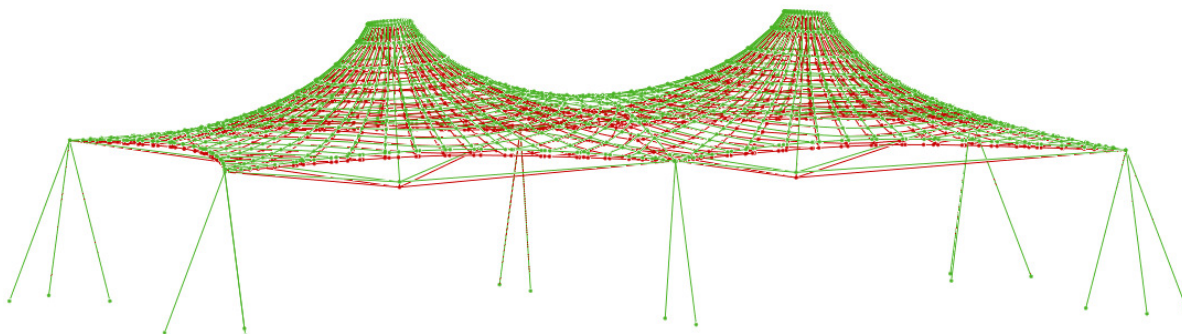
Slika 189: Razpored obtežbe vetra Y in vetra Y (srk)

Obtežne kombinacije:

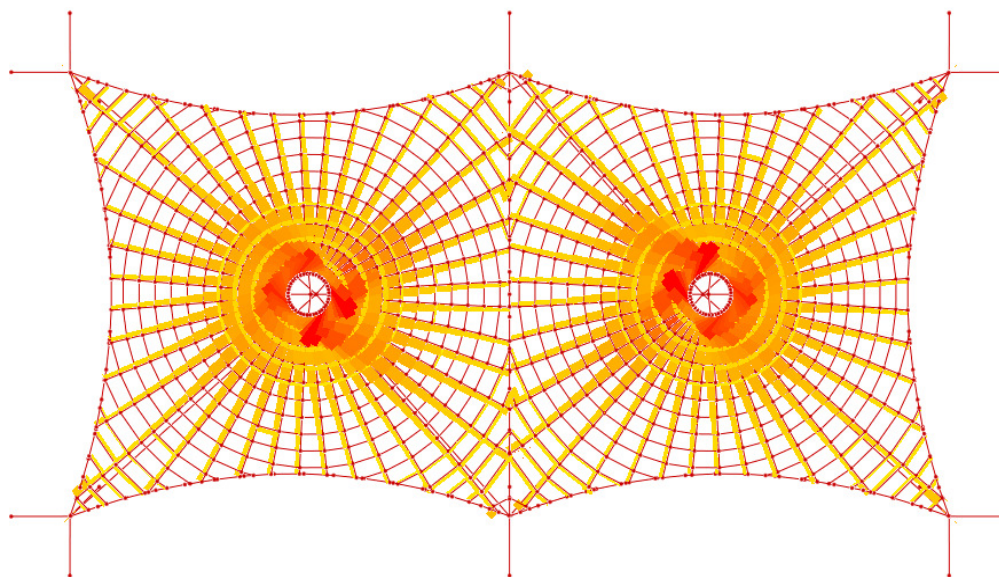
- 1) Lastna teža + prednapetje + sneg(nakopičen)
- 2) Lastna teža + prednapetje + veter X
- 3) Lastna teža + prednapetje + veter X (srk)
- 4) Lastna teža + prednapetje + sneg + $0,6 * \text{veter X}$
- 5) Lastna teža + prednapetje + veter Y
- 6) Lastna teža + prednapetje + veter Y (srk)
- 7) Lastna teža + prednapetje + sneg + $0,6 * \text{veter Y}$

Rezultati analize

1) Lastna teža + prednapetje + sneg (nakopičen)



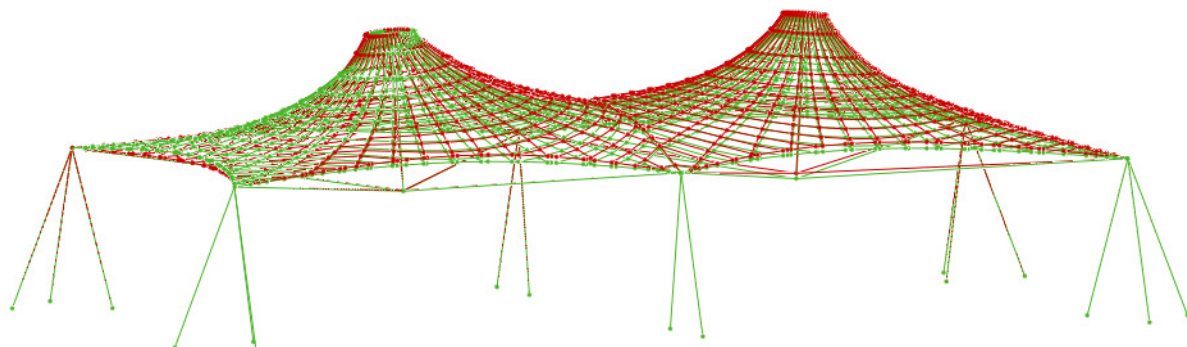
Slika 190: Primerjava začetne oblike in deformirane oblike zaradi obtežbe nakopičenega snega (zeleno – začetna oblika, rdeče – deformirana oblika)



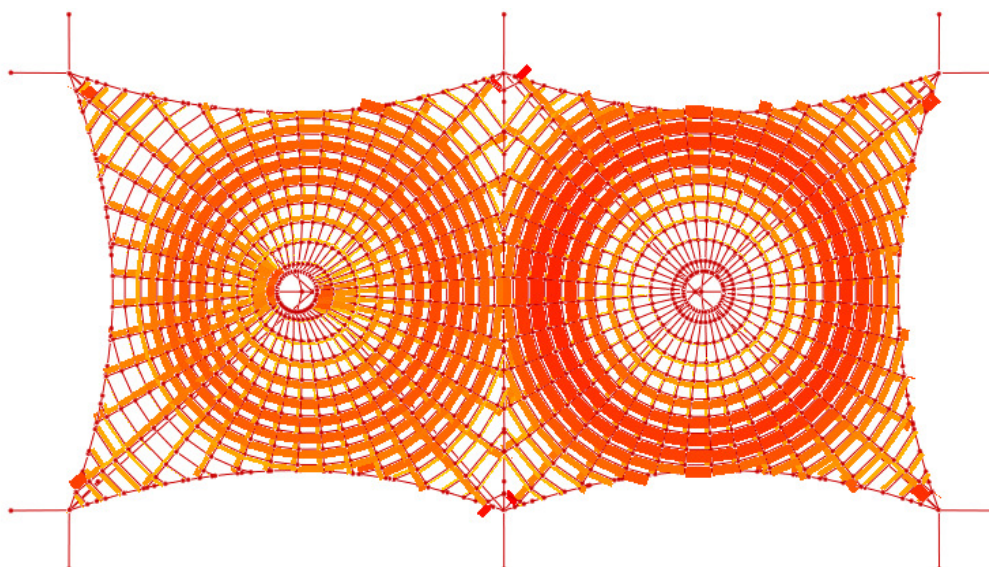
Slika 191: Potek napetosti v membrani zaradi obtežbe nakopičenega snega (napetosti gredo od manjših proti večjim po naslednjem barvnem zaporedju: rumena – oranžna – rdeča)

V nižjih položnejših delih membrane radialne napetosti ostanejo na približno enakih nivojih kot pri prednapetju (pribl. 3 kN/m), medtem ko tangencialna smer izgubi napetost. V strmejših predelih v bližini notranjega obroča se tangencialna napetost rahlo poveča na pribl. 3 kN/m, vendar močno prevladuje radialna smer, kjer se napetosti proti vrhu naglo povečajo na visoke ravni (pribl. 10 kN/m – 17 kN/m). V ogliščih, kjer sta robna kabla blizu, se tangencialne napetosti ohranijo. Lebdeči jambor se premakne navzdol za 17 cm, pomik na sredini robnih fleksibilnih kablov je pribl. 15 cm – 20 cm navzdol. Membrana se ob obtežbi snega najbolj premakne v položnem spodnjem delu, in sicer do 61 cm.

2) Lastna teža + prednapetje + veter X



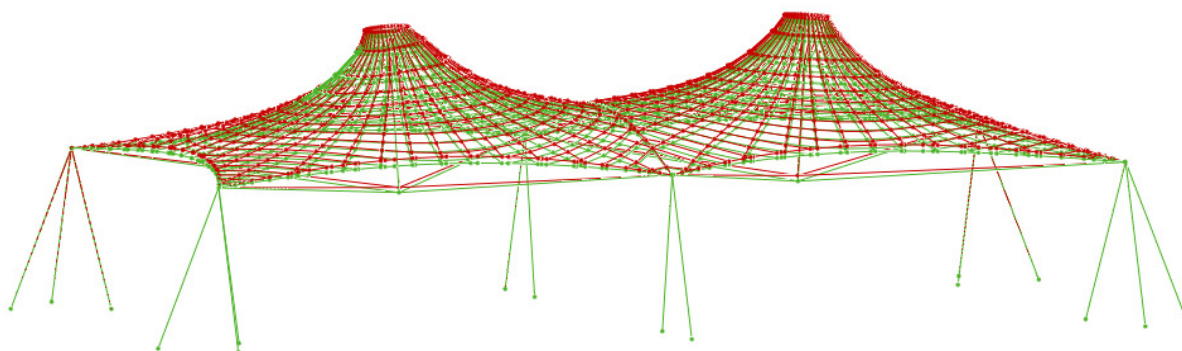
Slika 192: Primerjava začetne oblike in deformirane oblike zaradi obtežbe vetra X (zeleno – začetna oblika, rdeče – deformirana oblika)



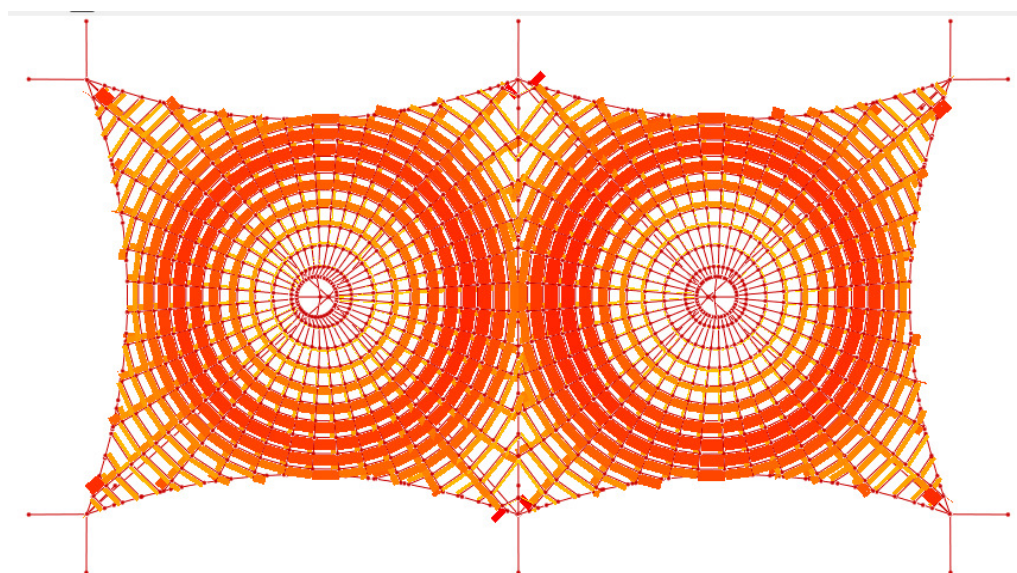
Slika 193: Potek napetosti v membrani zaradi obtežbe vetra X (napetosti gredo od manjših proti večjim po naslednjem barvnem zaporedju: rumena – oranžna – rdeča)

V položnejših predelih membrane prevladujejo tangencialne napetosti. V privetnem stožcu dosežejo vrednosti do 10 kN/m, v drugem, kjer smo predpostavili le srk, pa celo do 13 kN/m. V tem delu radialne napetosti dosežajo vrednosti 5 kN/m – 6 kN/m. V višjih notranjih delih se tangencialne napetosti postopoma zmanjšujejo, medtem ko radialne postopoma celo izginejo, razen v vrhu privetnega stožca, kjer zaradi tlaka vetra radialne napetosti dosežejo vrednosti do 12,6 kN/m. Največji pomik membrane je 50 cm, in sicer na privetni tlačni strani, medtem ko na nasprotni strani zaznamo dvig membrane za pribl. 30 cm. Pri drugem stožcu so dvigi manjši. Spodnji rob membrane se na privetni strani spusti za 25 cm, medtem ko se ostali robovi dvignejo do 20 cm. Lebdeči jambor v prvem stožcu se zaradi vpliva vetra vidno nagne proti vetru, premik spodnjega dela pa je zanemarljiv, kar pa ne velja za drugi lebdeči jambor, ki se dvigne za 17 cm.

3) Lastna teža + prednapetje + veter X (srk)



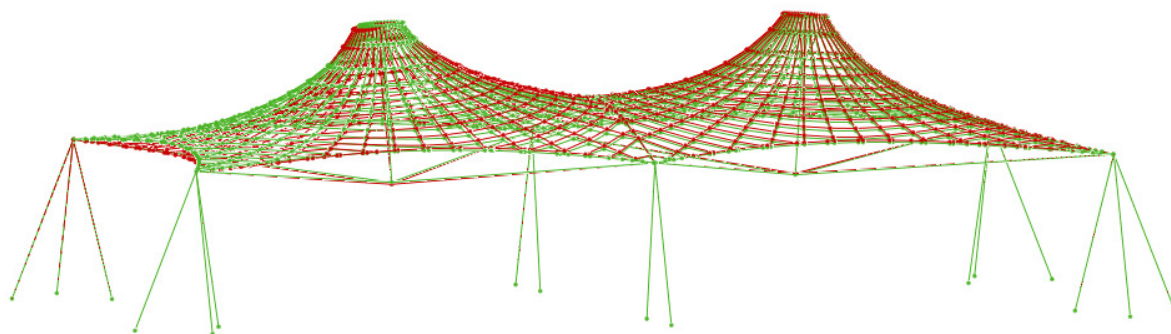
Slika 194: Primerjava začetne oblike in deformirane oblike zaradi obtežbe vetra X (srk) (zeleno – začetna oblika, rdeče – deformirana oblika)



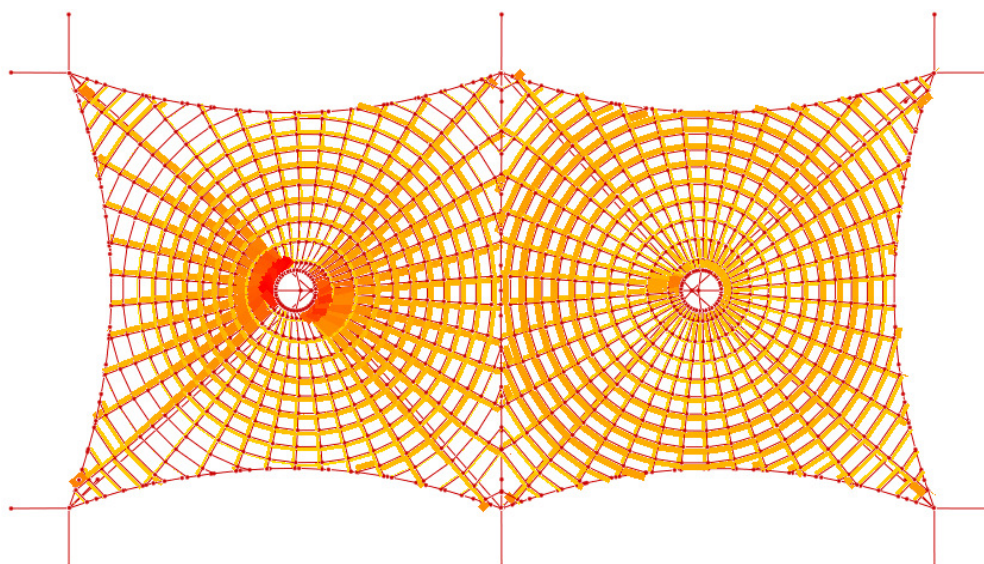
Slika 195: Potek napetosti v membrani zaradi obtežbe vetra X (srk) (napetosti gredo od manjših proti večjim po naslednjem barvnem zaporedju: rumena – oranžna – rdeča)

V sredini položnejšega dela membrane so tangencialne napetosti največje, tudi do 12 kN/m, nato pa se proti robu in predvsem proti notranjemu vrhu zmanjšujejo. Radialne napetosti so največje ob zunanjem robu (7 kN/m), nato se vse do notranjega obroča postopno zmanjšujejo, dokler se povsem na vrhu nateg ne izniči. Natezne sile v obešenih kablkih, ki podpirajo lebdeči jambor, se ob dvigu jambora znižajo na 5 kN – 7 kN. Oba jambora se ob predvideni obtežbi vetra dvigneta za 17 cm, robovi membrane pa tudi do 20 cm. Celotna membrana se dvigne, največ ob straneh prvega stožca, kjer smo tudi predpostavili največji srk.

4) Lastna teža + prednapetje + sneg + 0,6 * veter X



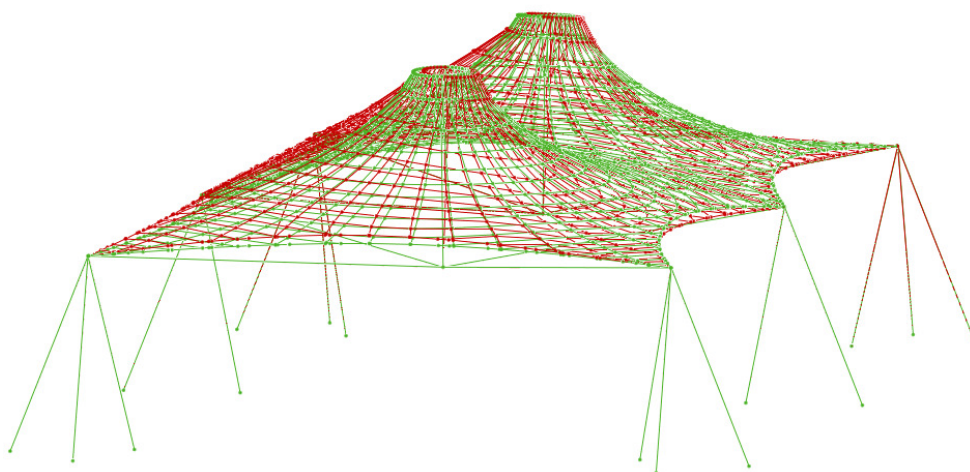
Slika 196: Primerjava začetne oblike in deformirane oblike zaradi kombinacije obtežbe snega in vetra X (zeleno – začetna oblika, rdeče – deformirana oblika)



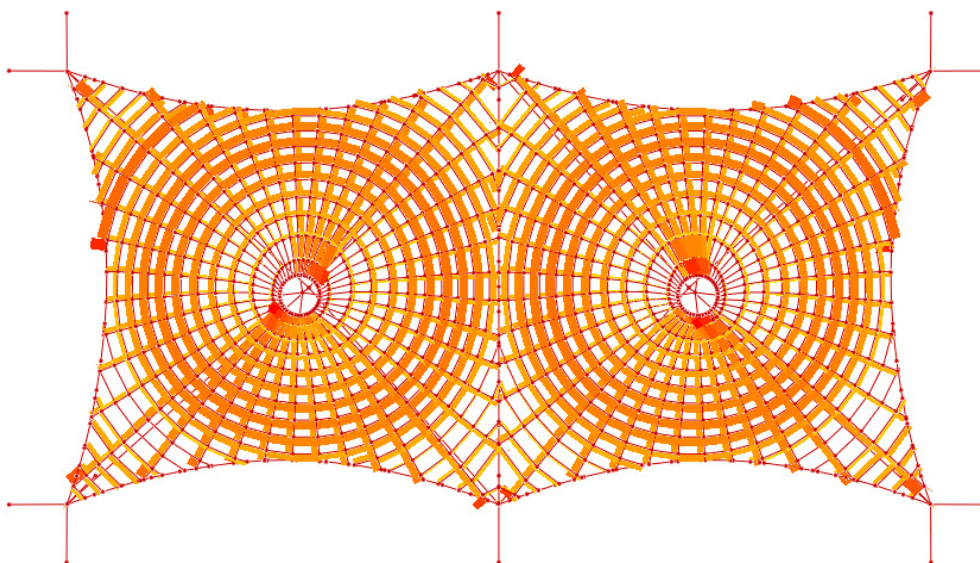
Slika 197: Potek napetosti v membrani zaradi kombinacije obtežbe snega in vetra X (napetosti gredo od manjših proti večjim po naslednjem barvnem zaporedju: rumena – oranžna – rdeča)

Potek radialnih napetosti v privetnem stožcu se zelo razlikuje med privetno in zavetrno stranjo, ter stranskim območjem. Ob straneh od robov proti vrhu napetosti padajo od 3kN/m pa vse do nenapetega vrha, medtem ko na sprednji in zadnji strani napetost od roba (4 kN/m) narašča. Na sredini vzpona je 7 kN/m, potem pa naglo naraste do 16 kN/m od notranjem obroču. Tangencialne napetosti znašajo 3 kN/m ob obroču, 4,5 kN/m v srednjem območju, nato pa se zmanjšujejo proti robu. Na nekaterih območjih celo do nenapetega stanja. Ob ogliščih se ponovno pojavijo večje tangencialne napetosti, saj je ta del bolj tog. Na drugem stožcu je porazdelitev bolj enakomerna. Radialne napetosti so po celotni površini približno konstantne (4 kN/m), tangencialne pa od robnih 5 kN/m proti vrhu padejo na 2 kN/m. Največji pomik membrane je na privetni tlačni strani, v spodnjem položnejšem delu, in sicer znaša 59 cm. Drugje imamo dvige, ki so precej manjši. Na privetni strani se rob poleže za 35 cm, ostali robovi pa malo dvignejo za približno 5 cm.

5) Lastna teža + prednapetje + veter Y



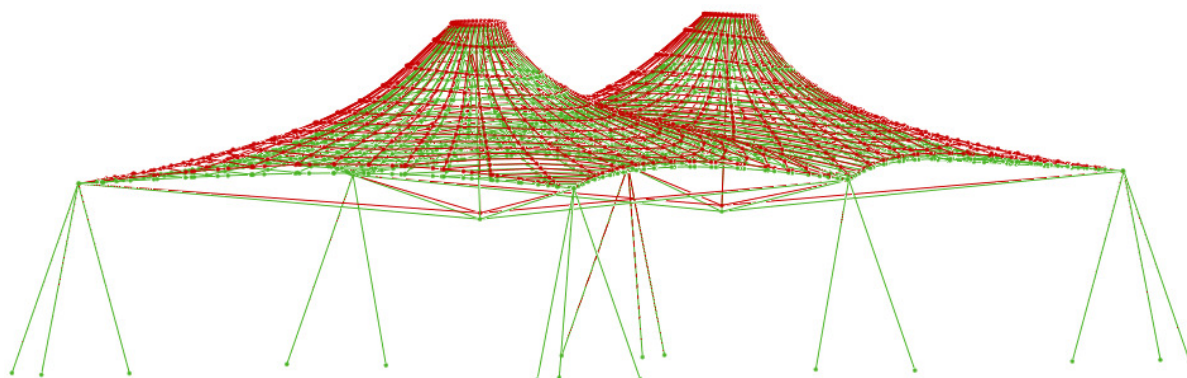
Slika 198: Primerjava začetne oblike in deformirane oblike zaradi obtežbe vetra Y (zeleno – začetna oblika, rdeče – deformirana oblika)



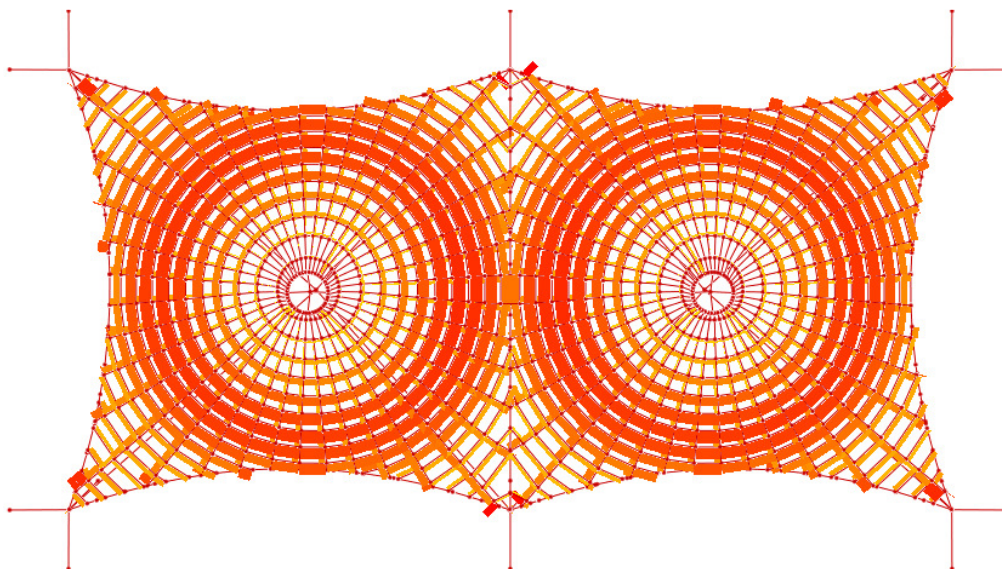
Slika 199: Potek napetosti v membrani zaradi obtežbe vetra Y (napetosti gredo od manjših proti večjim po naslednjem barvnem zaporedju: rumena – oranžna – rdeča)

Na vetrni in zavetrni strani radialna napetost od roba proti vrhu raste iz približno 7 kN/m do 16,6 kN/m, na bočnih straneh pa pada iz 5 kN/m pa vse do napetosti nič. Največje tangencialne natezne napetosti se pojavijo v sredinskem delu, nato pa proti vrhu in robu padajo na 2 kN/m oziroma vse do izničitve natega. V ognjiščnih delih membrane je tangencialni nateg, zaradi vpliva bližnjih robnih kablov, ponovno prisoten. Največji pomik je 59 cm, in je pričakovano na položnejšem delu privetrne strani membrane. Na zavetrni strani se pojavijo dvigi do 45 cm. Spust lebdečih jamborov za 5 cm ni izrazit, kar pa ne velja za nagib proti vetru. Privetrni rob se spusti za 30 cm, ostali robovi pa dvignejo za 20 cm – 25 cm.

6) Lastna teža + prednapetje + veter Y-srk



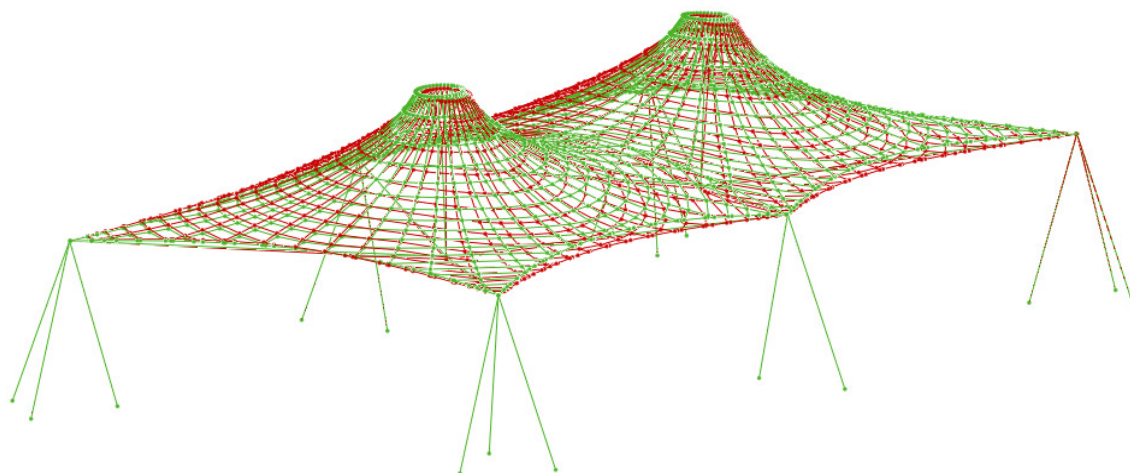
Slika 200: Primerjava začetne oblike in deformirane oblike zaradi obtežbe vetra Y (srk) (zeleno – začetna oblika, rdeče – deformirana oblika)



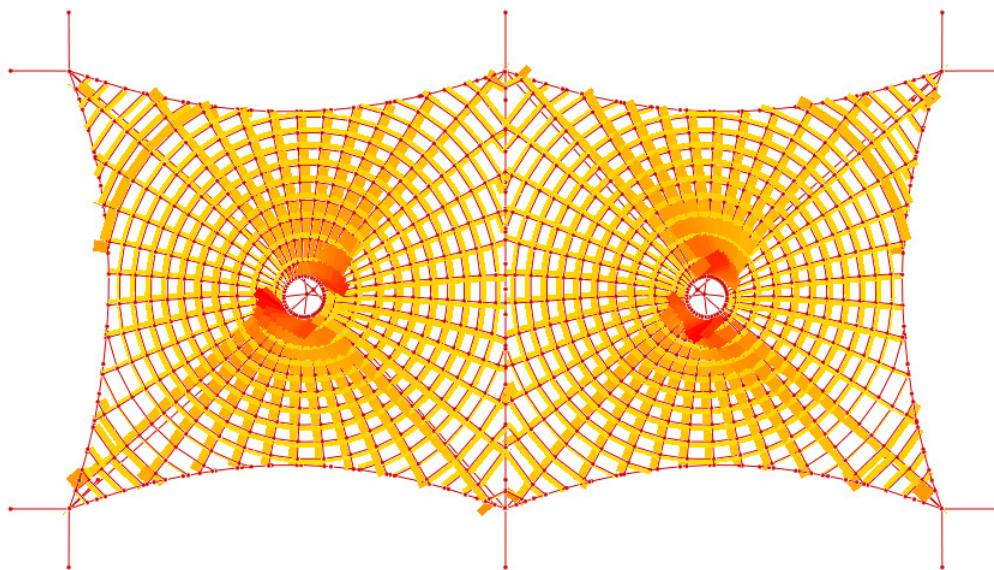
Slika 201: Potek napetosti v membrani zaradi obtežbe vetra Y (srk) (napetosti gredo od manjših proti večjim po naslednjem barvnem zaporedju: rumena – oranžna – rdeča)

Prevladujejo tangencialne napetosti, ki v srednjem območju dosežejo tudi 12 kN/m, nato pa se proti vrhu postopoma zmanjšujejo do 1,6 kN/m, proti robovom pa do 4 kN/m. Radialne napetosti padajo od roba (7 kN/m) proti vrhu. V območju ob notranjem obroču izgubimo vso prednapetje. Obešeni kabli ostanejo še vedno v nategu, in sicer obdržijo približno 8 kN. Lebdeči jambori se ob nastopu obtežbe vetra pomaknejo navzgor za 16 cm, robovi membrane pa za približno 20 cm. Največ pomik membrane je 35 cm. Gre za dvig na zavetrni strani, medtem ko je na sprednji strani dvig približno 16 cm.

7) Lastna teža + prednapetje + sneg + 0,6 * veter Y



Slika 202: Primerjava začetne oblike in deformirane oblike zaradi kombinacije obtežbe snega in vetra Y (zeleno – začetna oblika, rdeče – deformirana oblika)



Slika 203: Potek napetosti v membrani zaradi kombinacije obtežbe snega in vetra Y (napetosti gredo od manjših proti večjim po naslednjem barvnem zaporedju: rumena – oranžna – rdeča)

Do največje natezne napetosti v membrani (19,8 kN/m) pride na privetrni strani, tik ob notranjem obroču, ob skupnem delovanju snega in vetra Y. Proti robovom se vrednost naglo zniža, na sredini znaša okoli 5 kN/m, ob robu pa 4 kN/m. Na, glede na smer vetra, bočnih straneh je radialna napetost vseskozi približno konstantna (3 kN/m). Napetosti v tangencialni smeri so v večini membrane 3 kN/m, razen v bližini robov so nižje. Do največjega pomika tudi tu pride na položnem delu privetrne strani. Ta znaša 65 cm navzdol, medtem ko na nasprotni strani dobimo dvige do 24 cm. Privetrni robovi se spustijo za 40 cm, vsi ostali robovi pa dvignejo za približno 13 cm. Lebdeča jambora se ob nastopu obtežbe spustita za 9 cm.

Tabela kritičnih rezultatov osno obremenjenih elementov:

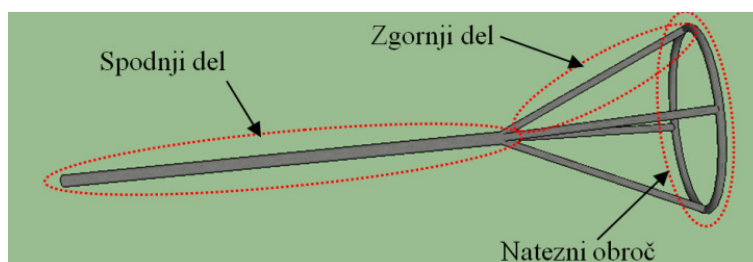
Preglednica 8: Kritični rezultati statične analize po posameznih osno obremenjenih elementih in maks. pomik (p = prednapetje, s_{nak} = sneg (nakopičen), v_x = veter X, $v_{x,srk}$ = veter X (srk), v_y = veter Y, $v_{y,srk}$ = veter Y (srk))

Element \ Obt. komb.	p	s_{nak}	v_x	$v_{x,srk}$	$s+0,6v_x$	v_y	$v_{y,srk}$	$s+0,6v_y$
Membrana [kN/m]	6,4	17,6	12,6	12,7*	16	16,6	11,9*	19,8
Robni kabli membrane [kN]	51	38	125	124	78	124	126	78
Stab. kabli v ogliščih [kN]	165	185	226	227	199	261	228	225
Stab. kabla ob straneh [kN]	285	398	315	272	316	368	274	374
Obešeni kabli [kN]	82	133	46	7	89	54	9	99
Vmesni kabel [kN]	1,4	2,9	52	47	18,3	37	47	8
Jambori v ogliščih [kN]	305	407	436	406	371	454	404	389
Jambora ob straneh [kN]	277	348	248	202	294	346	211	377
Max. pomik [cm]	1,4	61	50	33	59	59	35	64

* kritične vrednosti so v krožni smeri oz. pravokotno na smer krojev

Iz zgornje tabele lahko razberemo, da veter Y predstavlja za obravnavano konstrukcijo precej bolj kritično obtežbo kot veter X. Na obešene kable najbolj kritično vpliva obtežba snega, medtem ko obtežba vetra močno zmanjša silo v njih, sploh srk. Obratno velja za robne kabli in vmesni kabel, kjer obtežba vetra močno poveča sile v njih, sneg pa jih zmanjša. Na stabilizacijske kabli in posledično na jambore najbolj kritično delujeta sneg in veter v tlaku, veter v srku pa na njih ugodno deluje, saj zmanjša sile. Podobno velja, da pritisk snega in vetra povečujeta radialne napetosti, na tangencialne napetosti pa najbolj vpliva srk vetra. Največje pomike, pričakovano, povzroči vpliv snega, če tu dodamo še vpliv vetrnega tlaka se ta še dodatno poveča.

Tabele kritičnih rezultatov elementov visečega jambora:



Slika 204: Razdelitev lebdečega jambora

a) Spodnji del (glavni element)

Preglednica 9: Kritične notranje količine v spodnjem delu lebdečega jambora ob različnih obt. kombinacijah

Obt. komb. \ Not.kol.	N [kN]	V_y [kN]	V_z [kN]	M_y [kNm]	M_z [kNm]	M_t [kNm]
s_{nak}	54,8	0	0,3	1,03	0	0
v_x	15	0	0,51	1,73	0	0
$s+0,6v_x$	33,6	0	0,57	1,93	0	0
v_y	18,14	0,8	0	0,07	2,82	0
$s+0,6v_y$	38	0,9	0,1	0,3	3,2	0

b) Zgornji del (štiri razvejani elementi)

Preglednica 10: Kritične notranje količine v zgornjem delu lebdečega jambora ob različnih obt. kombinacijah

Obt. komb. \ Not.kol.	N [kN]	V_y [kN]	V_z [kN]	M_y [kNm]	M_z [kNm]	M_t [kNm]
s_{nak}	16,6	0	0,33	0,34	0	0
v_x	8,7	0	0,46	0,51	0	0
$s+0,6v_x$	10	0	0,4	0,47	0	0
	14,4	0	0,48	0,24	0	0
v_y	11,4	0,2	0,7	0,8	0,15	0
$s+0,6v_y$	17,1	0,23	0,82	0,92	0,23	0

c) Natezni obroč

Preglednica 11: Kritične notranje količine v nateznem obroču lebdečega jambora ob različnih obt. kombinacijah

Obt. komb. \ Not.kol.	N (nateg) [kN]	V_y [kN]	V_z [kN]	M_y [kNm]	M_z [kNm]	M_t [kNm]
s_{nak}	8,5	3	7,7	1,53	0,92	0,08
	10,6	1,1	2,2	0,67	0,67	0,21
v_x	1,7	2,1	3,8	0,36	1,33	0,1
$s+0,6v_x$	4,1	3,6	6,3	0,32	1,82	0,3
	8,3	1,2	3,1	1,15	1,05	0,05
	8,7	1,1	2,4	0,54	1,23	0,33
v_y	2,26	1,3	6,2	0,9	1,45	0
$s+0,6v_y$	5,2	4,5	6,9	1,31	1,81	0,3
	5,1	2,8	8,4	1,41	1,84	0,1

V primeru lebdečega jambora se izkaže, da je najbolj kritična obtežba sneg v kombinaciji z vetrom Y. V nateznem obroču se poleg natega, upogiba in striga pojavi tudi torzija, vendar ta nima večjega vpliva.

9.3.4 Dimenzioniranje

a) Membrana

$$\sigma_{Ed} = 19,8 \text{ kN/m}$$

$$\sigma_{Rd} = 23,3 \text{ kN/m (osnovna smer)}$$

$$19,8 \text{ kN/m} < 23,3 \text{ kN/m} \quad \checkmark$$

Zvar

$$\sigma_{Ed} = 12,7 \text{ kN/m}$$

$$\sigma_{Rd} = 0,8 * 20 \text{ kN/m (votkovna smer)} = 16 \text{ kN/m}$$

$$12,7 \text{ kN/m} < 16 \text{ kN/m} \quad \checkmark$$

b) Jambori

Jambori v ogliščih

$$F_{Ed} = 454 \text{ kN} * 1,5 = 681 \text{ kN}$$

Izberem cevni profil 177,8/10 (S 235)

$$A = 52,72 \text{ cm}^2$$

$$i = 5,943 \text{ cm}$$

$$l_u = 520 \text{ cm}$$

$$\lambda = 520 \text{ cm} / (5,943 \text{ cm} * 93,9 * 1,0) = 0,93$$

$$\chi = 0,58 \text{ (uklonska krivulja c)}$$

$$F_{Rd} = 0,58 * 52,72 \text{ cm}^2 * 23,5 \text{ kN/cm}^2 = 718 \text{ kN}$$

$$681 \text{ kN} < 718 \text{ kN} \quad \checkmark$$

Jambora ob straneh

$$F_{Ed} = 377 \text{ kN} * 1,5 = 566 \text{ kN}$$

Izberem cevni profil 177,8/10 (S 235)

$$A = 52,72 \text{ cm}^2$$

$$i = 5,943 \text{ cm}$$

$$l_u = 520 \text{ cm}$$

$$\lambda = 520 \text{ cm} / (5,943 \text{ cm} * 93,9 * 1,0) = 0,93$$

$$\chi = 0,58 \text{ (uklonska krivulja c)}$$

$$F_{Rd} = 0,58 * 52,72 \text{ cm}^2 * 23,5 \text{ kN/cm}^2 = 718 \text{ kN}$$

$$566 \text{ kN} < 718 \text{ kN} \checkmark$$

Lebdeči jambor

Spodnji del:

Izberem cevni profil 101,6/4 (S 235)

Kompaktnost prereza:

$$d / t = 101,6 \text{ mm} / 4 \text{ mm} = 25,4 \leq 50 \quad 1.R.K.$$

Strižna nosilnost prereza:

$$V_{pl,Rd} = A_v * f_y / (\gamma_{M0} * \sqrt{3}) = 0,64 * 12,26 \text{ cm}^2 * 23,5 \text{ cm}^2 / \sqrt{3} = 106 \text{ kN}$$

$$A = 12,26 \text{ cm}^2$$

$$i = 3,454 \text{ cm}$$

$$l_u \approx 0,8 * 350 \text{ cm} = 280 \text{ cm}$$

$$\lambda = 280 \text{ cm} / (3,454 \text{ cm} * 93,9 * 1,0) = 0,86$$

$$\chi = 0,63 \text{ (uklonska krivulja c)}$$

Obt. komb. \ Not.kol.	N_{Ed} [kN]	V_{Edy} [kN]	V_{Edz} [kN]	M_{Edy} [kNm]	M_{Edz} [kNm]	M_{Edt} [kNm]
S_{nak}	82,2	0	0,45	1,54	0	0

$$V_{Ed} = 0,45 \text{ kN} \leq 0,5 * 106 \text{ kN}$$

Vpliva prečnih sil ne upoštevamo.

$$C_{my} = 0,6$$

$$k_{yy} = 0,6 * (1 + (0,86 - 0,2) * (82,2 \text{ kN} / (0,63 * 12,26 \text{ cm}^2 * 23,5 \text{ kN/cm}^2 / 1,0))) = 0,78$$

Interakcijska enačba:

$$\frac{82,2 \text{ kN}}{0,63 * 12,26 \text{ cm}^2 * \frac{23,5 \text{ kN/cm}^2}{1,0}} + 0,78 * \frac{154,5 \text{ kNm}}{28,8 \text{ cm}^3 * \frac{23,5 \text{ kN/cm}^2}{1,0}} = 0,63 < 1 \checkmark$$

Obt. komb. \ Not.kol.	N_{Ed} [kN]	V_{Edy} [kN]	V_{Edz} [kN]	M_{Edy} [kNm]	M_{Edz} [kNm]	M_{Edt} [kNm]
s+0,6v _y	57	1,35	0,15	0,45	4,8	0

$$V_{Ed} \approx \sqrt{(1,35 \text{ kN}^2 + 0,15 \text{ kN}^2)} = 1,36 \text{ kN} \leq 0,5 * 106 \text{ kN}$$

Vpliva prečnih sil ne upoštevamo.

$$C_{my} = C_{mz} = 0,6$$

$$k_{yy} = k_{zz} = 0,6 * (1 + (0,86 - 0,2) * (57 \text{ kN} / (0,63 * 12,26 \text{ cm}^2 * 23,5 \text{ kN/cm}^2 / 1,0))) = 0,72$$

$$k_{yz} = k_{zy} = 0,6 * 0,72 = 0,43$$

Interakcijska enačba:

$$\frac{57 \text{ kN}}{0,63 * 12,26 \text{ cm}^2 * \frac{23,5 \text{ kN}}{1,0} \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^2}} + 0,72 * \frac{480 \text{ kNcm}}{28,8 \text{ cm}^3 * \frac{23,5 \text{ kN}}{1,0} \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^2}} + 0,43 * \frac{45 \text{ kNcm}}{28,8 \text{ cm}^3 * \frac{23,5 \text{ kN}}{1,0} \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^2}} =$$

$$= 0,63 < 1 \checkmark$$

Zgornji del:

Izberem cevni profil 63,5/4 (S 235)

Kompaktnost prereza:

$$d/t = 63,5 \text{ mm} / 4 \text{ mm} = 15,9 \leq 50 \quad \text{1.R.K.}$$

Strižna nosilnost prereza:

$$V_{pl,Rd} = A_v * f_y / (\gamma_{M0} * \sqrt{3}) = 0,64 * 7,477 \text{ cm}^2 * 23,5 \text{ cm}^2 / \sqrt{3} = 65 \text{ kN}$$

$$A = 7,477 \text{ cm}^2$$

$$i = 2,108 \text{ cm}$$

$$l_u \approx 0,6 * 165 \text{ cm} = 99 \text{ cm}$$

$$\lambda = 99 \text{ cm} / (2,108 \text{ cm} * 93,9 * 1,0) = 0,5$$

$$\chi = 0,84 \text{ (uklonska krivulja c)}$$

Obt. komb. \ Not.kol.	N_{Ed} [kN]	V_{Edy} [kN]	V_{Edz} [kN]	M_{Edy} [kNm]	M_{Edz} [kNm]	M_{Edt} [kNm]
s+0,6v _y	25,7	0,35	1,23	1,38	0,35	0

$$V_{Ed} \approx \sqrt{(0,35 \text{ kN}^2 + 1,23 \text{ kN}^2)} = 1,28 \text{ kN} \leq 0,5 * 106 \text{ kN}$$

Vpliva prečnih sil ne upoštevamo.

$$C_{my} = 0,77$$

$$k_{yy} = 0,77 * (1 + (0,5 - 0,2) * (25,7 \text{ kN} / (0,84 * 7,477 \text{ cm}^2 * 23,5 \text{ kN/cm}^2 / 1,0)) = 0,81$$

$$k_{yz} = 0,6 * 0,90 = 0,54$$

$$C_{mz} = 0,86$$

$$k_{zz} = 0,86 * (1 + (0,5 - 0,2) * (25,7 \text{ kN} / (0,84 * 7,477 \text{ cm}^2 * 23,5 \text{ kN/cm}^2 / 1,0)) = 0,90$$

$$k_{zy} = 0,6 * 0,81 = 0,47$$

Interakcijski enačbi:

$$\frac{25,7 \text{ kN}}{0,84 * 7,477 \text{ cm}^2 * \frac{23,5 \text{ kN/cm}^2}{1,0}} + 0,81 * \frac{138 \text{ kNcm}}{10,47 \text{ cm}^3 * \frac{23,5 \text{ kN/cm}^2}{1,0}} +$$

$$+ 0,54 * \frac{35 \text{ kNcm}}{10,47 \text{ cm}^3 * \frac{23,5 \text{ kN/cm}^2}{1,0}} = 0,71 < 1 \checkmark$$

$$\frac{25,7 \text{ kN}}{0,84 * 7,477 \text{ cm}^2 * \frac{23,5 \text{ kN/cm}^2}{1,0}} + 0,47 * \frac{138 \text{ kNcm}}{10,47 \text{ cm}^3 * \frac{23,5 \text{ kN/cm}^2}{1,0}} +$$

$$+ 0,90 * \frac{35 \text{ kNcm}}{10,47 \text{ cm}^3 * \frac{23,5 \text{ kN/cm}^2}{1,0}} = 0,57 < 1 \checkmark$$

Natezni obroč:

Izberem cevni profil 101,6/4 (S 235)

Kompaktnost prereza:

$$d / t = 101,6 \text{ mm} / 4 \text{ mm} = 25,4 \leq 50 \quad \text{1.R.K.}$$

Strižna nosilnost prereza:

$$V_{pl,Rd} = A_v * f_y / (\gamma_{M0} * \sqrt{3}) = 0,64 * 12,26 \text{ cm}^2 * 23,5 \text{ cm}^2 / \sqrt{3} = 106 \text{ kN}$$

Obt. komb. \ Not.kol.	N_{Ed} [kN] (nateg)	V_{Edy} [kN]	V_{Edz} [kN]	M_{Edy} [kNm]	M_{Edz} [kNm]	M_{Edt} [kNm]
s+0,6v _y	7,8	6,8	10,4	1,97	2,72	0,45

$$V_{Ed} \approx \sqrt{(6,8 \text{ kN}^2 + 10,4 \text{ kN}^2)} = 12,4 \text{ kN} \leq 0,5 * 106 \text{ kN}$$

Vpliva prečnih sil ne upoštevamo.

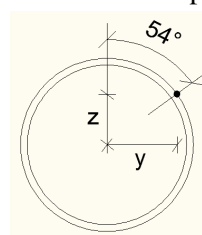
Preprosta kontrola brez upoštevanja torzije:

$$M_{pl,Rd} = W_{pl} * f_y / \gamma_{M0} = 28,8 \text{ cm}^3 * 23,5 \text{ kN/cm}^2 / 1,0 = 677 \text{ kNcm}$$

$$\left(\frac{M_{Edy}}{M_{Rdy}}\right)^2 + \left(\frac{M_{Edz}}{M_{Rdz}}\right)^2 = \left(\frac{197 \text{ kNcm}}{677 \text{ kNcm}}\right)^2 + \left(\frac{272 \text{ kNcm}}{677 \text{ kNcm}}\right)^2 = 0,25 \leq 1,0 \checkmark$$

Kontrola po Missesovem kriteriju tečenja:

(Izkaže se, da je kritična točka zaradi momentnih obremenitev prereza za 54° odklonjena od vertikale)



Slika 205: Kritična točka v cevi

$$\begin{aligned} \sigma &= M_{Edy} / I * z + M_{Edz} / I * y + N_{Ed} / A = \\ &= 197 \text{ kNcm} / 146,3 \text{ cm}^4 * 5,08 * \cos(54^\circ) \\ &+ 272 \text{ kNcm} / 146,3 \text{ cm}^4 * 5,08 * \sin(54^\circ) \\ &+ 7,8 \text{ kN} / 12,26 \text{ cm}^2 = 12,3 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

$$\tau_{EdV} \approx V_{Ed} * \sqrt{3} / (A * 0,64) = 2,74 \text{ kN/cm}^2 \text{ (maks. vrednost za cev – varna stran)}$$

$$\tau_{EdT} \approx M_{Edt} / (2 * \pi * r^2 * t) = 0,75 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau = \tau_{EdV} + \tau_{EdT} = 3,5 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = 13,7 \text{ kN/cm}^2 < 23,5 \text{ kN/cm}^2 \checkmark$$

c) Kabli

Robni kabel membrane

$$F_{Ed} = 126 \text{ kN} * 2,5 = 315 \text{ kN}$$

$$F_{Rd} = 368 \text{ kN}$$

$$315 \text{ kN} < 368 \text{ kN} \checkmark$$

Stabilizacijski kabel v oglišču

$$F_{Ed} = 261 \text{ kN} * 2,5 = 653 \text{ kN}$$

$$F_{Rd} = 713 \text{ kN}$$

$$653 \text{ kN} < 713 \text{ kN} \checkmark$$

Stabilizacijski kabel ob strani

$$F_{Ed} = 398 \text{ kN} * 2,5 = 995 \text{ kN}$$

$$F_{Rd} = 1150 \text{ kN}$$

$$995 \text{ kN} < 1150 \text{ kN} \checkmark$$

Obešeni kabel

$$F_{Ed} = 133 \text{ kN} * 2,5 = 333 \text{ kN}$$

$$F_{Rd} = 368 \text{ kN}$$

$$333 \text{ kN} < 368 \text{ kN} \checkmark$$

Vmesni kabel

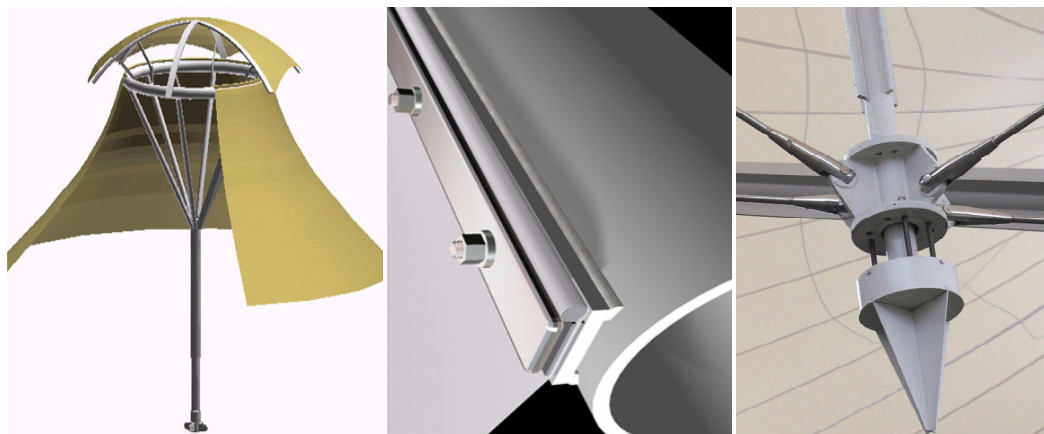
$$F_{Ed} = 52 \text{ kN} * 2,5 = 130 \text{ kN}$$

$$F_{Rd} = 172 \text{ kN}$$

$$130 \text{ kN} < 172 \text{ kN} \checkmark$$

9.3.5 Detajli

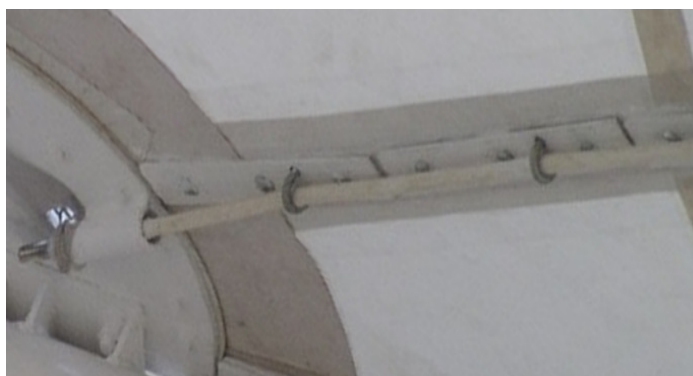
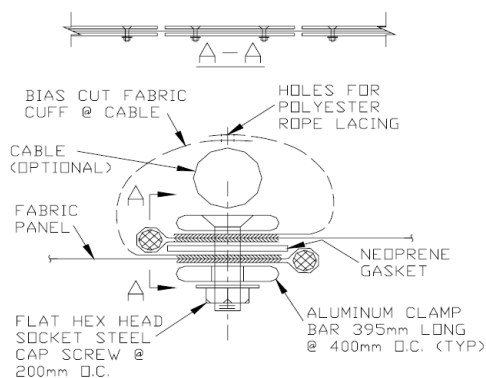
Spodnje slike prikazujejo detajle, ki so primerni za vgradnjo pri obravnavanem nadkritju.



Slika 206: Levo: Model lebdečega jambora z nateznim obročem in prekrivno kapo (Data ..., 2011); Sredina: Detajl pritrditve membrane na obroč (Design ..., 2011); Desno: Mehanski sistem za dviganje lebdečega jambora (How ..., 2011)



Slika 207: Levo: Fleksibilni robni detajl z zunanjim kablom (Design ..., 2011); Desno: Primer konstrukcije s fleksibilnim robnim detajlom (Benson, 2010)



Slika 208: Primer detajla mehanskega spoja membran z vmesnim kablom (Huntington, 2004; Membrane ..., 2012)



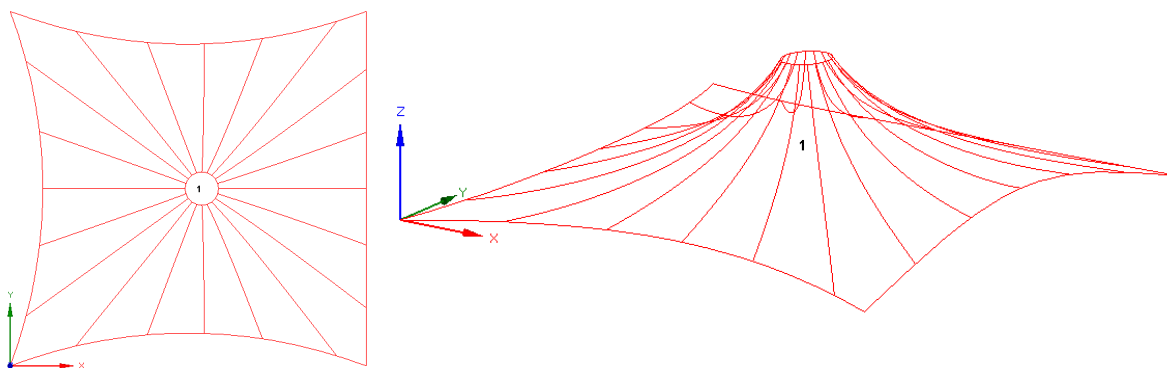
Slika 209: Možna ogliščna detajla (Data ..., 2011)



Slika 210: Možni detajli sistema za odvodnjavanje (How ..., 2010; Knowledge ..., 2011)

9.3.6 Krojenje membrane

Krojenje membrane bom naredil v posebnem modulu za krojenje vzorcev v sklopu programa Easy. Kot osnovo za krojenje vzamem površino, ki smo jo dobili v procesu iskanja oblike. Celotno površino razdelim na dva identična dela, nato pa vsakega izmed njih radialno razdelim na 20 delov, kateri bodo za izdelavo potrebovali enako širino materiala. To program samostojno opravi v nekaj iterativnih korakih, rezultat je površina, ki je z geodetskimi črtami razdeljena na 20 delov. Izbrana razdelitev enega dela membranske površine je prikazana na sliki 211.



Slika 211: Razdelitev enega polja membrane

Izkaže se, da je potrebna širina materiala za izdelavo vsakega kroja 2,36 m, kar glede na precejšnjo dolžino kroja pomeni, da bo popačenje pri projekciji majhno. Poleg tega pa moramo upoštevati tudi ekonomičnost pri porabi materiala. Željen material je dobavljiv v širini 4,7 m, kar omogoča izdelavo dveh krojev po širini materiala in s tem dober izkoristek.

Sledi projekcija vsakega od tridimenzionalnih delov na ravnino. Program s pomočjo zahtevnih algoritmov izvede to operacijo. Določim naj se kraj tvori tako, da se bo povprečna linija med robnima geodetskima črtama ujemala z osnovno smerjo tkanine. Tako omogočim, da dejanska osnovna smer končne membrane, čim bolj sledi radialnem poteku.

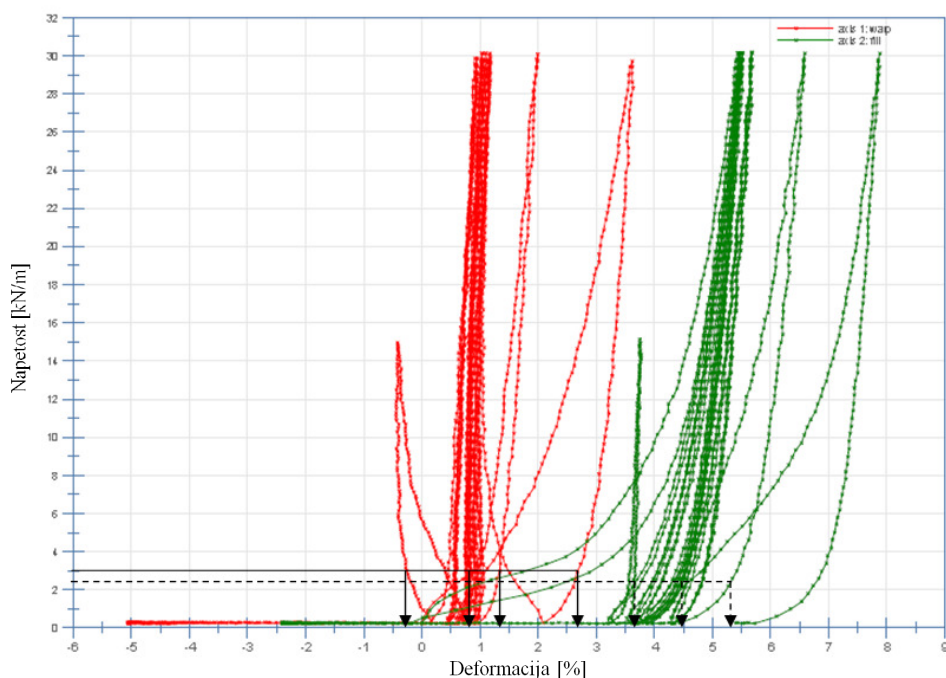
Kompensacija:

Predpostavljeno prednapetje v osnovni smeri: 3 kN/m

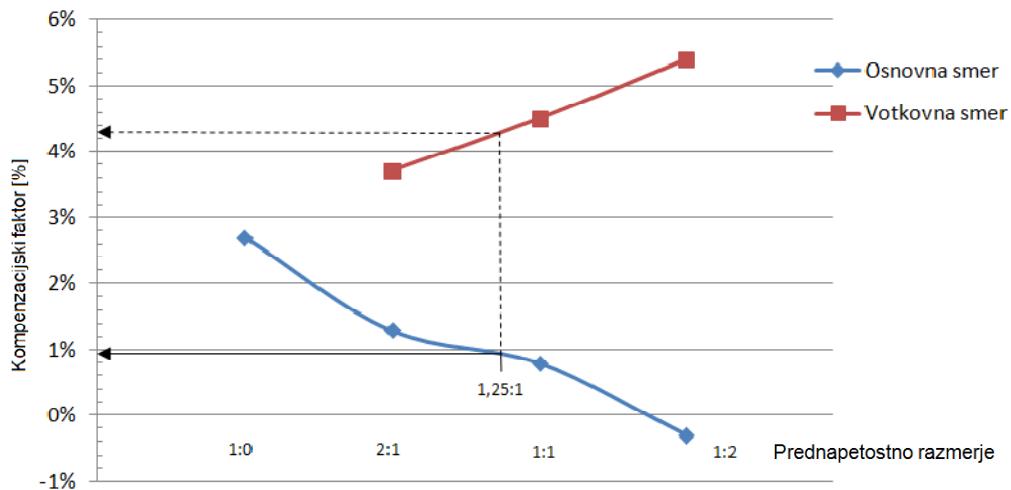
Predpostavljeno prednapetje v votkovni smeri: 2,4 kN/m

Razmerje prednapetja: $3 : 2,4 = 1,25 : 1$

Ker nimam rezultatov dvoosnega nateznega testa za konkretno konstrukcijo, bom kompensacijske vrednosti poiskal iz podatkov proizvajalca za standardna prednapetostna razmerja (slika 212) in iz teh z aproksimacijo predpostavil vrednosti za predvideno prednapetostno razmerje (slika 213). Kompenzirani kroji enega dela nadkritja so prikazani na sliki 214, primer načrta za izdelavo enega izmed krojev pa na sliki 215.



Slika 212: Obnašanje preizkušanca B18089 - določitev kompensacijskih faktorjev za različna napetostna razmerja (rdeča – osnova, zelena – votek)

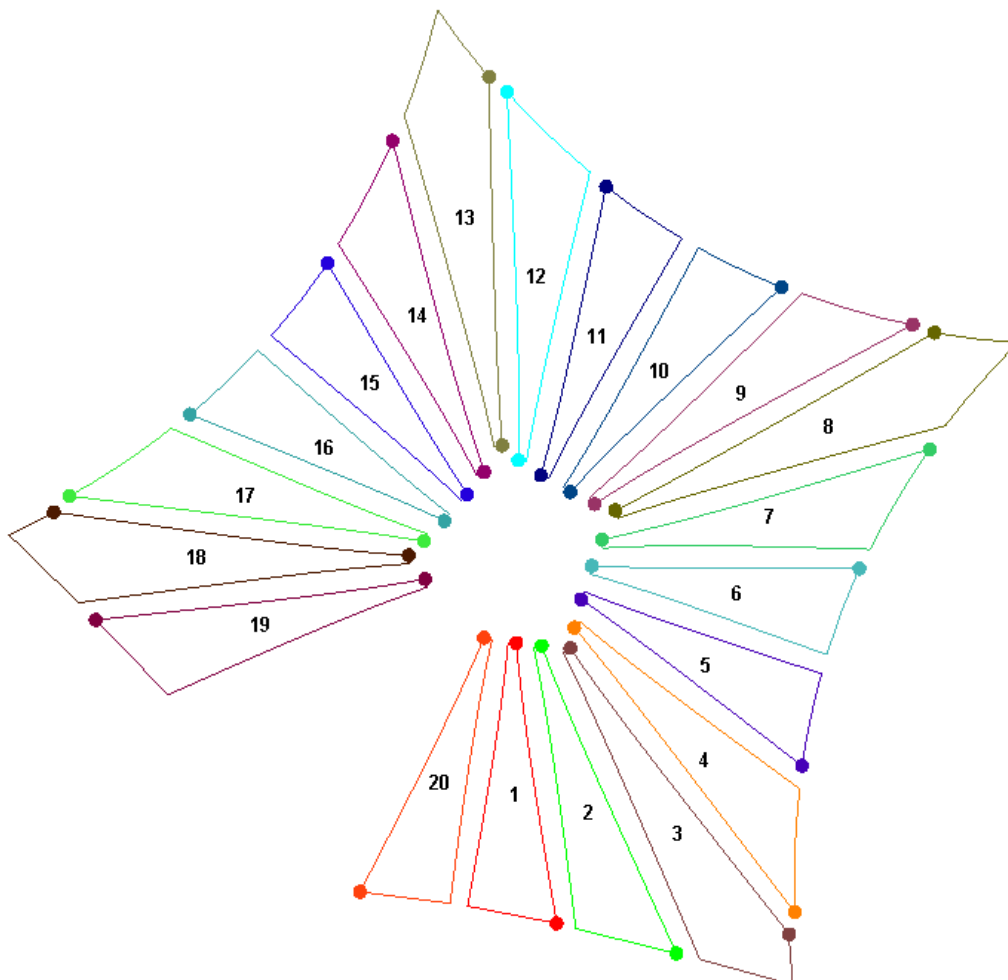


Slika 213: Aproximacija kompensacijskih faktorjev za predvideno napetostno razmerje

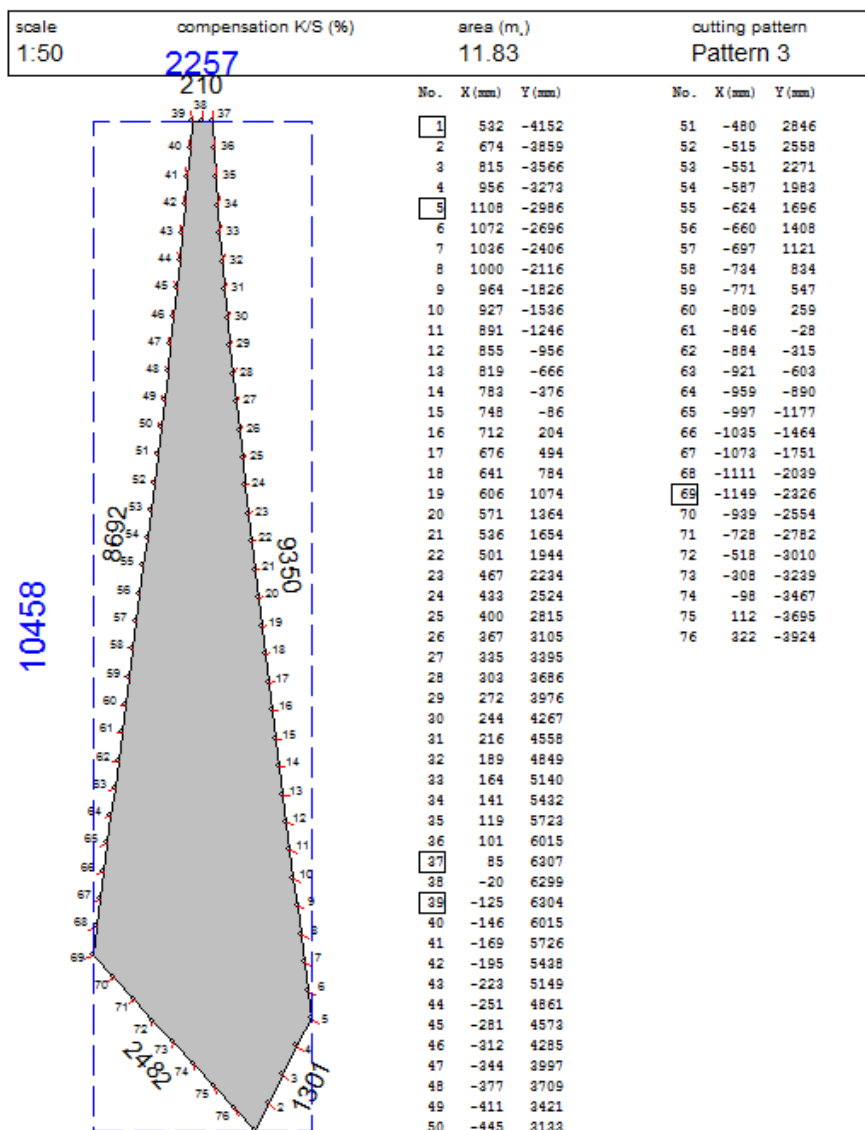
Vrednosti kompenciacije:

Osnovna smer: 1%

Votkovna smer: 4,3%



Slika 214: Kroji enega dela membrane za nadkritje tržnice



Slika 215: Primer načrta za izdelavo enega polja membrane za nadkritje tržnice

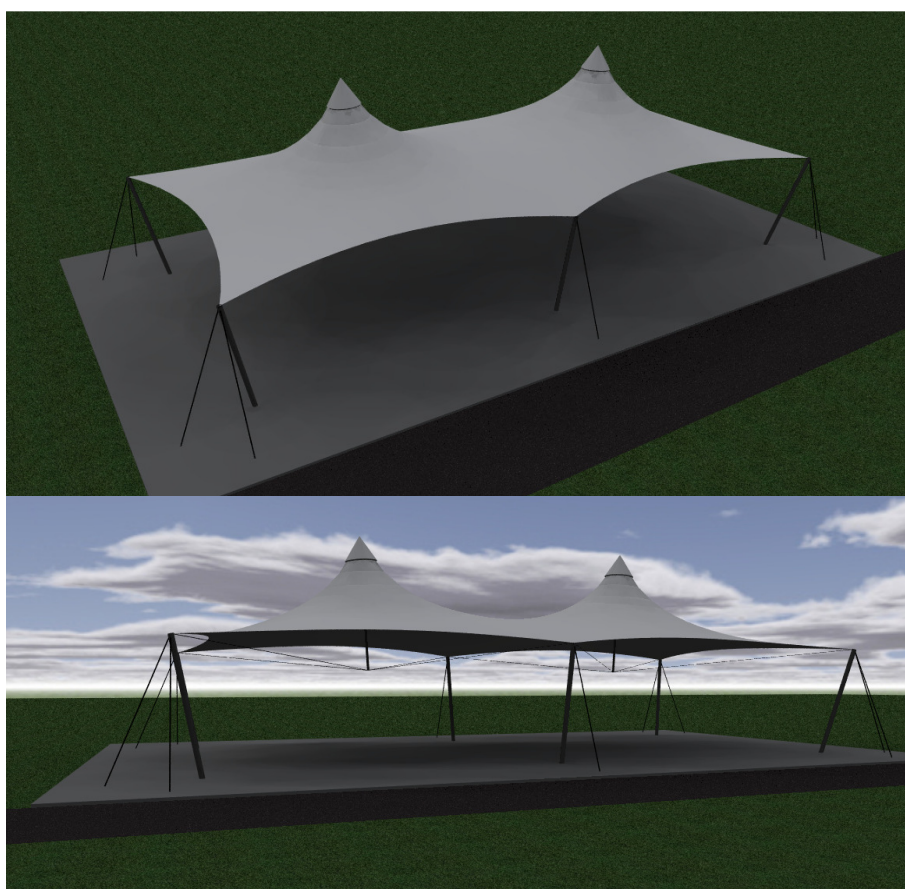
9.3.7 Postavitev

Membrano izdelamo v dveh delih (vsako polje zase), ki ju nato na gradbišču združimo z mehanskih spojem. Na gradbišču membrano položimo na zaščitena tla, ter jo na robovih spojimo na robne kable in kotne spojne plošče. Jambore, ki so vrtljivo vpeti v temeljna tla, zasučemo naprej in nanje pritrdimo (preko kotnih plošč) pripravljeno membrano. Jambore nato zasučemo v njihovo končno lego. Pri manevriranju z jambori jim vseskozi zagotavljamo začasno stabilnost z dodatnimi kabli. Med vrhove jamborov in pripravljena sidra v tleh namestimo stabilizacijske kable. Sedaj, ko membrana visi v zraku, nanjo v sredini vsakega polja pritrdimo še lebdeča jambora. Z dvigalom dvignemo lebdeči jambor in s tem tudi membrano do določene višine, nato pa spodnji del vsakega jambora stabiliziramo s štirimi visečimi kabli. Membrano prednapnemo z večanjem dolžine lebdečega jambora (slika 216). Ta mora biti izdelan tako, da to omogoča (mehansko ali hidravlično). Fine nastavitve prednapetja

lahko izvedemo z naknadnim spreminjanjem dolžine lebdečih jamborov ali dolžine preko zategovalcev v kotnih detajlih. Na koncu natančno preverimo geometrijo konstrukcije in v primeru, da imamo ustrezne inštrumente, še sile v kabljih oz. napetosti v membrani. Slika 217 prikazuje predvideno končno stanje ob zaključku postavitve nadkritja.



Slika 216: Postopek dviganja in napenjanja membrane



Slika 217: Tržnični plato z nadkritjem

10 ZAKLJUČEK

Skozi pripravo diplomske naloge sem se podrobno in celovito seznanil s prednapetimi membranskimi konstrukcijami. Te so, kljub relativno kratki zgodovini, razširjene po vsem svetu; največ se uporabljajo kot strešne konstrukcije. Glavna vzvoda za njihov razvoj sta bila razvoj novih membranskih materialov in računalnikov. Spoznal sem obnašanje prednapetih membran; globalno in na nivoju materiala. Predstavil sem vse komponente membranskih konstrukcij, najznačilnejša med njimi je sama membrana. Opisal sem proizvodnjo, mehanske in nemehanske lastnosti membranskih materialov, ki se najbolj množično uporabljajo za tovrstne namene. Predvsem sem se osredotočil na kompozitne membrane (PET/PVC in FG/PTFE membrane). Zanje sem izvedel tudi enoosna natezna testiranja ter še sam potrdil mehanske karakteristike posameznega kompozitnega materiala, ki jih navajajo različni viri.

Za gradbenega inženirja – načrtovalca prednapetih membranskih konstrukcij – se mi zdi najpomembnejše poznavanje obnašanja membrane (tako na nivoju materiala kot globalno) in vzrokov za le-to. Pri kompozitnih membranskih materialih na obnašanje najbolj vpliva nosilna tkanina. V mojem primeru so to tkanine iz polimernih oz. steklenih niti. Najpomembnejše se je zavedati interakcije osnovnih in votkovnih niti, ki ima za posledico kompleksno ortotropno nelinearno obnašanje membran, odvisno od dvoosnega napetostnega stanja. Dvoosnega nateznega preizkusa v okviru naloge nisem mogel narediti, vendar se je dalo že iz enoosnih nateznih preizkusov ugotoviti, da so FG/PTFE membrane bolj toge (manjši raztezki) in imajo višjo trdnost kot PET/PVC membrane. V splošnem še velja, da imajo FG/PTFE membrane še precej daljšo življenjsko dobo, so bolj odporne na zunanje vplive in bolj odbijajo umazanijo kot PET/PVC membrane, vendar pa so bolj občutljive za ravnanje in imajo precej višjo ceno. Iz tega sklepam, da je FG/PTFE membrane smotrno uporabiti pri konstrukcijah, od katerih pričakujemo dolgo življenjsko dobo in malo vzdrževanja, PET/PVC membrane pa za manjše konstrukcije in mobilne konstrukcije. Trenutno se izvajajo številne raziskave novih membranskih materialov, zato menim, da se bodo v prihodnosti razvili novi materiali, ki bodo boljši, močnejši in trajnejši. Pričakujem, da se bo z razvojem nižala cena membran in samih konstrukcij, je pa veliko odvisno od gibanja cen nafte in jekla.

Membrana nima upogibne togosti, prevzame lahko le natezne napetosti, zato se mora za prevzem obremenitev, ki delujejo prečno na površino, ukriviti v smeri obtežbe. Konstrukcije so izpostavljene navzdol in navzgor delujočim obtežbam, zato membrano že oblikujemo tako, da ima dvojno nasprotno ukrivljenost, da ne bi ob različnih obtežbah prehajala iz ene ukrivljenosti v drugo. Vendar sama ukrivljenost še ne zagotavlja nobene površinske togosti, kajti ob dinamičnih obtežbah (npr. vetra) bi membrana vibrirala in valovala, pri čemer bi se lahko poškodovala, poleg tega pa to ne bi bilo prijetno za uporabnike konstrukcije. Potrebujemo natezno napetost v membrani, zato vanjo vnesemo

prednapetje. Obnašanje prednapetih membranskih je odvisno od zunanje obremenitve, napetosti v membrani in ukrivljenosti membrane. Razumevanje teh medsebojno odvisnih veličin je ključnega pomena pri projektiranju prednapetih membranskih konstrukcij. Res je, da se dandanes projektiranje izvaja s specializiranimi računalniškimi programi, vendar pa so ti le orodje. Za njihovo upravljanje je potrebno razumevanje in poznavanje obnašanja prednapetih membranskih konstrukcij.

Trije glavni koraki projektiranja tovrstnih konstrukcij so iskanje oblike, statična analiza in določitev krojev membrane. Pri iskanju oblike projektant poda robne pogoje, program pa nato z različnimi metodami (v diplomski nalogi sem natančno opisal metodo gostote sil) določi ravnotežno obliko membrane. Preostane le še ocena dobljene oblike glede oblikovne ustreznosti in zadostne ukrivljenosti. Ta korak zahteva dobro poznavanje osnovnih oblik prednapetih membran, katere lahko nato kombiniramo. Membranske konstrukcije so zelo fleksibilne, čemur poleg fleksibilne membrane prispevajo še fleksibilni robni kabli (če so prisotni). Posledica tega so veliki pomiki membrane ob nastopu zunanjih obtežb in s tem potreba po nelinearni analizi.

Statična analiza je precej bolj kompleksen korak pri projektiranju. Glede na konvencionalne materiale in konstrukcije se tu pojavita dve težavi. Prva je določitev vrednosti elastičnega modula membrane. Programi imajo običajno možnost vnosa ene vrednosti za elastični modul za vsako smer, torej predpostavijo linearno elastičen material, kar pa za membrane ne drži. Iz tega sledi, da je material modeliran zelo približno. Najbolj sprejemljive vrednosti lahko dobimo z dvoosnimi testi, na katerih simuliramo pričakovane napetostne razmere. Ob upoštevanju, da so napetostne razmere različne glede na lokacijo v membrani in zunanjo obtežbo ter, da izvedba dvoosnih raziskav verjetno ni najbolj poceni, menim, da lahko za manjše projekte uporabimo kar rezultate dvoosnih preiskav, ki jih pridobimo od proizvajalca membrane, pretirana natančnost pa je odvečna. Pričakujem, da bodo v prihodnosti v računalniške programe za statično analizo membranskih konstrukcij vključeni bolj eksaktni modeli membranskega materiala, ki bi upoštevali napetostno stanje in interakcijo med nitimi v membrani.

Druga težava je določitev obtežb po površini membrane. Karakteristične obtežbe določimo v skladu z merodajnimi standardi, problem pa se pojavi pri razporeditvi obtežbe po površini, predvsem pri obtežbi vetra. Standardi namreč predpisujejo razporeditev le za nekaj osnovnih oblik za strehe, prednapete membranske konstrukcije pa imajo zelo kompleksno ukrivljene površine, poleg tega pa se ta ob obtežbi še dodatno spremeni. V večini primerov je težko najti vzporednice z oblikovnimi faktorji iz standardov. Najbolj verodostojne podatke je mogoče dobiti z testiranjem v vetrnem tunelu. Ti smo smotrni v primeru velikih projektov, ki so tudi izdatno finančno podprti, pri ostalih pa imamo možnost uporabe obstoječih vetrnih testov na podobnih konstrukcijah, uporabe priporočil v razni strokovni

literaturi ter aproksimacije oblikovnih faktorjev v skladu z obstoječimi standardi, izkušnjami in inženirsko presojo.

Ko imamo rezultate statične analize – sile in napetosti v konstrukciji, je potrebno dimenzionirati elemente oz. preveriti nosilnost že določenih. Evrokod standardi za dimenzioniranje konstrukcij predvidevajo metodo dovoljenih napetosti, vendar se izkaže, da je za prednapete membranske konstrukcije bolj primerna metoda dovoljenih napetosti (Forster in sod., 2004). Torej sem na model konstrukcije nanašal karakteristične obtežbe, pri obtežnih kombinacijah sem pa upošteval kombinacijske faktorje ψ_0 v skladu s SIST EN 1990. Po svetu obstajajo različni standardi in priporočila za dimenzioniranje takšnih konstrukcij. Po pregledu povzetkov le-teh, sem določil nek povprečen končni varnostni faktor, in sicer 5 za PET/PVC membrane in 6 za FG/PTFE membrane. Pri slednjih je faktor višji zaradi njihove občutljivosti na prepigibanje in nižjo odpornost na širjenje raztrganin, te pa so bile vzrok večine porušitev prednapetih membranskih konstrukcij. Nosilnost kablov sem preveril tudi po metodi dovoljenih napetosti, upošteval sem varnostni faktor 2,5. Ostale dele konstrukcije sem dimenzioniral v skladu s SIST EN 1993-1-1. Projektno vrednost sem določil tako, da sem dobljene sile pomnožil z 1,5 (če je prevladovala obtežba snega) oz. 1,6 (če je prevladovala obtežba vetra). Če z obnašanjem ali razporeditvijo napetosti in sil po konstrukciji nismo zadovoljni, je potrebno spremeniti obliko konstrukcije ali prednapetje, za ta ukrep pa je spet ključnega pomena dobro poznavanje obnašanja konstrukcij. Znanje s področja prednapetih membranskih konstrukcij se v zadnjih letih močno izpopolnjuje in širi po svetu, tudi po zaslugi združenja Tensinet, ki je nastalo kot projekt EU. Številne raziskovalne ustanove izvajajo najrazličnejše preizkuse, zato ne dvomim, da bo v prihodnosti nastal standard posebej za prednapete membranske konstrukcije, ki bo priključen ostalim evrokod standardom. Ta bo potem bolj dosledno določal razpored obtežb po membrani, metodo dimenzioniranja in razne varnostne faktorje.

Določitev krojev membrane je zelo pomembna faza v projektiranju. Od tega je odvisno dejansko obnašanje postavljene prednapete membranske konstrukcije. Kompleksno ukrivljene membrane ne moramo izdelati iz enega kosa, temveč jo sestavimo iz več krojev. Vsakega izmed njih izrežemo iz ravninske membranske pole. Glavni ugotovitvi glede določitve krojev sta dve. Prva je, da moramo kroje razporediti tako, da se glavne smeri membrane čim bolj ujemajo s smerjo največjih napetosti, ki nastanejo ob predvidenih obtežbah. Druga pa je, da je velikost oz. širina krojev odvisna od ukrivljenosti površine. Pri bolj ukrivljenih površinah je popačenje oblike kroja pri projekciji večje, zato mora biti kraj ožji, da ne presežemo še dovoljenih strižnih deformacij in s tem ustvarimo velike strižne napetosti. Zelo pomembna zadeva je še kompenzacija krojev, torej koliko moramo zmanjšati vsak kraj, da bo končana membrana imela želeno obliko in prednapetje. Kompenzacijske faktorje določimo z dvoosnimi nateznimi preizkusi. Iz podobnih razlogov kot pri določanju elastičnega modula

materiala menim, da tudi tu ni potrebna pretirana natančnost, ter da lahko za manjše projekte uporabimo kar dvoosni test, ki ga pridobimo od proizvajalca membrane.

V diplomu sem predstavil tudi različne značilne detajle stikov v prednapetih membranskih konstrukcijah, postopek proizvodnje membrane ter priprave in postavitve konstrukcije. Sestavo in značilnosti detajlov ter razne postopke pri gradnji prednapetih konstrukcij sem povzel iz raznih virov, vendar se zavedam, da je teorija nekaj drugega kot realizacija realnega projekta. Eno je zahtevati določeno prednapetje na računalniku, drugo pa ga je realizirati na konstrukciji. Za učinkovito izbiro detajlov, izdelavo ter postavitve konstrukcije so potrebne izkušnje.

Pri prednapetih membranskih konstrukcijah je veliko možnosti za optimizacijo konstrukcij, seveda pa so tu spet izkušnje ključnega pomena. Optimizacijo lahko dosežemo pri izbiri oblike membrane (količina materiala, volumen prostora za ogrevanje), izbiri materiala membrane in podporne konstrukcije, konfiguraciji podporne konstrukcije, izbiri detajlov, številu membranskih zvarov in ostalih stikov, izbiri procedure postavitve in napenjanja konstrukcije ter izbiri opreme za postavitve. Tudi z natančno določitvijo obtežb in smiselnih varnostnih faktorjev lahko mnogo prispevamo k optimizaciji. Rad bi poudaril, da je vsekakor smotrno (sploh pri večjih projektih) na začetku posvetiti veliko časa in denarja temeljitemu projektiranju in dodatnim raziskavam, saj bo tako konstrukcija cenejša, manj bo težav in vzdrževanja.

Na podlagi pridobljenega znanja sem v drugem delu diplomske naloge praktično pokazal potek projektiranja na primeru treh raznolikih konstrukcij. Poiskal sem ravnotežno obliko, analiziral konstrukcijo, dimenzioniral glavne komponente in določil kroje za izdelavo membrane. Predlagal sem tudi primerne detajle in proceduro postavitve konstrukcije. Iz primerov se je jasno videlo, da se v primeru navzdol delujočih obtežb povečajo napetosti v smeri konkavne ukrivljenosti, v pravokotni smeri pa zmanjšajo. Ob navzgor delujočih obtežbah je situacija obratna. Spoznal sem tudi, da je stopnja prednapetja zelo pomembna za obnašanje konstrukcij ter da so pri tovrstnih konstrukcijah pomiki precejšnji. Menim, da imam sedaj osnovno potrebno znanje za projektiranje prednapetih membranskih konstrukcij. Upam, da se bom imel čim prej priložnost srečati z realnim projektom.

V zadnjih letih je nastalo mnogo novih prednapetih membranskih konstrukcij po vsem svetu; so lažje, cenejše in atraktivnejše od primerljivih konvencionalnih konstrukcij zato jim napovedujem nadaljnji razvoj in uspešno prihodnost. Slej ko prej bo ta tehnologija prišla v Slovenijo, vendar je začetni pogoj za to znanje. Upam, da se bo v bližnji prihodnosti na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani vedno več govorilo in predavalo o prednapetih membranskih konstrukcijah, mogoče celo kdaj to postane samostojen predmet. Če bo moje diplomsko delo k temu kakorkoli pripomoglo, bo moj namen dosežen.

VIRI

Bechthold, M. 2008. Innovative Surface Structures. Technology and Applications. Abingdon, Taylor & Francis: str. 2–81.

Beg, D. 2011. Projektiranje jeklenih konstrukcij v skladu z evrokodom 3. Kratek povzetek. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

<http://www.fgg.uni-lj.si/kmk/> (Pridobljeno 5. 8. 2011.)

Beg, D., Rogelj, T., Čermelj, B. 2011. Jeklene konstrukcije I. Natezni elementi. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za metalne konstrukcije.

<http://www.fgg.uni-lj.si/kmk/JK%20I.htm> (Pridobljeno 5. 8. 2011.)

Berger, H. 1996. Light Structures – Structures of Light: The Art and Engineering of Tensile Architecture. Basel, Boston, Berlin, Birkhäuser: str. 7–53.

Calculating Panel Compensation. Meliar Design. 2011.

http://www.meliar.com/Paneling_Tuts.htm (Pridobljeno 15. 10. 2011.)

Chung, T. J. 2007. General Continuum Mechanics. Cambridge, Cambridge University Press: 105.

Drew, P. 2008. New Tent Architecture. London, Thames & Hudson: 208 str.

Easy Training Manual. 2010. Berlin, Technet GmbH.

Enos, R. 2011. Architectural Membrane Structures the Future Today.

<http://www.bookoftents.com/publications/membranes.htm> (Pridobljeno 15. 12. 2011.)

ETFE Foil. A Guide to Design. Architen Landrell Associates. 2011.

<http://www.architen.com/technical/articles/etfe-foil-a-guide-to-design/> (Pridobljeno 15. 12. 2011.)

Forster, B. (ur.), Mollaert, M. (ur.). 2004. European Design Guide for Tensile Surface Structures. Bruselj, Vrije universiteit Brussel: 354 str.

Galvanised Strand. Nobles. 2011.

http://www.nobles.com.au/products.aspx?doc_id=1724 (Pridobljeno 23.8.2011)

Giugliano, P. 2009. Technical Guideline to Permanent Tensile Architectures. Mehler Technologies.

<http://www.membrana-konkurs.pl/pliki/mehler/10.pdf> (Pridobljeno 6. 9. 2011.)

Gründig, L., Ekert, L., Moncrieff, E. 1996. Geodesic and Semi-Geodesic Line Algorithms for Cutting Pattern Generation of Architectural Textile Structures. Proceeding of Asia-Pacific Conference on Shell and Spatial Structures, Peking.

www.technet-gmbh.de (Pridobljeno 30. 11. 2011.)

Hajduković, M. 2011. Preskušanje in klasificiranje požarnih lastnosti materialov in konstrukcij. Zavod za gradbeništvo Slovenije.

<http://www.zag.si/si/index.php?nav0=dejavnosti&nav1=grfizika&nav2=pozarnilab>

(Pridobljeno 15. 12. 2011.)

Hegyí, D., Hincz, K. 2004. Long-Term Analysis of Prestressed Membrane. *Journal of Computational and Applied Mechanics* 6, 2: str. 219–235.

Holl, J., Ströbel, D., Singer, P. 2011. *Computational Modelling of Lightweight Structures*. Berlin, Textile Roofs 2011.

Huntington, C. G. 2004. *The Tensioned Fabric Roof*. Reston, The American Society of Civil Engineers: 203 str.

Fang-hui, L., Ming, G., Jun-jun, P. 2009. Practical Wind-Resistant Design of Large Space Flexible Cable Net. The Seventh Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, November 8–12, Tajpej.

www.iawe.org/Proceedings/7APCWE/T3B_5.pdf (Pridobljeno 15. 9. 2011.)

Membranes. *Verseidag*. 2011.

<http://www.verseidag.de/en/en/duraskin/architecture/membranes/membranes> (Pridobljeno 11. 8. 2011)

Milin Šipuš, Ž. Uvod u diferencijalnu geometriju. Predavanja, del 9. Zagreb, Prirodoslovno-matematički fakultet: str. 71–74.

<http://web.math.pmf.unizg.hr/nastava/udg/dodatni.html> (Pridobljeno 10. 11. 2011.)

Nagai, Y., Okada, A., Miyasato, N., Saitoh, M. 2011. Wind Tunnel Tests on The Horn-shaped Membrane Roof. V: Colman Lerner, J. (ur.), Boldes, U. (ur.). *Wind Tunnels and Experimental Fluid Dynamics Research*. Reka, Intech: str. 325–348.

<http://www.intechopen.com/articles/show/title/wind-tunnel-tests-on-the-horn-shaped-membrane-roof>

(Pridobljeno 30. 9. 2011.)

Schierle, G.G., Yin, M. 1993. Anticlastic Membranes: Correlation of Form, Prestress, Behavior. *Proceedings, 4th International Conference on Space Structures*, Surrey, Telford Publications

<http://www-classes.usc.edu/architecture/structures/structure-papers.html> (Pridobljeno 5. 12. 2011.)

Seidel, M. 2009. *Tensile Surface Structures. A practical Guide to Cable and Membrane Construction*. Berlin, Ernst & Sohn: 229 str.

Ströbel, D. 2011. Request for comment of construction. Osebna komunikacija. (20. 10. 2011.)

Suspension bridge. Wikipedia. 2011.

http://en.wikipedia.org/wiki/Suspension_bridge (Pridobljeno 10. 5. 2011.)

Tensile structure. Wikipedia. 2011.

http://en.wikipedia.org/wiki/Tensile_structure (Pridobljeno 28. 11. 2011.)

What is double curvature? Span Design. 2011.
http://www.spandesign.com/technical/article_what_is_double_curvature.aspx
(Pridobljeno 12. 12. 2011.)

Ostali viri

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

Campbell, D. M. 2004. Stretching the Limits. Non-Linear Pre-Stressed Structures. Structure magazine 11, 11: str. 18–23.

Easy.Beam Training Manual. 2009. Berlin, Technet GmbH.
Gründig, L., Moncrieff, E., Singer, P., Ströbel, D. 2000. High performance cutting pattern generation of architectural textile structures. Fourth international colloquium on computation of shell & spatial Structures, Junij 5–7, Chania.
www.technet-gmbh.de (Pridobljeno 15. 11. 2011.)

Mollaert, M. 2011. Membrane structures: understanding their forms. Bruselj, Vrije Universiteit Brussel.
<http://www.scribd.com/doc/71905518/Understanding-Tensile-Forms> (Pridobljeno 22. 10. 2011.)

Pauletti, R. M. O., Brasil, R. M. L. R. F. 2011. Structural Analysis and Construction of the Membrane Roof of the "Memorial dos Povos de Belém do Pará". Sao Paulo, Polytechnic School of the University of São Paulo, Department of Structural and Foundation Engineering.
<http://www.lmc.ep.usp.br/people/pauletti/> (Pridobljeno 10. 7. 2011.)

Ströbel, D., Singer, P. 2001. How to compensate membran material in warp and weft direction? Berlin, Technet GmbH.

Ströbel, D., Singer, P. 2003. Relation between force density and stress in a regular discret net. Berlin, Technet GmbH.

Dodatni viri slik:

Armijos, S. J. 2010a. Fabric Structure Forms: Point-Supported Structures.
<http://armijos.wordpress.com/2010/07/26/fabric-structure-forms-point-supported-structures/>
(Pridobljeno 5. 1. 2012.)

Armijos, S. J. 2010b. God is in the Details.
<http://armijos.wordpress.com/2010/10/08/god-is-in-the-details/> (Pridobljeno 5. 1. 2012.)

Armijos, S. J. 2011. 3G's for Fabric Structures.
<http://armijos.files.wordpress.com/2011/02/ms-gstation2.jpg> (Pridobljeno 5. 1. 2012.)

Bridgens, B. N., Gosling, P. D., Birchall, M. S. J. 2004. Tensile fabric structures: concepts, practice & developments. The Structural Engineer, 82, 14: str. 29.

Benson, J. 2010. King Abdul Aziz International Airport – Hajj, Saudi Arabia. JTS engineering blog.
<http://www.blog.jts.vr.it/?paged=13> (Pridobljeno 6. 11. 2012.)

Canada Place. DA Architects. 2012.
<http://da-architects.ca/projects/canada-place-pan-pacific-hotel/> (Pridobljeno 5. 1. 2012.)

Composition of Wire Rope. 2012.
<http://www.tlwire.co.kr/eng/products/sub1.html> (Pridobljeno 5. 1. 2012.)

Connections and detailing: Part 2. Fabric Architecture. 2000.
http://fabricarchitecturemag.com/articles/0300_hd_connections2.html (Pridobljeno 5. 1. 2012.)

Curtis, E. S. 1908. Atsina Camp Scene. Corbis Images.
<http://www.corbisimages.com/stock-photo/rights-managed/IH136935/atsina-camp-scene-by-edward-s-curtis> (Pridobljeno 5. 1. 2012.)

Data Bank of Textile Architecture Details. 2011.
<http://sites.upc.es/~www-cal/cat/recerca/tensilestruc/webdetalles/index.html>
(Pridobljeno 17. 9. 2012.)

Denver Airport. 2012.
<http://www.visitingdc.com/airports/denver-airport-address.asp> (Pridobljeno 5. 1. 2012.)

Design Details. Birdair. 2011.
<http://www.birdair.com/downloads/designDetailsPreview.aspx>

Europlast. 2012.
http://www.europlast-srl.com/realizzazioni_a_progetto_en.html (Pridobljeno 5. 1. 2012.)

EXPO-AXIS, SBA's entrance building in Shanghai, China. 2010.
<http://www.topboxdesign.com/expo-axis-sbas-entrance-building-in-shanghai-china/>
(Pridobljeno 8. 1. 2012.)

Fiera di Milano. Canobbio. 2012.
<http://www.canobbio.com/Page.asp?t=11&o=1500&l=en> (Pridobljeno 5. 1. 2012.)

Frei, O. 1955. Four-Point Tent as a Music Pavilion of the Bundesgartenschau.
<http://www.freiotto.com/FreiOtto%20ordner/FreiOtto/HauptseiteGross.html> (Pridobljeno 5. 1. 2012.)

Galerías Cuernavaca. Birdair. 2012
<http://www.birdair.com/downloads/photographyPreview.aspx> (Pridobljeno 5. 1. 2012.)

Geiger, D. 1975. Low-Profile Air Structures in the USA. Building Research and Practice, Marec / April 1975.
<http://www.columbia.edu/cu/gsap/BT/DOMES/OSAKA/o-lowpro.html> (Pridobljeno 5. 1. 2012.)

Georgia Dome Highlights. 2012.
<http://www.chick-fil-abowl.com/FanInfo/GeorgiaDome.aspx> (Pridobljeno 5. 1. 2012.)

GMP. 2012.

<http://www.gmp-architekten.com/projects.html>

Gottlieb-Daimler-Stadion Stuttgart innen. Wikipedia. 2005.

http://en.wikipedia.org/wiki/File:Gottlieb-Daimler-Stadion_Stuttgart_innen.JPG

(Pridobljeno 5. 1. 2012.)

High frequency welding. FIAB. 2012.

<http://www.fiabmachines.com/en/fiab-technology/fiab-hf-welding.html> (Pridobljeno 5. 1. 2012.)

How it Works. Base Structures Ltd. 2011.

<http://www.basestructures.com/assets/PDFs/How%20It%20Works.pdf> (Pridobljeno 27. 10.2011.)

Husain, M. 2008. King Fahd International Stadium.

<http://www.flickr.com/photos/15378438@N03/3272390929/> (Pridobljeno 5. 1. 2012.)

Janberg, N. 2010. Clouds of the Great Arch of La Défense.

<http://en.structurae.de/photos/index.cfm?JS=167271> (Pridobljeno 5. 1. 2012.)

Jawaharlal Nehru Stadium To Feature Tensile Membrane Roofing From Birdair. 2010.

<http://www.prlog.org/10699951-jawaharlal-nehru-stadium-to-feature-tensile-membrane-roofing-from-birdair.html> (Pridobljeno 5. 1. 2012.)

J.S. Dorton Arena. 2012.

http://www.waymarking.com/waymarks/WM1H83_JS_Dorton_Arena_Raleigh_NC

(Pridobljeno 5. 1. 2012.)

King Fahd International Stadium. 2012.

<http://www.ceroacero.es/foto.php?id=38748> (Pridobljeno 5. 1. 2012.)

Knowledge Base. Afzir. 2011.

<http://afzir.com/knowledge.html> (Pridobljeno 25. 10. 2011.)

Membrane Roof, Lasalle College of the Art. TensileWorld. 2012.

<http://www.tensileworld.com/forum/viewtopic.php?t=953&sid=244bc4c0eb7035b4c31dca6e813008fb>

(Pridobljeno 5. 1. 2012.)

M&G Ricerche Research Laboratory. Samyn and Partners. 2012.

http://www.samynandpartners.be/v5/03_projects/images/01-222/222-r01.jpg (Pridobljeno 8. 1. 2012.)

Moore, W. R. 2012. A Herd of Camels Passes the Black Goat-Hair Tent of a Bedouin Family.

http://www.allposters.com/-sp/A-Herd-of-Camels-Passes-the-Black-Goat-Hair-Tent-of-a-Bedouin-Family-Posters_i4001094_.htm (Pridobljeno 5. 1. 2012.)

München-Olympiapark. 1999.

<http://www.reiseagentur.de/Travelogs/MUC/City/jpeg/0140.jpg> (Pridobljeno 5. 1. 2012.)

O2 Arena. 2012.

<http://www.americanahotel.co.uk/en/o2-arena> (Pridobljeno 5. 1. 2012.)

Overview of the Dome. 2012.

<http://www.urban75.org/photos/dome/dome23.html> (Pridobljeno 5. 1. 2012.)

Q´eswachaka – Inca Brigde. 2012.

<http://www.dosmanosnederland.com/en/services/pack/package.php?package=52&pais=PER>

(Pridobljeno 5. 1. 2012.)

Schierle, G. G. 2009. Design of Fabric Structures. *AIA 2009 National Convention and Design Exposition*.

<http://www-classes.usc.edu/architecture/structures/Arch499/index.html> (Pridobljeno 6. 11. 2011.)

Seal Types. Miller Weldmaster. 2012.

http://www.weldmaster.com/seal_types/ (Pridobljeno 5. 1. 2012.)

Sebestyen, G. 2003. *New Architecture and Technology*. Oxford, Architectural Press: str. 30

<http://www.scribd.com/doc/6687339/New-Architecture-and-Technology> (Pridobljeno 5. 1. 2012.)

Supartono, F. X., Zhongli, L., Xiujiang, W. 2011. Membrane Structure: A Modern and Aesthetic Structural System. Seminar dan Pameran HAKI 2011 – Konstruksi Indonesia Melangkah ke Masa Depan.

<http://www.2dix.com/document-pdf/makalah-haki-pdf.php> (Pridobljeno 10. 11. 2011.)

Hightex - Tensile Structures: PTFE, ETFE and PVC Membranes. 2012.

http://www.designbuild-network.com/contractors/construct_materials/hightex/hightex2.html

(Pridobljeno 5. 1. 2012.)

Tension structure connection details. Fabric architecture. 2010.

http://fabricarchitecturemag.com/articles/0110_ce_connection.html (Pridobljeno 5. 1. 2012.)

Tension Structures. Sky Shades Hawaii. 2012.

<http://skyshadeshawaii.com/tension-structures.asp> (Pridobljeno 5. 1. 2012.)

The King Abdulaziz International Airport. 2012.

<http://www2.ce.ntu.edu.tw/photo/spatial/spa6bThe%20King%20Abdulaziz%20International%20Airport.jpg> (Pridobljeno 5. 1. 2012.)

Zou, B. 2010. Cable-membrane roof and ‘sun valleys’ define Shanghai Expo’s Boulevard. *Specialty fabrics Review*.

http://specialtyfabricsreview.com/articles/0610_wv_shanghai.html (Pridobljeno 5. 1. 2012.)

Wagner, R. 2011. *Mebranes and Environment*. Berlin, Textile Roofs 2011.

Wehdorn-Roithmayr, R. 2011. *Formfinding Space and Structure*. Berlin, Textile Roofs 2011.

Why return? 2010.

<http://blog.travelpod.com/travel-blog-entries/nadinesmith28/1/1281508593/tpod.html#>

(Pridobljeno 5. 1. 2012.)

World Cup Stadium Stuttgart. 2012.

<http://capl.washjeff.edu/browseresults.php?langID=1&photoID=3060&size=l> (Pridobljeno 5. 1. 2012.)