

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

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



Univerzitetni program Gradbeništvo,
Konstrukcijska smer

Kandidatka:

Anja Lavrič

Uporaba membran iz oslojenih tkanin za fasadne in strešne sisteme jeklenih konstrukcij

Diplomska naloga št.: 3194

Mentor:
prof. dr. Darko Beg

Ljubljana, 25. 10. 2011

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisana **ANJA LAVRIČ** izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom:
**»UPORABA MEMBRAN IZ OSLOJENIH TKANIN ZA FASADNE IN STREŠNE
SISTEME JEKLENIH KONSTRUKCIJ«.**

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

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

Ljubljana, 14. 10. 2011

(podpis)

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

- UDK:** 692.232:624.014.2(043.2)
- Avtor:** Anja Lavrič
- Mentor:** prof. dr. Darko Beg
- Naslov:** Uporaba membran iz oslojenih tkanin za fasadne in strešne sisteme jeklenih konstrukcij
- Obseg in oprema:** 196 str., 22 pregl., 72 sl., 87 en.
- Ključne besede:** membrane, oslojene tkanine, low-e prevleka, membranske sile, dvoslojna pnevmatska ponjava

Izvleček

Diplomsko delo se vsebinsko deli na tri dele. V prvem delu (poglavja od 2 do 7) so predstavljene vrste arhitekturnih membranskih struktur iz oslojenih tkanin, opisane so različne vrste oslojenih tkanin in njihova sestava, postopek varjenja membran iz oslojenih tkanin ter fizikalne in mehanske lastnosti tovrstnih membran z opisi laboratorijskih preizkusov posameznih lastnosti. Drugi del diplomskega dela (poglavje 8) govori o energetsko učinkovitih ponjavah iz oslojenih tkanin z dodatno low-e prevleko, ki zaradi svoje nizke emisivnosti oz. visoke reflektivnosti zmanjša stroške energije za hlajenje oz. ogrevanje notranjosti objekta. V zadnjem, tretjem delu (poglavje 9) pa je opisan postopek statičnega izračuna membranskih sil v dvoslojnih pnevmatskih ponjavah na dva različna načina, in sicer s pomočjo Young-Laplaceove enačbe za izračun površinskih napetosti v membrani in po principu modeliranja ploskev membran z neskončnim številom vzporednih linijskih vrvnih elementov. Prikazan je postopek izračuna z upoštevanjem deformabilnosti membran ter postopek izračuna pri obremenitvi ponjave s snegom v primeru, ko je obtežba s snegom manjša od začetnega zračnega pritiska v ponjavi in v primeru, ko je ta večja od začetnega zračnega pritiska v ponjavi. Opisano je spreminjanje sil v zgornji in spodnji membrani dvoslojne pnevmatske ponjave ter pripadajočih komponent reakcij v podporah v odvisnosti od tipa izračuna, upoštevanja deformabilnosti membran, začetnih višin obeh membran, velikosti zračnega pritiska v ponjavi in velikosti obremenitve s snegom. Prikazan je tudi postopek izračuna membranskih sil in reakcij v podporah pri obremenitvi s srkom vetra.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 692.232:624.014.2(043.2)
Author: Anja Lavrič
Supervisor: Prof. Darko Beg, Ph. D.
Title: Use of Coated Fabric Membranes for Facade and Roof Systems in Steel Constructions
Notes: 196 p., 22 tab., 72 fig., 87 eq.
Key words: membranes, coated fabrics, low-e coating, membrane forces, double-layer pneumatic roofing

Abstract

The thesis is divided into three parts. In the first part (chapters 2 to 7), types of architectural membrane structures from coated fabrics are presented, different types of coated fabrics and their composition is described, welding procedures for membranes from coated fabrics are shown, and physical and mechanical characteristics of these membranes are given, including laboratory tests descriptions of individual characteristics. In the second part of the thesis (chapter 8), we are discussing energy efficient roofing from coated fabrics with an additional low-e coating, which due to its low thermal emission or high reflection rates can lower energy costs for cooling and heating of the building interior. In the third and last part (chapter 9), the procedure for static calculations of membrane forces in pneumatic roofing is described in two different ways: Using the Young-Laplace equation for measuring surface tension in membranes and using the principle of modelling membrane surfaces with the infinite number of parallel line elements. The calculation procedure regarding membrane deformability and the calculation procedure regarding the snow load of the roofing, if the snow load is smaller than the initial air pressure inside the roofing and if it is bigger than the initial air pressure inside the roofing, are shown. Changes in forces in the upper and lower membrane of the double-layer pneumatic roofing are described, together with corresponding reaction components in supports, depending on the calculation type, membrane deformability, initial heights of both membranes, size of air pressure inside the roofing, and size of snow load. Also, the calculation procedure of membrane forces and corresponding reaction components regarding wind suction load, is shown.

ZAHVALA

Za pomoč pri nastajanju diplomske naloge se iskreno zahvaljujem sodelavcem v podjetju Loging in mentorju prof. dr. Darku Begu. Za moralno in finančno podporo skozi vsa leta študija bi se zahvalila tudi svojim staršema Tereziji in Francu ter babici Martini, ki mi je pomagala vsak teden narediti lepši.

KAZALO VSEBINE

1 UVOD	1
2 MEMBRANSKE KONSTRUKCIJE.....	3
2.1 Pnevmatске konstrukcije	4
2.1.1 Oblika	6
2.1.2 Materiali	7
2.1.3 Zračni pritisk	7
2.1.4 Obremenitve	8
2.2 Natezne membranske konstrukcije.....	11
2.2.1 Materiali	12
2.2.2 Oblika	14
2.2.3 Obremenitev	16
2.2.4 Prednapetost	16
2.3 Kableske kupole	16
2.3.1 Koncept »Tensegrity«	17
2.3.2 Uporaba	18
2.3.3 Kableska kupola gimnastične arene v Seulu	19
2.3.4 Kableska kupola Georgia Dome v ZDA	22
3 MEMBRANSKI MATERIALI	24
3.1 Tkanine iz poliestrskih vlaken, prevlečene z vinili	25
3.2 Tkanine iz poliestrskih vlaken laminirane z vinili.....	27
3.2.1 Zatemnjene membrane	28
3.3 Tkanine iz steklenih vlaken, prevlečene s PTFE.....	28
3.4 Tkani PTFE	31
3.5 ETFE folija	31
3.6 Mreže	32
3.7 Filmi	33
3.8 Cene membranskih materialov	34

4 POVRŠINSKE PREVLEKE PVC MEMBRAN	36
4.1 Akrilna površinska prevleka.....	36
4.2 PVDF površinska prevleka.....	37
4.3 PVF filmska laminirana površinska prevleka.....	38
4.4 PVDF/PVC površinska prevleka	38
4.5 Primerjava površinskih prevlek	39
5 VARJENJE MEMBRAN.....	40
5.1 Dielektrično visoko-frekvenčno varjenje	41
5.2 Rotacijsko varjenje	42
6 MEHANSKE IN FIZIKALNE LASTNOSTI ARHITEKTURNIH MEMBRAN.....	47
6.1 Natezna trdnost.....	48
6.2 Enoosni in dvoosni raztezek	51
6.3 Dimenzijska stabilnost.....	52
6.4 Trgalna trdnost.....	53
6.5 Adhezija prevleke	54
6.6 Varilnost membran in trdnost šivov	56
6.7 Vpijanje vlage.....	57
6.8 Odpornost na UV svetlobo in vremenske vplive.....	58
6.9 Odpornost na glive in plesni.....	59
6.10 Požarna odpornost	59
6.11 Možnost čiščenja in estetski videz	62
6.12 Povzetek lastnosti arhitekturnih membran	62
7 OPIS MEMBRAN PROIZVAJALCA VERSEIDAG-INDUTEX.....	65
7.1 Membrane za izdelavo fasad	67
7.2 Membrane za izdelavo fleksibilnih nateznih membranskih konstrukcij	68
7.3 Membrane za izdelavo mobilnih šotorov in skladiščnih objektov	73

8 ENERGETSKO UČINKOVITEJŠE OSLOJENE TKANINE Z LOW-E PREVLEKO

.....	75
8.1 Transmisija, absorpcija, emisija in refleksija sevalne energije	75
8.2 Kontrola sončne energije	77
8.3 Delovanje low-e prevleke na membranah iz oslojenih tkanin.....	81
8.3.1 Kombinacije membran z in brez low-e prevleke v primeru zahtev po dnevni svetlobi	82
8.4 Testiranje skladiščne hale z dvoslojno pnevmatsko ponjavo z low-e prevleko	83
8.4.1 Test 1: Meritve temperature in relativne vlažnosti zraka v testni hali.....	85
8.4.2 Test 2: Študija učinkovitosti low-e prevleke	92
8.4.2.1 Zimska toplotna zaščita	96
8.4.2.2 Poletna toplotna zaščita	99
8.4.2.3 Toplotna prehodnost ponjav	101
8.4.3 Zaključek	103

9 STATIČNI IZRAČUN STREŠNEGA SISTEMA IZ DVOSLOJNIH PNEVMATSKIH PONJAV

.....	105
9.1 Sile v membrani po Young-Laplaceovi enačbi	110
9.2 Sile v membrani po principu neskončnega števila vzporednih vrvi.....	112
9.3 Izračun sil v membranah in reakcij v podporah	113
9.3.1 Postopek izračuna z Young-Laplaceovo enačbo	114
9.3.2 Postopek izračuna po principu neskončnega števila vzporednih vrvi.....	115
9.3.3 Postopek izračuna z upoštevanjem raztezka membrane.....	116
9.4 Sile v membranah in reakcije v podporah zaradi zračnega pritiska v ponjavi	122
9.4.1 Sprememba višine membrane na sredini razpona zaradi raztezka membrane	123
9.4.2 Membranske sile in reakcije v odvisnosti od velikosti zračnega pritiska v ponjavi	125
9.4.3 Membranske sile in reakcije v odvisnosti od višine membrane na sredini razpona	127
9.4.4 Membranske sile in reakcije v odvisnosti od tipa izračuna sile v membrani	130
9.4.5 Vsota horizontalnih reakcij pri različnih višinah zgornje in spodnje membrane ..	133

9.5 Sile v membranah in reakcije v podporah zaradi obremenitve s snegom	136
9.5.1 Obnašanje dvoslojne pnevmatske ponjave pod obremenitvijo s snegom.....	138
9.5.2 Postopek izračuna končnega zračnega pritiska v ponjavi in končnih višin membran	141
9.5.2.1 Postopek izračuna za primer, ko velja $p_Z > q_S$ ali $p_K > q_S$	142
9.5.2.2 Postopek izračuna za primer, ko velja $p_Z \leq q_S$ in $p_K = q_S$	145
9.5.3 Membranske sile in reakcije v odvisnosti od velikosti obremenitve zaradi snega	147
9.5.4 Maksimalna obremenitev s snegom v odvisnosti od začetnih višin membran.....	153
9.5.5 Sile v membranah in reakcije v podporah v odvisnosti od začetnih višin membran	158
9.5.6 Sile v membranah in reakcije v podporah v odvisnosti od začetnega zračnega pritiska	165
9.6 Sile v membranah in reakcije v podporah zaradi obremenitve z vetrom	170
9.6.1 Obnašanje dvoslojne pnevmatske ponjave pod obremenitvijo s srkom vetra	175
9.6.2 Postopek izračuna končnega zračnega pritiska v ponjavi in končnih višin membran	176
9.6.3 Membranske sile in reakcije v odvisnosti od velikosti obremenitve zaradi srka vetra	179
9.7 Zaključek	183
10 VPLIV DVOSLOJNE PNEVMATSKE PONJAVE NA NOSILNO JEKLENO KONSTRUKCIJO.....	188
10.1 Distančniki.....	189
10.2 Napenjalne cevi	192

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Primerjava cen varjenih ponjav iz različnih membranskih materialov.	34
Preglednica 2: Zveza med razredi in referenčnimi požarnimi scenariji za gradbene produkte (izključeni talni gradbeni produkti) po EN 13501-1.	61
Preglednica 3: Tehnične karakteristike fasadnih membran nemškega podjetja Verseidag-Indutex GmbH pod blagovno znamko Duraskin®.	67
Preglednica 4: Tehnične karakteristike membran za izdelavo fleksibilnih nateznih membranskih konstrukcij nemškega podjetja Verseidag-Indutex GmbH pod blagovno znamko Duraskin® z možnostjo požarne odpornosti M2.	69
Preglednica 5: Tehnične karakteristike membran za izdelavo fleksibilnih nateznih membranskih konstrukcij nemškega podjetja Verseidag-Indutex GmbH pod blagovno znamko Duraskin® z osnovno tkanino iz poliestrskih vlaken in PVC prevleko.	70
Preglednica 6.1: Tehnične karakteristike membran za izdelavo fleksibilnih nateznih membranskih konstrukcij nemškega podjetja Verseidag-Indutex GmbH pod blagovno znamko Duraskin® z osnovno tkanino iz steklenih vlaken in PTFE prevleko.	71
Preglednica 6.2: Tehnične karakteristike membran za izdelavo fleksibilnih nateznih membranskih konstrukcij nemškega podjetja Verseidag-Indutex GmbH pod blagovno znamko Duraskin® z osnovno tkanino iz steklenih vlaken in PTFE prevleko.	72
Preglednica 7: Tehnične karakteristike membran za izdelavo mobilnih šotorov in skladišč nemškega podjetja Verseidag-Indutex GmbH pod blagovno znamko Duraskin®.	73
Preglednica 8: Vrednosti emisivnosti in reflektivnosti nekaterih gradbenih materialov.	77
Preglednica 9: Delitev elektromagnetnega valovanja glede na valovno dolžino.	78
Preglednica 10: Sestave in toplotne prehodnosti različnih konstrukcijskih sklopov testne hale.	93

Preglednica 11: Opisi variant različnih strešnih kritin testne hale, za katere so bile izvedene termične simulacije.....	94
Preglednica 12: Toplotne prehodnosti posameznih variant strešnih ponjav iz enega ali več slojev PVC membran pri različnih robnih pogojih.....	102
Preglednica 13: Rezultati preizkusa 5 tračnih preizkušancev po standardu ISO 1421:1998.	118
Preglednica 14: Iteracijska določitev končne sile v membrani P, obremenjene s konstantnim zračnim pritiskom v ponjavi 1000 Pa, s pomočjo Young-Laplaceove enačbe.....	121
Preglednica 15: Višina raztegnjene membrane $h(\Delta l)$ in sprememba višine Δh zaradi raztezka pri različnih začetnih višinah membran v odvisnosti od zračnega pritiska v ponjavi Δp	124
Preglednica 16: Velikost sile v membrani in velikost komponent reakcije ene membrane, po izračunu z Young-Laplaceovo enačbo brez in z upoštevanjem raztezka, v odvisnosti od notranjega pritiska v ponjavi z $L = 5,0$ m in začetno višino $h_1 = h_2 = 0,5$ m.	126
Preglednica 17: Velikost sile v membrani in velikost komponent reakcije ene membrane, po izračunu z Young-Laplaceovo enačbo brez in z upoštevanjem raztezka, v odvisnosti od višine membrane $h_1 = h_2$ na sredini razpona $L = 5,0$ m pri obremenitvi z zračnim pritiskom 1000 Pa.	128
Preglednica 18: Primerjava velikosti sil v membrani in komponent reakcij, izračunanih po Young-Laplaceovi enačbi in po principu vrvi brez in z upoštevanjem raztezka, v odvisnosti od višine membrane na sredini razpona $L = 5,0$ m pri obremenitvi z zračnim pritiskom 1000 Pa.	131
Preglednica 19: Vsota horizontalnih reakcij v podpori zaradi obeh membran, obremenjenih z notranjim zračnim pritiskom 1000 Pa, pri različnih višinah zgornje in spodnje membrane na sredini razpona $L = 5,0$ m ob enaki začetni prostornini $V = 2,01$ m ³ /m oz. vsoti višin 0,6 m (zgoraj) ter ob enaki začetni prostornini $V = 3,36$ m ³ /m oz. vsoti višin 1,0 m (spodaj).	133
Preglednica 20: Primer iteracijske določitve končnega pritiska v ponjavi p_K ter končnih višin zgornje $h_{1,K}$ in spodnje membrane $h_{2,K}$ s pripadajočo prostornino stisnjenega zraka v ponjavi	

V_K pri razponu $L = 5,0$ m in začetnima višinama nedeformiranih membran $h_{1,0} = h_{2,0} = 0,5$ m pri začetnem zračnem pritisku 1000 Pa in obremenitvijo s snegom 800 Pa. **144**

Preglednica 21: Začetne višine zgornjih $h_{1,0}$ in spodnjih $h_{2,0}$ nedeformiranih membran ter razlike med njimi pri ponjavih z razponom 5,0 m, 4,5 m in 4,0 m, kjer je začetna višina nedeformiranih membran simetrične ponjave enaka desetini razpona ($h_{1,0} = h_{2,0} = L/10$). ... **154**

Preglednica 22: Primer iteracijske določitve končnega pritiska v ponjavi p_K ter končnih višin zgornje $h_{1,K}$ in spodnje membrane $h_{2,K}$ s pripadajočo prostornino stisnjenega zraka v ponjavi V_K pri razponu $L = 5,0$ m in začetnima višinama nedeformiranih membran $h_{1,0} = h_{2,0} = 0,5$ m pri začetnem zračnem pritisku 1000 Pa in obremenitvijo s srkom vetra 2000 Pa. **178**

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Potek temperature zraka v 5 merilnih točkah znotraj in zunaj testne hale v časovnem obdobju 14 dni.	87
Grafikon 2: Potek temperature zraka v 5 merilnih točkah znotraj in zunaj testne hale v časovnem obdobju 2 dni z najvišjimi izmerjenimi temperaturami.....	87
Grafikon 3: Potek relativne vlažnosti zraka v 5 merilnih točkah znotraj in zunaj testne hale v časovnem obdobju 14 dni.	89
Grafikon 4: Potek relativne vlažnosti zraka v 5 merilnih točkah znotraj in zunaj testne hale v časovnem obdobju 2 dni z najvišjimi izmerjenimi temperaturami.....	89
Grafikon 5: Potrebna energija za ogrevanje pri različnih variantah strešnih konstrukcij (v tabeli so ponjave z low-e so obarvane rumeno).	96
Grafikon 6: Potrebna energija za ogrevanje pri energetsko učinkovitejših variantah strešnih konstrukcij.	97
Grafikon 7: Potrebna energija za hlajenje pri različnih variantah strešnih konstrukcij (v tabeli so ponjave z low-e so obarvane rumeno).	99
Grafikon 8: Potrebna energija za ogrevanje pri energetsko učinkovitejših variantah strešnih konstrukcij (vse razen Var 10 – trapezna pločevina).	100
Grafikon 9: Zveza med natezno silo in deformacijami 5 preizkušancev iz poliestrske tkanine prevlečene s PVC.	117
Grafikon 10: Zveza med natezno silo v membrani in deformacijami.	119
Grafikon 11: Višina loka membrane na sredini razpona med podporama $L = 5,0$ m v odvisnosti od dolžine loka membrane.	123

Grafikon 12: Sprememba višine membrane Δh zaradi raztezka pri različnih začetnih višinah membran v odvisnosti od zračnega pritiska v ponjavi Δp **125**

Grafikon 13: Velikost sile v membrani in velikost komponent reakcije ene membrane, po izračunu z Young-Laplaceovo enačbo brez in z upoštevanjem raztezka, v odvisnosti od notranjega pritiska v ponjavi z $L = 5,0$ m in začetno višino $h_1 = h_2 = 0,5$ m. **127**

Grafikon 14: Velikost sile v membrani in velikost komponent reakcije ene membrane, po izračunu z Young-Laplaceovo enačbo brez in z upoštevanjem raztezka, v odvisnosti od višine membrane $h_1 = h_2$ na sredini razpona $L = 5,0$ m pri obremenitvi z zračnim pritiskom 1000 Pa. **129**

Grafikon 15: Primerjava velikosti sile v membrani, izračunane po Young-Laplaceovi enačbi in po principu vrvi, v odvisnosti od višine membrane $h_1 = h_2$ na sredini razpona $L = 5,0$ m pri obremenitvi z zračnim pritiskom 1000 Pa. **132**

Grafikon 16: Vsota horizontalnih reakcij v podpori zaradi obeh membran, obremenjenih z notranjim zračnim pritiskom 1000 Pa, pri različnih višinah zgornje in spodnje membrane na sredini razpona $L = 5,0$ m ob enaki začetni prostornini $V = 2,01$ m³/m oz. vsoti višin 0,6 m (zgoraj) ter ob enaki začetni prostornini $V = 3,36$ m³/m oz. vsoti višin 1,0 m (spodaj). **134**

Grafikon 17: Razlika pritiskov na zgornjo $\Delta p_{1,K}$ in spodnjo $\Delta p_{2,K}$ membrano ponjave z razponom $L = 5,0$ m in začetnima višinama nedeformiranih membran $h_{1,0} = h_{2,0} = 0,5$ m v odvisnosti od velikosti obremenitve s snegom q_s pri začetnem zračnem pritisku 1000 Pa. .. **147**

Grafikon 18: Sile v obeh membranah in pripadajoče komponente reakcij v podporah ponjave z razponom $L = 5,0$ m in začetnima višinama nedeformiranih membran $h_{1,0} = h_{2,0} = 0,5$ m v odvisnosti od velikosti obremenitve s snegom q_s pri začetnem zračnem pritisku 1000 Pa. .. **149**

Grafikon 19: Končna višina zgornje $h_{1,K}$ in spodnje membrane $h_{2,K}$ pri ponjavi z razponom $L = 5,0$ m in začetnima višinama nedeformiranih membran $h_{1,0} = h_{2,0} = 0,5$ m v odvisnosti od velikosti obremenitve s snegom q_s pri začetnem zračnem pritisku 1000 Pa. **153**

Grafikon 20: Maksimalna dopustna obremenitev s snegom na ponjavah z različnimi razponi L in začetnimi višinami nedeformiranih membran $h_{1,0}$ in $h_{2,0}$, prikazanimi v Preglednici 21, pri začetnem zračnem pritisku 1000 Pa v odvisnosti od razlike začetnih višin obeh membran. **155**

Grafikon 21: Maksimalna dopustna obremenitev s snegom na simetričnih ponjavah z različnimi razponi L pri začetnem zračnem pritisku 1000 Pa v odvisnosti od začetne višine nedeformiranih membran $h_{1,0} = h_{2,0}$. **156**

Grafikon 22: Sila v spodnji membrani in komponente reakcij v podporah pri ponjavah z različnimi razponi L in začetnimi višinami nedeformiranih membran $h_{1,0}$ in $h_{2,0}$, prikazanimi v Preglednici 21, pri začetnem zračnem pritisku 1000 Pa in maksimalni dopustni obremenitvi s snegom v odvisnosti od razlike začetnih višin obeh membran. **159**

Grafikon 23: Začetne višine neobremenjenih spodnjih membran in končne višine teh membran obremenjenih z začetnim zračnim pritiskom 1000 Pa in maksimalno dopustno obremenitvijo s snegom $q_{S,max}$ pri ponjavah z različnimi razponi L in začetnimi višinami nedeformiranih membran $h_{1,0}$ in $h_{2,0}$, prikazanimi v Preglednici 21. **160**

Grafikon 24: Horizontalne in vertikalne komponente reakcij v podporah ponjave z razponom $L = 5,0$ m pri začetnem zračnem pritisku 1000 Pa in obremenitvi s snegom 800 Pa v odvisnosti od razlike začetnih višin obeh membran $h_{1,0}$ in $h_{2,0}$, prikazanih v Preglednici 21. **161**

Grafikon 25: Vsota horizontalnih reakcij v podporah ponjave z razponom $L = 5,0$ m pri začetnem zračnem pritisku 1000 Pa in različnih obremenitvah s snegom q_S v odvisnosti od razlike začetnih višin obeh membran $h_{1,0}$ in $h_{2,0}$, prikazanih v Preglednici 21. **164**

Grafikon 26: Največja dopustna obremenitev s snegom $q_{S,max}$ na simetričnih ponjavah z različnimi razponi L in začetno nedeformirano višino obeh membran $L/10$ v odvisnosti od začetnega zračnega pritiska v ponjavi p_Z . **166**

Grafikon 27: Končna sila v spodnji membrani $P_{2,K}$ in horizontalna komponenta reakcije v podpori $H_{2,K}$ pri simetričnih ponjavah z različnimi razponi L in začetno nedeformirano višino

membran $L/10$ pri največji dopustni obremenitvi s snegom $q_{S,max}$ v odvisnosti od začetnega zračnega pritiska v ponjavi p_Z **168**

Grafikon 28: Končna višina deformirane spodnje membrane $h_{2,K}$ pri simetričnih ponjavah z različnimi razponi L in začetno nedeformirano višino membran $L/10$ pri največji dopustni obremenitvi s snegom $q_{S,max}$ v odvisnosti od začetnega zračnega pritiska v ponjavi p_Z **169**

Grafikon 29: Faktor izpostavljenosti $c_e(z)$ v odvisnosti od višine objekta za različne kategorije terena pri faktorju hribovitosti $c_0(z) = 1,0$ (raven teren) in turbulenčnemu faktorju $k_I = 1,0$. **172**

Grafikon 30: Razlika pritiskov na zgornjo $\Delta p_{1,K}$ in spodnjo $\Delta p_{2,K}$ membrano ponjave z razponom $L = 5,0$ m in začetnima višinama nedeformiranih membran $h_{1,0} = h_{2,0} = 0,5$ m v odvisnosti od velikosti obremenitve s srkom vetra q_W pri začetnem zračnem pritisku 1000 Pa. **180**

Grafikon 31: Končna višina zgornje $h_{1,K}$ in spodnje membrane $h_{2,K}$ pri ponjavi z razponom $L = 5,0$ m in začetnima višinama nedeformiranih membran $h_{1,0} = h_{2,0} = 0,5$ m v odvisnosti od velikosti obremenitve s srkom vetra q_W pri začetnem zračnem pritisku 1000 Pa. **180**

Grafikon 32: Sile v obeh membranah in pripadajoče komponente reakcij v podporah ponjave z razponom $L = 5,0$ m in začetnima višinama nedeformiranih membran $h_{1,0} = h_{2,0} = 0,5$ m v odvisnosti od velikosti obremenitve s srkom vetra q_W pri začetnem zračnem pritisku 1000 Pa. **181**

KAZALO SLIK

Slika 1: Olimpijski stadion Beijing National Stadium, Peking, Kitajska, s polnilom iz tkanine prevlečene s PTFE in ETFE folije med nosilnimi elementi strehe in fasade.	4
Slika 2: Olimpijski vodni center Beijing National Aquatics Centre, Peking, Kitajska s fasado in streho iz pnevmatske membranske konstrukcije iz ETFE folije.	4
Slika 3: Zračno podprt pnevmatski objekt z ojačitveno mrežo kablov (levo) in prosojni pnevmatski objekt iz ojačane ETFE folije (desno).....	5
Slika 4: Zračno podprt pnevmatski objekt z napihnjnimi nosilnimi elementi.	6
Slika 5: Zračno podprta pnevmatska streha z ojačitveno mrežo kablov na stadionu Tokyo Dome, Tokio, Japonska, postavljena leta 1988.	7
Slika 6: Pnevmska streha nogometnega stadiona Metrodome, Minneapolis, Minnesota, ZDA pred poružitvijo decembra 2010 (levo) in po poružitvi (desno).	9
Slika 7: Natezna membranska konstrukcija O2 Arene, London, Velika Britanija, ki jo preko kablov nosijo tlačno in upogibno obremenjeni jekleni stebri.....	11
Slika 8: Natezna membranska nadstrešnica v olimpijskem parku v Münchnu, Nemčija, ki jo je za poletne olimpijske igre oblikoval arhitekt Frei Otto.	12
Slika 9: Natezna pnevmatska streha športnega centra Triglav v Ljubljani iz dvoslojne membrane, izdelane iz poliestrske tkanine prevlečene s PVC, ki je vgrajena med nosilno konstrukcijo iz paličnih lokov.	13
Slika 10: Natezna pnevmatska membranska konstrukcija Allianz Arene, München, Nemčija, iz napihljivih ETFE blazin.....	13
Slika 11: Sedlasta oblika ploskve z označeno sedelno točko (levo) in oblika hiperboličnega paraboloida (desno), ki sta najbolj pogosti obliki natezних membran.	15

Slika 12: Načela »tensegrity« uporabljena na najbolj enostavni konstrukciji »tensegrity« prizmi (levo), na stolpu Needle Tower (sredina), ki ga je oblikoval Kenneth Snelson, in na Skylon stolpu, postavljenem za Britanski festival v Londonu, Velika Britanija, leta 1951.	18
Slika 13: Kabelska streha gimnastične olimpijske arene v Seulu, Južna Koreja, postavljene za olimpijske igre leta 1988.	19
Slika 14: Notranjost gimnastične arene (levo) in konstrukcija njene kabelske kupole (desno).	19
Slika 15: Konstrukcijski elementi kabelske kupole arene v tlorisu (zgoraj) in prerezu (spodaj).	20
Slika 16: Dvigovanje kabelske kupole gimnastične arene prikazano v prerezu kupole (levo) in na enem radialnem kabelskem paličju (desno).	22
Slika 17: Stadion Georgia Dome v Atlanti, ZDA, zgrajen leta 1992, s kabelsko kupolo v obliki kristala.	23
Slika 18: Konstrukcija kabelske kupole stadiona Georgia Dome med gradnjo leta 1992 (levo) in detajl spoja na vrhu tlačnih palic v tlorisu (desno zgoraj) in v prerezu (desno spodaj).	23
Slika 19: Membrana sestavljena iz osnovne tkanine, kjer so osnovne in votkove niti preje spletene skupaj z nitjo, prevlečene s polimerno prevleko.	24
Slika 20: Sestava membrane iz poliestrske tkanine, prevlečene ali laminirane z vinili.	26
Slika 21: Sestava membrane iz tkanine steklenih vlaken, prevlečene s PTFE.	29
Slika 22: Prezračevana fasada iz mreže, oslojene s polimeri, na poslovno-proizvodnem objektu Loging v Novem mestu, ki zmanjšuje stroške klimatizacije za 30%.	33
Slika 23: Rotacijsko varjenje membran z vročim zrakom (levo) in s segretim klinom (desno) ter dielektrično oz. visoko-frekvenčno varjenje (na sredini).	41
Slika 24: Varilna naprava za visoko-frekvenčno varjenje.	42

Slika 25: Rotacijska varilna naprava za varjenje z vročim zrakom.....	44
Slika 26: Rotacijska varilna naprava za varjenje s segretim klinom.	44
Slika 27: Ročno vodena varilna naprava (levo) prostoročna varilna naprava z različnimi nastavki in valjčki za varjenje z vročim zrakom (desno)	45
Slika 28: Standardni tipi šivov membran.	46
Slika 29: Obremenjevanje preizkušanca do porušitve pri metodi s tračnim preizkušancem z delnim vpetjem ob merjenju napetosti in raztezka.	50
Slika 30: Obremenjevanje preizkušanca do porušitve pri metodi s tračnim preizkušancem s polnim vpetjem ob merjenju napetosti in raztezka.	50
Slika 31: Osnovne in votkove niti stkane po običajni ravninski tkalski tehniki (levo) in po »warp-knit weft-inserted« tehniki, kjer so prednapete osnovne in votkove niti spletene skupaj s povezovalnimi nitmi (desno).	52
Slika 32: Preizkušanje trgalne trdnosti membranskega preizkušanca po jezični trgalni metodi (levo) in po trapezoidni trgalni metodi (na sredini) ter oblika preizkušancev s prikazom smeri obremenjevanja pri obeh metodah (desno).....	54
Slika 33: Cepilni adhezijski preizkus.	55
Slika 34: Laboratorijska oprema za pospešeno preperevanje oz. staranje membranskih vzorcev s simulacijo vremenskih vplivov in s fluorescentno UV svetlobo.	58
Slika 35: Z membransko kritino pokrite tribune nogometnega stadiona Soccer City v Johannesburgu, Južna Afrika, ki je leta 2010 na World Architecture Festival Awards (WAF Awards) prejel nagrado »World's Best Sport Building«.	65
Slika 36: Green Point Stadium v Cape Townu, Južna Afrika, z membransko fasado in kritino (levo) in luksuzni hotel Burj Al Arab v Dubaju s fasado iz bele membrane (desno).....	66

Slika 37: Rdeča membranska fasada Hale 12 v trgovskem centru BTC v Ljubljani (levo) in zložljiva pnevmatska membranska streha avditorija v Portorožu (desno).	66
Slika 38: Primeri uporabe membran za izdelavo fasad.	68
Slika 39: Primeri uporabe membran za izdelavo fleksibilnih natezних membranskih konstrukcij.	68
Slika 40: Primeri uporabe membran za izdelavo mobilnih šotorov in skladiščnih objektov. ..	74
Slika 41: Spekter sončne energije.....	78
Slika 42: Načini prenosa toplote zaradi sončnega sevanja preko ovoja objekta.	80
Slika 43: Delovanje low-e prevleke na membranah iz oslojenih tkanin.	82
Slika 44: Možnosti kombinacije membrane z low-e prevleko in svetlobo prepustne membrane brez low-e prevleke.	83
Slika 45: Testna skladiščna hala v lasti podjetja Logging, ki jo ima v najemu družba Union v Ljubljani.	85
Slika 46: Pozicije 4 merilnih točk znotraj testne hale in 1 merilne točke zunaj testne hale.....	86
Slika 47: Temperatura zraka v posameznih merilnih točkah v času najvišje zunanje temperature 1.8.2008 ob 17:14.	90
Slika 48: Relativna vlažnost zraka v posameznih merilnih točkah v času najvišje zunanje temperature 1.8.2008 ob 17:14.	90
Slika 49: Variante različnih strešnih kritin testne hale, za katere so bile izvedene termične simulacije.....	95
Slika 50: Dvorana športnega centra Triglav v Ljubljani s streho iz dvoslojnih svetlobo prepustnih pnevmatskih ponjav, pritrjenih na jeklene nosilne loke iz prostorskega paličja, prečno povezane z distančniki.....	106

- Slika 51: Skladiščni objekt s strešnim sistemom iz dvoslojnih pnevmatskih ponjav za skladiščenje proizvodov firme Michelin pred zaključkom gradnje, eden izmed mobilnih objektov, ki ga podjetje Logging oddaja v najem. **106**
- Slika 52: Skladišče farmacevtskih izdelkov tovarne zdravil Krka d.d. v Novem mestu s streho iz dvoslojnih ponjav, ki pri tleh objekta pri dnevni svetlobi zagotavljajo osvetljenost 200 lux, kar zadošča za branje oznak na skladiščnem blagu brez potrebne dodatne osvetlitve. **107**
- Slika 53: Aluminijski profil za pritrditev ponjave preko privarjenega robnega traku oz. kedra (levo) in naprava za izdelavo kedra (desno), ki se ga na robovih ponjave zvari skupaj z obema slojema membrane. **107**
- Slika 54: Loggingov detajl pritrjevanja ponjav na nosilne okvirje jeklene konstrukcije preko tipskega aluminijskega profila (profil modre barve), privijačenega na U profil, ki se ga privari na jeklen nosilni okvir, s tesnjenjem stika preko privihanih trakov membrane in dodano toplotno izolacijo na stiku (na sliki v oranžni barvi). **108**
- Slika 55: Prečni prerez igle, ki plava na površju vode zaradi sil površinske napetosti. **110**
- Slika 56: Sile površinske napetosti, ki delujejo na majhen diferencialni delec površine, obremenjen z razliko pritiskov v normalni smeri na njegovo površino. **111**
- Slika 57: Sile v vrvi (temno modro) in v nepomičnih podporah (rdeče) zaradi enakomerno porazdeljene obremenitve (svetlo modro). **112**
- Slika 58: Dimenzije zgornje in spodnje membrane v dvoslojni ponjavi. **113**
- Slika 59: Hidravlična naprava z video merilcem deformacij med obremenjevanjem tračnega preizkušanca. **117**
- Slika 60: Cone za določanje obtežbe s snegom na tleh po nacionalnem dodatku Evrokod standarda SIST EN 1991-1-3:2004/A101. **137**

Slika 61: Sile v membranah dvoslojne pnevmatske ponjave in komponente reakcij v podporah pri obremenitvi z zračnim pritiskom (zgoraj) in z dodatno obremenitvijo s snegom v primeru, ko je ta manjša od začetnega zračnega pritiska (na sredini) in obratno (spodaj).	139
Slika 62: Primer zunanjih obremenitev zaradi vetra na ploskve stavbe.	171
Slika 63: Razdelitev Slovenije na cone za določitev temeljne vrednosti osnovne hitrosti vetra.	171
Slika 64: Razdelitev zgornje ploskve strehe na področja pri smeri vetra pravokotno na sleme (levo) in pri smeri vetra vzporedno s slemenom (desno).	174
Slika 65: Sile v membranah dvoslojne pnevmatske ponjave in komponente reakcij v podporah pri obremenitvi z zračnim pritiskom (zgoraj) in z dodatno obremenitvijo s srkom vetra (spodaj).	175
Slika 66: Jeklena nosilna konstrukcija objekta s strešnim sistemom iz dvoslojnih pnevmatskih ponjav.	188
Slika 67: Prečni prerez jeklene konstrukcije s strešnim sistemom iz dvoslojnih pnevmatskih ponjav.	189
Slika 68: Računski model distančnika obremenjenega z osno silo in upogibnim momentom.	190
Slika 69: Priključek distančnika in povezij na stojino prečke okvilja in pritrnitev tipskega aluminijastega profila na zgornjo pasnico prečke preko kratkih HOP U profilov.	191
Slika 70: Distančnik in napenjalna cev v kapu objekta v tlorisnem pogledu.	192
Slika 71: Distančnik in napenjalna cev v kapu objekta v 3D pogledu.	193
Slika 72: Pritrditev krajšega roba ponjave preko cevi v žepu ponjave na napenjalno cev.	193

1 UVOD

Vodotesni membranski materiali se kot različne vrste zaščitnih materialov uporabljajo že stoletja, kljub temu pa so šele v zadnjih 50 letih raziskovalna in razvojna prizadevanja privedla do pomembnih dosežkov na področju oblikovanja oslojenih tkanin. To so membrane iz osnovne tkanine iz poliestrskih ali steklenih vlaken prevlečene s polimeri. Običajno so poliestrske tkanine prevlečene s PVC, tkanine iz steklenih vlaken pa s PTFE, bolj poznanem pod blagovno znamko Teflon®. V takšni kompozitni membrani nosilnost in dobre mehanske lastnosti zagotavlja predvsem osnovna tkanina, funkcija polimerne prevleke pa je, da osnovno tkani ščiti pred propadanjem zaradi zunanjih vplivov, preprečuje prepuščanje vode in zraka, daje membrani varilnost, požarno odpornosti ter možnost široke palete barv.

Uporaba visoko zmogljivih oslojenih tkanin se je v zadnjih 30 letih močno razmahnila na področju izdelave različnih arhitekturnih konstrukcij. Na primer, kdo bi si pred 50 leti lahko zamislil, da bi bilo na milijone dolarjev vrednega inventarja v objektu zanesljivo zaščitene ga pred neugodnimi zunanjimi vplivi z membranami iz oslojenih tkanin, ki tehtajo manj kot 1.000 g/m²? Ali pa, da bi 80.000 navijačev gledalo nogometno tekmo na stadionu pokritem z zračno-podprto konstrukcijo iz steklenih vlaken prevlečenih s Teflon®-om?

Razvile so se 3 osnovne vrste arhitekturnih konstrukcij iz visoko zmogljivih membranskih oslojenih tkanin: pnevmatske konstrukcije, natezne membranske konstrukcije in kabelske kupole. Te konstrukcije lahko tekmujejo tudi z običajnimi sistemi gradnje z dolgo življenjsko dobo. Danes arhitekturne konstrukcije iz poliestrske tkanine prevlečene s PVC zagotavljajo kakovostne fizikalne in mehanske lastnosti za obdobje od 15 do 20 let, arhitekturne konstrukcije iz tkanine steklenih vlaken prevlečenih s PTFE pa tudi do 25 let.

Preden lahko arhitekti in inženirji začnejo uporabljati membrane iz oslojenih tkanin, morajo dobro poznati mehanske in fizikalne lastnosti teh inovativnih arhitekturnih membran. Nekatere lastnosti so podobne lastnostim običajnih gradbenih materialov, vendar pa je večina lastnosti identičnih lastnostim fleksibilnih materialov. Najprej je potrebno vedeti, kako se oslojene tkanine proizvajajo in oblikujejo. Arhitekturne membrane so sestavljene iz štirih komponent: osnovne tkanine, adhezivnega oz. lepilnega sloja, polimerne prevleke in

površinske zaščitne prevleke. Vsaka od naštetih komponent prispeva k različnim lastnostim končnega produkta.

Število konstrukcij iz arhitekturnim membran bo v prihodnosti še raslo in se širilo po svetu. Uspešno dolgoročno delovanje tega gradbenega koncepta bo bilo odvisno od ustreznega izbora in uporabe membran, zato morajo arhitekti, inženirji in lastniki objektov razumeti njihove fizikalne in mehanske lastnosti ter v proces nabave vključiti tudi ustrezne laboratorijske preizkuse membran.

Ta diplomska naloga se vsebinsko deli na 3 dele. V 1. delu, ki zajema poglavja od 2 do 7, so predstavljene vrste arhitekturnih konstrukcij, ki jih je možno oblikovati iz tovrstnih membran, opisane so različne vrste oslojenih tkanin in njihova sestava, postopek varjenja membran v ponjave za vgradnjo na jekleno podkonstrukcijo objekta ter fizikalne in mehanske lastnosti membran z opisi laboratorijskih preizkusov posameznih lastnosti.

2. del diplomske naloge predstavlja poglavje 8, ki govori o energetsko učinkovitih ponjavah iz oslojenih tkanin z low-e prevleko. Low-e prevleka ima zelo nizko emisivnost, angleško »low emissivity«, iz česar tudi izhaja njeno ime. Nizka emisivnost poskrbi, da poleti ponjava večino absorbirane toplote zaradi sončnega sevanja odda v zunanjo okolico in ne v notranjost hale, zaradi česar se hala ne pregreva, s tem pa se zmanjšajo stroški energije za hlajenje hale. Pozimi low-e prevleka na ponjavi deluje kot infrardeče ogledalo, saj reflektira oz. odbija toploto iz notranjega prostora nazaj v halo in ji tako preprečuje, da bi prešla v zunanjo okolico, zaradi česar se znižajo tudi stroški energije za ogrevanje hale.

V 3. vsebinskem delu diplomske naloge, ki ga predstavlja zadnje poglavje 9, pa je prikazan statični račun dvoslojne pnevmatske ponjave, sestavljene iz dveh slojev oslojenih tkanin, ki ju ločuje stisnjen zrak pod pritiskom. V tem poglavju je predstavljen postopek izračuna sil v zgornji in spodnji membrani ponjave ter pripadajočih komponent reakcij v podporah pri obremenitvi z notranjim zračnim pritiskom v ponjavi ter obnašanje takšne ponjave pri spremenljivi zunanji obremenitvi s snegom, ki je lahko tudi večja od začetnega zračnega pritiska v ponjavi. Vsakemu od naštetih delov diplomske naloge sledi zaključek, ki povzema ugotovitve posameznega vsebinskega dela.

2 MEMBRANSKE KONSTRUKCIJE

Membranske konstrukcije so ena izmed vrst prostorskih konstrukcij iz napetih membran.

Običajne membrane so izdelane iz:

- tkanine oslojene s polimeri (npr. tkanina iz poliestrskih vlaken prevlečena s polivinil kloridom (PVC), tkanina iz steklenih vlaken prevlečena s politetrafluoretlenom (PTFE) ali PVC),
- transparentne polietilenske (PE) tkanine ali
- folije (npr. etilentetrafluoretlen (ETFE) ali PVC folija).

Glede na obliko lahko membranske konstrukcije razdelimo na:

- pnevmatske konstrukcije (ang. pneumatic structures),
- natezne membranske konstrukcije (ang. tensile membrane structures) in
- kabelske kupole (ang. cable domes).

Pri zgoraj naštetih vrstah membranskih konstrukcij membrane sodelujejo skupaj s kabli, stebri, okvirji in ostalimi konstrukcijskimi elementi, da dosežajo svojo obliko in stabilnost le te. Obstajajo pa tudi konstrukcije z membranami, kjer membrane v konstrukcijskih elementih ne povzročajo obremenitev, temveč predstavljajo nekakšne vrste polnilo. Takšna konstrukcija je npr. Beijing National Stadium, imenovan tudi »Bird's Nest stadium« (v prevodu »Ptičje gnezdo«), zgrajen za olimpijske igre v Pekingu leta 2008, kjer tkanina iz steklenih vlaken prevlečena s PTFE in ETFE folija le zapolnjujeta prostore med velikimi jeklenimi nosilnimi elementi, ki gradijo mogočno streho in fasado (Slika 1). Med membranske konstrukcije sodijo tudi objekti z membranami, napetimi preko nosilnih okvirjev. Beijing National Aquatics Center, ki stoji poleg prej omenjenega olimpijskega stadiona v Pekingu, imenovan tudi »Water cube« (v prevodu »Vodna kocka«), je primer kombinacije pnevmatske in natezne membranske konstrukcije, kjer so napihnjene blazine iz ETFE folije vgrajene med jekleno nosilno podkonstrukcijo (Slika 2).

(Koch, K. 2004. Membrane Structures. London, Prestel: 224 str.)



Slika 1: Olimpijski stadion Beijing National Stadium, Peking, Kitajska, s polnilom iz tkanine prevlečene s PTFE in ETFE folije med nosilnimi elementi strehe in fasade.



Slika 2: Olimpijski vodni center Beijing National Aquatics Centre, Peking, Kitajska s fasado in streho iz pnevmatske membranske konstrukcije iz ETFE folije.

2.1 Pnevmatске konstrukcije

Pnevmatски objekt je vsak objekt, ki dosega konstrukcijsko stabilnost z notranjim zračnim pritiskom, ki napihne fleksibilni ovoj (t.i. nosilno membrano), tako da je zrak glavni nosilni medij objekta. Notranji zračni pritisk se ustvarja s pomočjo opreme za črpanje zraka (ventilatorji ali kompresorji). Takšni objekti nimajo nosilne konstrukcije, zato morajo biti ventilatorji oz. kompresorji ves čas vključeni, da vzdržujejo konstantni zračni tlak v objektu oz. v napihnutih nosilnih elementih objekta. Zračno podprti objekti delujejo na enak način

kot milni mehurček na površini vode, katerega obliko stabilizira izključno zračni pritisk znotraj njega. Ovoj pnevmatskih objektov je običajno izdelan iz sintetičnih tkanin iz poliestrskih ali steklenih vlaken prevlečenih s polimeri ali iz ojačanih folij. Te membrane so lahko še dodatno ojačane z vgrajenimi jeklenimi kabli. V pnevmatske objekte se vstopa preko zračnih zapor, izvedenih z dvojnimi ali vrtljivimi vrati. Prvi je takšen objekt leta 1946 uporabil ameriški inženir Walter Bird za pokritje radarske antene v ZDA, nato pa so postali priljubljeni v mnogih državah sveta. Koncept pnevmatskih objektov je postal v ZDA še posebej popularen potem, ko je inženir David H. Geiger postavil pnevmatski paviljon na Expo '70 v Osaki na Japonskem leta 1970.

Pnevmatske konstrukcije delimo na 3 vrste:

- zračno podprte pnevmatske konstrukcije (ang. air-supported pneumatic structures), ki jih v celoti podpira zrak pod pritiskom ($0,1-1,0 \text{ kN/m}^2$), vpihovan direktno pod membranski ovoj (Slika 3),
- zračno napihljive pnevmatske konstrukcije (ang. air-inflated pneumatic structures), kjer so z zrakom pod visokim pritiskom ($30-700 \text{ kN/m}^2$) napihnjeni le nosilni elementi objekta in
- zračno podprte pnevmatske konstrukcije z napihljenimi nosilnimi elementi (kombinacija obeh zgoraj naštetih pnevmatskih konstrukcij) (Slika 4).



Slika 3: Zračno podprt pnevmatski objekt z ojačitveno mrežo kablov (levo) in prosojni pnevmatski objekt iz ojačane ETFE folije (desno).

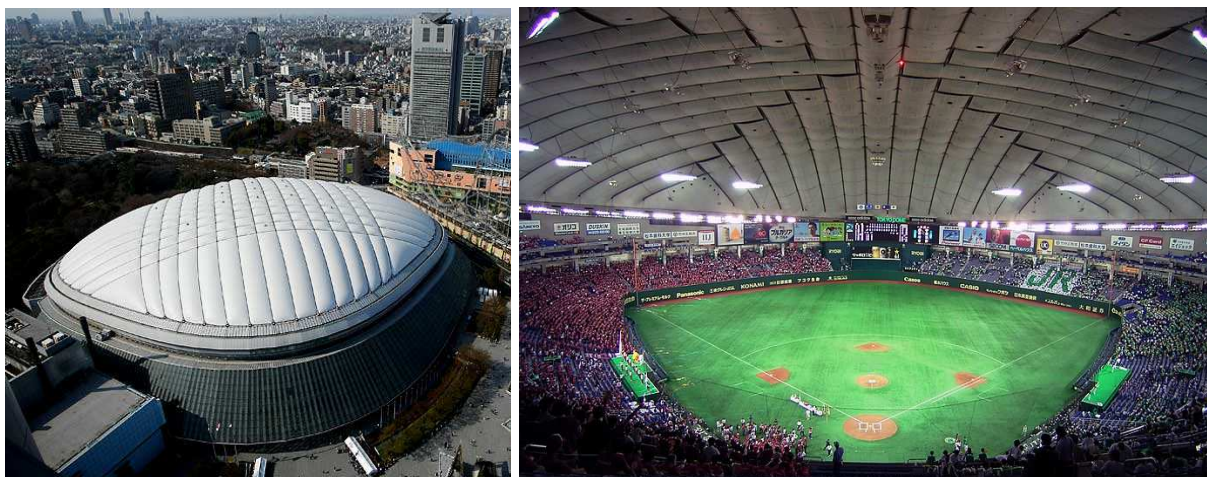


Slika 4: Zračno podprt pnevmatski objekt z napihnjnimi nosilnimi elementi.

Običajno so pnevmatski objekti kupolaste oblike, saj ta oblika zagotavlja največjo prostornino pri najmanjši površini materiala in s tem tudi nižjo ceno objekta. Da se ohranja stabilnost konstrukcije, mora biti objekt ves čas pod tlakom, ki je enak ali večji od kateregakoli zunanega pritiska na konstrukcijo (npr. pritisk vetra, porazdeljena teža snega,...). Pnevmski objekti imajo vgrajene sisteme ventilatorjev oz. kompresorjev, ki vzdržujejo konstantni notranji tlak in nadomestijo vsako uhajanje zraka, zato za ohranjanje stabilnosti konstrukcije ni nujno, da je objekt ves čas nepredušno zaprt, vendar pa morajo biti vsi vhodi opremljeni z dvojnimi ali vrtljivimi vrati (t.i. zračna zapora). Zračno podprti objekti so na tla fiksirani s težkimi utežmi, s sidri, s temelji ali s kombinacijo naštetega. Objekt je lahko v celoti ali delno zračno podprt, lahko pa je zračno podprta le streha (Slika 5). Objekti, ki jih v celoti podpira notranji zračni pritisk, so lahko grajeni kot začasni ali stalni objekti, medtem ko so objekti, kjer je z notranjim zračnim pritiskom podprta le streha, grajeni kot stalni objekti.

2.1.1 Oblika

Oblika zračno-podprtih objektov je omejena in mora biti takšna, da je celotna površina ovoja pod enakomerni notranjim zračnim pritiskom, v nasprotnem primeru, bi se na ovoju pojavile gube in območja koncentrirane napetosti, kar lahko povzroči porušitev konstrukcije. V praksi imajo vse napihnjene površine dvojno ukrivljenost, zato so najpogostejše oblike pnevmatskih konstrukcij poloble, ovali in polcilindri z ukrivljenimi konci.



Slika 5: Zračno podprta pnevmatska streha z ojačitveno mrežo kablov na stadionu Tokyo Dome, Tokio, Japonska, postavljena leta 1988.

2.1.2 Materiali

Materiali, ki se uporabljajo za zračno podprte ovoje objektov, so podobni tistim, ki se jih uporablja za natezne konstrukcije. To so sintetične tkanine iz steklenih vlaken ali poliestra, ki se jih z namenom, da se prepreči njihovo propadanje zaradi vlage in ultravijoličnega sevanja, prevleče s polimeri kot so PVC in PTFE (bolj poznan pod blagovno znamko Teflon®). Odvisno od uporabe in lokacije, imajo lahko pnevmatske konstrukcije notranje obloge iz lažjih materialov za izolacijo ali akustiko. Membranski ovoj pnevmatskih konstrukcij je lahko tudi dvoslojen, pri čemer se prostor med obema slojema napihne z zrakom in se s tem zagotovi boljšo toplotno izolacijo, poleg tega pa lahko vpihovanje toplega zraka med oba sloja pomaga tudi pri topljenju snega, ki se nabere na ovoju.

2.1.3 Zračni pritisk

Notranji zračni pritisk v zračno podprtih objektih ni tolikšen, kot bi večina ljudi pričakovala in se ga v objektu sploh ne občuti. Vrednost potrebnega notranjega zračnega pritiska je odvisna od teže materiala, teže obešenih inštalacij (razsvetljava, prezračevanje, ipd.) ter obremenitve zaradi vetra in snega, vendar ta predstavlja majhen delež atmosferskega tlaka. Notranji zračni pritisk se pogosto meri v centimetrih vodnega stolpca in se giblje od 0,8 cm vodnega stolpca za minimalni notranji pritisk do 7,6 cm vodnega stolpca za maksimalni

notranji pritisk. 2,5 cm vodnega stolpca je standardni notranji zračni pritisk za normalne razmere obratovanja (1 cm vodnega stolpca je enak pritisku 1 mBara oz. 100 Pa).

(Lutes, D. A. 1971. Air-Supported Structures. Canadian Building Digests: 137 str.)

2.1.4 Obremenitve

Glavne obremenitve, ki delujejo na zračno podprti ovoj so notranji zračni pritisk, veter in obremenitev s snegom. Da objekt prenaša spremenljive obremenitve snega in vetra, mora biti vpihovanje zraka ustrezno prilagojeno. Sodobne pnevmatske konstrukcije imajo računalniško vodene mehanske sisteme, ki zaznavajo dinamične obremenitve in jih izenačijo z vpihovanjem zraka.

Nevarnost nenadne porušitve konstrukcije ovoja je skoraj zanemarljiva, saj se konstrukcija v primeru velike obremenitve (sneg ali veter) najprej deformira ali povesi. Če se te opozorilne znake ignorira ali spregleda, pa lahko ovojnica zaradi kopičenja ekstremnih obremenitev počí, kar pripelje do nenadnega padca notranjega zračnega pritiska in posledično do porušitve.

Zračni pritisk na ovoj pnevmatske konstrukcije je enak pritisku na tla v notranjosti objekta, zato je potrebno ovoj dobro pritrčiti na tla oz. na spodnjo konstrukcijo v primerih, kjer je zračno podprta le streha. Pri objektih z velikimi razponi se za sidranje in stabilizacijo konstrukcije v ovoj vgradijo ojačitveni kabli ali mreže. Vsi načini sidranja zahtevajo neko obliko balasta. Včasih so za balast uporabljali vreče peska, betonske bloke, opeko ipd., ki so jih namestili po obodu objekta, danes pa večina proizvajalcev izdeluje svoje sisteme sidranja. (Koch, K. 2004. Membrane Structures. London, Prestel: 224 str.)

Za pnevmatske strehe je najbolj problematična obremenitev s snegom, saj je sneg porazdeljen po celotni strehi in tako je lahko njegova skupna teža na strehi z veliko površino ogromna. Sneg je potrebno z zračno podprtih streh sprotno odstranjevati, vendar lahko v času snežnega meteža v kratkem času zapade veliko snega, ki ga je možno odstraniti šele potem, ko se vremenske razmere umirijo. V veliko primerih po svetu se je zgodilo, da so pnevmatske strehe pod vplivom bremena snega popustile in se porušile. Ena izmed najbolj odmevnih porušitev se je zgodila decembra 2010, ko se je porušila pnevmatska streha stadiona za

ameriški nogomet Hubert H. Humphrey Metrodome v Minneapolisu, Minnesota, ZDA (Slika 6). Stadion, zgrajen leta 1982, je bil znan po svoji zračno podprti strehi iz prevlečene tkanine iz steklenih vlaken, ki jo je stabiliziral zračni tlak v notranjosti stadiona. Stadion Metrodome je bil drugi največji športni objekt s kupolasto streho, ki jo je v celoti podpiral zračni pritisk (največji je Pontiac Silverdome, Pontiac, Michigan, ZDA). Streha, ki jo je podpiral pozitiven zračni pritisk, je potrebovala 120 m³/s zraka, da je ostala napihnjena. Konstantni zračni pritisk pod streho je vzdrževalo 20 ventilatorjev z močjo 90 konjskih moči. Streha je bila izdelana iz dveh slojev: zunanji sloj debeline 0,8 mm je bil izdelan iz tkanine iz steklenih vlaken, prevlečene s Teflonom (PTFE), notranji sloj debeline 0,4 mm pa iz akustične tkanine iz steklenih vlaken. Prostor med obema slojema je bil zapolnjen z zrakom, ki je strehi zagotavljal toplotno izolacijo, pozimi pa so med oba sloja vpihovali topel zrak, ki je pomagal stopiti sneg na strehi. Poleg tega so se morali na streho povzpeti tudi delavci in s pomočjo pare in vroče vode iz visokotlačnih naprav s strehe odstraniti preostali nakopičen sneg. V času izgradnje je imela streha stadiona s 40.500 m² tkanine največji razpon, do takrat dosežen na ta način. Celotna streha je tehtala 260 ton, imela je razpon 60 m in je bila na najvišji točki visoka za približno 16 nadstropij. Kljub temu, da je bila v času porušitve zaradi varnosti notranjost stadiona segreta na 27°C, je 43 cm zapadlega snega povzročilo trganje in porušitev strehe. (Engineering Failures, Case Studies in Engineering. <http://engineeringfailures.org/?p=391/> (14.10.2010).)



Slika 6: Pnevmatična streha nogometnega stadiona Metrodome, Minneapolis, Minnesota, ZDA pred porušitvijo decembra 2010 (levo) in po porušitvi (desno).

Prednosti pnevmatskih objektov:

- nizka teža,
- možnost pokrivanja velikih razponov brez vmesnega podpiranja,
- montažna gradnja,
- enostavna in hitra montaža, demontaža,
- občutno nižji začetni stroški,
- mobilnost,
- ovoj iz membran različnih barv, velikosti in oblik,
- prepustnost za sončno svetlobo in radijske valove.

Slabosti pnevmatskih objektov:

- neprekinjeno delovanje ventilatorjev oz. kompresorjev za vzdrževanje tlaka,
- pogoste oskrbe z električno energijo v sili,
- ob izgubi pritiska ali popustitvi membrane se streha poruši,
- ne dosega izolacijskih vrednosti trdih sten,
- večja poraba energije za ogrevanje in hlajenje,
- manjša nosilnost,
- relativno kratka življenjska doba,
- slaba odpornost na ogenj in
- slaba zvočna izolacija.

Uporaba pnevmatskih objektov:

- trajni inčasni objekti za različne namene (proizvodni in skladiščni šotori, športno-rekreacijski objekti, dvorane za predstave, trgovine ali razstave),
- mobilne stavbe (vzdrževalne postaje, postaje za zdravstveno pomoč, klubske stavbe, knjižnice),
- transportni in hidro-inženirski objekti (mostovi, jezovi, zapore) in
- pomožni objekti pri opravljanju gradbenih del (dvigala, zimska zatočišča, opaževanje).

2.2 Natezne membranske konstrukcije

Natezne konstrukcije so konstrukcije, ki jih sestavljajo elementi obremenjeni izključno z nateznimi obremenitvami, brez tlačnih obremenitev ali upogibnih momentov. Večina natezних konstrukcij je podprtih z različnimi oblikami tlačnih in upogibnih elementov, kot so stebri (npr. pri O2 Areni v Londonu, Velika Britanija (Slika 7), bivši Millennium Dome), tlačni obroči in nosilci. Natezne membranske konstrukcije so najbolj pogosto uporabljene kot strehe, saj zelo ekonomično in atraktivno premostijo velike razpone.



Slika 7: Natezna membranska konstrukcija O2 Arene, London, Velika Britanija, ki jo preko kablov nosijo tlačno in upogibno obremenjeni jekleni stebri.

Ruski inženir Vladimir Grigorjevič Šuhov je bil eden izmed prvih, ki je začel razvijati praktične izračune napetosti in deformacij natezних konstrukcij, lupin in membran. Oblikoval je osem natezних tankih jeklenih lupin, ki so pokrivalo razstavne paviljone sejma Nižni Novgorod leta 1986 s skupno površino 27.000 m². Antonio Gaudi je uporabil ta koncept v obratnem smislu pri gradnji cerkve Colonia Guella, ki je bila obremenjena izključno s tlačnimi napetostmi. Izdelal je viseči natezni model cerkve za izračun tlačnih sil in eksperimentalno določil geometrijo stebrov in obokov. Koncept je kasneje uporabil nemški arhitekt in inženir Frei Otto ter Luis René Gutierrez Alcalá. Slednji je prvič uporabil to idejo za gradnjo nemškega paviljona na Expo 67 v Montrealu, za njim pa je idejo uporabil še Frei Otto pri gradnji strehe olimpijskega stadiona za poletne olimpijske igre v Münchnu leta 1972

(Slika 8). Frei Otto je olimpijski stadion zasnoval tako, da neprekinjene natezne površine nadstrešne membrane prebadajo številni jekleni stebri, ki preko jeklenih kablov nosijo membrano in omogočajo razgibano obliko njenih ukrivljenih površin. Natezno membrano je bočno stabiliziral s pomočjo mreže manjših kablov, priključenih na večje jeklene kable, ki se v prečni smeri raztezajo preko celotnega razpona nadstrešnice in so na obeh straneh pritrjeni v betonske temelje.



Slika 8: Natezna membranska nadstrešnica v olimpijskem parku v Münchnu, Nemčija, ki jo je za poletne olimpijske igre oblikoval arhitekt Frei Otto.

2.2.1 Materiali

Običajno se za izdelavo natezних membranskih konstrukcij uporabljajo membrane iz oslojenih tkanin, kot so tkanine iz steklenih vlaken, prevlečenih s PTFE, in poliestrske tkanine, prevlečene s PVC. To so tkani materiali, ki imajo običajno različne natezne trdnosti v pravokotnih smereh, saj lahko osnovne niti vlaken prenašajo večje obremenitve kot votkove niti vlaken, ki potekajo pravokotno nanje. Natezne membranske konstrukcije so lahko izdelane tudi iz več plasti membran, običajno iz dveh plasti, med katere se vpihuje zrak, tako da se oblikujejo toge blazine, ki membranski konstrukciji zagotovijo dobre izolacijske lastnosti in estetski efekt (Slika 9).



Slika 9: Natezna pnevmatska streha športnega centra Triglav v Ljubljani iz dvoslojne membrane, izdelane iz poliestrske tkanine prevlečene s PVC, ki je vgrajena med nosilno konstrukcijo iz paličnih lokov.

Natezne membranske konstrukcije se lahko izdelajo tudi iz ETFE filma, bodisi kot ena plast bodisi v obliki napihljive blazine, kot npr. pri Allianz Areni, München, Nemčija (Slika 10). Na ETFE blazine se lahko izdelajo tudi različni vzorci, ki omogočajo, da skozi blazine prehajajo različne stopnje svetlobe, ko so te napihnjene na različne nivoje. Takšne natezne pnevmatske konstrukcije so najpogosteje podprte z jekleno podkonstrukcijo, saj svoje nosilnosti ne morejo pridobiti iz dvojne ukrivljenosti.



Slika 10: Natezna pnevmatska membranska konstrukcija Allianz Arene, München, Nemčija, iz napihljivih ETFE blazin.

2.2.2 Oblika

Večina nateznih membranskih konstrukcij pridobi nosilnost iz svoje dvojno ukrivljene oblike. S tem, ko se membrane napnejo v obliko z dvojno ukrivljenostjo, dobijo dovolj togosti, da prenašajo obremenitve, ki so jim izpostavljene (npr. obremenitev z vetrom in snegom). Da se membrani vsili ustrezna dvojna ukrivljenost, je najpogosteje potrebno membrano oz. njeno nosilno konstrukcijo prednapeti.

Obnašanje objektov, katerih nosilnost je odvisna od prednapetja, ni linearno, zato je bilo do 1990-ih let oblikovanje tovrstnih konstrukcij zelo zahtevno. Najpogostejši način za načrtovanje dvojne ukrivljenosti membran je bila izdelava pomanjšanih modelov dejanskih objektov, s pomočjo katerih so lahko projektanti razumeli njihovo obnašanje in izvedli raziskave za določanje oblike. Takšni pomanjšani modeli so bili pogosto izdelani iz hlačnih nogavic ali filma iz milnice, ki se obnašajo na podoben način kot arhitekturne membrane, saj ne morejo prevzeti strižnih obremenitev. Filmi iz milnice imajo enakomerno napetost v vseh smereh in za doseganje določene oblike potrebujejo sklenjeno obrobo. Vedno zavzamejo obliko z najmanjšo površino, saj je za takšno obliko potrebna minimalna energija. Slabost modelov iz takšnih filmov pa je ta, da jih je zelo težko meriti. Poleg tega lahko pri uporabi filmov z veliko površino njihova lastna teža močno in negativno vpliva na obliko. Dandanes se za določanje oblike membran uporabljajo računalniški programi za nelinearne numerične analize ali analize s končnimi elementi.

Osnovna enačba ravnovesja za membrane z ukrivljenostjo v dveh smereh je:

$$w = \frac{t_1}{R_1} + \frac{t_2}{R_2}$$

Kjer sta:

- R_1 in R_2 glavna polmera ukrivljenosti pri filmih iz milnice ali smeri osnove in votka pri tkaninah,
- t_1 in t_2 napetosti v ustreznih smereh,
- w pa je obremenitev na m^2 .

Za prednapeto in neobremenjeno površino ($w = 0$) velja: $\frac{t_1}{R_1} = -\frac{t_2}{R_2}$

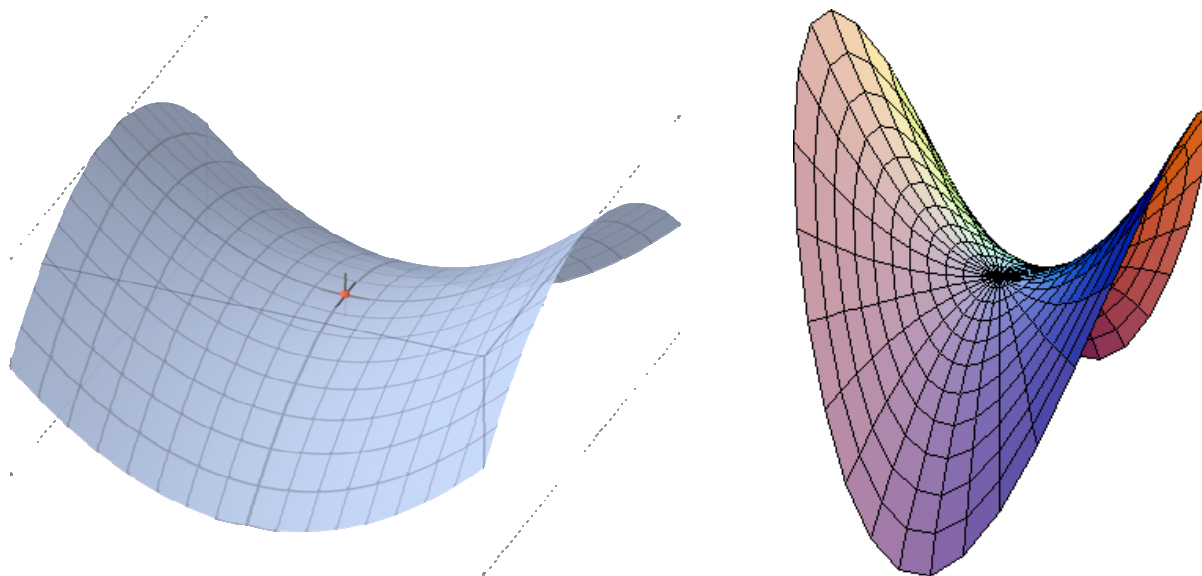
Pri filmu iz milnice so napetosti površine enake v obeh smereh, zato zanj velja: $R_1 = -R_2$

Linije glavne ukrivljenosti ne vijugajo in se vedno sekajo pod pravim kotom. Geodetska linija je najkrajša linija med dvema točkama na površini. Te linije se običajno uporabljajo za določanje linij rezanja oz. šivnih linij. Razlog za to je relativna ravnost šivov med posameznimi odrezanimi kosi membrane, kar se odraža z manjšim odpadkom membrane in tesnejšo povezavo spojenih kosov membran.

Končna oblika natezne membranske konstrukcije je odvisna od:

- oblike tkanine ali vzorca vezave vlaken,
- geometrije podporne konstrukcije (stebri, kabli, nosilci, natezni obroči,...),
- prednapetosti, nanesene na membrano ali na njeno podporno konstrukcijo.

Obstaja veliko različnih dvojno ukrivljenih oblik. Mnoge med njimi imajo posebne matematične lastnosti. Najbolj osnovna dvojno ukrivljena oblika natezних membran je sedlasta oblika, ki je lahko hiperbolični paraboloid (niso vse sedlaste oblike hiperbolični paraboloidi) (Slika 11). To je oblika dvojne ukrivljenosti, kjer sta glavni ukrivljenosti nasprotnega predznaka. Druge oblike natezних membran so sedla različnih polmerov, stožčaste oblike šotorov in vse njihove kombinacije.



Slika 11: Sedlasta oblika ploskve z označeno sedelno točko (levo) in oblika hiperboličnega paraboloida (desno), ki sta najbolj pogosti obliki natezних membran.

2.2.3 Obremenitev

Pomembno je, da končna oblika membrane ne dopušča zadrževanje vode na konstrukciji, saj lahko to membrano deformira in vodi do lokalne porušitve ali celo porušitve celotne konstrukcije. Tudi obremenitev s snegom je lahko resen problem za natezne membranske konstrukcije, saj sneg z njih pogosto ne odteče tako kot voda. Nekatero membranske konstrukcije, ki so nagnjene k zadrževanju snega, imajo vgrajeno ogrevanje za taljenje snega, ki se nakopiči na njih.

2.2.4 Prednapetost

Prednapetost je namerno nanesena napetost v konstrukcijske elemente, poleg lastne teže in ostalih spremenljivih obremenitev, ki jih te lahko nosijo. Uporablja se za to, da običajno zelo fleksibilni konstrukcijski elementi ostanejo togi pod vsemi možnimi obremenitvami. Pogost primer prednapetja v vsakdanjem življenju je regalna enota, kjer so police oprte na žice, ki potekajo od tal do stropa. Žice držijo police na fiksnem mestu, ker so napete, saj sistem ne bi deloval, če bi bil žice ohlapne. Prednapetost se lahko nanese na membrano z raztegovanjem le te, z vleko njenih robov ali s prednapetimi kabli, ki podpirajo membrano in s tem spreminjajo njeno obliko. Stopnja prednapetosti določa obliko natezne membranske konstrukcije.

(Koch, K. 2004. Membrane Structures. London, Prestel: 224 str.)

2.3 Kabelske kupole

»Tensegrity« je konstrukcijski princip, ki temelji na uporabi izoliranih tlačnih komponent znotraj mreže kontinuirane natezne napetosti. Izraz »tensegrity« je izpeljal Buckminster Fuller kot okrajšavo za »**tensional integrity**«, kar v prevodu pomeni »natezna celovitost«. Drugo poimenovanje tega konstrukcijskega principa, ki ga je večinoma uporabljal umetnik Kenneth Snelson, ki je oblikoval stolp Needle Tower (Slika 12, sredina), pa je »floating compression«. Princip deluje tako, da se tlačni elementi (običajno palice in podporniki) ne dotikajo med seboj, prednapeti natezni elementi (običajno kabli ali vrvi) pa sistem prostorsko razprejo.

2.3.1 Koncept »Tensegrity«

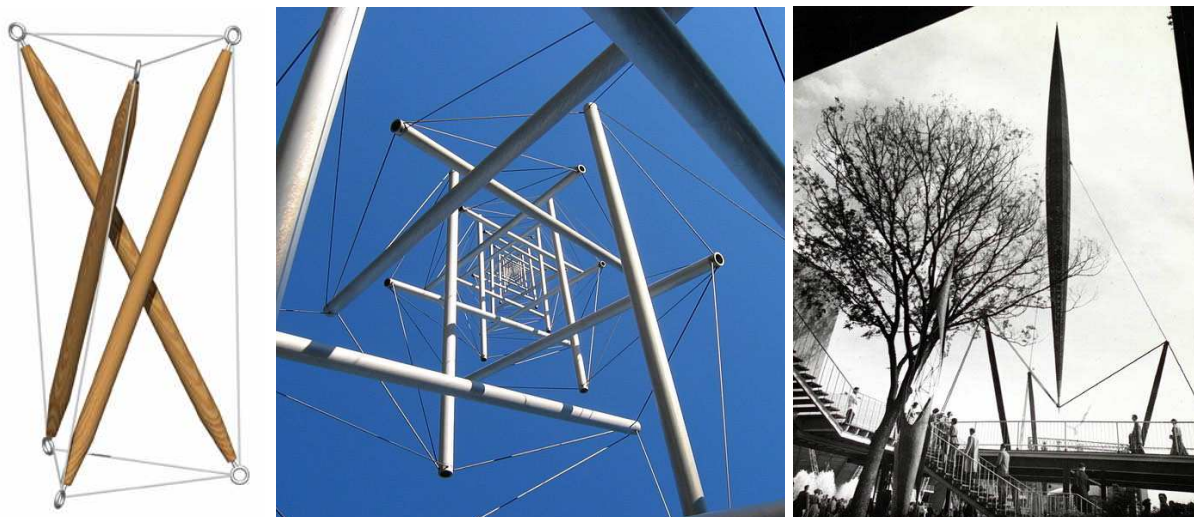
»Tensegrity« konstrukcije temeljijo na kombinaciji nekaj enostavnih, vendar premetenih, in visoko oblikovnih načelih:

- vsi nosilni elementi so obremenjeni le s čistim tlakom ali čistim nategom, kar pomeni, da se konstrukcija poruši le, če se natezni kabli plastično deformirajo ali če se tlačne palice uklonijo,
- predobtežba ali prednapetost omogoča kablom, da so togi v nategu,
- mehanska stabilnost omogoča, da ostanejo elementi v nategu oz. tlaku, ko se napetost v konstrukciji zaradi obremenitev poveča.

Zaradi teh načel ni noben nosilni element izpostavljen upogibnemu momentu. Na takšen način je možno z majhno maso in majhnimi prečnimi prerezi elementov doseči izredno toge konstrukcije.

»Tensegrity« prizma (Slika 12, levo) je najbolj enostavna »tensegrity« konstrukcija. Vsaka izmed 3 tlačnih palic prizme je simetrična ostalima 2 palicama. Vsak konec palice je povezan s 3 kabli, ki zagotavljajo tlak v palici in natančno definirajo pozicijo tistega konca palice. Na enak način tudi 3 kabli Skylon stolpa (Slika 12, desno) definirajo spodnji konec stolpa, ki so ga postavili leta 1951 na Britanskem festivalu ob reki Temzi v Londonu in tako širši javnosti predstavili koncept »tensegrity«. Skylon je bil vitka, vertikalna jeklena »tensegrity« konstrukcija futurističnega videza v obliki cigare. Dajala je vtis, kot da lebdi nad tlemi. Priljubljena šala tistega obdobja je bila, da Skylon, tako kot britansko gospodarstvo leta 1951, nima vidnih podpornih sredstev. Podolgovati stolp je bil na zgornjemu koncu stabiliziran le s 3 kabli, prav toliko kablov pa je bilo potrebnih tudi na spodnjem koncu, da je bil določen točen položaj spodnjega konca konice, dokler je bila ta tlačno obremenjena. 2 kabla ne bi bila dovolj za stabilizacijo konice, tako kot človek ne more biti stabilen na ohlapni vrvi, 1 kabel pa je le limitni primer 2 kablov, ki sta sidrana na istem mestu. Preprosta »tensegrity« konstrukcija Skylona s 3 palicami temelji na tem, da lokalno vsak konec vsake palice izgleda tako kot spodnji konec koničastega stolpa. Dokler je kot med katerimakoli kabloma manjši od 180° je pozicija konca palice dovolj definirana. Kar pa morda ni razvidno takoj, je to, da je konstrukcija kot celota stabilna zato, ker je to pravilo izpolnjeno za vseh 6 koncev palic. Pri nekaterih variantah, kot je npr. Needle Tower, se na enem koncu palice

stikujejo več kot 3 natezni kabli, kar pa se lahko razlaga tako, da 3 kabli definirajo pozicijo konice določene palice, ostali kabli pa so le dodatno pritrjeni na to, že definirano točko.



Slika 12: Načela »tensegrity« uporabljena na najbolj enostavni konstrukciji »tensegrity« prizmi (levo), na stolpu Needle Tower (sredina), ki ga je oblikoval Kenneth Snelson, in na Skylon stolpu, postavljenem za Britanski festival v Londonu, Velika Britanija, leta 1951.

2.3.2 Uporaba

Arhitekti kot pomembne prednosti teh konstrukcij navajajo njihovo majhno težo in dobro vizualno preglednost, ki je zanje pomembna estetska lastnost. Ideja je bila sprejeta v arhitekturo v 1960-ih, ko sta Maciej Gintowt in Maciej Krasiński zasnovala areno Spodek v Katowicach, Poljska, ki je bila ena prvih velikih objektov, na katerem so bila uporabljena »tensegrity« načela, saj streha izkorišča nagnjene stene arene, ki jih nosi sistem kablov, da podpira svoj obod. V 1980-ih je David Geiger oblikoval olimpijsko gimnastično areno (Olympic Gymnastics Arena) v Seulu, Južna Koreja, za letne olimpijske igre 1988 (Slika 13). Kupola Georgia Dome (Slika 17), ki so jo uporabili za letne olimpijske igre leta 1996, je še ena »tensegrity« konstrukcija, podobna prej omenjeni gimnastični areni. Teoretično ni omejitev za velikost »tensegrity« konstrukcij. Tako bi bila lahko cela mesta prekrita s tovrstnimi kupolami.

(Gomez-Jauregui, V. 2010. Tensegrity Structures and their Application to Architecture. Santander, Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cantabria: 296 str.)

2.3.3 Kabelska kupola gimnastične arene v Seulu

Gimnastična arena Davida Geigerja (Slika 13) je bila glavno prizorišče olimpijskih iger v Seulu v Južni Koreji leta 1988. Geiger je na tem objektu uporabil konstrukcijski sistem, ki ni bil do takrat še nikoli uporabljen. Z membrano iz oslojene tkanine pokrita streha olimpijske arene v Seulu je prva »samostoječa« kabelska kupola na svetu. Glavni koncept kabelske kupole je ustvarjanje neprekinjene natezne napetosti skozi strešno konstrukcijo s pomočjo nateznih kablov in tlačnih palic. Ultra lahki sistem kabelske kupole odpira novo vizijo membranskih konstrukcij, ki odpravlja operativne potrebe zračno podprtih pnevmatskih konstrukcij, kot je npr. potreba po sistemih, ki uravnavajo zračni pritisk v hali in s povečevanjem zračnega pritiska kompenzirajo padec pritiska v hali zaradi vetra ali snega.

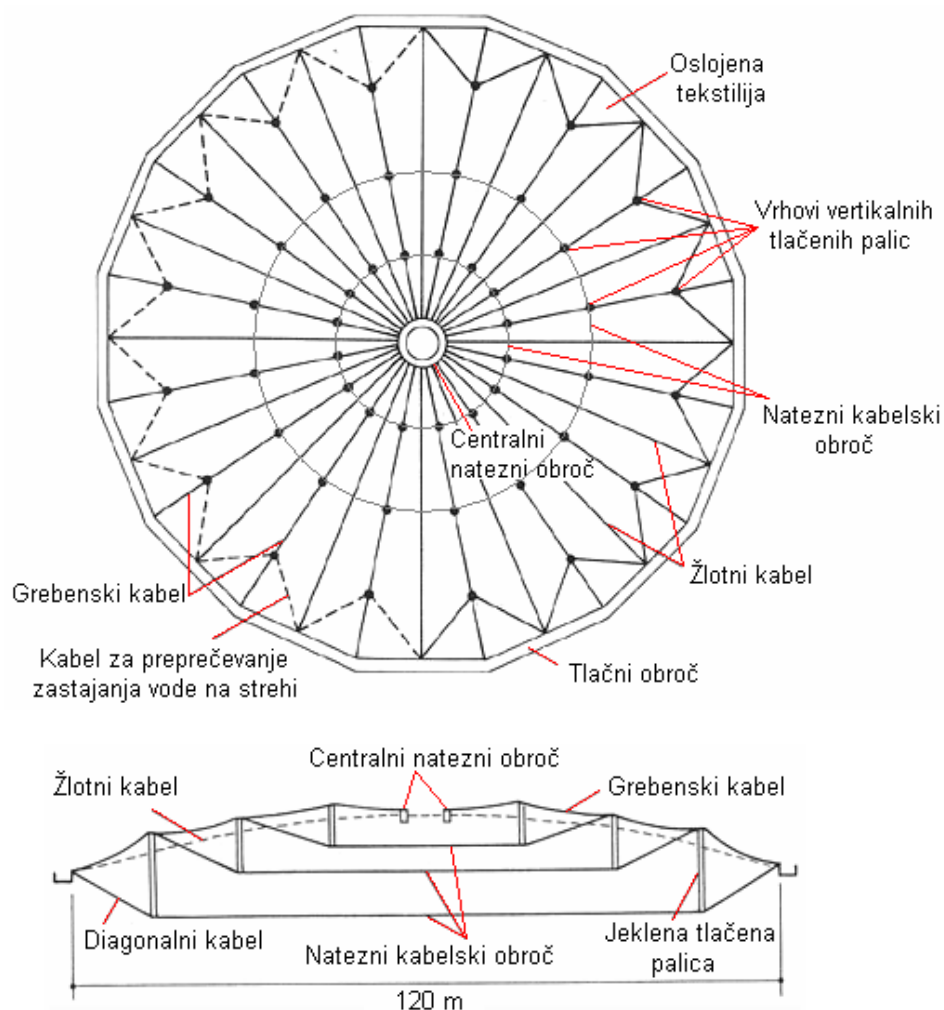


Slika 13: Kabelska streha gimnastične olimpijske arene v Seulu, Južna Koreja, postavljene za olimpijske igre leta 1988.



Slika 14: Notranjost gimnastične arene (levo) in konstrukcija njene kabelske kupole (desno).

Primarni konstrukcijski sistem gimnastične arene (Slika 14 in Slika 15) predstavlja 16 radialnih kabelskih paličij, ki so sestavljena iz grebenskih kablov, diagonalnih kablov in tlačnih palic. Vsi spodnji konci tlačnih palic na določenem radiju so med seboj povezani z tlačnimi kabelskimi obroči. To ustvarja 3-dimenzionalno mrežo kablov in palic, ki je izjemno učinkovita pri disipaciji lokalnih obremenitev. Posebnost tega sistema je, da nima trikotne prostorske oblike. Konstrukcija kabelske strehe ima 3 natezne kabelske obroče. Vsi kabli so spleteni iz 7 vrvi iz prednapetih žic, vozlišča mreže pa so izdelana iz litega železa. Mreža kablov in palic je prednapeta v obod tlačnega obroča iz armiranega betona (AB). Zaradi opiranja na kontinuirani obod tlačnega AB obroča, ki zapira konstrukcijski sistem, ta konstrukcija ne more biti klasificirana kot čisti »tensegrity« sistem. AB tlačni obroč podpirajo zidovi stadiona na način, ki je podoben tistemu pri zračno podprtih kupolah stadionov.



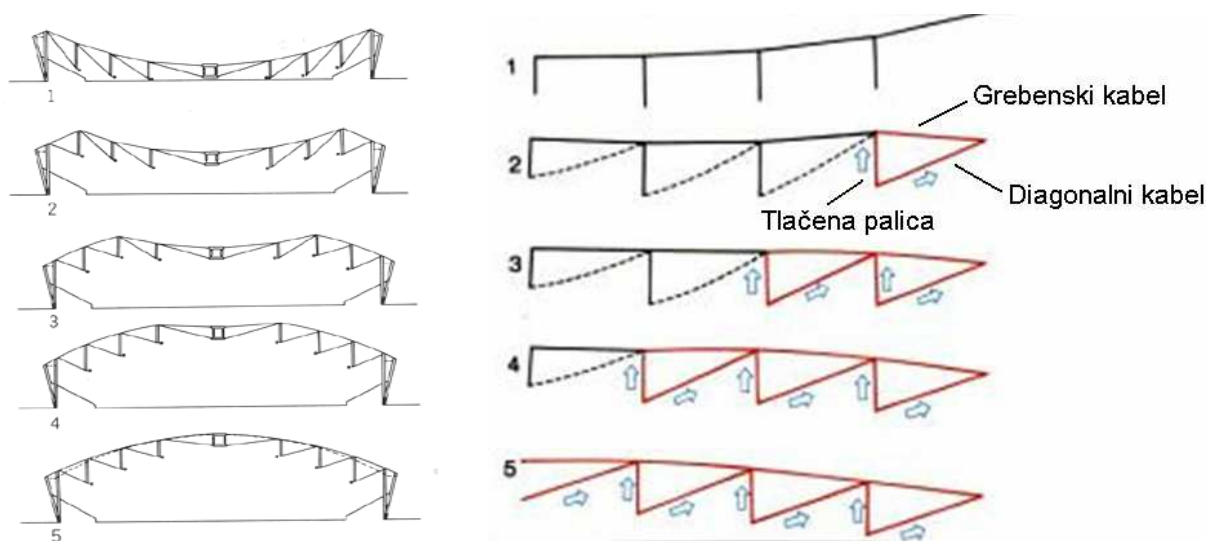
Slika 15: Konstrukcijski elementi kabelske kupole arene v tlorisu (zgoraj) in prerezu (spodaj).

Membranska kritina je sestavljena iz 16 kosov oslojene tkanine, ki so spojeni na mestih radialnih grebenskih kablov, na katere se kritina opira. Ti kosi so trikotne oblike, z enim vogalom pritrjenim na centralni natezni jekleni obroč, z nasprotno stranico pa na obod tlačnega AB obroča in prednapeti z nateznimi žlotnimi kabli, ki simetrično razpolavljajo ravnino vsakega kosa membrane. Streha je toplotno izolirana in prepušča svetlobo. Uporaba napete membrane na kabelskih kupolah je primerna zaradi prepuščanja svetlobe in nizke mase, vendar se lahko za pokritje kupole uporabijo tudi tradicionalne »toge« strešne kritine.

(Kazuo, I. 1999. Membrane Designs and Structures in the World. Tokyo, Shinkenchiku-sha Co. Ltd: 212-215.)

Mreža kablov je sestavljena na tleh stadiona, potem pa se jo dviguje v več fazah, od zunanjšega oboda proti notranjemu (Slika 16). Na Sliki 16 desno je prikazan 1 grebenški kabel, vertikalne tlačene palice, ki povezujejo grebenški kabel z nateznimi kabelskimi obroči, izdelanimi iz 40 jeklenih kablov debeline 15 mm, in 5 faz napenjanja diagonalnih kablov, ki so potrebne za dvig kabelske kupole. S pomočjo hidravlične opreme mora 32 delavcev (2 na vsakem grebenskem kablju) napenjati diagonalne kable sočasno, tako da se ohranja natezne kabelske obroče v horizontalni legi. Obremenitev se prenaša od centralnega nateznega obroča preko grebenskih kablov, nateznih kabelskih obročev in diagonalnih kablov do obodnega tlačnega AB obroča. Za končno stabilizacijo in togost večslojne membranske kritine, pripete na grebenske kable, se med temi kabli napnejo še žlotni kabli.

(Free, J. 1987. Cable domes. Popular Science, november 1987: 88-89.)



Slika 16: Dvigovanje kableske kupole gimnastične arene prikazano v prerezu kupole (levo) in na enem radialnem kablenskem paličju (desno).

2.3.4 Kableska kupola Georgia Dome v ZDA

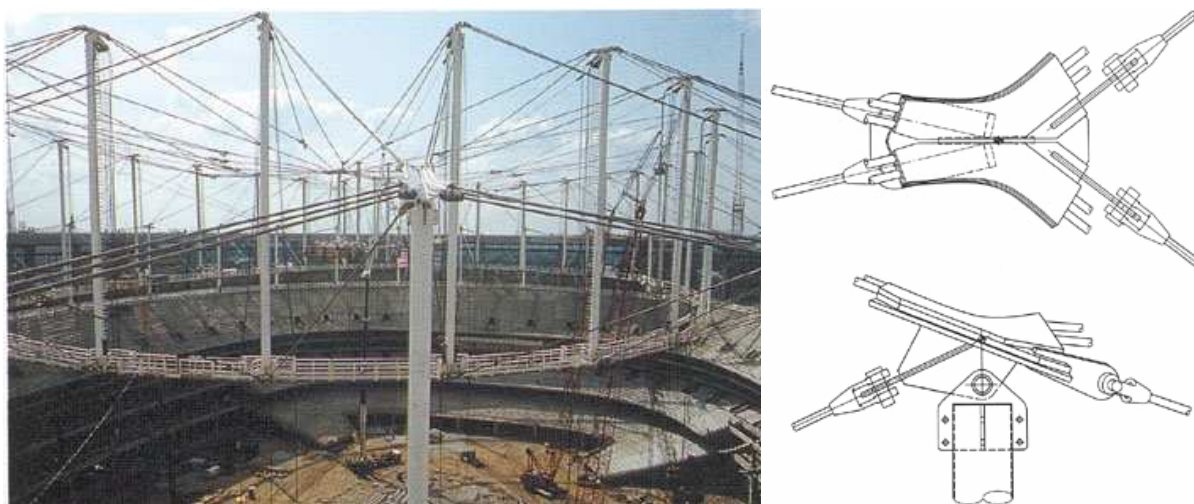
Kableska kupola Georgia Dome (Slika 17) je z dimenzijami 240 x 192 m največja kableska kupola na svetu. Prav tako kot kupolo gimnastične arene v Seulu tudi to kupolo sestavlja mreža trikotnikov iz nateznih kablov in vertikalnih tlačnih palic, katerih spodnje konce povezuje natezni kablenski obroč, nazaj pa jih držijo diagonalni kabli. Kupola Georgia Dome je prekrita z membrano iz tkanine iz steklenih vlaken prevlečenih s PTFE. Tudi to kupolo drži tlačni AB obroč, ki je izdelan iz betonske škatle širine 7,9 m in višine 1,5 m. AB obroč z obsegom 700 m stoji na 52 AB stebrih. Vanj je vgrajenih 26 jeklenih sider, na katere so pritrjeni natezni kabli kupole. Da bi omogočili toplotno raztezanje strešne konstrukcije neodvisno od spodnje konstrukcije, so AB tlačni obroč postavili na teflonske ležaje, ki dopuščajo le radialne pomike strehe. Takšen način podpiranja še vedno omogoča horizontalnim silam vetra in potresa, da se prenesejo v spodnjo konstrukcijo.



Slika 17: Stadion Georgia Dome v Atlanti, ZDA, zgrajen leta 1992, s kabelsko kupolo v obliki kristala.

Priključki tako grebenskih kablov kot tudi spodnjih nateznih kabelskih obročev na palice so izdelani iz varjencev iz pločevin (Slika 18). Nепrekinjeni natezni kabli so vpeti v sedla varjencev, ki zagotavljajo prenos obremenitve med kabli in palicami. Pritrditev tlačnih palic na te varjence je izvedena preko čepastega spoja, da je dviganje kupole enostavnejše in da spoj dopušča rotacije v primeru neenakomerno porazdeljene obtežbe.

(Kazuo Ishii 1999. Membrane Designs and Structures in the World. Tokyo, Shinkenchiku-sha Co. Ltd: str. 180-183.)



Slika 18: Konstrukcija kabelske kupole stadiona Georgia Dome med gradnjo leta 1992 (levo) in detajl spoja na vrhu tlačnih palic v tlorisu (desno zgoraj) in v prerezu (desno spodaj).

3 MEMBRANSKI MATERIALI

Membrane so običajno sestavljene iz tkane ali pletene osnovne tkanine z visoko natezno trdnostjo, prevlečene oz. laminirane z vezljivimi polimeri, ki membrano dodatno ojačajo in jo naredijo trajnejšo ter bolj odporno na okoljske vplive (Slika 19). Ena izmed metod izdelave membran je tudi ta, da se polimerno prevleko nanaša na prednapeto tkanino. Takšne membrane imajo v obeh smereh vlaken identične lastnosti in posledično tudi povečano dimenzijsko stabilnost.



Slika 19: Membrana sestavljena iz osnovne tkanine, kjer so osnovne in votkove niti preje spletene skupaj z nitjo, prevlečene s polimerno prevleko.

Lažje membrane (200 do 300 g/m^2) se običajno uporabljajo kot zvočno in toplotno izolacijske podloge položene pod konstrukcijskimi ovoji. Za dolgotrajno zunanjo uporabo pa so potrebne težje membrane (600 do 1500 g/m^2) s površinskimi prevlekami iz akrila, polivinilfluorida (PVF, npr. Tedlar) ali polivinilidenfluorida (PVDF, npr. Vidar, Fluorex®, Kynar®), ki zagotavljajo finalno zaščito pred okoljskimi vplivi. Membranske ponjave se izdelujejo iz velikih, skupaj sešitih membranskih pol. Pole membran se med seboj spaja s toplotnim postopkom, tako da se dve poli na mestu preklopa zvari s pomočjo visoko-frekvenčne varilne naprave ali opreme za varjenje z vročim zrakom ali s segretim klinom. Pravilno izdelan »šiv« mora prenesti vse obremenitve, ki se pojavijo v membranskih konstrukcijah. Na testiranjih med seboj zvarjenih membran mora biti območje šiva močnejše od same membrane.

Natezna trdnost osnovne tkanine se določi glede na linearno gostoto vlaken v niti preje, debelino in trdnost niti preje ter števila le teh na tekoči meter. Gostejša in debelejša kot je nit preje in več kot jih na tekoči meter, večja je natezna trdnost končnega produkta. Tkanine za izdelavo membranskih konstrukcij običajno tehtajo od 100 g/m² do 500 g/m², njihova natezna trdnost pa znaša od 2500 N/5cm do 7000 N/5cm. Tkanine za pokrivanje šotorov imajo lahko tudi nižje vrednosti natezne trdnosti.

Med najbolj široko uporabljane membranske materiale iz oslojenih tkanin spadajo:

- tkanina iz poliestrskih vlaken, prevlečena z vinili (običajno PVC),
- tkanina iz poliestrskih vlaken, laminirana z vinili (običajno PVC) in
- tkanina iz steklenih vlaken prevlečena s PTFE (politetrafluoretilenom).

Vse pogosteje pa se uporabljajo tudi membrane iz:

- tkanega PTFE in
- ETFE folije.

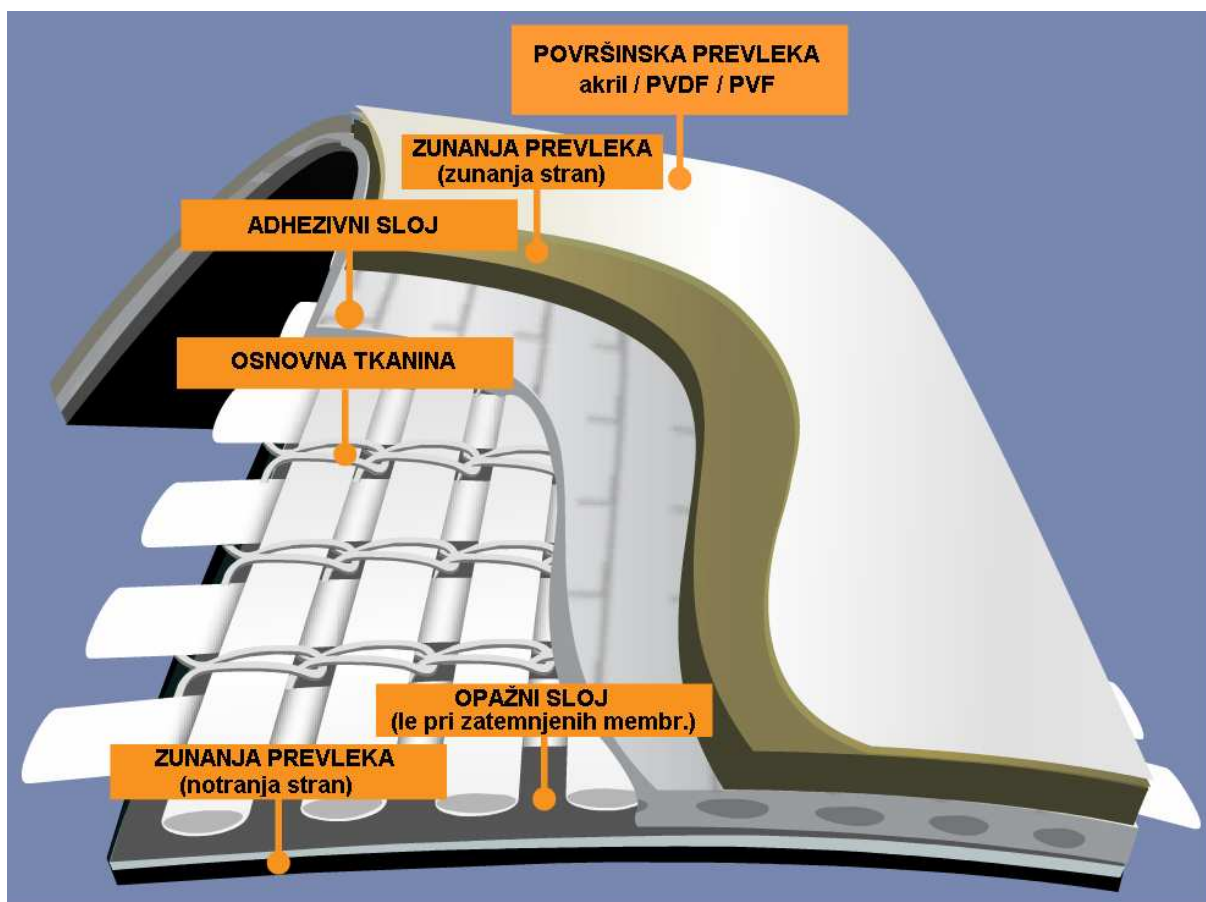
Poliestrške tkanine so zaradi svoje trdnosti, trajnosti, raztegljivosti in cene največkrat uporabljene tkanine v proizvodnji membran. Poliistri, prevlečeni ali laminirani s PVC filmi, so na splošno najcenejše gradbene membrane za dolgotrajno zunanjo uporabo.

3.1 Tkanine iz poliestrskih vlaken, prevlečene z vinili

Poliistri, prevlečeni z vinili, običajno s PVC, so najpogostejši material za izdelavo trajnih fleksibilnih membranskih konstrukcij, kot so po meri izdelane ponjave, nadstreški, prehodi, šotorske dvorane, manjše zračno podprte konstrukcije in lahke konstrukcije z okvirnimi elementi.

Membrane iz poliestrske tkanine prevlečene s PVC (Slika 20) so sestavljene iz:

- poliestrske osnovne tkanine,
- adhezivnega ali lepilnega sloja,
- zunanje PVC prevleke in
- površinske prevleke.



Slika 20: Sestava membrane iz poliestrske tkanine, prevlečene ali laminirane z vinili.

Osnovna tkanina predstavlja nosilni sloj zunanje prevleke, ki se jo nanese na tkanino v tekoči obliki, in zagotavlja natezno trdnost, raztegljivost, odpornost na trganje in dimenzijsko stabilnost končnega membranskega izdelka. Poliestrska tkanina je izdelana iz stkanе preje kontinuiranih vlaken z visoko natezno trdnostjo in dimenzijsko stabilnostjo, ki se lahko več kot tisočkrat ukrivijo brez poslabšanja nateznih mehanskih lastnosti.

Adhezivni sloj deluje kot kemična vez med poliestrskimi vlakni in zunanjo prevleko ter preprečuje absorbiranje vode v vlakna (kapilarni učinek) in s tem poškodbe tkanine zaradi zamrzovanja in odtaljevanja absorbirane vode.

Tekoča PVC prevleka (vinil Organisol ali Plastisol) vsebuje kemikalije za doseganje zelenih lastnosti glede barve, odpornosti na vodo in plesen ter požarne odpornosti. Možno je izdelati tudi takšne membrane, ki prepuščajo velike deleže svetlobe ali pa takšne, ki so popolnoma

neprosojne. Po nanosu tekoče prevleke na tkanino gre membrana skozi grelno komoro, kjer se tekoča prevleka osuši in strdi. PVC prevleke so dostopne v širokem spektru barv, vendar so nestandardne barve dražje, saj je potrebno pri menjavi barve s strojev za nanašanje prevlek očistiti vse sledi prejšnjih barv.

3.2 Tkanine iz poliestrskih vlaken laminirane z vinili

Poliestrske tkanine, laminirane z vinili (običajno PVC), se uporabljajo za ponjave, šotore in nizko napete okvirne konstrukcije. Izdelane so iz ojačitvene poliestrske osnovne tkanine, stisnjene med dve plasti tekočega PVC filma. Običajno se pri laminiranju na tkanino nanese dve ali več plasti tekočega filma, ki se ga na tkanino spoji s toploto, pritiskom in lepilom. Na takšen način se oblikuje ena sama membranska plast tega kompozitnega materiala. Pri mrežasti poliestrski tkanini oz. pri tkanini z odprto vezavo (vezava, pri kateri vzporedne osnovne niti, ki jih prepletajo prečne vtokove vezi, niso stisnjene skupaj, tako da so med njimi puščene odprtine) se zunanji PVC filmi na obeh straneh tkanine med seboj povežejo preko odprtin v tkanini. Težje osnovne tkanine pa so stekane pretesno, da bi dopuščale proces laminiranja, zato se v tem primeru za povezavo zunanjih filmov z osnovno tkanino uporabljajo lepila.

Dobra kemijska vez je ključnega pomena tako za preprečevanje razslojevanja oz. delaminacije kot tudi za razvoj ustrezne trdnosti šiva. Lepilo omogoča šivu, ki se ga izdelava z varjenjem membrane na drug kos enakega materiala, da lahko prevzame strižne obremenitve in ostale zahtevane obremenitve membranskih konstrukcij pri vseh temperaturah. Lepilo hkrati preprečuje tudi absorpcijo vlage v vlakna tkanine ter s tem rast gliv in zamrzovanje vode v kompozitnem membranskem materialu, kar lahko poškoduje adhezivno vez med zunanjo prevleko in tkanino. Uporabljena lepila so izdelana na vodni osnovi in so v skladu s predpisi EPA (Environmental Protection Agency).

Kompozitne membrane s tkaninami z odprto vezavo so običajno bolj ekonomične, čeprav je cena odvisna tudi od števila in vrste različnih dodatkov, ki se jih dodaja v polimerno prevleko za izboljšanje različnih lastnosti membrane. V tekočo PVC maso za izdelavo prevlek

poliestrskih tkanin se lahko primešajo različne barve, snovi za UV odpornost, odpornost proti obrabi ter obstojnost barv, vendar več kot je dodatkov, večja je cena membrane.

3.2.1 Zatemnjene membrane

Zatemnjene membrane (ang. blackout fabric) so posebna vrsta membran, ki se večinoma uporabljajo za šotore. To so neprosojne membrane, pri katerih je na osnovno tkanino nanesen temen opazni sloj, ki je z obeh strani laminiran z belo zunanjo prevleko. Ker takšne membrane ne prepuščajo svetlobe, omogočajo kontrolirano ogrevanje in osvetljevanje notranjosti konstrukcij, ki jih prekrivajo. Neprosojne membrane imajo tudi to prednost, da madeži, umazanija, mesta popravil ali kakršnekoli neusklajenosti panelov na zunanji strani stavbe, niso vidni od znotraj.

Zatemnjene membrane imajo tudi slabosti. Notranjost šotorskih dvoran iz zatemnjenih membran je hladnejša kot pri nezatemnjenih membranah, ki lahko prepuščajo del vpadle svetlobe in s tem tudi toplote, zato je potrebno takšen prostor bolj ogrevati. Ogrevanje in razsvetljava pa seveda prispevata k večjim stroškom obratovanja. Več slojev naredi membrano težjo in težje obvladljivo ter poveča nevarnost razslojevanja oz. delaminacije tekom časa. Takšna membrana je dražja od ostalih materialov za izdelavo šotorov, luknjice za pripenjanje so za uporabnike bolj opazne in pogosto se notranja barva popolnoma ne ujema z zunanjo barvo.

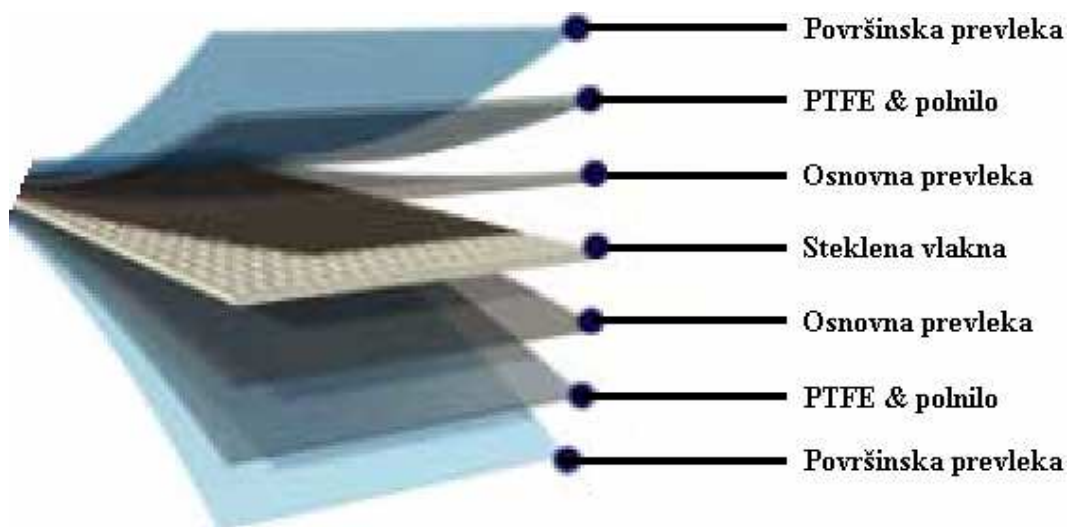
3.3 Tkanine iz steklenih vlaken, prevlečene s PTFE

Tkanina iz steklenih vlaken, prevlečena s PTFE (bolj poznan pod blagovno znamko Teflon® PTFE), se prav tako pogosto uporablja za izdelavo membranskih konstrukcij. Steklena vlakna so oblikovana v kontinuirane filamente, ki se zvijajo v prejo. Te preja se nato stke v osnovno tkanino, ki je podlaga za nanos PTFE prevleke. Steklena vlakna imajo visoko natezno trdnost, se obnašajo elastično in niso občutljiva na večje relaksacije napetosti ali lezenje. Membrane iz steklenih vlaken, prevlečenih s PTFE, poleg tega prepuščajo tudi večji delež svetlobe kot membrane iz poliestrske tkanine, prevlečene ali laminirane s PVC, njihova prepustnost

svetlobe pa lahko znaša tudi do 50%. Svetloba se ob prehodu membrane razprši in notranjost prostora osvetli z enakomerno difuzno svetlobo. Razkrajanje kompozitnih membran iz steklenih vlaken prevlečenih s PTFE je tekom časa minimalno, njihova pričakovana življenjska doba pa je večja od 25 let. Takšne membrane dosegajo najvišji razred požarne odpornosti (Class A – glej Preglednico 2 v poglavju 6.10 Požarna odpornost), medtem pa še vedno ohranijo visoko stopnjo prepustnosti svetlobe, zato se jih pogosto uporablja kot kritino kupol stadionov (zračno podprtih in kabelskih) ter ostalih stalnih objektov.

Membrane iz steklenih vlaken, prevlečenih s PTFE (Slika 21), so sestavljene iz:

- površinske prevleke,
- PTFE in polnila,
- osnovne prevleke in
- steklenih vlaken.



Slika 21: Sestava membrane iz tkanine steklenih vlaken, prevlečene s PTFE.

Tkanina iz steklenih vlaken je nosilni sloj kompozita in končnemu prevlečenemu produktu zagotavlja ustrezne mehanske lastnosti. Steklena vlakna imajo zelo dobre karakteristike. So ena izmed najmočnejših tekstilnih vlaken, ki imajo večjo specifično natezno trdnost kot jeklena žica enakega premera, pri manjši teži. Steklena vlakna imajo tudi izjemno dimenzijsko stabilnost pri različnih tipih okoljskih razmer. V splošnem raztezek steklenih vlaken ob poružitvi znaša 3% ali manj. Poleg tega jih odlikuje tudi odlična toplotna odpornost

pri relativno nizki ceni. Pri 371°C ohranijo približno 50% natezne trdnosti na sobni temperaturi, pri 482°C pa približno 25%. Njihova točka mehčanja je pri 846°C, točka taljenja pa pri 1121°C. Ker so steklena vlakna iz anorganskih materialov, niso gorljiva, zato so prva izbira v primerih s strožjimi požarnimi zahtevami. Tako kot steklo samo so tudi steklena vlakna odporna na večino kemikalij. Zaradi inertnosti (ne-reaktivnosti) pa so neobčutljiva na sočno svetlobo, glive in bakterije.

Osnovna prevleka je kritični del te kompozitne konstrukcije. Predstavlja podlago za PTFE prevleko in zagotavlja njeno trdno sidranje na tkanino iz steklenih vlaken. Prav tako določa karakteristike fleksibilnosti končnega produkta. Za osnovno prevleko se lahko uporabijo različne formulacije, odvisno od lastnosti, ki se jih želi doseči. PTFE prevleka je kemično inertna in lahko prenese temperature od -70°C do 230°C, poleg tega pa je tudi imuna na UV sevanje in jo je mogoče očistiti z vodo. Polimer PTFE, razvit sredi 1980-ih let, ima izjemne lastnosti:

- odpornost na večino močnih kemikalij,
- zelo nizek koeficient trenja,
- nelepljivost,
- negorljivost,
- odlične dielektrične lastnosti,
- odpornost na staranje,
- netoksičnost,
- UV odpornost,
- odpornost na vlago,...

Vsaka plast PTFE in polnila je sestavljena iz več nanesenih slojev PTFE disperzij. Ti sloji PTFE zagotavljajo dolgotrajno zaščito pred vsemi potencialnimi tipi razgradnje zaradi vplivov okolja. S PTFE se lahko kombinirajo različni tipi polnil za doseganje dodatnih lastnosti kot so odpornost proti obrabi, izboljšana prepustnost svetlobe ali posebne barve.

Površinska prevleka sestoji iz sloja FEP (fluoriran etilen propilen), bolj poznanega pod blagovno znamko Teflon® FEP. FEP je po sestavi zelo podoben PTFE, zato ga prav tako kot PTFE odlikujeta lastnosti nizkega trenja in ne-reaktivnosti, glavna razlika med njima pa je ta,

da je FEP lažje oblikovati. FEP je mehkejši od PTFE in se topi pri 260°C, ima visoko prepustnost svetlobe in je odporen na sončno svetlobo.

Nekateri industrijski strokovnjaki menijo, da so membrane iz steklenih vlaken, prevlečenih s PTFE, zaradi visoke temperature mehčanja, izjemno majhne relaksacije in lezenja (raztezek pri dolgotrajni obremenitvi) boljše od membran s poliestrsko osnovo. Drugi poznavalci pa pravijo, da se tako poliester kot steklena vlakna pri visokih temperaturah raje topijo kot gorijo ter da so lahko tudi ustrezno projektirane membrane s poliestrsko osnovo enako trajne. Zaradi razlik v obnašanju poliestrskih in steklenih vlaken pri testih požarne odpornosti, so tkanine iz steklenih vlaken, prevlečene s PTFE, po ameriških predpisih glede negorljivosti materiala bolj primerne za uporabo na gradbenih objektih. To je glavni vzrok za pogostejšo uporabo membran iz steklenih vlaken, prevlečenih s PTFE, v ZDA, vendar se ob tem postavljajo vprašanja o tem, ali naj bi se standardi, ki so sprejeti za druge gradbene materiale, prevzemali tudi za membrane.

3.4 Tkani PTFE

Ta material je sestavljen iz PTFE vlaken, stkanih v tkanino. Za zdaj je na voljo le en tak material iz stkanih polimerov. Prednost tkanega PTFE pred tkaninami iz steklenih vlaken prevlečenih s PTFE je ta, da združuje odpornost na vplive okolja in sposobnost dobrega prenašanja ponavljajočih se prepogibanj in zlaganj. Takšna fleksibilnost je še posebej zaželena pri mobilnih konstrukcijah in konstrukcijah, ki se odpirajo. Vendar pa je PTFE precej drag material in ni tako močan kot poliester ali steklena vlakna.

3.5 ETFE folija

Ena izmed novosti v razvoju membranskih konstrukcij je etilentetrafluoretilena (ETFE). To je transparentna membrana s kvaliteto, primerljivo oslojenim tkaninam in prednostmi PTFE, kot je npr. samočistilna sposobnost. Zaradi odpornost proti atmosferski onesnaženosti in UV svetlobi ima ETFE zelo dolgo življenjsko dobo, daljšo od 20 let. Učinkovita toplotna

izolativnost (povprečna vrednost toplotne prehodnosti U je $2,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ za dvoslojni sistem) in visoka prepustnost svetlobe (95% vidne svetlobe in 85% UV svetlobe) omogočata uporabo v številnih aplikacijah, kjer tradicionalni materiali, kot je npr. steklo, ne bi bili praktični. ETFE je več kot 20-krat lažji kot steklo (gostota ETFE je $0,35 \text{ kg/m}^2$, gostota stekla pa 15 kg/m^2). Je tudi okolju prijazen in energetsko učinkovit material, saj ga sestavljajo fluorit, vodikov sulfat in triklorometan, ki ne vsebujejo petrokemičnih derivatov. ETFE je mogoče 100% reciklirati.

3.6 Mreže

To so manj uporabljani materiali za membranske konstrukcije. Mreža je širok pojem za vse porozne tkanine z odprtimi prostorčki med osnovnimi in votkovimi nitmi prediva. Lahko se jih izdelava iz skoraj vseh vlaken z različnimi metodami, vključno pletenjem, tkanjem in raztegovanjem. V nekaterih primerih se jih uporablja za ojačitev drugih oslojenih tkanin, lahko pa so tudi prevlečene s polimeri na enak način kot oslojene tkanine.

Mreže, ki se uporabljajo v gradbeništvu, so običajno izdelane iz tkanih poliestrskih vlaken, prekritih s tanko plastjo vinilov, ali pa so spletene iz polietilenskega prediva z visoko gostoto (ang. high-density polyethylene - HDPE), polipropilenskega (PP) ali akrilnega prediva. Poliestrske mreže se dobro barvajo, so močne, imajo nizek koeficient absorpcije in so lahko zelo ekonomične. Mreže iz najlona oz. akrila se pogosto uporabljajo v industrijskih aplikacijah zaradi svoje moči in odpornosti na kemikalije, čeprav nimajo visokega koeficienta absorpcije in lahko stanejo več kot poliestrske mreže. PP in HDPE mreže so inertne, zato se ne morejo umazati ali obarvati, in so cenejše v primerjavi s poliestri in najlonom. PP ima v primerjavi z ostalimi nizko temperaturo taljenja, kar je nezaželen dejavnik v nekaterih industrijskih aplikacijah.

Mreže lahko zagotovijo gosto senco in zavetje pred vetrom. Ker so porozne, ne ščitijo pred dežjem. Niso drage in se uporabljajo za izdelavo različnih membranskih konstrukcij in estetskih fasad, ki so lahko izvedene po sistemu prezračevane fasade (Slika 22), kar zniža stroške ogrevanja oz. hlajenja notranjih prostorov, saj se ovoj stavbe pod mrežasto fasado ne pregreva. Zaradi poroznosti seveda niso primerne za izdelavo zračno podprtih konstrukcij.



Slika 22: Prezračevana fasada iz mreže, oslojene s polimeri, na poslovno-proizvodnem objektu Loging v Novem mestu, ki zmanjšuje stroške klimatizacije za 30%.

3.7 Filmi

Filmi so transparentni polimeri ekstrudirani v pole brez nosilne osnovne tkanine, zato niso ne laminirani ne prevlečeni. Primeri filmov so čisti vinil, poliester ali polietilen. Ti filmi so cenejši od membran iz oslojene tkanine, vendar niso niti tako močni niti tako trajni. Filmi so precej šibkejši v nategu, vendar pa so bolj elastični kot membrane z osnovo iz tkanine. Filmi se uporabljajo tudi za izdelavo zračno napihljivih konstrukcij, ki so sestavljene iz nosilnih membranskih napihljivih elementov, v katerih je zrak pod pritiskom, v notranjosti konstrukcije pa ni pritiska, tako kot pri zračno podprtih konstrukcijah. Nekatere zračno napihljive strehe ali ovoji objektov so izdelani iz 2 ali 3 plasti filma, ki so med seboj termično zvarjene in sešite, tako oblikovane blazine pa so napolnjene z zrakom s pomočjo majhnih ventilatorjev. Z vpihavanje zraka se poveča notranji pritisk, ki napne površino in tako naredi element nosilen. Takšne filmske blazine so vpete v aluminijasti okvir okoli oboda konstrukcije, ki preprečuje premikanje napihljenih elementov.

Debelina filmov znaša med 30 do 200 mikronov. Prepuščajo lahko od 25% do 95% svetlobe in imajo visoko odpornost na umazanijo. Teža filmov je majhna, njihova življenjska doba pa se giblje od 20 do 25 let. Napihljive blazine zagotavljajo dobro toplotno izolativnost. Potrebno je narediti še več raziskav za oblikovanje zanesljivih standardnih in ekonomičnih detajlov, kot je npr. izboljšanje vodotesnosti in zmanjšanje zastajanja vode na konstrukcijah.

(Sourcebook 2009. Fabric Structures. Fabric architecture. Fabric Structures Association.
http://fabricarchitecturemag.com/articles/0409_f2_structures.html (18.8.2011).)

3.8 Cene membranskih materialov

V Preglednici 1 je narejena primerjava cen različnih oblik in tipov ponjav, t.j. končnih produktov iz membran, ki so že zvarjene med seboj, z vsemi robnimi trakovi in navarjenimi elementi za pritrdjevanje na podkonstrukcijo.

Preglednica 1: Primerjava cen varjenih ponjav iz različnih membranskih materialov.

Tip membrane	Tipična uporaba	Cena ponjave
Enoslojna ravninska ponjava iz poliestrskih vlaken prevlečenih s PVC	Začasne in stalne konstrukcije	9-12 € na m ²
Dvoslojna ravninska ponjava iz poliestrskih vlaken prevlečenih s PVC	Začasne in stalne konstrukcije	20-30 € na m ²
Enoslojna 3-dimenzionalna ponjava iz poliestrskih vlaken prevlečenih s PVC	Šotori, ponjave in nadstreški	30-40 € na m ²
Enoslojna ravninska ponjava iz steklenih vlaken prevlečenih s PTFE	Stalne konstruk. velikih dimenzij (pož. odp. ClassA ASTM E-108)	30-40 € na m ²
Dvoslojna ravninska ponjava iz steklenih vlaken prevlečenih s PTFE	Stalne konstruk. velikih dimenzij (pož. odp. ClassA ASTM E-108)	60-80 € na m ²
Enoslojna 3-dimenzionalna ponjava iz steklenih vlaken prevlečenih s PTFE	Šotori, ponjave in nadstreški (pož. odp. ClassA ASTM E-108)	60-80 € na m ²
Ponjava iz mreže poliestrskih vlaken prevlečenih s PVC	Konstrukcije in sistemi za senčenje	20-30 € na m ²
ETFE folija	Visoko transparentni (97%) atriji, notranji parki, biosfere, pnevmatski uokvirjeni elementi	80-100 € na m ²
Tkani PTFE	Zložljive strehe in konstruk. (bolj elastičen od standardnega PTFE)	85-100 € na m ²

Iz preglednice je razvidno, da so najcenejše enoslojne ponjave, dvoslojne ponjave so zaradi večje porabe materiala približno še enkrat dražje, še dražje pa so enoslojne membrane 3-dimenzionalnih oblik (sferične, paraboloidne, stožčaste oblike,...). Membranske konstrukcije iz novejših materialov kot sta ETFE folija in tkani PTFE zaenkrat spadajo med najdražje membranske konstrukcije. Cena ponjav iz steklenih vlaken, prevlečenih s PTFE, je več kot še enkrat večja od cene enake ponjave iz poliestrskih vlaken, prevlečenih s PVC.

4 POVRŠINSKE PREVLEKE PVC MEMBRAN

Večina membran za izdelavo membranskih konstrukcij ima nekakšno obliko površinske prevleke, ki se jo nanese na zunanjo stran membrane, z namenom, da ščiti membrano pred zunanjimi vplivi in omogoči lažje čiščenje membrane. Površinski premaz utrdi zunanjo površino membrane in preprečuje umazaniji, da bi se prijela materiala, hkrati pa dovoljuje membrani, da se jo očisti z vodo. Površinski premaz se s staranjem materiala sčasoma izpere ali preperi in membrano izpostavi umazaniji, ki jo je kasneje težje očistiti. Debelejši kot je površinski premaz, dlje časa se obdrži na membrani. Premazi, ki so pretanki, se drobijo in razpokajo, ko se membrana prepogiba.

Izkušnje kažejo, da lahko površinske prevleke precej povečajo trajnost membran, saj lahko podaljšajo življenjsko dobo membran tudi preko 5 let. So pa nanje padle tudi kritike zaradi njihove togosti (še posebej za PVF površinske prevleke) in nestalne kvalitete. Kljub temu pa uporaba površinskih prevlek še naprej raste. Kvaliteta površinske prevleke membrane je pogojena z estetskimi zahtevami trajnih konstrukcij. Membranske konstrukcije kot so skladišča in industrijski objekti na splošno ne potrebujejo visoke stopnje samočistilnosti. Pnevmatске konstrukcije za športne dvorane zahtevajo srednjo stopnjo samočistilnosti, medtem ko po meri izdelane natezne konstrukcije zahtevajo najvišjo stopnjo samočistilnosti.

Med najpogosteje uporabljene površinske prevleke s PVC oslojenih tkanin spadajo:

- Akrilna površinska prevleka,
- PVF (polivinilfluorid) filmska laminirana površinska prevleka,
- PVDF (polivinilidenfluorid) površinska prevleka in
- PVDF/PVC površinska prevleka.

4.1 Akrilna površinska prevleka

Akrilna površinska prevleka je najbolj ekonomična in široko dostopna prevleka. Formulirana je iz akrilne smole in morebitnih drugih smol, kot so PVC ali poliuretan, ki se raztapljajo v topilih. Na membrane se jo nanaša s sprejem v zelo tanki plasti debeline od 5 μm do 10 μm , ki

daje membrani površini sijaj ter odpornost proti UV razgradnji. Ker je prevleka tanka, je takšne membrane enostavno obdelovati in variti z visoko-frekvenčnimi ali vroče-zračnimi varilnimi napravami. Ena izmed težav s to površinsko prevleko je ta, da sčasoma preperi in erodira, zaradi česar konstrukcija po več letih postane umazana. Akrilna prevleka zagotovi membrani življenjsko dobo 10 let ali več, odvisno od okoljskih razmer. Uporablja se na številnih industrijskih in športnih objektih, razstavnih paviljonih, začasnih koncertnih dvoranh in mobilnih skladiščih.

4.2 PVDF površinska prevleka

PVDF površinska prevleka je sestavljena iz mešanice fluora, ogljika in vodika. Na membrano se jo nanese s sprejem, na enak način kot akrilno površinsko prevleko, vendar običajno v večjih debelinah od 7 μm do 15 μm . Kombinacija fluora in ogljika, v primerjavi z akrilnimi površinskimi prevlekami, zagotavlja superiorno zaščito pred UV razgradnjo in poškodbami zaradi kemičnih vplivov. Membrane s PVDF prevleko imajo tudi večjo barvno obstojnost kot tiste z akrilno prevleko. Poleg tega so odporne na alge in glive ter imajo samočistilne lastnosti, ki omogočajo lažje vzdrževanje. PVDF površinske prevleke lahko trajajo dlje časa kot akrilne površinske prevleke, vendar tudi ti materiali sčasoma preperijo in erodirajo, zaradi česar se konstrukcije postopoma umažejo. Tovrstne membrane so fleksibilne, odporne na pikanje, enostavne za uporabo in imajo splošno življenjsko dobo 15 do 20 let, odvisno od okoljskih razmer.

PVDF se kemično vgradi v membrane, kar zmanjša izbor barv, saj je bela standardna barva PVDF. Možnosti ostalih barv so tako omejene in zahtevajo posebno proizvodnjo, kar izdelke podraži. Zaradi kemijskih lastnosti prevleke je potrebno prevleko na mestu šiva pred varjenjem odrgniti s PVC membrane, kar prav tako poveča ceno proizvodnje. Zaradi tega razloga so otežena tudi popravila membran na licu mesta.

4.3 PVF filmska laminirana površinska prevleka

PVF filmska površinska prevleka iz polivinilfluorida (komercialno bolj poznanega kot Tedlar®) se med proizvodnim procesom v tankem sloju laminira na PVC membrano. Rezultat je debelejša membrana, ki je odporna na vremenske in kemične vplive bolj od konkurenčnih membran. PVF prevleka daje membrani samočistilno sposobnost, ki ji omogoča, da se sama očisti snovi kot so kisel dež, grafiti in ptičji iztrebki. Zaradi teh lastnosti se tovrstne prevleke pogosto uporablja na membranah v industrijskih območjih, puščavskih regijah in obalnih conah ter na membranskih konstrukcijah, kjer je zunanji videz zelo pomemben.

Pomembno je omeniti, da je PVF dostopen le v obliki filma, v nasprotju z akrilno in PVDF površinsko prevleko. Za PVF filme je značilno, da so fleksibilni in ne vsebujejo plastifikatorjev. Kemično so podobni Teflon® fluoropolimernemu materialu, zato so zelo kemično inertni in trpežni. PVF je na voljo v pigmentiranih filmih debelin od 25 µm do 38 µm. Pigmentacija daje barvo zunanji površini membrane ter povečuje odpornost membrane na UV svetlobo. Poleg različnih barv so Tedlar PVF filmi dostopni tudi v več različnih belih formulacijah, ki prepuščajo od 3 do 60% svetlobe. PVF filmska površinska prevleka je kar 10-krat debelejša od ostalih površinskih prevlek, zato ima nizko stopnjo erozije, ki se odraža v življenjski dobi približno 25 let, odvisno od okoljskih razmer.

Slabost membran s PVF površinsko prevleko je ta, da jih ni mogoče variti. Šivi na takšnih membranah tako niso narejeni s preklapljanjem pol, ampak so te med seboj spojene z dodatnim varjenim šivom, tako da se na mestu šiva na spodnjo stran doda trak, ki se ga zavari na obe poli.

4.4 PVDF/PVC površinska prevleka

PVDF/PVC površinska prevleka je v bistvu razredčena PVDF površinska prevleka, ki poceni proizvodnjo končnega izdelka. Pred varjenjem membran prevleke ni potrebno odrgniti z območij varjenja, kar precej zniža stroške proizvodnje. Ker pa je PVDF razredčen, se trajnost membrane in odpornost na okoljske vplive zmanjša. To se kaže v življenjski dobi od 10 do 15

let. Takšne membrane so dostopne tudi v barvah, vendar je cena določene barve odvisna od dolžine trajanja proizvodnje v določeni barvi.

(Sourcebook 2009. Fabric Structures. Fabric architecture. Fabric Structures Association.

http://fabricarchitecturemag.com/articles/0409_f2_structures.html (18.8.2011).)

4.5 Primerjava površinskih prevlek

Raziskovalci podjetja DuPont so pred nekaj leti izvedli primerjavo trajnosti in učinkovitosti vseh treh različnih sistemov površinske prevleke. V primerjavo so bile vključene naprave za pospešeno staranje in preperevanje membran zaradi vremenskih vplivov in meritve debeline površinske prevleke s pomočjo optične mikroskopije. Rezultati so pokazali, da akrilna površinska prevleka traja od 3 do 5 let, PVDF površinska prevleka od 4 do 7 let, PVF filmska površinska prevleka pa več kot 10 let. PVF film je po pospešenem staranju v napravah, ki je bilo ekvivalentno 10 letom staranja pri dejanskih zunanjih razmerah, še vedno ohranil 70% svoje prvotne debeline. Čeprav je pospešeno preizkušanje materialov uporabno primerjalno orodje, je še vedno najboljši način za določitev odpornosti na umazanijo dolgotrajna izpostavljenost membran na prostem.

(Seaman, R. N., Bradenburg, F. 2000. Utilization of Vinyl-Coated Polyester Fabrics for Architectural Applications. Fabric architecture. Fabric Structures Association.

http://fabricarchitecturemag.com/articles/0700_id_part1.html,

http://fabricarchitecturemag.com/articles/0900_id_part2.html (18.8.2011).)

5 VARJENJE MEMBRAN

Pri varjenju tkanin prevlečenih s termoplastičnimi polimeri se uporabljajo varilne naprave, ki dve membranski poli zvarijo tako, da na preklop pol dovedejo določeno količino toplote in pritiska ter tako staljene polimere obeh pol na mestu šiva povežejo skupaj. Na takšen način se izdelata nepredušen in vodotesen šiv.

Termoplastične prevleke, kot so polivinilklorid (PVC), poliuretan (PU), polietilenske (PE) tkanine in polipropilen (PP), se lahko varijo s toploto in se tako izognejo potrebi po šivanju, lepljenju, povezovanju z različnimi lepilnimi trakovi ali po drugih bolj zapletenih in dragih metodah.

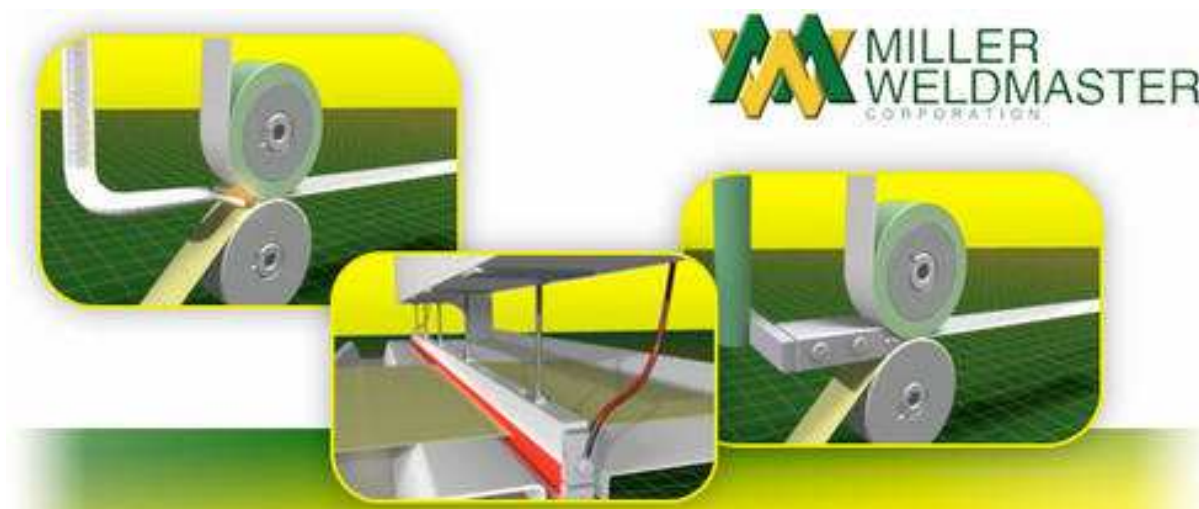
Obstajata dva postopka varjenja membran s pomočjo toplote:

- dielektrično in
- rotacijsko varjenje.

Ta dva postopka se naprej delita na različne tipe varjenja:

- vodoodporno varjenje,
- varjenje z vročim zrakom,
- varjenje s segretim klinom,
- radio-frekvenčno varjenje in
- ultrazvočno varjenje.

Varjenje z vročim zrakom (Slika 23, levo) in s segretim klinom (Slika 23, desno) ter ultrazvočno varjenje so kategorizirani kot rotacijsko varjenje. Pri tem postopku varjenja se preklop dveh membranski pol med varjenjem kontinuirano premika skozi varilno napravo. Visoko-frekvenčne naprave (Slika 23, na sredini) za varjenje pa so tip naprav za »štancanje« oz. ponavljajoče stiskanje. Preklopljeni membranski poli se med varjenjem ne premikata, ampak stojita na mestu.



Slika 23: Rotacijsko varjenje membran z vročim zrakom (levo) in s segretim klinom (desno) ter dielektrično oz. visoko-frekvenčno varjenje (na sredini).

5.1 Dielektrično visoko-frekvenčno varjenje

Dielektrično visoko-frekvenčno oz. radio-frekvenčno varjenje (Slika 24) je starejši postopek od rotacijskega varjenja, razvit pred več kot 40 leti. Radio-frekvenca je katerakoli frekvenca med normalno slišnimi zvočnimi valovi in delom spektra z infrardečo svetlobo, t.j. frekvenca med 10^4 in 10^9 nihajev na sekundo (Hz). Naprave za radio-frekvenčno toplotno varjenje delujejo s približno 27 MHz. Pri tej metodi se kovinska matrica na spodnjem delu varilnega stroja pritisne na preklop membranskih pol, ki ga podpira spodnja plošča, nato pa se na preklop med matrico in ploščo dovede časovno reguliran pulz radio-frekvenčne energije. Dovedena energija segreje membrani med matrico in ploščo dovolj, da se termoplastična prevleka začasno stali in se termoplasti dveh membranski pol spojijo skupaj. Po spojitvi se matrica dvigne, na varilno pozicijo se postavi nov preklop membran in postopek se ponovi.



Slika 24: Varilna naprava za visoko-frekvenčno varjenje.

5.2 Rotacijsko varjenje

Rotacijsko varjenje je kontinuirani proces, kje se preklapljeni membranski poli s pomočjo dveh pogonskih koles kontinuirano premikata skozi območje varjenja. Toplota se dovede preko vira toplote, ki je lahko segret kovinski klin ali vroč zrak, tik pred prehodom preklopa med pogonskima kolesoma. Pogonska kolesa raztaljeni preklop stisnejo skupaj in tako izdelajo stalen zvar.

Rotacijsko varjenje je hitrejše od dielektričnega visoko-frekvenčnega varjenja. Hitrost se povečuje z dolžino izdelkov in šivov. Na takšen način je mogoče doseči varjenje s hitrostjo do 6 metrov na minuto in celo več. Vendar pa rotacijsko varjenje za doseganje največje hitrosti in fleksibilnosti zahteva izkušenega in dobro usposobljenega operaterja. Prav tako omogoča izdelavo 3-dimenzionalnih končnih produktov, ki ne ležijo v eni ravnini kot so oblačila, napihljivi čolni, vreče in napihljive membranske konstrukcije. Ker se pri dielektričnem varjenju uporablja ravna osnovna plošča, je njena uporaba omejena na izdelke, katerih šivi morajo tekom procesa varjenja ležati v ravnini. Danes imajo določene specializirane visoko-frekvenčne varilne naprave 3-dimenzijske matrice in osnovne plošče ter vakuumske sisteme za držanje membranskih pol na poziciji, medtem ko se nanje pritiska matrico, vendar so takšne naprave zelo drage. Visoko-frekvenčno varjenje je primerno za izdelavo velikih količin

majhnih, enakih in ravnih šivov. Rotacijsko varjenje pa se lahko uporablja za različne vrste in oblike šivov z majhnimi prilagoditvami ali brez prilagoditev. Prednost rotacijskega varjenja je tudi ta, da razen izbora ustreznih širin pogonskih koles in šob za vpihavanja zraka ne zahtevajo matric in ostalega dodatnega orodja, kar omogoča veliko hitrejšo vzpostavitev proizvodnje v primerjavi z visoko-frekvenčnim varjenjem.

(Seamtek Incorporated. 2001. Heat Sealing Coated/Laminated Fabric Seams. Technical Articles. <http://www.seamtek.com/HeatSealing.htm> (18.8.2011).)

Prednosti rotacijskega varjenja pred visoko-frekvenčnim varjenjem:

- hitrejša proizvodnja,
- možnost izdelave 3-dimenzionalnih končnih izdelkov,
- prilagodljivost za različne vrste in oblike šivov,
- ne zahteva dodatne opreme za obdelovanje.

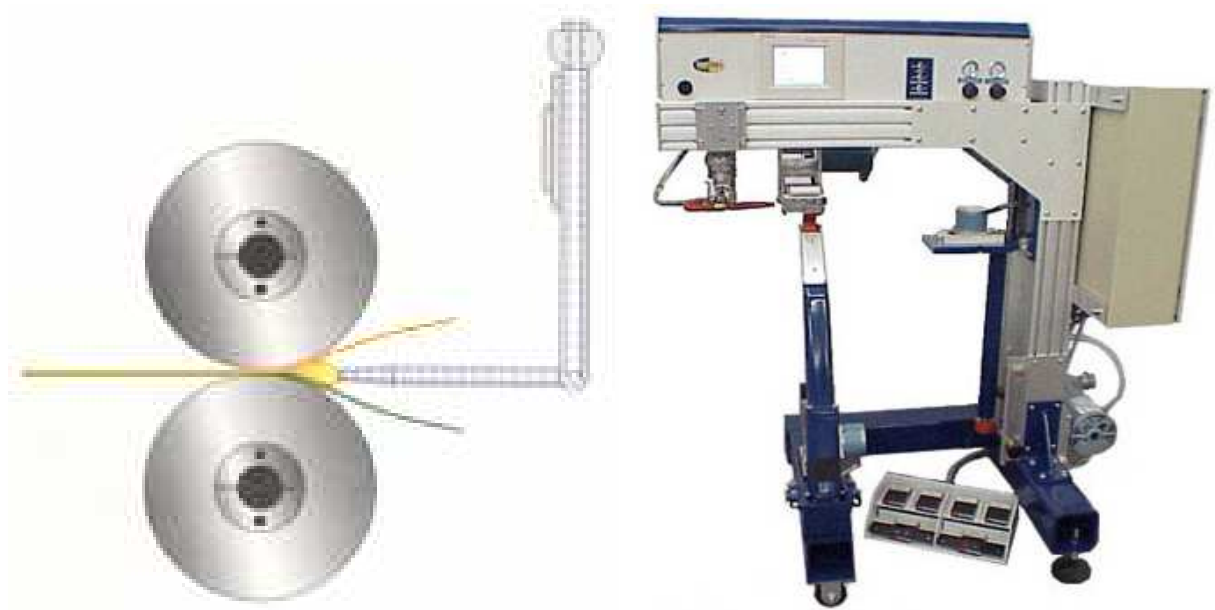
Slabost rotacijskega varjenja pred visoko-frekvenčnim varjenjem:

- potreba po izkušenem in dobro usposobljenem operaterju.

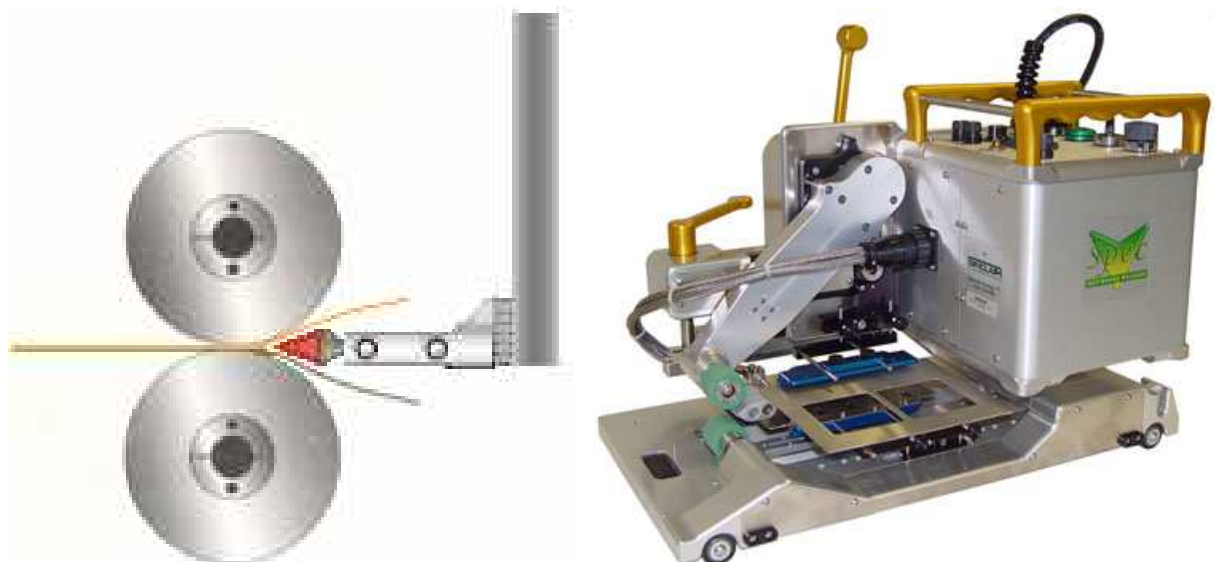
Čeprav varjenje z vročim zrakom in varjenje z vročim klinom spadata med rotacijske postopke varjenja, obstajajo določene razlike med njima. Varjenje z vročim zrakom (Slika 25) je hitrejši postopek od varjenja s segretim klinom (Slika 26). Pri slednjem se za varjenje uporablja majhen kovinski kos klinaste oblike, preko katerega med poli membran dovaja toplota neposredno pred prehodom med pogonskima kolesoma, kjer se s pritiskom membrane dokončno zavarijo skupaj. Pri varjenju z vročim zrakom se toplota namesto preko kovinskega klina dovaja skozi šobe za vpihovanje vročega zraka.

Če se pri varjenju s segretim klinom postopek varjenja prekine za kratek čas, se kovinski klin pregreje in ko se začne poli membran zopet variti, se lahko te na začetni točki varjenja ožgejo. Pri varjenju z vročim zrakom takšnih problemov zaradi pregrevanja ni. Ker se pri varjenju s klinom dovaja toplota preko kovinskega klina, lahko takšne ali drugačne oblike umazanije, kot so madeži ali stopljeni delci prevlek, blokirajo prenos toplote, kar se odraža v neenakomernosti zvara. Pri varjenju z vročim zrakom se kot vir toplote uporablja vroč zrak, zato je prenos toplote enakomeren. Površine membran z deformacijami, kot so križni šiv, med

prehodom klin dvignejo in tako poslabšajo kvaliteto varjenja. Tudi teh pomanjkljivosti pri varjenju z vročim zrakom ni, saj zrak ni tog in steče preko deformirane površine. Prednost varjenja s segretim klinom pa je ta, da porabi manj energije in povzroča manj hrupa kot zračni tok, ki prihaja iz varilnih šob pri varjenju z vročim zrakom.



Slika 25: Rotacijska varilna naprava za varjenje z vročim zrakom.



Slika 26: Rotacijska varilna naprava za varjenje s segretim klinom.

Pri analizi zgoraj omenjenih razlik med obema postopkoma rotacijskega varjenja, je očitno, da je varjenje s segretim klinom bolj primerno za varjenje relativno enostavnih izdelkov, ki so izdelani iz tehnično manj naprednih membran z gladkimi površinami brez nepravilnosti. Na drugi strani pa se lahko varjenje z vročim zrakom uporablja za bolj napredne oblike membran.

Poleg avtomatskih naprav za rotacijsko varjenje obstajajo tudi ročno vodene varilne naprave (Slika 27, levo), ki jih varilec potiska vzdolž preklopa membran in jih tako zvari med seboj. Varjenje z vročim zrakom je možno izvajati tudi s posebnimi prostoročnimi pištolami (Slika 27, desno), ki skozi šobo izpihujejo vroč zrak. Curek vročega zraka, usmerjen v preklopljeni membrani, ki se ju želi zvariti, stali termoplastični prevleki obeh membran, potem pa se z valjčkom določene oblike in širine pritisne na zvar, kar membrani trajno spoji. Ta proces je počasnejši od večine ostalih varilnih procesov, vendar ga je možno izvajati skoraj kjerkoli, zato je še posebej primeren za popravila membranskih konstrukcij in izdelavo zvarov na samem gradbišču.

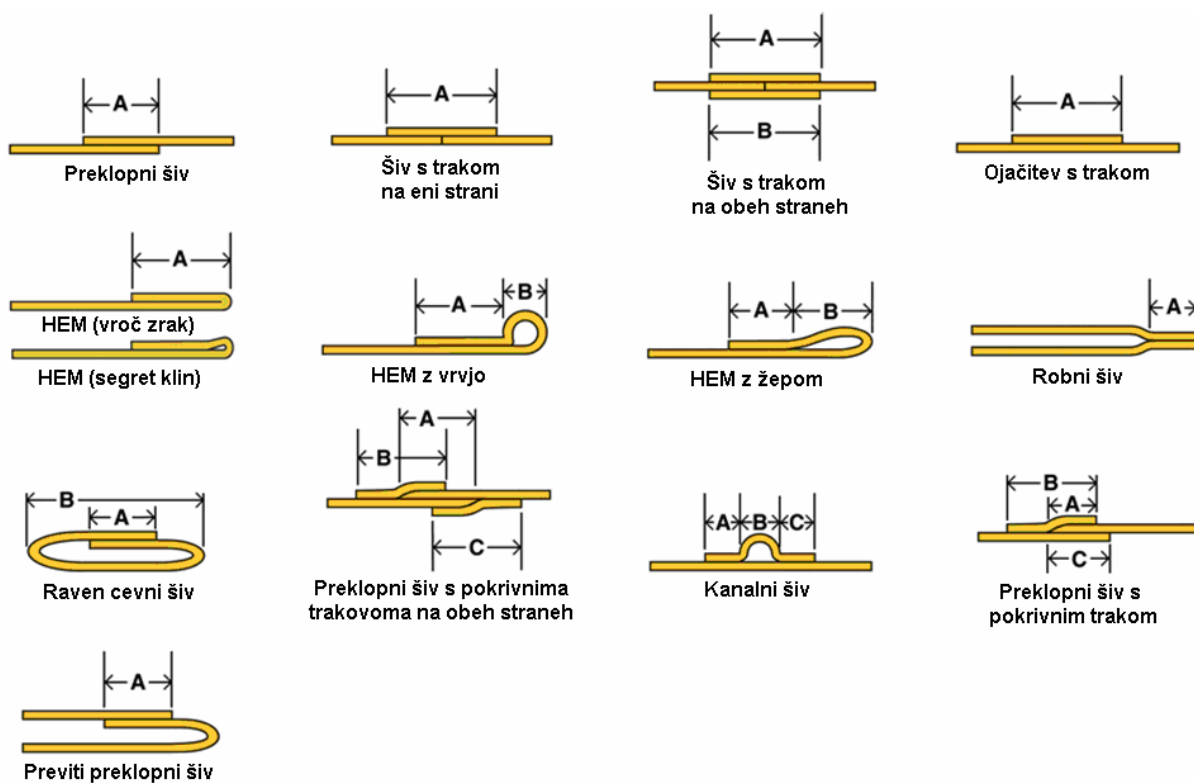
(Knowledge Center. Fabric Welding. Academic Reports.

<http://www.teonline.com/knowledge-centre/fabric-welding.html> (18.8.2011).)



Slika 27: Ročno vodena varilna naprava (levo) prostoročna varilna naprava z različnimi nastavki in valjčki za varjenje z vročim zrakom (desno) .

Na Sliki 28 so prikazani standardni tipi šivov membran. Dimenzije A, B in C se lahko spreminjajo glede na zahteve proizvodnje.



Slika 28: Standardni tipi šivov membran.

6 MEHANSKE IN FIZIKALNE LASTNOSTI ARHITEKTURNIH MEMBRAN

Podatki o preizkušeni izdelkih so skoraj edini način za vzpostavitev merila relativne kvalitete arhitekturnih membran. V proces izdelave membran vstopi veliko spremenljivk, ki naredijo produkt enega proizvajalca bistveno drugačnega od produkta njegovega konkurenta z enega ali več vidikov. Rezultati testov so najboljši pokazatelj takšnih razlik. Mnogi proizvajalci membranskih materialov so vložili velike količine denarja in časa v testiranje in karakterizacijo svojih produktov in tako pridobili informacije o njihovih lastnostih, kot so:

- natezna trdnost traku z vpetjem po celotni širini (ang. strip tensile strength),
- natezna trdnost traku z delnim vpetjem (ang. grab tensile strength),
- trapezoidna trgalna trdnost (ang. trapezoidal tear strength),
- jezična trgalna trdnost (ang. tongue tear strength),
- adhezijska trdnost (ang. adhesion strength),
- požarna odpornost (ang. flame resistance),
- končna teža (ang. finished weight),
- teža osnovne tkanine (ang. base fabric weight),
- razpoložljive površinske prevleke (ang. available topcoatings),
- odpornost na razpokanje na mrazu (ang. resistance to cold cracking),
- relaksacija in lezenje zaradi stalne obtežbe (ang. dead load),
- konstrukcijske lastnosti (ang. structural properties),
- pričakovana življenjska doba (ang. life expectancy).

Preden lahko arhitekti in inženirji začnejo uporabljati arhitekturne membrane kot gradbeni material, je potrebno poznati njihove mehanske lastnosti. Nekatere mehanske lastnosti so podobne lastnostim običajnih gradbenih materialov, mnoge izmed lastnosti pa so identične lastnostim fleksibilnih materialov.

Najprej je pomembno poznati, kako se membrane oblikuje in proizvaja. Arhitekturne membrane iz poliestrske tkanine prevlečene s PVC so sestavljene iz štirih komponent:

- osnovna tkanina,
- adhezivni oz. lepilni sloj,
- zunanja prevleka in
- površinska prevleka.

Vsaka izmed naštetih komponent prispeva na eno ali več mehanskih lastnosti.

6.1 Natezna trdnost

Material na membranskih konstrukcijah, pa naj bodo to zračno podprte konstrukcije, natezne membranske konstrukcije ali pa kabelske konstrukcije, mora prenesti obremenitve, ki se lahko pojavijo na posameznih konstrukcijah. Te napetosti so povezane z notranjim zračnim pritiskom ali prednapetostjo konstrukcije, s spremenljivimi obremenitvami zaradi vetra in snega ter z drugimi statičnimi ali dinamičnimi obremenitvami. Natezna trdnost membranskih materialov se lahko izračuna s pomočjo običajnih inženirskih formul in z uporabo ustreznih varnostnih faktorjev.

Natezna trdnost je najpomembnejša mehanska lastnost membran in je neposredno povezana z osnovno tkanino. V bistvu so od osnovne tkanine odvisne tako natezna trdnost kot tudi raztezne lastnosti, medtem ko ima debelina zunanje prevleke zelo majhen vpliv na te lastnosti. Niti preje, izdelane iz dolgih kontinuiranih poliestrskih ali steklenih filamentov, se formirajo v osnovno tkanino s pomočjo tkanja ali pletenja. Običajno so niti preje položene v dveh medsebojno pravokotnih smereh. Te niti imenujemo osnovne in votkove niti. Natezna trdnost osnovne tkanine je določena kot produkt natezne trdnosti niti preje, linearne gostote vlaken vsake niti in števila niti na 5 cm širine. Za povečanje natezne trdnosti materiala se običajno poveča natezna trdnost preje ali pa število niti preje na dolžinsko enoto.

Ker je natezna trdnost arhitekturnih membran odvisna od osnovne tkanine iz poliestrske oz. steklene preje vlaken, je za življenjsko dobo konstrukcije pomembno, da se preja zavaruje pred propadanjem in slabšanjem svojih lastnosti. Če se začnejo niti preje trgati, potem je

lahko ogrožena konstrukcijska stabilnost celotnega objekta. Varovanje preje pred poškodbami je tako ena glavnih funkcij zunanje prevleke.

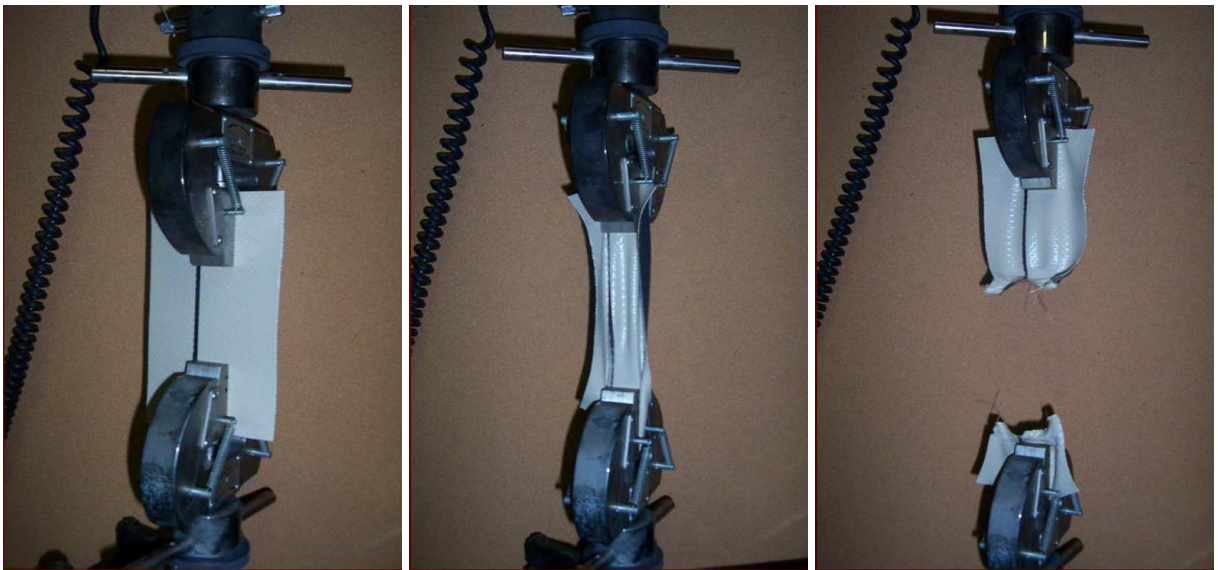
Za ugotavljanje natezne trdnosti membran se uporabljata dve metodi, opisani v standardih ISO 1421:1998 (ameriški standard ASTM D-751):

- metoda s tračnim preizkušancem s polnim vpetjem (ang. Cut Strip Test Method) in
- metoda s tračnim preizkušancem z delnim vpetjem (ang. Grab Test Method).

Vzorci materiala se preizkušajo v obeh smereh (osnovni in vtokovi smeri). Kadar primerjamo natezne trdnosti in raztezke različnih membran, je pomembno, da so vzorci preizkušeni z isto metodo. Glavna razlika med obema metodama je ta, da je tračni preizkušanec z delnim vpetjem vpet v čeljusti stroja na sredini krajših stranic (Slika 29), tračni preizkušanec s polnim vpetjem pa je vpet po celotni dolžini krajših stranic (Slika 30). Pri tračnem preizkušancu s polnim vpetjem so zato natezne napetosti po širini traka enakomerne, pri tračnem preizkušancu z delnim vpetjem pa ne, saj je na sredini širine traku natezna napetost največja in se zmanjšuje priti robovoma preizkušanca, medtem ko so vogali preizkušanca neobremenjeni. Ker je velikost tračnega preizkušanca z delnim vpetjem večja, ta prenese večje obremenitve od tračnega preizkušanca s polnim vpetjem iz enakega materiala in z enako širino vpetja v čeljusti stroja.

Metoda s tračnim preizkušancem z delnim vpetjem ima določene prednosti pred metodo s tračnim preizkušancem s polnim vpetjem. Priprava tračnega preizkušanca z delnim vpetjem je enostavnejša, poleg tega pa je njegovo obnašanje bližje dejanskemu obnašanju obremenjenih membran, saj se raztezanje membran v nezgodnih situacijah pojavlja lokalno, podobno kot pri tračnem preizkušancu z delnim vpetjem. Metoda s tračnim preizkušancem s polnim vpetjem pa običajno zagotavlja natančnejše rezultate, ki jih je lažje interpretirati. Tračne preizkušance z delnim vpetjem se na široko uporablja v tekstilni industriji, tračne preizkušance s polnim vpetjem pa za raziskovalne namene.

(Pan, N. 2003. Relationship Between Grab and Strip Tensile Strengths for Fabric with Roughly Linear Mechanical Behaviour. Textile Research Journal 2003, 73: 165.)



Slika 29: Obremenjevanje preizkušanca do porušitve pri metodi s tračnim preizkušancem z delnim vpetjem ob merjenju napetosti in raztezka.



Slika 30: Obremenjevanje preizkušanca do porušitve pri metodi s tračnim preizkušancem s polnim vpetjem ob merjenju napetosti in raztezka.

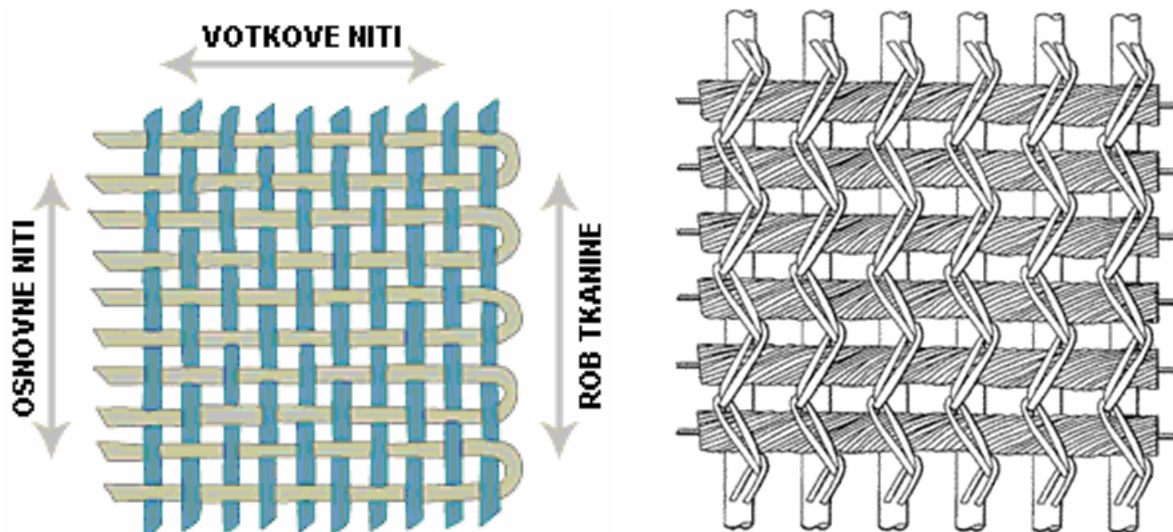
6.2 Enoosni in dvoosni raztezek

Ob povečevanju natezne obremenitve v membranskem preizkušancu se material razteguje in poruši pri dosegu svoje natezne trdnosti. Ta lastnost je podobna lastnostim običajnih gradbenim materialom kot so jeklo in steklo, vendar je dolžina raztezka pri membranah občutno večja. Običajno se velikost raztezka membranskih preizkušancev giblje od 20-50% začetne dolžine preizkušanca. Z vidika oblikovanja in projektiranja membran raztezek ob poružitvi ni tako pomemben kot raztezek pri delovnih obremenitvah oz. dejanskih obremenitvah membran na objektih z membranskimi konstrukcijami. Tudi raztezki pri teh obremenitvah so večji kot pri ostalih gradbenih materialih. Zelo pomembno je, da projektant razume, kaj pomenijo vrednosti raztezka membranskega materiala.

Lastnosti raztezanja so odvisne od lastnosti osnovne tkanine oz. bolj natančno od:

- izbora vrste vlaken,
- vzorca tkanja in
- metode nanašanje prevleke.

Za izdelavo osnovne tkanine se lahko uporabi različne tipe vlaken. Nekatera vlakna imajo pod enako obremenitvijo manjše raztezke, nekatera pa večje. Možna je uporaba različne preje vlaken v osnovni in votkovi smeri, vendar pa se različne preje vlaken vsekakor ne sme uporabiti v isti smeri. Drugi faktor, ki vpliva na lastnosti raztezanja, je vzorec tkanja niti preje, ki se ga uporabi za izdelavo osnovne tkanine. Če se osnovne in votkove niti preje prepletajo po običajni ravninski tkalski tehniki (Slika 31, levo), niti preje ob vgradnji v tkanino niso popolnoma iztegnjene. Ko se takšno tkanino obremeni se niti preje začnejo ravnati, kar se odraža v relativno velikem razteku pri majhnih obremenitvah. Osnovne in votkove niti preje so lahko kombinirane tudi s pomočjo »warp-knit weft-inserted« stroja (v dobesednem prevodu osnova-spletena, votek-vstavljen), kjer so niti v obeh smereh prednapete v iztegnjeno in ravno lego ter spletene skupaj s povezovalnimi nitmi (Slika 31, desno). Obremenitve se tako prenašajo direktno na poliestrska oz. steklena vlakna. Takšne tkanine imajo v obeh smereh vlaken enake lastnosti in so dimenzijsko stabilnejše, kar pomeni, da imajo pri določeni obtežbi manjše raztezke kot tkanine iz preje vlaken s podobno natezno trdnostjo, tkane po klasični ravninski tkalski tehniki.



Slika 31: Osnovne in votkove niti stkane po običajni ravninski tkalski tehniki (levo) in po »warp-knit weft-inserted« tehniki, kjer so prednapete osnovne in votkove niti spletene skupaj s povezovalnimi nitmi (desno).

Tretji faktor, ki vpliva na lastnosti raztezanja, pa je povezan z metodo nanašanja polimerne prevleke na osnovno tkanino. Pri večini postopkov nanašanja prevleke gre osnovna tkanina s prevleko preko segrelih peči ali drugih virov energije in se zaradi toplote lahko raztegne. Takšni postopki lahko povzročijo, da se material skrči, ali da se v njem pojavijo diskontinuitete, v vsakem primeru pa so prizadete lastnosti raztezanja.

Lastnosti enoosnega raztezanja materiala se lahko ugotavljajo po ISO 1421:1998 (ameriški standard ASTM D-751) po metodi s tračnim preizkušancem ali po ASTM D-4851 s preizkušancem pod statično obtežbo. Dvoosno testiranje pa se izvaja s številnimi testnimi metodami, ki so jih razvili proizvajalci materiala ali izdelovalci membranskih konstrukcij.

6.3 Dimenzijska stabilnost

Dimenzijska stabilnost je zelo pomembna lastnost kateregakoli gradbenega materiala. Če se zaradi spremembe temperature ali vlage spreminja velikost materiala, je potrebno te spremembe upoštevati pri projektiranju objekta. To je še posebej pomembno pri projektiranju

natezних membranskih konstrukcij, kjer so membranske pole odrezane na točno določene velikosti, da dajo objektu projektirano začetno prednapetost.

Dimenzijska stabilnost arhitekturnih membran je neposredno povezana z osnovno tkanino. Na začetku so bile arhitekturne membrane izdelane iz najlonskih vlaken, vendar ta vlakna niso bila dimenzijsko stabilna in so jih zato kmalu zamenjali za poliestrska in steklena vlakna. Dimenzijska stabilnost osnovne tkanine iz poliestrskih ali steklenih vlaken je tako dobra, da za to mehansko lastnost v splošnem ni posebnih določil ali preizkusov, zahteva se le izdelava osnovne tkanine iz omenjenih vlaken. Dimenzijska stabilnost se preizkuša po standardu ASTM D1204.

6.4 Trgalna trdnost

Trgalna trdnost arhitekturnih membran je pomembna mehanska lastnost. Odpornost materiala na trganje ali širjenje trganja je lahko kritična za konstrukcijsko celovitost objekta. To še posebej velja za zračno podprte konstrukcije, kjer lahko padec zračnega pritiska znotraj objekta povzroči katastrofalno porušitev.

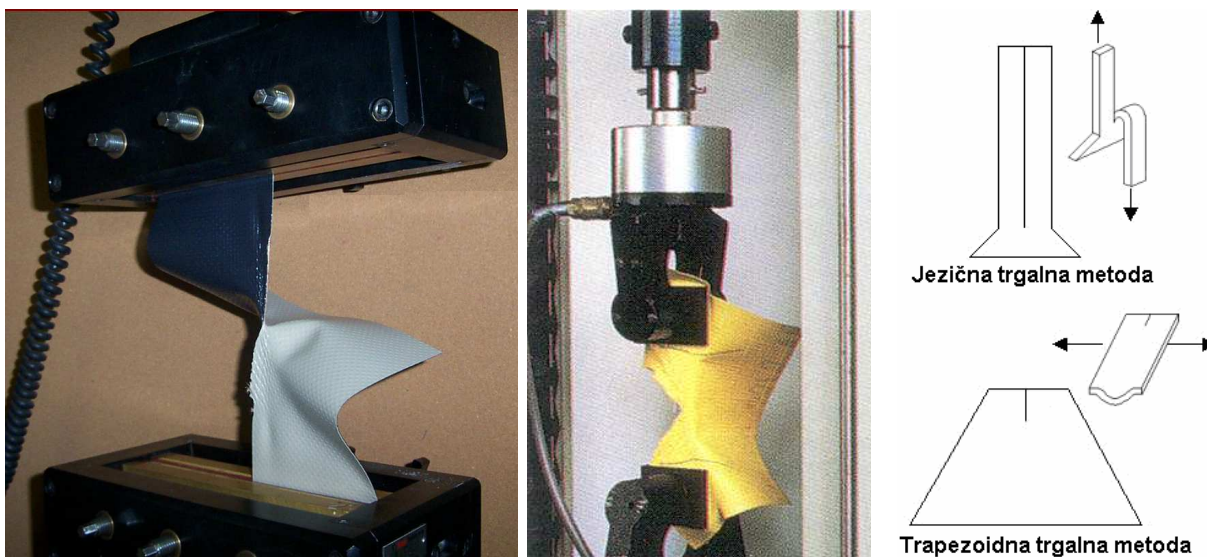
Lastnost trgalne trdnosti je odvisna od kombinacije različnih faktorjev, ki so povezani z:

- osnovno tkanino,
- konstrukcijo tkanja in
- vrednostjo adhezije.

Za doseganje največje možne trgalne trdnosti membrane, mora biti nitim preje omogočeno, da se lahko premikajo in drsijo druga ob drugi znotraj zaščitne zunanje prevleke. Če so niti preje fiksirane na določenem mestu, se trgalna sila prenese na individualne niti, kar se odraža v zmanjšani vrednosti trgalne trdnosti. V splošnem imajo membrane s tkanino, izdelano po »warp-knit weft-inserted«
metodi, večjo trgalno trdnost kot tkanine, ki so stkane po običajni ravninski tkalski tehniki, saj niti preje niso stkane med seboj.

Lepilni premaz oz. adhezija med osnovno tkanino in polimerno prevleko ima prav tako velik vpliv na trgalno trdnost. Večja adhezija premaza omeji sposobnost niti preje, da drsijo ena ob drugi in jih »zveže« znotraj zunanje prevleke, kar močno zmanjša trgalno trdnost. Manjša adhezija premaza omogoča večjo trgalno trdnost, vendar pa prinese druge pomembne probleme.

Preizkušanje trgalne trdnosti materiala se lahko izvaja po ISO 4674-1:2003 oz. ASTM D-751 jezični trgalni metodi (Slika 32, levo) ali ASTM D-4533 trapezoidni trgalni metodi (Slika 32, na sredini). V mnogih primerih se za boljšo karakterizacijo trgalne trdnosti uporabljata obe metodi. Preizkušanje trgalne trdnosti se izvaja tudi na materialu, ki je bil naravno ali pospešeno staran, da se ugotovi izguba trgalne trdnosti tekom časa.



Slika 32: Preizkušanje trgalne trdnosti membranskega preizkušanca po jezični trgalni metodi (levo) in po trapezoidni trgalni metodi (na sredini) ter oblika preizkušancev s prikazom smeri obremenjevanja pri obeh metodah (desno).

6.5 Adhezija prevleke

Adhezija prevleke je sposobnost zunanje prevleke, da se oprime osnovne tkanine. Najmočnejša osnovna tkanina in najboljša formulacija zunanje prevleke sta brez vrednosti, če

ju ni mogoče ustrezno povezati med seboj. Dobra adhezija zunanje prevleke je pogoj za izdelavo in varjenje membran. Pomembna je tudi zato, da ne pride do odstopanja oz. delaminacije zunanje prevleke od tkanine, ko je material izpostavljen delovanju okolja.

Primarna naloga lepilnega oz. adhezivnega sloja je, da poveže osnovno tkanino z zunanjo prevleko. Lepilo je snov iz sintetične Plastisol smole z dodatki za izboljšanje adhezije, ki se jo dodaja v tekočo maso za izdelavo zunanje prevleke. Ko se to zmes nanese na osnovno tkanino, se med nitmi tkanine in lepilom oblikuje kemična vez, s tem pa tudi vez med zunanjo prevleko in nitmi tkanine. Ta proces je potrebno skrbno spremljati, da se doseže dovolj velika adhezija, ki ne sme biti premajhna in ne prevelika. Premajhna adhezija namreč povzroča probleme s trdnostjo šiva in delaminacijo zunanje prevleke, prevelika adhezija pa zmanjša trgalno trdnost membran.

Adhezija prevleke se preizkuša s pomočjo ISO 36:2011 (am. stand. ASTM D-751) cepilnega adhezijskega preizkusa, kjer so preizkušanci izdelani iz dveh zvarjenih ali zlepljenih kosov membran. S pomočjo cepilnega stroja se preizkušanci razcepijo na dva dela pri konstantni cepilni obremenitvi (Slika 33). Rezultati so podani kot velikost sile na 5 cm (N/5cm).



Slika 33: Cepilni adhezijski preizkus.

6.6 Varilnost membran in trdnost šivov

Ena izmed najkoristnejših lastnosti membran je sposobnost učinkovitega varjenja v velike ponjave, ki jih je mogoče vgraditi v membranske konstrukcije. Za razliko od običajnih gradbenih materialov kot so les, jeklo ali opeka, ki zahtevajo montažo na gradbišču, se lahko membranske pole med seboj zvari že v sami proizvodnji in se jih nato prinese na gradbišče, kjer se vgradi

Zunanje prevleke membran so termoplastičen material, kar pomeni, da se lahko spajajo s toploto. Proces spajanja s toploto se lahko izvaja preko visoko-frekvenčnega (radio-frekvenčnega) varjenja ali varjenja s pomočjo vročega zraka ali segretega klina. Šivi se lahko proizvajajo s hitrostjo do 6,1 m/min.

Ker osnovne tkanine membran prenašajo obremenitve na membranskih konstrukcijah, morajo biti šivi sposobni prenesti obremenitve iz enega kosa membrane na drugega. Zaradi prenašanja obremenitev na šiv delujejo strižne sile, zato je za celovitost membranske konstrukcije pomembno, da je natezna trdnost šiva večja od natezne trdnosti same membrane. Membrane naj bi se vedno porušile izven območja šivov pri vrednostih, ki so enake natezni trdnosti membrane, zato je potrebno zagotoviti, da je šiv vsaj tako močan kot membrana. Vsak šiv mora prenesti vse zahtevane obremenitve, ki delujejo na objekt pri vseh vrstah okoljskih razmer.

Trdnost šiva je odvisna od:

- adhezivnega oz. lepilnega sloja,
- zunanje prevleke in
- procesa varjenja.

Adhezivni sloj mora med osnovno tkanino in zunanjo prevleko ustvariti vez, ki lahko prenese strižne sile, prisotne zaradi obremenitev. Zunanja prevleka mora biti ustrezno formulirana in nanesena, da se jo lahko vari in da prenese strižne sile. Proces varjenja pa mora biti izveden z ustrezno širino preklopa in potrebno količino toplote in pritiska v določenem časovnem intervalu, da se izdelata dober »šiv«. Običajno materiali z večjo natezno trdnostjo zahtevajo

širši preklop za izdelavo šiva, da lahko prenesejo večje ali enake strižne sile kot sama membrana.

Preizkušanje trdnosti šivov zajema serijo preizkusov, ki vključujejo preizkušanje adhezije zvara, strižne trdnosti šiva in statične obremenitve. Adhezija zvara se prav tako kot adhezija prevleke preizkuša s prej opisanim cepilnim adhezijskim testom po ASTM D-751. Preizkus strižne trdnosti šiva je modifikacija preizkusa tračne natezne trdnosti po ASTM D-751, pri katerem se preizkušane širine 2,54 cm (1 inch) zareže pravokotno na smer šiva in se ga natezno obremenjuje v vzdolžni smeri, prav tako kot pri postopku preizkušanja tračne natezne trdnosti. Najpomembnejši izmed vseh preizkusov je statični preizkus. Pri tem preizkusu se na preizkušane širine 2,54 cm (1 inch) preko šiva nanese obremenitev, ki se jo pusti stati 4 ure, medtem pa se opazuje, kaj se s šivom dogaja. Preizkus se izvaja tako pri sobni temperaturi kot tudi pri visoki temperaturi, ki običajno znaša 71°C (160 F). Ta preizkus najbolj natančno simulira dejanske razmere na terenu, saj je v času obratovanja objekta šiv izpostavljen konstantni obremenitvi.

6.7 Vpijanje vlage

Tako zaradi konstrukcijskih kot tudi estetskih razlogov je pomembno, da osnovna tkanina ne vpija vlage. Kontinuirani filamentni preje lahko zaradi kapilarnega dviga povlečejo vodo v območje med filamenti. Če se tega ne prepreči, lahko vlaga vpliva na adhezijske lastnosti med osnovno tkanino in zunanjo prevleko, kar povzroča težave s šivi ali odstopanje oz. delaminacijo zunanje prevleke. Tudi majhne količine vlage, prisotne v osnovni tkanini, so lahko vir rasti gliv, ki povzročajo razbarvanje materiala in s tem povezan estetski problem, viden ob pogledu iz notranjosti stavbe (iz temnejšega prostora proti svetlejšem).

Lastnosti ne-vpijanjanja vlage se dosežejo z ustrezno izbiro preje, lepilnega sloja in postopka izdelave prevleke. V zadnjih letih je uporaba poliestrske preje, ki ne vpija vlage, močno zmanjšala ta problem, poleg tega proizvajalci niti preje finalno obdelajo, kar še dodatno zmanjša vpijanje vlage. Še en način za odpravljanje vpijanja vlage pa je uporaba dodatka za adhezivni sloj, ki popolnoma impregnira osnovno tkanino.

Preizkus vpivanja vode se izvaja s potapljanjem traku membrane širine 2,54 cm (1 inch) v barvno raztopino vode. En konec vzorca se za 24 ur potopi v raztopino, potem pa se ga odstrani in se ugotovi stopnja vpitja tekočine.

6.8 Odpornost na UV svetlobo in vremenske vplive

Načelo podaljševanja življenjske dobe membranskih konstrukcij je, da se ohrani natezna trdnost osnovne tkanine, zato je to potrebno zaščititi pred UV svetlobo in ostalimi vremenskimi vplivi. Zaščito pred UV svetlobo zagotavlja zunanja prevleka membrane, ki mora biti formulirana tako, da UV svetlobo odbija ali pa jo absorbira, tako da ta ne more vplivati na osnovno tkanino ali na samo zunanjo prevleko. To se običajno doseže z ustrezno izbiro pigmentov, z uporabo UV absorberjev ali s kombinacijo obojega. Zaradi želje po različnih barvah ali transmisijah svetlobe se proces formulacije zunanje prevleke še dodatno zaplete. Preizkušanje odpornosti membran na UV svetlobo se lahko izvaja po ASTM G-26 Xenon-Arc preizkusu ali pa po ASTM G-53 fluorescentnem preizkusu (ISO 1419:1995). Stroji za pospešeno preperevanje oz. staranje s simulacijo vremenskih vplivov združujejo visoko koncentracijo UV svetlobe s pršenjem vode in z visokimi temperaturami. Na takšen način lahko v zgolj nekaj mesecih simulirajo leta izpostavljenosti membran zunanjim vremenskimi vplivom in ob tem zelo dobro posnemajo njihovo dejansko obnašanje na terenu.



Slika 34: Laboratorijska oprema za pospešeno preperevanje oz. staranje membranskih vzorcev s simulacijo vremenskih vplivov in s fluorescentno UV svetlobo.

6.9 Odpornost na glive in plesni

Arhitekturne membrane se pogosto uporabljajo v vročem in vlažnem okolju, ki je dovzetno za rast gliv in plesni. Rast gliv na membranah ni samo estetski problem, saj lahko privede tudi do strukturnih problemov materiala. Pogosto se rast gliv na membranah začne z nabiranjem umazanije na površini materiala.

Za zmanjšanje morebitnih težav zaradi napada gliv in plesni na material proizvajalci med sestavine adhezivnega oz. lepilnega sloja ter zunanje prevleke dodajajo fungicide. Poleg tega tudi uporaba sistema površinske prevleke zmanjša nabiranje umazanije na površini materiala in tako poveča odpornost materiala na glive in plesni. Ko se material razvije, se izdelajo laboratorijski preizkusi, ki morajo zagotoviti, da material ne podpira rasti gob in plesni. Arhitekturne membrane se preizkušajo po ASTM G-21 standardnem preizkusu za določanje odpornosti sintetičnih polimernih materialov na glive.

6.10 Požarna odpornost

Požarna odpornost membrane (ang. flame resistance) je lastnost, ki preprečuje vžig membrane na vročem zraku in zavira širjenje ognja. Najbolje se požarna odpornost membrane opiše z izrazom »omejeno vnetljiv« material. Material se bo v prisotnosti vira ognja vžgal, vendar se bo sam pogasil, ko bo vir odstranjen. Ta lastnost je dejansko lahko prednost, če upoštevamo, kaj se dogaja znotraj objektov z membranskimi konstrukcijami v času požara. Namreč, ko plameni dosežejo streho membranske konstrukcije, se membrana stali in izgori ter tako omogoči dimu in toploti, da uideta iz objekta.

Požarno odpornost membran zagotavlja zunanja prevleka. Ta mora biti formulirana z ustreznimi vrstami in količinami dodatkov za zaviranje gorenja (ang. flame retardants), ki dajo prevleki samougasljive lastnosti, zahtevane za varen gradbeni material. Ker so ti dodatki vključeni v zunanjo prevleko in se jih ne da iztisniti ali odstraniti, ostane material požarno odporen tekom celotne življenjske dobe. Membrane s PVC zunanjo prevleko imajo zaradi

svojih samougasljivih lastnosti relativno nizko stopnjo širjenja ognja, prav tako pa imajo zaradi svoje majhne teže tudi relativno nizko stopnjo razvoja dima.

Membrana s prevleko z zaviralci gorenja lahko prenese zelo visoke temperature točkovnega vira, vendar se takšen material ob prisotnosti velikega vira vžiga, kljub temu lahko vžge. Namreč večji kot je vir vžiga, večja toplotna energija pride do vlaken osnovne tkanine za zaščitno prevleko in več kot je toplotne energije, ki pride do vlaken, hitreje membrana doseže temperaturo, pri kateri se vžge in zagori od znotraj navzven. Tipični požari šotorskih objektov se npr. začnejo z majhnimi viri vžiga, ki se zaradi vnetljivih predmetov v šotoru razširijo v velike vire in tako prispevajo k vžigu membrane.

Obstaja veliko različnih preizkusov požarne odpornosti, ki se uporabljajo za preizkušanje gradbenih materialov, vendar mnogi izmed njih niso primerni za preizkušanje membran. Glavni test, ki se uporablja za preizkušanje membran v ZDA, je NFPA 701 Vertical Flame Test. Pri tem testu se spodnji konec vzorca membrane, ki se ga drži v vertikalni legi, izpostavi ognju za 12 sekund, nato pa se ga odstrani. Material se mora sam pogasiti v času 2 sekund po odstranitvi in ne sme imeti prekomerne ožgane dolžine.

Drugi pogosti preizkus požarne odpornosti membran je ASTM E-84 Tunnel Test, kjer se 7,6 m (25 feet) dolg vzorec materiala drži v horizontalni legi in se ga vžge na enem koncu. Pri preizkusu se določi stopnja širjenja ognja in razvoj dima med gorenjem membranskega vzorca glede na primerjavo s kontrolnim materialom. Proizvajalci morajo zagotoviti potrjeno informacijo, katere ASTM, NFPA ali druge požarne preizkuse so njihovi produkti prestali.

Preglednica 2: Zveza med razredi in referenčnimi požarnimi scenariji za gradbene produkte (izključeni talni gradbeni produkti) po EN 13501-1.

Euroclass	Prispevanje k požaru / zelena stopnja varnosti	Klasifikacija po DIN 4102
F	Produkti brez določene reakcije na požarno obremenitev ali produkti, ki ne morejo biti klasificirani v nobenega izmed razredov A1, A2, B, C, D, E.	B3 (vnetljivi materiali)
E	Produkti razreda E so sposobni za krajši čas prenesti majhno požarno obremenitev brez večjega širjenja požara.	B2 (vnetljivi materiali)
D	Produkti izpolnjujejo kriterije za razred E in so sposobni za daljši čas prenesti majhno požarno obremenitev brez večjega širjenja požara. Poleg tega so sposobni prenesti temperaturno obremenitev z enim gorečim predmetom z zadostno zamudo in omejenostjo sproščene toplote.	
C	Enako kot razred D z izpolnjevanjem bolj strogih zahtev. Poleg tega imajo produkti razreda C pri temperaturni obremenitvi z enim gorečimi predmetom omejeno bočno širjenje požara.	B1 (težko vnetljivi materiali)
B	Enako kot razred C z izpolnjevanjem bolj strogih zahtev.	
A2	Produkti razreda A2 izpolnjujejo enake kriterije kot razred B za SBI-test po EN 13823. Poleg tega pod pogoji polno razvitega požara ti produkti ne bodo bistveno prispevali k obremenitvi zaradi požara in k širjenju požara.	A2 (negorljivi materiali)
A1	Produkti razreda A1 ne bodo sodelovali v nobeni fazi požara, vključno s fazo polno razvitega požara. Zaradi tega razloga, se predvideva, da so avtomatično sposobni zadovoljiti vsem zahtevam nižjih razredov.	A1 (negorljivi materiali)

(Lehner, S. 2005. European Fire Classification of Construction Products, New Test Method »SBI«, and Introduction European Classification System into German Building Regulations. Otto-Graf-Journal, Vol. 16: 151-166.)

6.11 Možnost čiščenja in estetski videz

Videz objekta je običajno zelo pomembna zadeva, ne samo takrat, ko je objekt nov, ampak tudi tekom staranja objekta. Na svetu je veliko odmevnih zgradb z arhitekturnimi membranami, ki imajo unikatne vzorce in oblike. Te konstrukcije morajo ohraniti svoj videz dolgo časa in običajno tudi arhitekta in projektanta zelo skrbi sprememba barve ali pretirano zadrževanje umazanije na konstrukciji, ki lahko vplivajo na vizualni izgled konstrukcije. Sprememba barve je pri membranah običajno povezana z zunanjo prevleko, vendar lahko na barvo vpliva tudi površinska prevleka. Pri formulaciji zunanje prevleke je potrebno paziti, da se uporabijo barvno obstojni pigmenti. Za preizkušanje barvne obstojnosti se vzorci membran preizkušajo v napravah, ki simulirajo pospešeno staranje materiala, s pomočjo katerih je mogoče ugotoviti kakršnekoli večje spremembe barve.

Večji estetski problem je povezan z zadrževanjem umazanije na arhitekturnih materialih. Membrane z mehki in fleksibilnimi PVC prevlekami, ki vsebujejo plastifikatorje, so občutljive na prijemanje umazanije na zunanjo površino. Ta problem se običajno rešuje z uporabo ustrezne površinske prevleke na zunanji strani membrane. Namen površinskih prevlek je ustvariti tanek in trd film na površini membrane, ki preprečuje prijemanje umazanije in omogoča, da se umazanija spere z membrane pri običajni količini padavin.

(Seaman, R. N., Bradenburg, F. 2000. Utilization of vinyl-coated polyester fabrics for architectural applications. Fabric architecture. Fabric Structures Association.

http://fabricarchitecturemag.com/articles/0700_id_part1.html,

http://fabricarchitecturemag.com/articles/0900_id_part2.html (18.8.2011))

6.12 Povzetek lastnosti arhitekturnih membran

Visoko zmogljive lastnosti arhitekturnih membran so dosežene z ustrezno izbiro:

- vlaken osnovne tkanine,
- konstrukcije tkanja osnovne tkanine,
- formulacije zunanje prevleke in
- postopka nanašanja prevleke na tkanino.

Vrsta izbrane preje vlaken in konstrukcija tkanja le te v osnovno tkanino zagotavlja arhitekturnim membrani naslednje mehanske in fizikalne lastnosti:

- visoka natezna trdnost,
- visoka trgalna trdnost,
- enoosne in dvoosne karakteristike raztezanja,
- odpornost na širjenje trganja,
- odpornost proti prebadanju,
- dimenzijska stabilnost osnovne tkanine ob spreminjanju temperature in vlage,
- odpornost na kemične vplive,
- odpornost na degradacijo zaradi UV svetlobe,
- ohranitev teh lastnosti pri dolgotrajni izpostavljenosti vplivom na prostem.

Ustrezna zasnova zunanje prevleke in postopka nanašanja le te na osnovno tkanino daje arhitekturnim membranam naslednje lastnosti:

- zaščita osnovne tkanine,
- kvalitetna adhezija na osnovno tkanino,
- obnašanje pod temperaturnimi in stalnimi obremenitvami,
- ne vpijanje vlage in vode,
- odpornost na obrabo,
- požarna odpornost,
- možnost različnih barv,
- obstojnost barve,
- fleksibilnost pri nizkih temperaturah,
- fleksibilnost pri dolgotrajni izpostavljenosti vplivom na prostem,
- možnost varjenja,
- možnost popravil na terenu,
- kemična odpornost,
- ohranitev teh lastnosti pri dolgotrajni izpostavljenosti vplivom na prostem.

Za določanje in vrednotenje mehanskih in fizikalnih lastnosti membranskih gradbenih materialov za izdelavo arhitekturnih membranskih konstrukcij so na voljo številne preizkušene metode testiranja, ki so se tekom let izkazale kot odličen pokazatelj kvalitete

membran. Število membranskih konstrukcij bo v prihodnosti še naprej naraščalo. Uspešno in dolgotrajno delovanje te vrste objektov je odvisno od kvalitete izbranih membran, zato morajo arhitekti, inženirji in lastniki objektov razumeti zahtevane lastnosti membran in v proces nabave vključiti tudi izvedbo ustreznih preizkusov teh lastnosti.

7 OPIS MEMBRAN PROIZVAJALCA VERSEIDAG-INDUTEX

Nemško podjetje Verseidag-Indutex GmbH izdeluje visoko kvalitetne arhitekturne membrane iz oslojenih tkanin, ki jih prodajajo pod blagovno znamko Duraskin®. Njihove membrane se uporabljajo za izdelavo fasad, fleksibilnih nateznih membranskih konstrukcij, mobilnih šotorov in skladiščnih objektov. Proizvajajo pa tudi membrane za ponjave tovornih vozil ter industrijske kontejnerje za transport in skladiščenje kosovnega blaga, tekočin in plinov (npr. vode za gašenje, kemičnih odpadkov, pitne vode, gnojnice,...), pa tudi za reševalne vreče, boje, bokobrane, naftne bariere,... Membrane proizvajalca Verseidag-Indutex se v Sloveniji najpogosteje uporabljajo, zato je v tem poglavju podan tudi njihov opis. Na spodnjih slikah je prikazanih nekaj svetovno prepoznavnih objektov, na katerih so uporabljene različne Duraskin® membrane.



Slika 35: Z membransko kritino pokrite tribune nogometnega stadiona Soccer City v Johannesburgu, Južna Afrika, ki je leta 2010 na World Architecture Festival Awards (WAF Awards) prejel nagrado »World's Best Sport Building«.



Slika 36: Green Point Stadium v Cape Townu, Južna Afrika, z membransko fasado in kritino (levo) in luksuzni hotel Burj Al Arab v Dubaju s fasado iz bele membrane (desno).

V Sloveniji se s projektiranjem in gradnjo jeklenih montažnih objektov z membransko kritino in fasado ukvarja podjetje Loging. Na spodnji sliki sta prikazana dva izmed najbolj prepoznavnih Logingovih objektov z membranami Duraskin® na slovenskih tleh.



Slika 37: Rdeča membranska fasada Hale 12 v trgovskem centru BTC v Ljubljani (levo) in zložljiva pnevmatska membranska streha avditorija v Portorožu (desno).

7.1 Membrane za izdelavo fasad

Te membrane odlikuje izredna odpornost na vremenske vplive. Prepustne mrežaste membrane z odprtinami (mrežasta konstrukcija membrane, kjer so vzporedne osnovne oz. votkove niti preje med seboj dovolj razmaknjene, da tudi po nanosu prevleke med njimi ostanejo prazni prostorčki) zmanjšajo izpostavljenost fasade sončni svetlobi in omogočajo dovod svežega zraka - sistem prezračevane fasade. Na voljo so tudi negorljive različice v skladu z DIN 4102 A2.

Preglednica 3: Tehnične karakteristike fasadnih membran nemškega podjetja Verseidag-Indutex GmbH pod blagovno znamko Duraskin®.

Lastnosti	Standard	B 3704	B 18656 F	B 18909 F	B 18971
Osnovna tkanina	-	PES	SV EC 6	SV EC 9	SV EC 6
Prevleka	-	PVC	PTFE	PTFE	PTFE
Površinska prevleka	-	PVDF fluor lak	-	-	-
Skupna teža [g/m ²]	DIN EN ISO 2286-2	480	700	650	450
Širina [cm]	DIN EN ISO 2286-1	300	300	300	300
Natezna trdnost [N/5cm]	DIN 53354 osnova/votek	3500/3000	5000/4500	3500/3000	1700/2300
Trgalna trdnost [N]	DIN 53363 osnova/votek	900/500	450/450	250/250	200/250
Prepustnost svetlobe pri 550 nm [%]	DIN 5036	36	34	50	40
Odprta površina [%]	-	-	≈ 20	-	≈ 40
Požarna odpornost	DIN 4102	B1	A2	A2	A2

Podane vrednosti so nominalne vrednosti s toleranco $\pm 5\%$. Prepustnost svetlobe se pri membrani B 3704 nanaša na belo barvo, pri ostalih treh PTFE membranah pa na beljeno verzijo. Membrane s tkanino iz steklenih vlaken in PTFE prevleko se ne šivajo, se le varijo.

(Verseidag-Indutex GmbH. 2011. Facades. Architecture.

<http://www.verseidag.de/en/en/duraskin/architecture/facades/facades> (18.8.2011).)



Slika 38: Primeri uporabe membran za izdelavo fasad.

7.2 Membrane za izdelavo fleksibilnih nateznih membranskih konstrukcij



Slika 39: Primeri uporabe membran za izdelavo fleksibilnih nateznih membranskih konstrukcij.

Pravilna izbira in sestava vhodnih surovin, kot tudi tehnologija izdelave prevleke, določa visoko kakovost, trajnost in estetski izgled teh membran, ki izpolnjujejo visoke tehnične in estetske zahteve. Učinkovito površinsko tesnjenje nudi zaščito proti onesnaženosti okolja in zavira proces staranja.

Preglednica 4: Tehnične karakteristike membran za izdelavo fleksibilnih nateznih membranskih konstrukcij nemškega podjetja Verseidag-Indutex GmbH pod blagovno znamko Duraskin® z možnostjo požarne odpornosti M2.

Lastnosti	Standard	B 4951	B 4617
Osnovna tkanina	-	PES	PES
Prevleka	-	PVC	PVC
Površinska prevleka	-	PVDF fluor ali akrilni lak	PVDF fluor ali akrilni lak
Skupna teža [g/m ²]	DIN EN ISO 2286-2	800 (akrilni lak) 900 (PVDF lak)	900 (akrilni lak) 1000 (PVDF lak)
Širina [cm]	DIN EN ISO 2286-1	250	250
Natezna trdnost [N/5cm]	DIN 53354 osnova/votek	3000/3000	4400/4000
Trgalna trdnost [N]	DIN 53363 osnova/votek	300/300	580/520
Adhezija [N/5cm]	DIN 53357	100	120
Prepustnost svetlobe pri 550 nm [%]	DIN 5036	6	5
Požarna odpornost	DIN 4102/ NF P 92.503	B1/M2	B1/M2

Preglednica 5: Tehnične karakteristike membran za izdelavo fleksibilnih natezних membranskih konstrukcij nemškega podjetja Verseidag-Indutex GmbH pod blagovno znamko Duraskin® z osnovno tkanino iz poliestrskih vlaken in PVC prevleko.

Lastnosti	Standard	B 4915	B 4618	B 4092
Osnovna tkanina	-	PES	PES	PES
Prevleka	-	PVC	PVC	PVC
Površinska prevleka	-	PVDF fluor ali akrilni lak	PVDF fluor ali akrilni lak	PVDF fluor ali akrilni lak
Skupna teža [g/m ²]	DIN EN ISO 2286-2	1050 (akrilni lak) 1150 (PVDF lak)	1300 (akrilni lak) 1400 (PVDF lak)	1450 (akrilni lak) 1550 (PVDF lak)
Širina [cm]	DIN EN ISO 2286-1	250	250	250
Natezna trdnost [N/5cm]	DIN 53354 osnova/votek	5750/5100	7450/6400	9800/8300
Trgalna trdnost [N]	DIN 53363 osnova/votek	950/800	1400/1100	1800/1600
Adhezija [N/5cm]	DIN 53357	120	150	150
Prepustnost svetlobe pri 550 nm [%]	DIN 5036	4	3	3
Požarna odpornost	DIN 4102	B1	B1	B2

Preglednica 6.1: Tehnične karakteristike membran za izdelavo fleksibilnih natezних membranskih konstrukcij nemškega podjetja Verseidag-Indutex GmbH pod blagovno znamko Duraskin® z osnovno tkanino iz steklenih vlaken in PTFE prevleko.

Lastnosti	Standard	B 18909 M	B 18919	B 18656 M
Osnovna tkanina	-	SV EC 9	SV EC 6	SV EC 6
Prevleka	-	PTFE	PTFE	PTFE
Površinska prevleka	-	-	-	-
Skupna teža [g/m ²]	DIN EN ISO 2286-2	650	600	700
Širina [cm]	DIN EN ISO 2286-1	300	300	300
Natezna trdnost [N/5cm]	DIN 53354 osnova/votek	3500/3000	3500/2300	5000/4500
Trgalna trdnost [N]	DIN 53363 osnova/votek	250/250	250/200	450/500
Adhezija [N/5cm]	DIN 53357	-	40±5	-
Prepustnost svetlobe pri 550 nm [%]	DIN 5036	50	20	34
Požarna odpornost	DIN 4102	A2	A2	A2

Preglednica 6.2: Tehnične karakteristike membran za izdelavo fleksibilnih natezних membranskih konstrukcij nemškega podjetja Verseidag-Indutex GmbH pod blagovno znamko Duraskin® z osnovno tkanino iz steklenih vlaken in PTFE prevleko.

Lastnosti	Standard	B 18039	B 18089	B 18059
Osnovna tkanina	-	SV EC 3/4	SV EC 3/4	SV EC 3/4
Prevleka	-	PTFE	PTFE	PTFE
Površinska prevleka	-	-	-	-
Skupna teža [g/m ²]	DIN EN ISO 2286-2	800	1150	1550
Širina [cm]	DIN EN ISO 2286-1	300	470	470
Natezna trdnost [N/5cm]	DIN 53354 osnova/votek	4200/4000	7000/6000	8000/7000
Trgalna trdnost [N]	DIN 53363 osnova/votek	300/300	500/500	500/500
Adhezija [N/5cm]	DIN 53357	60	80	100
Prepustnost svetlobe pri 550 nm [%]	DIN 5036	17	14	11
Požarna odpornost	DIN 4102	A2	B1	B1

Na posebno zahtevo je pri membranah B 4951 in B 4617 na voljo tudi požarna odpornost M2. Prepustnost svetlobe se nanaša na membrane v beli 286 barvi. Membrane z akrilnim lakom je mogoče variti, membrane s PVDF fluor lakom pa ne. Pri slednjih membranah je potrebno pred varjenjem na mestu preklopa membran PVDF fluor lak odstraniti, šele nato se membrane lahko med seboj zvari. Membrane z osnovno tkanino iz steklenih vlaken in PTFE prevleko se ne šivajo, lahko se le varijo. Vse vrednosti, navedene brez toleranc, so nominalne vrednosti s toleranco $\pm 5\%$.

(Verseidag-Indutex GmbH. 2011. Membranes. Architecture.

<http://www.verseidag.de/en/en/duraskin/architecture/membranes/membranes> (18.8.2011).)

7.3 Membrane za izdelavo mobilnih šotorov in skladiščnih objektov

Ti inovativni in fleksibilni materiali so bili posebej razviti za sodobno gradnjo mobilnih šotorov in skladišč po meri uporabnikov. Ponujajo visoko raven kakovosti, zanesljivosti in funkcionalnosti, odlikujejo pa jih lesk, ki jim ga daje akrilni lak, in odpornost.

(Verseidag-Indutex GmbH. 2011. Tents. <http://www.verseidag.de/en/en/duraskin/tents/tents> (18.8.2011).)

Preglednica 7: Tehnične karakteristike membran za izdelavo mobilnih šotorov in skladišč nemškega podjetja Verseidag-Indutex GmbH pod blagovno znamko Duraskin®.

Lastnosti	Standard	B 1010	B 1015	B 1017	B 1018	B 1673
Osnovna tkanina	-	PES	PES	PES	PES	PES
Prevleka	-	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC
Površinska prevleka	-	Akrilni lak	Akrilni lak	Akrilni lak	Akrilni lak	Akrilni lak
Skupna teža [g/m ²]	DIN EN ISO 2286-2	550	630	650	900	850
Širina [cm]	DIN EN ISO 2286-1	250-300	250-300	250-300	250-300	250-300
Natezna trdnost [N/5cm]	DIN 53354 osnova/votek	2000/2000	2800/2500	2800/2500	4400/3900	2800/2500
Trgalna trdnost [N]	DIN 53363 osnova/votek	200/200	300/250	300/250	500/450	300/300
Adhezija [N/5cm]	DIN 53357	100	100	100	150	100
Požarna odpornost	DIN 4102/ NF P 92.503	B1/M2	B1/M2	B1/M2	B1	B1/M2



Slika 40: Primeri uporabe membran za izdelavo mobilnih šotorov in skladiščnih objektov.

8 ENERGETSKO UČINKOVITEJŠE OSLOJENE TKANINE Z LOW-E PREVLEKO

Sončno sevanje je elektromagnetno valovanje, ki prenaša fotone, energijske delce brez mase, zato se poleg svetlobe s sončnim sevanjem prenaša tudi toplota. Toplota se prenaša tako z vidnim sončnim sevanjem (vidna svetloba), ki predstavlja približno polovico sončnega sevanja, kot tudi z nevidnim sončnim sevanjem (ultravijolični in infrardeči žarki), ki predstavlja drugo polovico sončnega sevanja. Največji vir toplote je sončna toplota, obstaja pa tudi toplota drugih virov (npr. ogrevalnih naprav), ki je povezana s pojavi kondukcije, konvekcije in radiacije.

Glavna ideja kontrole sončne energije je prepuščanje čim večje količine vidne svetlobe in preprečevanje prehoda nevidnemu sončnemu sevanju, s tem pa tudi toploti, ki jo to sevanje prenaša. Low-e prevleke so prevleke z nizko emisivnostjo, angleško »low emissivity«, iz česar tudi izhaja okrajšava low-e. Te prevleke poleg tega, da preprečujejo prehod nevidnemu infrardečemu sončnemu sevanju, še dodatno zmanjšujejo pregrevanje prostora, saj poskrbijo, da se v ovoju prostora absorbirana toplota, ki je posledica segrevanja ovoja zaradi sončnega sevanja, zaradi nizke emisivnosti večinoma sprošča navzven in ne v prostor. Posledično so potrebe po hlajenju prostora veliko manjše, zato lahko prostor funkcionira tudi brez klimatskih naprav. Poleg tega low-e prevleke delujejo kot infrardeče ogledalo, saj odbijajo toplotno sevanje iz notranjosti prostora nazaj v prostor in tako preprečujejo, da bi toplota prešla iz prostora, s čimer se zmanjša potrebna energija za ogrevanje prostora.

(Seybold, B. 2009. Low-E High-Tec Quality for Textile Roofing. Düren, H. Seybold GmbH & Co. KG: 1-7.)

8.1 Transmisija, absorpcija, emisija in refleksija sevalne energije

V vseh materialih pride do pojava transmisije, absorpcije, emisije in refleksije sevalne energije. Za lažje razumevanje besedila v tem poglavju, sledijo opisi omenjenih izrazov.

Transmisivnost je lastnost snovi, ki nam pove, koliko energijskega toka (npr. svetlobni tok, toplotni tok) preide skozi snov. Definirana je kot razmerje med oslavljenim energijskim tokom po prehodu skozi poljubno snov in energijskim tokom pred prehodom skozi snovi.

Absorpcija je pojav, ko se energijski tok pri prehodu skozi snov (absorber) oslabi, saj se del njegove energije spremeni v notranjo energijo absorberja. Na mikroskopski ravni energijo vpadlega fotona energijskega toka prejmejo atomi ali molekule snovi oz. absorberja, ki zato preidejo v višji energijski nivo, vpadli foton pa se izniči. Atomi v snovi oddajajo sprejeto energijo s toplotnim sevanjem. Ta pojav imenujemo emisija.

Emisivnost je lastnost površine telesa, ki nam pove, kako močno lahko določeno telo seva toplotno energijo. Definirana je kot razmerje med sevalno toplotno energijo poljubnega telesa v primerjavi s sevalno toplotno energijo črnega referenčnega telesa. Črno telo je namreč primer idealnega emisivnega telesa s faktorjem emisivnosti 1, ki odda vso absorbirano toplotno energijo. Nasprotno telo s faktorjem emisivnosti 0 smatramo kot telo, katerega sevalna energija limitira proti 0. Dejansko v realnem svetu ne obstajajo idealna črna telesa, prav tako tudi ne telesa, ki sevalno toploto v celoti zadržijo, zato imajo realni materiali stopnjo emisivnosti med 0 in 1. Low-e materiali so torej materiali z nizko emisivnostjo, ki sevajo oz. oddajajo nizko stopnjo sevalne energije.

Refleksivnost materiala je lastnost površine telesa, ki pove kolikšen delež energijskega toka se od površine snovi odbije nazaj v prostor. Refleksivnost je obratno sorazmerna emisivnosti materiala, zato je vsota obeh omenjenih vrednosti enaka 1. Če je npr. emisivnost asfalta enaka 0,90, je vrednost njegove refleksivnosti enaka 0,10. To pomeni, da takšno telo absorbira in odda 90 % sevalne energije, le 10 % pa je reflektira oz. odbije nazaj v prostor. Nasprotno, emisivnost low-e materiala aluminijskega znaša 0,03, njegova refleksivnost pa 0,97, kar pomeni, da aluminij reflektira 97% sevalne energije, absorbira in odda pa je le 3%. V Preglednici 8 so podane vrednosti emisivnosti in refleksivnosti nekaterih materialov, ki se med drugim uporabljajo tudi v gradbeništvu.

Emisivnost in refleksivnost sta torej obratno sorazmerni lastnosti površine materiala, zato sta njuni vrednosti različni za zgornjo in spodnjo površino membrane z dodano low-e prevleko na

eni strani membrane. Emisivnost low-e prevleke, ki se jo nanaša na površino membrane iz oslojene tkanine znaša 0,22, reflektivnost pa 0,78.

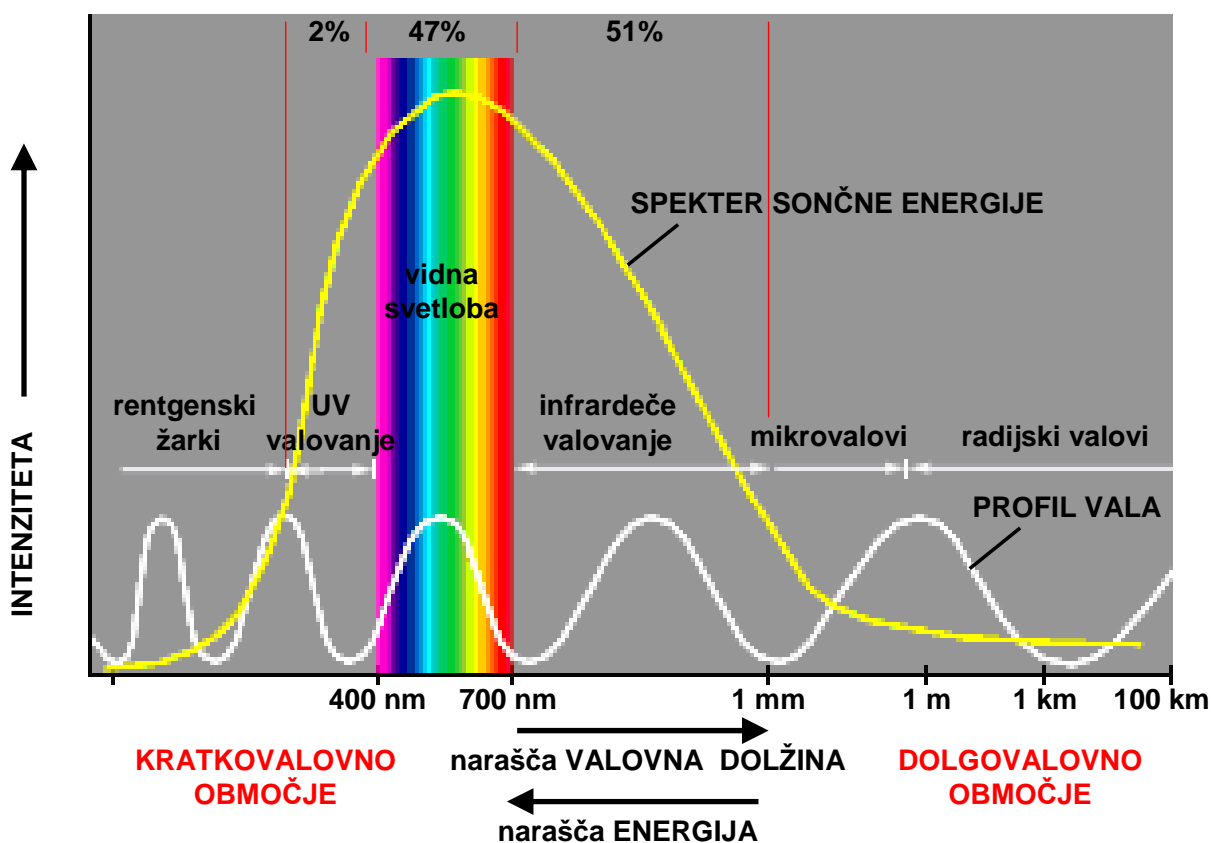
Preglednica 8: Vrednosti emisivnosti in reflektivnosti nekaterih gradbenih materialov.

Površina materiala	Emisivnost [-]	Reflektivnost [-]
asfalt	0,90-0,98	0,02-0,10
alumijska folija	0,03-0,05	0,95-0,97
opeka	0,93	0,07
beton	0,85-0,95	0,05-0,15
steklo (neglazirano)	0,95	0,05
steklena vlakna/celuloza	0,80-0,90	0,10-0,20
apnenec	0,36-0,90	0,10-0,64
marmor	0,93	0,07
papir	0,92	0,08
mavec	0,91	0,09
srebro	0,02	0,98
mehko jeklo	0,12	0,88
les	0,90	0,10

8.2 Kontrola sončne energije

Sončno energijo lahko opišemo kot elektromagnetno valovanje, ki prenaša fotone, t.j. nedeljive kvantne delce brez mase, a z gibalno količino in točno določeno energijo. Sončno sevanje je sestavljeno iz množice fotonov različnih energij. Elektromagnetno valovanje je mešanica valovanj različnih valovnih dolžin in jakosti. Valovanje z daljšo valovno dolžino ima nižjo frekvenco in obratno. Večja kot je frekvenca valovanja, večja je energija fotonov. Valovne dolžine elektromagnetnega valovanja sončnega sevanja prikazuje Preglednica 9.

Porazdelitev fotonov glede na njihovo energijo oz. valovno dolžino imenujemo spekter sončne energije (Slika 41). Človeško oko zaznava le del spektra sončne energije kot vidno sevanje oziroma kot tako imenovano vidno svetlobo.



Slika 41: Spekter sončne energije.

Preglednica 9: Delitev elektromagnetnega valovanja glede na valovno dolžino.

Elektromagnetno valovanje		Valovna dolžina
žarki gama		< 0,01 nm
rentgenski žarki		0,01 nm – 10 nm
ultravijolično (UV) valovanje		10 nm – 380 nm
vidna svetloba	vijolična barva	380 nm – 450 nm
	modra barva	450 nm – 495 nm
	zelená barva	495 nm – 570 nm
	rumena barva	570 nm – 590 nm
	oranžna barva	590 nm – 620 nm
	rdeča barva	620 nm – 750 nm
infrardeče (IR) valovanje		750 nm – 1 mm
mikrovalovi		1 mm – 1 m
radijski valovi		> 1 m

Sončno sevanje torej predstavlja celoten spekter valovnih dolžin elektromagnetnega valovanja, ki ga oddaja Sonce. Toplotno sevanje pa je emisija elektromagnetnega valovanja iz različnih snovi, katerih temperatura je večja od absolutne ničle, in predstavlja pretvorbo toplotne energije, t.j. povprečne kinetične energije naključnega gibanja atomov in molekul v snovi, v elektromagnetno energijo.

(Laboratorij za fotovoltaike in optoelektroniko. 2007. Sončno sevanje in obsevanje. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko. <http://pv.fe.uni-lj.si/Obsevanje.aspx/> (24.9.2011).)

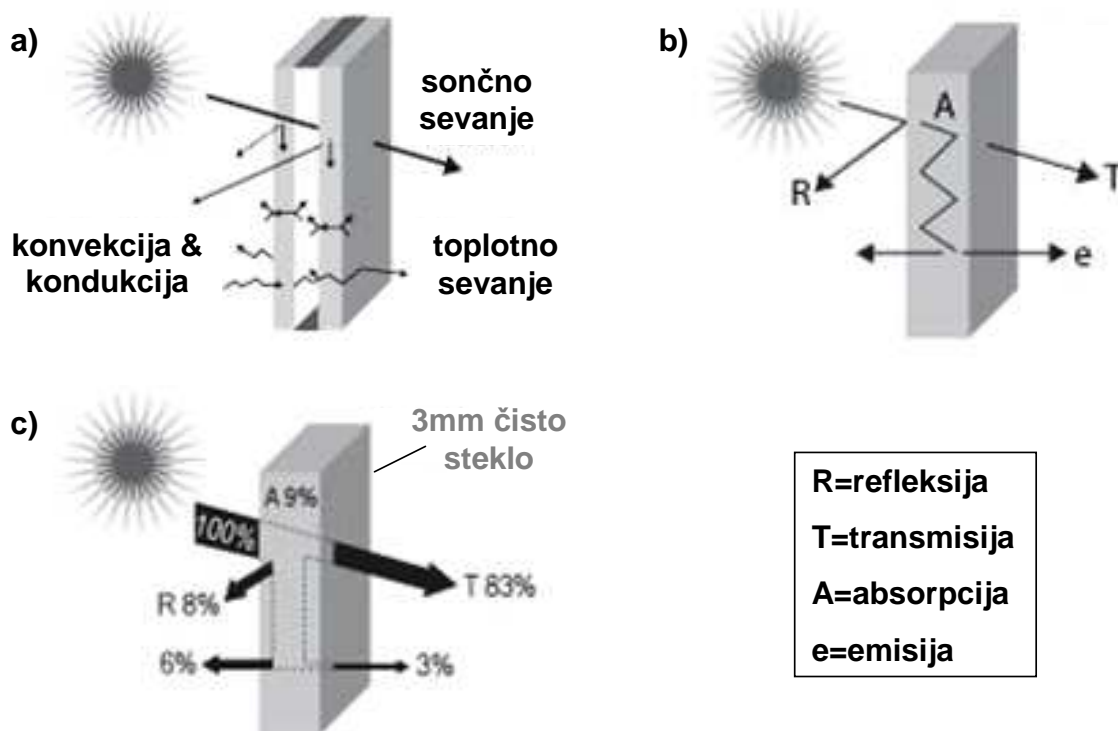
Dva glavna vira toplote, ki preide v zgradbo, sta sončna toplota in toplota drugih virov. Sončna toplota je direktna sončna toplota, ki pride v zgradbo preko sončnega sevanja, toploto drugih virov pa predstavljajo različni faktorji kot so kondukcija, konvekcija in radiacija. Toplotna kondukcija je prenos toplote skozi trdne snovi in mirujoče tekočine, toplotna konvekcija je prenos toplote zaradi gibanja snovi, radiacija pa je prenos toplote s sevanjem. Največji vir toplote je sončna toplota, zato se ji posveča večja pozornost, čeprav tudi učinki ne-sončne toplote niso zanemarljivi in igrajo pomembno vlogo pri nekaterih zgradbah. Iz spektra sončne energije (Slika 41), je razvidno, da se večina sončne energije prenaša preko nevidnih infrardečih in ultravijoličnih žarkov ter vidne svetlobe. Približno 50% toplote dobimo z vidno svetlobo, preostalih 50% pa z infrardečo in ultravijolično svetlobo. Ultravijolični žarki so med drugim tudi glavni razlog za bledenje barv.

Kaj torej pomeni kontrola sončne energije? To ni nič drugega kot prepuščanje maksimalne količine vidne svetlobe v stavbo in preprečevanje prehoda toploti. Ker se 50% toplote prenaša preko vidne svetlobe, moramo pričakovati, da tudi v primeru prepuščanja izključno vidne svetlobe v stavbo preide 50% sončne toplote.

Ko žarki sončnega sevanja zadenejo površino ovoja stavbe, se ti lahko prenesejo preko ovoja v notranjost objekta (transmisija), lahko se odbijejo od površine ovoja (refleksija) ali pa jih ovoj vsrka oz. absorbira (absorpcija) in sprejeto energijo odda s toplotnim sevanjem (emisija) (Slika 42). Razmerja med naštetimi možnostmi so odvisna od tipa ovoja stavbe. Glede na to, da vidna svetloba prenaša energijo, so tudi transmisija, refleksija in absorpcija pojavi, ki so povezani z energijo. Kontrola sončne energije deluje na principu povečevanja refleksivnosti in absorpcije energije ter povečevanja transmisije svetlobe z izbiro pravega tipa ovoja stavbe.

Na Sliki 42 primer c) prikazuje različne načine prenosa toplote preko 3 mm čistega stekla. 8% sončnega sevanja oz. elektromagnetnega valovanja, ki pade na površino stekla se odbije nazaj v zunanji prostor (refleksija), 83% sevanja preide v notranji prostor (transmisija), 9% sevanja pa se absorbira v steklu in ga nato steklo odda v obliki toplotnega sevanja, in sicer 3% v notranji ter 6% v zunanji prostor.

(Ram, A. 2011. Solar and Heat Control Glasses. A Glass Knowledge Blog. <http://theglassblog.wordpress.com/2011/02/06/solar-and-heat-control-glasses/> (24.9.2011).)



Slika 42: Načini prenosa toplote zaradi sončnega sevanja preko ovoja objekta.

8.3 Delovanje low-e prevleke na membranah iz oslojenih tkanin

Nemški podjetji H. Seybold GmbH & Co. KG in Verseidag Indutex GmbH sta skupaj razvila nov koncept low-e prevleke za PVC material. Ta inovacija, ki temelji na kombinaciji lastnosti low-e materiala z membranami iz oslojenih tkanin, iz katerih se izdelujejo ponjave za pokrivanje streh, ima trajni pozitiven vpliv na ravnotežje energije v hali. Večslojne ponjave z integrirano low-e prevleko so zaščitene z evropskim patentom (št. 07015002.4 pod imenom »Folienelement«).

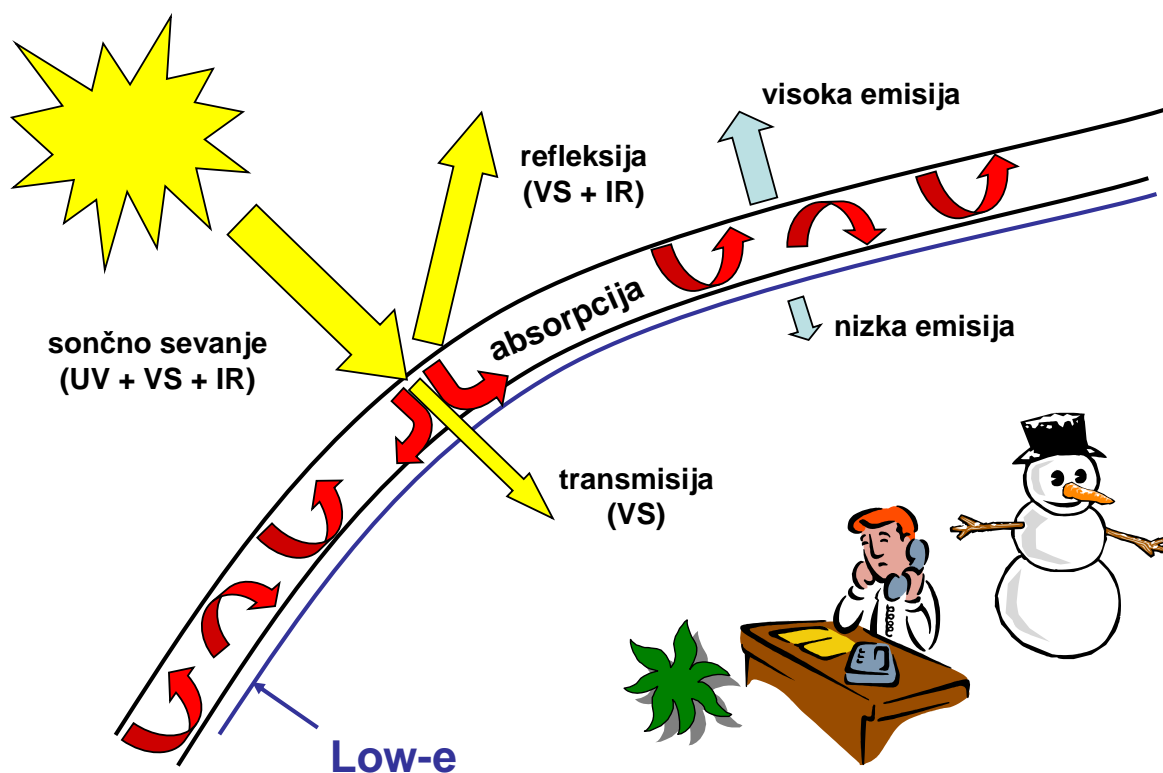
Low-e je okrajšava za »low emissivity«, kar v prevodu pomeni nizka emisivnost. Low-e prevleka vpliva tako na sončno sevanje (elektromagnetno valovanje, ki ga oddaja Sonce) kot tudi na toplotno sevanje (emisija elektromagnetnega valovanja iz snovi). Low-e prevleka z nizko emisivnostjo oz. visoko reflektivnostjo (reflektivnost je obratno sorazmerna vrednost emisivnosti, njuna vsota pa je enaka 1) ustvarja ravnotežje energije v hali.

Delovanje low-e prevleke na spodnji strani membrane iz oslojene tkanine je prikazano na Sliki 43. Membrana odbije infrardečo svetlobo in del vidne svetlobe, pri prehodu preostalega sončnega sevanja skozi membrano pa se del energijskega toka absorbira v membrani, zaradi česar se ta segreje. Low-e prevleka poskrbi, da je emisija toplote, absorbirane v membrani, v prostor pod njo zelo majhna, zato se prostor ne pregreva in se ga lahko uporablja brez klimatizacije (odvisno od zahtev) tudi pri visokih zunanjih temperaturah. Low-e prevleka na notranji strani strešne ponjave deluje kot infrardeče ogledalo, saj reflektira toploto iz notranjosti nazaj v prostor, tako da ta ne more zapustiti prostora. Zaradi tega se zmanjšajo tudi stroški ogrevanja objekta.

Membrane iz oslojenih tkanin z low-e prevleko se uporabljajo za izdelavo strešnih in fasadnih sistemov (čelne in stranske zavese) začasnih ali stalnih objektov za vsa področja uporabe.

Prednosti strešnih in fasadnih sistemov iz membran z low-e prevleko so:

- optimalni klimatski pogoji v začasnih ali stalnih objektih, neodvisni od zunanje temperature,
- prihranek energije za hlajenje oz. ogrevanje in redukcija CO₂ do 80%,
- ni dodatnih finančnih izdatkov za montažo oz. demontažo.

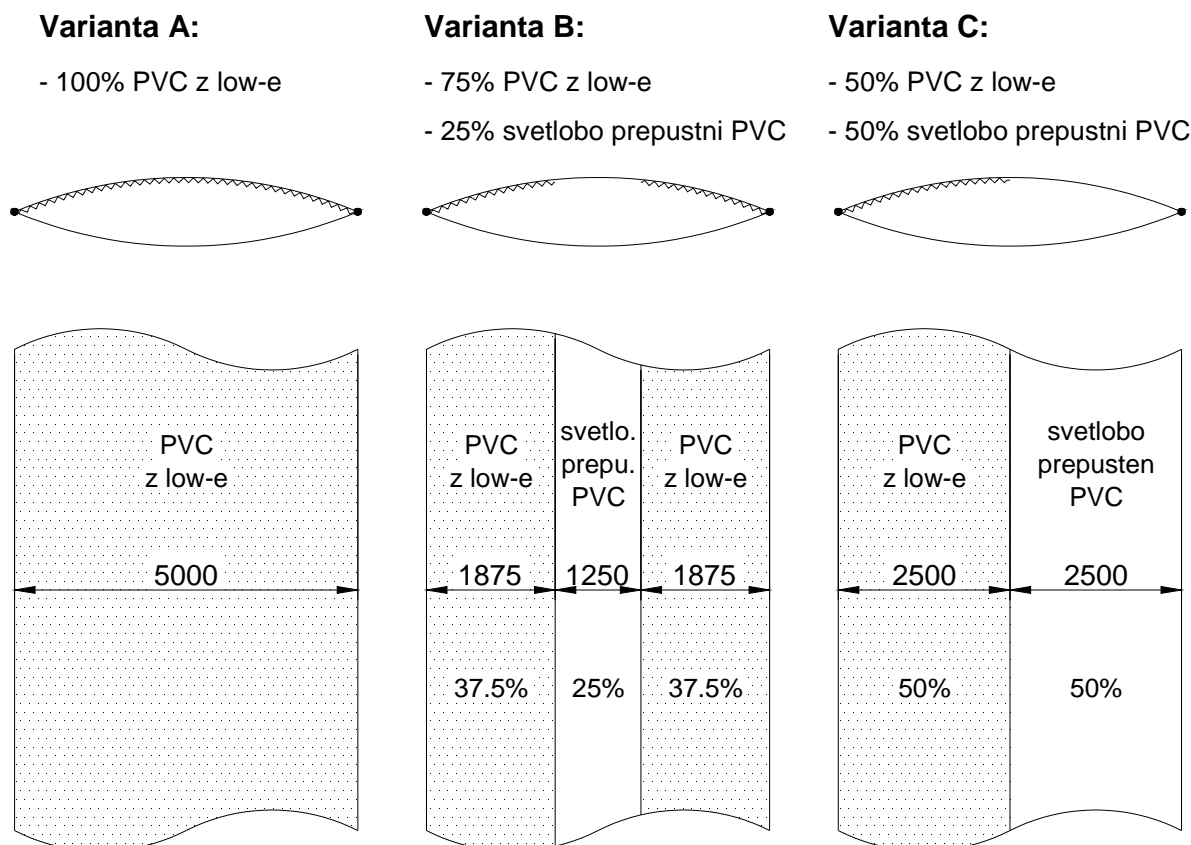


Slika 43: Delovanje low-e prevleke na membranah iz oslojenih tkanin.

8.3.1 Kombinacije membran z in brez low-e prevleke v primeru zahtev po dnevni svetlobi

Pri uporabi membran z low-e prevleko na celotni površini ponjave dosežemo popolno zatemnitev prostora pod ponjavo, saj low-e prevleka ne prepušča svetlobe. V primeru zahtev po dnevni svetlobi se PVC membrane z low-e prevleko kombinirajo s svetlobo prepustnimi PVC membranami. Transmisivnost ponjave je tako odvisna od razmerja obeh uporabljenih materialov (Slika 44).

(Seybold, B. 2009. Low-E High-Tec Quality for Textile Roofing. Düren, H. Seybold GmbH & Co. KG: 1-7.)



Slika 44: Možnosti kombinacije membrane z low-e prevleko in svetlobo prepustne membrane brez low-e prevleke.

8.4 Testiranje skladiščne hale z dvoslojno pnevmatsko ponjavo z low-e prevleko

Začasna skladiščna hala družbe Union v Ljubljani, na kateri je bil izveden test, je pokrita z dvoslojno pnevmatsko ponjavo. Zgornji sloj ponjave je izdelan v kombinaciji 83% PVC membrane z low-e in 17% svetlobo prepustne PVC membrane, spodnji oz. notranji sloj pa v celoti sestoji iz svetlobo prepustne PVC membrane. Testno skladiščno halo je projektiralo in postavilo podjetje Loging d.o.o. iz Novega mesta. Spodaj so podani podatki o tesni hali, ki so bili uporabljeni v raziskavi.

Dimenzije jeklene konstrukcije:

16 × 70 m

Strešna kritina:

- Streha je v celoti pokrita z dvoslojno pnevmatsko ponjavo.
- Zgornji sloj ponjave je izdelan v kombinaciji neprosojne in prosojne PVC membrane, in sicer 83% celotne površine sloja predstavlja neprosojna PVC membrana z low-e prevleko proti notranji strani objekta, 17% pa svetlobo prepustna PVC membrana.
- Spodnji sloj ponjave v celoti sestoji iz svetlobo prepustne PVC membrane.

Zunanje stene:

- Začasno skladišče je zaprto z fasadnimi paneli (debeline 40-50 mm), ki segajo od tal do kapa objekta.
- V zunanje stene je vgrajenih več vrat za osebni prehod in dvojna sekcijska vrata dimenzij 4×4 m. V času obratovanja skladišča so sekcijska vrata običajno ves čas odprta, zato so bila odprta tudi v času 14 dni trajajočega testa.

Vrednost dnevne svetlobe v hali:

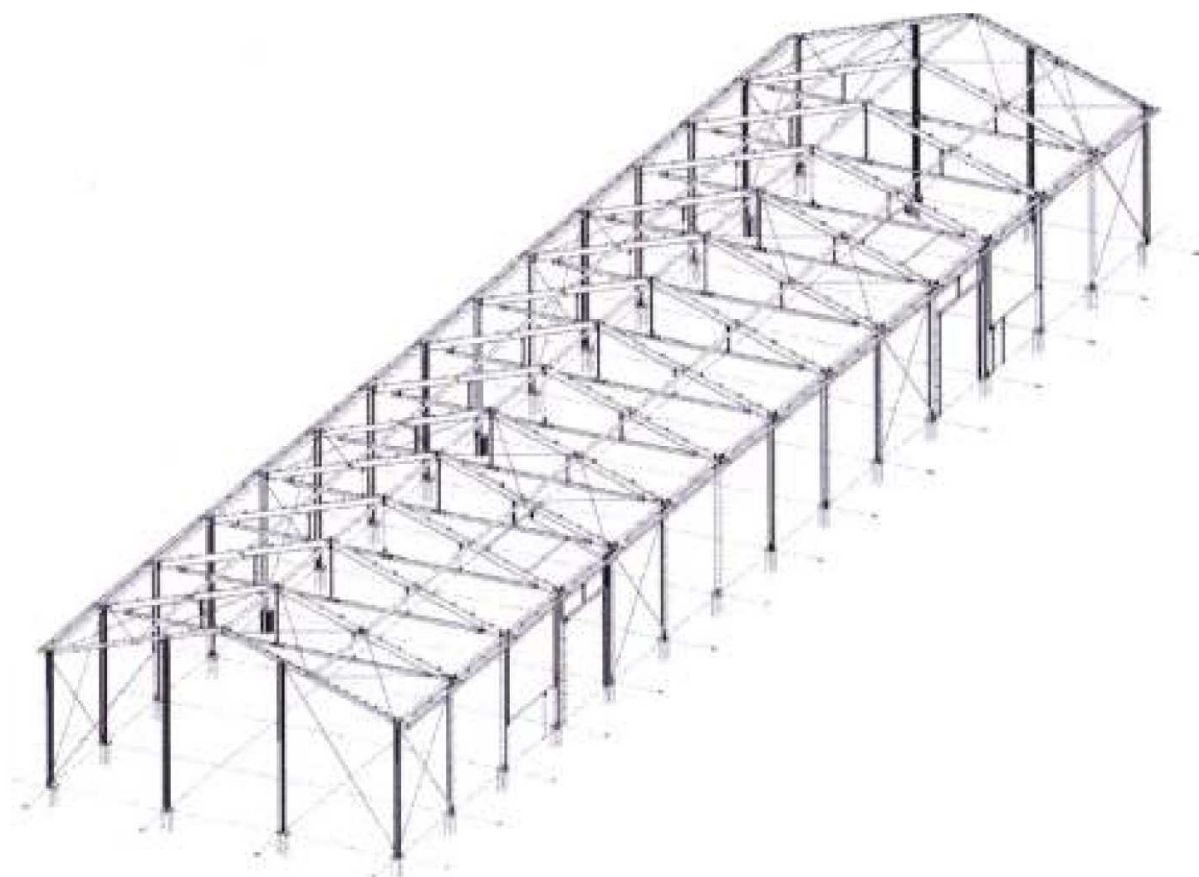
- Dnevna svetloba, ki preide skozi dvoslojno pnevmatsko ponjavo, dosega intenziteto 200 lux pri tleh hale.
- Takšna intenziteta dnevne svetlobe zadošča za branje oznak blaga v skladišču brez kakršnegakoli dodatnega vira svetlobe.

Strokovnjaki podjetja Integral Ingenieure iz Aachna (Nemčija) so izvedli 2 različni raziskavi učinka membranske ponjave z low-e prevleko na testni hali:

- Pri 1. testu so spremljali potek temperature in relativne vlažnosti zraka v različnih merilnih točkah, nameščenih znotraj in zunaj testne hale.
- Pri 2. testu je bila izvedena računalniška termična simulacija testne hale, s pomočjo katere so primerjali potrebe po energiji za ogrevanje in hlajenje pri različnih vrstah strešnih ponjav (glede na uporabo in pozicijo low-e prevleke) in ostalih strešnih konstrukcijah.

8.4.1 Test 1: Meritve temperature in relativne vlažnosti zraka v testni hali

1. test je bil izveden na terenu v Logingovi skladiščni hali, ki jo ima v najemu družba Union v Ljubljani. Testna hala dimenzij 70×16 m, ki jo je projektiralo in postavilo podjetje Loging, ima slemensko višino 8,8 m in kapno višino 6,0 m (Slika 45). Znotraj hale so bile na različne višine nameščene 4 merilne točke (oznake od 02 do 05), merilna točka 01 pa je bila nameščena v kapu na zunanji strani hale (Slika 46). Meritve temperature in relativne vlažnosti zraka v merilnih točkah so se izvajale 14 dni, v obdobju od 25.7.2008 do 8.8.2008. Opazovane količine so bile merjene v intervalih 15 minut tekom celotnega dneva.

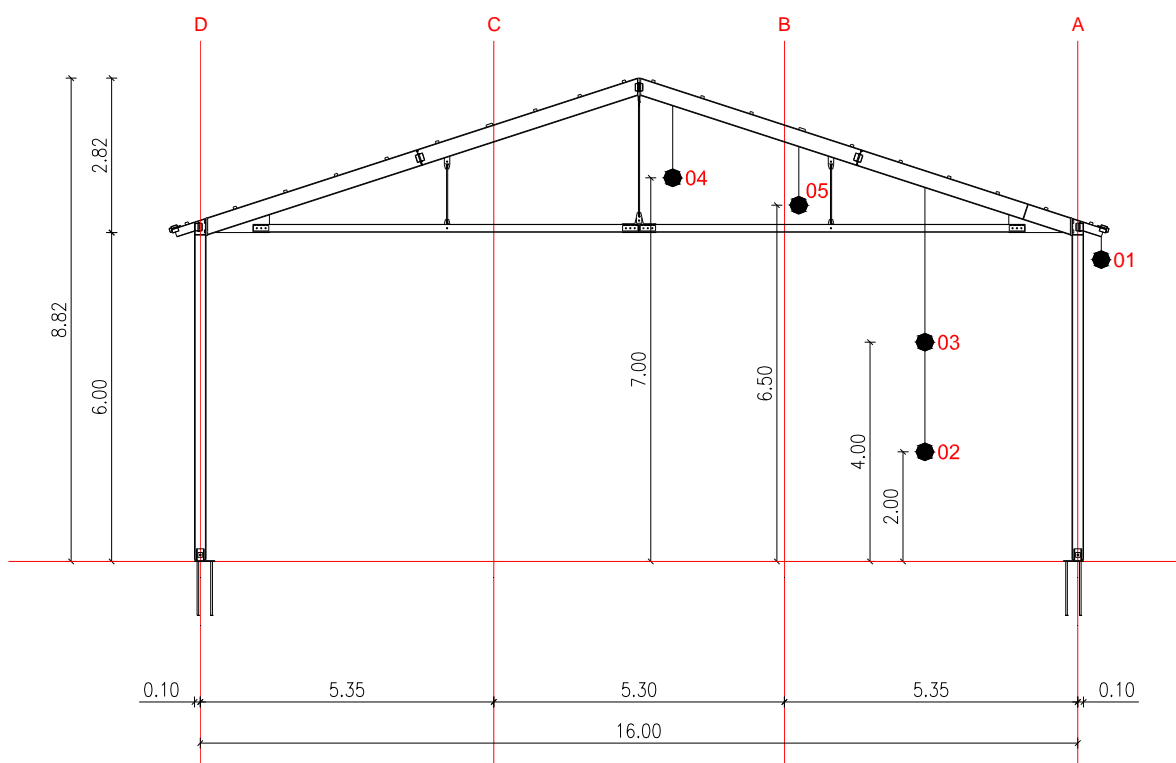


Slika 45: Testna skladiščna hala v lasti podjetja Loging, ki jo ima v najemu družba Union v Ljubljani.

Pri raziskavi so bili uporabljeni meteorološki podatki za srednje klimatske razmere regije, v kateri stoji testna hala. Vremenski podatki so bili pridobljeni iz programa Meteonorm, ki je v lasti švicarskega podjetja Meteotest.

Izračun temelji na vrednostih sledečih meteoroloških podatkov z urnim intervalom:

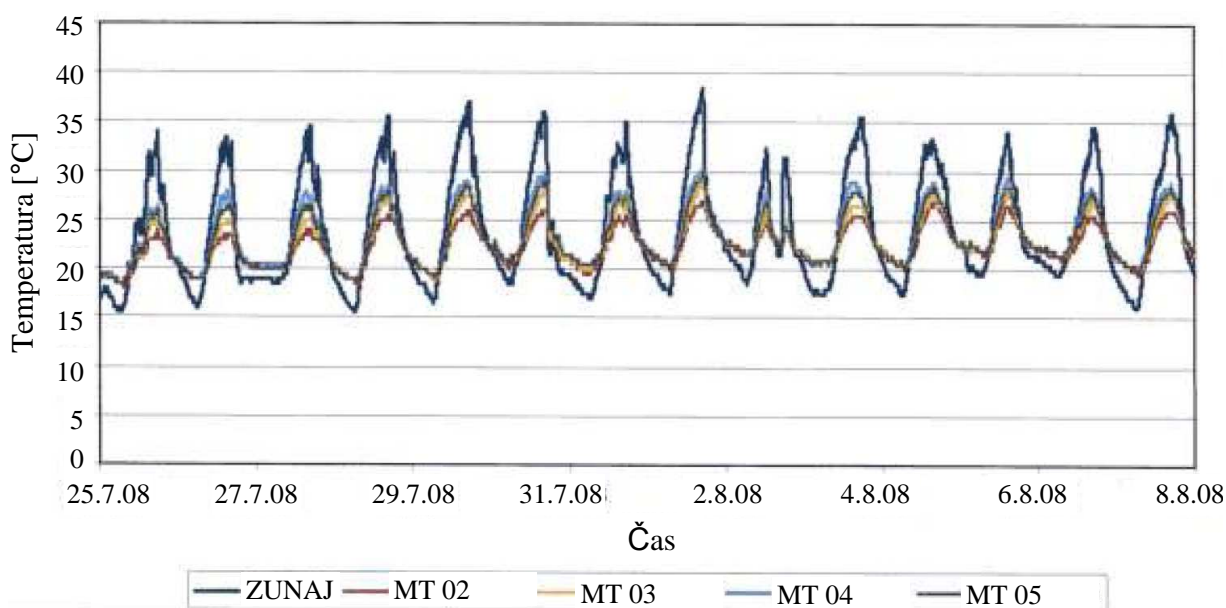
- zunanja temperatura,
- globalno sevanje,
- difuzno sevanje,
- relativna vlažnost zraka,
- stopnja oblačnosti,
- smer in hitrost vetra.



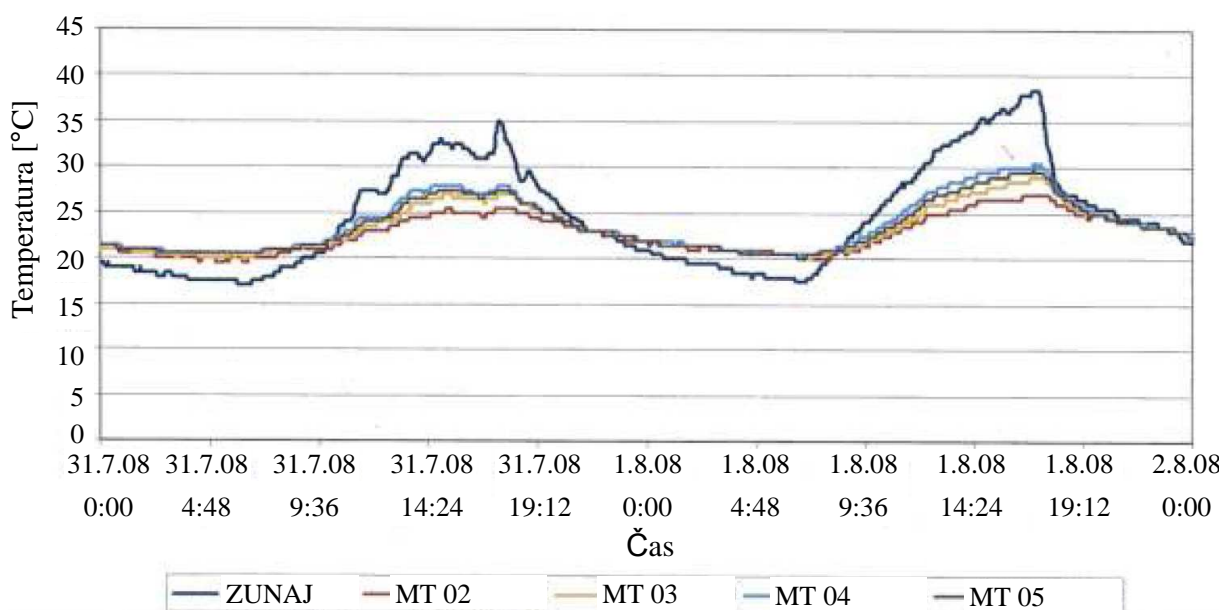
Slika 46: Pozicije 4 merilnih točk znotraj testne hale in 1 merilne točke zunaj testne hale.

Rezultati 14 dnevnih meritev temperature v merilnih točkah so prikazani na Grafikonu 1, podrobnejši rezultati za 2 dneva z najvišjimi temperaturami (31.7.2008 in 1.8.2008) pa so prikazani na Grafikonu 2. Iz obeh grafikonov je razvidno, da so izmerjene temperature v posameznih merilnih točkah tekom dneva najbolj nihale v zunanji merilni točki, in sicer so razlike med jutranjo in popoldansko zunanjo temperaturo znašale tudi do 20°C. Izmed notranjih merilnih točk so bila največja nihanja temperature izmerjena v najvišji merilni točki 04 (7 m nad tlemi) in so znašala do 10°C, najmanjša pa v najnižji merilni točki 02 (2 m nad tlemi) do 7°C.

Nočne in jutranje temperature v hali so bile v vseh notranjih merilnih točkah od 02 do 05 približno enake, do večjih odstopanj med njimi pa je prišlo v popoldanskem času, in sicer višje kot je bila pozicionirana merilna točka, višje temperature so bile v njej izmerjene. Razlike med temperaturo v najvišji in v najnižji notranji merilni točki so znašale tudi do 5°C.



Grafikon 1: Potek temperature zraka v 5 merilnih točkah znotraj in zunaj testne hale v časovnem obdobju 14 dni.



Grafikon 2: Potek temperature zraka v 5 merilnih točkah znotraj in zunaj testne hale v časovnem obdobju 2 dni z najvišjimi izmerjenimi temperaturami.

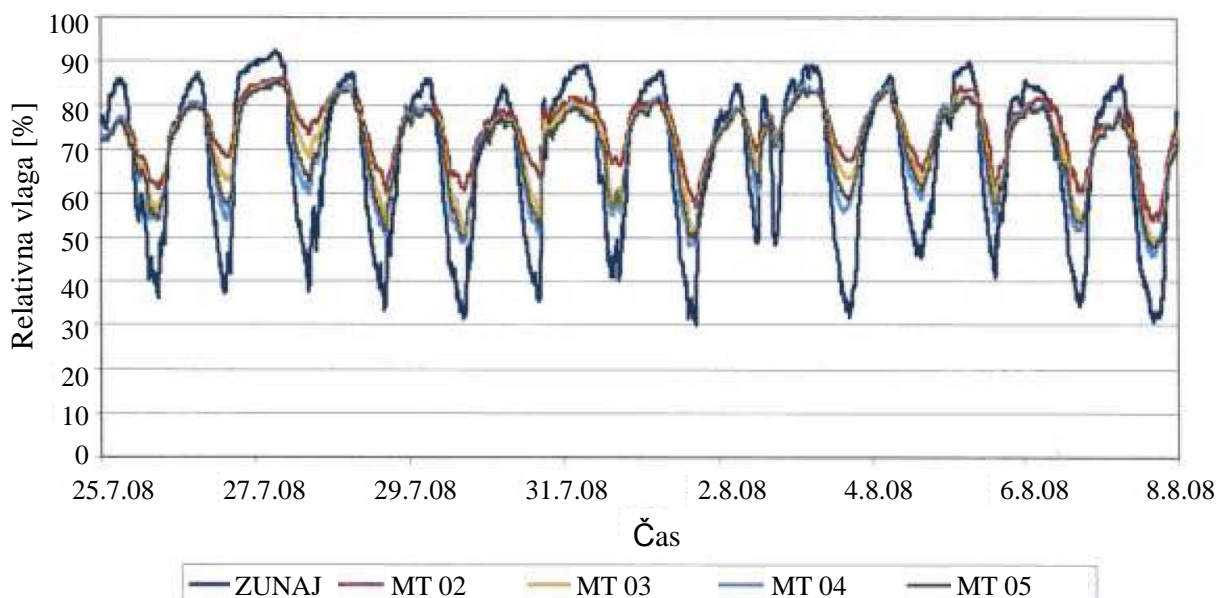
Največje razlike v izmerjenih temperaturah so bile med notranjimi merilnimi točkami in zunanjo merilno točko 01. Največje temperaturne razlike med zunanjo in najvišjo notranjo merilno točko 04 so znašale do 8°C, med zunanjo in najnižjo notranjo merilno točko 02 pa tudi do 12°C. Ponoči so bile razlike v temperaturi med zunanjo merilno točko in notranjimi merilnimi točkami manjše in so znašale do 4°C. V povprečju so bile ekstremne popoldanske temperature v najvišji notranji merilni točki 04 za 20% nižje od zunanjih temperatur ob istem času, povprečne ekstremne temperature v najnižji notranji merilni točki 02 pa tudi za 30% nižje. Ekstremne jutranje temperature v notranjosti hale so bile v povprečju za 20% višje od zunanjih temperatur ob istem času.

Rezultati 14 dnevni meritev relativne vlažnosti v merilnih točkah so prikazani na Grafikonu 3, podrobnejši rezultati za 2 dneva z najvišjimi temperaturami (31.7.2008 in 1.8.2008) pa so prikazani na Grafikonu 4. Nihanje relativne vlažnosti v posameznih merilnih točkah je imelo nasproten potek v primerjavi z nihanjem temperature, saj je bila relativna vlažnost najvišja v času najnižjih temperatur in obratno. Relativna vlažnost zraka je tako kot temperatura čez dan najbolj nihala v zunanji merilni točki, in sicer so razlike med jutranjo in popoldansko relativno vlažnost znašale tudi do 60%. Izmed notranjih merilnih točk so bila največja nihanja relativne vlažnosti izmerjena v najvišji merilni točki 04 (7 m nad tlemi) in so znašala do 30%, najmanjša pa v najnižji merilni točki 02 (2 m nad tlemi) do 20%.

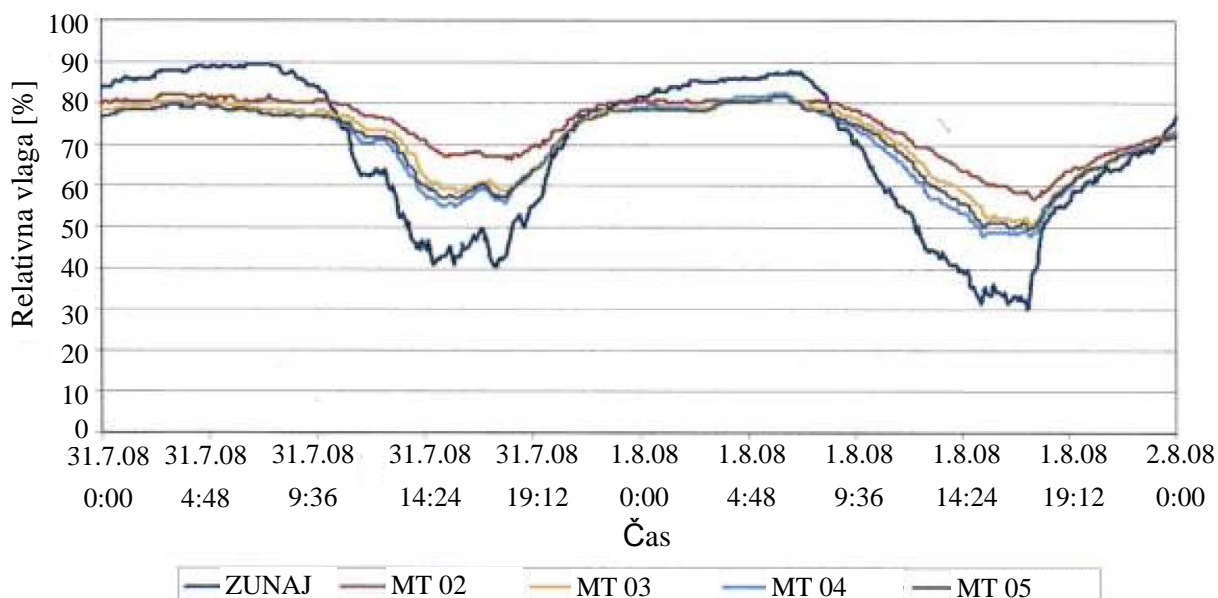
Nočna in jutranja relativna vlažnost v hali je bila v vseh notranjih merilnih točkah približno enaka, do večjih odstopanj med njimi pa je prišlo v popoldanskem času, in sicer višje kot je bila pozicionirana merilna točka, manjša relativna vlažnost zraka je bila v njej izmerjena. Razlike med relativno vlažnostjo v najvišji in v najnižji notranji merilni točki so znašale tudi do 15%.

Največje razlike v vrednostih relativne vlažnosti zraka so bile med notranjimi merilnimi točkami in zunanjo merilno točko 01. Razlike med zunanjo in najvišjo notranjo merilno točko 04 so znašale tudi preko 20%, razlike med zunanjo in najnižjo notranjo merilno točko 02 pa tudi preko 30%. Ponoči so bile razlike v relativni vlažnosti med zunanjo in notranjimi merilnimi točkami manjše in so znašale do 10%. V povprečju je bila ekstremna relativna vlažnost zraka v popoldanskem času v najvišji notranji merilni točki 04 za 50% višja od

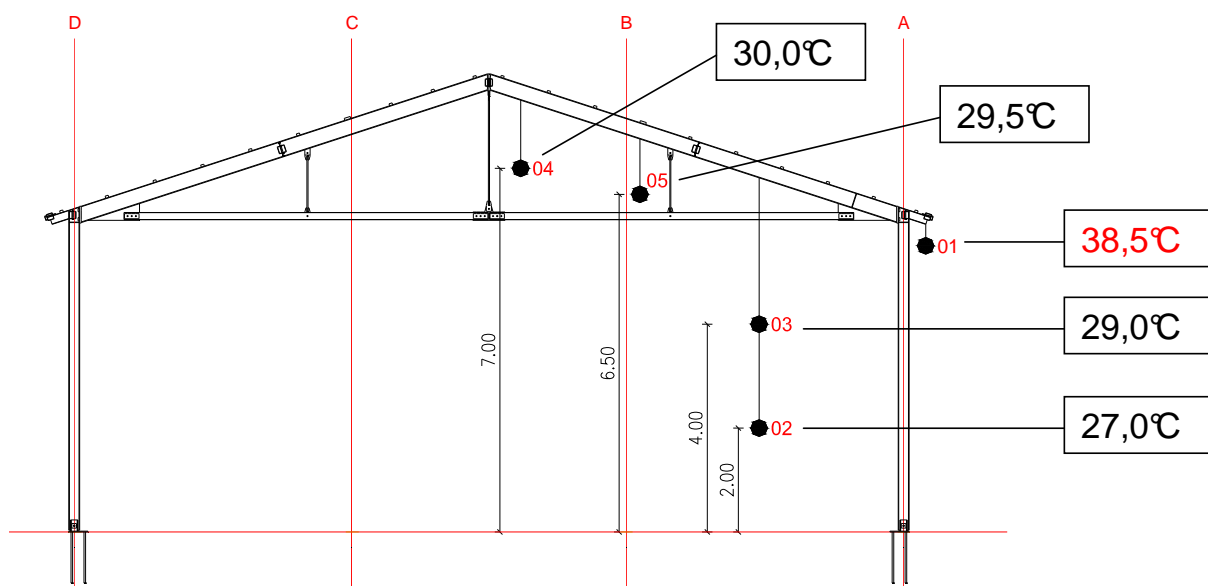
relativne vlažnosti zunanjega zraka, povprečna ekstremna relativna vlažnost zraka v najnižji notranji merilni točki 02 pa tudi za 100% višja. Ekstremna relativna vlažnost zraka je bila zjutraj v notranjosti hale v povprečju za 10 % nižja od relativne vlažnosti zunanjega zraka.



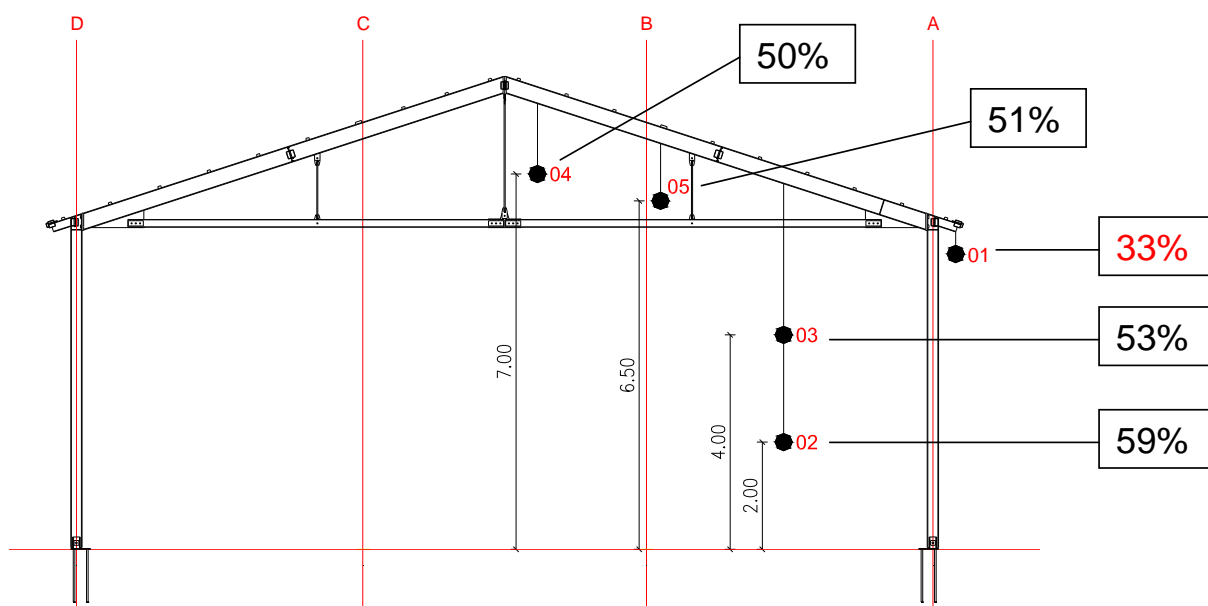
Grafikon 3: Potek relativne vlažnosti zraka v 5 merilnih točkah znotraj in zunaj testne hale v časovnem obdobju 14 dni.



Grafikon 4: Potek relativne vlažnosti zraka v 5 merilnih točkah znotraj in zunaj testne hale v časovnem obdobju 2 dni z najvišjimi izmerjenimi temperaturami.



Slika 47: Temperatura zraka v posameznih merilnih točkah v času najvišje zunanje temperature 1.8.2008 ob 17:14.



Slika 48: Relativna vlažnost zraka v posameznih merilnih točkah v času najvišje zunanje temperature 1.8.2008 ob 17:14.

Na Slikah 47 in 48 so prikazane vrednosti temperature zraka in relativne vlažnosti v merilnih točkah znotraj in zunaj testne hale v času najvišjih zunanjih temperatur. Razvidno je, da se notranja temperatura zraka na območju strehe celo pri največji izmerjeni zunanji temperaturi

zraka 38,5°C ni dvignila preko 30°C. Temperatura zraka 2 m nad tlemi oz. na območju, kjer se gibljejo ljudje, pa je bila še za 3°C nižja od temperature v najvišji merilni točki in je znašala 27°C pri relativni vlažnosti zraka 59%.

(Krämer, S. 2009. Recording of Air Temperature and Relative Atmospheric Humidity in the Hall. Low-E High-Tec Quality for Textile Roofing. Düren, H.Seybold GmbH & Co.KG: 1-5.)

Zahteve za zagotavljanje varnosti in zdravja delavcev, ki jih mora delodajalec upoštevati pri načrtovanju, oblikovanju, opremljanju in vzdrževanju delovnih mest določa Pravilnik o zahtevah za zagotavljanje varnosti in zdravja delavcev na delovnih mestih (UL RS, št. 89/1999). Delovno mesto je po tem pravilniku prostor v zgradbah delodajalca, ki je namenjen za izvajanje dela delavcev, in vsak drug prostor, do katerega ima delavec dostop v času dela. K delovnim mestom po tem pravilniku tako sodijo tudi skladišča.

V 6. poglavju pravilnika so navedene zahteve glede temperature v delovnih prostorih. 2. odstavek 25. člena tega poglavja navaja, da temperatura zraka v delovnih prostorih ne sme presegati +28 °C. V spodnjem območju testne hale, kjer se gibljejo ljudje, ta temperatura ni bila presežena tudi v času najvišje zunanje temperature, ki je znašala 38,5°C (Sika 47). To dokazuje, da se prostor pod dvoslojno pnevmatsko ponjavo v kombinaciji PVC membrane z low-e prevleko in svetlobo prepustne PVC membrane ne pregreva in se ga lahko uporablja brez klimatizacije tudi pri visokih zunanjih temperaturah.

Pravilnik o zahtevah za zagotavljanje varnosti in zdravja delavcev na delovnih mestih v 7. poglavju podaja tudi zahteve glede razsvetljave v delovnih prostorih. 3. odstavek 31. člena tega poglavja navaja, da mora na stalnih delovnih mestih osvetljenost znašati najmanj 200 lux. Osvetljenost, ki so jo izmerili pri tleh testne hale je znašala 200 lux, kar izpolnjuje omenjeno zahtevo glede razsvetljave, zato tekom sončnega dneva ni potrebe po dodatni razsvetljavi. Posledično se tako zmanjšajo tudi stroški elektrike za razsvetljevanje prostora s svetili. Dodatna lokalna razsvetljava je po pravilniku zahtevana le za delovna mesta, na katerih delavci opravljajo dela z večjimi vidnimi zahtevami.

(Pravilnik o zahtevah za zagotavljanje varnosti in zdravja delavcev na delovnih mestih. UL RS št. 89/1999)

8.4.2 Test 2: Študija učinkovitosti low-e prevleke

Pri tem testu se je s pomočjo termične simulacije stavbe ugotavljala potreba po energiji za ogrevanje testne hale v zimskem obdobju in za hlajenje v poletnem obdobju pri uporabi različnih vrst strešnih kritin. Predmet preiskave je bila nova membrana iz poliestrske tkanine prevlečene s PVC z dodano low-e prevleko z nizko vrednostjo emisivnosti 0,22.

Izdelana je bila primerjava med sledečimi strešnimi kritinami:

- enoslojna ponjava,
- dvoslojna pnevmatska ponjava,
- troslojna pnevmatska ponjava,
- trapezna pločevina in
- »sandwich« strešni paneli.

V računalniškem programu za termično simulacijo je bil izdelan model testne hale začasnega skladišča družbe Union dimenzij 70×16 m s slemensko višino 8,8 m in kapno višino 6,0 m. Za izdelavo modela testne hale je bilo potrebno v program vnesti sestave različnih konstrukcijskih sklopov in njihove toplotne prehodnosti U (Preglednica 10) ter spodaj naštetе podatke o uporabi, razsvetljavi, ogrevanju, hlajenju in prezračevanju.

Tip uporabe:	distribucijsko skladišče za pijačo
Čas uporabe:	od 7.00 do 18.00 (čez celo leto)
Osebe/stroji:	brez
Razsvetljava:	fluorescentne žarnice s kapaciteto $3,6 \text{ W/m}^2$ (pozimi)
Ogrevanje:	klimatska naprava z zaščito proti zmrzovanju s ciljno temperaturo 5°C
Hlajenje:	klimatska naprava s ciljno temperaturo 26°C
Prezračevanje:	izmenjava zraka $0,5 \text{ h}^{-1}$

Prezračevanje je naravno skozi odprtine za zračenje (odprte ves čas) in skozi dvojna sekcijska vrata dimenzij 4×4 na stranskih stenah (poleti odprta celoten čas uporabe, pozimi pa 60% časa uporabe).

Preglednica 10: Sestave in toplotne prehodnosti različnih konstrukcijskih sklopov testne hale.

Konstrukcijski sklop	Konstrukcijska sestava (od notranjih do zunanjih plasti)	Toplotna prehodnost U [W/m^2K]
Zunanja stena	1 mm jeklena pločevina 60 mm poliuretanska izolacija 30 1 mm jeklena pločevina	$U = 0,46 W/m^2K$
Talna plošča	200 mm standardni beton	$U = 3,77 W/m^2K$
Vrata	2 mm aluminjska pločevina 40 mm ekstrudiran polistiren 35 2 mm aluminjska pločevina	$U = 0,76 W/m^2K$
Enoslojna ponjava (Var 1 do 3)	0,4 mm membrana 1	*
Dvoslojna ponjava (Var 4 do 8)	0,4 mm spodnja membrana 800 mm stisnjen zrak 0,4 mm zgornja membrana	*
Neprosojna streha – sendvič paneli (Var 9)	1 mm jeklena pločevina 60 mm poliuretanska izolacija 030 1 mm jeklena pločevina	$U = 0,46 W/m^2K$
Neprosojna streha – trapezna pločevina (Var 10)	1 mm jeklena pločevina	$U = 7,10 W/m^2K$
Troslojna ponjava (Var 11)	0,4 mm spodnja membrana 400 mm stisnjen zrak 0,4 mm srednja membrana 400 mm stisnjen zrak 0,4 mm zgornja membrana	*

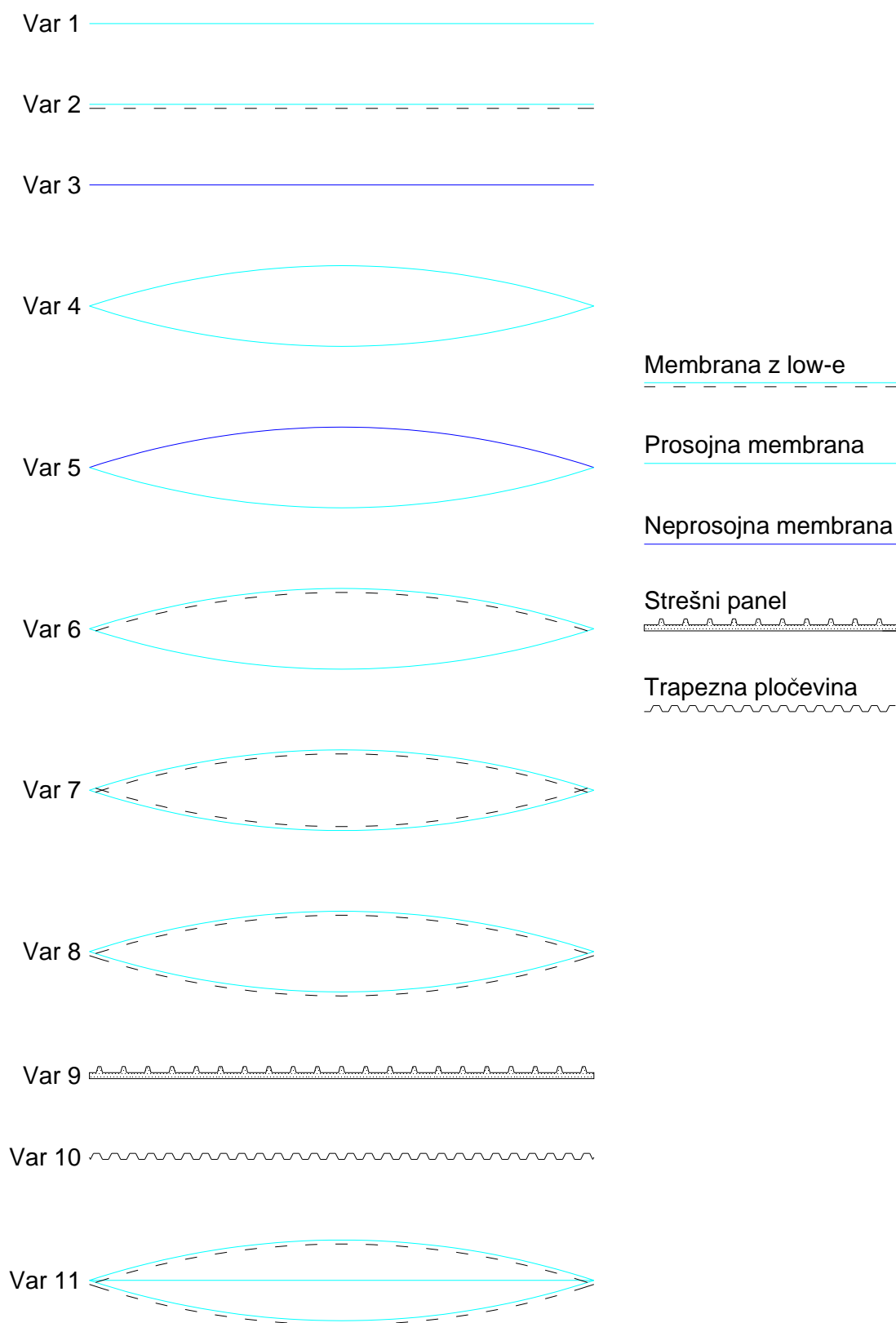
* Vrednosti toplotnih prehodnosti membranskih ponjav, izračunanih po DIN EN ISO 6946, so podane med rezultati.

Preglednica 11: Opisi variant različnih strešnih kritin testne hale, za katere so bile izvedene termične simulacije.

Varianta	Strešna konstrukcija	Spodnja membrana	Zgornja membrana	
Var 1	Enoslojna ponjava	B1015		
Var 2		B1015 low-e Poz N		
Var 3		B1673 (neprosojna)		
Var 4	Dvoslojna pnevmatska ponjava	B1010	B1015	
Var 5		B1010	B1673 (neprosojna)	
Var 6 *		B1010	B1015 low-e Poz N	
Var 7		B1015 low-e Poz Z	B1015 low-e Poz N	
Var 8		B1015 low-e Poz N	B1015 low-e Poz N	
Var 9	Neprosojna streha – »sandwich« strešni paneli	1 mm jeklena pločevina / 60 mm poliuretanska izolacija 030 / 1 mm jeklena pločevina		
Var 10	Neprosojna streha – trapezna pločevina	1 mm jeklena pločevina		
Varianta	Strešna konstrukcija	Spodnja membrana	Srednja membrana	Zgornja membrana
Var 11	Troslojna pnevmatska ponjava	B1015 low-e Poz N	B1010	B1015 low-e Poz N

* Podjetje Logging za »Energetsko učinkovito low-e membransko streho industrijskih in športnih objektov« (strešna konstrukcija Var 6) leta 2009 prejelo zlato priznanje za inovacije Gospodarske zbornice Dolenjske in Bele krajine (GDZBK), leta 2010 pa še nacionalno bronasto priznanje Gospodarske zbornice Slovenije (GZS). Strešno konstrukcijo Var 6 so razvili skupaj z nemškim podjetjem za oblikovanje arhitekturnih membran H. Seybold GmbH & Co. KG.

»Poz N« in »Poz Z« sta možni poziciji low-e prevleke na PVC membrani, in sicer pomeni »Poz N« pozicijo low-e prevleke na notranji strani membrane, »Poz Z« pa na zunanji strani membrane. Variante strešnih kritin, opisanih v Preglednici 11, so grafično prikazane na Sliki 49.

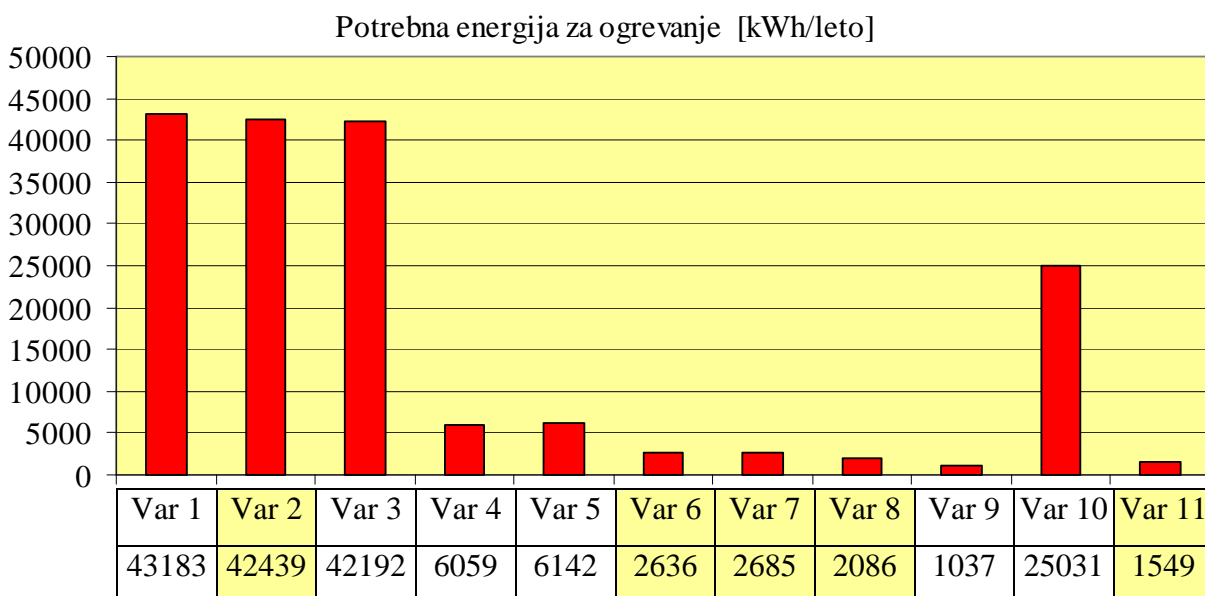


Slika 49: Variante različnih strešnih kritin testne hale, za katere so bile izvedene termične simulacije.

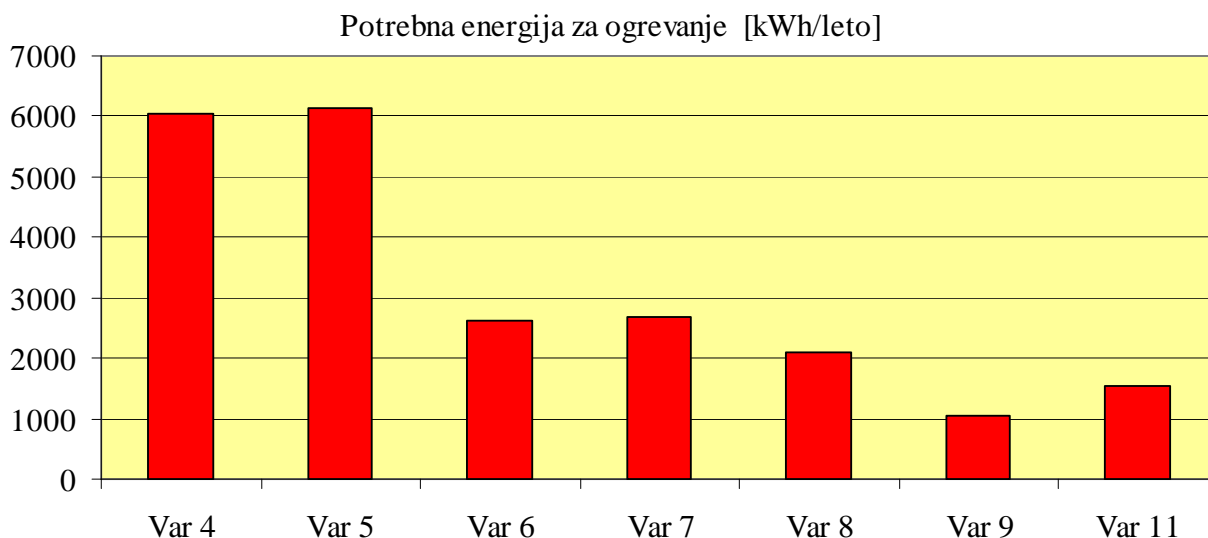
8.4.2.1 Zimska toplotna zaščita

Na Grafikonu 5 je prikazana potrebna energija za ogrevanje hale na ciljno temperaturo 5°C (zaščita proti zmrzovanju blaga v skladišču) pri različnih variantah strešnih konstrukcij, opisanih v Preglednici 11. K posamezni varianti so v Grafikonu 5 pripisane tudi številske vrednosti potrebne energije za ogrevanje v kWh/leto. Variante z večjo energetsko učinkovitostjo (Var 4, Var 5, Var 6, Var 7, Var 8, Var 9 in Var 11) so zaradi boljše preglednosti predstavljene še na Grafikonu 6.

Iz Grafikona 5 je razvidno, da so potrebe po energiji za ogrevanje največje pri enoslojnih ponjavah (Var 1, Var 2 in Var 3) in pri trapezni pločevini (Var 10). Med enoslojnimi ponjavami daje najmanjšo zimsko toplotno zaščito prosojna membrana B1015 (Var 1), če se na spodnjo stran te membrane doda low-e prevleka (Var 2) se toplotna zaščita izboljša za 1,7%, če pa se namesto prosojne membrane uporabi neprosojna B1673 (Var 3), pa je toplotna zaščita za 2,3% boljša. Te razlike so minimalne, zato membran z low-e prevleko ni smiselno uporabljati kot enoslojne ponjave, saj prihranek energije za ogrevanje ne pokrije stroškov izdelave low-e prevleke.



Grafikon 5: Potrebna energija za ogrevanje pri različnih variantah strešnih konstrukcij (v tabeli so ponjave z low-e so obarvane rumeno).



Grafikon 6: Potrebna energija za ogrevanje pri energetsko učinkovitejših variantah strešnih konstrukcij.

Z uporabo dvoslojnih pnevmatskih ponjav (Var 4, Var 5, Var 6, Var 7 in Var 8), pri katerih toplotno izolacijo nudi predvsem stisnjen zrak med obema slojema membrane, se v primerjavi z enoslojno PVC ponjavo občutno zniža potrebna energija za ogrevanje hale. Že pri dvoslojni pnevmatski ponjavi iz prosojnih membran brez low-e prevleke (Var 4) je potrebna energija za ogrevanje hale kar za 86,0% manjša kot pri prosojni enoslojni ponjavi (Var 1). Če se na notranjo stran zgornjega sloja takšne dvoslojne ponjave doda še low-e prevleka (Var 6), pa se zimska toplotna zaščita izboljša še za 56,5%. Izmed dvoslojnih ponjav najmanjšo zimsko toplotno zaščito, za 1,4% manjšo kot Var 4, nudi ponjava z zgornjim slojem in zatemnjene oz. neprosojne membrane (Var 5), saj so toplotni dobitki zaradi sončnega sevanja v tem primeru zaradi neprosojnosti zgornje membrane (takšna membrana ne prepušča sončnega sevanja) manjši.

Kot je bilo že omenjeno, se potrebna energija za ogrevanje pri dodatku low-e prevleke na notranjo stran zgornjega sloja prosojne ponjave (Var 6) zmanjša kar za 56,5 %, če pa se low-e prevleka doda na notranjo stran obeh slojev prosojne ponjave (Var 8), pa se potrebna energija za ogrevanje zmanjša za 65,6%, torej še za dodatnih 9,1%. Zelo pomembno je, da se low-e prevleka pozicionira na pravo stran membrane. Če se na prosojno dvoslojno ponjavo z low-e prevleko na notranji strani zgornjega sloja membrane (Var 6) doda low-e prevleka še na notranjo stran spodnjega sloja membrane (Var 8), se potrebna energija za ogrevanje zmanjša

za 20,9%, če pa se low-e prevleka namesto na notranjo stran doda na zgornjo stran spodnjega sloja membrane (Var 7), pa se poleg stroškov za izdelavo dodatne low-e prevleke za 1,9% poveča tudi potrebna energija za ogrevanje, zato takšna varianta ni smiselna. Razlika v energetske učinkovitosti ponjav Var 7 in Var 8 je velika, čeprav sta obe ponjavi sestavljeni iz enake količine enakega materiala, razlikujeta se le v tem, da je pri Var 7 low-e prevleka na nasprotni strani spodnje membrane kot pri Var 8.

Razlog za razliko v obnašanju je ta, da sta emisivnost in reflektivnost obratno sorazmerni lastnosti površine materiala in sta njuni vrednosti pri membrani z low-e prevleko različni za eno in drugo stran membrane. Emisivnost low-e prevleke je enaka 0,22, reflektivnost pa 0,78 (njuna vsota je enaka 1). Večja kot je emisivnost, manjša je reflektivnost, zato ima površina prosojne membrane brez low-e prevleke z večjo emisivnostjo tudi manjšo reflektivnost. Low-e prevleka na spodnji strani ponjave deluje kot infrardeče ogledalo, saj odbija toplotno sevanje iz notranjosti prostora nazaj v prostor in tako preprečuje, da bi toplota prešla iz prostora, s čimer se zmanjša potrebna energija za ogrevanje prostora. Če se low-e prevleka namesti na zgornjo stran spodnje membrane tega učinka na spodnji membrani ni, zato je potrebna energija za ogrevanje pri Var 7 večja.

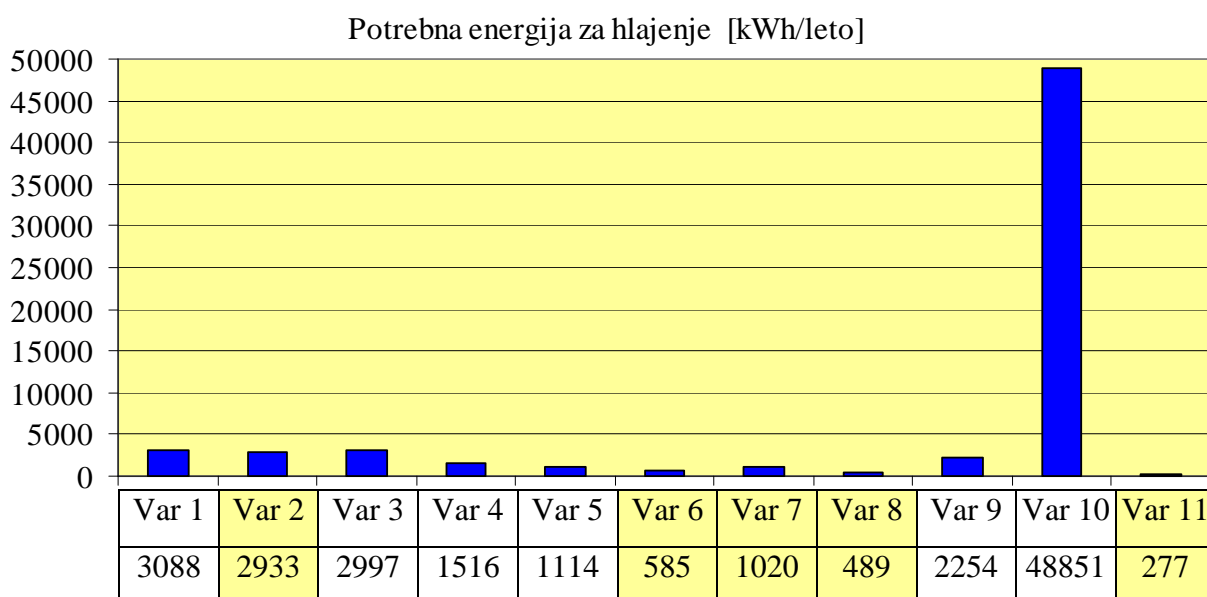
Toplotna prehodnost U je pri troslojni pnevmatski ponjavi z low-e prevleko na spodnji strani zgornjega in spodnjega sloja (Var 11) manjša kot pri dvoslojni ponjavi z enako pozicijo low-e prevlek (Var 8), saj je prostornina stisnjenega zraka pri troslojni ponjavi zaradi vmesne membrane razdeljena na polovico, zato se zrak v ponjavi počasneje in manj ohlaja oz. segreva. Izmed vseh tipov membranskih ponjav ima troslojna ponjava z low-e prevleko na spodnji strani zgornjega in spodnjega sloja membrane (Var 11) največjo energetsko učinkovitost. Potrebna energija za ogrevanje je pri Var 11 kar za 74,4% manjša kot pri prosojni dvoslojni ponjavi brez low-e prevleke (Var 4).

Toplotna prehodnost neprosojne strešne kritine iz »sandwich« panelov ($U = 0,46 \text{ W/m}^2\text{K}$) je nižja od toplotnih prehodnosti membranskih strešnih konstrukcij, zato so potrebe po energiji pri tej varianti (Var 9) najnižje. Potrebna energija za ogrevanje je pri strešni kritini iz trapezne pločevine (Var 10) bistveno večja kot pri Var 9, kar je posledica visoke vrednosti toplotne prehodnosti trapezne pločevine ($U = 7,10 \text{ W/m}^2\text{K}$).

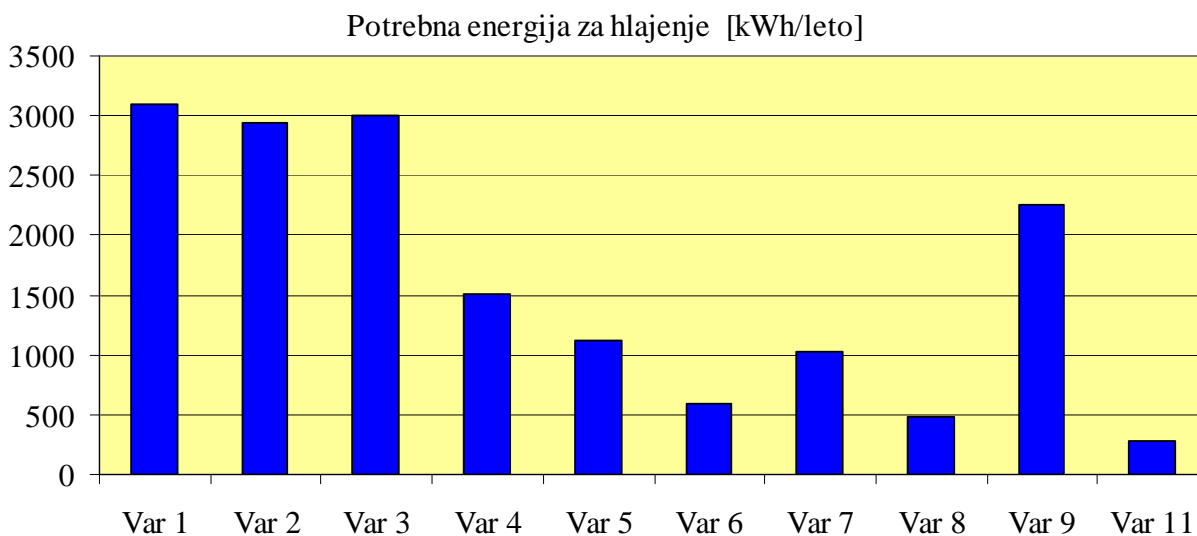
8.4.2.2 Poletna toplotna zaščita

Na Grafikonu 7 je prikazana potrebna energija za hlajenje hale na ciljno temperaturo 26°C pri različnih variantah strešnih konstrukcij, opisanih v Preglednici 11. K posamezni varianti so v Grafikonu 7 pripisane tudi številске vrednosti potrebne energije za hlajenje v kWh/leto. Variante z večjo energetsko učinkovitostjo oz. vse variante strešnih kritin razen trapezne pločevine (Var 10) so zaradi boljše preglednosti predstavljene še na Grafikonu 8. Vrednost potrebne energije za hlajenje pri strešni kritini iz trapezne pločevine (Var 10) je v primerjavi z vrednostmi ostalih strešnih kritin izredno velika, kar za faktor 14,8 večja od potrebne energije za hlajenje pri prosojni enoslojni membrani (Var 1), ki je med ostalimi variantami največja.

Razlike v vrednostih potrebne energije za hlajenje so med enoslojnimi in dvoslojnimi ponjavami bistveno manjše kot razlike v vrednostih potrebne energije za ogrevanje. Med variantami strešnih kritin na Grafikonu 8 (brez trapezne pločevine) je potrebna energija za hlajenje pri enoslojnih ponjavah največja. S spreminjanjem prosojnosti in dodajanjem low-e se energetska učinkovitost enoslojnih ponjav bistveno ne spreminja. Če se na prosojno enoslojno ponjavo s spodnje strani doda low-e prevleka, se potrebe po energiji za hlajenje zmanjšajo za 5,0%, v primeru uporabe zatemnjene membrane brez low-e prevleke pa za 2,9%.



Grafikon 7: Potrebna energija za hlajenje pri različnih variantah strešnih konstrukcij (v tabeli so ponjave z low-e so obarvane rumeno).



Grafikon 8: Potrebna energija za ogrevanje pri energetsko učinkovitejših variantah strešnih konstrukcij (vse razen Var 10 – trapezna pločevina).

Že pri uporabi dvoslojne pnevmatske ponjave iz prosojnih membran brez low-e prevlek (Var 4) se potrebna energija za hlajenje v primerjavi z enoslojno prosojno ponjavo brez low-e prevleke (Var 1) zmanjša za 50,9%, če pa se na notranjo stran zgornje membrane v takšni ponjavi doda še low-e prevleka (Var 6), pa se potrebna energija za hlajenje zmanjša kar za 81,1%.

Izmed dvoslojnih pnevmatskih ponjav sta se za energetsko najbolj učinkoviti izkazali ponjavi z low-e prevlekami na notranji strani ponjave (Var 6 in Var 8). Če dvoslojni pnevmatski ponjavi iz prosojnih membran (Var 4) na notranjo stran zgornjega sloja dodamo low-e prevleko (Var 6) se potrebna energija za hlajenje zmanjša za 61,4%, v primeru ko low-e prevleko dodamo na notranjo stran obeh slojev membrane (Var 8), pa se potrebe po energiji za hlajenje zmanjšajo za 67,7%, torej še za dodatnih 20,3%. Razlika v energetski učinkovitosti ponjav Var 6 in Var 8 je majhna, zato se običajno low-e prevleka dodaja le na notranjo stran zgornjega sloja membrane (Var 6), saj so stroški izdelave dodatne low-e prevleke večji od prihranka energije.

Razlika v energetski učinkovitosti ponjav Var 7 in Var 8 je pri poletni toplotni zaščiti še večja kot pri zimski, zato je v tem primeru še pomembnejše, da se low-e prevleka pozicionira na spodnjo stran membrane (Var 8) in ne na zgornjo (Var 7). Čeprav sta obe ponjavi sestavljeni

iz enake količine enakega materiala, so potrebe po energiji za hlajenje pri Var 8 za 52,1% manjše kot pri Var 7. Površina z low-e prevleko ima zelo nizko emisivnost 0,22, zato je količina oddane toplote na strani low-e prevleke mnogo manjša kot na nasprotni strani. Pri Var 7 tako segreta ponjava oddaja večino toplote v halo, pri Var 8 pa je dosežen nasprotni učinek, zato takšna ponjava oddaja toploto ven iz hale, njena notranjost pa se ne pregreva.

Zanimivo je to, da je potrebna energija za hlajenje pri kritini iz strešnih panelov s poliuretansko izolacijo debeline 6 cm (Var 9) večja kot pri vseh vrstah dvoslojnih membranskih ponjav. Razlog za takšno obnašanje je nizka toplotna prehodnost strešnih panelov ($U = 0,46 \text{ W/m}^2\text{K}$), ki preprečuje ohlajanje strehe in prehod toplote iz notranjosti hale v zunanjo okolico.

Izmed obravnavanih strešnih kritin največjo poletno toplotno zaščito notranjosti hale nudi troslojna pnevmatska ponjava z low-e prevleko na notranji strani zgornjega in spodnjega sloja membrane (Var 11). Potrebna energija za hlajenje je pri takšni ponjavi je kar za 87,7% manjša kot pri kritini iz strešnih panelov (Var 9), za 81,7% manjša kot pri prosojni dvoslojni ponjavi brez low-e prevleke (Var 4) in za 45,4 % manjša kot pri dvoslojni ponjavi z low-e prevleko na notranji strani obeh slojev membran (Var 8).

8.4.2.3 Toplotna prehodnost ponjav

V Preglednici 12 so podane vrednosti toplotne prehodnosti U za vse variante ponjav, opisane v Preglednici 11 (Var 1 – Var 8 in Var 11), in robni pogoji upoštevani pri njihovem izračunu, izvedenem po DIN EN ISO 6946, dodatku A in dodatku B. Vrednosti toplotne prehodnosti U so za zimsko in poletno obdobje različne, saj je različna tudi smer toplotnega toka v posameznem obdobju. Toplotni tok se vedno giblje od točke z višjo temperaturo k točki z nižjo temperaturo, zato pozimi toplotni tok teče iz toplejše notranjosti hale proti hladnejši zunanosti, poleti pa ravno obratno.

(Krämer, S. 2009. Effectiveness of the Low-E coating. Low-E High-Tec Quality for Textile Roofing. Düren, H. Seybold GmbH & Co. KG: 1-47.)

Preglednica 12: Toplotne prehodnosti posameznih variant strešnih ponjav iz enega ali več slojev PVC membran pri različnih robnih pogojih.

Robni pogoji	Klimatski pogoji		Zima	Poletje
	Smer toplotnega toka		Navzgor	Navzdol
	Zunanja temperatura		$T_{\text{zun}} = 3^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{zun}} = 22^{\circ}\text{C}$
	Notranja temperatura		$T_{\text{not}} = 15^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{not}} = 20^{\circ}\text{C}$
	Hitrost vetra		$v = 1,7 \text{ m/s}$	$v = 2,0 \text{ m/s}$
Vrsta ponjave	Varianta	Uporabljeni tipi membran v sestavi ponjave	Toplotna prehodnost U [W/m ² K]	Toplotna prehodnost U [W/m ² K]
Enoslojna ponjava	Var 1	B1015	5,9	4,3
	Var 2	B1015 low-e Poz N	4,3	1,7
	Var 3	B1673 (neprosojna)	5,9	4,3
Dvoslojna pnevmatska ponjava	Var 4	zg: B1015 sp: B1010	3,0	2,3
	Var 5	zg: B1673 (neprosojna) sp: B1010	3,0	2,3
	Var 6	zg: B1015 low-e Poz N sp: B1010	2,0	1,1
	Var 7	zg: B1015 low-e Poz N sp: B1015 low-e Poz Z	1,7	0,8
	Var 8	zg: B1015 low-e Poz N sp: B1015 low-e Poz N	1,8	0,7
Troslojna pnevmatska ponjava	Var 11	zg: B1015 low-e Poz N sr: B1010 sp: B1015 low-e Poz N	1,3	0,6

8.4.3 Zaključek

Z uporabo dvoslojne pnevmatske ponjave se v primerjavi z enoslojno ponjavo občutno zniža potrebna energija za ogrevanje in hlajenje hale, saj pri dvoslojni ponjavi stisnjen zrak med membranama ponjavo toplotno izolira. Kljub enaki prostornini stisnjenega zraka, pa je toplotna prehodnost troslojne pnevmatske ponjave manjša od toplotne prehodnosti dvoslojne pnevmatske ponjave, saj srednja membrana v troslojni ponjavi razdeli stisnjen zrak na dva dela in s tem prepreči mešanje zraka med zgornjim in spodnjim delom. Z mešanjem zraka se prenaša tudi toplota, zato se z večanjem števila prekatov v ponjavi, ki med seboj niso povezani, zmanjšuje toplotna prehodnost ponjave.

Primerjava dvoslojnih pnevmatskih ponjav Var 4, Var 5 in Var 6 je pokazala, da se z uporabo low-e prevleke na notranji strani zgornjega sloja ponjave (Var 6) potrebna energija za ogrevanje precej zmanjša. V primeru uporabe low-e prevleke na notranji strani obeh slojev membran (Var 8) se energetska učinkovitost ponjave še poveča, vendar se v praksi običajno low-e prevleka nanaša le na eno membrano v večslojni ponjavi, saj so stroški izdelave dodatne low-e prevleke pri kratkoročnih investicijah, kot so npr. začasna skladišča, večji od prihranka energije.

Izmed obravnavanih variant najmanjšo potrebno energijo za ogrevanje dosega kritina iz strešnih panelov (Var 9), saj je njena toplotna prehodnost U manjša kot pri ostalih variantah. Ta isti razlog pa hkrati poveča potrebe po energiji za hlajenje, saj strešni paneli zaradi svoje nizke toplotne prehodnosti preprečujejo, da bi poleti toplota iz hale skozi streho prešla v okolico. Potrebna energija za hlajenje je pri vseh večslojnih ponjavah manjša kot pri kritini iz strešnih panelov.

Uporaba strešne kritine iz trapezne jeklene pločevine vodi do občutnega pregrevanja zraka pod kritino in s tem tudi celotne notranjosti hale. Trapezna pločevina namreč absorbira sončno sevanje in odda toploto v zgornjo plast zraka v hali.

V primerjavi s prosojno dvoslojno pnevmatsko ponjavo brez low-e prevleke so se potrebe po energiji ob uporabi dvoslojne pnevmatske ponjave z low-e prevleko na notranji strani zgornjega sloja zmanjšale:

- v zimskem obdobju za 56,5% in
- v poletnem obdobju za 61,4%.

Ob uporabi troslojne pnevmatske ponjave z low-e prevleko na notranji strani zgornjega in spodnjega sloja pa so se potrebe po energiji zmanjšale:

- v zimskem obdobju 74,4% in
- v poletnem obdobju 81,7%.

9 STATIČNI IZRAČUN STREŠNEGA SISTEMA IZ DVOSLOJNIH PNEVMATSKIH PONJAV

Iz oslojenih membran je mogoče oblikovati veliko različnih strešnih sistemov. Ti so lahko sestavljeni iz enega ali več slojev membran. Kot je bilo omenjeno že v prejšnjih poglavjih, membrane, ki so sicer zelo fleksibilen material, pridobijo togost in nosilnost tako, da se jih postavi v položaj z dvojno ukrivljenostjo. Enoslojnim membranskim ponjavam se lahko dvojna ukrivljenost vsili s pomočjo prednapetih kablov, ki so pritrjeni na tlačne stebre in v tla (primer: nadstrešnica olimpijskega parka v Münchnu) ali pa s pomočjo posebnih nateznih obročev na tlačnih stebrih, ki vlečejo membrano v stožčasto obliko in oblikujejo strešni sistem s koničastimi vrhovi, pokritimi s tipskimi kapami (primer: paviljoni in nadstrešnice s koničasto streho).

Membranski strešni sistemi so lahko sestavljeni tudi iz več slojev membran. Običajno se takšni strešni sistemi izdelujejo iz dveh slojev membran. Tudi v tem primeru ponjava pridobi togost in nosilnost z dvojno ukrivljenostjo zgornje in spodnje membrane. Ker je membrana izdelana iz tkanine, prevlečene s polimeri, ki tkanino z obeh strani popolnoma prekrijejo in zatesnijo, takšna membrana ne prepušča niti vode niti zraka, zato je dvojno ukrivljenost obeh membran najlažje doseči tako, da se ponjavo napihne z zrakom pod pritiskom, ki hkrati streho tudi toplotno izolira. Seveda se lahko uporabi tudi voda ali kakšna druga tekočina, vendar je specifična teža tekočin mnogo večja od specifične teže plinov, zato se za polnjenje ponjav običajno uporabljajo plini. V tej diplomski nalogi je podrobneje predstavljena dvoslojna pnevmatska ponjava, t.j. ponjava iz zgornjega in spodnjega sloja membrane, ki sta na robovih ponjave spojena, znotraj robov pa ju ločuje plast stisnjene zraka. Konstantni zračni pritisk v ponjavi vzdržujejo posebni kompresorji, ki zaznajo spremembe zračnega pritiska v ponjavi in jih kompenzirajo z vpihovanjem ali spuščanjem zraka iz ponjave.

Informacije o izvedbi in statičnem izračunu dvoslojnih pnevmatskih ponjavah za izdelavo te diplomske naloge sem dobila od novomeškega podjetja Loging d.o.o., ki se že vrsto let uspešno ukvarja z projektiranjem in izdelavo tovrstnih strešnih sistemov. Nekaj Logingovih referenčnih objektov s strešnim sistemom iz dvoslojnih pnevmatskih ponjav je prikazano na spodnjih slikah (Slike 50, 51 in 52).



Slika 50: Dvorana športnega centra Triglav v Ljubljani s streho iz dvoslojnih svetlobo prepustnih pnevmatskih ponjav, pritrjenih na jeklene nosilne loke iz prostorskega paličja, prečno povezane z distančniki.

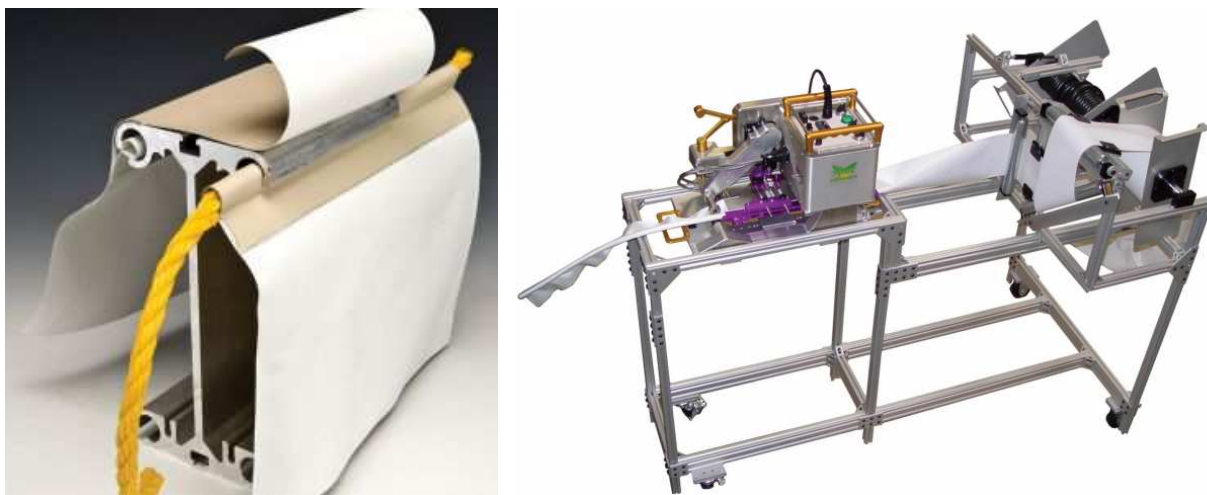


Slika 51: Skladiščni objekt s strešnim sistemom iz dvoslojnih pnevmatskih ponjav za skladiščenje proizvodov firme Michelin pred zaključkom gradnje, eden izmed mobilnih objektov, ki ga podjetje Loging oddaja v najem.

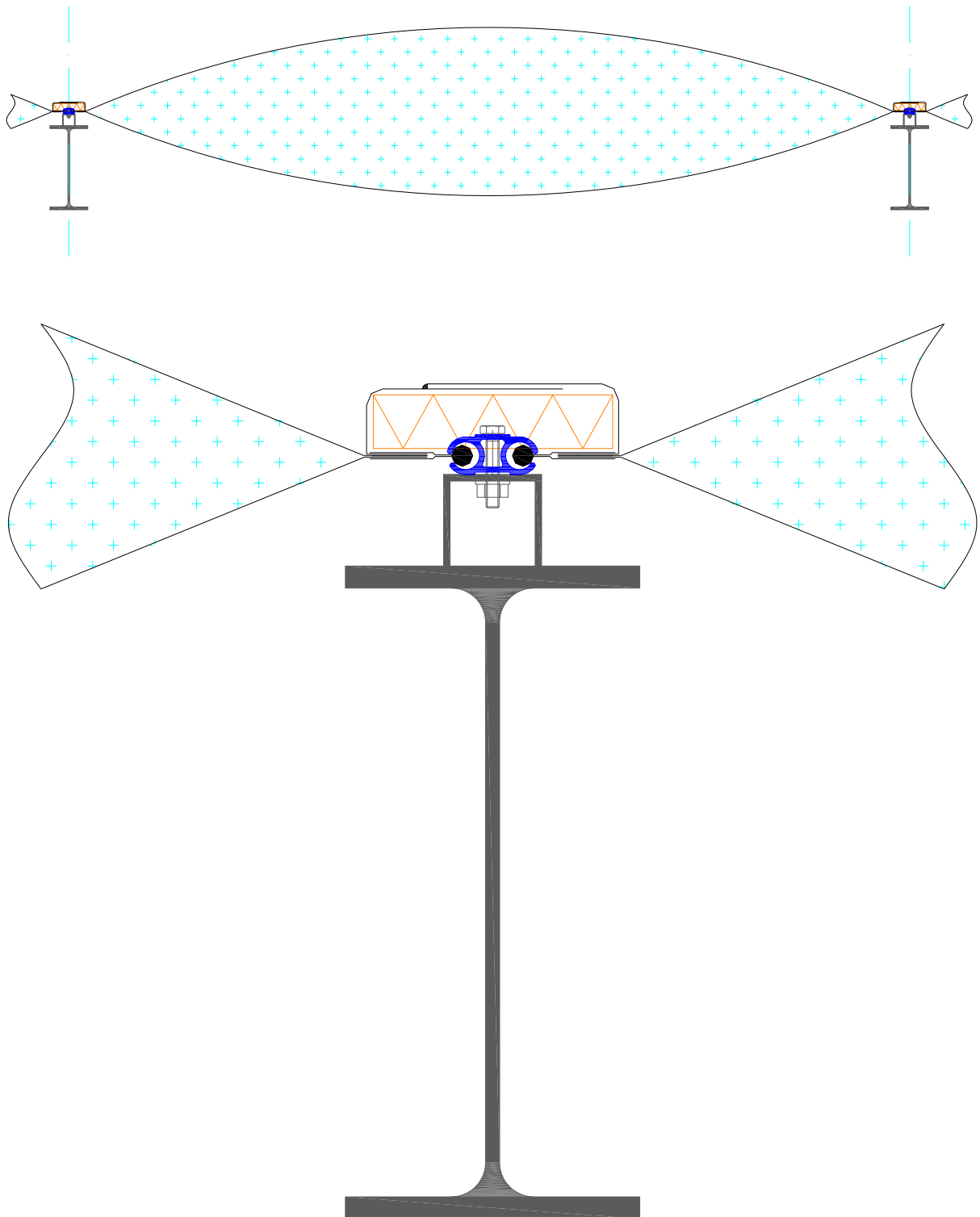


Slika 52: Skladišče farmacevtskih izdelkov tovarne zdravil Krka d.d. v Novem mestu s streho iz dvoslojnih ponjav, ki pri tleh objekta pri dnevni svetlobi zagotavljajo osvetljenost 200 lux, kar zadošča za branje oznak na skladiščnem blagu brez potrebne dodatne osvetlitve.

Zgornjo in spodnjo membrano ponjave se na robovih zvari skupaj s posebnim robnim trakom, imenovanim keder, ki se ga izdelava iz traka membrane, prepognjenega v dva sloja, z vgrajeno vrvjo ali fleksibilno plastično cevjo v pregibu (Slika 53, desno). Takšen odebeljeni rob ponjave se potegne skozi tipske aluminijaste profile (Slika 53, levo in Slika 54), ki predstavljajo neke vrste nepomično členkasto podporo ponjave, saj preprečujejo pomike ponjave, omogočajo pa ji zasuke okoli vzdolžne osi roba ponjave.



Slika 53: Aluminijasti profil za pritrditev ponjave preko privarjenega robnega traku oz. kedra (levo) in naprava za izdelavo kedra (desno), ki se ga na robovih ponjave zvari skupaj z obema slojema membrane.



Slika 54: Logingov detajl pritrjevanja ponjav na nosilne okvirje jeklene konstrukcije preko tipskega aluminijastega profila (profil modre barve), privijačenega na U profil, ki se ga privari na jeklen nosilni okvir, s tesnjenjem stika preko privihanih trakov membrane in dodano toplotno izolacijo na stiku (na sliki v oranžni barvi).

Na Sliki 54 je prikazan Logingov detajl pritrdjevanja ponjav na jeklene nosilne okvirje. Med oba sloja robnega traku oz. kedra se pri proizvodnji ponjav privarijo trije sloji membran, in sicer dva sloja predstavljata zgornjo in spodnjo membrano ponjave, tretji sloj pa je dodaten trak za tesnjenje stika, ki poteka po celotni dolžini ponjave. Ti trije sloji se med seboj predhodno zvarijo in še prešijejo, nato pa se jih vstavi v keder ter se jih privari še na zgornji in spodnji sloj kedra. Na nosilne okvirje jeklene konstrukcije se privari HOP U profil s privijačenim tipskim aluminijastim profilom za členkasto vpenjanje membrane. Na gradbišču se s pomočjo vitla potegne ponjavo s kedrom na robovih skozi aluminijaste profile na obeh straneh ponjave hkrati. Ko je ponjava nameščena, se na stik dveh ponjav položi trša toplotna izolacija, ki se jo zatesni tako, da se trakova membrane, privarjena kot tretji sloj v keder, preklopi nad toplotno izolacijo in se ju ročno zvari s pištolo za varjenje z vročim zrakom, spoj pa se na koncu utrdi s pritiskom z valjčkom. Vpeto in na stikih zatesnjeno membrano se lahko nato s pomočjo kompresorja napihne. Ponjave so med seboj povezane s plastičnimi cevmi, zato lahko en kompresor regulira zračni pritisk v več ponjavah hkrati.

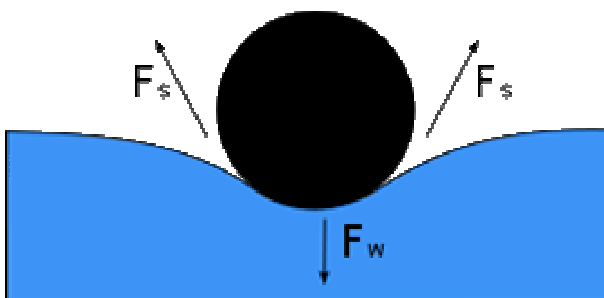
V nadaljevanju tega poglavja je podrobno predstavljeno obnašanje strešnega sistema jeklenih konstrukcij iz dvoslojnih pnevmatskih ponjav pod vplivom različnih stalnih in zunanjih spremenljivih obremenitev. Membrane v dvoslojnih ponjavah se lahko računa na dva načina:

- Z Young-Laplaceovo enačbo iz mehanike kapljev, po kateri se membrana obravnava kot meja med dvema različnima kapljevina (med kapljevine spadajo tekočine in plini), ki s površinsko napetostjo in ustrezno ukrivljenostjo uravnateži obremenitve v smeri pravokotno nanjo.
- Po principu neskončnega števila vzporednih vrvi, s katerimi se modelirajo membrane v ponjavi. V primeru, ko je širina precej manjša od dolžine ponjave, se obremenitve prenašajo v krajši smeri ponjave, torej vzdolž njene širine, zato se lahko ukrivljena ploskev membrane modelira z neskončnim številom vzporednih vrvnih linijskih elementov.

9.1 Sile v membrani po Young-Laplaceovi enačbi

V primeru, ko na napeto površino membrane ne deluje nobena sila v pravokotni smeri, je membrana ravna, če pa na eno stran membrane deluje pritisk, ki se razlikuje od pritiska na drugi strani, pa se v normalni smeri na površino membrane pojavijo sile, ki so enake razliki obeh pritiskov pomnoženi s površino, na katero delujejo. Da sile v membrani, ki potekajo v tangencialni smeri površine izničijo normalne sile zaradi pritiska, se površina membrane ukrivi.

Takšen sistem, kjer sile v tangencialni smeri površine prevzamejo obremenitev na površino v normalni smeri, se lahko nazorno prikaže na primeru igle, ki plava na površju vode (Slika 55). Lastna teža igle F_w pritiska na površino vode in je uravnotežena s silami površinske napetosti F_s na obeh straneh igle, ki so vzporedne površini vode v točkah, kjer se ta dotika igle. Horizontalni komponenti obeh sil F_s kažeta v nasprotno smer, zato se izničita, vertikalni komponenti pa kažeta v isto smer in se seštejeta ter tako uravnotežita silo F_w . Takšne in podobne pojave opisuje Young-Laplaceova enačba.



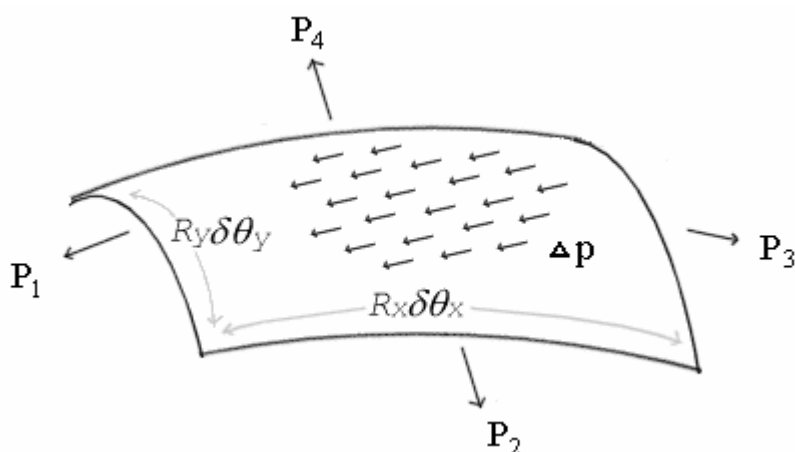
Slika 55: Prečni prerez igle, ki plava na površju vode zaradi sil površinske napetosti.

Young-Laplaceova enačba (1) je nelinearna parcialna diferencialna enačba, ki opisuje zvezo med razliko porazdeljenega pritiska v smeri normale na površino membrane ali stene (Δp), površinsko napetostjo v membrani (P) in glavnima radijema ukrivljenosti membrane (R_x in R_y), ki razmejuje dve statični tekočini (med tekočine spadajo tako kapljevine kot tudi plini). Membrana je definirana kot tanka plast snovi, skozi katero tekočine ne morejo pronicati. Young-Laplaceova enačba velja le ob predpostavki, da je membrana oz. stena, ki ločuje dve statični tekočini, zelo tanka. Ta enačba je med drugim zelo pomembna pri raziskavah

kapilarnega učinka. Z njo se določa oblika vodnih kapljic, luž, milnih mehurčkov in vseh ostalih oblik, ki jih določa površinska napetost.

$$\Delta p = P \cdot \left(\frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_y} \right) \quad (1)$$

Slika 56 prikazuje majhen diferencialni delec površine, obremenjen v pravokotni smeri z razliko pritiskov na obeh straneh Δp . Površinska ukrivljenost delca regulira sile površinske napetosti, ki delujejo v normalni smeri na stranice delca. Pojav, ko so vse normalne membranske sile P_1 , P_2 , P_3 in P_4 na delec uravnotežene, opisuje Young-Laplaceova enačba. $\delta\theta_x$ in $\delta\theta_y$ sta diferencialna kota krožnega izseka, ki definirata velikost diferencialnega delca.



Slika 56: Sile površinske napetosti, ki delujejo na majhen diferencialni delec površine, obremenjen z razliko pritiskov v normalni smeri na njegovo površino.

Pri strešnih sistemih iz dvoslojnih pnevmatskih membranskih ponjav je širina ponjave zelo majhna v primerjavi z dolžino ponjave. Ponjava med dvema jeklenima okvirjema je običajno široka od 4 m do 5 m, dolga pa je od 20 m do 40 m. Zaradi tega razloga se lahko za izračun površinske napetosti obeh membran ponjave privzame, da je ukrivljenost membrane v vzdolžni smeri ponjave zelo majhna oz. da je radij ukrivljenosti R_x neskončno velik (2). Young-Laplaceova enačba se tako za tovrstne ponjave zapiše v krajši obliki (3), površinska napetost membrane pa se izrazi z enačbo (4).

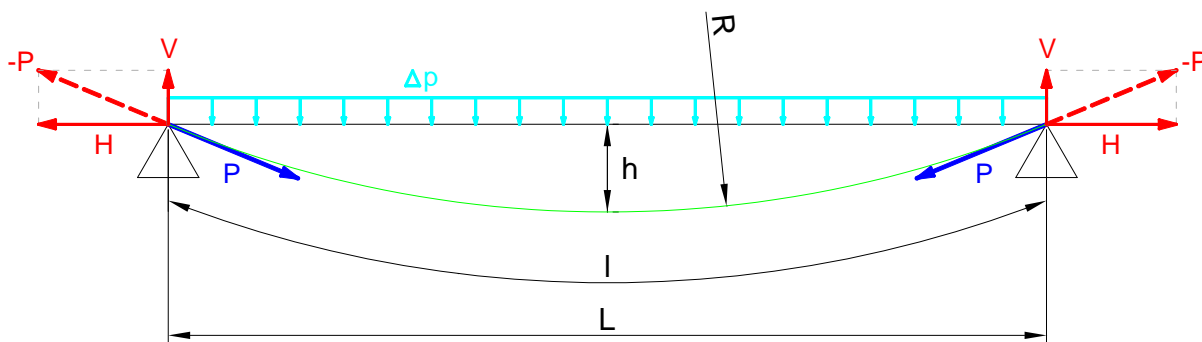
$$R_x \approx \infty \quad \rightarrow \quad \frac{1}{R_x} \approx 0 \quad (2)$$

$$\Delta p = P \cdot \frac{1}{R_y} \quad (3)$$

$$P = \Delta p \cdot R_y \quad (4)$$

9.2 Sile v membrani po principu neskončnega števila vzporednih vrvi

Ker je širina ponjave zelo majhna v primerjavi z njeno dolžino, lahko dovolj natančne rezultate za napetost membrane dobimo tudi tako, da membrano, ki je ploskovni element, modeliramo z neskončnim številom vzporednih linijskih nateznih vrvnih elementov. Za vrvi, ki je na obeh koncih nepomično podprta, se lahko predpostavi poenostavitev, da ta ob obremenitvi z enakomerno porazdeljeno obremenitvijo oblikuje krožni lok z radijem R , ki je od horizontalne linije med podporama na sredini razpona L odmaknjen za višino h (Slika 57).



Slika 57: Sile v vrvi (temno modro) in v nepomičnih podporah (rdeče) zaradi enakomerno porazdeljene obremenitve (svetlo modro).

V primeru dvoslojne pnevmatske ponjave enakomerno porazdeljeno obremenitev membrane Δp predstavlja razlika notranjega pritiska na površino membrane in zunanjih spremenljivih porazdeljenih obremenitev. Te obremenitve uravnovesita reakciji v nepomičnih podporah. Horizontalno H in vertikalno V komponento reakcije v podporah se po principu vrvi izračuna po enačbah (5) in (6).

$$H = \frac{\Delta p \cdot L^2}{8 \cdot h} \quad (5)$$

$$V = \frac{\Delta p \cdot L}{2} \quad (6)$$

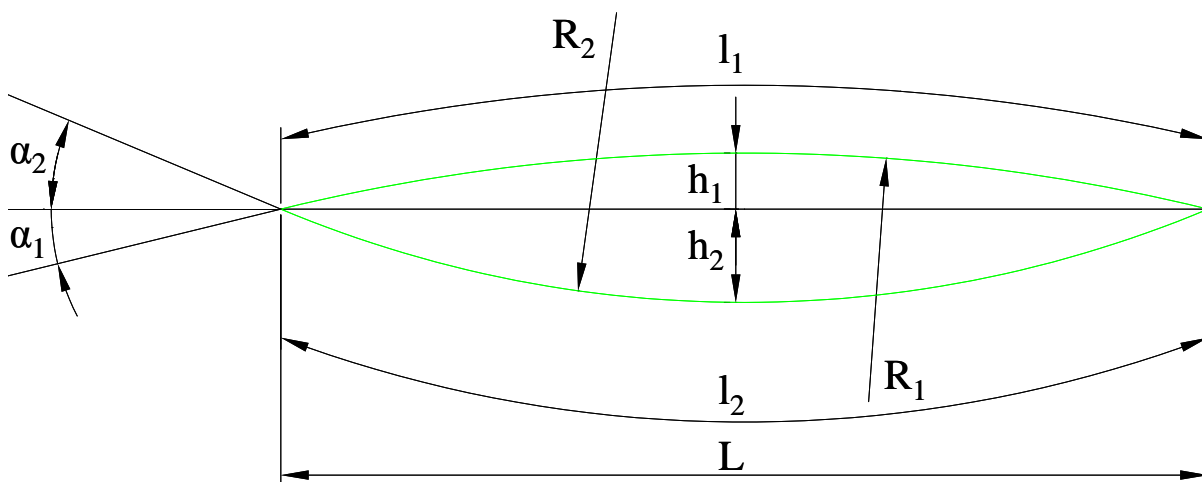
Ker je membrana modelirana z neskončnim številom vzporednih vrvi, sta obe komponenti reakcije podani kot sila na tekoči meter [N/m]. Sila v membrani P se lahko izračuna po Pitagorovem izreku iz komponent reakcij po enačbi (7).

$$P = \sqrt{H^2 + V^2} = \sqrt{\left(\frac{\Delta p \cdot L^2}{8 \cdot h}\right)^2 + \left(\frac{\Delta p \cdot L}{2}\right)^2} \quad (7)$$

9.3 Izračun sil v membranah in reakcij v podporah

Na Sliki 58 je prikazan prečni prerez napihnjene dvoslojne pnevmatske ponjave z označenimi tipičnimi dimenzijami zgornje in spodnje membrane. Indeks 1 se nanaša na zgornjo, indeks 2 pa na spodnjo membrano dvoslojne ponjave. Vse formule za krožni odsek, uporabljene v nadaljevanju diplomskega dela, so povzete po spodaj navedenem viru.

(Beyer, W. H. 1987. CRC Standard Mathematical Tables, 28th ed. Boca Raton, FL: CRC Press: 125 str.)



Slika 58: Dimenzije zgornje in spodnje membrane v dvoslojni ponjavi.

Iz Young-Laplaceove enačbe (4) kot tudi iz enačbe za izračun po principu neskončnega števila vzporednih vrvi (7) je razvidno, da je sila v membrani odvisna od obremenitve membrane in od oblike napete membrane, in sicer v enačbi (4) od radija krožnega odseka R , v enačbi (7) pa od razpona med podporama L in od višine napihnjene membrane h na sredini razpona, ki definirata radij krožnega odseka. Zaradi tega je zelo pomembno, da v proizvodnji ponjav membrane odrežejo na pravo širino in so pravilno skrojene med seboj v ponjavo. Širina membrane l oz. dolžina krožnega odseka je nekoliko večja od razpona med nepomičnima podporama L , izračuna pa se po enačbi (8).

$$l = 2 \cdot R \cdot \arcsin\left(\frac{L}{2 \cdot R}\right) \quad (8)$$

9.3.1 Postopek izračuna z Young-Laplaceovo enačbo

Za izračun sil v zgornji in v spodnji membrani (P_1 in P_2) je potrebno poznati radij krožnega odseka (R_1 in R_2), ki ga oblikujeta membrani, obremenjeni z razliko pritiskov (Δp_1 in Δp_2). Simetrične ponjave so običajno krojene tako, da je začetna višina posamezne neobremenjene membrane na sredini ponjave ($h_{1,0}$ in $h_{2,0}$) enaka desetini razpona L med nepomičnimi podporami ponjave (9). Krožnico določajo 3 definirane točke. Dve točki krožnice, ki jo opiše membrana, obremenjena z razliko pritiskov pravokotno na njeno površino, določata nepomični podpori, tretjo točko pa podaja predpostavljena višina, ki pri običajnih dvoslojnih simetričnih ponjavah znaša desetino razpona L med podporama. Tako je krožni odsek posamezne membrane definiran in lahko se izračuna njegov radij (10) oz. (11), ki je potreben za določitev sile v membrani (12) oz. (13).

Velikost natezne sile v membrani je vzdolž celotnega loka membrane konstantna in deluje v smeri tangente na membrano. Strižnih sil, tlačnih osnih sil in upogibnih momentov v membrani ni, saj jih ta ni sposobna prenesti. Iz sile v posamezni membrani se s pomočjo kotnih funkcij izračunata še obe komponenti reakcij v podporah (14) – (17), tako da je v podpori zagotovljeno ravnotežje sil.

$$h_{1,0} = h_{2,0} = \frac{L}{10} \quad (9)$$

$$R_1 = \frac{4 \cdot h_1^2 + L^2}{8 \cdot h_1} \quad (10)$$

$$R_2 = \frac{4 \cdot h_2^2 + L^2}{8 \cdot h_2} \quad (11)$$

$$P_1 = \Delta p_1 \cdot R_1 \quad (12)$$

$$P_2 = \Delta p_2 \cdot R_2 \quad (13)$$

$$H_1 = P_1 \cdot \cos \alpha_1 \quad (14)$$

$$H_2 = P_2 \cdot \cos \alpha_2 \quad (15)$$

$$V_1 = P_1 \cdot \sin \alpha_1 \quad (16)$$

$$V_2 = P_2 \cdot \sin \alpha_2 \quad (17)$$

Horizontalni reakciji zgornje in spodnje membrane v nepomični podpori se seštevata (18), saj delujeta v isti smeri, medtem ko se vertikalni reakcij zaradi nasprotnih ukrivljenosti membran odštevata (19).

$$H = H_1 + H_2 = \Delta p_1 \cdot R_1 \cdot \cos \alpha_1 + \Delta p_2 \cdot R_2 \cdot \cos \alpha_2 \quad (18)$$

$$V = V_2 - V_1 = \Delta p_2 \cdot R_2 \cdot \sin \alpha_2 + \Delta p_1 \cdot R_1 \cdot \sin \alpha_1 \quad (19)$$

9.3.2 Postopek izračuna po principu neskončnega števila vzporednih vrvi

Pri izračunu po principu neskončnega števila vzporednih vrvi se za razliko od izračuna po Young-Laplaceovi enačbi najprej izračunata obe komponenti reakcij v nepomičnih podporah (20) – (23) zaradi razlike porazdeljenih obremenitev na zgornjo (Δp_1) in spodnjo membrano (Δp_2). Silo v posamezni membrani (24) oz. (25) pa se izračuna po Pitagorovem izreku iz obeh pripadajočih komponent reakcij.

$$H_1 = \frac{\Delta p_1 \cdot L^2}{8 \cdot h_1} \quad (20)$$

$$H_2 = \frac{\Delta p_2 \cdot L^2}{8 \cdot h_2} \quad (21)$$

$$V_1 = \frac{\Delta p_1 \cdot L}{2} \quad (22)$$

$$V_2 = \frac{\Delta p_2 \cdot L}{2} \quad (23)$$

$$P_1 = \sqrt{H_1^2 + V_1^2} = \sqrt{\left(\frac{\Delta p_1 \cdot L^2}{8 \cdot h_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta p_1 \cdot L}{2}\right)^2} \quad (24)$$

$$P_2 = \sqrt{H_2^2 + V_2^2} = \sqrt{\left(\frac{\Delta p_2 \cdot L^2}{8 \cdot h_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta p_2 \cdot L}{2}\right)^2} \quad (25)$$

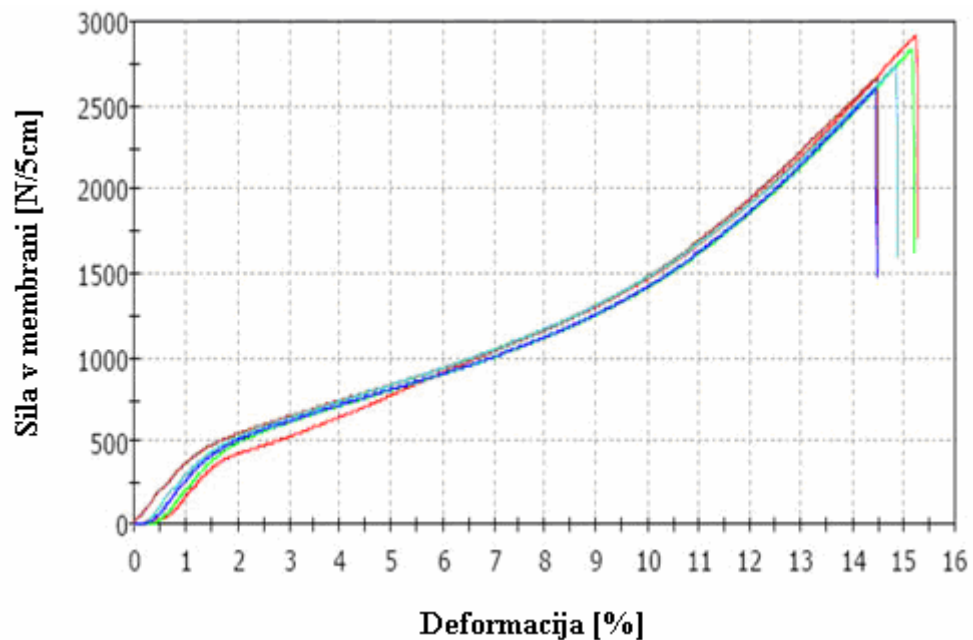
9.3.3 Postopek izračuna z upoštevanjem raztezka membrane

Velikost raztezka je pri membranah iz oslojenih tkanin večja kot pri običajnih gradbenih materialih, zato je zelo pomembno, da se pri izračunu sil v membrani upošteva tudi vpliv deformabilnosti membrane. Deformacije ob porušitvi preizkušancev iz poliestrskih tkanin prevlečenih s PVC običajno znašajo od 10-20%, pri preizkušancih iz steklenih vlaken prevlečenih s PTFE pa so te manjše in se gibljejo od 3-10%. Običajno so membrane iz oslojenih tkanin zaradi svoje deformabilnosti obremenjene s precej manjšimi obremenitvami od njihove natezne trdnosti, zato so deformacije pri delovnih obremenitvah membran mnogo manjše od deformaciji ob porušitvi.

Tipična oblika P-ε diagrama za membrane iz oslojenih tkanin je prikazana na Grafikonu 9, ki prikazuje zvezo med natezno silo in deformacijami 5 preizkušancev iz poliestrske tkanine prevlečene s PVC širine 5 cm. Preizkus je bil izveden po ISO 1421:1998 standardni metodi s tračnim preizkušancem za testiranje tkanin prevlečenih z gumo ali polimeri, s pomočjo hidravlične naprave z video merilcem deformacij (Slika 59). V Preglednici 13 so zapisani rezultati preizkusa in statistične vrednosti le teh.



Slika 59: Hidravlična naprava z video merilcem deformacij med obremenjevanjem tračnega preizkušanca.



Grafikon 9: Zveza med natezno silo in deformacijami 5 preizkušancev iz poliestrske tkanine prevlečene s PVC.

Preglednica 13: Rezultati preizkusa 5 tračnih preizkušancev po standardu ISO 1421:1998.

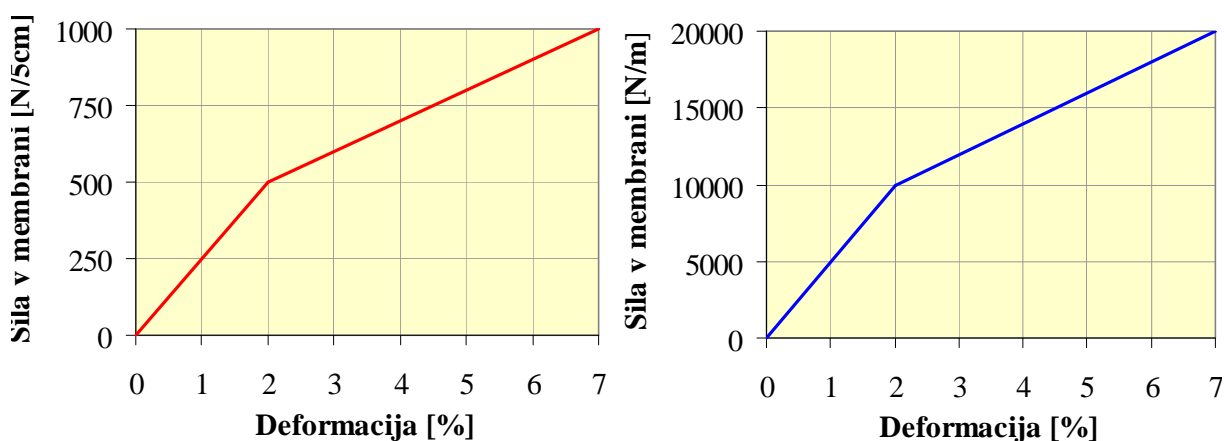
	Sila ob poružitvi [N/5cm]	Deformacija ob poružitvi [%]	Nominalna merilna dolžina [mm]	Debelina [mm]	Širina [mm]
Preizkušanec 1	2916	15	49,56	0,57	50,00
Preizkušanec 2	2654	14	49,86	0,57	50,00
Preizkušanec 3	2833	15	49,52	0,56	50,00
Preizkušanec 4	2730	15	49,48	0,57	50,00
Preizkušanec 5	2594	14	49,59	0,56	50,00
Srednja vrednost	2745	15	49,60	0,57	50,00
CoV [%]	4,759	2,641	0,302	0,968	0,000

V podjetju Loging za izdelavo dvoslojnih pnevmatskih strešnih ponjav uporabljajo membrane iz poliestrske tkanine prevlečene s PVC, zaščitene z akrilno ali PVDF površinsko prevleko, s težo 650 g/m^2 in natezno trdnostjo 2800 N/5cm , zato sem v nadaljevanju za vse ponjave uporabila ta tip membrane. Deformacije teh membran glede na velikost natezne obremenitve so prikazane na Grafikonu 9.

Glede na Grafikon 9 se lahko za poenostavitev računa privzamejo naslednje predpostavke:

- Lastna teža membran je zanemarljivo majhna.
- Med vrednostmi nateznih sil v membrani od 0 do 500 N/5cm se deformacije linearno povečujejo od 0 do 2%.
- Med vrednostmi nateznih sil v membrani od 500 do 1000 N/5cm se deformacije linearno povečujejo od 2 do 7%.

Z upoštevanjem zgornjih predpostavk dobimo poenostavljen P-ε diagram tipičnih membran (Grafikon 10). Dejanske sile v membranah dvoslojnih pnevmatskih ponjav običajno ne presežejo vrednosti 1000 N/5cm , zato so za izračun raztezka membran pomembne le vrednosti deformaciji, ki pripadajo nateznim obremenitvam do te vrednosti. Deformacija membrane $\epsilon(P)$ se v odvisnosti od sile v membrani izračuna po enačbi (28).



Grafikon 10: Zveza med natezno silo v membrani in deformacijami.

Membrana, ki sestavlja ponjavo, obremenitve zaradi notranjega zračnega tlaka v ponjavi in spremljive zunanje obremenitve uravnateži s t.i. površinsko napetostjo oz. z nateznimi silami v membrani. Zaradi teh sil se membrana tudi raztegne, kar pomeni, da se višina membrane h poveča, radij loka membrane R pa se zmanjša. Sistem senzorjev za regulacijo notranjega zračnega pritiska v ponjavi poskrbi, da se pri konstantnih zunanjih obremenitvah zračni pritisk v ponjavi ne spreminja, torej se ob raztezanju membrane, obremenjene s konstantno razliko pritiskov Δp , spreminjata le oblika membrane (h , R in α) ter natezna sila v membrani P . Iz Young-Laplaceove enačbe (4) je neposredno razvidno, da sta pri konstantni razliki pritiska Δp sila v membrani P in radij loka membrane R premo sorazmerna. Torej se pri zmanjšanju radija loka membrane R zaradi raztezka membrane zmanjša tudi sila v membrani. Prav tako je iz enačbe za silo v membrani po principu vrvi (7) razvidno, da se pri povečanju višine membrane h zaradi raztezka membrane sila v membrani P zmanjša. Končno silo v membrani se izračuna iteracijsko v i -tih korakih po enačbah od (28) do (33). Silo v membrani v i -tem koraku pa se lahko pri tem računa ali z Young-Laplaceovo enačbo (26) ali po principu vrvi (27). Korake je potrebno ponoviti tolikokrat, da se sila v membrani stabilizira oz. da je razlika med novo in predhodno silo v membrani po enačbi (33) enaka nič.

$$P_i = \Delta p \cdot R(P_{i-1}) \quad (26)$$

$$P_i = \sqrt{\left(\frac{\Delta p \cdot L^2}{8 \cdot h(P_{i-1})}\right)^2 + \left(\frac{\Delta p \cdot L}{2}\right)^2} \quad (27)$$

$$\varepsilon(P_i) = \begin{cases} \frac{0,02}{10000 \text{ N/m}} \cdot P_i, & \text{če je } 0 \leq P_i \leq 10000 \text{ N/m} \\ \frac{0,05}{10000 \text{ N/m}} \cdot P_i - 0,03, & \text{če je } 10000 \text{ N/m} \leq P_i \leq 20000 \text{ N/m} \end{cases} \quad (28)$$

$$\Delta l(P_i) = l_0 \cdot \varepsilon(P_i) \quad (29)$$

$$l(P_i) = l_0 + \Delta l(P_i) \quad (30)$$

$$R(P_i) = \frac{l(P_i)}{\Theta(P_i)} \approx \frac{l(P_i)}{\sqrt{24 \cdot \left(1 - \frac{L}{l(P_i)}\right)}}, \quad \text{če je } \Theta(P_i) = 2 \cdot \alpha(P_i) \in [0, \pi/2] \quad (31)$$

$$h(P_i) = R(P_i) - \sqrt{R^2(P_i) - (L/2)^2} \quad (32)$$

$$\Delta P_i = P_i - P_{i-1} \quad (33)$$

Kjer je:

- P_i sila v membrani v i-tem koraku iteracije,
- P_{i-1} sila v membrani v predhodnem koraku i-tega koraka iteracije,
- $R(P_{i-1})$ radij loka deformirane membrane zaradi P_{i-1} ,
- $\varepsilon(P_i)$ deformacija membrane zaradi P_i ,
- l_0 širina nedeformirane membrane,
- $\Delta l(P_i)$ raztezek membrane zaradi P_i ,
- $l(P_i)$ širina deformirane membrane zaradi P_i ,
- $R(P_i)$ radij loka deformirane membrane zaradi P_i ,
- $\Theta(P_i)$ središčni kot krožnega odseka, ki ga opiše deformirana membrana zaradi P_i ,
- $\alpha(P_i)$ kot med tangento na deformirano membrano in horizontalo na mestu podpore,
- $h(P_i)$ višina deformirane membrane na sredini razpona L zaradi P_i .

Primer iteracijske določitve končne sile v tipični membrani z razponom podpor $L = 5,0$ m in začetno višino na sredini razpona $h_0 = 0,5$ m, obremenjene izključno s 1000 Pa notranjega zračnega pritiska v ponjavi, je prikazan v Preglednici 14. Za izračun končne sile v membrani P je potrebno poznati konstantno razliko pritiskov na membrano Δp in razpon ponjave L ter robne pogoje membrane, ki so v Preglednici 14 podani kot začetni podatki (l_0 , R_0 , h_0).

V tem primeru je bilo za stabilizacijo sile v membrani potrebno narediti 9 korakov. V zadnjem stolpcu preglednice je podana razlika med silo v membrani v i -tem in predhodnem koraku. Razvidno je, da ima razlika v vsakem naslednjem koraku nasproten predznak, njena absolutna vrednost pa je iz koraka v korak manjša, dokler ta pri končni vrednosti sile v membrani v 9. koraku ni enaka 0. Pri takšnih robnih pogojih raztezek membrane znaša 5,67 cm, višina membrane pa se iz začetne vrednosti 50 cm poveča za približno 9,5 cm. Ob upoštevanju raztezka membrane je sila v membrani pri notranjem zračnem pritisku 1000 Pa od začetne vrednosti manjša kar za 953 N/m oz. za 14,66%. Z upoštevanjem raztezka obremenjene membrane dobimo manjše vrednosti sil v membrani in posledično tudi manjši vpliv membrane na jekleno konstrukcijo. Izračun brez upoštevanja raztezka je zato na varni strani.

Preglednica 14: Iteracijska določitev končne sile v membrani P , obremenjene s konstantnim zračnim pritiskom v ponjavi 1000 Pa, s pomočjo Young-Laplaceove enačbe.

Začetni podatki:	
$l_0 =$	5,13 m
$R_0 =$	6,50 m
$h_0 =$	0,50 m

Konstante:	
$\Delta p =$	1000 Pa
$L =$	5,00 m

i	P_i [N/m]	$\varepsilon(P_i)$ [-]	$\Delta l(P_i)$ [m]	$l(P_i)$ [m]	$R(P_i)$ [m]	$h(P_i)$ [m]	ΔP_i [N/m]
1	6500	0,0130	0,0667	5,1990	5,4243	0,6105	-
2	5424	0,0108	0,0557	5,1880	5,5636	0,5933	-1075,70
3	5564	0,0111	0,0571	5,1894	5,5448	0,5956	139,28
4	5545	0,0111	0,0569	5,1892	5,5473	0,5953	-18,75
5	5547	0,0111	0,0569	5,1892	5,5470	0,5953	2,51
6	5547	0,0111	0,0569	5,1892	5,5470	0,5953	-0,34
7	5547	0,0111	0,0569	5,1892	5,5470	0,5953	0,05
8	5547	0,0111	0,0569	5,1892	5,5470	0,5953	-0,01
9	5547	0,0111	0,0569	5,1892	5,5470	0,5953	0,00

9.4 Sile v membranah in reakcije v podporah zaradi zračnega pritiska v ponjavi

Zračni pritisk v dvoslojni ponjavi ima dve glavni funkciji, in sicer:

- napne obe membrani ter tako oblikuje togo blazino, ki lahko prenaša obremenitve na jekleno konstrukcijo,
- stisnjen zrak med membranama streho toplotno izolira,
- poleg zgornjih dveh glavnih funkcij lahko vpihovanje toplega zraka v ponjavo pomaga pri taljenju snega in s tem zmanjšuje obremenitev s snegom.

Zračni pritisk v ponjavi ni ves čas enak, ampak se tekom leta spreminja od približno 400 Pa do 1000 Pa ($100 \text{ Pa} = 1 \text{ mBar} = 0,1 \text{ kN/m}^2$). Poleti je zračni pritisk v ponjavi lahko nižji, pozimi pa se poveča, da lahko prenese zahtevane obremenitve s snegom. Če se pozimi zračni pritisk v ponjavi ne bi povečal, bi lahko pri velikih obremenitvah zaradi snega zgornja membrana izgubila stabilnost in padla na spodnjo stran ponjave.

Zračni pritisk v ponjavi uravnavajo posebni senzorji. Obstajata dva sistema senzorjev, ki se vgrajujeta v vpihovalne naprave pnevmatskih ponjav:

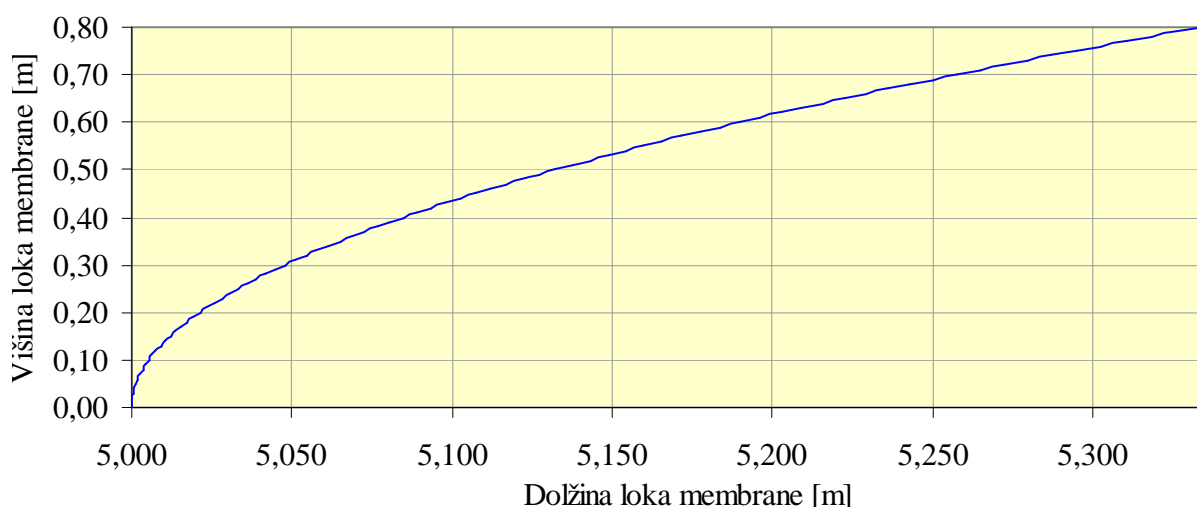
- Prvi sistem senzorjev preklaplja med poletnim in zimskim režimom in tako poskrbi, da se poleti v ponjavi vzdržuje nižji zračni tlak, pozimi pa višji.
- Drugi in dražji sistem senzorjev pa zazna povečanje ali zmanjšanje zračnega pritiska v ponjavi zaradi zunanjih spremenljivih vplivov (sneg, veter, temperaturne spremembe) in posledično poveča ali zmanjša zračni pritisk v ponjavi.

Če je dvoslojna ponjava, izdelana iz dveh membran enakega materiala in dimenzij, obremenjena le z notranjim zračnim pritiskom, je blazina napihnjene ponjave simetrična, saj je lastna teža membran in stisnjenega zraka zelo majhna. V tem primeru so karakteristike prereza ponjave enake za zgornjo in spodnjo membrano ($h_1 = h_2$, $\alpha_1 = \alpha_2$, $R_1 = R_2$, $l_1 = l_2$). Dimenzije zgornje in spodnje membrane pa so lahko tudi različne. Če naročnik objekta npr. želi, da so krožni loki napihnjениh ponjav zaradi estetskih razlogov iz zunanje strani bolj izraziti kot iz notranje, potem mora biti širina spodnje membrane l_2 manjša od širine zgornje membrane l_1 in obratno. Posledično se razlikujejo tudi vse druge dimenzijske karakteristike

ponjave, ki v tem primeru ni več simetrična, kljub temu, da je obremenjena izključno z notranjim zračnim pritiskom.

9.4.1 Sprememba višine membrane na sredini razpona zaradi raztezka membrane

Iz Grafikona 11 je razvidno, da se z raztezanjem membrane, t.j. s povečevanjem dolžine loka membrane, višina membrane zelo hitro povečuje. Če se npr. membrana z začetno višino $h_0 = 0,5$ m in dolžino loka $l_0 = 5,13$ m raztegne za 1% (t.j. 5,13 cm), se njena višina poveča za 9 cm, pri 2% raztezk pa celo za 17 cm, kar predstavlja 34% njene začetne višine. Manjša kot je začetna višina membrane h_0 , večje je povečanje višine pri enakem velikostnem redu raztezka. Pri membrani z začetno višino $h_0 = 0,3$ m in dolžino loka $l_0 = 5,05$ m se tako pri 1% raztezk (t.j. 5,05 cm) višina poveča kar za 13 cm, pri 2% raztezk pa za 23 cm, kar je precej več kot pri membrani z začetno višino $h_0 = 0,5$ m.



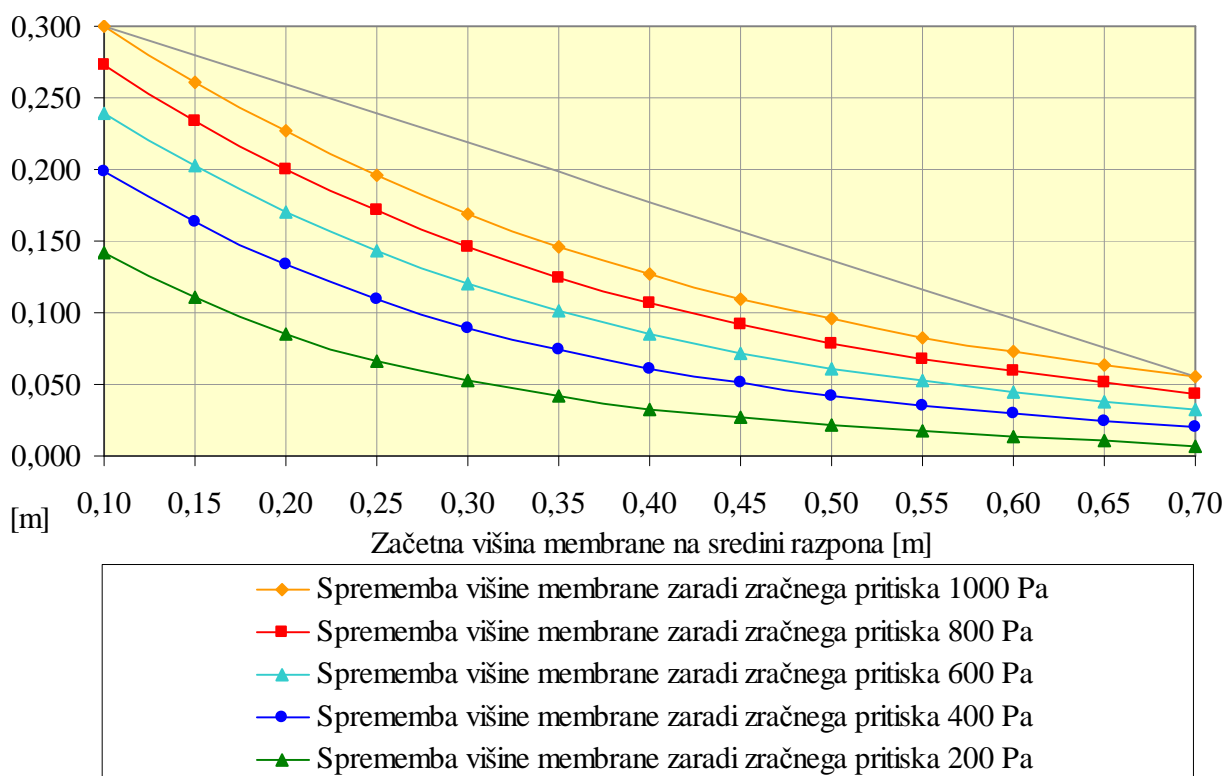
Grafikon 11: Višina loka membrane na sredini razpona med podporama $L = 5,0$ m v odvisnosti od dolžine loka membrane.

Preglednica 15 in Grafikon 12 prikazujeta spreminjanje višine membrane zaradi raztezka, ki je posledica obremenitve z zračnim pritiskom v ponjavi. Ker je na ponjavo nameščen sistem senzorjev, ki poskrbi, da je pri enaki zunanji obremenitvi zračni pritisk v ponjavi konstanten, je membrana ves čas obremenjena z enakim zračnim pritiskom, ki se zaradi raztezanja

membrane ne zmanjšuje. Z manjšanjem začetne višine membrane, se sprememba višine zaradi raztezka čedalje hitreje povečuje. Manjša kot je namreč višina membrane, večja sila se pojavi v membrani in večja kot je ta sila, večje so deformacije membrane ter s tem posledično tudi večja sprememba višine. Pri začetni višini membrane $h_0 = 0,10$ m je npr. sprememba višine membrane zaradi raztezka pri obremenitvi z 200 Pa zračnega pritiska enaka polovični vrednosti raztezka pri 5-krat večjem zračnem pritisku. Z večanjem zračnega pritiska v ponjavi se spremembe višine membrane zaradi raztezka čedalje počasneje povečujejo.

Preglednica 15: Višina raztegnjene membrane $h(\Delta l)$ in sprememba višine Δh zaradi raztezka pri različnih začetnih višinah membran v odvisnosti od zračnega pritiska v ponjavi Δp .

	$\Delta p = 1000$ Pa		$\Delta p = 800$ Pa		$\Delta p = 600$ Pa		$\Delta p = 400$ Pa		$\Delta p = 200$ Pa	
h_0 [m]	$h(\Delta l)$	Δh [m]	$h(\Delta l)$	Δh [m]	$h(\Delta l)$	Δh [m]	$h(\Delta l)$	Δh [m]	$h(\Delta l)$	Δh [m]
0,10	0,400	0,300	0,372	0,272	0,340	0,240	0,299	0,199	0,243	0,143
0,15	0,411	0,261	0,384	0,234	0,353	0,203	0,314	0,164	0,261	0,111
0,20	0,426	0,226	0,401	0,201	0,371	0,171	0,334	0,134	0,286	0,086
0,25	0,446	0,196	0,421	0,171	0,393	0,143	0,360	0,110	0,317	0,067
0,30	0,469	0,169	0,446	0,146	0,420	0,120	0,390	0,090	0,352	0,052
0,35	0,496	0,146	0,475	0,125	0,451	0,101	0,424	0,074	0,391	0,041
0,40	0,526	0,126	0,507	0,107	0,485	0,085	0,461	0,061	0,433	0,033
0,45	0,560	0,110	0,542	0,092	0,522	0,072	0,501	0,051	0,477	0,027
0,50	0,595	0,095	0,579	0,079	0,561	0,061	0,542	0,042	0,521	0,021
0,55	0,633	0,083	0,618	0,068	0,602	0,052	0,586	0,036	0,567	0,017
0,60	0,672	0,072	0,659	0,059	0,645	0,045	0,630	0,030	0,614	0,014
0,65	0,713	0,063	0,701	0,051	0,688	0,038	0,675	0,025	0,660	0,010
0,70	0,755	0,055	0,744	0,044	0,732	0,032	0,720	0,020	0,707	0,007



Grafikon 12: Sprememba višine membrane Δh zaradi raztezka pri različnih začetnih višinah membran v odvisnosti od zračnega pritiska v ponjavi Δp .

9.4.2 Membranske sile in reakcije v odvisnosti od velikosti zračnega pritiska v ponjavi

Preglednica 16 in Grafikon 13 prikazujeta velikosti sile v membrani in obeh komponent reakcije, ki jih ta povzroča v podpori, v odvisnosti od notranjega zračnega pritiska v tipični ponjavi z razponom $L = 5,0$ m in začetnima višinama membrane na sredini razpona $h_1 = h_2 = 0,5$ m. Vse tri omenjene karakteristične sile so po Young-Laplaceovi enačbi izračunane dvakrat, in sicer enkrat brez upoštevanja raztezka membrane (črtkane črte na grafikonu), drugič pa z upoštevanjem raztezka membrane (polne črte na grafikonu).

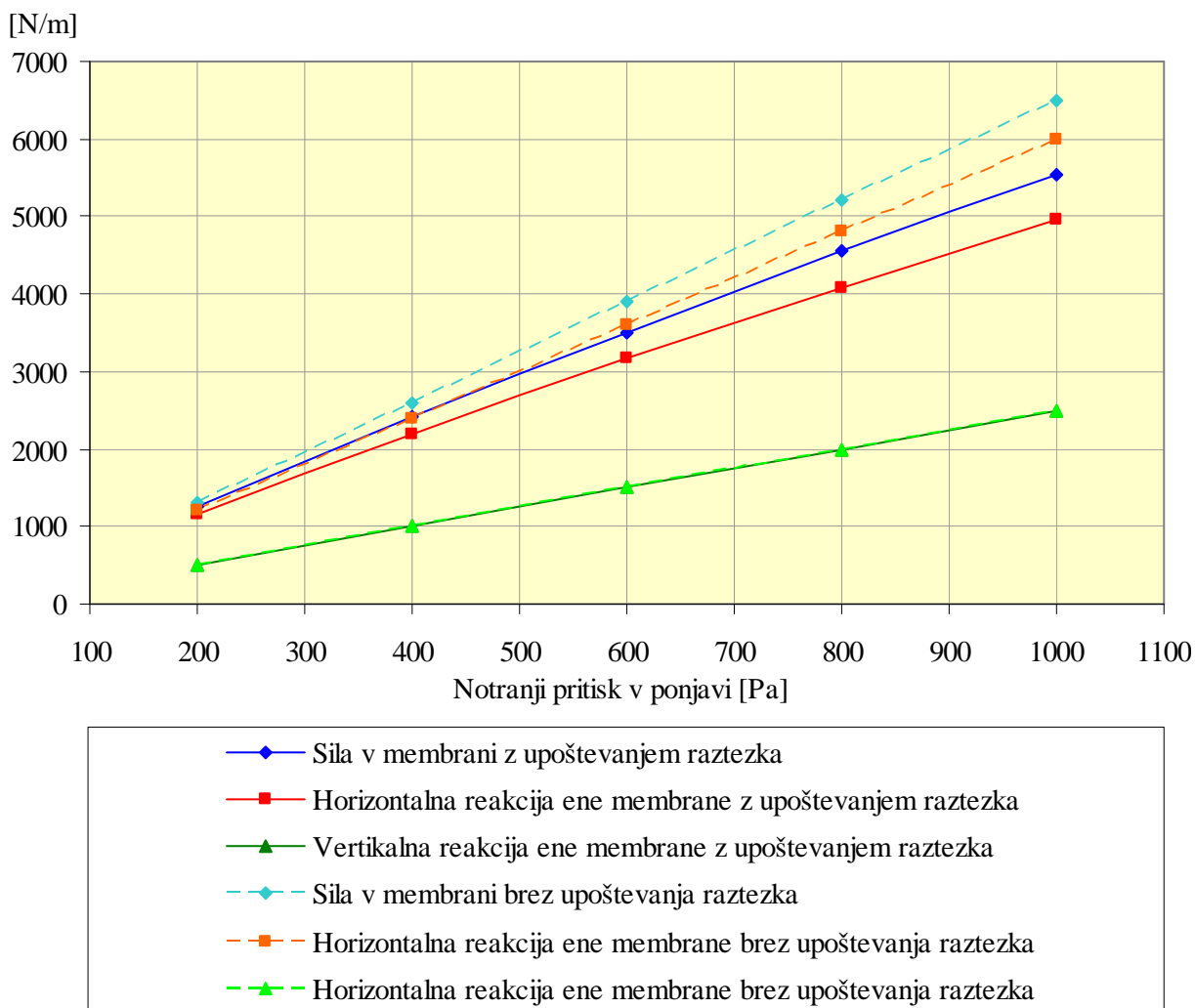
Iz Grafikona 13 je razvidno, da sta ob upoštevanju raztezka sila v membrani P in horizontalna komponenta reakcije H manjši, na vertikalno komponento reakcije V pa raztezek nima vpliva. Če se raztezka membrane v izračunu ne upošteva, se vse opazovane sile z naraščanjem zračnega pritiska v ponjavi linearno povečujejo, ob upoštevanju raztezka, pa rast sile v

membrani P in horizontalne komponente reakcije H ni več popolnoma linearna, saj se povečujeta čedalje počasneje. To je razvidno tudi iz odstotka zmanjšanja omenjenih sil zaradi upoštevanja raztezka v Preglednici 16. Večji kot je zračni pritisk v ponjavi, večji je tudi vpliv raztezka na vrednost sile v membrani in horizontalne komponente reakcije, kar je smiselno, saj raztezek narašča linearno s silo v membrani. Z upoštevanjem deformabilnosti membrane se pri 200 Pa zračnega pritiska sila v membrani zmanjša za 3,8%, pri 1000 Pa pa kar za 14,7%, medtem ko je zmanjšanje horizontalne komponente reakcije še večje.

Sila v tipični deformabilni ponjavi pri poletnem zračnem pritisku 400 Pa znaša 2413 N/m, pri zimskem zračnem pritisku 1000 Pa pa 5547 N/m. Pri računu vpliva napihnjene simetrične ponjave na jekleno konstrukcijo nas bolj kot sama sila v posamezni membrani zanima vsota horizontalnih komponent reakcij obeh membran, saj se zaradi enakih, vendar nasprotnih ukrivljenosti membran vertikalni komponenti reakcij izničita ne glede na razmerje obeh začetnih višin, horizontalni komponenti pa se seštejeta. Vsota horizontalnih komponent reakcij obeh membran pri poletnem zračnem pritisku 400 Pa znaša približno 4400 N/m, pri zimskem zračnem pritisku 1000 Pa pa približno 9900 N/m. Deformabilnost ponjave torej ugodno vpliva tako na velikost sile v membrani, na podlagi katere se izbere vrsta uporabljene membrane, kot tudi na velikost horizontalne komponente reakcije, ki je pomembna pri dimenzioniranju jeklenega okvirja.

Preglednica 16: Velikost sile v membrani in velikost komponent reakcije ene membrane, po izračunu z Young-Laplaceovo enačbo brez in z upoštevanjem raztezka, v odvisnosti od notranjega pritiska v ponjavi z $L = 5,0$ m in začetno višino $h_1 = h_2 = 0,5$ m.

$\Delta p_1 = \Delta p_2$ [Pa = N/m ²]	$P_1 = P_2$ [N/m]			$H_1 = H_2$ [N/m]			$V_1 = V_2$ [N/m]	
	brez Δl	z Δl	znižanje	brez Δl	z Δl	znižanje	brez Δl	z Δl
200	1300	1251	3,79 %	1200	1146	4,47 %	500	500
400	2600	2413	7,20 %	2400	2196	8,50 %	1000	1000
600	3900	3508	10,06 %	3600	3171	11,92 %	1500	1500
800	5200	4549	12,51 %	4800	4086	14,87 %	2000	2000
1000	6500	5547	14,66 %	6000	4952	17,47 %	2500	2500



Grafikon 13: Velikost sile v membrani in velikost komponent reakcije ene membrane, po izračunu z Young-Laplaceovo enačbo brez in z upoštevanjem raztezka, v odvisnosti od notranjega pritiska v ponjavi z $L = 5,0$ m in začetno višino $h_1 = h_2 = 0,5$ m.

9.4.3 Membranske sile in reakcije v odvisnosti od višine membrane na sredini razpona

V Preglednici 17 in na Grafikonu 14 je prikazano spreminjanje sile v posamezni membrani simetrične ponjave zaradi notranjega zračnega pritiska 1000 Pa in spreminjanje komponent reakcije v podpori v odvisnosti od višine obeh membran ponjave ($h_1 = h_2$) na sredini razpona $L = 5,0$ m. Vse tri sile so izračunane s pomočjo Young-Laplaceove enačbe, in sicer enkrat brez upoštevanja raztezka membrane (črtkane črte na grafikonu), drugič pa z upoštevanjem le tega (polne črte na grafikonu).

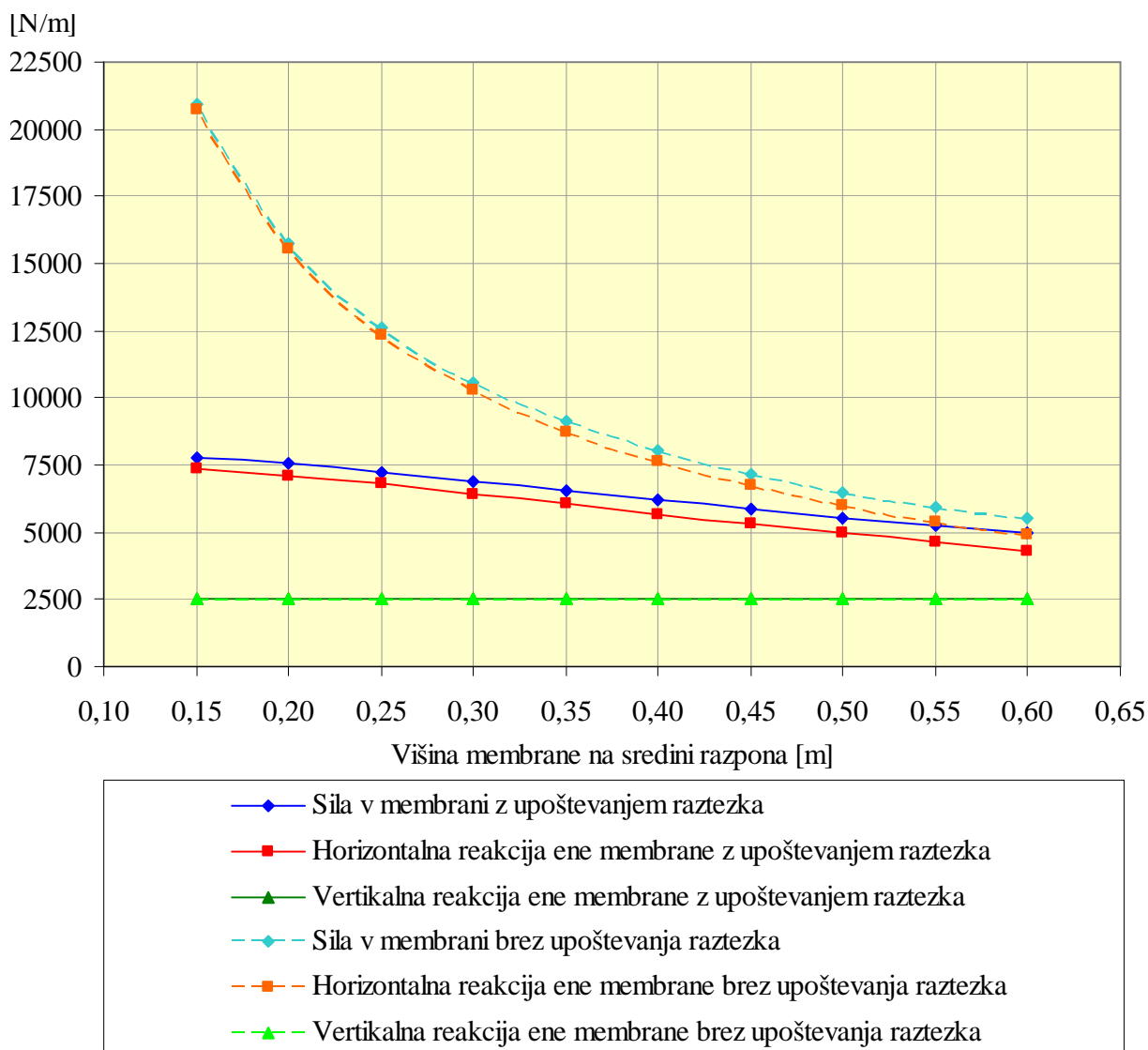
Po Young-Laplaceovi enačbi je sila v membrani P enaka zmnožku razlike pritiska na membrano v normalni smeri Δp in radija loka membrane R . Manjša kot je višina membrane h na sredini razpona, večji je radij loka R in posledično je pri konstantni razliki pritiska Δp večja tudi sila v membrani P . Ko gre višina membrane h proti nič, gre radij njenega loka R proti neskončno, kar pri konstantnem zračnem pritisku pomeni, da gre proti neskončno tudi sila v membrani P . Če se raztezka membrane ne upošteva, se sila v membrani P in horizontalna komponenta reakcije v podpori H z zmanjševanjem višine membrane h čedalje hitreje povečujeta, kar je hitro razvidno iz Grafikona 14.

Preglednica 17: Velikost sile v membrani in velikost komponent reakcije ene membrane, po izračunu z Young-Laplaceovo enačbo brez in z upoštevanjem raztezka, v odvisnosti od višine membrane $h_1 = h_2$ na sredini razpona $L = 5,0$ m pri obremenitvi z zračnim pritiskom 1000 Pa.

$\Delta p_1 = \Delta p_2 = 1000$ Pa										
$h_1 = h_2$ [m]	$P_1 = P_2$ [N/m]			$H_1 = H_2$ [N/m]			$V_1 = V_2$ [N/m]		H / P	$h(\Delta l)$ [m]
	brez Δl	z Δl	znižanje	brez Δl	z Δl	znižanje	brez Δl	z Δl	z Δl	
0,15	20908	7804	62,67 %	20758	7393	64,38 %	2500	2500	94,73 %	0,411
0,20	15725	7541	52,05 %	15525	7114	54,18 %	2500	2500	94,34 %	0,426
0,25	12625	7232	42,72 %	12375	6786	45,17 %	2500	2500	93,83 %	0,446
0,30	10567	6895	34,75 %	10267	6425	37,41 %	2500	2500	93,19 %	0,469
0,35	9104	6546	28,1 %	8754	6050	30,89 %	2500	2500	92,42 %	0,496
0,40	8013	6199	22,64 %	7613	5672	25,49 %	2500	2500	91,51 %	0,526
0,45	7169	5863	18,22 %	6719	5304	21,07 %	2500	2500	90,45 %	0,560
0,50	6500	5547	14,66 %	6000	4952	17,47 %	2500	2500	89,27 %	0,595
0,55	5957	5253	11,81 %	5407	4620	14,55 %	2500	2500	87,95 %	0,633
0,60	5508	4984	9,52 %	4908	4311	12,16 %	2500	2500	86,51 %	0,672

Manjša kot je začetna višina membrane, večji je vpliv raztezka na silo v membrani P in horizontalno komponento reakcije H . Že pri višini membrane $h = 0,60$ m se z upoštevanjem raztezka višina poveča za približno 7 cm, sila v membrani pa posledično pade skoraj za 10%. Membrana z začetno višino $h = 0,15$ m se zaradi enakega zračnega pritiska mnogo bolj raztegne, in sicer se njena višina poveča kar za 36 cm, zaradi česar se sila v njej zniža za skoraj 63%, še bolj pa se zmanjša horizontalna komponenta reakcije. Upoštevanja raztezka na

vertikalno reakcijo nima vpliva, prav tako tudi oblika membrane ne. Za izračun vertikalne komponente reakcije ene membrane je tako potreben izključno podatek o velikosti zračnega pritiska, razlika vertikalnih komponent reakcij obeh membran pa je vedno enaka nič, torej zračni pritisk v ponjavi povzroča v podporah le horizontalne reakcije, vertikalnih pa ne.



Grafikon 14: Velikost sile v membrani in velikost komponent reakcije ene membrane, po izračunu z Young-Laplaceovo enačbo brez in z upoštevanjem raztezka, v odvisnosti od višine membrane $h_1 = h_2$ na sredini razpona $L = 5,0$ m pri obremenitvi z zračnim pritiskom 1000 Pa.

Iz Grafikona 14 je razvidno, da se z zmanjševanjem višine membrane brez upoštevanja raztezka sila v membrani in horizontalna reakcija v podpori eksponentno povečujeta, z

upoštevanjem le tega pa naraščata približno linearno. Sila v membrani se z znižanjem višine membrane za 5 cm poveča v povprečju za 313 N/m, horizontalna komponenta reakcije pa približno za 342 N/m. Manjša kot je višina membrane, manjše je zaradi naklona membrane v podpori tudi razmerje med horizontalno komponento reakcije in silo v membrani.

9.4.4 Membranske sile in reakcije v odvisnosti od tipa izračuna sile v membrani

V Preglednici 18 in na Grafikonu 15 je narejena primerjava med izračunom sil v membrani in komponent reakcij v podpori po Young-Laplaceovi enačbi in po principu vrvi. Izračun se nanaša na membrano z razponom $L = 5,0$ m in začetno višino na sredini razpona $h = 0,5$ m, obremenjeno z notranjim zračnim pritiskom v ponjavi 1000 Pa, in sicer enkrat brez upoštevanja, drugič pa z upoštevanjem deformabilnosti membrane.

Iz Preglednice 18 je razvidno, da tako kot deformabilnost in oblika membrane, tudi sprememba tipa izračuna sile v membrani ne vpliva na vrednost vertikalne komponente reakcije. Ta je odvisna izključno od razlike pritiskov na membrano Δp in od razpona ponjave L . Primerjava ostalih vrednosti je pokazala, da so sile v membrani P in horizontalne komponente reakcij H , izračunane po principu vrvi, nekoliko večje, vendar se, kot je razvidno tudi iz Grafikona 7, zelo dobro ujemajo z vrednostmi po Young-Laplaceovi enačbi. Do razlike med izračunoma pride zato, ker je pri Young-Laplaceovi enačbi predpostavljeno, da enakomerno porazdeljena obremenitev deluje na membrano v smeri njene normale, t.j. pravokotno na membrano, medtem ko je pri principu vrvi predpostavljeno, da enakomerno porazdeljena obremenitev deluje v vertikalni smeri oz. pravokotno na horizontalno linijo, ki povezuje obe nepomični podpori.

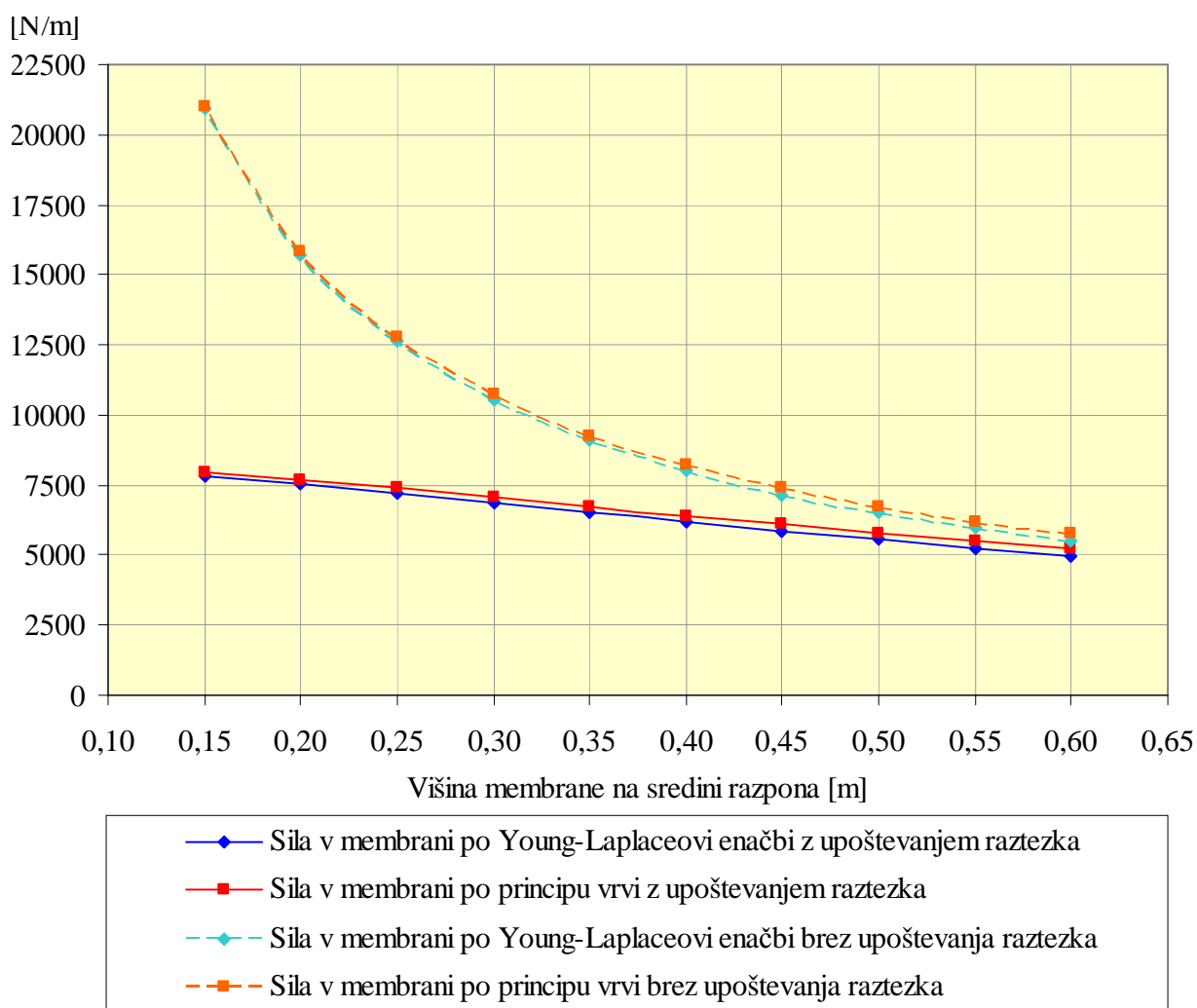
Po Young-Laplaceovi enačbi se torej smer enakomerne obremenitve od ene proti drugi podpri zaradi ukrivljenosti membrane neprestano spreminja, po principu vrvi pa je ves čas enaka, vendar so zaradi velikih radijev lokov membran razlike v vrednostih opazovanih sil dovolj majhne. Točnejše rezultate za silo v membrani in horizontalno komponento reakcije v podpori pri obremenitvi z zračnim pritiskom dobimo po Young-Laplaceovi enačbi, saj notranji zračni pritisk v ponjavi deluje pravokotno na površino obeh membran. Pri obremenitvi zaradi snega

in ostalih gravitacijsko pogojenih obremenitvah, ki zaradi gravitacije delujejo v vertikalni smeri, pa točnejše rezultate daje izračun po principu vrvi.

Preglednica 18: Primerjava velikosti sil v membrani in komponent reakcij, izračunanih po Young-Laplaceovi enačbi in po principu vrvi brez in z upoštevanjem raztezka, v odvisnosti od višine membrane na sredini razpona $L = 5,0$ m pri obremenitvi z zračnim pritiskom 1000 Pa.

$\Delta p_1 = \Delta p_2 = 1000$ Pa			Brez upoštevanja deformabilnosti membrane.					
$h_1 = h_2$	$P_1 = P_2$ [N/m] brez Δl			$H_1 = H_2$ [N/m] brez Δl			$V_1 = V_2$ [N/m]	
[m]	Y-L	vrvi	razlika	Y-L	vrvi	razlika	Y-L	vrvi
0,15	20908	20983	0,36 %	20758	20833	0,36 %	2500	2500
0,20	15725	15824	0,63 %	15525	15625	0,64 %	2500	2500
0,25	12625	12748	0,97 %	12375	12500	1,01 %	2500	2500
0,30	10567	10712	1,38 %	10267	10417	1,46 %	2500	2500
0,35	9104	9272	1,85 %	8754	8929	1,99 %	2500	2500
0,40	8013	8203	2,37 %	7613	7813	2,63 %	2500	2500
0,45	7169	7381	2,95 %	6719	6944	3,35 %	2500	2500
0,50	6500	6731	3,56 %	6000	6250	4,17 %	2500	2500
0,55	5957	6208	4,21 %	5407	5682	5,09 %	2500	2500
0,60	5508	5777	4,88 %	4908	5208	6,11 %	2500	2500
$\Delta p_1 = \Delta p_2 = 1000$ Pa			Z upoštevanjem deformabilnosti membrane.					
$h_1 = h_2$	$P_1 = P_2$ [N/m] z Δl			$H_1 = H_2$ [N/m] z Δl			$V_1 = V_2$ [N/m]	
[m]	Y-L	vrvi	razlika	Y-L	vrvi	razlika	Y-L	vrvi
0,15	7804	7944	1,79 %	7393	7541	1,99 %	2500	2500
0,20	7541	7689	1,97 %	7114	7272	2,21 %	2500	2500
0,25	7232	7392	2,21 %	6786	6956	2,51 %	2500	2500
0,30	6895	7068	2,51 %	6425	6611	2,89 %	2500	2500
0,35	6546	6734	2,87 %	6050	6253	3,36 %	2500	2500
0,40	6199	6403	3,29 %	5672	5894	3,92 %	2500	2500
0,45	5863	6084	3,76 %	5304	5547	4,58 %	2500	2500
0,50	5547	5784	4,28 %	4952	5216	5,34 %	2500	2500
0,55	5253	5507	4,83 %	4620	4907	6,21 %	2500	2500
0,60	4984	5254	5,42 %	4311	4621	7,18 %	2500	2500

Večji kot je radij loka membrane R oz. manjša kot je višina membrane h na sredini razpona, manjše so razlike med obema tipoma izračuna. Ob upoštevanju deformabilnosti membrane so seveda te razlike pri posameznih višinah membrane večje, saj se z upoštevanjem raztezka membrane poveča tudi višina membrane. Pri začetni višini deformabilne membrane $h = 0,15$ m je sila v membrani pri izračunu po principu vrvi za 1,8% večja kot pri izračunu po Young-Laplaceovi enačbi, horizontalna komponenta reakcije pa za 2,0%. Ta razlika se z večanjem začetne višine membrane čedalje hitreje povečuje in pri začetni višini membrane $h = 0,60$ m za silo v membrani znaša 5,4%, za horizontalno komponento reakcije pa 7,2%.



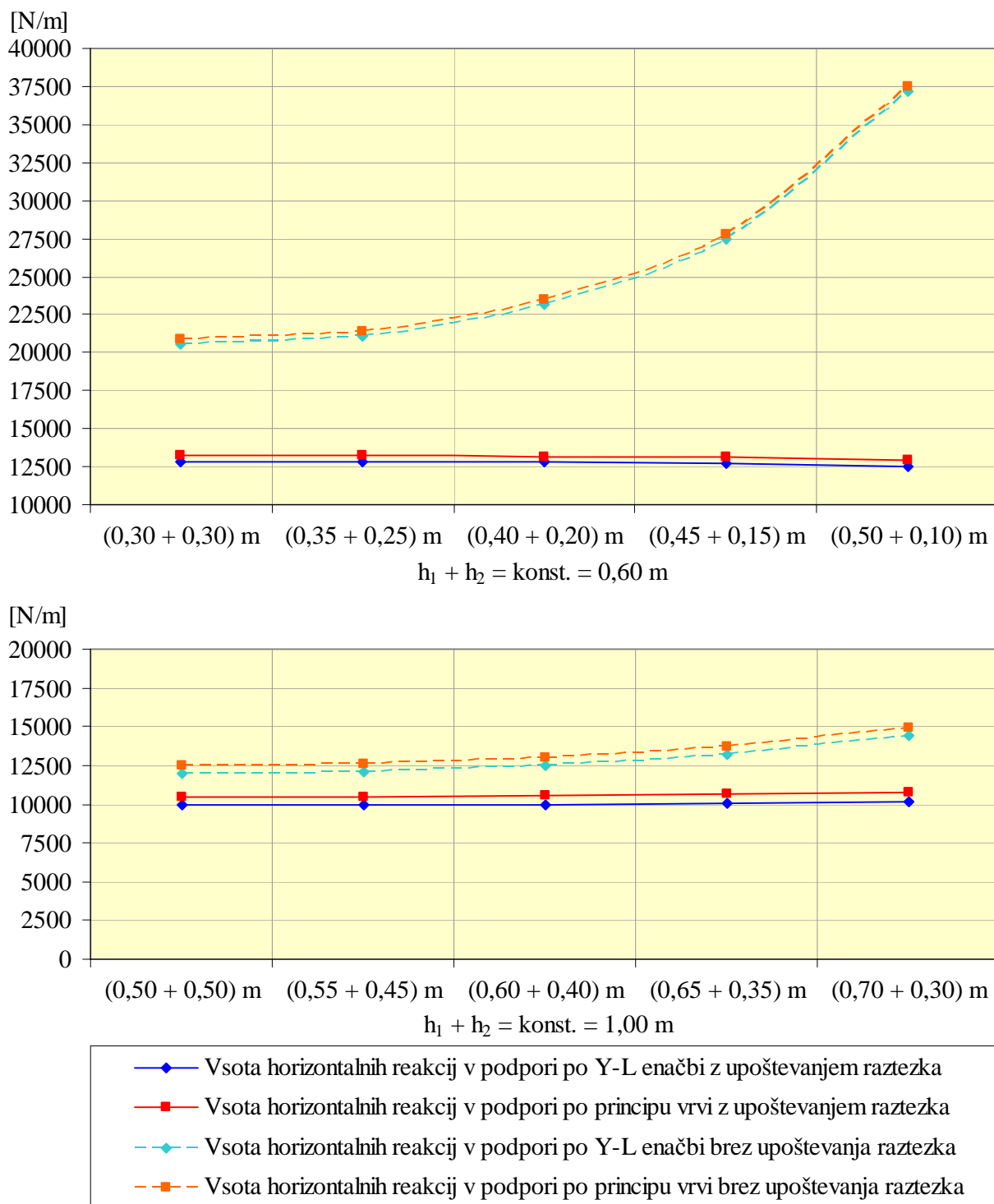
Grafikon 15: Primerjava velikosti sile v membrani, izračunane po Young-Laplaceovi enačbi in po principu vrvi, v odvisnosti od višine membrane $h_1 = h_2$ na sredini razpona $L = 5,0$ m pri obremenitvi z zračnim pritiskom 1000 Pa.

9.4.5 Vsota horizontalnih reakcij pri različnih višinah zgornje in spodnje membrane

Dvoslojna pnevmatska ponjava, ki jo sestavljata zgornja in spodnja membrana, je lahko tudi nesimetrična, kar pomeni, da se lahko višina zgornje membrane h_1 na sredini razpona razlikuje od višine spodnje ponjave h_2 . V Preglednici 19 in na Grafikonu 16 so prikazane vsote horizontalnih reakcij v podpori zaradi zgornje in spodnje membrane ponjave, obremenjene z zračnim pritiskom 1000 Pa, katerih vsota začetnih višin na sredini razpona $L = 5,0$ m v prvem primeru znaša 0,6 m, v drugem primeru pa 1,0 m. Pri enaki vsoti začetnih višin obeh membran je enaka tudi začetna prostornina zraka v ponjavi. Ker je zračni pritisk na zgornjo in spodnjo membrano enak, lastna teža pa je zanemarljivo majhna, je pri enaki vsoti višin obeh membran za izračun vsote horizontalnih reakcij vseeno, katera membrana je nižja.

Preglednica 19: Vsota horizontalnih reakcij v podpori zaradi obeh membran, obremenjenih z notranjim zračnim pritiskom 1000 Pa, pri različnih višinah zgornje in spodnje membrane na sredini razpona $L = 5,0$ m ob enaki začetni prostornini $V = 2,01$ m³/m oz. vsoti višin 0,6 m (zgoraj) ter ob enaki začetni prostornini $V = 3,36$ m³/m oz. vsoti višin 1,0 m (spodaj).

$h_1 + h_2 = 0,60$ m		$H_1 + H_2$ [N/m] brez Δl			$H_1 + H_2$ [N/m] z Δl			$h_1 + h_2$
h_1 [m]	h_2 [m]	Y-L	vrvi	razlika	Y-L	vrvi	razlika	z Δl
0,30	0,30	20533	20833	1,46 %	12851	13222	2,89 %	0,938
0,35	0,25	21129	21429	1,42 %	12835	13209	2,91 %	0,942
0,40	0,20	23138	23438	1,29 %	12786	13166	2,97 %	0,953
0,45	0,15	27478	27778	1,09 %	12697	13087	3,07 %	0,971
0,50	0,10	37200	37500	0,81 %	12558	12962	3,21 %	0,996
$h_1 + h_2 = 1,00$ m		$H_1 + H_2$ [N/m] brez Δl			$H_1 + H_2$ [N/m] z Δl			$h_1 + h_2$
h_1 [m]	h_2 [m]	Y-L	vrvi	razlika	Y-L	vrvi	razlika	z Δl
0,50	0,50	12000	12500	4,17 %	9903	10432	5,34 %	1,191
0,55	0,45	12126	12626	4,12 %	9924	10453	5,33 %	1,193
0,60	0,40	12521	13021	3,99 %	9984	10515	5,33 %	1,199
0,65	0,35	13236	13736	3,78 %	10075	10611	5,32 %	1,209
0,70	0,30	14381	14881	3,48 %	10188	10729	5,31 %	1,224



Grafikon 16: Vsota horizontalnih reakcij v podpori zaradi obeh membran, obremenjenih z notranjim zračnim pritiskom 1000 Pa, pri različnih višinah zgornje in spodnje membrane na sredini razpona $L = 5,0 \text{ m}$ ob enaki začetni prostornini $V = 2,01 \text{ m}^3/\text{m}$ oz. vsoti višin $0,6 \text{ m}$ (zgoraj) ter ob enaki začetni prostornini $V = 3,36 \text{ m}^3/\text{m}$ oz. vsoti višin $1,0 \text{ m}$ (spodaj).

Iz Grafikona 16 je razvidno, da se ob naraščanju razlike med začetno višino zgornje in spodnje membrane pri izračunu brez upoštevanja deformabilnosti membran vsota horizontalnih komponent reakcij v podpori eksponentno povečuje, medtem ko je pri izračunu z upoštevanjem raztezkov vsota približno konstantna. Torej večja kot je razlika v višinah obeh membran, večji je vpliv raztezka na izračun. Pri vsoti višin $h_1 + h_2 = 0,6$ m, je že pri simetrični ponjavi vsota horizontalnih reakcij ob neupoštevanju raztezka za 60% večja od dejanske vrednosti, pri višinah membran (0,1 + 0,5) m pa je večja skoraj za 200%. Z večanjem skupne višine obeh membran se vpliv raztezka zmanjšuje. Pri vsoti višin $h_1 + h_2 = 1,0$ m, je pri simetrični ponjavi vsota horizontalnih reakcij ob neupoštevanju raztezka za približno 20% večja od dejanske vrednosti, pri višinah membran (0,7 + 0,3) m pa za nekaj več kot 40%.

Vsota horizontalnih reakcij zaradi vpliva membran je zelo pomembna za dimenzioniranje okvirjev jeklene nosilne konstrukcije objektov s streho iz dvoslojnih pnevmatskih ponjav, zato je potrebno upoštevati vpliv deformacij membrane, saj se v nasprotnem primeru okvirji konstrukcije predimenzionirajo in tako po nepotrebnem podražijo investicijo. Pomembna ugotovitev je ta, da je pri ponjavah z enako vsoto začetnih višin membran, obremenjenih z enakim zračnim pritiskom, približno enaka tudi vsota obeh horizontalnih reakcij, ki ju povzročata membrani v podporah, t.j. v okvirjih jeklene konstrukcije. Z zmanjševanjem začetne skupne višine membran, se vsota horizontalnih komponent reakcij povečuje.

Pri začetni debelini ponjave na sredini razpona 1,0 m znaša vsota horizontalnih reakcij obeh membran povprečno 10,0 kN/m po Young-Laplaceovi enačbi in 10,5 kN/m po principu vrvi, pri začetni debelini ponjave 0,6 m pa znaša v povprečju 12,7 kN/m po Young-Laplaceovi enačbi in 13,1 kN/m po principu vrvi. Večja kot je vsota začetnih višin membran, večja je tudi razlika v vrednostih med izračunom po Young-Laplaceovi enačbi in po principu vrvi, vendar ta razlika ni velika. Pri začetni debelini ponjave 1,0 m, ki je običajna za ponjave z razponom $L = 5,0$ m, je npr. vsota horizontalnih komponent reakcij po principu vrvi z upoštevanjem raztezka za približno 5,3% večja od vsote, izračunane po Young-Laplaceovi enačbi.

Zadnji stolpec v Preglednici 19 prikazuje končno skupno višino raztegnjenih membran. S primerjavo teh vrednosti lahko ugotovimo, da manjša kot je razlika med začetnima višinama

zgornje in spodnje membrane, manjša je tudi njuna končna skupna višina zaradi raztezka. Poleg tega so tudi razlike med končnimi debelinami simetričnih in nesimetričnih ponjav pri manjših začetnih debelinah ponjav večje kot ponjavah z večjo začetno debelino. V povprečju se ponjava z začetno debelino 0,6 m raztegne na končno debelino 0,96 m, ponjava z začetno debelino 1,0 m pa na končno debelino 1,20 m.

9.5 Sile v membranah in reakcije v podporah zaradi obremenitve s snegom

Zračni pritisk v dvoslojnih pnevmatskih ponjavah je pozimi običajno večji kot v ostalih letnih časih, saj mora takrat napihnjena ponjava poleg toplotne izolacije objekta zagotavljati tudi prenos obremenitve s snegom v podpore, t.j. na okvirje jeklene nosilne konstrukcije objekta. Če bi bil pozimi zračni pritisk v ponjavi premajhen, bi zaradi teže snega zgornja membrana izgubila stabilnost in bi padla na spodnjo membrano oz. pod horizontalno linijo, ki povezuje obe podpori. Če bi se to zgodilo hipno, bi se lahko membrana ali pa pritrditve membrane na podpore zaradi sunka sile poškodovale. Če sunek sile v takšnem nezgodnem primeru ne bi bil prevelik, bi membrani kljub ukrivljenostma enakega predznaka lahko še vedno prenašali obremenitve zaradi snega, le sile v membranah bi se zaradi tega nekoliko povečale in prerazporedile med membranama, večje pa bi bile tudi komponente reakcij v podporah. Na takšen način bi se tudi precej zmanjšala toplotna izolativnost ponjave, saj bi bila prostornina stisnjenega zraka manjša oz. bi bila plast stisnjenega zraka tanjša.

Za lažjo predstavbo velikosti obremenitev pnevmatske ponjave zaradi snega v nadaljevanju so na naslednjih straneh izračunane obtežbe s snegom na strehi z naklonom do 30° za nekaj večjih krajev v Sloveniji. Obtežba zaradi snega na strehi se po Evrokod standardu SIST EN 1991-1-3:2004 za trajna in začasna projektna stanja določi z enačbo (34).

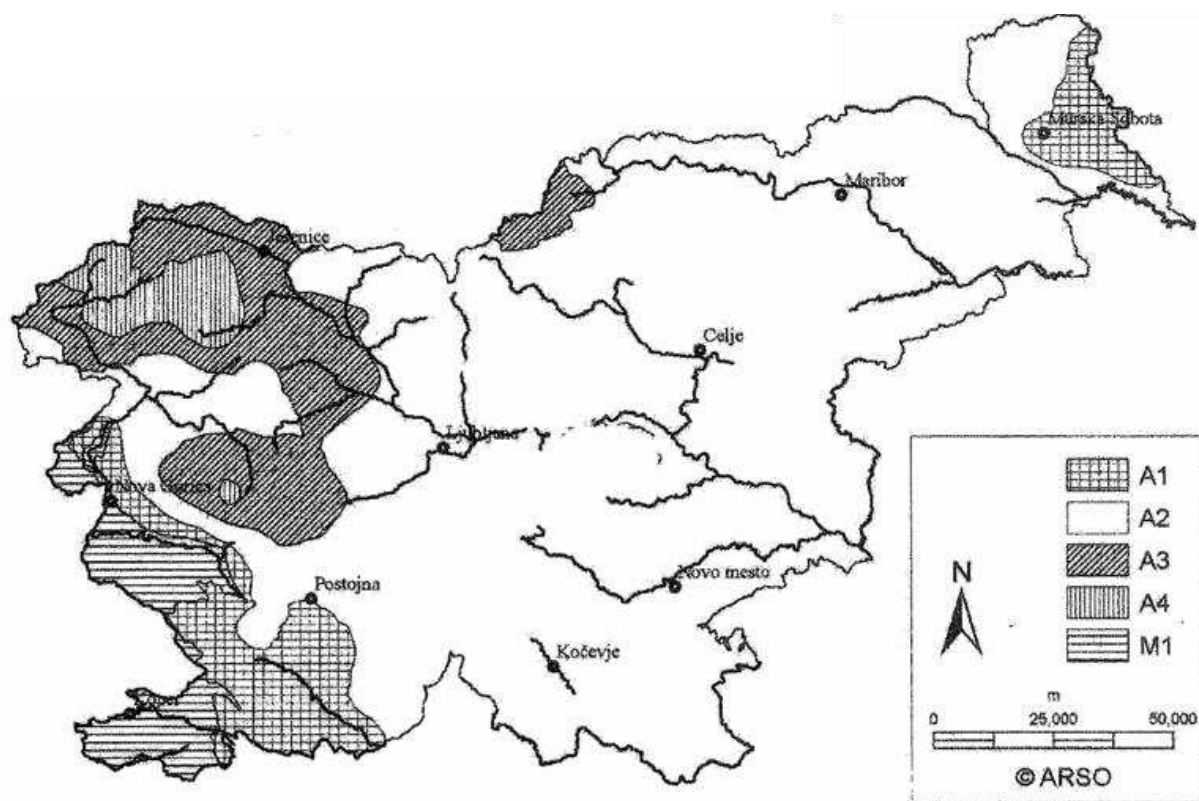
$$s = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k \quad (34)$$

Kjer je:

- μ_i oblikovni koeficient obtežbe snega,
- C_e koeficient izpostavljenosti,
- C_t toplotni koeficient,
- s_k karakteristična obtežba snega na tleh.

Za določitev obremenitve zaradi snega na obravnavani strehi jeklenega objekta iz dvoslojnih pnevmatskih ponjav predpostavimo:

- da objekt stoji na terenu z običajno izpostavljenostjo vetru ($C_e = 1,0$),
- da ne pride do zmanjšanja obtežbe snega zaradi topljenja snega ($C_t = 1,0$) in
- da je naklon dvokapne strehe $\alpha \leq 30^\circ$ ($\mu_1 = 0,8$).



Slika 60: Cone za določanje obtežbe s snegom na tleh po nacionalnem dodatku Evrokod standarda SIST EN 1991-1-3:2004/A101.

Karakteristična obtežba snega na tleh se za območje Slovenije glede na nadmorsko višino kraja A in cono, v kateri ta leži (Slika 60). Obtežbe s snegom na strehi v različnih krajih Slovenije:

- Jesenice (Cona A3, nadmorska višina A = 576 m):

$$s = \mu_1 \cdot s_k = \mu_1 \cdot 1,935 \cdot \left[1 + (A/728)^2\right] = 0,8 \cdot 1,935 \cdot \left[1 + (576/728)^2\right] = 2,52 \text{ kN/m}^2$$

- Ljubljana (Cona A2, nadmorska višina A = 298 m):

$$s = \mu_1 \cdot s_k = \mu_1 \cdot 1,293 \cdot \left[1 + (A/728)^2\right] = 0,8 \cdot 1,293 \cdot \left[1 + (298/728)^2\right] = 1,21 \text{ kN/m}^2$$

- Novo mesto (Cona A2, nadmorska višina A = 190 m):

$$s = \mu_1 \cdot s_k = \mu_1 \cdot 1,293 \cdot \left[1 + (A/728)^2\right] = 0,8 \cdot 1,293 \cdot \left[1 + (190/728)^2\right] = 1,10 \text{ kN/m}^2$$

- Murska Sobota (Cona A1, nadmorska višina A = 189 m):

V tej coni je potrebno dodatno upoštevati, da je obtežba s snegom na tleh s_k najmanj $1,20 \text{ kN/m}^2$.

$$s_k = 0,651 \cdot \left[1 + (A/728)^2\right] = 0,651 \cdot \left[1 + (189/728)^2\right] = 0,69 \text{ kN/m}^2 \rightarrow s_k = 1,20 \text{ kN/m}^2$$

$$s = \mu_1 \cdot s_k = 0,8 \cdot 1,20 = 0,96 \text{ kN/m}^2$$

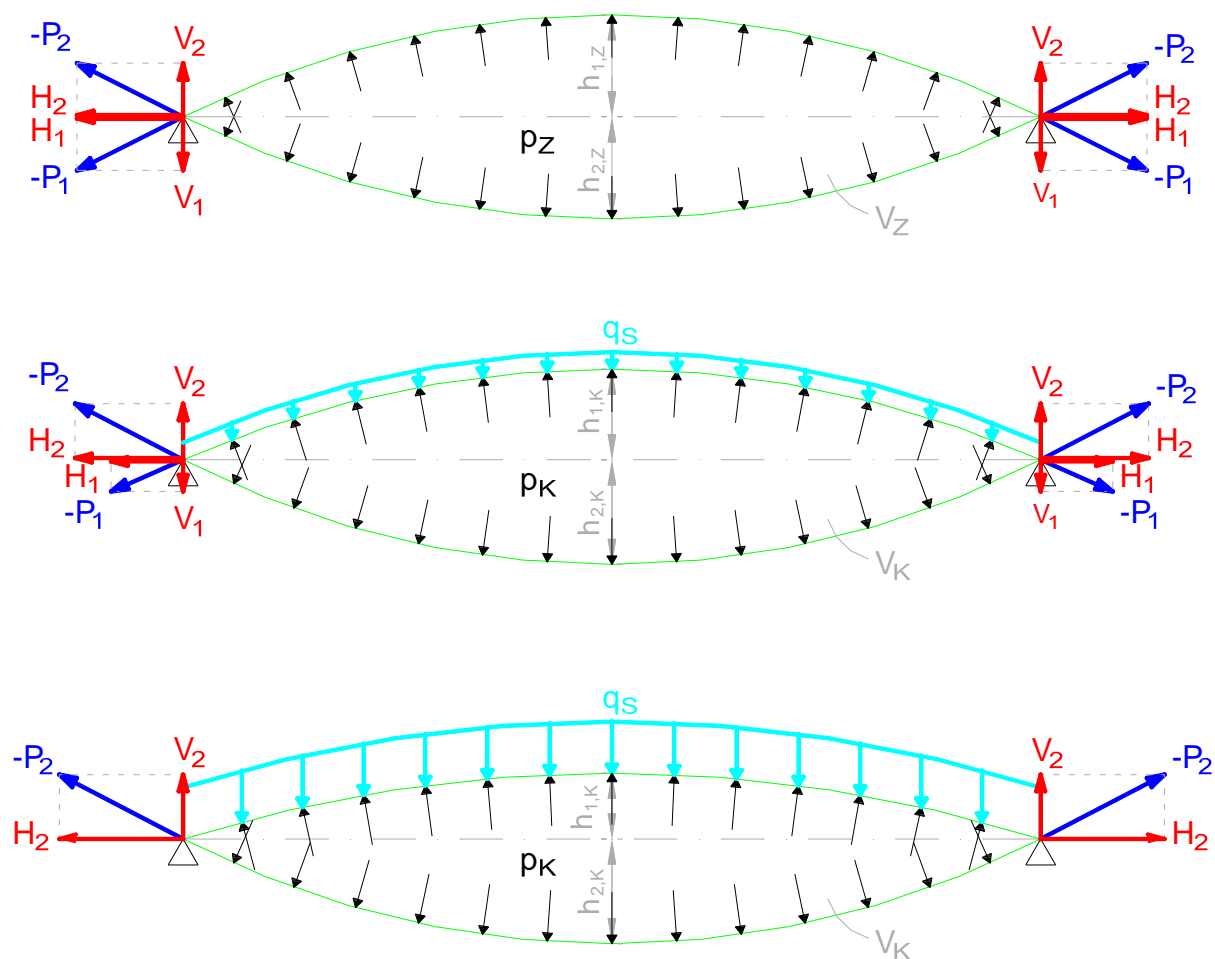
- Koper (Cona M1, nadmorska višina A = 10 m):

$$s = \mu_1 \cdot s_k = \mu_1 \cdot 0,289 \cdot \left[1 + (A/452)^2\right] = 0,8 \cdot 0,289 \cdot \left[1 + (10/452)^2\right] = 0,23 \text{ kN/m}^2$$

(Beg, D. (Ur.), Pogačnik A. (Ur.). 2009. Priročnik za projektiranje gradbenih konstrukcij po evrokod standardih. Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije: 1-60 str.)

9.5.1 Obnašanje dvoslojne pnevmatske ponjave pod obremenitvijo s snegom

Sile v obeh membranah in komponente reakcij v podporah zaradi vpliva membran prikazuje Slika 61. V ponjavi obremenjeni le z notranjim zračnim pritiskom p_Z (Slika 61, zgoraj) s v zgornji membrani pojavi sila P_1 v spodnji pa sila P_2 , ki ju v podporah uravnotežita komponenti reakcij H_1 in V_1 oz. H_2 in V_2 . Pri začetnem zračnem pritisku v ponjavi p_Z ima na sredini razpona L zgornja membrana začetno višino $h_{1,Z}$, spodnja membrana pa $h_{2,Z}$. Glede na začetni višini obeh membran se lahko določi tudi začetna prostornina stisnjenega zraka na tekoči meter preseka ponjave V_Z .



Slika 61: Sile v membranah dvoslojne pnevmatske ponjave in komponente reakcij v podporah pri obremenitvi z zračnim pritiskom (zgoraj) in z dodatno obremenitvijo s snegom v primeru, ko je ta manjša od začetnega zračnega pritiska (na sredini) in obratno (spodaj).

Če na takšno ponjavo zapade sneg, se zaradi zmanjšane razlike pritiskov na zgornjo membrano ($\Delta p_{1,K} = p_z - q_s$) višina te membrane zmanjša ($h_{1,K} < h_{1,z}$), posledično pa se zmanjša tudi prostornina stisnjenega zraka na tekoči meter preseka ponjave ($V_K < V_z$). V ponjavi zaradi tega pride do izotermne spremembe, t.j. spremembe stanja termodinamskega sistema, pri kateri se temperatura zraka ne spreminja, spreminjata pa se njegova prostornina in tlak. Spremembe slednjih količin pri idealnem plinu opisuje Boylov zakon. Idealni plin je približek realnih plinov, pri katerem se zanemarijo privlačne sile med molekulami plina in delež, ki ga v prostoru, napolnjenem s plinom, zasedajo same molekule. Boylov zakon pravi, da sta pri konstantni temperaturi absolutni tlak in prostornina fiksne količine idealnega plina obratno sorazmerna oz. da je njun zmnožek konstantna vrednost (35). Relacijo med začetnim

p_Z in končnim zračnim pritiskom p_K v pnevmatski ponjavi ter začetno V_Z in končno prostornino V_K stisnjenega zraka na tekoči meter preseka ponjave se tako lahko opiše z enačbo (36). Ta enačba velja ob pogoju, da je temperatura zraka v ponjavi konstantna.

$$T = konst. \quad \rightarrow \quad p \cdot V = konst. \quad (35)$$

$$T_Z = T_K \quad \rightarrow \quad p_Z \cdot V_Z = p_K \cdot V_K \quad (36)$$

V primeru, ko je enakomerno porazdeljena obremenitev zaradi snega q_S manjša od začetnega zračnega pritiska v ponjavi p_Z (Slika 61, na sredini), se višina zgornje ponjave in s tem tudi prostornina stisnjenega zraka v ponjavi zmanjšata, posledično pa se poveča zračni pritisk v ponjavi. Ob tem pojavu se razlika pritiskov, ki delujejo na spodnjo membrano ($\Delta p_{2,K} = p_Z + \Delta p(q_S)$) poveča, zaradi česar se poveča tudi sila v spodnji membrani P_2 , razlika pritiskov na zgornjo membrano ($\Delta p_{1,K} = p_K - q_S$) pa se zmanjša, s tem pa se zmanjša tudi sila v zgornji membrani P_1 .

Kadar pa je obremenitev zaradi snega q_S večja od začetnega zračnega pritiska v ponjavi p_Z in manjša od obremenitve, pri kateri zgornja membrana zaradi izgube stabilnosti pade na spodnjo stran (Slika 61, spodaj), pa se mora končni zračni pritisk v ponjavi p_K povečati toliko, da uravnoteži zunanjo obremenitev zaradi snega. To pomeni, da se mora prostornina stisnjenega zraka v ponjavi zmanjšati toliko, da se absolutni zračni pritisk v ponjavi poveča na vrednost, ki je enaka obremenitvi zaradi snega ($p_K = q_S$). Ob tem se najbolj zmanjša višina zgornje membrane, saj je sila v tej membrani zaradi izenačitve obeh obremenitev enaka nič ($\Delta p_{1,K} = p_K - q_S = 0$), višina spodnje membrane pa se zaradi raztezka ob zvišanju pritiska v ponjavi poveča. Končni zračni pritisk v ponjavi p_K je enak razliki pritiskov na spodnjo membrano $\Delta p_{2,K}$, saj je to edina obremenitev, ki deluje nanjo. Obremenitev zaradi snega namreč neposredno deluje le na zgornjo membrano ponjave, posledično pa s povečanjem zračnega pritiska v ponjavi vpliva tudi na spodnjo membrano. Pri takšni obremenitvi je torej sila v zgornji membrani enaka nič, vse obremenitve pa na podpore prenaša le spodnja membrana. Funkcija zgornje membrane je v tem primeru ta, da s spremembo prostornine stisnjenega zraka v ponjavi kompenzira potrebno povečanje zračnega pritiska v ponjavi za uravnoteženje zunanje obremenitve.

9.5.2 Postopek izračuna končnega zračnega pritiska v ponjavi in končnih viših membran

Postopek izračuna končnega zračnega pritiska v ponjavi in pripadajočih viših membran se v primeru, ko je začetni zračni pritisk v ponjavi večji ali enak obremenitvi s snegom ($p_Z \geq q_S$), razlikuje od postopka izračuna, ko je začetni zračni pritisk manjši od obremenitve s snegom ($p_Z < q_S$), saj se razlikuje tudi obnašanje ponjave v enem in drugem primeru, opisano v predhodnem poglavju.

Notranji zračni pritisk v ponjavi se zaradi obremenitve s snegom, manjše od vrednosti začetnega zračnega pritiska, nekoliko poveča, zato se pri obremenitvah s snegom, ki so malo večje od začetnega zračnega pritiska, zgodi, da se zaradi njih zračni pritisk v ponjavi poveča toliko, da je na koncu večji od same obremenitve s snegom. V tem primeru se ponjava še vedno obnaša enako kot pri manjših obremenitvah s snegom, zato je pravilnejša razdelitev obeh primerov obnašanja oz. postopkov izračuna ponjave, obremenjene s snegom, sledeča:

- postopek izračuna za primer, ko velja $p_Z > q_S$ ali $p_K > q_S$ in
- postopek izračuna za primer, ko velja $p_Z \leq q_S$ in $p_K = q_S$.

V nadaljevanju je opisan postopek izračuna končnega zračnega pritiska p_K ter končnih viših membran $h_{1,K}$ in $h_{2,K}$ za oba primera obnašanja dvoslojne pnevmatske ponjave, obremenjene s snegom. Vhodni podatki pri obeh izračunih so začetni zračni pritisk v ponjavi p_Z in pripadajoči višini zgornje $h_{1,Z}$ in spodnje membrane $h_{2,Z}$, obremenjene z začetnim zračnim pritiskom p_Z , ki se jih izračuna po postopku, opisanem v poglavju 9.3.3 Postopek izračuna z upoštevanjem raztezka membrane. Vse količine s prvim indeksom 1 se nanašajo na zgornjo membrano, vse količine s prvim indeksom 2 pa na spodnjo membrano. Vse količine z drugim indeksom Z se nanašajo na začetno stanje ponjave pred zmanjšanjem prostornine stisnjene zraka v ponjavi oz. pred povečanjem zračnega pritiska v ponjavi zaradi dodatne obremenitve ponjave, vse količine z drugim indeksom K pa se nanašajo na končno stanje ponjave, torej po zmanjšanju prostornine oz. povečanju zračnega pritiska v ponjavi zaradi dodatne obremenitve ponjave.

9.5.2.1 Postopek izračuna za primer, ko velja $p_Z > q_S$ ali $p_K > q_S$

1.) Z enačbo (37) se izračuna začetna prostornina stisnjene zraza na tekoči meter preseka ponjave V_Z pri obremenitvi izključno z začetnim zračnim pritiskom p_Z .

$$V_Z = \frac{R_{1,Z}^2}{2} \cdot (\Theta_{1,Z} - \sin \Theta_{1,Z}) + \frac{R_{2,Z}^2}{2} \cdot (\Theta_{2,Z} - \sin \Theta_{2,Z}) \quad (37)$$

Ob upoštevanju enačb (38) in (39), ki veljajo za krožni odsek, se lahko V_Z izrazi v odvisnosti od začetnih višin obeh membran $h_{1,Z}$ in $h_{2,Z}$ (40):

$$R = \frac{4 \cdot h^2 + L^2}{8 \cdot h} \quad (38)$$

$$\Theta = 4 \cdot \arctan\left(\frac{2 \cdot h}{L}\right) \quad (39)$$

$$V_Z(h_{1,Z}; h_{2,Z}) = \left(\frac{4 \cdot h_{1,Z}^2 + L^2}{8 \cdot h_{1,Z}}\right)^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left[4 \cdot \arctan\left(\frac{2 \cdot h_{1,Z}}{L}\right) - \sin\left(4 \cdot \arctan\left(\frac{2 \cdot h_{1,Z}}{L}\right)\right)\right] + \left(\frac{4 \cdot h_{2,Z}^2 + L^2}{8 \cdot h_{2,Z}}\right)^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left[4 \cdot \arctan\left(\frac{2 \cdot h_{2,Z}}{L}\right) - \sin\left(4 \cdot \arctan\left(\frac{2 \cdot h_{2,Z}}{L}\right)\right)\right] \quad (40)$$

2.) Na začetku se predpostavi, da je končna višina spodnje membrane $h_{2,K}$ enaka njeni začetni višini $h_{2,Z}$ (41). V resnici je končna višina spodnje membrane $h_{2,K}$ zaradi raztezka, ki je posledica povečanja zračnega pritiska v membrani zaradi obremenitve s snegom, nekoliko večja od njene začetne višine $h_{2,Z}$. Ta napaka bo v nadaljevanju z iteracijami izločena.

$$h_{2,K} = h_{2,Z} \quad (41)$$

3.) Iz razlike pritiskov na zgornjo membrano Δp_1 , izračunane po enačbi (42), se po postopku, opisanem v poglavju 9.3.3. Postopek izračuna z upoštevanjem raztezka membrane, izračuna končna višina zgornje membrane $h_{1,K}$.

$$\Delta p_{1,K} = p_Z - q_S \quad \rightarrow \quad h_{1,K} = h_{1,K}(\Delta p_{1,K}) \quad (42)$$

4.) Z enačbo (43) se izračuna končna prostornina stisnjenega zraka na tekoči meter preseka ponjave V_K pri obremenitvi z začetnim zračnim pritiskom p_Z in obremenitvijo s snegom q_S .

$$V_K(h_{1,K}; h_{2,K}) = \left(\frac{4 \cdot h_{1,K}^2 + L^2}{8 \cdot h_{1,K}} \right)^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left[4 \cdot \arctan\left(\frac{2 \cdot h_{1,K}}{L}\right) - \sin\left(4 \cdot \arctan\left(\frac{2 \cdot h_{1,K}}{L}\right)\right) \right] + \\ + \left(\frac{4 \cdot h_{2,K}^2 + L^2}{8 \cdot h_{2,K}} \right)^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left[4 \cdot \arctan\left(\frac{2 \cdot h_{2,K}}{L}\right) - \sin\left(4 \cdot \arctan\left(\frac{2 \cdot h_{2,K}}{L}\right)\right) \right] \quad (43)$$

5.) Po Boylovem zakonu za izotermične spremembe se z enačbo (44) izračuna končni zračni pritisk v ponjavi p_K pri obremenitvi z začetnim zračnim pritiskom p_Z in obremenitvijo s snegom q_S .

$$p_K = p_Z \cdot (V_Z / V_K) \quad (44)$$

6.) Zaradi povečanja tlaka v ponjavi se končni višini obeh membran ponjave, določeni v 2. in 3. točki tega izračuna, zaradi dodatnega raztezka nekoliko povečata. Dejanske vrednosti končnih višin membran $h_{1,K}$ in $h_{2,K}$, končnega zračnega pritiska v ponjavi p_K in končne prostornine stisnjenega zraka na tekoči meter preseka ponjave V_K se izračunajo iteracijsko v i -tih korakih, analogno prejšnjim točkam izračuna, po enačbah od (45) do (52), kjer je $i \geq 2$, vrednosti z indeksom $(i-1)$ pa so za $i = 2$ določene v predhodnih točkah tega izračuna.

$$p_{Z,i} = p_{K,i-1} \quad (45)$$

$$h_{1,Z,i} = h_{1,K,i-1} \quad (46)$$

$$h_{2,Z,i} = h_{2,K,i-1} \quad (47)$$

$$V_{Z,i} = V_Z(h_{1,Z,i}; h_{2,Z,i}) \quad (48)$$

$$h_{1,K,i} = h_{1,K}(\Delta p_{1,K,i} = p_{Z,i} - q_S) \quad (49)$$

$$V_{K,i} = V_K(h_{1,K,i}; h_{2,K,i}) \quad (50)$$

$$p_{K,i} = p_{Z,i} \cdot (V_{Z,i} / V_{K,i}) \quad (51)$$

$$h_{2,K,i} = h_{2,K}(p_{K,i}) \quad (52)$$

Primer iteracijske določitve končnega pritiska v ponjavi p_K ter končnih višin zgornje $h_{1,K}$ in spodnje membrane $h_{2,K}$ s pripadajočo končno prostornino stisnjenega zraka na tekoči meter preseka ponjave V_K pri začetnem zračnem pritisku v ponjavi 1000 Pa in obremenitvijo s snegom 800 Pa je prikazan v Preglednici 20. Začetne vrednosti v 1. koraku so vhodni podatki, končne vrednosti v 1. koraku so količine, izračunane od 2. do 5. točke v prej opisanem postopku izračuna, vrednosti v vseh nadaljnjih korakih pa so izračunane po enačbah, navedenih v 6. točki postopka izračuna. Vrednosti v posameznem koraku se računajo v navedenem zaporedju od leve proti desni po enačbah od (45) do (52).

Preglednica 20: Primer iteracijske določitve končnega pritiska v ponjavi p_K ter končnih višin zgornje $h_{1,K}$ in spodnje membrane $h_{2,K}$ s pripadajočo prostornino stisnjenega zraka v ponjavi V_K pri razponu $L = 5,0$ m in začetnima višinama nedeformiranih membran $h_{1,0} = h_{2,0} = 0,5$ m pri začetnem zračnem pritisku 1000 Pa in obremenitvijo s snegom 800 Pa.

i	$p_{Z,i}$ [Pa]	$h_{1,Z,i}$ [m]	$h_{2,Z,i}$ [m]	$V_{Z,i}$ [m ³ /m]	$h_{1,K,i}$ [m]	$V_{K,i}$ [m ³ /m]	$p_{K,i}$ [Pa]	$h_{2,K,i}$ [m]
1	1000,00	0,59531	0,59531	4,01337	0,52146	3,75993	1067,40	0,60056
2	1067,40	0,52146	0,60056	3,77804	0,52879	3,80308	1060,38	0,60002
3	1060,38	0,52879	0,60002	3,80121	0,52803	3,79864	1061,09	0,60008
4	1061,09	0,52803	0,60008	3,79883	0,52811	3,79910	1061,02	0,60007
5	1061,02	0,52811	0,60007	3,79908	0,52810	3,79905	1061,03	0,60007
6	1061,03	0,52810	0,60007	3,79905	0,52810	3,79906	1061,03	0,60007
7	1061,03	0,52810	0,60007	3,79906	0,52810	3,79906	1061,03	0,60007
8	1061,03	0,52810	0,60007	3,79906	0,52810	3,79906	1061,03	0,60007

Količine v Preglednici 20 so se zelo hitro stabilizirale, saj se končne vrednosti po osmih iteracijah bistveno ne razlikujejo od končnih vrednosti v 1. koraku, zato bi za izračun sil v membranah in reakcij v podporah zadoščale že te vrednosti, pridobljene brez iteracij. Z upoštevanjem teh vrednosti bi bili na varni strani, saj je končni zračni pritisk v 1. koraku večji

od dejanskega končnega zračnega pritiska po osmih iteracijah. Končna višina spodnje membrane $h_{2,K}$, obremenjene z zračnim pritiskom in s snegom, se od začetne višine spodnje membrane $h_{2,Z}$, obremenjene izključno z začetnim zračnim pritiskom, razlikuje le za 5 mm oz. za 0,8%, kar pomeni, da je predpostavka v 2. točki postopka izračuna, ki pravi, da je končna višina spodnje membrane $h_{2,K}$ enaka njeni začetni višini $h_{2,Z}$, popolnoma upravičena.

9.5.2.2 Postopek izračuna za primer, ko velja $p_Z \leq q_S$ in $p_K = q_S$

1.) Da je dvoslojna pnevmatska ponjava z zunanjo obremenitvijo zaradi snega q_S , ki je večja od začetnega notranjega zračnega pritiska v ponjavi p_Z , v ravnotežju z zunanjo obremenitvijo, se mora prostornina stisnjenega zraka v ponjavi zmanjšati za toliko, da je končni zračni pritisk v ponjavi enak obremenitvi s snegom (53).

$$p_K = q_S \quad (53)$$

2.) Z enačbo (54) se izračuna začetna prostornina stisnjenega zraka na tekoči meter preseka ponjave V_Z pri obremenitvi izključno z začetnim zračnim pritiskom p_Z .

$$V_Z(h_{1,Z}; h_{2,Z}) = \left(\frac{4 \cdot h_{1,Z}^2 + L^2}{8 \cdot h_{1,Z}} \right)^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left[4 \cdot \arctan\left(\frac{2 \cdot h_{1,Z}}{L}\right) - \sin\left(4 \cdot \arctan\left(\frac{2 \cdot h_{1,Z}}{L}\right)\right) \right] + \\ + \left(\frac{4 \cdot h_{2,Z}^2 + L^2}{8 \cdot h_{2,Z}} \right)^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left[4 \cdot \arctan\left(\frac{2 \cdot h_{2,Z}}{L}\right) - \sin\left(4 \cdot \arctan\left(\frac{2 \cdot h_{2,Z}}{L}\right)\right) \right] \quad (54)$$

3.) Po Boylovem zakonu za izotermične spremembe se z enačbo (55) izračuna končna prostornina stisnjenega zraka na tekoči meter preseka ponjave V_K pri obremenitvi z začetnim zračnim pritiskom p_Z in obremenitvijo s snegom q_S .

$$V_K = V_Z \cdot (p_Z / p_K) \quad (55)$$

4.) Iz razlike pritiskov na spodnjo membrano Δp_2 , enaki končnemu zračnemu pritisku v ponjavi p_K (56), ki je edini delujoči pritisk na to membrano, se po postopku, opisanem v poglavju Izračun z upoštevanjem raztezka membrane, izračuna končna višina spodnje membrane $h_{2,K}$.

$$\Delta p_{2,K} = p_K = q_S \quad \rightarrow \quad h_{2,K} = h_{2,K}(\Delta p_{2,K}) \quad (56)$$

5.) Z enačbo (57) se v odvisnosti od končne višine spodnje membrane $h_{2,K}$ izračuna končna prostornina stisnjenega zraka v spodnjem delu ponjave na tekoči meter preseka $V_{sp,K}$ pri obremenitvi z začetnim zračnim pritiskom p_Z in obremenitvijo s snegom q_S .

$$V_{sp,K}(h_{2,K}) = \left(\frac{4 \cdot h_{2,K}^2 + L^2}{8 \cdot h_{2,K}} \right)^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left[4 \cdot \arctan\left(\frac{2 \cdot h_{2,K}}{L}\right) - \sin\left(4 \cdot \arctan\left(\frac{2 \cdot h_{2,K}}{L}\right)\right) \right] \quad (57)$$

6.) Iz razlike med končno prostornino stisnjenega zraka v celotni ponjavi V_K in prostornino stisnjenega zraka v spodnjem delu ponjave $V_{sp,K}$ se z enačbo (58) izračuna prostornina stisnjenega zraka v zgornjem delu ponjave na tekoči meter preseka $V_{zg,K}$.

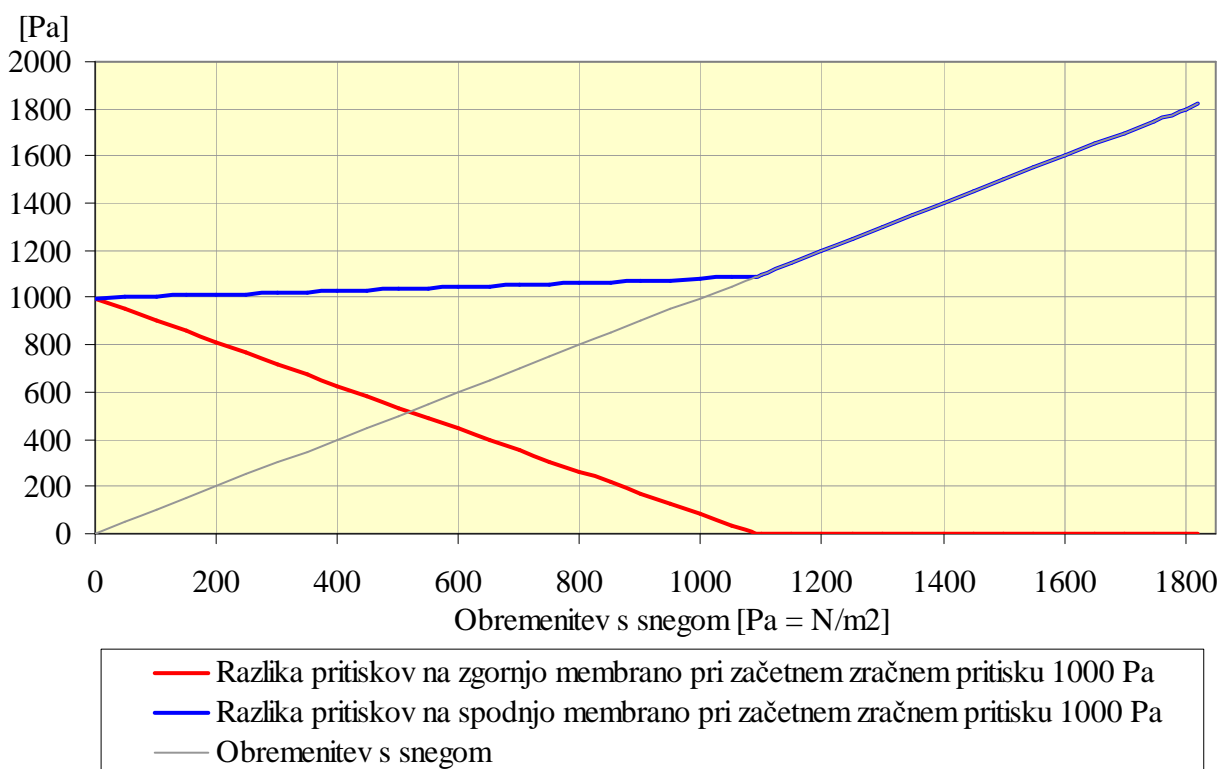
$$V_{zg,K} = V_K - V_{sp,K} \quad (58)$$

7.) Glede na prostornino stisnjenega zraka v zgornjem delu ponjave $V_{zg,K}$ se določi končna višina zgornje membrane $h_{1,K}$ pri obremenitvi z začetnim zračnim pritiskom p_Z in obremenitvijo s snegom q_S .

$$h_{1,K} = h_{1,K}(V_{zg,K}) \quad (59)$$

9.5.3 Membranske sile in reakcije v odvisnosti od velikosti obremenitve zaradi snega

Spreminjane razlike pritiskov na zgornjo $\Delta p_{1,K}$ in spodnjo membrano $\Delta p_{2,K}$ v odvisnosti od velikosti obremenitve s snegom pri začetnem zračnem pritisku 1000 Pa prikazuje Grafikon 17. Če je ponjava obremenjena le z zračnim pritiskom, v tem primeru je ta enak 1000 Pa, sta razliki pritiskov na obe membrani enaki vrednosti zračnega pritiska v ponjavi. Modra črta, ki prikazuje razliko pritiskov na spodnjo membrano, obremenjeno z začetnim zračnim pritiskom p_z in s snegom q_s , hkrati predstavlja tudi vrednost zračnega pritiska v ponjavi, saj je zračni pritisk edina obremenitev, ki neposredno deluje na spodnjo membrano.

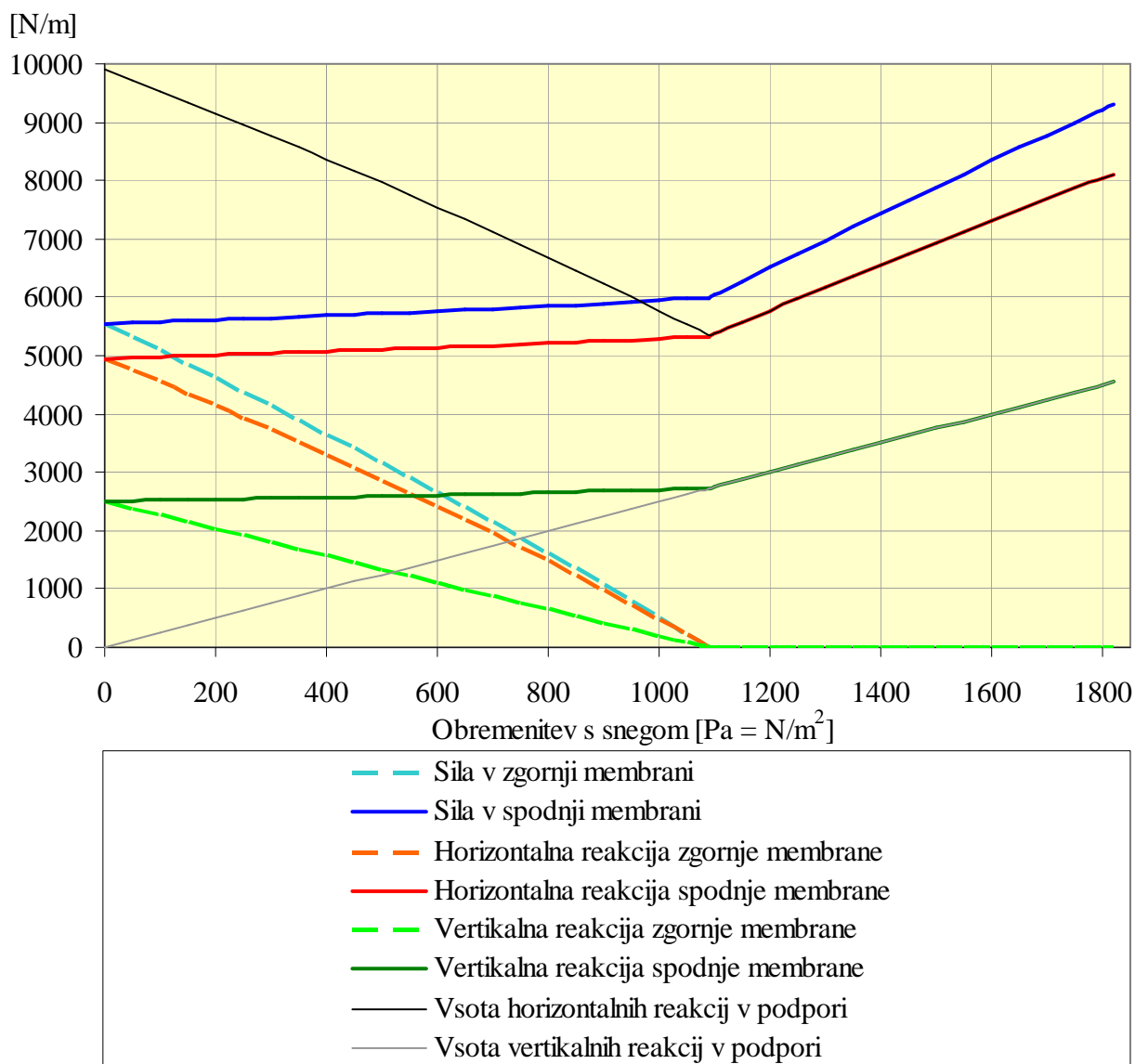


Grafikon 17: Razlika pritiskov na zgornjo $\Delta p_{1,K}$ in spodnjo $\Delta p_{2,K}$ membrano ponjave z razponom $L = 5,0$ m in začetnima višinama nedeformiranih membran $h_{1,0} = h_{2,0} = 0,5$ m v odvisnosti od velikosti obremenitve s snegom q_s pri začetnem zračnem pritisku 1000 Pa.

S povečevanjem obremenitve s snegom se zračni pritisk v ponjavi počasi in linearno povečuje do vrednosti 1090 Pa, ki pripada vrednosti obremenitve s snegom 1090 Pa ($\Delta p_{2,K} = p_K = q_s$). Pri začetnem zračnem pritisku 1000 Pa v ponjavi z razponom $L = 5,0$ m in začetnima

nedeformiranima višinama membran $h_{1,0} = h_{2,0} = 0,5$ m je ta obremenitev s snegom mejna vrednost, ki ločuje oba tipa obnašanja membrane pod vplivom obremenitve s snegom. Pri obremenitvah s snegom, ki so manjše od 1090 Pa, je zračni pritisk v ponjavi ves čas večji od vrednosti obremenitve s snegom, po izenačitvi teh dveh vrednosti pri 1090 Pa, pa zračni pritisk narašča enako z obremenitvijo s snegom (modra črta prekrije sivo črto), in sicer precej hitreje kot do vrednosti 1090 Pa. Medtem ko s povečevanjem obremenitve s snegom do 1090 Pa razlika pritiskov na spodnjo membrano linearno narašča od vrednosti 1000 Pa do 1090 Pa, razlika pritiskov na zgornjo membrano linearno pada od vrednosti 1000 Pa do 0 Pa. Tudi pri nadaljnjem povečevanju obremenitve s snegom razlika pritiskov na zgornjo membrano ostane enaka nič, saj na to membrano deluje tako notranji zračni pritisk kot tudi obremenitev zaradi snega, ki sta od vrednosti 1090 Pa naprej enaki, vendar nasprotno usmerjeni, zaradi česar se izničita.

Ker je razlika pritiskov na zgornjo membrano $\Delta p_{1,K}$ enaka nič, je tudi sila v tej membrani $P_{1,K}$ enaka nič, vendar je zgornja membrana zaradi ukrivljenosti pri $h_{1,K} > 0$ kljub temu stabilna. Zgornja membrana izgubi stabilnost pri vrednosti obremenitve s snegom $q_S = 1820$ Pa, saj pri tej vrednosti preskoči iz zgornje strani ponjave na spodnjo oz. spremeni predznak ukrivljenosti. V primeru, da se membrani zaradi sunka sile ob preskoku ne poškodujeta, zgornja membrana zaradi ukrivljenosti nasprotnega predznaka zopet postane stabilna in ponjava lahko še naprej prenaša zunanje obremenitve na jekleno nosilno konstrukcijo. Vsi prikazani grafikoni se končajo pri vrednosti obremenitve s snegom, ki povzroči preskok zgornje membrane, saj se takšno stanje ponjave smatra kot nezgodno stanje. Glede na vrednosti obremenitev s snegom, izračunanih za nekaj večjih slovenskih krajev v poglavju 8.5, je razvidno, da bi bil začetni zračni pritisk 1000 Pa v ponjavi z razponom $L = 5,0$ m in začetnima višinama nedeformiranih membran $h_{1,0} = h_{2,0} = 0,5$ m, z upoštevanjem varnostnega faktorja za prevladujočo spremenljivo obtežbo 1,5, ustrezen za vse naštetje kraje, razen za Jesenice ne. Tam je namreč obremenitev s snegom ($q_{S, \text{Jesenice}} = 2,52 \text{ kN/m}^2 = 2520$ Pa) več kot dvakrat večja od obremenitve s snegom v Ljubljani ($q_{S, \text{Ljubljana}} = 1,21 \text{ kN/m}^2 = 1210$ Pa). Kakšen bi moral biti začetni zračni pritisk v ponjavi p_Z in kakšne oblike bi morala biti ponjava ($L, h_{1,0}, h_{2,0}$), da bi prenesla obremenitev s snegom v Jesenicah je opisano v nadaljnjih poglavjih.



Grafikon 18: Sile v obeh membranah in pripadajoče komponente reakcij v podporah ponjave z razponom $L = 5,0$ m in začetnima višinama nedeformiranih membran $h_{1,0} = h_{2,0} = 0,5$ m v odvisnosti od velikosti obremenitve s snegom q_s pri začetnem zračnem pritisku 1000 Pa.

Na Grafikonu 18 je prikazano spreminjanje sil v zgornji in spodnji membrani tipične ponjave (P_1 in P_2) in pripadajočih komponent reakcij (H_1 , V_1 , H_2 in V_2), ki jih te povzročajo v podporah, pri začetnem zračnem pritisku 1000 Pa v odvisnosti od obremenitve s snegom q_s . Razvidno je, da je spreminjanje opazovanih vrednosti zgornje oz. spodnje membrane sorazmerno spreminjanju razlike pritiskov na zgornjo oz. spodnjo membrano ($\Delta p_{1,K}$ in $\Delta p_{2,K}$) na Grafikonu 17. Prav tako kot razlika pritiskov na spodnjo membrano $\Delta p_{2,K}$ se tudi sila v spodnji membrani $P_{2,K}$ počasi povečuje od vrednosti 5547 N/m pri obremenitvi izključno s

1000 Pa notranjega zračnega pritiska do vrednosti 5987 N/m, ko je zračni pritisk v ponjavi enak obremenitvi s snegom 1090 Pa. Začetna sila v zgornji membrani je zaradi simetričnosti ponjave pri obremenitvi z začetnim zračnim pritiskom 1000 Pa enaka sili v spodnji membrani in znaša 5547 N/m. Pri povečevanju obremenitve s snegom q_s pa se linearno zmanjšuje do vrednosti nič, ko se zračni pritisk v ponjavi p_K in obremenitev s snegom q_s pri 1090 Pa izenačita. Pri nadaljnjem povečevanju obremenitve s snegom sila v zgornji membrani ostane enaka nič, sila v spodnji membrani pa začne hitreje naraščati, in sicer premo sorazmerno z zračnim pritiskom v ponjavi, ki je od vrednosti 1090 Pa naprej enak vrednosti obremenitve s snegom.

Horizontalna komponenta reakcije H_1 oz. H_2 je približno enaka 90% sile v zgornji P_1 oz. spodnji membrani P_2 . Zanimiva ugotovitev je ta, da obremenitev ponjave s snegom ugodno vpliva na vsoto horizontalnih komponent reakcij, na katere se dimenzionira jeklene okvirje nosilne konstrukcije. Vsota horizontalnih komponent reakcij (črna črta na grafikonu) je največja, ko sta membrani obremenjeni izključno z notranjim zračnim pritiskom, potem pa se linearno zmanjšuje dokler ni končni zračni pritisk v ponjavi p_K enak obremenitvi s snegom q_s . Po izenačitvi obremenitev na zgornjo membrano, je sila v tej membrani enaka nič in prav tako tudi pripadajoči komponenti reakcij, zato je vsota horizontalnih reakcij od točke izenačitve dalje enaka horizontalni komponenti reakcije spodnje membrane (črna črta prekrije rdečo). Vsota horizontalnih reakcij v podpori tipične ponjave, prikazane na Grafikonu 18, ima npr. pri obremenitvah s snegom 800 Pa in 1400 Pa enako vrednost.

Pri tipični ponjavi z razponom $L = 5,0$ m in začetnima višinama nedeformirane membrane $h_{1,0} = h_{2,0} = 0,5$ m je vsota horizontalnih komponent reakcij obeh membran, obremenjenih le z začetnim zračnim pritiskom 1000 Pa, enaka 9903 N/m. Ob povečevanju obremenitve s snegom q_s se vsota horizontalnih reakcij linearno zmanjšuje do vrednosti 5334 N/m, ko je končni zračni pritisk v ponjavi p_K enak obremenitvi s snegom q_s pri 1090 Pa, od tu naprej pa se začne linearno povečevati do končne vrednosti 8112 N/m, pri kateri zgornja membrana preskoči na spodnjo stran ponjave. Iz podanih vrednosti je razvidno, da je vsota horizontalnih komponent reakcij obeh membran največja, ko je ponjava obremenjena izključno z začetnim zračnim pritiskom, in sicer je ta vrednost za skoraj 1800 N/m večja od končne vrednosti pri preskoku zgornje membrane.

Očitno je, da obremenitev s snegom ugodno vpliva na vsoto horizontalnih reakcije. Za razliko od slednjih pa se vsota vertikalnih komponent reakcij obeh membran povečuje premo sorazmerno z obremenitvijo s snegom q_s . Vsota vertikalnih reakcij je enaka vrednosti obremenitve s snegom q_s , pomnoženi s polovično velikostjo razpona $L/2$. Sama oblika obeh membran nanjo nima vpliva.

Vertikalna reakcija V_1 oz. V_2 zaradi sile v zgornji oz. spodnji membrani je odvisna le od razlike pritiskov na posamezno membrano $\Delta p_{1,K}$ oz. $\Delta p_{2,K}$ in od razpona ponjave L ter se jo izračuna po enačbi (60) oz. (61). Vsota vertikalnih reakcij pa je odvisna le od velikosti obremenitve zaradi snega q_s in od razpona ponjave L , izračuna pa se jo po enačbi (62). Posamezna membrana se zaradi razlike pritiskov, ki deluje nanjo, ukrivi toliko, da je vertikalna komponenta sile v membrani v točki podpiranja enaka rezultantni sili enakomerno porazdeljene vertikalne obtežbe na polovici razpona, enaki vrednosti razlike pritiskov na posamezno membrano. Ko je to ravnotežje doseženo, membrana obstane v položaju, ki zagotavlja ravnotežje vertikalnih obremenitev. Silo v membrani, ki ni odvisna le od razlike pritiskov na membrano, ampak tudi od njene ukrivljenosti, pa uravnoteži horizontalna komponenta reakcije. To pomeni, da je horizontalna komponenta reakcije odvisna od vertikalne komponente reakcije in ne obratno, saj se mora najprej zagotoviti ravnotežje v vertikalni smeri in nato še ravnotežje v horizontalni smeri. Npr. vsota vertikalnih reakcij je vedno enaka rezultantni sili obremenitve s snegom q_s na polovici razpona L , ne glede na ukrivljenost ter višino zgornje in spodnje membrane. Da je doseženo ravnotežje še v horizontalni smeri, pa se morata zgornja in spodnja membrana ustrezno ukriviti, tako da veljata enačbi (63) in (64), kjer kot α predstavlja kot med tangento na ukrivljeno membrano in horizontalo v točki podpiranja ponjave.

$$V_{1,K} = \frac{\Delta p_{1,K} \cdot L}{2} \quad (60)$$

$$V_{2,K} = \frac{\Delta p_{2,K} \cdot L}{2} \quad (61)$$

$$V_{1,K} + V_{2,K} = \frac{q_s \cdot L}{2} \quad (62)$$

$$V = P \cdot \sin \alpha \quad \rightarrow \quad P = \frac{V}{\sin \alpha}$$

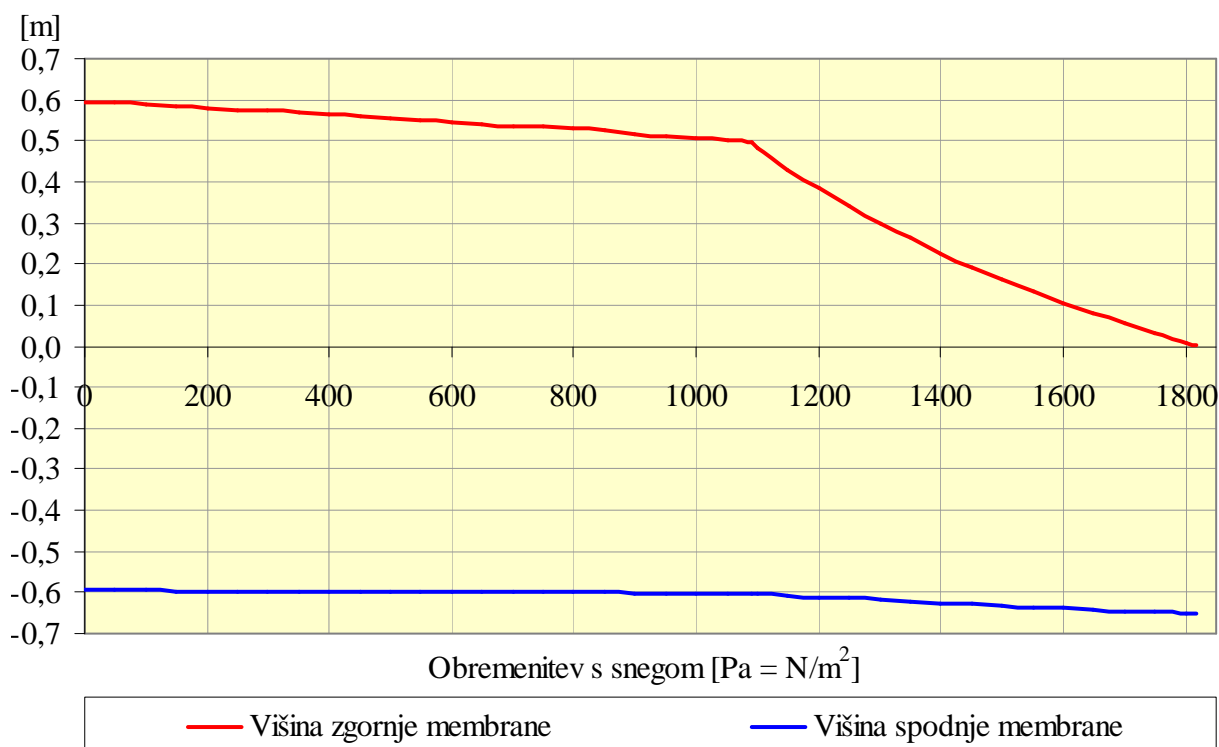
$$H = P \cdot \cos \alpha \quad \rightarrow \quad H = \frac{V}{\sin \alpha} \cdot \cos \alpha = \frac{V}{\tan \alpha}$$

$$H_1 = \frac{V_1}{\tan \alpha_1} \tag{63}$$

$$H_2 = \frac{V_2}{\tan \alpha_2} \tag{64}$$

Na Grafikonu 19 je prikazano spreminjanje končnih višin zgornje in spodnje membrane pri tipični ponjavi, obremenjeni z začetnim zračnim pritiskom 1000 Pa, v odvisnosti od obremenitve s snegom q_s . Začetni višini nedeformiranih membran simetrične ponjave sta bili $h_{1,0} = h_{2,0} = 0,5$ m. Zaradi začetnega zračnega pritiska v ponjavi velikosti 1000 Pa sta se membrani enako raztegnili in posledično se je povečala tudi njuna višina, ki je narasla na 0,5953 m. Ti dve višini zgornje $h_{1,Z}$ in spodnje membrane $h_{2,Z}$ sta v izračunu sil v membranah in reakcij v podporah zaradi obremenitve s snegom q_s uporabljeni kot začetni višini membran, ki pripadata začetnemu zračnemu pritisku p_Z v ponjavi.

Iz Grafikona 19 je razvidno, da se do mejne vrednosti obremenitve s snegom 1090 Pa, ko se končni zračni pritisk v ponjavi p_K izenači z vrednostjo zunanje obremenitve q_s , višina zgornje membrane približno linearno zmanjšuje od začetne vrednosti 0,5953 m do vrednosti 0,4980 m, torej za vsega skupaj 10 cm, medtem ko ostaja višina spodnje membrane bolj ali manj enaka, saj se poveča iz začetne vrednosti 0,5953 m na vrednost 0,6024 m, kar je manj kot za 1 cm. Pri izenačitvi obeh obremenitev sila v zgornji membrani pade na nič, zato se začne pri povečevanju obremenitve s snegom preko 1090 Pa višina zgornje membrane mnogo hitreje nižati, saj mora ponjava z zmanjševanjem prostornine stisnjenega zraka med membranama kompenzirati razliko med obremenitvijo s snegom q_s in začetnim zračnim pritiskom v ponjavi p_Z , ki za prikazani primer znaša 1000 Pa. Od vrednosti obremenitve s snegom 1090 Pa do vrednosti 1819 Pa, ko zgornja membrana preskoči na spodnjo stran ponjave, se višina zgornje membrane zmanjša za 50 cm, višina spodnje membrane pa se zaradi dodatnega raztezka ob povečanju končnega zračnega pritiska v ponjavi p_K , ki je od 1090 Pa naprej enak obremenitvi s snegom, poveča za 5 cm.



Grafikon 19: Končna višina zgornje $h_{1,K}$ in spodnje membrane $h_{2,K}$ pri ponjavi z razponom $L = 5,0$ m in začetnima višinama nedeformiranih membran $h_{1,0} = h_{2,0} = 0,5$ m v odvisnosti od velikosti obremenitve s snegom q_s pri začetnem zračnem pritisku 1000 Pa.

9.5.4 Maksimalna obremenitev s snegom v odvisnosti od začetnih višin membran

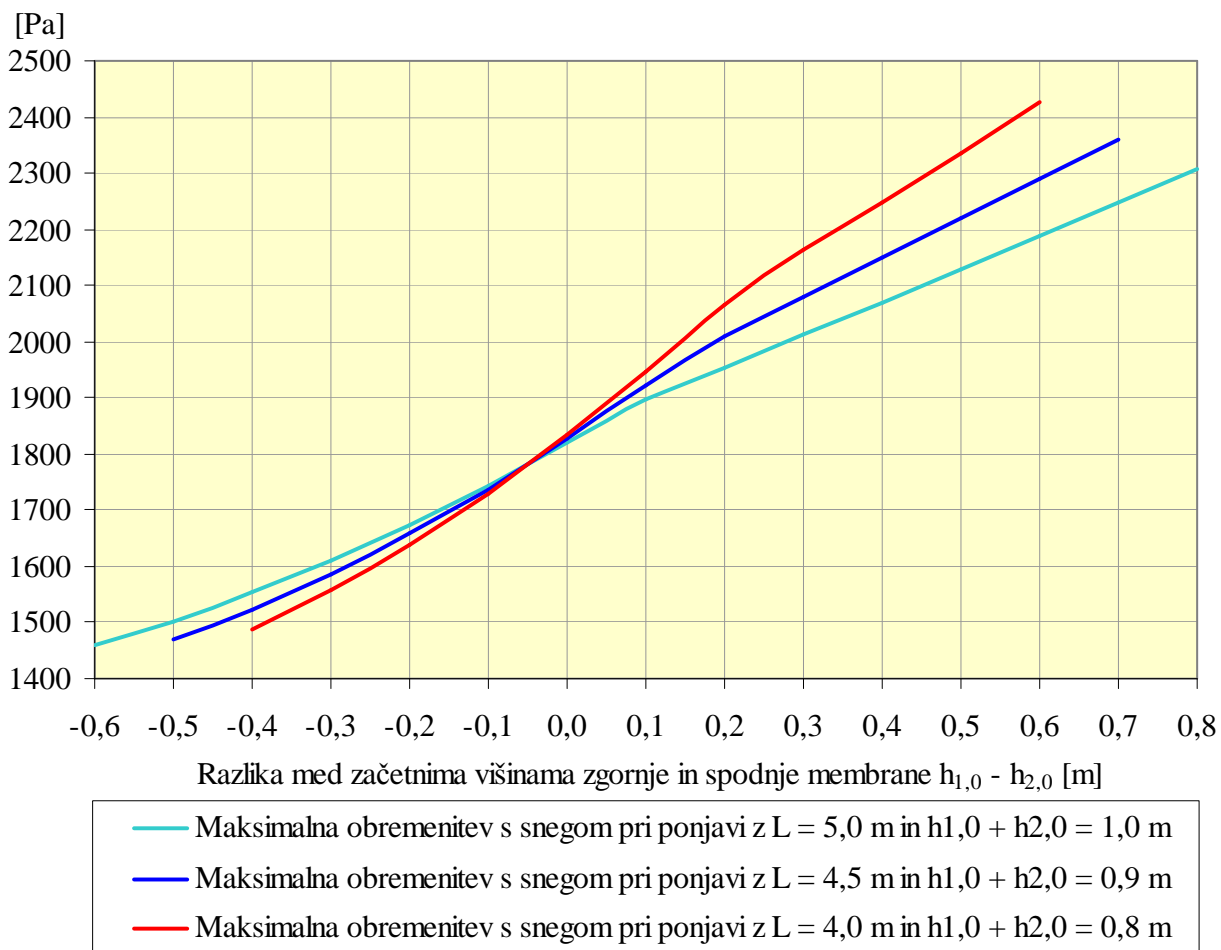
V tem in naslednjem poglavju je prikazano spreminjanje končnega zračnega pritiska v ponjavi, sil v membranah in reakcij v podporah zaradi obremenitve s snegom v odvisnosti od začetnih višin nedeformiranih membran in razpona ponjave. Predpostavljeno je, da je začetna višina zgornje in spodnje nedeformirane membrane pri simetrični ponjavi enaka desetini razpona ($h_{1,0} = h_{2,0} = L/10$) in da se razlika med začetnima nedeformiranima višinama zgornje in spodnje membrane pri nesimetrični ponjavi spreminja tako, da je vsota obeh začetnih višin pri enakem razponu konstantna. Skupna začetna višina nedeformirane ponjave pri razponu $L = 5,0$ m tako znaša dve desetini razpona oz. 1,0 m, pri razponu $L = 4,5$ je enaka 0,9 m, pri razponu $L = 4,0$ m pa 0,8 m. Vse količine na grafikonih v tem in naslednjem poglavju se spreminjajo v odvisnosti od razlike med začetnima višinama zgornje in spodnje membrane, ki so za različne razpone ponjav L podane v Preglednici 21.

Preglednica 21: Začetne višine zgornjih $h_{1,0}$ in spodnjih $h_{2,0}$ nedeformiranih membran ter razlike med njimi pri ponjavah z razponom 5,0 m, 4,5 m in 4,0 m, kjer je začetna višina nedeformiranih membran simetrične ponjave enaka desetini razpona ($h_{1,0} = h_{2,0} = L/10$).

	L = 5,0 m		L = 4,5 m		L = 4,0 m	
	$h_{1,0} + h_{2,0} = 1,0$ m		$h_{1,0} + h_{2,0} = 0,9$ m		$h_{1,0} + h_{2,0} = 0,8$ m	
$h_{1,0} - h_{2,0}$ [m]	$h_{1,0}$ [m]	$h_{2,0}$ [m]	$h_{1,0}$ [m]	$h_{2,0}$ [m]	$h_{1,0}$ [m]	$h_{2,0}$ [m]
0,80	0,90	0,10	-	-	-	-
0,70	0,85	0,15	0,80	0,10	-	-
0,60	0,80	0,20	0,75	0,15	0,70	0,10
0,50	0,75	0,25	0,70	0,20	0,65	0,15
0,40	0,70	0,30	0,65	0,25	0,60	0,20
0,30	0,65	0,35	0,60	0,30	0,55	0,25
0,20	0,60	0,40	0,55	0,35	0,50	0,30
0,10	0,55	0,45	0,50	0,40	0,45	0,35
0,00	0,50	0,50	0,45	0,45	0,40	0,40
-0,10	0,45	0,55	0,40	0,50	0,35	0,45
-0,20	0,40	0,60	0,35	0,55	0,30	0,50
-0,30	0,35	0,65	0,30	0,60	0,25	0,55
-0,40	0,30	0,70	0,25	0,65	0,20	0,60
-0,50	0,25	0,75	0,20	0,70	-	-
-0,60	0,20	0,80	-	-	-	-

Grafikon 20 prikazuje vrednosti maksimalne dopustne obremenitve s snegom $q_{S,max}$ za ponjave iz Preglednice 21. Vrednosti maksimalnih dopustnih obremenitev so v vseh primerih večje od začetnega zračnega pritiska v ponjavi, zato je pri takšnih obremenitvah s snegom obremenjena le spodnja membrana, medtem ko je sila v zgornji membrani enaka nič, saj je končni pritisk v ponjavi enak obremenitvi s snegom, ki neposredno deluje le na zgornjo membrano in je zato razlika pritiskov nanjo enaka nič. Pri razliki začetnih višin zgornje in spodnje membrane $h_{1,0} - h_{2,0} = -0,05$ m je maksimalna dopustna obremenitev s snegom za vse obravnavane razpone enaka in znaša približno 1780 Pa. Pri razlikah začetnih višin večjih od -0,05 m lahko ponjave z manjšimi razponi prenesejo večje obremenitve s snegom kot ponjave z večjimi razponi, obratno pa velja za razlike začetnih višin manjše od -0,05 m, vendar se pri

slednjih vrednosti maksimalnih dopustnih obremenitev s snegom na ponjavah z različnimi razponi manj razlikujejo med seboj.

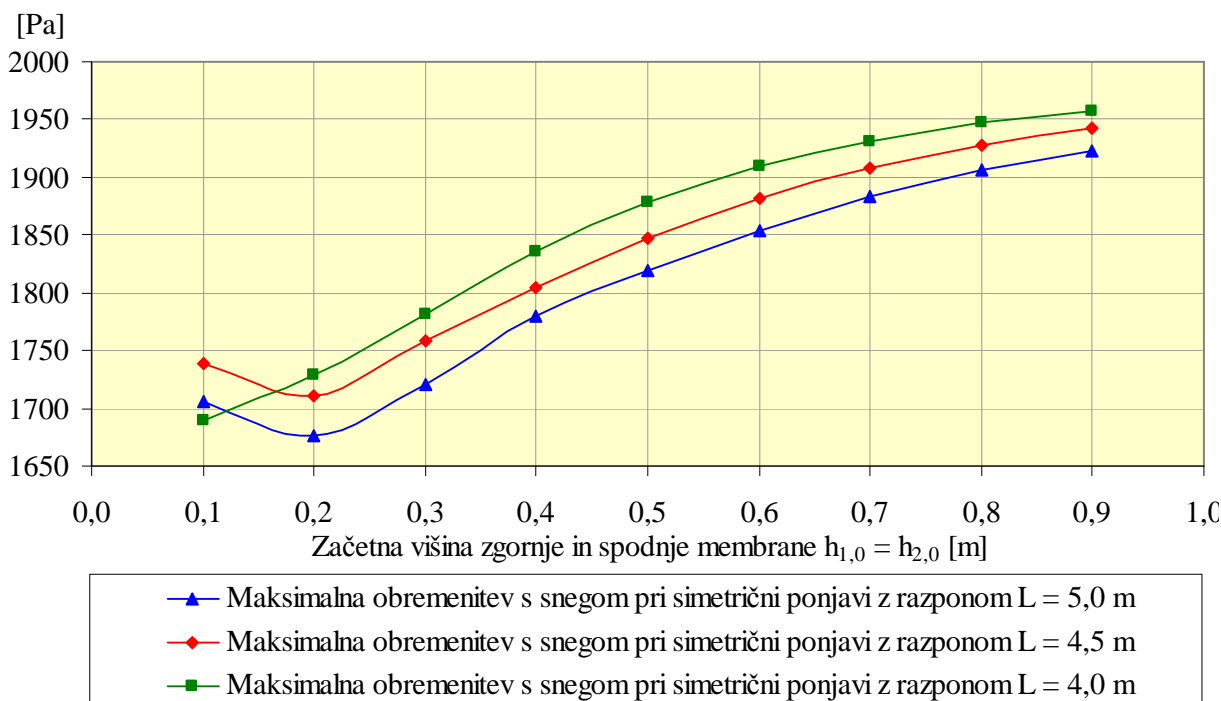


Grafikon 20: Maksimalna dopustna obremenitev s snegom na ponjavah z različnimi razponi L in začetnimi višinami nedeformiranih membran $h_{1,0}$ in $h_{2,0}$, prikazanimi v Preglednici 21, pri začetnem zračnem pritisku 1000 Pa v odvisnosti od razlike začetnih višin obeh membran.

Iz Grafikona 20 je razvidno, da se črte maksimalnih dopustnih obremenitev med vrednostmi razlik začetnih višin 0,1 in 0,3 prelomijo. Vzrok za to je, da sila v spodnji membrani preseže vrednost 10000 N/m, pri kateri se lomi tudi črta $P-\epsilon$ diagrama (Grafikon 10 v poglavju 9.3.3 Postopek izračuna z upoštevanjem raztezka membrane). Do vrednosti sile v membrani 10000 N/m se namreč membrana pri povečanju sile za 1000 N/m raztegne za 0,2%, pri vrednostih sil v membrani nad 10000 N/m pa so raztezki večji, saj se membrana pri povečanju sile za 1000 N/m raztegne za 0,5%. Zaradi te spremembe deformabilnosti so maksimalne dopustne

obremenitve s snegom na obravnavanih membranah iz poliestrskih tkanin prevlečenih s PVC po dosegu sile v spodnji membrani 10000 N/m manjše, kot bi bile v primeru, če bi bila uporabljena membrana iz steklenih vlaken prevlečenih s PTFE, ki je manj deformabilna, ali če bi bila natezna trdnost PVC membrane večja, zaradi česar bi do spremembe deformabilnosti prišlo šele pri večjih membranskih silah.

Začetne višine nedeformiranih membran, na podlagi katerih se določi dolžina loka oz. širina zgornje in spodnje membrane, ki se ju zvari v ponjavo, so zelo pomembne, saj se lahko pri enaki porabi materiala s pravilno izbiro začetnih višin močno poveča nosilnost ponjav. Pri razponu $L = 5,0$ m maksimalna dopustna obremenitev s snegom $q_{S,max}$ pri začetnih višinah $h_{1,0} = 0,2$ m in $h_{2,0} = 0,8$ m znaša 1461 Pa, pri začetnih višinah $h_{1,0} = 0,9$ m in $h_{2,0} = 0,1$ m pa 2306 Pa, kar predstavlja za 58% večjo nosilnost. Razlike v nosilnosti so pri manjših razponih še nekoliko večje. Pri razponu $L = 4,0$ m ter začetnih višinah $h_{1,0} = 0,7$ m in $h_{2,0} = 0,1$ m je npr. maksimalna dopustna obremenitev s snegom enaka 2427 Pa, kar je za 63% več kot pri začetnih višinah $h_{1,0} = 0,2$ m in $h_{2,0} = 0,6$ m, ko je ta enaka 1489 Pa.



Grafikon 21: Maksimalna dopustna obremenitev s snegom na simetričnih ponjavah z različnimi razponi L pri začetnem zračnem pritisku 1000 Pa v odvisnosti od začetne višine nedeformiranih membran $h_{1,0} = h_{2,0}$.

Na Grafikonu 21 je prikazano spreminjanje maksimalne dopustne obremenitve s snegom $q_{S,max}$ v odvisnosti od začetne višine nedeformiranih membran pri simetričnih ponjavah z razponi 5,0 m, 4,5 m in 4,0 m. Manjši kot je razpon simetrične ponjave L in večja kot je začetna nedeformirana višina obeh membran, večje obremenitve zaradi snega lahko ponjava prenaša. Od začetne višine 0,2 m do 0,5 m se nosilnost povečuje hitro, nato pa čedalje počasneje. S povečevanjem začetne nedeformirane višine membrane se povečuje količina potrebnega materiala za izdelavo ponjave in s tem tudi cena ponjave, zato je potrebno izbrati neko smiselno začetno višino, ki daje dovolj veliko nosilnost, hkrati pa preveč ne podraži investicije. Iz Grafikona 21 je razvidno, da so sprejemljive začetne višine do 0,6 m, saj je pri nadaljnem večanju začetnih višin prirastek nosilnosti čedalje manjši. Maksimalna dopustna obremenitev zaradi snega na ponjavah z razponom 5,0 m in 4,5 m je pri začetni višini nedeformiranih membran 0,1 m večja kot pri 0,2 m in manjša kot pri 0,3 m. Razlog za takšno obnašanje je ta, da je sila v spodnji membrani pri takšni začetni višini in razponu ponjave 5,0 m in 4,5 m večja od vrednosti 10000 N/m, zaradi česar pride do večjega raztezka membrane, medtem ko je pri razponu 4,0 m sila v spodnji membrani ves čas manjša od 10000 N/m.

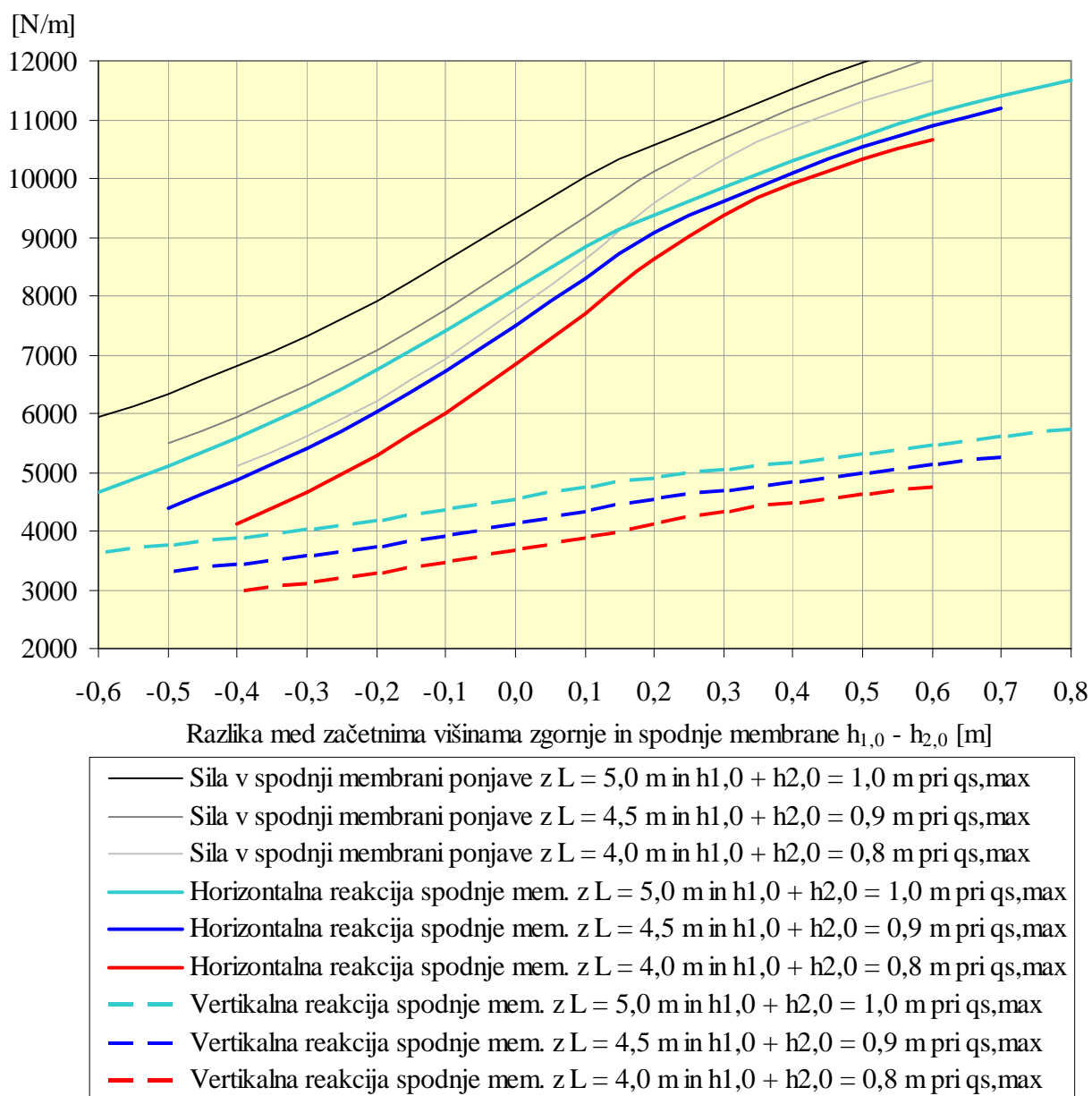
Pomembno je omeniti tudi to, da so prikazani rezultati za ponjave z velikimi začetnimi višinami bolj ali manj teoretične narave, saj začetni kot med tangento na zgornjo membrano in horizontalo v točki podpiranja pri začetnih višinah nad 0,6 m presega od 30° , zato sneg zdrsne s ponjave proti podporam oz. proti jeklenim okvirjem in obremenitev ni več enakomerno porazdeljena kot je predpostavljeno v izračunu. Tako se del obremenitve s snegom prenese neposredno na jekleno konstrukcijo, ponjava pa se zaradi tega nekoliko razbremeni, zato so lahko debeline snežne odeje, ki jih takšen strešni sistem prenese, še večje od navedenih. Visok zračni pritisk v ponjavi, obremenjeni s snegom, stabilizira zgornjo membrano in sili membrano v idealno lego v obliki krožnega loka. V primeru ponjave z razponom 5,0 m in začetno višino nedeformirane membrane 0,5 m je dolžina loka nedeformirane membrane enaka 5,13 m, pri obremenitvi z zračnim pritiskom 1000 Pa pa se zaradi raztezka poveča na 5,19 m. V opisanem izračunu je predpostavljeno, da ima membrana ves čas obliko krožnega loka, vendar pa se pri povečevanju obremenitve s snegom zgornja membrana spušča, njena dolžina pa je večja od dolžine krožnega loka pri manjših višinah, zato v tem primeru ne more oblikovati pravilnega krožnega loka. Do preskoka zgornje membrane lahko zato pride že pri nekoliko manjših vrednosti obremenitve s snegom.

9.5.5 Sile v membranah in reakcije v podporah v odvisnosti od začetnih višin membran

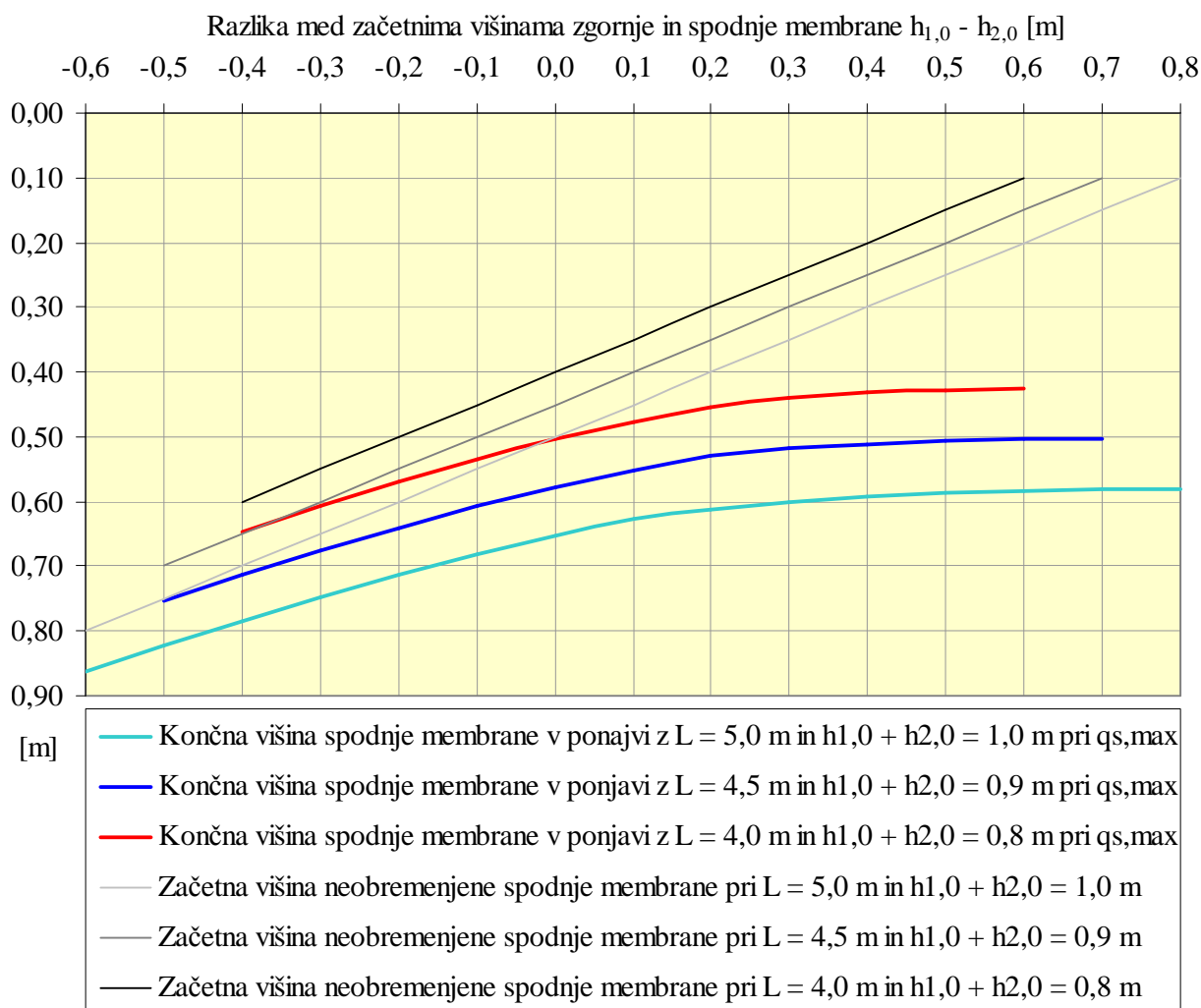
Grafikon 22 prikazuje vrednosti horizontalne in vertikalne komponente reakcije v podpori zaradi sile v spodnji membrani, ki je posledica začetnega zračnega pritiska 1000 Pa in maksimalne dopustne obremenitve s snegom $q_{s,max}$, v odvisnosti od razlike med začetnima višinama zgornje in spodnje membrane pri ponjavah, prikazanih v Preglednici 21. Sila v zgornji membrani je pri maksimalni dopustni obremenitvi s snegom enaka nič, zato v podporah ne povzroča reakcij. Komponente reakcije v podporah zaradi sile v spodnji membrani, prikazane na Grafikonu 22, so torej edine reakcije, ki se pri takšni obremenitvi pojavijo v podporah. Vertikalna komponenta reakcije je v primeru, ko je sila v zgornji membrani enaka nič, odvisna izključno od velikosti obremenitve s snegom in razpona ponjave, torej neodvisna od začetnega zračnega pritiska v ponjavi in začetnih višin membran, njena vrednost pa je enaka obremenitvi s snegom pomnoženi s polovico razpona. Ta komponenta reakcije tako določa silo v spodnji membrani in s tem tudi horizontalno komponento reakcije. Sive črte, ki prikazujejo vrednost sile v spodnji membrani pri različnih razponih, se po presežku vrednosti 10000 N/m zaradi spremembe deformabilnosti membrane prelomijo. Sila v membrani od tu naprej narašča počasneje, saj so raztezki membrane pri enakem povečanju sile v membrani po dosegu vrednosti 10000 N/m za faktor 1,5 večji kot prej. Posledično se zaradi loma črt, ki prikazujejo vrednosti sil v spodnji membrani, prelomijo tudi črte horizontalnih komponent reakcij.

Večja kot je razlika med začetnima višinama zgornje in spodnje membrane, večje je razmerje med vrednostma vertikalne in horizontalne komponente reakcije. Pri najmanjši razliki začetnih višin predstavlja vertikalna komponenta reakcije skoraj 80% vrednosti horizontalne komponente reakcije, pri največji razliki pa že manj kot 50%. Razlog za čedalje večjo razliko med obema komponentama je ta, da je končna višina spodnje membrane, ki je edina obremenjena membrana, največja pri najmanjši razliki začetnih višin. Večja kot je namreč začetna višina neobremenjene spodnje membrane, večja je tudi končna višina te membrane po uravnoteženju obremenitev. Pri večji končni višini spodnje membrane, je tudi kot med tangento na membrano in horizontalo v točki podpiranja večji, zato je za uravnoteženje vertikalne komponente reakcije, določene z obremenitvijo s snegom in razponom ponjave, potrebna manjša sila v membrani. Razmerje med vertikalno in horizontalno komponento

reakcije torej določa kot med tangento na membrano in horizontalo v točki podpiranja, ki pa je odvisen od končne višine spodnje membrane. Končne višine spodnje membrane pri maksimalni dopustni obremenitvi s snegom so za različne razpone ponjave in razlike v začetnih višinah nedeformiranih membran (po Preglednici 21) prikazane na Grafikonu 23.



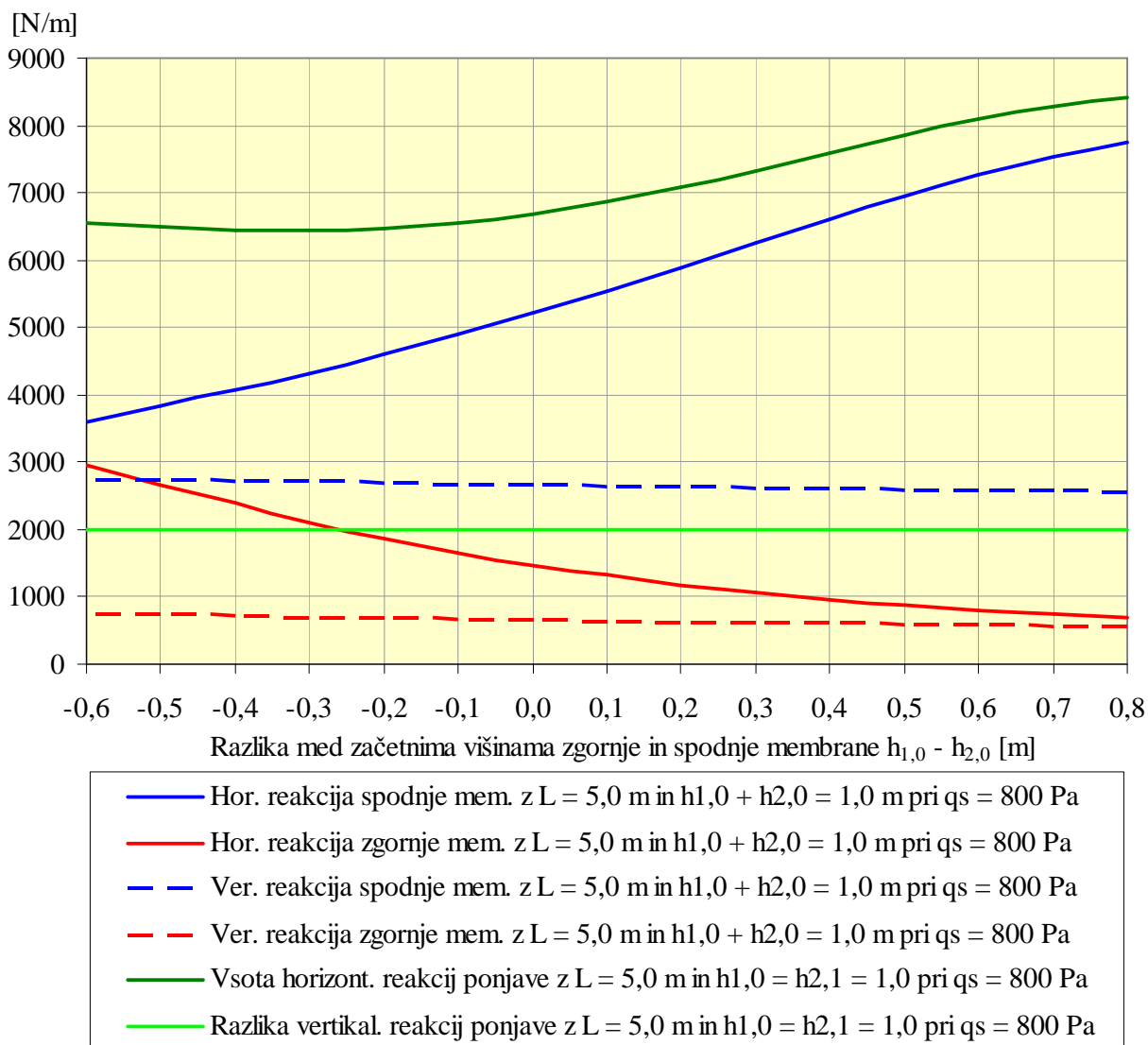
Grafikon 22: Sila v spodnji membrani in komponente reakcij v podporah pri ponjavah z različnimi razponi L in začetnimi višinami nedeformiranih membran $h_{1,0}$ in $h_{2,0}$, prikazanimi v Preglednici 21, pri začetnem zračnem pritisku 1000 Pa in maksimalni dopustni obremenitvi s snegom v odvisnosti od razlike začetnih višin obeh membran.



Grafikon 23: Začetne višine neobremenjenih spodnjih membrani in končne višine teh membran obremenjenih z začetnim zračnim pritiskom 1000 Pa in maksimalno dopustno obremenitvijo s snegom $q_{s,max}$ pri ponjavah z različnimi razponi L in začetnimi višinami nedeformiranih membran $h_{1,0}$ in $h_{2,0}$, prikazanimi v Preglednici 21.

Iz Grafikona 23 je razvidno, da je pri večji začetni višini neobremenjene spodnje membrane $h_{2,0}$ (sive črte), večja tudi njena končna višina $h_{2,K}$ (barvne črte) zaradi obremenitve z začetnim zračnim pritiskom p_z in maksimalne dopustne obremenitve s snegom q_s , čeprav je pri manjših začetnih višinah spodnje membrana sprememba višine zaradi obremenitve večja. Višina spodnje membrane se zaradi obremenitve pri najmanjši razliki začetnih višin pri vseh treh različnih razponih poveča za približno 7,6%, medtem ko se pri največjih razlikah začetnih višin pri razponu $L = 5,0$ m poveča za kar 480%, pri razponu $L = 4,5$ m za 400%, pri

razponu $L = 4,0$ pa za 324 %. Kljub takšnemu povečanju višine pa še vedno velja, da so pri večjih začetnih višinah spodnjih membran tudi končne višine raztegnjenih membran večje. Pri povečevanju razlike med začetnima višinama zgornje $h_{1,0}$ in spodnje $h_{2,0}$ membrane se končne vrednosti višin približujejo vrednosti 0,58 m pri razponu $L = 5,0$ m, vrednosti 0,50 m pri razponu $L = 4,5$ m in vrednosti 0,42 m pri razponu $L = 4,0$ m.



Grafikon 24: Horizontalne in vertikalne komponente reakcij v podporah ponjave z razponom $L = 5,0$ m pri začetnem zračnem pritisku 1000 Pa in obremenitvi s snegom 800 Pa v odvisnosti od razlike začetnih višin obeh membran $h_{1,0}$ in $h_{2,0}$, prikazanih v Preglednici 21.

Na Grafikonu 24 je prikazano, kako se v odvisnosti od razlike začetnih višin nedeformiranih membran spreminjajo komponente reakcij v podporah ponjave z razponom 5,0 m pri začetnem zračnem pritisku 1000 Pa in obremenitvijo s snegom 800 Pa. Ker je obremenitev s snegom manjša od začetnega zračnega pritiska, je razlika pritiskov na zgornjo membrano večja od 200 Pa, zato je obremenjena tudi zgornja membrana. Na spodnjo membrano ponjave obremenjene s snegom neposredno deluje le končni zračni pritisk v ponjavi, ki je zaradi zmanjšanja višine zgornje membrane oz. zmanjšanja prostornine stisnjene zraka v ponjavi nekoliko večji od začetnega zračnega pritiska 1000 Pa. Ker je v tem primeru razlika pritiskov na spodnjo membrano 5-krat večja od razlike pritiskov na zgornjo membrano, je logično, da so tudi membranske sile in reakcije, ki jih te povzročajo v podporah, za spodnjo membrano večje kot za zgornjo.

Sila v membrani je odvisna tako od razlike pritiskov na membrano kot tudi od višine membrane oz. radija ukrivljenosti membrane (Young-Laplaceova enačba). V primeru, prikazanem na Grafikonu 24, je razlika pritiskov na zgornjo in spodnjo membrano pri različnih začetnih višinah membran približno konstantna, zato se sila v membranah spreminja predvsem zaradi spreminjanja začetnih ukrivljenosti membran oz. njihovih začetnih višin. Večji kot je radij ukrivljenosti membrane oz. manjša kot je njena višina, večja je sila v membrani. Višina spodnje membrane je največja pri najmanjši vrednosti razlike začetnih višin membran na abscisni osi Grafikona 24, zato je sila v spodnji membrani in z njo povezana horizontalna komponenta reakcije v podpori pri tej vrednosti najmanjša in se z večanjem razlike začetnih višin povečuje. Obratno velja za zgornjo membrano, katere višina je največja pri največji vrednosti razlike začetnih višin, zato sta pri tej vrednosti sila v membrani in njena horizontalna komponenta reakcije v podpori najmanjši in se z manjšanjem razlike začetnih višin povečujeta.

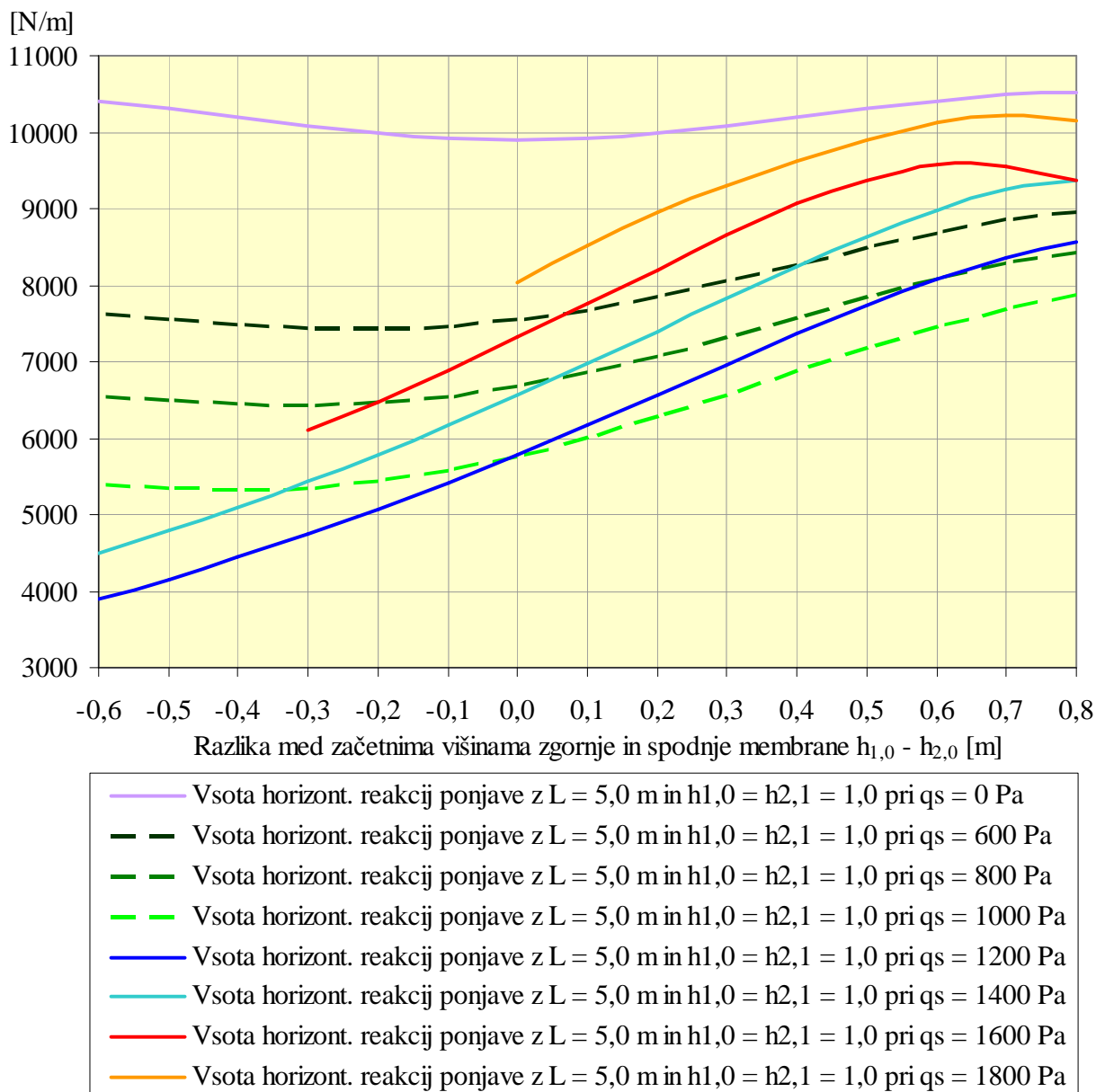
Kot je bilo omenjeno že na začetku tega poglavja, je hierarhija vseh sil in komponent reakcij sledeča: horizontalna komponenta reakcije je odvisna od sile v membrani, sila v membrani je odvisna od vertikalne komponente reakcije, vertikalna komponenta reakcije pa je odvisna od razlike pritiskov na membrano. Za določitev velikosti vertikalne komponente reakcije je torej potrebno poznati vrednost končnega zračnega pritiska v ponjavi in vse zunanje obremenitve (v tem primeru je to obremenitev s snegom). Ker vertikalna komponenta reakcije posamezne

membrane ni odvisna od višine membrane, je njena vrednost pri konstantni velikosti obremenitve s snegom konstantna, kar je razvidno tudi iz Grafikona 24. Razlika vertikalnih komponent reakcij zgornje in spodnje membrane je pri obremenitvi izključno z zračnim pritiskom vedno enaka nič, ne glede na začetne višine membran, pri enakomerno porazdeljeni zunanji obremenitvi s snegom pa je enaka vrednosti te obremenitve pomnoženi s polovico razpona ponjave. Njena vrednost je torej neodvisna od začetnega ali končnega zračnega pritiska v ponjavi, odvisna je le od razpona ponjave in vrednosti zunanje obremenitve. V primeru z Grafikona 24 razlika vertikalnih komponent reakcij znaša 2000 N/m, kar je enako zmnožku obremenitve s snegom 800 Pa ($\text{Pa} = \text{N/m}^2$) in polovice razpona $L/2 = 2,5$ m.

Vertikalni komponenti reakcij zgornje in spodnje membrane zaradi nasprotnih ukrivljenosti delujeta v nasprotnih smereh, medtem ko horizontalni komponenti obeh membran delujeta v isti smeri, zato se ju sešteva. Njuna vsota je na Grafikonu 24 prikazana z zeleno črto. Ker je pri konstantni vsoti začetnih višin vrednost horizontalne komponente reakcije zgornje membrane največja, ko je horizontalna komponenta reakcije spodnje membrane najmanjša, se njuna vsota s spreminjanjem razlike začetnih višin membran ne spreminja toliko kot vrednosti posamezne horizontalne komponente. Vsota horizontalnih komponent se pri povečevanju razlike med začetnima višinama zgornje in spodnje membrane povečuje, saj se ob tem povečuje tudi vrednost horizontalne komponente reakcije spodnje membrane, ki je v prikazanem primeru obremenjena s 5-krat večjo razliko pritiskov kot zgornja membrana. Horizontalne komponente reakcij spodnje membrane so tako pri vseh razmerjih začetnih višin večje od komponent reakcij spodnje membrane, zato je tudi vsota horizontalnih komponent obeh membran bolj odvisna od spodnje membrane.

Grafikon 25 prikazuje spreminjane vsote horizontalnih komponent reakcij pri različno velikih obremenitvah s snegom v odvisnosti od razlike začetnih višin membran. Vsota horizontalnih komponent reakcij se pri obremenitvah s snegom, ki so manjše ali enake začetnemu zračnemu pritisku v ponjavi, spreminja podobno kot na Grafikonu 24, njene vrednosti pa se z večanjem obremenitve s snegom zmanjšujejo. Pri obremenitvah s snegom, ki so večje od začetnega zračnega pritiska v ponjavi, pa je zgodba obratna, saj se vrednosti vsote horizontalnih komponent reakcij povečujejo z naraščanjem obremenitve s snegom. V tem primeru je končni zračni pritisk v ponjavi enak obremenitvi s snegom, zato je razlika pritiskov na zgornjo

membrano enaka nič in obremenitve v celoti prevzame nase spodnja membrana. Vsota horizontalnih komponent reakcij je takrat enaka vrednosti horizontalne komponente reakcije spodnje membrane, zato se njene vrednosti v odvisnosti od razlike začetnih višin membran spreminjajo podobno kot horizontalne komponente reakcij spodnje membrane na Grafikonu 24.



Grafikon 25: Vsota horizontalnih reakcij v podporah ponjave z razponom $L = 5,0$ m pri začetnem zračnem pritisku 1000 Pa in različnih obremenitvah s snegom q_s v odvisnosti od razlike začetnih višin obeh membran $h_{1,0}$ in $h_{2,0}$, prikazanih v Preglednici 21.

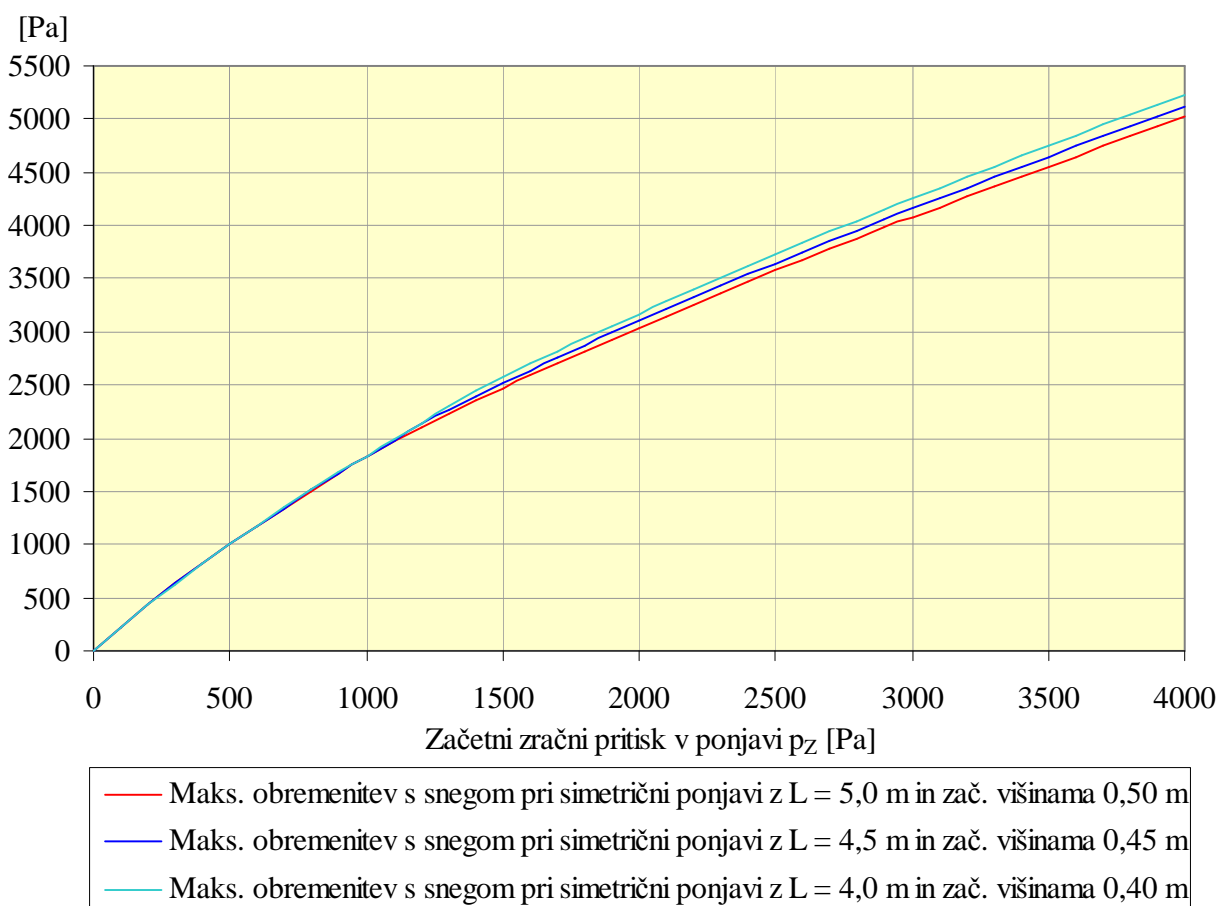
Črte, ki predstavljajo vsoto horizontalnih reakcij pri obremenitvi s snegom 1600 Pa in 1800 Pa, so krajše od ostalih črt, saj je zgornja membrana stabilna le pri prikazanih razlikah med začetnima višinama zgornje in spodnje membrane, pri manjših razlikah začetnih višin pa zgornja membrana preskoči na spodnjo stran ponjave.

Vsota horizontalnih komponent reakcij obeh membran, na katero se projektira jeklene okvirje nosilne konstrukcije, se torej z večanjem obremenitve s snegom povečuje do trenutka, ko se končni zračni pritisk v ponjavi izenači z vrednostjo obremenitve s snegom, nato pa se z obremenitvijo s snegom začne večati tudi vsota horizontalnih reakcij. Iz Grafikona 25 je razvidno tudi, da obremenitev s snegom ugodno vpliva na vsoto horizontalnih komponent reakcij, saj vrednosti vsote horizontalnih komponent reakcij pri kakršnikoli obremenitvi s snegom in pri kakršnemkoli razmerju začetnih višin membran nikoli ne presežejo vrednosti pri obremenitvi izključno z začetnim zračnim pritiskom. Se pa zato z večanjem obremenitve s snegom povečuje razlika vertikalnih komponent reakcij, ki je pri obremenitvi izključno z zračnim pritiskom enaka nič. Pri dimenzioniranju jeklenih okvirjev je torej potrebno narediti dve obtežni kombinaciji, in sicer se pri prvi ponjavo obremeni le z največjim začetnim zračnim pritiskom, v drugi pa še dodatno s predpisano obremenitvijo s snegom.

9.5.6 Sile v membranah in reakcije v podporah v odvisnosti od začetnega zračnega pritiska

Na Grafikonu 26 je prikazano spreminjanje maksimalne dopustne obremenitve s snegom $q_{S,max}$ na simetričnih ponjavah različnih razponov v odvisnosti od začetnega zračnega pritiska v ponjavi p_z . Maksimalne dopustne obremenitve s snegom na vseh simetričnih ponjavah, z začetnima višinama membran enakima desetini razpona ($h_{1,0} = h_{2,0} = L/10$), so do vrednosti začetnega zračnega pritiska 1000 Pa približno enake, pri nadaljnjem povečevanju pa se razlike med njimi počasi povečujejo. Večji kot je začetni zračni pritisk v ponjavi, večja je tudi maksimalna dopustna obremenitev s snegom, ki jo ponjave prenese. Na Grafikonu 26 je spremljano spreminjanje maksimalne dopustne obremenitve s snegom do vrednosti začetnega zračnega pritiska v ponjavi 4000 Pa, kar pa ne pomeni, da ponjave večjih obremenitev ne morejo prenesti. Pri začetnem zračnem pritisku 4000 Pa in maksimalni dopustni obremenitvi s snegom je sila v spodnji membrani ponjave z razponom 5,0 m enaka 19124 N/m, kar

predstavlja 34,2% izkoriščenost natezne nosilnosti membrane, saj sila v membrani z natezno trdnostjo 2800 N/5cm ob poružitvi znaša 56000 N/m. Poleg tega tudi raztezki membrane pri povečevanju sile v membrani nad vrednostjo 20000 N/m naraščajo čedalje počasneje, kar je razvidno iz Grafikona 9 v poglavju 9.3.3 Postopek izračuna z upoštevanjem raztezka membrane. Razlog za večanje začetnega zračnega pritiska v ponjavi le do vrednosti 4000 Pa je ta, da je končna višina spodnje membrane v ponjavi z razponom 5,0 m pri takšni obremenitvi enaka 0,93 m, kar predstavlja 87% povečanje višine glede na njeno začetno višino 0,50 m. Pri maksimalni dopustni obremenitvi s snegom na ponjavi z razponom 5,0 m in začetnim notranjim zračnim pritiskom 5000 Pa je končna višina spodnje membrane skoraj že enaka 1,00 m oz. za 100% večja od začetne nedeformirane višine. Omejitev za dopustne obremenitve takšnih ponjav torej prej kot nosilnost predstavlja deformabilnost membran.

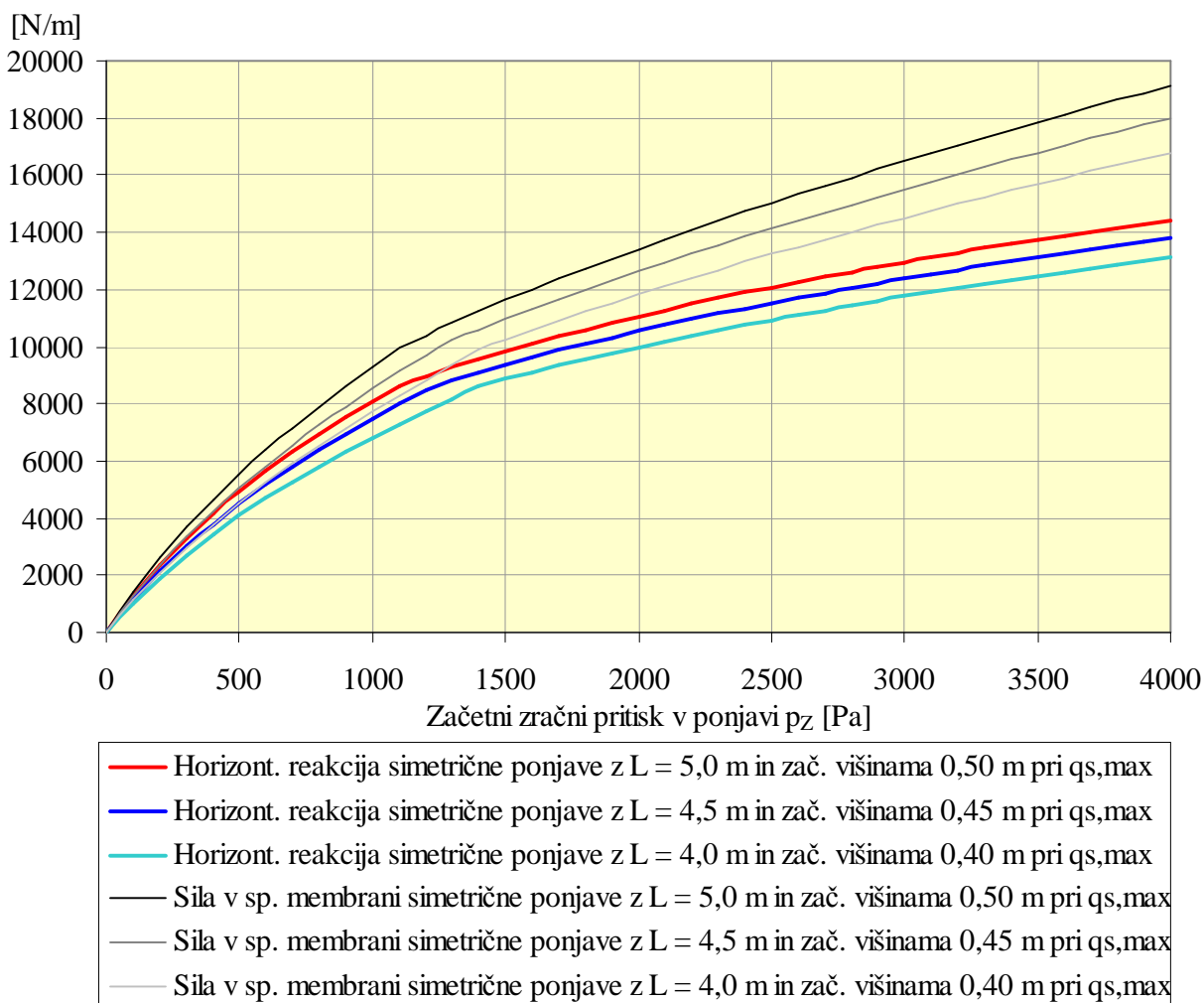


Grafikon 26: Največja dopustna obremenitev s snegom $q_{S,max}$ na simetričnih ponjavah z različnimi razponi L in začetno nedeformirano višino obeh membran $L/10$ v odvisnosti od začetnega zračnega pritiska v ponjavi p_z .

Obremenitev s snegom na strehah z naklonom manjšim od 30° v Jesenicah znaša $2,52 \text{ kN/m}^2$ oz 2520 Pa . Projektno vrednost obremenitve s snegom, v primeru ko je sneg prevladujoča spremenljiva obtežba, dobimo tako, da karakteristično vrednost obremenitve s snegom 2520 Pa pomnožimo z varnostnim faktorjem $1,5$, kar znese 3780 Pa . Zračni pritisk v ponjavi z razponom $5,0 \text{ m}$ mora za prevzem takšne obremenitve znašati vsaj 2700 Pa .

Če pri enaki obremenitvi s snegom, ki je večja od začetnega zračnega pritiska v ponjavi, povečamo začetni zračni pritisk v ponjavi, vrednosti obeh komponent reakcij in sile v spodnji membrani ostanejo enake, saj so te vrednosti odvisne od končnega zračnega pritiska v ponjavi, ta pa je pri zunanjih obremenitvah, večjih od začetnega zračnega pritiska v ponjavi, kar enak vrednosti zunanje obremenitve, zato so reakcije v podporah in sile v spodnji membrani pri takšnih obremenitvah odvisne le od zunanje obremenitve in ne od začetnega zračnega pritiska. Pri povečevanju vrednosti začetnega zračnega pritiska v ponjavi se povečuje le višina zgornje membrane, saj ta s spremembo prostornine stisnjenega zraka v ponjavi kompenzira razliko med začetnim in končnim zračnim pritiskom v ponjavi. Začetni zračni pritisk v ponjavi pa mora biti seveda dovolj velik, da lahko prevzame obremenitev s snegom oz. da je potrebna sprememba prostornine stisnjenega zraka v ponjavi za potrebno povečanje zračnega pritiska v ponjavi dovolj majhna, da je končna višina zgornje membrane še vedno večja od nič.

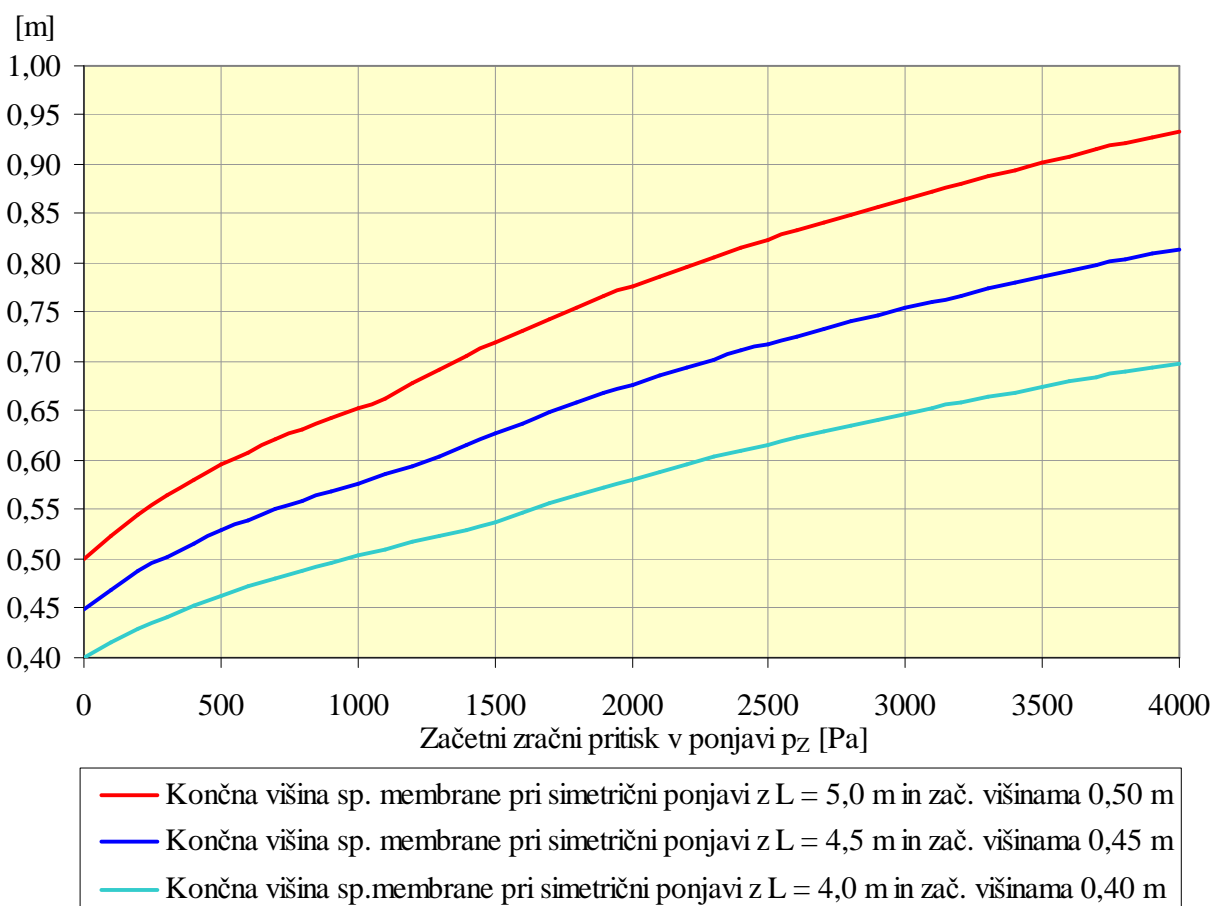
Za prevzem projektne obremenitve s snegom v Jesenicah, ki je enaka 3780 Pa , je potreben začetni zračni pritisk v ponjavi vsaj 2700 Pa . Pri tej vrednosti začetnega zračnega pritiska je višina zgornje membrane približno enaka nič. Če bi bil začetni zračni pritisk v ponjavi za 100 Pa večji, ne bi bile reakcije v podporah in sila v spodnji membrani nič drugačne, saj bi bil končni pritisk v ponjavi še vedno enak vrednosti obremenitve s snegom, večja pa bi bila končna višina zgornje membrane, in sicer za $3,2 \text{ cm}$. Pri obremenitvah s snegom, ki so večje od začetnega zračnega pritiska v ponjavi, se torej s povečevanjem začetnega zračnega pritiska povečuje le višina zgornje membrane in s tem tudi vrednost maksimalne dopustne obremenitve s snegom, reakcije v podporah in sile v spodnji membrani pa ostajajo enake. Večji začetni zračni pritisk v ponjavi pri obremenitvah s snegom torej deluje ugodno, zato se njegove vrednosti pri obtežni kombinaciji, kjer je sneg prevladujoča spremenljiva obtežba, ne sme povečevati z varnostnimi faktorji.



Grafikon 27: Končna sila v spodnji membrani $P_{2,K}$ in horizontalna komponenta reakcije v podpori $H_{2,K}$ pri simetričnih ponjavah z različnimi razponi L in začetno nedeformirano višino membran $L/10$ pri največji dopustni obremenitvi s snegom $q_{s,max}$ v odvisnosti od začetnega zračnega pritiska v ponjavi p_z .

Na Grafikonu 27 je prikazano spreminjanje horizontalnih komponent reakcij v podporah in sile v spodnji membrani v odvisnosti od začetnega zračnega pritiska v ponjavah z različnimi razponi in pripadajočimi maksimalnimi dopustnimi obremenitvami s snegom. Prikazane vrednosti so torej največje možne vrednosti zaradi obremenitve s snegom pri določenem začetnem zračnem pritisku. Razvidno je, da se tanke sive črte, ki predstavljajo sile v spodnji membrani pri različnih razponih, pri vrednosti 10000 N/m lomijo, saj se pri tej vrednosti spremeni deformabilnost membrane, predpostavljena na Grafikonu 10 v poglavju 9.3.3. Postopek izračuna z upoštevanjem raztezka membrane. Istočasno se lomijo tudi barvne črte,

ki predstavljajo horizontalne komponente reakcij v podporah. Razvidno je, da se horizontalne komponente reakcij s povečevanjem začetnega zračnega pritiska v ponjavi in pripadajoče maksimalne dopustne obremenitve s snegom povečujejo počasneje kot sile v spodnji membrani. Razlog za takšno obnašanje je ta, da se z večanjem obremenitev povečuje višina spodnje membrane in s tem tudi kot med horizontalo in tangento v točki podpiranja, zato v podporah čedalje večji delež sile v membrani prevzema vertikalna komponenta reakcije, ki je enaka obremenitvi s snegom pomnoženi s polovico razpona, horizontalna komponenta reakcije pa prevzema čedalje manjši delež. Takšno obnašanje je za nosilno jekleno konstrukcijo ugodno. Tudi pri začetnem zračnem pritisku 4000 Pa s pripadajočo maksimalno obremenitvijo s snegom, ki znaša več kot 5000 Pa, horizontalne komponente reakcij ne presežejo vrednosti 15000 N/m, kar je ekvivalentno obremenitvi z 1,5 tone na tekoči meter.



Grafikon 28: Končna višina deformirane spodnje membrane $h_{2,K}$ pri simetričnih ponjavah z različnimi razponi L in začetno nedeformirano višino membran $L/10$ pri največji dopustni obremenitvi s snegom $q_{s,max}$ v odvisnosti od začetnega zračnega pritiska v ponjavi p_z .

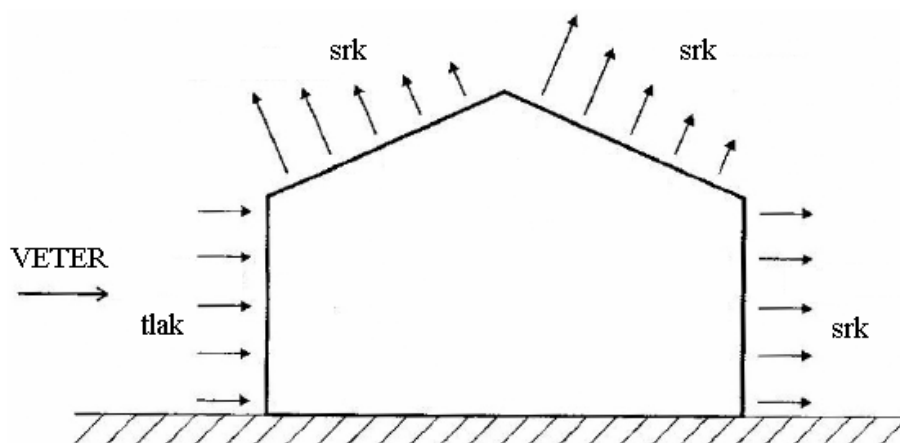
Grafikon 28 prikazuje vrednosti končne višine spodnje membrane obremenjene z začetnim zračnim pritiskom in pripadajočo maksimalno dopustno obremenitvijo s snegom. Tudi črte, ki povezujejo te vrednosti se lomijo v točki, ko sila v spodnji membrani preseže vrednosti 10000 N/m, pri kateri se deformabilnost membrane poveča. Končna višina se z večanjem obremenitev na začetku najhitreje povečuje, saj je začetni radij loka membrane največji, sila v membrani pa je po Young-Laplaceovi enačbi enaka zmnožku radija loka membrane in razlike porazdeljene obremenitve nanjo. Z večanjem razlike obremenitev na spodnjo membrano se zaradi raztezanja membrane njena višina povečuje, radij pa se zmanjšuje, zato sila v membrani narašča počasneje, kot bi v primeru, če bi bila deformabilnost membrane manjša.

Obremenitev s snegom bi se lahko pri pnevmatskih ponjavah zmanjšala tudi tako, da bi se v ponjavo vpihoval topel zrak, ki bi povzročil topljenje snega. V tem primeru bi npr. v Jesenicah pozimi za prenašanje obremenitve s snegom zadoščal že veliko manjši začetni zračni pritisk v ponjavi, posledično pa bi bili manjši tudi raztezki spodnje membrane.

9.6 Sile v membranah in reakcije v podporah zaradi obremenitve z vetrom

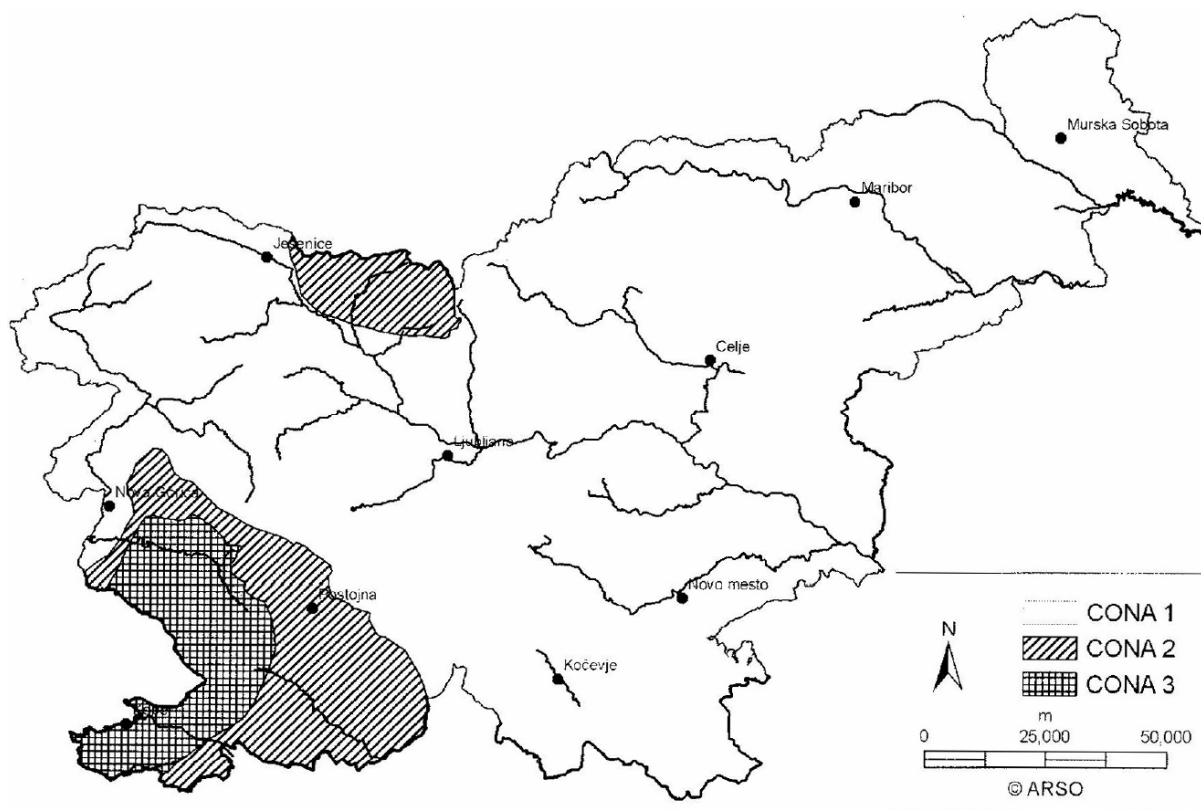
V primeru, ko veter na streho iz dvoslojne pnevmatske ponjave deluje tlačno, se ponjava obnaša enako kot pri obremenitvi s snegom, zato je postopek izračuna membranskih sil in reakcij v podporah pri tlačni obremenitvi z vetrom enak postopku izračuna pri obremenitvi s snegom, opisanem v poglavju 9.5 Sile v membranah in reakcije v podporah zaradi obremenitve s snegom. Veter pa lahko na streho hale deluje tudi v nasprotni smeri (Slika 62), in sicer kot srk, ki vleče zgornjo membrano navzven. Obnašanje ponjave je v tem primeru drugačno kot pri obremenitvi s snegom.

Za lažjo predstavbo velikosti obremenitev pnevmatske ponjave zaradi srka vetra so v nadaljevanju izračunane vrednosti največjega srka vetra na strehi z naklonom 15° za nekaj večjih krajev v Sloveniji. Obtežba z vetrom na strehi je določena po Evrokod standardu SIST EN 1991-1-4:2005 in nacionalnem dodatku SIST EN 1991-1-4:2005/oA101.



Slika 62: Primer zunanjih obremenitev zaradi vetra na ploskve stavbe.

Za določitev zunanjega tlaka na strehi zaradi vetra je potrebno poznati cono, v kateri stoji objekt (Slika 63), faktor izpostavljenosti (Grafikon 29), kategorijo terena ter višino in naklon strehe objekta.



Slika 63: Razdelitev Slovenije na cone za določitev temeljne vrednosti osnovne hitrosti vetra.

Temeljna vrednost osnovne hitrosti vetra $v_{b,0}$:

Cona 1 (večina Slovenije):

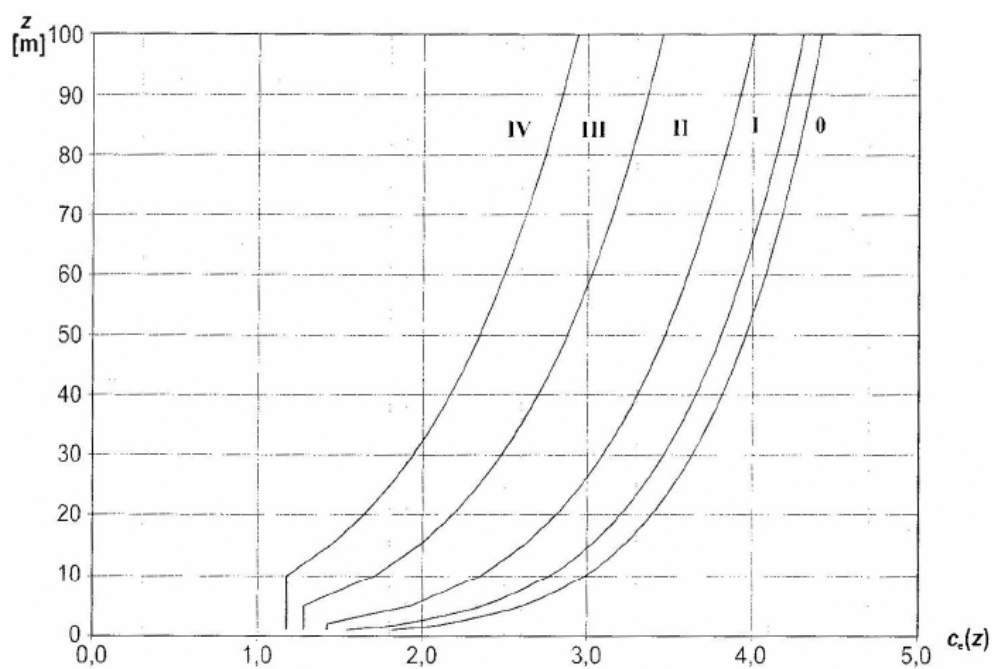
- 20 m/s pod 800 m,
- 25 m/s od 800 m do 1600 m,
- 30 m/s od 1600 m do 2000 m,
- 40 m/s nad 2000 m.

Cona 2 (Trnovski gozd, Notranjska, Karavanke):

- 25 m/s pod 1600 m,
- 30 m/s od 1600 m do 2000 m,
- 40 m/s nad 2000 m.

Cona 3 (Primorje, Kras in del Vipavske doline):

- 30 m/s



Grafikon 29: Faktor izpostavljenosti $c_e(z)$ v odvisnosti od višine objekta za različne kategorije terena pri faktorju hribovitosti $c_0(z) = 1,0$ (raven teren) in turbulenčnemu faktorju $k_1 = 1,0$.

Kategorije terena:

- 0 Morsko ali obalno področje, izpostavljeno proti odprtemu morju
- I Jezersko ali ravninsko področje z zanemarljivim rastlinjem in brez ovir
- II Področje z nizkim rastlinjem (trava) in posameznimi ovirami (drevesi, stavbami) na razdalji najmanj 20 višin ovir
- III Področja z običajnim rastlinjem ali stavbami ali s posameznimi ovirami na razdalji največ 20 višin ovir (vasi, podeželsko okolje, stalni gozd)
- IV Področje, kjer je najmanj 15% površine pokrite s stavbami s povprečno višino več kot 15 m

Za določitev obremenitve z vetrom na obravnavani strehi jeklenega objekta iz dvoslojnih pnevmatskih ponjav predpostavimo:

- da objekt stoji na terenu kategorije II,
- da je višina objekta $z = 10$ m in
- da je naklon dvokapne strehe $\alpha = 15^\circ$.

Osnovni tlak vetra:
$$q_b = 0,5 \cdot \rho \cdot v_{b,0}^2 = 0,5 \cdot 1,25 \text{ kg/m}^3 \cdot v_{b,0}^2 \quad (65)$$

Tlak pri največji hitrosti pri sunkih vetra:
$$q_p(z = 10\text{m}) = c_e(z = 10\text{m}) \cdot q_b = 2,35 \cdot q_b \quad (66)$$

Zunanji tlak na strehi:
$$w_e = q_p(z = 10\text{m}) \cdot c_{pe,10} \quad (67)$$

Kjer je:

$v_{b,0}$ osnovna hitrost vetra,

ρ gostota zraka,

$c_e(z)$ faktor izpostavljenosti (glede na kategorijo terena in višino strehe se ga odčita iz Grafikona 29),

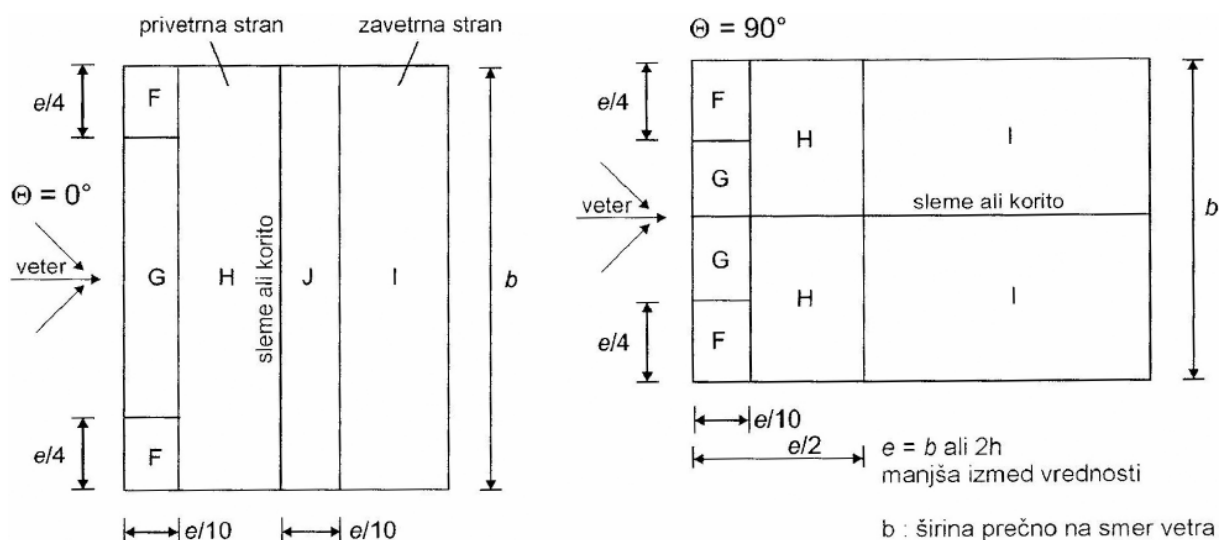
z višina strehe,

$c_{pe,10}$ koeficient zunanjega tlaka za površine večje od 10 m^2 .

Če enačbe od (65) do (67) združimo in upoštevamo, da najbolj negativen koeficient zunanjega tlaka vetra $c_{pe,10} = -1,9$ za dvokapnice z naklonom 15° dobimo pri smeri vetra vzporedno s

slemenom objekta na področju F (Slika 64), lahko velikost največjega srka vetra na strehi izračunamo po enačbi (68).

$$w_e = 2,35 \cdot 0,5 \cdot 1,25 \text{ kg/m}^3 \cdot v_{b,0}^2 \cdot (-1,9) = -2,79 \text{ kg/m}^3 \cdot v_{b,0}^2 \quad (68)$$



Slika 64: Razdelitev zgornje ploskve strehe na področja pri smeri vetra pravokotno na sleme (levo) in pri smeri vetra vzporedno s slemenom (desno).

Karakteristična vrednost največjega srka vetra na strehi v različnih krajih Slovenije:

- Ljubljana (Cona 1, $v_{b,0} = 20$ m/s):

$$w_e = -2,73 \text{ kg/m}^3 \cdot v_{b,0}^2 = -2,79 \text{ kg/m}^3 \cdot 20^2 \text{ m}^2/\text{s}^2 = -1116 \text{ N/m}^2 = -1116 \text{ Pa}$$

- Postojna (Cona 2, $v_{b,0} = 25$ m/s):

$$w_e = -2,73 \text{ kg/m}^3 \cdot v_{b,0}^2 = -2,79 \text{ kg/m}^3 \cdot 25^2 \text{ m}^2/\text{s}^2 = -1744 \text{ N/m}^2 = -1744 \text{ Pa}$$

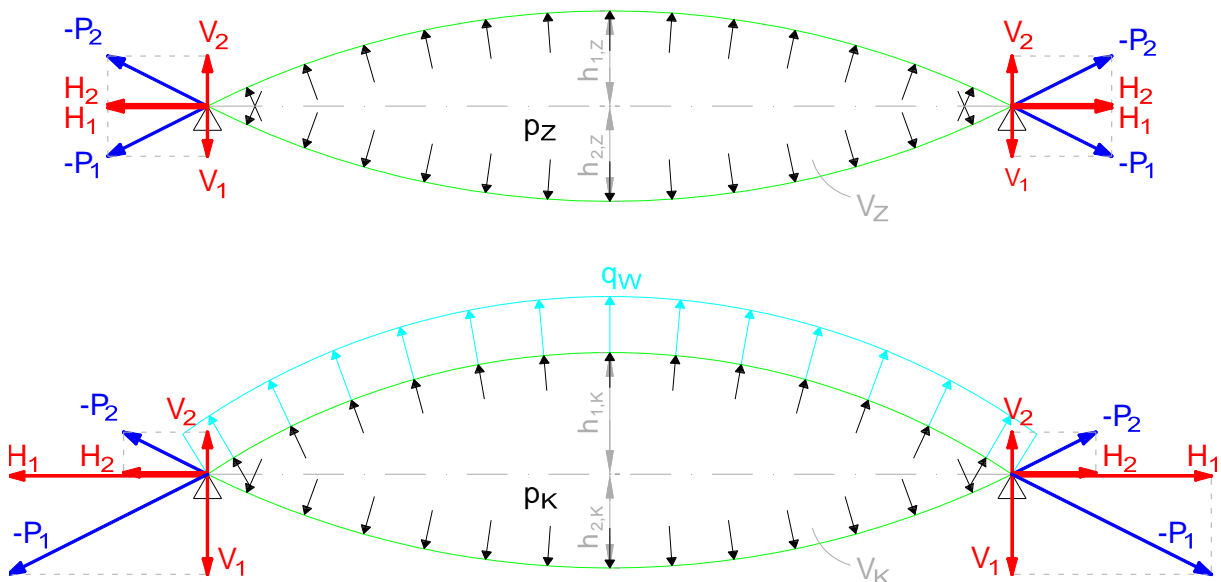
- Koper (Cona 4, $v_{b,0} = 30$ m/s):

$$w_e = -2,73 \text{ kg/m}^3 \cdot v_{b,0}^2 = -2,79 \text{ kg/m}^3 \cdot 30^2 \text{ m}^2/\text{s}^2 = -2511 \text{ N/m}^2 = -2511 \text{ Pa}$$

(Beg, D. (Ur.), Pogačnik A. (Ur.). 2009. Priročnik za projektiranje gradbenih konstrukcij po evrokod standardih. Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije: 1-75 str.)

9.6.1 Obnašanje dvoslojne pnevmatske ponjave pod obremenitvijo s srkom vetra

Obremenitev s srkom vetra tako kot obremenitev s snegom neposredno deluje le na zgornjo membrano ponjave, vendar za razliko od obremenitve s snegom silo v zgornji membrani povečuje. Pri povečevanju obremenitve s snegom se je namreč razlika pritiskov na zgornjo membrano zmanjševala, zato se je zmanjševala tudi sila v membrani, pri povečevanju obremenitve s srkom vetra pa se razlika pritiskov na zgornjo membrano povečuje, s tem pa se povečuje tudi sila v membrani, zaradi česar se membrana dodatno raztegne. Zaradi prirastka raztezka zgornje membrane se poveča višina te membrane in s tem tudi prostornina stisnjenga zraka na tekoči meter preseka ponjave. Po Boylovem zakonu je pri konstantni temperaturi zmnožek prostornine in tlaka plina konstantna vrednost, torej se pri povečanju prostornine zraka v ponjavi zmanjša zračni pritisk v ponjavi. Končni zračni pritisk v ponjavi je tako pri obremenitvi s srkom vetra manjši od začetnega zračnega pritiska in ker je zračni pritisk edina obremenitev, ki neposredno deluje na spodnjo membrano, se sila v spodnji membrani zaradi srka vetra zmanjša.



Slika 65: Sile v membranah dvoslojne pnevmatske ponjave in komponente reakcij v podporah pri obremenitvi z zračnim pritiskom (zgoraj) in z dodatno obremenitvijo s srkom vetra (spodaj).

9.6.2 Postopek izračuna končnega zračnega pritiska v ponjavi in končnih viših membran

V tem poglavju je opisan postopek izračuna končnega zračnega pritiska p_K ter končnih viših membran $h_{1,K}$ in $h_{2,K}$ dvoslojne pnevmatske ponjave pri obremenitvi z zunanjim srkom vetra. Vhodni podatki so začetni zračni pritisk v ponjavi p_Z in pripadajoči višini zgornje $h_{1,Z}$ in spodnje membrane $h_{2,Z}$, obremenjene z začetnim zračnim pritiskom p_Z , ki se jih izračuna po postopku, opisanem v poglavju 9.3.3 Postopek izračuna z upoštevanjem raztezka membrane. Vse količine s prvim indeksom 1 se nanašajo na zgornjo membrano, vse količine s prvim indeksom 2 pa na spodnjo membrano. Vse količine z drugim indeksom Z se nanašajo na začetno stanje ponjave pred zmanjšanjem prostornine stisnjene zraka v ponjavi oz. pred povečanjem zračnega pritiska v ponjavi zaradi dodatne obremenitve ponjave, vse količine z drugim indeksom K pa se nanašajo na končno stanje ponjave, torej po zmanjšanju prostornine oz. povečanju zračnega pritiska v ponjavi zaradi dodatne obremenitve ponjave.

1.) Z enačbo (69) se izračuna začetna prostornina stisnjene zraka na tekoči meter preseka ponjave V_Z pri obremenitvi izključno z začetnim zračnim pritiskom p_Z .

$$V_Z = \frac{R_{1,Z}^2}{2} \cdot (\Theta_{1,Z} - \sin \Theta_{1,Z}) + \frac{R_{2,Z}^2}{2} \cdot (\Theta_{2,Z} - \sin \Theta_{2,Z}) \quad (69)$$

Ob upoštevanju enačb (70) in (71), ki veljajo za krožni odsek, se lahko V_Z izrazi v odvisnosti od začetnih viših obeh membran $h_{1,Z}$ in $h_{2,Z}$ (72):

$$R = \frac{4 \cdot h^2 + L^2}{8 \cdot h} \quad (70)$$

$$\Theta = 4 \cdot \arctan\left(\frac{2 \cdot h}{L}\right) \quad (71)$$

$$V_Z(h_{1,Z}; h_{2,Z}) = \left(\frac{4 \cdot h_{1,Z}^2 + L^2}{8 \cdot h_{1,Z}}\right)^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left[4 \cdot \arctan\left(\frac{2 \cdot h_{1,Z}}{L}\right) - \sin\left(4 \cdot \arctan\left(\frac{2 \cdot h_{1,Z}}{L}\right)\right)\right] + \left(\frac{4 \cdot h_{2,Z}^2 + L^2}{8 \cdot h_{2,Z}}\right)^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left[4 \cdot \arctan\left(\frac{2 \cdot h_{2,Z}}{L}\right) - \sin\left(4 \cdot \arctan\left(\frac{2 \cdot h_{2,Z}}{L}\right)\right)\right] \quad (72)$$

2.) Na začetku se predpostavi, da je končna višina spodnje membrane $h_{2,K}$ enaka njeni začetni višini $h_{2,Z}$ (73). V resnici se končna višina spodnje membrane $h_{2,K}$ nekoliko zmanjša, saj se zaradi srka vetra zračni pritisk v membrani zniža. Ta napaka bo z iteracijami izločena.

$$h_{2,K} = h_{2,Z} \quad (73)$$

3.) Iz razlike pritiskov na zgornjo membrano Δp_1 , izračunane po enačbi (74), se po postopku, opisanem v poglavju 9.3.3. Postopek izračuna z upoštevanjem raztezka membrane, izračuna končna višina zgornje membrane $h_{1,K}$.

$$\Delta p_{1,K} = p_Z + q_W \quad \rightarrow \quad h_{1,K} = h_{1,K}(\Delta p_{1,K}) \quad (74)$$

4.) Z enačbo (75) se izračuna končna prostornina stisnjenega zraka na tekoči meter preseka ponjave V_K pri obremenitvi z začetnim zračnim pritiskom p_Z in srkom vetra q_W .

$$V_K(h_{1,K}; h_{2,K}) = \left(\frac{4 \cdot h_{1,K}^2 + L^2}{8 \cdot h_{1,K}} \right)^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left[4 \cdot \arctan\left(\frac{2 \cdot h_{1,K}}{L}\right) - \sin\left(4 \cdot \arctan\left(\frac{2 \cdot h_{1,K}}{L}\right)\right) \right] + \\ + \left(\frac{4 \cdot h_{2,K}^2 + L^2}{8 \cdot h_{2,K}} \right)^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left[4 \cdot \arctan\left(\frac{2 \cdot h_{2,K}}{L}\right) - \sin\left(4 \cdot \arctan\left(\frac{2 \cdot h_{2,K}}{L}\right)\right) \right] \quad (75)$$

5.) Po Boylovem zakonu za izotermične spremembe se z enačbo (76) izračuna končni zračni pritisk v ponjavi p_K pri obremenitvi z začetnim zračnim pritiskom p_Z in srkom vetra q_W .

$$p_K = p_Z \cdot (V_Z / V_K) \quad (76)$$

6.) Zaradi povečanja prostornine stisnjenega zraka med membranama se zračni pritisk v ponjavi zniža, zato se končni višini obeh membran ponjave, določeni v 2. in 3. točki tega izračuna nekoliko zmanjšata. Dejanske vrednosti končnih višin membran $h_{1,K}$ in $h_{2,K}$, končnega zračnega pritiska v ponjavi p_K in končne prostornine stisnjenega zraka na tekoči meter preseka ponjave V_K se izračunajo iteracijsko v i -tih korakih, analogno prejšnjim

točkam izračuna, po enačbah od (77) do (84), kjer je $i \geq 2$, vrednosti z indeksom $(i-1)$ pa so za $i = 2$ določene v predhodnih točkah tega izračuna.

$$p_{Z,i} = p_{K,i-1} \quad (77)$$

$$h_{1,Z,i} = h_{1,K,i-1} \quad (78)$$

$$h_{2,Z,i} = h_{2,K,i-1} \quad (79)$$

$$V_{Z,i} = V_Z(h_{1,Z,i}; h_{2,Z,i}) \quad (80)$$

$$h_{1,K,i} = h_{1,K}(\Delta p_{1,K,i} = p_{Z,i} - q_s) \quad (81)$$

$$V_{K,i} = V_K(h_{1,K,i}; h_{2,K,i}) \quad (82)$$

$$p_{K,i} = p_{Z,i} \cdot (V_{Z,i} / V_{K,i}) \quad (83)$$

$$h_{2,K,i} = h_{2,K}(p_{K,i}) \quad (84)$$

Preglednica 22: Primer iteracijske določitve končnega pritiska v ponjavi p_K ter končnih višin zgornje $h_{1,K}$ in spodnje membrane $h_{2,K}$ s pripadajočo prostornino stisnjenega zraka v ponjavi V_K pri razponu $L = 5,0$ m in začetnima višinama nedeformiranih membran $h_{1,0} = h_{2,0} = 0,5$ m pri začetnem zračnem pritisku 1000 Pa in obremenitvijo s srkom vetra 2000 Pa.

i	p_Z [Pa]	$h_{1,Z}$ [m]	$h_{2,Z}$ [m]	V_Z [m ³ /m]	$h_{1,K}$ [m]	V_K [m ³ /m]	p_K [Pa]	$h_{2,K}$ [m]
1	1000,00	0,59531	0,59531	4,01337	0,77262	4,63062	866,70	0,58457
2	866,70	0,77262	0,58457	4,59364	0,75978	4,54848	875,31	0,58528
3	875,31	0,75978	0,58528	4,55092	0,76062	4,55387	874,74	0,58523
4	874,74	0,76062	0,58523	4,55371	0,76056	4,55351	874,78	0,58523
5	874,78	0,76056	0,58523	4,55352	0,76056	4,55354	874,78	0,58523
6	874,78	0,76056	0,58523	4,55354	0,76056	4,55354	874,78	0,58523
7	874,78	0,76056	0,58523	4,55354	0,76056	4,55354	874,78	0,58523

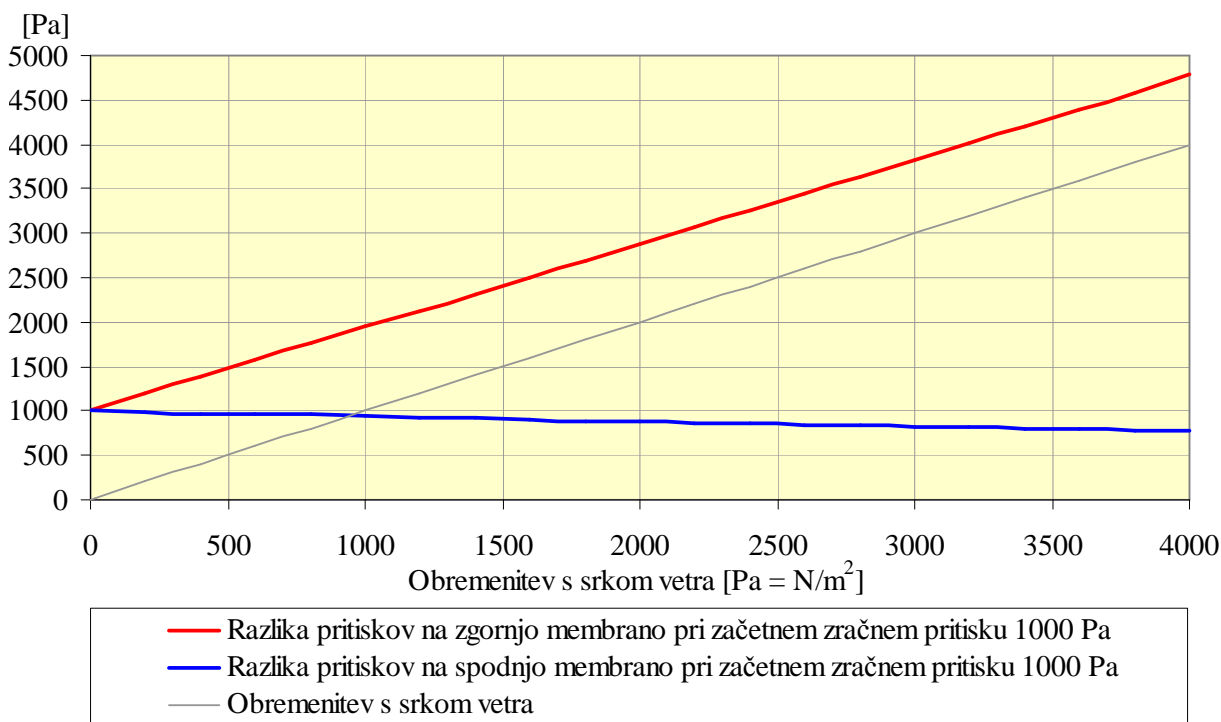
V Preglednici 22 je prikazan primer iteracijske določitve končnega pritiska v ponjavi p_K ter končnih višin zgornje $h_{1,K}$ in spodnje membrane $h_{2,K}$ s pripadajočo končno prostornino stisnjenega zraka na tekoči meter preseka ponjave V_K pri začetnem zračnem pritisku v ponjavi 1000 Pa in obremenitvijo s srkom vetra 2000 Pa. Začetne vrednosti v 1. koraku so vhodni podatki, končne vrednosti v 1. koraku so količine, izračunane od 2. do 5. točke v prej

opisanem postopku izračuna, vrednosti v vseh nadaljnjih korakih pa so izračunane po enačbah, navedenih v 6. točki postopka izračuna. Vrednosti v posameznem koraku se računajo v navedenem zaporedju od leve proti desni po enačbah od (77) do (84).

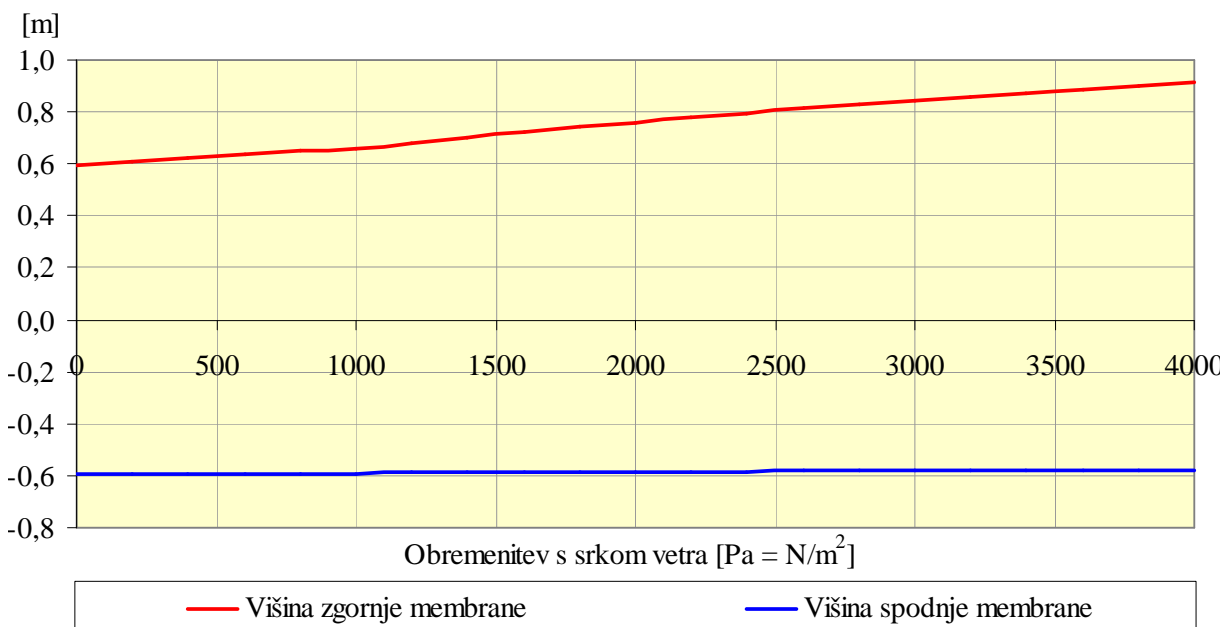
Količine v Preglednici 22 so se zelo hitro stabilizirale, saj se končne vrednosti po šestih iteracijah bistveno ne razlikujejo od končnih vrednosti v 1. koraku, zato bi za izračun sil v membranah in reakcij v podporah zadoščale že te vrednosti, pridobljene brez iteracij. Končna višina spodnje membrane $h_{2,K}$, obremenjene z zračnim pritiskom in s srkom vetra, se od začetne višine spodnje membrane $h_{2,Z}$, obremenjene izključno z začetnim zračnim pritiskom, razlikuje le za 1 cm oz. za 1,7%, kar pomeni, da je predpostavka v 2. točki postopka izračuna, ki pravi, da je končna višina spodnje membrane $h_{2,K}$ enaka njeni začetni višini $h_{2,Z}$, popolnoma upravičena.

9.6.3 Membranske sile in reakcije v odvisnosti od velikosti obremenitve zaradi srka vetra

Spreminjane razlike pritiskov na zgornjo $\Delta p_{1,K}$ in spodnjo membrano $\Delta p_{2,K}$ v odvisnosti od velikosti obremenitve s srkom vetra pri začetnem zračnem pritisku 1000 Pa prikazuje Grafikon 30. Na začetku je razlika pritiskov na zgornjo in spodnjo membrano enaka, saj nanju deluje le začetni zračni pritisk, s povečevanjem obremenitve s srkom vetra pa se začne razlika pritiskov na zgornjo membrano povečevati, vendar počasneje od naraščanja obremenitve s srkom vetra. Zaradi raztezka zgornje membrane se prostornina stisnjenega zraka v ponjavi povečuje, s tem pa se zmanjšuje zračni pritisk v ponjavi in posledično je tudi prirastek razlike pritiskov na zgornjo membrano manjši od povečanja obremenitve s srkom vetra. Razlika pritiskov na spodnjo membrano je ves čas enaka zračnemu pritisku v ponjavi, ki se z večanjem obremenitve s srkom vetra zmanjšuje, vendar ne tako hitro kot narašča razlika pritiskov na zgornjo membrano. Pri večanju obremenitve s srkom vetra do 4000 Pa zračni pritisk v ponjavi pada od začetne vrednosti 1000 Pa do vrednosti 780 Pa. Na grafikonu se obremenitev s srkom vetra povečuje le do vrednosti 4000 Pa, vendar lahko ponjava prenese tudi večje obremenitve. Obremenitev s srkom bi se lahko večala toliko časa, dokler ne bi prišlo do porušitve zgornje membrane, ob tem pa bi bil zračni pritisk v ponjavi še vedno večji od nič, kar pomeni, da bi bila višina spodnje membrane večja od nedeformirane višine 0,5 m.

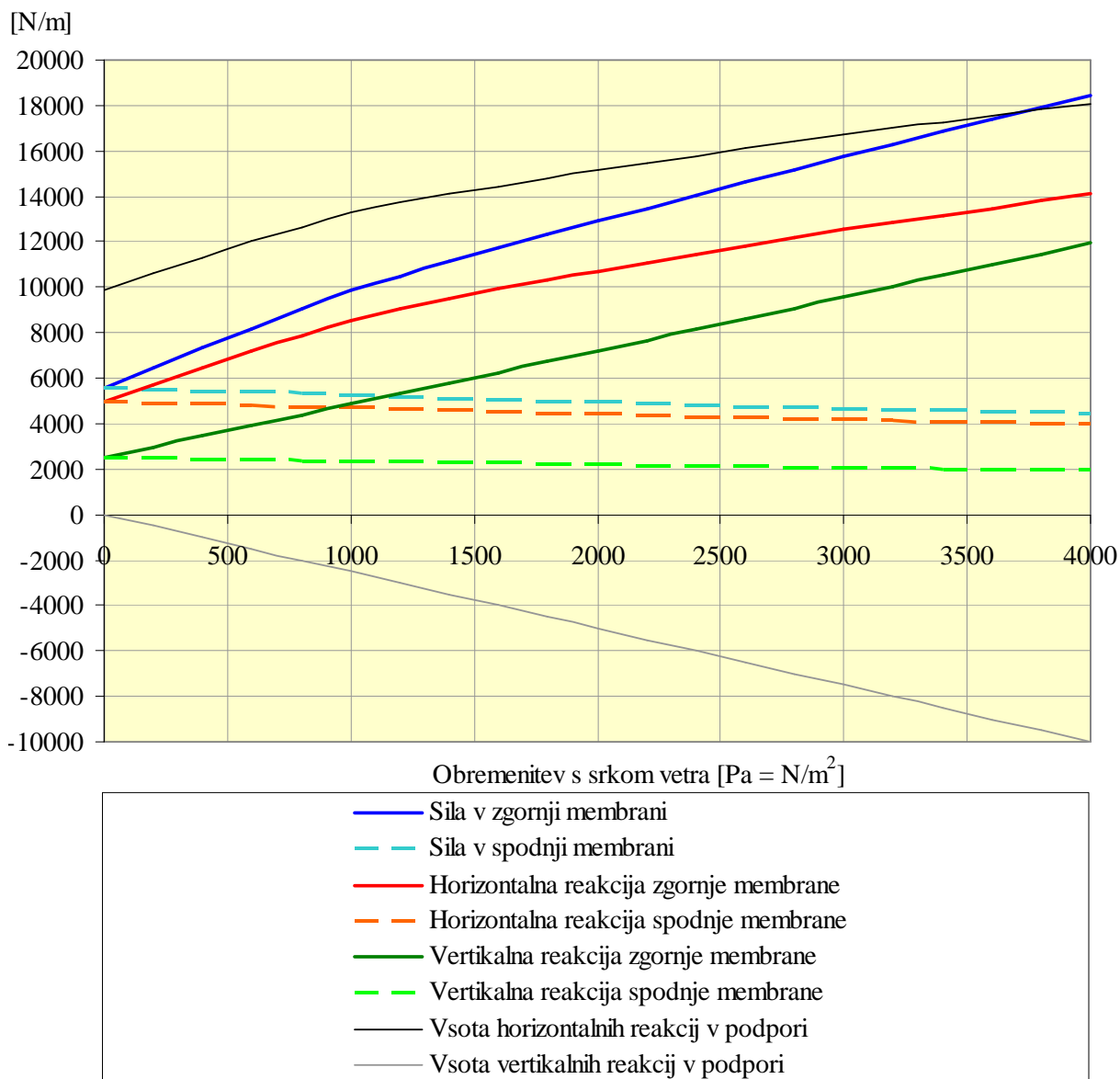


Grafikon 30: Razlika pritiskov na zgornjo $\Delta p_{1,K}$ in spodnjo $\Delta p_{2,K}$ membrano ponjave z razponom $L = 5,0$ m in začetnima višinama nedeformiranih membran $h_{1,0} = h_{2,0} = 0,5$ m v odvisnosti od velikosti obremenitve s srkom vetra q_w pri začetnem zračnem pritisku 1000 Pa.



Grafikon 31: Končna višina zgornje $h_{1,K}$ in spodnje membrane $h_{2,K}$ pri ponjavi z razponom $L = 5,0$ m in začetnima višinama nedeformiranih membran $h_{1,0} = h_{2,0} = 0,5$ m v odvisnosti od velikosti obremenitve s srkom vetra q_w pri začetnem zračnem pritisku 1000 Pa.

Na Grafikonu 31 je prikazano spreminjanje višin zgornje in spodnje membrane. Višina spodnje membrane se zelo počasi zmanjšuje, saj se počasi zmanjšuje tudi razlika pritiskov na spodnjo membrano. Razlika pritiskov na zgornjo membrano pa s povečevanjem obremenitve s srkom vetra raste mnogo hitreje, zato se zaradi raztezka zgornje membrane hitreje povečuje tudi višina te membrane.



Grafikon 32: Sile v obeh membranah in pripadajoče komponente reakcij v podporah ponjave z razponom $L = 5,0 \text{ m}$ in začetnima višinama nedeformiranih membran $h_{1,0} = h_{2,0} = 0,5 \text{ m}$ v odvisnosti od velikosti obremenitve s srkom vetra q_w pri začetnem zračnem pritisku 1000 Pa .

Iz Grafikona 32 je razvidno, da se z naraščanjem obremenitve s srkom vetra sila v zgornji membrani zelo hitro povečuje, saj srk vetra deluje na membrano v isti smeri kot zračni pritisk v ponjavi. Sila v zgornji membrani pri obremenitvi le z začetnim zračnim pritiskom 1000 Pa znaša 5547 N/m, pri dodatni obremenitvi s 1000 Pa srka vetra pa znaša že 9847 N/m. Črta, ki na grafikonu prikazuje silo v zgornji membrani, se pri srku vetra, ki je nekoliko večji od 1000 Pa, prelomi, saj se pri sili v membrani 10000 N/m spremeni deformabilnost membrane. Do vrednosti 10000 N/m je raztezek membrane pri povečanju sile v membrani za 1000 N/m enak 0,2%, po presegu vrednosti 10000 N/m pa raztezek pri enakem prirastku znaša 0,5%. Pri povečanju obremenitve s srkom vetra za 200 Pa se pred spremembo deformabilnosti membrane sila v zgornji membrani poveča za povprečno 860 Pa, po spremembi deformabilnosti pa za 570 Pa. Povečanje deformabilnosti membrane torej ugodno vpliva na silo v zgornji membrani in s tem tudi na horizontalno komponento reakcije oz. na vsoto horizontalnih komponent reakcij.

Razlika vertikalnih komponent reakcije obeh membran je tudi v primeru srka vetra odvisna le od velikosti obremenitve s srkom vetra in razpona ponjave in ne od zračnega pritiska v ponjavi ali od višin membran, od katerih je odvisno le razmerje med vertikalnima komponentama reakcije zgornje in spodnje membrane, njuna razlika pa je vedno enaka zmnožku obremenitve s srkom vetra in polovičnega razpona. Razlika vertikalnih komponent reakcij pri obremenitvi s srkov vetra deluje v negativni smeri oz. okvir jeklene konstrukcije vleče navzgor, zato je potrebno zagotoviti ustrezno sidranje in temeljenje jeklene konstrukcije.

Deformabilnost membrane ugodno vpliva tudi na horizontalne komponente reakcij obeh membran oz. njuno vsoto, saj se zaradi raztezka zgornje membrane, ki pri obremenitvi s srkom vetra prispeva večinski delež k vsoti horizontalnih komponent reakcij, povečuje njena višina in s tem tudi kot tangente na zgornjo membrano v točni podpiranja, zato je delež sile v membrani, ki ga prevzame horizontalna komponenta reakcije čedalje manjši. Sile v spodnji membrani in pripadajoče komponente reakcij se tako kot zračni pritisk v ponjavi, ki je edina neposredna obremenitev spodnje membrane, zmanjšujejo počasi.

9.7 Zaključek

Membrani, ki sestavljata dvoslojno pnevmatsko ponjavo, prenašata razliko pritiskov pravokotno na njuno površino le z nateznimi osnimi silami, saj strižnih sil, tlačnih osnih sil in upogibnih momentov membrane niso sposobne prenesti. Da natezne sile v membrani, ki potekajo v tangencialni smeri njene površine, izničijo razliko pritiskov pravokotno na njeno površino, se površina membrane ukrivi. Velikost natezne sile v membrani je vzdolž celotnega loka membrane konstantna.

Deformabilnost membran je precej večja od deformabilnosti klasičnih gradbenih materialov in upoštevanje njenega vpliva bistveno vpliva na rezultate, zato se je ne sme zanemariti. Sicer so rezultati brez upoštevanja deformabilnosti membran na varni strani, saj so manj ugodni od tistih z upoštevanjem deformabilnosti, vendar so razlike med rezultati, še posebej pri membranah z majhnimi začetnimi višinami, zelo velike. Razlog za takšno razliko je ta, da je pri konstantni razliki pritiskov na membrano sila v membrani odvisna od velikosti radija krožnega loka, ki ga opiše ukrivljena membrana, in sicer večji kot je radij oz. manjša kot je višina loka, večja je sila v membrani, posledično pa je večji tudi raztezek membrane in s tem zmanjšanje sile v membrani. Brez upoštevanja raztezka membrane se z zmanjševanjem začetne višine membrane sila v membrani in pripadajoča horizontalna komponenta reakcije eksponentno povečujeta, z upoštevanjem raztezka pa naraščata približno linearno.

Pri ponjavah z enako vsoto začetnih višin membran je pri obremenitvi z zračnim pritiskom v ponjavi ob upoštevanju deformabilnosti membran približno enaka tudi vsota horizontalnih komponent reakcij v podpori, ki je pomembna za dimenzioniranje okvirjev jeklene nosilne konstrukcije.

Razlika vertikalnih komponent reakcij v podporah zaradi sile v zgornji in spodnji membrani ponjave, obremenjene le z začetnim zračnim pritiskom, je vedno enaka nič, tako pri simetričnih kot tudi pri nesimetričnih ponjavah, torej ne glede na začetno višino zgornje in spodnje membrane. Upoštevanje deformabilnosti membran ne vpliva na vertikalne komponente reakcij posamezne membrane v podpori, saj so te odvisne izključno od razlike pritiskov, ki deluje pravokotno na površino membrane, in od razpona med podporama

ponjave. Ker pri dvoslojni pnevmatski ponjavi, obremenjeni zgolj z notranjim zračnim pritiskom, na zgornjo in spodnjo membrano deluje enak zračni pritisk, razpon pa je prav tako za obe membrani enak, sta njuni vertikalni komponenti reakcije v podpori enako veliki, vendar zaradi nasprotnih ukrivljenosti membran tudi nasprotno usmerjeni, zato se odštejeta.

Sile v membrani, obremenjeni z razliko enakomerno porazdeljenih pritiskov, se lahko računajo na dva načina, in sicer s pomočjo Young-Laplaceove enačbe, ki določa površinsko napetost membrane, obravnavane v mehanikih tekočin, ali po principu vrvi, kjer se ploskev membrane modelira z neskončnim številom vzporednih linijskih vravnih elementov. Razlika med obema izračunoma je ta, da po Young-Laplaceovi enačbi pritisk deluje pravokotno na površino membrane, po principu vrvi pa v smeri gravitacije. Po Young-Laplaceovi enačbi se torej smer enakomerne obremenitve od ene proti drugi podpori zaradi ukrivljenosti membrane neprestano spreminja, po principu vrvi pa je ves čas enaka, vendar so zaradi velikih radijev lokov membran razlike v vrednostih, pridobljenih na en in drug način, zelo majhne. Večji kot je radij loka membrane oz. manjša kot je začetna višina membrane, manjše so tudi razlike med obema tipoma izračuna. Točnejše rezultate pri obremenitvi z zračnim pritiskom v ponjavi, ki deluje v pravokotni smeri na obe membrani, torej dobimo z Young-Laplaceovo enačbo, pri obremenitvi s snegom, ki deluje v smeri gravitacije, pa po principu vrvi.

Pri obremenitvi dvoslojne pnevmatske ponjave s snegom se glede na razmerje med začetnim p_Z oz. končnim p_K zračnim pritiskom v ponjavi in obremenitvijo s snegom q_S ločita 2 tipa obnašanja ponjave z različnima postopkoma statičnega izračuna:

- za primer, ko velja $p_Z > q_S$ ali $p_K > q_S$ in
- za primer, ko velja $p_Z \leq q_S$ in $p_K = q_S$.

Pri prvem primeru obnašanja sta obremenjeni obe membrani, saj je obremenitev s snegom q_S manjša od začetnega p_Z ali končnega p_K zračnega pritiska v ponjavi, zato je razlika pritiskov na zgornjo membrano z notranje strani večja od nič. V tem primeru se zaradi obremenitve s snegom zmanjša razlika pritiskov na zgornjo membrano in s tem tudi njena višina, vendar ne več kot do začetne višine nedeformirane membrane. Po Boylovem zakonu, ki pravi, da je pri konstantni temperaturi tudi zmnožek prostornine in tlaka idealnega plina konstanten, se zaradi zmanjšanja prostornine stisnjenega zraka v ponjavi nekoliko poveča zračni pritisk v ponjavi, posledično pa tudi sila v spodnji membrani.

V drugem primeru obnašanja pa je obremenitev s snegom q_s večja od začetnega zračnega pritiska v ponjavi p_z , zato se mora zračni pritisk na račun zmanjšanja prostornine stisnjene zraka v ponjavi povečati toliko, da izenači in uravnoteži obremenitev s snegom. Ker je v tem primeru končni zračni pritisk v ponjavi p_k enak obremenitvi s snegom q_s , je razlika pritiskov na zgornjo membrano enaka nič in posledično je tudi sila v tej membrani enaka nič. Funkcija zgornje membrane je ta, da s spremembo prostornine stisnjene zraka v ponjavi kompenzira potrebno povečanje zračnega pritiska v ponjavi za uravnoteženje zunanje obremenitve. Pri tem tipu obnašanja ponjave se z večanjem obremenitve s snegom končni zračni pritisk in s tem tudi sila v spodnji membrani povečujeta mnogo hitreje kot pri prvem tipu obnašanja, posledično pa se tudi mnogo hitreje zmanjšuje višina zgornje membrane. Obremenitev s snegom lahko narašča toliko časa, dokler je višina zgornje membrane večja od nič, pri večjih obremenitvah pa zgornja membrana izgubi stabilnost in preskoči na spodnjo stran ponjave, kar se smatra za nezgodno stanje, čeprav se zgornja membrana na spodnji strani zopet stabilizira in ponjava lahko še naprej prenaša obremenitve na jekleno nosilno konstrukcijo.

Zanimiva ugotovitev je ta, da obremenitev ponjave s snegom ugodno vpliva na vsoto horizontalnih komponent reakcij, na katere se dimenzionira jeklene okvirje nosilne konstrukcije. Vsota horizontalnih komponent reakcij je namreč največja, ko sta membrani obremenjeni izključno z začetnim zračnim pritiskom v ponjavi, potem pa se z večanjem obremenitve s snegom linearno zmanjšuje, dokler ni končni zračni pritisk v ponjavi enak obremenitvi s snegom (do vrednosti, pri kateri se spremeni tip obnašanja ponjave). Zatem se vsota horizontalnih komponent reakcij začne linearno povečevati, vendar nikoli ne preseže začetne vrednosti pri obremenitvi izključno z zračnim pritiskom.

Razlika vertikalnih komponent reakcij, oz. vertikalna komponenta reakcije spodnje membrane pri drugem tipu obnašanja, je ne glede na razmerje začetnih višin membran in velikosti zračnega pritiska v ponjavi odvisna le od obremenitve s snegom in razpona ponjave, in sicer se jo izračuna kot zmnožek obremenitve s snegom in polovičnega razpona ponjave. Posamezna membrana se mora torej ukriviti toliko, da razlika vertikalnih komponent reakcij uravnoteži obremenitev s snegom vzdolž razpona ponjave, silo v tako ukrivljeni membrani pa uravnoteži horizontalna komponenta reakcij. Torej v ponjavi velja hierarhija sil, pri kateri je horizontalna komponenta reakcije odvisna od sile v membrani, sila v membrani je odvisna od

vertikalne komponente reakcije, razlika vertikalnih komponent reakcij pa je odvisna od obremenitve s snegom in razpona ponjave.

Z večanjem razlike med začetno višino zgornje in spodnje membrane se pri enakem razponu in začetnem zračnem pritisku v ponjavi maksimalna dopustna obremenitev s snegom povečuje, z manjšanje razlike pa se zmanjšuje. Tudi vsota horizontalnih komponent reakcij se z večanjem razlike med začetno višino zgornje in spodnje membrane povečuje, saj se ob tem zmanjšuje višina spodnje membrane, ki prevzame večino obremenitve s snegom (pri 2. tipu obnašanja celo vso). Manjša kot je namreč višina spodnje membrane pri enaki razliki pritiskov, večja je sila v njej in s tem tudi njena horizontalna komponenta reakcije v podpori. Spreminjanje razlike višin obeh membran pri enaki obremenitvi s snegom, začetnem zračnem pritisku in razponu ponjave ne vpliva na vertikalno komponento reakcije posamezne membrane. Njena vrednost je ob konstantni vrednosti razlike pritiskov in razpona ves čas konstantna, ne glede na višino membrane.

Večji kot je začetni zračni pritisk v ponjavi, večja je tudi maksimalna dopustna obremenitev s snegom, ki jo ponjave prenese. Omejitev za dopustne obremenitve takšnih ponjav pa prej kot nosilnost predstavlja deformabilnost membran, saj se z večanjem začetnega zračnega pritiska v ponjavi povečuje tudi višina obeh raztegnjenih membran, poleg tega pa tudi horizontalne reakcije v podporah.

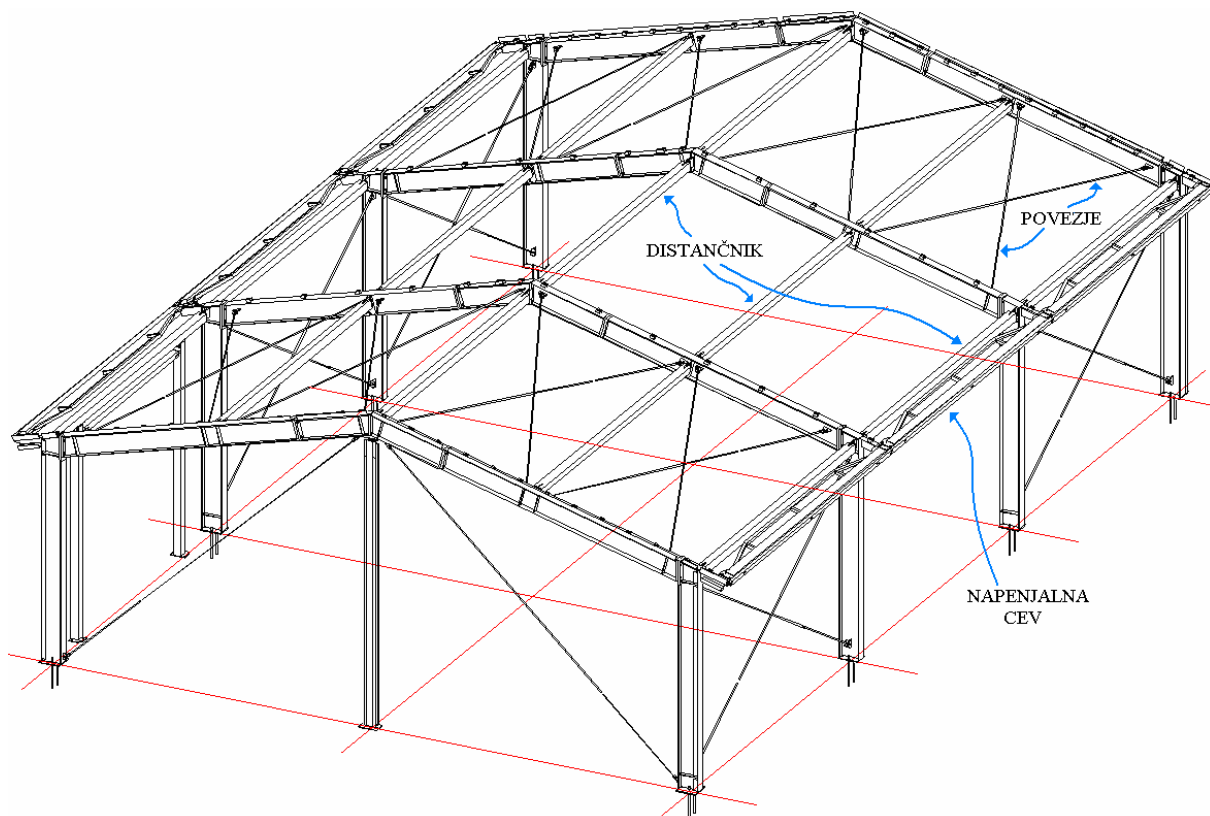
Obremenitev s snegom torej ugodno vpliva na vsoto horizontalnih komponent reakcij, saj je ta največja, ko je ponjava obremenjena izključno z začetnim zračnim pritiskom. Razlika vertikalnih komponent reakcij v podporah pa narašča sorazmerno z obremenitvijo s snegom. Pri dimenzioniranju jeklenih okvirjev nosilne konstrukcije s strešnim sistemom iz dvoslojnih pnevmatskih ponjav na obremenitev s snegom je torej potrebno narediti dve obtežni kombinaciji. Največje horizontalne reakcije daje obtežna kombinacija, pri kateri je ponjava obremenjena le z začetnim zračnim pritiskom, največje vertikalne reakcija pa obtežna kombinacija, kjer je ponjava obremenjena z začetnim zračnim pritiskom in projektno obremenitvijo s snegom. Vrednost projektne obremenitve s snegom se lahko tudi zmanjša, in sicer v primeru, če se v ponjavo s kompresorji vpihuje topel zrak, ki topi sneg na ponjavi in tako zmanjšuje obtežbo s snegom.

Obnašanje ponjave v primeru pritiska vetra na zgornjo ponjavo je identično obnašanju pri obremenitvi s snegom, do razlik pa pride pri obremenitvi s srkom vetra, ki deluje v nasprotni smeri kot obremenitev s snegom. Ker je smer delovanja srka vetra na zgornjo membrano enaka smeri delovanja zračnega pritiska v ponjavi, se razlika pritiskov na zgornjo membrano z večanjem srka vetra povečuje, s tem pa se povečuje tudi sila v zgornji membrani. Zaradi povečanje sile v zgornji membrani se membrana dodatno raztegne, s tem pa se poveča prostornina stisnjenega zraka v ponjavi in posledično zračni pritisk v ponjavi nekoliko vpade. Pri obremenitvi s srkom vetra ne pride do izgube stabilnosti membran, tako kot pri presegu največje dopustne obremenitve s snegom, zato se ponjava zaradi srka vetra poruši, ko je presežena natezna trdnost zgornje membrane. Tik pred porušitvijo je zračni pritisk v ponjavi še vedno večji od nič, zato se višina spodnje membrane, ki je neposredno obremenjena le z zračnim pritiskom v ponjavi, ne zniža pod začetno vrednost v nedeformiranem stanju. Najbolj neugoden obtežni primer s srkom vetra je, ko je ponjava obremenjena z notranjim zračnim pritiskom in zunanjo prevladujočo spremenljivo obremenitvijo s srkom vetra, saj je pri takšni kombinaciji vplivov razlika pritiskov in s tem tudi sila v zgornji membrani največja.

V vseh obravnavanih obtežnih primerih se je izkazalo, da deformabilnost membran, ki sestavljajo strešni sistem iz dvoslojnih pnevmatski ponjav, ugodno vpliva na silo v membrani, saj se njena vrednost pri povečanju višine membrane zaradi raztezka zmanjša. Zaradi zmanjšane sile v membrani je manjša tudi komponenta horizontalne komponente reakcije v podpori, poleg tega pa se s povečanjem višine membrane zmanjša tudi razmerje med horizontalo in vertikalno komponento reakcije, zato je ugoden vpliv deformabilnosti membran na horizontalne komponente reakcij še večji kot na sile v membrani.

10 VPLIV DVOSLOJNE PNEVMATSKE PONJAVE NA NOSILNO JEKLENO KONSTRUKCIJO

Pri izračunu membranskih sil v zgornji in spodnji membrani dvoslojne pnevmatske ponjave ter pripadajočih komponent reakcij v podporah, opisanem v poglavju 9, je bilo predpostavljeno, da je ponjava nepomično členkasto podprta. Podpore ponjave morajo torej preprečiti pomike ponjave, dopustiti pa morajo zasuke okoli vzdolžne osi. Zasuke ponjave okoli njenih vzdolžnih robov omogoča tipski aluminijasti profil, opisan na začetku poglavja 9 (Slika 54), ki se ga na nosilno konstrukcijo pritrdi preko kratkih U profilov, privarjenih na zgornjo pasnico prečke okvirja (Slika 69), pomike ponjave pa prepreči jeklena nosilna konstrukcija. Pomike vzdolžnega roba ponjave v vertikalni smeri preprečujejo primarni nosilni okvirji, v horizontalni smeri pa distančniki (Slika 66).

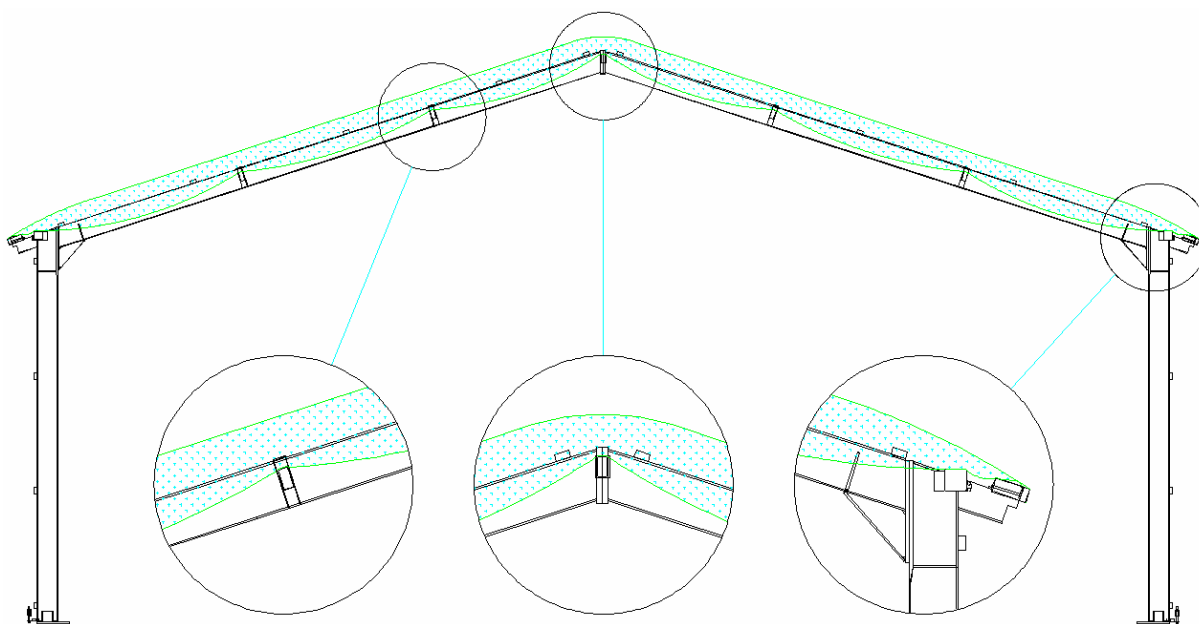


Slika 66: Jeklena nosilna konstrukcija objekta s strešnim sistemom iz dvoslojnih pnevmatskih ponjav.

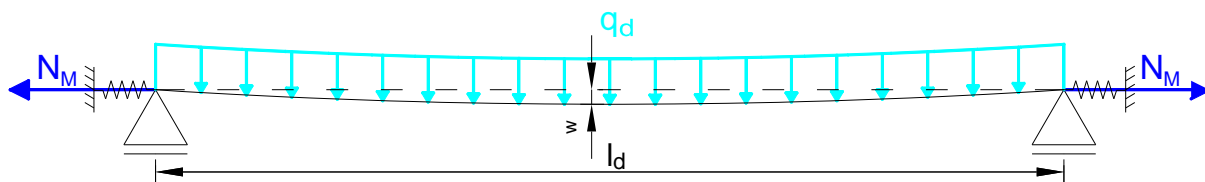
Zagotovljeno pa mora biti tudi nepomično členkasto podpiranje krajšega roba ponjave v kapu strehe med dvema okvirjema. S tem namenom se v kap strešnega sistema iz dvoslojnih pnevmatskih ponjav dodajo še napenjalni cevi (Slika 70 in Slika 71), ki preprečujejo pomike krajšega roba ponjave, hkrati pa omogočajo zasuke ponjave okoli krajšega roba. S fasadnimi in strešnimi povezji pa je zagotovljena stabilnost objekta.

10.1 Distančniki

Naloga distančnikov je, da preprečijo pomike vzdolžnih robov ponjave, bočno podpirajo prečko okvirja in prevzamejo horizontalne obremenitve v smeri slemena objekta. Spodnja membrana ponjave poteka nad distančniki in se jim po obliki prilagaja (Slika 67). Ker je spodnja membrana ponjave obremenjena z notranjim zračnim pritiskom v ponjavi, so distančniki na mestih, kjer podpirajo spodnjo membrano, obremenjeni z enakomerno linijsko obremenitvijo q_d , ki je enaka velikosti zračnega pritiska v ponjavi p_{zr} pomnoženi z razmakom med distančniki r_d . V distančniku se poleg upogibnega momenta zaradi porazdeljene obtežbe q_d pojavi tudi osna sila N_d (Slika 68).



Slika 67: Prečni prerez jeklene konstrukcije s strešnim sistemom iz dvoslojnih pnevmatskih ponjav.



Slika 68: Računski model distančnika obremenjenega z osno silo in upogibnim momentom.

Distančnik bočno podpira prečko okvirja, zato se v njem pojavi osna sila zaradi izbočenja prečke okvirja N_b , ki se jo upošteva z nadomestno izbočno silo. Pri vmesnih okvirjih se pri enaki obremenitvi pojav na obeh straneh okvirja sile zaradi vleka ponjave (vsota horizontalnih komponent reakcij obeh membran ponjave) med seboj zaradi nasprotne usmerjenosti izničijo, drugače pa je pri krajnih okvirjih, kjer morajo silo zaradi vleka ponjave N_{vl} prevzeti distančniki. Poleg tega se v distančnike preko fasadnih stebričkov prenese tudi del horizontalne obremenitve čelne fasade N_w . Zaradi upogiba distančnika pod obremenitvijo z zračnim pritiskom v ponjavi se v distančniku pojavi tudi osna sila N_M , saj se distančnik v horizontalni smeri ne premika prosto, prav tako pa zaradi podajnosti okvirjev tudi ni nepomično podprt, zato se vrednost osne sile N_M nahaja nekje med nič in vrednostjo osne sile v nepomično podprtem upognjenem nosilcu N_M' , odvisno od podajnosti okvirja (85).

$$N_M' = \frac{q_d \cdot l_d^2}{8 \cdot w} \quad \rightarrow \quad 0 < N_M < N_M' \quad (85)$$

Kje je:

l_d dolžina distančnika,

w upogibek distančnika, obremenjenega z enakomerno linijsko obremenitvijo q_d .

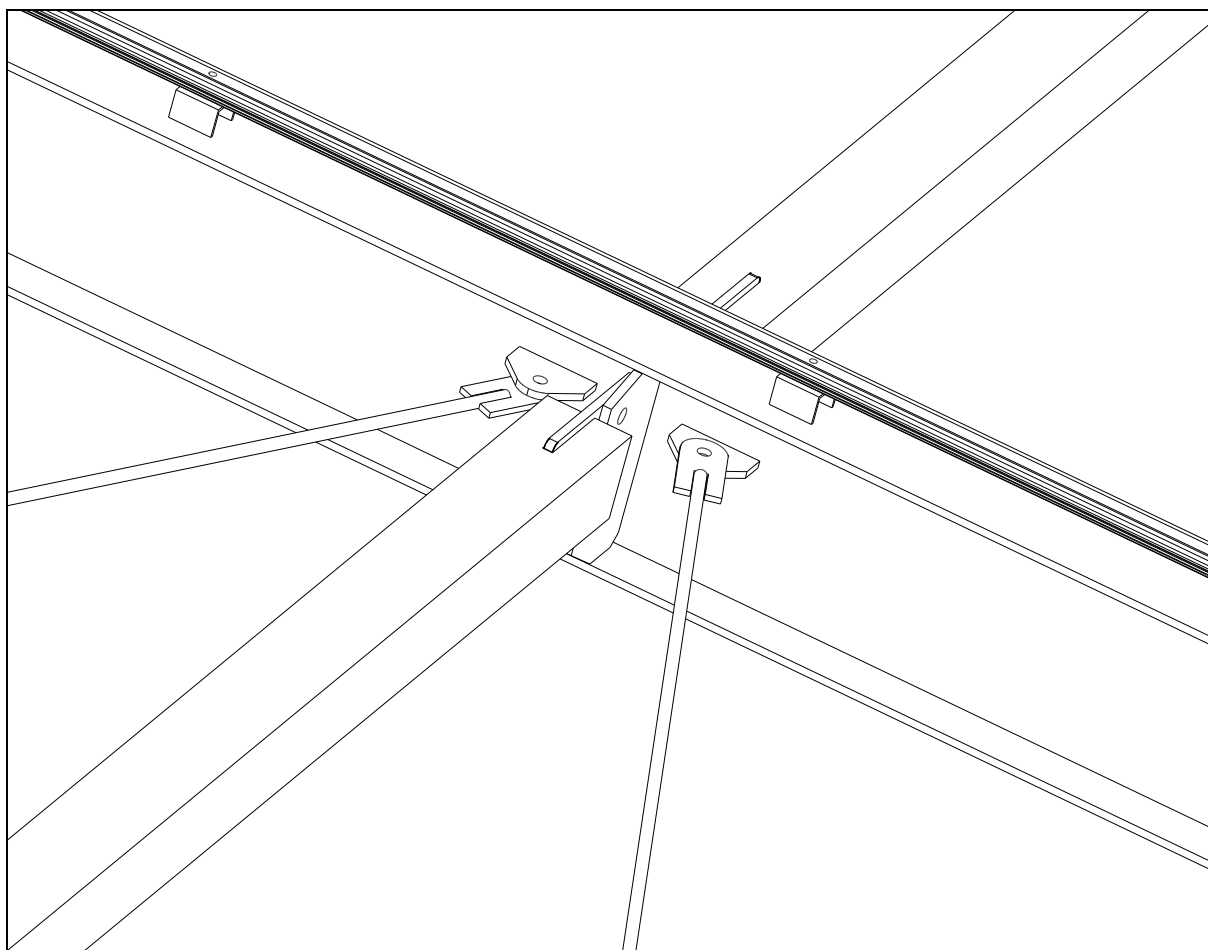
Na Sliki 69 je prikazan priključek distančnika in povezij na prečko okvirja na višini dveh tretjin stojine prečke. Ponjava se v poljih s strešnimi povezji s spodnjo membrano opira tudi na povezja, zato se v teh poljih v distančniku pojavi tudi osna sila zaradi vleka povezij N_p . Distančnike je torej potrebno dimenzionirati na interakcijo upogibnega momenta zaradi enakomerne linijske obremenitve na distančniku (86) in osne sile v distančniku (87).

$$q_d = p_{zr} \cdot r_d \quad (86)$$

$$N_d = N_{vl} + N_M + N_w + N_b + N_p \quad (87)$$

Kjer je:

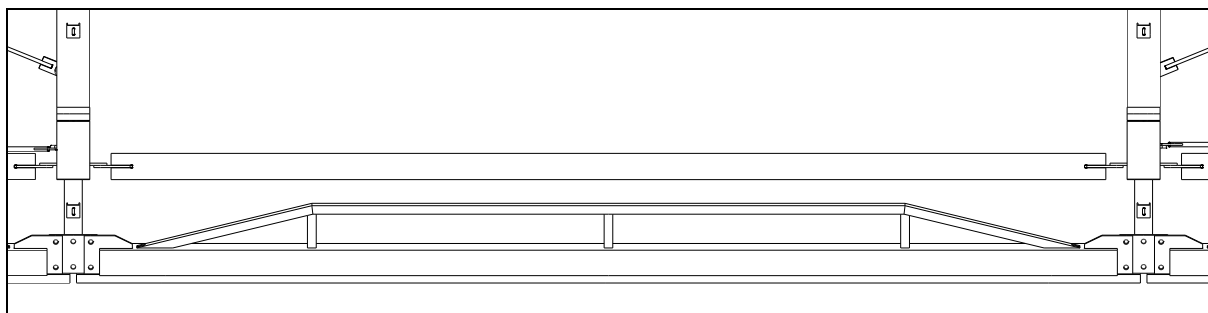
- q_d enakomerna linijska obremenitev na distančniku zaradi zračnega pritiska v ponjavi,
- p_{zr} notranji zračni pritisk v ponjavi,
- r_d razdalja med distančniki,
- N_d vsota osnih sil v distančniku,
- N_{vl} osna sila v distančniku zaradi vleka ponjave (pri distančnikih v krajnih poljih),
- N_M osna sila v distančniku zaradi upogibnega momenta v distančniku (vpliv ponjave),
- N_w osna sila v distančniku zaradi horizontalne obremenitve čelne fasade z vetrom,
- N_b osna sila v distančniku zaradi zvrnitve prečke okvirja (nadomestna izbočna sila),
- N_p osna sila v distančniku zaradi vleka povezij, obremenjenih z zračnim pritiskom v ponjavi (pri distančnikih v poljih s strešnimi povezji).



Slika 69: Priključek distančnika in povezij na stojino prečke okvirja in pritrnitev tipskega aluminijastega profila na zgornjo pasnico prečke preko kratkih HOP U profilov.

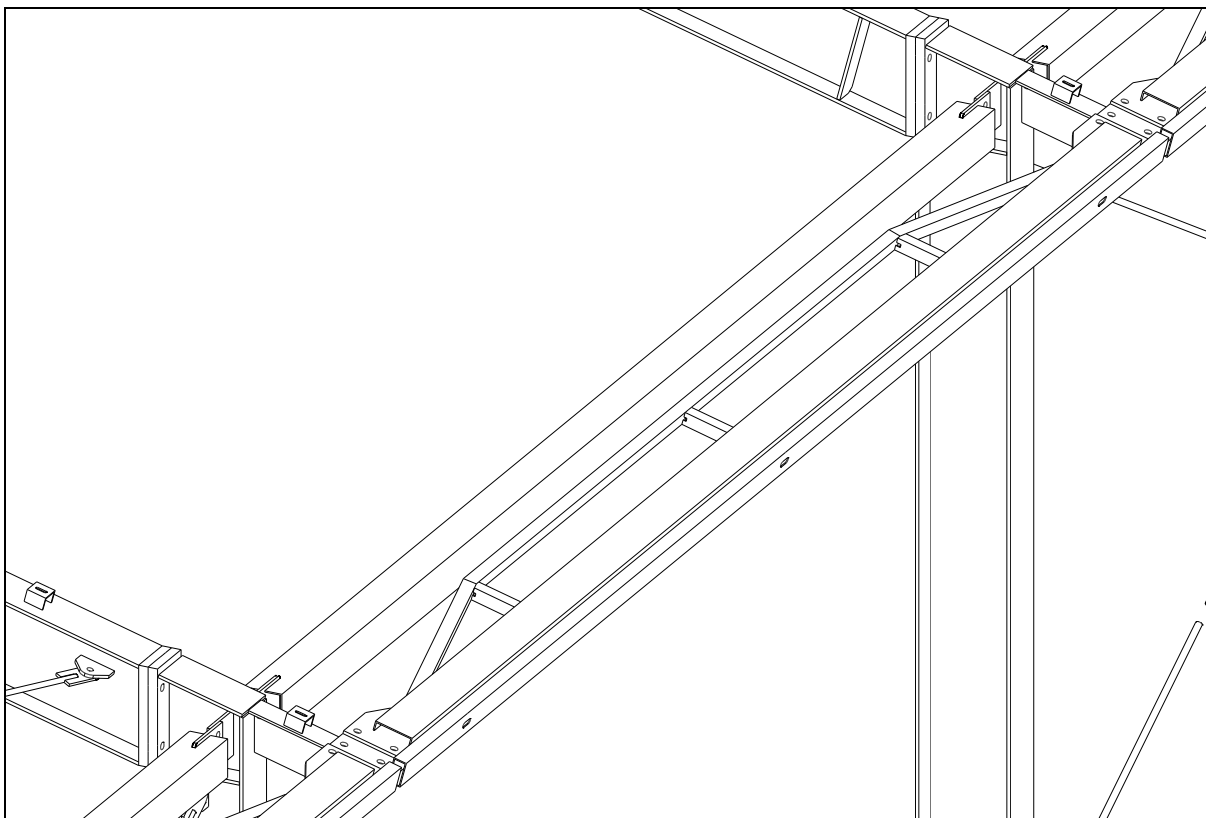
10.2 Napenjalne cevi

Kot je bilo že omenjeno na začetku tega poglavja, je potrebno zagotoviti tudi nepomično podpiranje krajšega roba ponjave v kapu strehe. To se lahko izvede z napenjalno cevjo, ki se jo privijači na jeklene konzole, privarjene na stebre okvirjev. S konzolami se napenjalne cevi odmakne od fasade objekta in se s tem v kapu zagotovi napušč, na katerega se lahko pritrdi žleb za odvodnjavanje padavinske vode. Ponjavo se na napenjalno cev pritrdi tako, da se na krajšem robu ponjave iz membrane izdela t.i. žep (Slika 72), v katerega se pri montaži ponjave na nosilno konstrukcijo vstavi jeklena cev, ki se jo preko membran privijači na zunanjo stran napenjalne cevi. Žep je narejen iz prepognjene membrane in je ločen od napihnjene dela ponjave, zato se pri vijachenju žepne cevi preko membran žepa ponjave, napihljivi del ponjave ne more poškodovati.

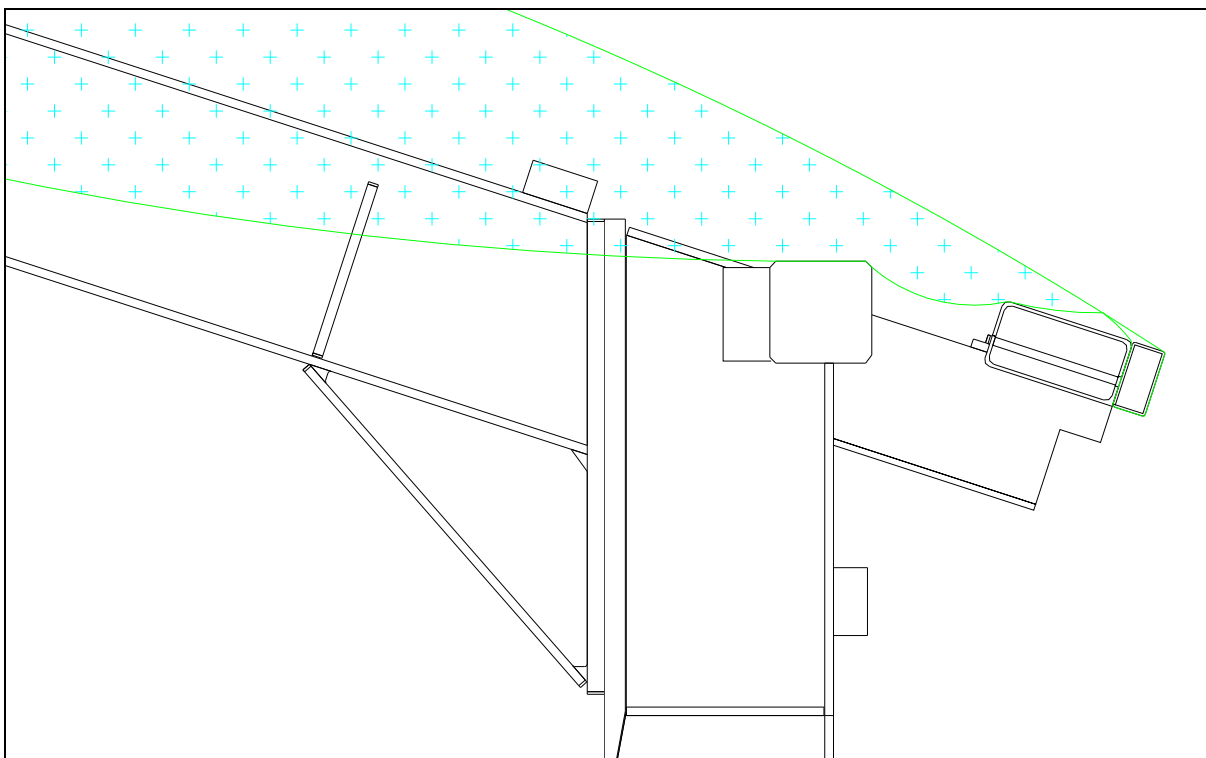


Slika 70: Distančnik in napenjalna cev v kapu objekta v tlorisnem pogledu.

Na napenjalno cev deluje sila vleka ponjave, ki je na krajšem robu ponjave približno enaka sili vleka na vzdolžnem robu ponjave. V prečnem prerezu ponjave zgornja in spodnja membrana zavzmeta obliko krožnega loka, v vzdolžnem prerezu ponjave pa je zgornja membrana na območju med slemenom in kapom skoraj popolnoma ravna in se zaradi velikega razmerja med dolžino in širino ponjave obremenitve večinoma prenašajo v prečni, krajši smeri ponjave, zato so na tem delu sile v vzdolžni smeri membrane zelo majhne. V kapu in v slemenu pa se zgornja membrana tudi v vzdolžni smeri ukrivi tako kot v prečni smeri, zato se v tem delu membranske sile v vzdolžni smeri zgornje membrane povečajo in lahko upoštevamo, da znašajo približno toliko kot v prečni smeri. Namesto oblike napenjalne cevi, prikazane na Slikah 70 in 71, se lahko uporabijo tudi drugačni elementi, ki so sposobni prenesti enakomerno porazdeljeno linijsko horizontalno obremenitev zaradi vleka ponjave.



Slika 71: Distančnik in napenjalna cev v kapu objekta v 3D pogledu.



Slika 72: Pritrditev krajšega roba ponjave preko cevi v žepu ponjave na napenjalno cev.

VIRI

Beg, D. (Ur.), Pogačnik A. (Ur.). 2009. Priročnik za projektiranje gradbenih konstrukcij po evrokod standardih. Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije: 1-60 str.

Beyer, W. H. 1987. CRC Standard Mathematical Tables, 28th ed. Boca Raton, FL: CRC Press: 125 str.

Engineering Failures, Case Studies in Engineering.
<http://engineeringfailures.org/?p=391/> (14. 10. 2010).

Free, J. 1987. Cable domes. Popular Science, november 1987: 88-89.

Gomez-Jauregui, V. 2010. Tensegrity Structures and their Application to Architecture. Santander, Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cantabria: 296 str.

Kazuo, I. 1999. Membrane Designs and Structures in the World. Tokyo, Shinkenchiku-sha Co. Ltd: 180-183, 212-215.

Knowledge Center. Fabric Welding. Academic Reports.
<http://www.teonline.com/knowledge-centre/fabric-welding.html> (18. 8. 2011).

Koch, K. 2004. Membrane Structures. London, Prestel: 224 str.

Krämer, S. 2009. Effectiveness of the Low-E coating. Low-E High-Tec Quality for Textile Roofing. Düren, H. Seybold GmbH & Co. KG: 1-47.

Krämer, S. 2009. Recording of Air Temperature and Relative Atmospheric Humidity in the Hall. Low-E High-Tec Quality for Textile Roofing. Düren, H. Seybold GmbH & Co. KG: 1-5.

Laboratorij za fotovoltaike in optoelektroniko. 2007. Sončno sevanje in obsevanje. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko.

<http://pv.fe.uni-lj.si/Obsevanje.aspx/> (24. 9. 2011).

Lehner, S. 2005. European Fire Classification of Construction Products, New Test Method »SBI«, and Introduction European Classification System into German Building Regulations. Otto-Graf-Journal, Vol. 16: 151-166.

Lutes, D. A. 1971. Air-Supported Structures. Canadian Building Digests: 137 str.

Pan, N. 2003. Relationship Between Grab and Strip Tensile Strengths for Fabric with Roughly Linear Mechanical Behaviour. Textile Research Journal 2003, 73: 165.

Pravilnik o zahtevah za zagotavljanje varnosti in zdravja delavcev na delovnih mestih. UL RS št. 89/1999.

Ram, A. 2011. Solar and Heat Control Glasses. A Glass Knowledge Blog. <http://theglassblog.wordpress.com/2011/02/06/solar-and-heat-control-glasses/> (24. 9. 2011).

Seaman, R. N., Bradenburg, F. 2000. Utilization of Vinyl-Coated Polyester Fabrics for Architectural Applications. Fabric architecture. Fabric Structures Association. http://fabricarchitecturemag.com/articles/0700_id_part1.html, http://fabricarchitecturemag.com/articles/0900_id_part2.html (18. 8. 2011).

Seamtek Incorporated. 2001. Heat Sealing Coated/Laminated Fabric Seams. Technical Articles. <http://www.seamtek.com/HeatSealing.htm> (18. 8. 2011).

Seybold, B. 2009. Low-E High-Tec Quality for Textile Roofing. Düren, H. Seybold GmbH & Co. KG: 1-7.

Sourcebook. 2009. Fabric Structures. Fabric architecture. Fabric Structures Association. http://fabricarchitecturemag.com/articles/0409_f2_structures.html (18. 8. 2011).

Verseidag-Indutex GmbH. 2011. Facades. Architecture. <http://www.verseidag.de/en/en/duraskin/architecture/facades/facades> (18. 8. 2011).

Verseidag-Indutex GmbH. 2011. Membranes. Architecture. <http://www.verseidag.de/en/en/duraskin/architecture/membranes/membranes> (18. 8. 2011).

Verseidag-Indutex GmbH. 2011. Membranes.
<http://www.verseidag.de/en/en/duraskin/tents/tents> (18. 8. 2011).

Standardi:

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

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

SIST EN 1991-1-3:2004/A101:2008 – Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 1-3. del: Splošni vplivi – Obtežba snega – Nacionalni dodatek.

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

SIST EN 1991-1-4:2005/oA101:2007 – Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 1-4. del: Splošni vplivi – Obtežbe vetra – Nacionalni dodatek.