

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



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

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

To je izvirna različica zaključnega dela.

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

Brglez, G., 2014. Zračno podprte membranske konstrukcije. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Brank, B.): 103 str.

Datum arhiviranja: 06-01-2015

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



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

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

This is original version of final thesis.

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

Brglez, G., 2014. Zračno podprte membranske konstrukcije. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Brank, B.): 103 pp.

Archiving Date: 06-01-2015

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM GRADBENIŠTVO
KONSTRUKCIJSKA SMER

Kandidat:

GORAZD BRGLEZ

ZRAČNO PODPRTE MEMBRANSKE KONSTRUKCIJE

Diplomska naloga št.: 3416/KS

AIR-SUPPORTED MEMBRANE STRUCTURES

Graduation thesis No.: 3416/KS

Mentor:

prof. dr. Boštjan Brank

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Janko Logar

Član komisije:

izr. prof. dr. Sebastjan Bratina

Ljubljana, 18. 12. 2014

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisani Gorazd Brglez izjavljam, da sem avtor diplomskega dela z naslovom »Zračno podprte membranske konstrukcije«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju.

Ljubljana, 11. december 2014

Gorazd Brglez

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	624.074.4(497.4)(043.2)
Avtor:	Gorazd Brglez
Mentor:	prof. dr. Boštjan Brank
Naslov:	Zračno podprte membranske konstrukcije
Tip dokumenta:	Diplomska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema:	103 str., 20 pregl., 105 sl., 1 pril.
Ključne besede:	Zračno podprte konstrukcije, krojenje membrane, notranji pritisk, iskanj oblike, PVC membrane, DIN 4134.

Izvleček:

V diplomski nalogi so obravnavane zračno podprte membranske konstrukcije. Prikazan je kratek zgodovinski pregled teh konstrukcij in nekaj izstopajočih sodobnih primerov. Razloženo je njihovo delovanje in medsebojna povezava treh osnovnih komponent tovrstnih konstrukcij, ki so zrak pod pritiskom, izvor nadtlača in zrakotesni ovoj. Obravnavani so materiali, ki se uporabljajo, njihovo stikovanje, tipični detajli, strojnice, vrata in montaža zračno podprtih konstrukcij. Predstavljen je proces načrtovanja. Na konceptualnem nivoju so razloženi procesi, kot sta iskanje oblike in krojenje membrane, nato so obravnavani še vplivi na konstrukcijo, pri čemer so prevladujoči notranji pritisk, sneg in veter. Opisani so nekateri standardi, ki so veljavni za to področje in jih lahko uporabimo za določevanje vplivov, račun notranjih sil, pomikov in določevanje varnosti. Na začetku drugega dela diplomske naloge so predstavljeni nekateri računalniški programi, s katerimi si lahko pomagamo pri načrtovanju. Nato je narejen primer načrtovanja zračno podprte membranske konstrukcije nad nogometnim igriščem. Prikažem proces zasnove oblike, določevanje vplivov, račun notranjih sil in pomikov, dimenzioniranje membrane in detajlov pritrdjevanja in krojenje membrane.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 624.074.4(497.4)(043.2)

Author: Gorazd Brglez

Supervisor: prof. Boštjan Brank, Ph.D.

Title: Air-supported membrane structures

Document type: Graduation Thesis – University studies

Scope and tools: 103 p., 20 tab., 105 fig., 1 ann.

Keywords: Air-supported membrane structures, cutting pattern, internal pressure, form-finding, PVC membranes, DIN 4134.

Abstract:

The graduation thesis deals with air-supported membrane structures. A short historical overview is done and some modern examples are presented. The behavior of air-supported structures is explained, focusing on basic components of such structures, which are air under pressure, source of pressure and air-tight envelope. Materials and their manufacture, joints, typical details, pressure generating units, air locks and structural installation are described. Following this description, the design process is presented. Knowledge on form-finding and cutting patterns is important in this field of civil engineering, as well as loading conditions due to internal pressure, snow loads and wind loads; therefore all this is discussed on a conceptual level. More distinct view on this topic is given by presenting some standards that are regulating this field and applying concepts into practice. At the beginning of second part of the thesis, some computer programs are presented that can be used in the design process. This is followed by an example of design of an air-supported membrane structure over the football field. All important parts of such design are presented in detail, like conceptual design, form-finding process, identification of actions on structure, calculation of internal forces and deformations, dimensioning of membrane and joints and defining of cutting patterns.

ZAHVALA

Za pomoč in vodenje pri izdelavi diplomske naloge bi se rad zahvalil mentorju prof. dr. Boštjanu Branku.

Posebno bi se rad zahvalil Benu, Janezu, Janku, Marku S., Marku A., Matevžu, Matjažu, Tinetu, Tomažu in Žigi ter ostalim sošolcem in prijateljem, ki so mi z nešteto prilogami polepšali čas študija.

Največja zahvala pa gre mami, očetu, bratu Robertu in Maji, ki so mi omogočili študij in me vseskozi podpirali in spodbujali.

KAZALO VSEBINE**IZJAVE II**

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
--	------------

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
---	-----------

ZAHVALA	V
----------------	----------

1 UVOD	1
---------------	----------

2 ZGODOVINSKI PREGLED	3
------------------------------	----------

3 PRINCIPI DELOVANJA IN OBLIKOVANJA NAPIHLJIVIH KONSTRUKCIJ	10
--	-----------

3.1 Kako delujejo?	10
--------------------	----

3.2 Oblike	11
------------	----

3.2.1 Enostavne geometrijske oblike	11
-------------------------------------	----

3.2.2 Rotacijske ploskve	11
--------------------------	----

3.2.3 Minimalne površine	12
--------------------------	----

3.2.4 Ostale oblike	13
---------------------	----

3.3 Ostali sestavni deli napihljive konstrukcije	13
--	----

4 MATERIALI IN GRADNIKI NAPIHLJIVE KONSTRUKCIJE	15
--	-----------

4.1 Membrana	15
--------------	----

4.1.1 Tehnične tkanine	15
------------------------	----

4.1.1.1 PET/PVC	17
-----------------	----

4.1.1.2 FG/PTFE	17
-----------------	----

4.1.2 Tehnične folije	18
-----------------------	----

4.2 Metode spajanja	18
---------------------	----

4.2.1 Trajni stiki	19
--------------------	----

4.2.2 Montažni stiki	20
----------------------	----

4.3 Prenos sil na rob membrane in v temelje	21
---	----

4.4 Strojnice	24
---------------	----

4.5 Vrata	25
-----------	----

4.6 Montaža zračno podprtih membranskih konstrukcij	25
---	----

5 PROCES NAČRTOVANJA NAPIHLJIVIH KONSTRUKCIJ	26
---	-----------

5.1 Iskanje oblike	26
--------------------	----

5.2 Krojenje membrane	27
-----------------------	----

5.2.1 Razpored krojnih pol	27
----------------------------	----

5.2.2 Razvoj krojne pole	28
--------------------------	----

5.2.3 Kompenzacija	28
--------------------	----

5.3 Vplivi na zračno podprte membranske konstrukcije	31
--	----

5.3.1 Notranji pritisk	31
------------------------	----

5.3.2 Veter	32
-------------	----

5.3.3 Sneg	35
------------	----

5.3.4 Ostale obtežbe	36
----------------------	----

5.3.5 Deformacije	37
-------------------	----

5.4 Predpisi	38
--------------	----

5.4.1 Splošno o varnosti	38
--------------------------	----

5.4.2 Evrokodi	39
----------------	----

5.4.3 SIST EN 13782:2006	39
--------------------------	----

5.4.4 DIN 4134	43
----------------	----

5.4.4.1 Vplivi na konstrukcijo	44
--------------------------------	----

5.4.4.2	Določevanje notranjih sil in obtežne kombinacije	46
5.4.4.3	Varnostni faktorji po Mintu (1981)	49
5.4.4.4	Deformacije	50
5.4.4.5	Zahteve za strojno opremo in upravljanje z objektom	51
5.4.5	Design Manual For Ground-Mounted Air-Supported Structures	52
5.4.5.1	Pomiki	52
5.4.5.2	Sidrna sila	53
5.4.5.3	Notranje sile in določevanje materiala	54
5.4.5.4	Notranji pritisk in karakteristike vpihovalne enote	56
5.4.5.5	Komentar	57
6	PROGRAMI, KI JIH UPORABLJAM V NADALJEVANJU NALOGE	58
6.1	Rhinoceros 5	58
6.2	MPanel in MPanel FEA	58
6.3	IxCube 4-10	59
7	NOGOMETNO IGRIŠČE V LJUBLJANI	61
7.1	Zasnova	62
7.2	Izbira oblike na podlagi izkušenj	63
7.3	Določitev oblike z algoritmom za iskanje oblike pri predpisanem pritisku	65
7.4	Analiza obtežb	67
7.4.1	Lastna, stalna in koristna obtežba	67
7.4.2	Veter	67
7.4.3	Sneg	68
7.4.4	Notranji pritisk	69
7.5	Določitev notranjih sil po standardu DIN 4134	69
7.6	Določitev notranjih sil s programom ixCube 4-10.	71
7.6.1	Določitev deformirane oblike	71
7.6.2	Primerjava oblike izbrane na podlagi izkušenj in tiste dobljene z algoritmom za iskanje oblike	73
7.6.3	Notranje sile zaradi pritiska	75
7.6.4	Notranje sile zaradi vetra in notranjega pritiska	77
7.6.5	Notranje sile zaradi snega in notranjega pritiska	82
7.7	Pomiki	83
7.8	Primerjava rezultatov analize po DIN 4134 in s programom ixCube	84
7.9	Dimenzioniranje	84
7.10	Krojenje membrane	92
8	ZAKLJUČEK	96
VIRI		100

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Klasifikacija PET/PVC membran (Forster in sod., 2004).	17
Preglednica 2: Klasifikacija FG/PTFE membran (Forster in sod., 2004).	18
Preglednica 3: : Klasifikacija EFTE membran (Forster in sod., 2004).	18
Preglednica 4: Vetrna obtežba na poenostavljen način glede na SIST EN 1991-1-4.	40
Preglednica 5: Varnostni koeficienti za material iz PET/PVC in visokofrekvenčno varjene stike po standardu SIST EN 13782:2006.	41
Preglednica 6: Notranji pritisk p_i pri cilindričnih konstrukcijah z zaključki nad polkrožnim ali pravokotnim tlorisom in pri sferičnih konstrukcijah po DIN 4134.	45
Preglednica 7: Tlak ob sunkih vetra v odvisnosti od višine konstrukcije glede na DIN 4134.	45
Preglednica 8: Redukcijski koeficienti tlaka ob sunkih vetra glede na DIN 4134.	46
Preglednica 9: Koeficienti α za določitev notranje sile zaradi vetra pri cilindričnih konstrukcijah nad pravokotnim tlorisom glede na DIN 4134.	47
Preglednica 10: Koeficienti α za določitev notranje sile zaradi vetra pri cilindričnih konstrukcijah z zaključki nad polkrožnim tlorisom in sferičnih konstrukcijah glede na DIN 4134.	47
Preglednica 11: Kot med tangento na membrano v podpori in vodoravnico, ki nakazuje smer delovanja sile v podporah na privetni strani glede na DIN 4134.	48
Preglednica 12: Relativna razdalja f_s/r za primer snežne obtežbe, kadar se sneg zaradi ogrevanja ne stopi, glede na DIN 4134.	51
Preglednica 13: Povzetek rezultatov računa notranjih sil po DIN 4134.	71
Preglednica 14: Notranje sile v smereh ϕ in x zaradi notranjega pritiska dobljene v programu ixCube 4-10.	76
Preglednica 15: Izpis največjih notranjih sil v smereh ϕ in x zaradi notranjega pritiska in vetra v X smeri.	79
Preglednica 16: Izpis največjih reakcij v vpetju in njenih pripadajočih vrednosti zaradi notranjega pritiska in vetra v smeri X.	79
Preglednica 17: Izpis največjih notranjih sil v smereh ϕ in x zaradi notranjega pritiska in vetra v Y smeri.	81
Preglednica 18: Izpis največjih reakcij v vpetju zaradi notranjega pritiska in vetra v Y smeri.	81

Preglednica 19: Primerjava notranjih sil dobljenih s standardom DIN 4134 in programom IxCube 4-10.....	84
Preglednica 20: Primerjava reakcij v podporah dobljenih s standardom DIN 4134 in programom IxCube 4-10.....	84

KAZALO SLIK

Slika 1: Observatorij Haystack z jekleno konstrukcijo in zaključnim slojem iz membrane (Tracy, 2006).....	3
Slika 2: Telstarjeva kupula v Andover, Maine, ZDA. Identični dvojček stoji v Franciji (Punnet, 2002).	4
Slika 3: Mobilni napihljivi vojaški šotor ameriške vojske (Caldera, 1998)	4
Slika 4: Ameriški paviljon na svetovni razstavi Expo 1970 (Geiger, 1975)	5
Slika 5: Notranjost stadiona Tokyo Dome med baseball turnirjem leta 2007 (Broadrec, 2007).....	6
Slika 6: Paviljon skupine Fuji na svetovni razstavi Expo 1970 (Poltrack, 2013).....	7
Slika 7: Zračno podprta konstrukcija podjetja ASATI, ki je pokrila celotno gradbišče (ASATI, 2014). 7	
Slika 8: Največja zračno podprta konstrukcija na svetu postavljena leta 2006 v Južni Koreji (Southern Inflatables, 2014)	8
Slika 9: Zračno podprta koncertna dvorana Arc Nova, ki gostuje po delih Japonske, ki jih je prizadel potres in cunami (Azzarello, 2013).	8
Slika 10: Notranjost koncertne dvorane Arc Nova (Azzarello, 2013).....	9
Slika 11: Leviathan Anisha Kapoorja (Frearson, 2011).	9
Slika 12: Notranjost Levithana (Frearson, 2011).	9
Slika 13: Modeli iz milnice, ki predstavljajo sinklastično obliko (levo) in antiklastično obliko (desno) (Forster in sod., 2004)	10
Slika 14: Prikaz enostavnih geometrijskih oblik na primeru rezervoarjev za bioplin (ArTech, 2014). 11	
Slika 15: Vsak prerez skozi rotacijsko telo zadostuje (Otto in sod., 1982).	12
Slika 16: Prikaz mejnih vrednosti minimalne površine napete na nekem okvirju (Otto in sod., 1982). 12	
Slika 17: Oblikovanje minimalne površine nad ostrorobimi tlorisi. Za pridobitev večje svetle višine v kotih lahko kote zaoblamo in povišamo (Otto in sod., 1982).	13
Slika 18: Levo sta dve konstrukciji sestavljeni iz cilindra in z zaključki nad pravokotnim tlorisom, ki je najpogosteje uporabljena oblika v praksi, desno pa kombinacija enake oblike s sfero (Plasteco Milano, 2014).	13
Slika 19: Levo je primer strojne enote z ogrevanjem na plin (Apen Group, 2014) desno pa njena namestitev na objekt (Teloni Abiti, 2014).....	14

Slika 20: Levo: enostavni prikaz vezenja (Oman, 2006). Desno: razlika med osnovno in votkovno smerjo (Warp and ..., 2014).....	15
Slika 21: Prikaz dveh različnih vezav platna. Levo platno vezava, desno panama vezava (Forster in sod., 2004).....	16
Slika 22: Načini varjenja (levo) in prikaz prenosa sile v zvaru (desno) (Forster in sod., 2004).	19
Slika 23: Diagram visokofrekvenčnega varjenja (levo in sredina) in praktični prikaz (desno) (Seidel, 2009)	19
Slika 24: Vrste šivov (Seidel, 2009).....	20
Slika 25: Vijačen spoj z veznimi ploščicami (Seidel, 2009)	21
Slika 26: Keder tračnica (Seidel, 2009)	21
Slika 27: Vezan montažni stik z vrvjo spleteno med dvema deloma (levo) in zračni sistem (desno) (Seidel, 2009).....	21
Slika 28: Fleksibilen detajl jeklene vrvi v žepku membrane (Seidel, 2009).....	22
Slika 29: Primer dveh fleksibilnih robov na primeru pokritja bazena (Canobbio, 2003). Prvi je pri odprtini za vrata, drugi pa pri spremembi ukrivljenosti (med zeleno in belo membrano)	22
Slika 30: Detajl pritrditve membrane na temelj z jekleno cevjo v membranskem žepku.	23
Slika 31: Detajl pritrditve membrane na temelj z jeklenim L profilom	23
Slika 32: Centrifugalni ventilator (Novovent, 2014).....	24
Slika 33: Prikaz možnosti razporejanja krojnih pol (Otto in sod., 1982)	27
Slika 34: Projekcija z ohranjanjem dolžin (prvi dve risbi) in projekcija z ohranjanjem kotov (drugi dve risbi) (Seidel, 2009).....	28
Slika 35: Kompenzacija kroja (Seidel, 2009).....	29
Slika 36: Rezultat dvoosnega nateznega preizkusa pri razmerju napetosti med osnovo in votkom 2:1 (Kovačević, 2012).	30
Slika 37: Potek obremenjevanja preizkušancev (Kovačević, 2012)	30
Slika 38: Primera obnašanja membrane v enoosnem nateznem preizkusu (osnovna smer). Levo je primer PET/PVC membrane, desno pa FG/PTFE membrana (Kovačević, 2012).	31
Slika 39: Razporeditev pritiska vetra po kupolasti konstrukciji, kot ga predlaga Evrokod 1 del 4.....	33
Slika 40: Primeri razporeditev pritiska vetra v polkrožnem cilindru iz ostale literature (Otto in sod, 1982).	33

Slika 41: Prikaz treh različnih odzivov konstrukcije glede na hitrost vetra. Na abscisi je hitrost vetra, na ordinati pa moč odziva konstrukcije. Prvi graf prikazuje odziv, ki je posledica turbulentnega udarjanja vetra. Drugi graf je odziv konstrukcije, kot posledica odlepljanja vrtincev, tretji pa kot aerodinamična nestabilnost ali galopiranje (Otto in sod, 1982).	34
Slika 42: Prikaz odlepljanja vrtincev za krožnim profilom v laminarnem toku (Karman ..., 2014). Pri tem pojavu lahko pričakujemo odziv kot na drugem grafu slike 41.....	34
Slika 43: »Panel flutter« je pogost pojav v letalstvu, včasih tudi pri zračno podprtih konstrukcijah (Abdala, 2014).....	35
Slika 44: Prikaz treh tipov zračno podprtih membranskih konstrukcij, ki jih pokriva DIN 4134.	43
Slika 45: Definicija koordinatnega sistema in notranjih količin pri cilindričnih konstrukcijah po DIN 4134.	44
Slika 46: Definicija koordinatnega sistema in notranjih količin pri sferičnih konstrukcijah po DIN 4134.	44
Slika 47: Potrebna varnostna razdalja od membrane za obtežbe vetra in obtežbe zaradi vetra in snega. Leva polovica predstavlja kombinacijo brez snega, desna pa zajema oba vpliva (DIN 4134).	50
Slika 48: Primer grafa za maksimalne pomike po Design manual ... (1969).	53
Slika 49: Primer grafa za določanje koeficienta C_{AL} po Design manual ... (1969).	54
Slika 50: Primer grafa koeficientov notranjih sil po Design manual ... (1969).	56
Slika 51: MPanel orodna vrstica.....	58
Slika 52: Prikaz modula Modeler med iskanjem oblike za priklop na transportni vhod.....	59
Slika 53: Prikaz modula Patterner, med krojenjem priklopa na transportni vhod.	60
Slika 54: Prikaz modula Production. Na sliki so krojne pole za transportni vhod.	60
Slika 55: Prikaz postopka oblikovanja cilindrične oblike z zaključki nad pravokotnim tlorisom.....	63
Slika 56: Vizualizacija zračno podprte konstrukcije dobljene z enostavnimi oblikami	63
Slika 57: Oblika priklopa na transportni vhod, ki služi kot vhodni podatek za ixCube 4-10.....	64
Slika 58: Začetna mreža končnih elementov za priklop na transportni vhod v ixCube 4-10 iz katere iščemo zeleno obliko.	64
Slika 59: Oblika priklopa za transportni vhod dobljena s programom ixCube 4-10.	65
Slika 60: Oblika membrane, ki se bo krojila z izrezanimi luknjami za priklope.....	65
Slika 61: Začetna površina, ki jo uporabim za iskanje oblike.	66

Slika 62: Oblika, ki jo dobim z algoritmom za iskanje oblike v programu IxCube 4-10. Dobljena površina je minimalna površina.	66
Slika 63: Vizualizacija zračno podprte konstrukcije dobljene z minimalnimi površinami.	67
Slika 64: Prikaz smeri notranjih sil v našem primeru.	69
Slika 65: Nedeformirana oblika (levo) in deformirana oblika (desno) dobljena s programom ixCube 4-10.	72
Slika 66: Primerjava začetne (rdeča barva) in deformirane oblike (mreža) v programu Rhinoceros. ..	72
Slika 67: Prerez skozi začetno (rdeča) in deformirano (črna) obliko po daljši strani tri metre stran od osi sidranja.	73
Slika 68: Sedlasta deformacija cilindričnih zračno podprtih membranskih konstrukcij z zaključki nad pravokotnim prerezemom v računskem modelu (levo) in v praksi (desno) (Duol, 2014).	73
Slika 69: Prikaz gubanja priklopov na konstrukciji (Teloni Abiti, 2014).	73
Slika 70: Razlike med oblikama. Zelena barva prikazuje obliko dobljeno z izkušnjami, vijolična pa minimalno površino.	74
Slika 71: Pomanjkanje prostora pri minimalni površini. Kvader v kotu predstavlja 2 m visokega človeka Uporabljene barve so enake kot na sliki 70	74
Slika 72: Primer štirih krojnih pol minimalne površine dobljenih z IxCube 4-10.	75
Slika 73: Prikaz usmeritve membrane.	75
Slika 74: Glavne napetosti sI [kN/m] zaradi notranjega pritiska $0,3 \text{ kN/m}^2$	76
Slika 75: Glavne napetosti sII [kN/m] zaradi notranjega pritiska $0,3 \text{ kN/m}^2$	76
Slika 76: Prikaz obtežbe vetra na konstrukcijo v X smeri (levo) in Y smeri (desno)	77
Slika 77: Deformacije konstrukcije zaradi statične obremenitve vetra v X smeri.	78
Slika 78: Prikaz smeri in razporeda reakcij zaradi notranjega pritiska $0,3 \text{ kN/m}^2$ in vetra v X smeri ..	78
Slika 79: Glavna napetost sI [kN/m] zaradi notranjega pritiska $0,3 \text{ kN/m}^2$ in vetra v X smeri	78
Slika 80: Glavna napetost sII [kN/m] zaradi notranjega pritiska $0,3 \text{ kN/m}^2$ in vetra v X smeri	79
Slika 81: Deformacije konstrukcije zaradi statične obremenitve vetra v Y smeri.	80
Slika 82: Prikaz smeri in razporeda reakcij zaradi notranjega pritiska $0,3 \text{ kN/m}^2$ in vetra v X smeri. .	80
Slika 83: Glavna napetost sI [kN/m] zaradi notranjega pritiska $0,3 \text{ kN/m}^2$ in vetra v Y smeri.	80
Slika 84: Glavna napetost sII [kN/m] zaradi notranjega pritiska $0,3 \text{ kN/m}^2$ in vetra v Y smeri.	81

Slika 85: Obtežba snega na konstrukciji.....	82
Slika 86: Deformacije ob hkratnem delovanju notranjega pritiska in obtežbe snega.....	82
Slika 87: Glavna napetost s_I [kN/m] zaradi notranjega pritiska $0,3 \text{ kN/m}^2$ in snega.	83
Slika 88: Glavna napetost s_{II} [kN/m] zaradi notranjega pritiska $0,3 \text{ kN/m}^2$ in snega.	83
Slika 89: Vezna ploščica	86
Slika 90: Detajl pritrditve membrane na togo sidrišče	87
Slika 91: Prerez skozi model jeklenega profila v Scia Engineer. Horizontalno komponenta sile se prenese na zunanji rob, vertikalna pa na notranjega.....	87
Slika 92: Prikaz Von Misesovih napetosti v L-profilu, kot podlaga za izbor porušnega mehanizma za dimenzioniranje L-profila.....	88
Slika 93: Reakcije v sidrnem L-profilu, pri največji vertikalni obremenitvi.....	89
Slika 94: Vijačen kotnik v nategu, ki se ga preoblikuje v T-element (SIST EN 1993-1-8:2005).....	89
Slika 95: Preureditev enega metra L-profila v nadomestni T-element.....	89
Slika 96: Trije načini porušitve T-elementa. Levo je popolna plastifikacija pasnic, v sredini hkratna plastifikacija pasnice in porušitev vijakov, desno pa samo porušitev vijakov (BCSA/SCI Connections Group, 2013).....	90
Slika 97: Prikaz našega porušnega mehanizma. Prijemališče sile $FT, 1, Rd$ je v našem primeru na stiku med stojino in pasnico, zato tam ne more nastati plastični členek.	90
Slika 98: Vse možne porušitvene linije (BCSA/SCI Connections Group, 2013).....	91
Slika 99: Razlaga oznak uporabljenih pri računu z nadomestnimi T-elementi.	91
Slika 100: Razvitje 3D oblike na ravnino (pogled iz perspektive).....	92
Slika 101: Razdelitev membrane na več delov.....	93
Slika 102: Krojne pole za 1a in 3.	94
Slika 103: Primer kroja. Svetlo modra črta označuje odrezno linijo, temno modra je sistemska linija, siva označuje globino prekrivanja zaradi stika, kratke rdeče črtice pa so markerji, s katerimi si pomagamo pri poravnavi pol pri varjenju.	94
Slika 104: Izpis iz programa IxCube, kjer vidimo z rdečo tloris priklopa, zraven so razvite krojne pole na ravnino, v okvirčkih pa vsaka pola posebej.....	95
Slika 105: Krojna pola za transportni vhod, kot jo izpiše program IxCube 4-10.	95

1 UVOD

Ko se sprehajamo po slovenskih mestih, verjetno nismo posebno pozorni na balone, kot jim rečemo po domače, ki navadno pokrivajo teniška igrišča in bazene. To so ti. pnevmatsko stabilizirane oz. zračno podprte membranske konstrukcije. V angleško govorečih deželah jim pravijo »air-supported structures«. Zdi se, kot da jih ni veliko, vendar če boste bolj pozorni, se jih najde kar nekaj. Za njimi se skriva velika industrija in znanje, ki se je skozi čas razvilo do te mere, da so varne za uporabnika. Nenavadne so predvsem zaradi tega, ker je glavni nosilni element zrak, kar pomeni, da so to najlažje konstrukcije, ki jih je kadarkoli naredil človek. Namenjeni so večinoma pokritju teniških igrišč in bazenov z namenom zaščite pred mrazom, vetrom, dežjem in snegom, v tujini pa lahko opazimo tudi pokrita velika nogometna igrišča, večnamenske športne površine, skladišča, celo atletske steze. Te konstrukcije so večinoma preproste oblike, lahko pa se s pomočjo sodobnih računalniških orodij ustvari vizualno zanimivejše in kompleksnejše rešitve.

In kdo se ukvarja v Sloveniji s postavljanjem balonov? Trenutno dve podjetji, ki sta specializirani za to področje, to sta Duol in DBS Inženiring. Vendar samo na slovenskem trgu ne bi preživel, ker je sorazmerno majhen, pač pa svoje inženirske usluge in produkte nudita po celem svetu. Na tem trgu se srečata s svetovno konkurenco in podjetji, kot so Asati in Yeadon iz ZDA ter Plasteco Milano in Canobbio iz Italije in mnogimi drugimi. V DBS Inženiringu sem v absolventskem času in kasneje skoraj eno leto delal tudi sam, zato me je ta stvar začela zanimati. Pri svojem delu sem se srečal z različnimi problemi, specifičnimi za to področje, zato sem začel pregledovati literaturo in prišel do mnogih ugotovitev. Začetno zanimanje, delo v tem podjetju in samo dejstvo, da še do takrat nisem diplomiral sta bila povod za nastanek tega diplomskega dela

V diplomski nalogi sem poskušal narediti pregled področja, ki do sedaj v Sloveniji še ni bil celostno obravnavan. Kljub temu, da imamo dve dobri podjetji, ki delujeta na tem področju, je opaziti pomanjkanje literature iz tega področja v slovenskem jeziku, zato verjamem, da bo to delo koristilo tudi kakšnemu inženirju, zaposlenemu v omenjenih podjetjih.

Diplomska naloga je sestavljena iz dveh delov. Prvi, bolj teoretični del, zajema poglavja od 2 do 5. Na začetku (drugo poglavje) prikažem obris razvoja zračno podprtih konstrukcij od njegovih začetkov do danes. Kot je značilno za marsikatero tehnologijo, se tudi tukaj vidi prenos znanja iz vojaških v komercialne namene, predvsem šport. V tretjem poglavju se razloži razlika med različnimi vrstami membranskih konstrukcij, spoznamo se z osnovnimi principi delovanja zračno podprtih konstrukcij in z opisi posameznih komponent se dobi obris teme, ki je podrobneje razložena v četrtem poglavju. Poznavanje sestave in delovanja konstrukcije je nujno za uspešno načrtovanje le-teh, zato v četrtem poglavju konstrukcijo razdelim na posamezne dele in vsakega posebej opišem. Predstavim tehnologijo izdelave membrane, najpogosteje uporabljene detajle, način delovanja strojnice in montažo. S tem znanjem se odpravimo v peto poglavje, kjer predstavim načrtovanje takšnih konstrukcij. Na začetku

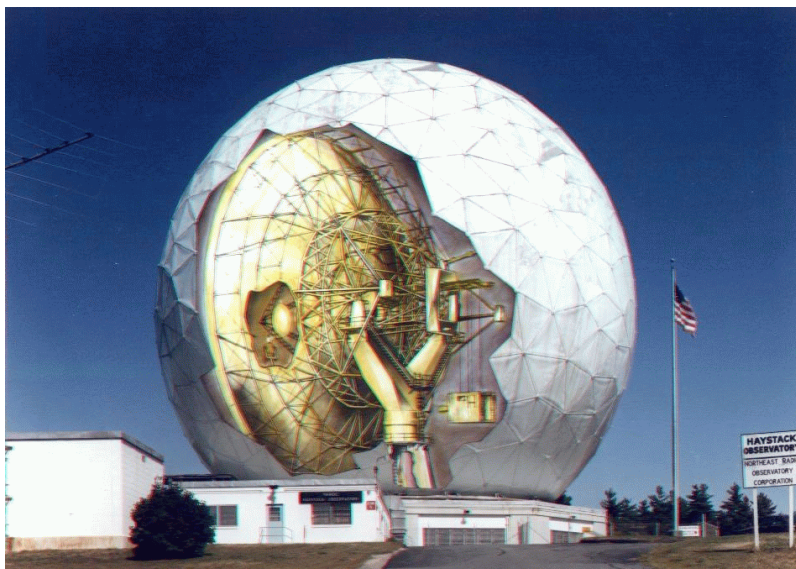
tega poglavja so predstavljeni, za klasično gradbeništvo nenavadni procesi, kot sta iskanje oblike konstrukcije in krojenje membrane. Tukaj spoznamo pojma kompenzacije in razvoja krojne pole. V nadaljevanju so opisani vplivi, ki delujejo na zračno podprto konstrukcijo s poudarkom na notranjem pritisku, vetru in snegu, ki so ključni za dimenzioniranje. Velik del tega poglavja zajema tudi opis standardov, ki se dotikajo tega področja in nam nudijo zakonsko podlago za projektiranje.

Drugi del je praktični in zajema poglavji šest in sedem. V šestem poglavju predstavim programe, ki sem jih pridobil za namene diplomske naloge in sem jih uporabil v sedmem poglavju. Programi za analizo membranskih konstrukcij so vrhunski izdelki, za katerimi se skriva kompleksno znanje, kar odraža tudi njihova cena. Cene se gibljejo od par tisoč do par deset tisoč evrov, odvisno od kompleksnosti programa. V sedmem poglavju naredim primer zračno podprte konstrukcije, ki pokrije nogometno igrišče. Zajema faze od zasnove konstrukcije, statične analize do dimenzioniranja posameznih detajlov. S slikami in komentarji poskušam na čim bolj jasn način razložiti ključne stvari.

2 ZGODOVINSKI PREGLED

Umetnost postavljanja šotorov je stara že tisočletja. Človek si je stoletja s poskušanjem in odpravljanjem napak gradil učinkovita zavetišča za bivanje in skladiščenje. Razvoj te umetnosti je zajel ogromno različic, a šele v moderni dobi je iznašel način, kako zaobiti okorne podporne sisteme z uporabo napihljivih tehnologij.

Začetki zračno podprtih konstrukcij sežejo v prva leta druge svetovne vojne, ko se je pojavila potreba po zaščiti radarskih anten pred močnim vetrom. Prve izvedbe so bile majhne toge konstrukcije v obliki sfere, narejene iz ivernih plošč ali pleksi stekla. V ZDA so jih poimenovali »radome«, kot kombinacija angleških besed »radar dome«. Tehnični tekstili so bili uporabljeni sprva le kot prevleka z namenom zaščite pred navlaženjem nosilne konstrukcije.



Slika 1: Observatorij Haystack z jekleno konstrukcijo in zaključnim slojem iz membrane (Tracy, 2006)

Radarske antene so se uporabljale tudi po drugi svetovni vojni in so sčasoma pridobivale na velikosti, zato jih je bilo potrebno še toliko bolj zaščititi pred neugodnimi vplivi vetra, še posebej tiste, ki so bile nameščene v arktičnih conah, kjer so močnejši vetrovi. Uporaba lahke arhitekture se je ponujala kar sama od sebe, saj so bili prihranki na teži za konstrukcijske elemente in temelje očitni.



Slika 2: Telstarjeva kupula v Andover, Maine, ZDA. Identični dvojček stoji v Franciji (Punnet, 2002).

Poleg zaščit za radarske sisteme, so se v vojski napihljive konstrukcije uporabljale tudi za začasna mobilna pokritja. Prednosti so bile manjša teža, cena, volumen pri transportu ter velika mobilnost. Z razvojem takšnih in drugačnih zračno podprtih konstrukcij se je začela tovrstna umetnost postavljanja šotorov postopoma razvijati iz obrti v vejo znanstvenega načrtovanja (Design manual ..., 1969).

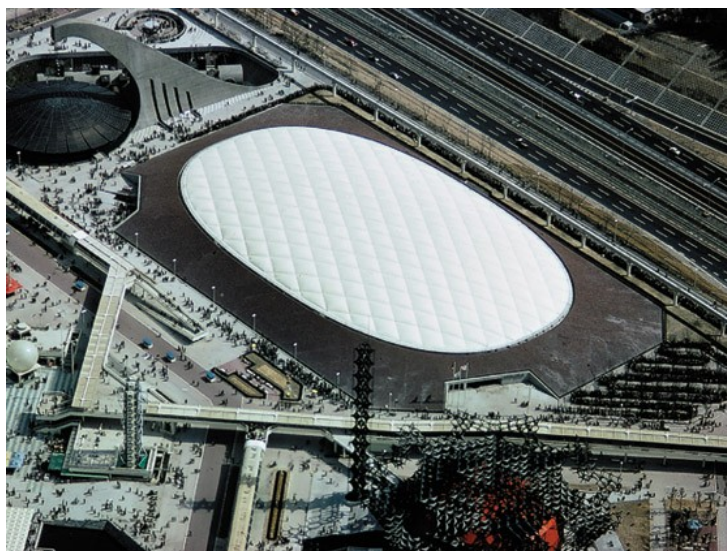


Slika 3: Mobilni napihljivi vojaški šotor ameriške vojske (Caldera, 1998)

Kmalu se je zgodil prenos teh konstrukcij iz vojaških v civilne namene. Ameriško podjetje ASATI je bilo pionir na tem področju, saj je tlakovalo pot zračno podprtim konstrukcijam v industrijske in rekreacijske namene. Leta 1962 je bila postavljena prva zračno podprta konstrukcija nad obstoječim teniškim igriščem. Zasnovano je bilo nad pravokotnim tlorisom, kar je omogočalo boljši izkoristek prostora in manjšo porabo materiala. Sledila je seveda aplikacija na vse športe, od kopalšč, do ameriškega nogometa, celo golfa (1982).

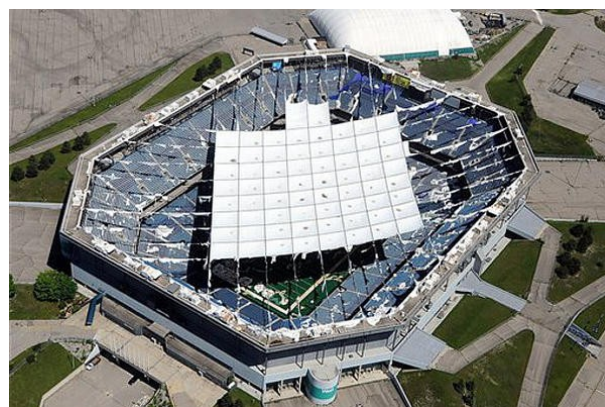
Svetovna razstava Expo leta 1970 je bil nekakšna prelomnica pri zračno podprtih konstrukcijah. Paviljon ZDA je pokrivala zračno podprta membranska konstrukcija, ki je imela tlorisno obliko v obliki elipse razpona 80x140 m in je bila vkopana v zemljo. Nosilni sistem so bile jeklene vrvi sidrane

v betonski nosilec, ki je ležal na zemeljski bermi, membrana pa je poskrbela za zrakotesnost. Notranji pritisk je bil 200 paskalov.



Slika 4: Ameriški paviljon na svetovni razstavi Expo 1970 (Geiger, 1975)

To je v kasnejših letih povzročilo razmah tovrstnega sistema za pokritje stadionov. Prvi primer je bila Pontiac Silverdome v Michiganu, ZDA, zgrajena leta 1975, ki je imela streho iz steklenih vlaken prekritih s teflonskim premazom. Po poškodbi v snežnem neurju 1985 so jo zamenjali z novo in dodali ojačitve iz jeklenih vrvi. Z raznimi izboljšavami za topljenje snega je zdržala več kot 25 let, tj. do januarja 2013, ko je jo spet poškodovalo snežno neurje in sedaj sramotno razpada, verjetno tudi kot posledica splošne gospodarske krize v Detroitu.



Slika 4: Pontiac Silverdome leta 2005 na sliki levo (Goodman, 2009) in isti razpadajoči objekt posnet leta 2013 na sliki desno (Gurganian, 2014)

Podobna streha je bila tudi na stadionu Metrodome v Minneapolisu, Minnesota, ZDA, zgrajenim leta 1982, vendar je imela veliko več težav kot njena vzornica iz Michigana. Kar petkrat se je poškodovala, štirikrat v svojih prvih petih letih delovanja, vsakokrat je bil razlog močno snežno neurje. Po začetnih težavah so uvedli dvodelno strategijo: ko se je pričakovalo nabiranje snega so vpihovali vroč zrak med obe membrani, poleg tega so na streho splezali delavci, ki so z vročo vodo in paro topili nabirajoči se sneg. Ta strategija je delovala do leta 2011, ko so streho zamenjali zaradi dotrajanosti. Stadion je bil v

obratovanju do konca leta 2013, ko so se odločili, da bodo na tem mestu zgradili nov stadion. Izven ZDA ima takšno streho stadion v Tokiu, ki pa brez težav obratuje od leta 1988.



Slika 5: Notranjost stadiona Tokyo Dome med baseball turnirjem leta 2007 (Broadrec, 2007)

Ostali zgradbe s takšno streho so še Syracuse University Carrier Dome (1980), Hoosier Dome v Indianapolis (1983) in BC Place Stadium v Vancouveru (1983). Začetni zagon v osemdesetih se je do danes precej umiril, saj se je ekonomija v profesionalnem športu spremenila. Dandanes se veliko več kapitala vlaga v športne prireditve kot v osemdesetih, zato prednosti »cenejše« zračno podprte konstrukcije niso toliko izrazite. Veliki so tudi vzdrževalni stroški, predvsem z ogrevanjem v primeru sneženja. Pomisleki so nastali tudi zaradi možnosti porušitve takšne strehe in strahu, ki ga ta prinaša pri ljudeh. Ta je povsem odveč, saj lahko takšna konstrukcija samo izgubi pritisk, ne more pa se porušiti na ljudi. Zračno podprta konstrukcija je *aktiven* sistem, ki zahteva stalni nadzor ljudi, ti pa lahko delajo napake (Riddle, M., 2010).

Expo '70 je predstavil še eno vrsto zračno podprtih oz. v tem primeru napihljivih konstrukcij, ki so tudi vredne omembe. Japonski paviljon skupine Fuji, pa je bila za tiste čase največja napihljiva konstrukcija. Na krožnem tlorisu radija 50 m, so bili postavljeni loki iz membranskih cevi, ki so bili pod pritiskom skoraj 10.000 paskalov. Ker je bilo vseh 16 lokov enako dolgih, njihovo vpetje pa se je od sredine stran ožilo, je prišlo do značilne oblike. Loka na sredini sta imela polkrožno obliko, loki stran od centra pa so imeli vedno ožje vpetje in s tem višji vrh.



Slika 6: Paviljon skupine Fuji na svetovni razstavi Expo 1970 (Poltrack, 2013)

Izvedenke iz takšne konstrukcije lahko vidimo tudi v Sloveniji, npr. v Šentvidu nad Ljubljano, kjer pokriva inline hokejsko igrišče.

Prednosti zračno podprtih konstrukcij se izkorišča tudi pri zaščiti začasnih delovišč in gradbišč. Njihova uporaba je posebej koristna v arktičnih pogojih pri gradnji cevovodov ali pri gradnji v zimskem obdobju, ker se lahko celotno gradbišče pokrije z zračno podprto konstrukcijo, kar pospeši gradnjo in zaščiti gradbišče in delavce pred zunanji vplivi.



Slika 7: Zračno podprta konstrukcija podjetja ASATI, ki je pokrila celotno gradbišče (ASATI, 2014).

Danes se zračno podprte konstrukcije še vedno večinoma uporabljajo za pokrivanje športnih igrišč, skladiščenje in zaščito gradbišč. Tehnologija je dovolj dobro raziskana, da je zagotovljena varnost in trajnost konstrukcij. Sodobna računalniška orodja nam omogočajo projektiranje še večjih konstrukcij in iskanje še bolj nenavadnih oblik, kar s pridom izkoriščajo arhitekti. Trenutno največja zračno

podprta konstrukcija je postavljena v Južni Koreji nad odlagališčem odpadkov in meri neverjetnih 215m x 215m v tlorisu in 45 m v višino.



Slika 8: Največja zračno podprta konstrukcija na svetu postavljena leta 2006 v Južni Koreji (Southern Inflatables, 20149)

Primer sodobne arhitekture in oblikovanja pa se izraža v konstrukciji na slikah 9 in 10. To je prenosljiva koncertna dvorana Arc Nova, ki sta jo oblikovala kipar Anish Kapoor in arhitekt Arata Isozaki in je bila namenjena turneji po celotni Japonski, ki je okrevala po uničljivem potresu in cunamiju leta 2011. Sprejme lahko do 500 ljudi skupaj z orkestrom, ki jih poleg dobre glasbe očara s svojo nenavadno obliko in igro svetlobe z membrano vijolične barve.



Slika 9: Zračno podprta koncertna dvorana Arc Nova, ki gostuje po delih Japonske, ki jih je prizadel potres in cunami (Azzarello, 2013).

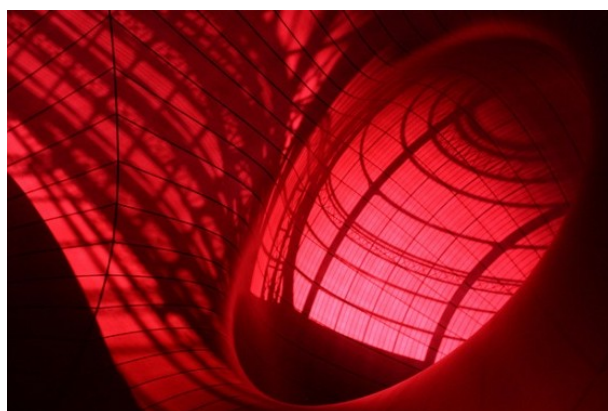


Slika 10: Notranjost koncertne dvorane Arc Nova (Azzarello, 2013).

Zračno podprte konstrukcije so dobile svoj prostor tudi v umetnosti. Anish Kapoor je leta 2011 za razstavo Monumenta v Parizu postavil konstrukcijo Leviathan, ki je dobila ime po morski pošasti iz Svetega pisma. Konstrukcija lepo zapolni prostor v pariški Grand Palais, poleg tega so se lahko obiskovalci sprehodili po notranjosti in občudovali igro senc na prosojni rdeči membrani.



Slika 11: Leviathan Anisha Kapoorja (Frearson, 2011).



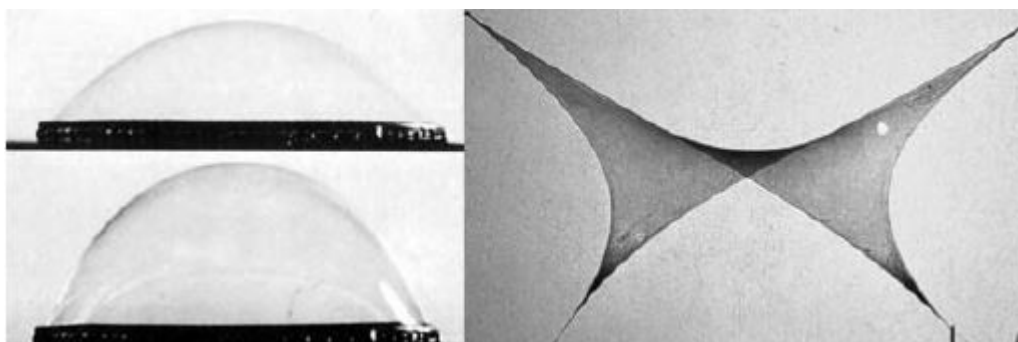
Slika 12: Notranjost Levithana (Frearson, 2011).

3 PRINCIPI DELOVANJA IN OBLIKOVANJA NAPIHLJIVIH KONSTRUKCIJ

3.1 Kako delujejo?

Zračno podprte membranske konstrukcije so del družine prednapetih membranskih konstrukcij. Membranske konstrukcije dobijo obliko zaradi ravnotežja nateznih sil, ki delujejo v membrani, zato so to zelo naravne konstrukcije podobno kot lupinaste in drevesno razvejanje konstrukcije. V grobem ločimo prednapete membranske konstrukcije v dve skupini:

- Antiklastične membrane ali dvojno ukrivljene membrane, pri katerih imata glavna radija ukrivljenosti (v dveh pravokotnih smereh) nasprotni predznak. Napete in stabilizirane so zaradi mehansko vnesenega prednapetja.
- Sinklastične membrane ali dvojno ukrivljene membrane, pri katerih imata glavna radija ukrivljenosti (v dveh pravokotnih smereh) enak predznak. Napete in stabilizirane so zaradi zračnega ali hidravličnega pritiska, ki deluje pravokotno na membransko površino.



Slika 13: Modeli iz milnice, ki predstavljajo sinklastično obliko (levo) in antiklastično obliko (desno) (Forster in sod., 2004)

Zračno podprte membranske konstrukcije imajo sinklastične oblike. Razliko v pritisku omogočajo ventilatorji, ki vpihujejo zrak pod nepropustno membransko površino. Tako ni potrebe po togih podpornih elementih, kot so stebri, zidovi, loki itd., kar naredi zračno podprte konstrukcije najbolj lahke konstrukcije, kar jih je naredil človek. Teoretično bi lahko takšna konstrukcija imela razpon več kilometrov (Forster in sod., 2004).

Konstrukcije, ki izkoriščajo zrak kot nosilni element, se razlikujejo med seboj po načinu kako ga izkoriščajo. V diplomskem delu se osredotočam predvsem na enostenske konstrukcije, pri katerih se zrak vpihuje v prostor med tlemi in membrano, in tako nastane razlika v pritisku med zunanostjo in notranostjo. Membrana lebdi na zraku, od tod tudi poimenovanje »zračno podprte« membranske konstrukcije. Ker mora biti konstrukcija ves čas zrakotesna, mora biti vstopanje in izstopanje ljudi in opreme narejeno preko posebnih elementov, kot so npr. krožna vrata ali dvojna vrata. Druga vrsta konstrukcij so dvostenske membranske konstrukcije, pri katerih se zrak vpihuje v zaprte membranske elemente, ki ne prepuščajo zraka in se zaradi tega napihnejo. Takšni elementi delujejo nato kot nosilec, steber, lok, stena ali plošča, ki se jih lahko v kombinaciji z drugimi uporabi za nosilni sistem. Posebna

izvedba vrat ni potrebna, ker ne vstopamo v prostor z nadpritiskom. Takšne konstrukcije imenujemo napihljive konstrukcije.

3.2 Oblike

Oblika membrane ima odločujoč vpliv na arhitekturno in strukturno kvaliteto in s tem na dolgotrajno obnašanje konstrukcije. Skupaj z notranjim pritiskom določa tudi razpored notranjih sil. Zračno podprte konstrukcije imajo lahko različne oblike nad poljubnim tlorisom. V nadaljevanju bodo predstavljene nekatere uporabne oblike.

3.2.1 Enostavne geometrijske oblike

Pod to kategorijo lahko uvrstimo sfero, elipsoid in stožec. Sfera je zelo pogosto uporabljena oblika. Lahko se uporabi celo sfero ali samo del. Sferična oblika omogoča enako razporeditev sil po vsej površini. Svoje praktične izvedbe je dobila v zaščitah za radarske antene kot na sliki 2 in drugod. Elipsoid je malo oz. skoraj nič uporabljena oblika. Stožec je primerna oblika, ker ima enojno ukrivljeno površino, ki se jo enostavno razvije na ravnino, vendar se v praksi zelo redko uporablja. V takšni zračno podprti konstrukciji je razporeditev sil zelo neenakomerna. Vrh je izpostavljen obremenitvam vetra, membrana pa tam ni tako napeta. Sploščeni stožec bi bil bolj uporaben, ker bi sneg še vedno lahko zdrsnil z membrane, izpostavljenost vetru pa bi bila manjša. Potrebno bi bilo le sploščiti oz. zaobliti vrh, vendar potem oblika ne bi bila več enostavna (Otto in sod., 1982).

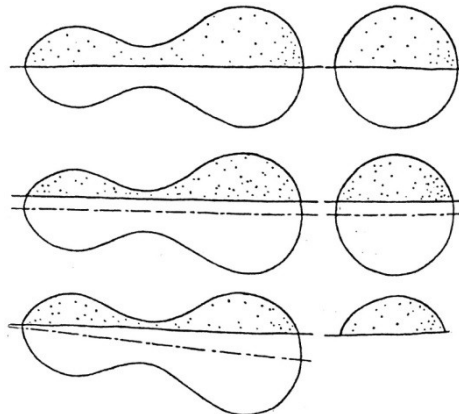


Slika 14: Prikaz enostavnih geometrijskih oblik na primeru rezervoarjev za bioplin (ArTech, 2014).

3.2.2 Rotacijske ploskve

Rotacijske ploskve ali vrtenine so dobljene z vrtenjem krivulje okoli neke osi. Pri zračno podprtih konstrukcijah so takšne izvedbe možne, pri čemer je zaželeno, da so ploskve gladke, s čimer se izognemo skokom napetosti na mestih ne gladkosti. Določene ne gladkosti so sicer dovoljene, vendar je potrebno tem mestom posvetiti posebno pozornost, tako da se na teh mestih vstavijo ojačitveni obroči ali jeklene vrvi. Takšna ne gladkost nastane npr. pri kombiniranju cilindra in dela sfere. Na mestu stika pride do skoka ukrivljenosti, zato je tam tudi skok v napetostih. Napetosti se sicer v realnosti porazdelijo po območju blizu stika, s tem pa se spremeni tudi ukrivljenost valja in dela sfere na tem

območju. Tako na koncu ne dobimo točno takšne oblike, kot smo si jo zamislili. Pri zračno podprtih konstrukcijah ni potrebno da je oblika ravno polovica rotacijskega telesa. Kakršni koli prerez skozi telo zadostuje (Otto in sod., 1982).

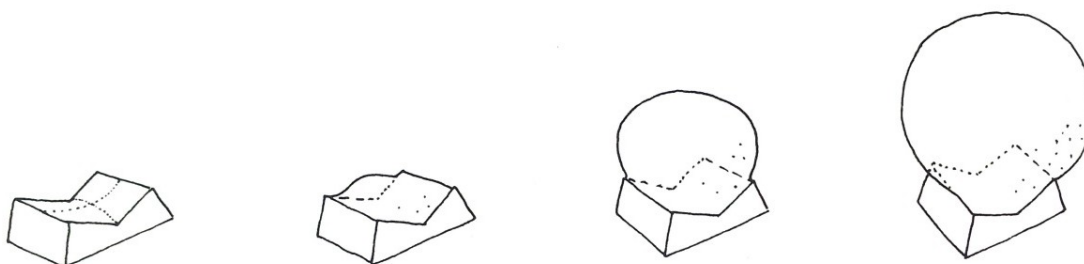


Slika 15: Vsak prerez skozi rotacijsko telo zadostuje (Otto in sod., 1982).

3.2.3 Minimalne površine

Ploskev, ki zasede najmanjšo površino pri danih pogojih, je minimalna površina. Enostavno se jih modelira z milnico, lahko pa si pomagamo s kakšnim računalniškim programom, ki ima vgrajene algoritme za iskanje minimalne površine. Prikaz minimalnih površin je na sliki 13.

Vse pnevmatsko obremenjene minimalne površine, ki so razprte nad nekim fiksnim okvirjem, imajo dve mejni obliki; sedlo in sfero. Kadar ni pritiska je površina sedlasta. Ko se pritisk povečuje, se površina vedno bolj preoblikuje proti sferasti obliki. Sedlasta površina sčasoma izginja in prevladujoča površina postaja sfera. To je torej končna oblika.



Slika 16: Prikaz mejnih vrednosti minimalne površine napete na nekem okvirju (Otto in sod., 1982).

Minimalne površine so pomembne, ne samo zato, ker imajo najmanjšo možno površino, ampak imajo zelo ugoden razpored napetosti, primeren za membranske konstrukcije. Napetosti so v vsaki točki na površini enake velikosti v vseh smereh. Tako je lahko material optimalno izkoriščen, obenem pa se izognemo koncentracijam napetosti. Čeprav se minimalne površine niso pogosto izvedle v praksi, pa je razumevanje minimalnih površin začetna točka vsakega iskanja oblike. Iz odstopanj od minimalnih površin lahko sklepamo na razporeditev notranjih sil. Večja kot so odstopanja, bolj se bodo razlikovale notranje sile od enakomernega razporeda sil.

Minimalna površina se lahko razvije nad vsakim tlorisom. Najbolj so uporabne minimalne površine v obliki sfere ali elipsoida, ki nastanejo nad neko gladko in zaprto krivuljo, saj je prostor pod njimi zelo dobro izkoriščen. Drugače velja za minimalne površine nad ostrorobnimi tlorisi, kot so npr. pravokotniki. Minimalna površina se na tem mestu začne kot tangenta, ki leži v ravnini, ki jo definirata stranici pravokotnika. Tam so prostori zelo slabo izkoriščeni, saj je na tem mestu navadno premalo svetle višine. Prav tako pa se tam lahko nabira sneg ali voda, ker so nakloni zelo majhni (Otto in sod., 1982).



Slika 17: Oblikovanje minimalne površine nad ostrorobnimi tlorisi. Za pridobitev večje svetle višine v kotih lahko kote zaobljimo in povišamo (Otto in sod., 1982).

3.2.4 Ostale oblike

Možne so tudi vse ostale oblike, ki ne sodijo v zgornje kategorije. Takšne oblike imajo navadno zelo spremenljive napetosti po površini in s časom spreminjajo obliko zaradi neenakomernih deformacij. V večini primerov, po stabilizaciji z notranjim pritiskom, ne dosežejo oblike, ki je bila zamišljena na začetku. To se dogaja zaradi neenakomernih sprememb v ukrivljenosti, kar hoče konstrukcija po stabilizaciji popraviti samodejno. Takšne oblike se uporabljajo predvsem zaradi enostavnega krojenja z malo odpadnega materiala, zaradi boljše izkoriščenosti prostora pod njimi ali pa zaradi posebnih zahtev arhitekta (sliki 9 in 10).



Slika 18: Levo sta dve konstrukciji sestavljeni iz cilindra in z zaključki nad pravokotnim tlorisom, ki je najpogosteje uporabljena oblika v praksi, desno pa kombinacija enake oblike s sfero (Plasteco Milano, 2014).

3.3 Ostali sestavni deli napihljive konstrukcije

Da membrana lebdi nad slojem zraka pod pritiskom, skrbijo ventilatorji, ki vpihujejo zrak med membrano in tlemi in so nameščeni zunaj konstrukcije kjer zajemajo zrak. Ventilatorji za delovanje potrebujejo elektriko ali fosilna goriva, zato mora biti njihova dobava nemotena ves čas. Zrak prehaja

iz zunanosti v notranjost objekta skozi zračne kanale, ki se lahko speljejo pod zemljo ali nad zemljo skozi betonski temelj ali skozi membrano. Skupaj z ventilatorjem se v strojno enoto navadno dodaja tudi ogrevalno opremo, ki skrbi za ogrevanje zraka v objektu.



Slika 19: Levo je primer strojne enote z ogrevanjem na plin (Apen Group, 2014) desno pa njena namestitvev na objekt (Teloni Abiti, 2014).

Zrakotesnost membrane mora biti čim boljša, ker s tem privarčujemo na energiji za napihovanje. Za vstopanje in izstopanje iz objekta mora biti poskrbljeno tako, da se ne izgublja notranji pritisk. To se navadno naredi s krožnimi ali z dvojnimi vrati. Ker takšna vrata ne omogočajo hitrega izstopanja v primeru nevarnosti, se vgradi tudi zasilne izhode, ki so enojna vrata s panično kljuko.

Znano je, da so zračno podprte konstrukcije velik potrošnik energije. Potrebujemo stalno obratovanje ventilatorjev za napihovanje in veliko energije za ogrevanje. Membrana ima zelo slabe toplotno izolacijske lastnosti, zato se veliko energije izgubi skozi ovoj konstrukcije. To slabost se skuša odpraviti s tako imenovano »dvojno« ali celo »trojno« membrano. Najenostavnejša rešitev je, da se na nosilno membrano privari še dodatno membrano ali dve, tako da je vmes ujet zrak. To deloma pomaga, vendar so še vedno veliki linijski toplotni mostovi na mestu zvara. Poleg tega je potrebno ob sneženju zrak iz dvojne membrane izpustiti, da povečamo toplotno prehodnost in s tem pospešimo taljenje snega z membrane. Kompleksnejše rešitve z manj toplotnimi mostovi že obstajajo, vendar na trgu ne zaživijo zaradi njihove večje cene.

4 MATERIALI IN GRADNIKI NAPIHLJIVE KONSTRUKCIJE

Pri zračno podprtih membranskih konstrukcijah mora sodelovati med seboj več komponent, da dosežemo željen učinek. Glavni nosilni element je zrak pod pritiskom. Da lahko imamo zrak pod pritiskom pa potrebujemo zrakotesni ovoj in izvor nadtlaka. Zrakotesni ovoj sestavljajo tla in primerno pritrjena membrana, nadtlak pa navadno ustvarjajo strojnice z ventilatorji, ki omogočajo vnos zraka pod pritiskom.

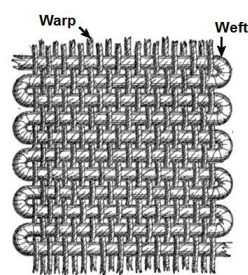
4.1 Membrana

Konstrukcije z velikim razponom, narejene iz materiala, ki služi kot konstrukcijski element in kot zaščita pred okoljskimi vplivi, se imenujejo membranske konstrukcije in mednje spadajo tudi zračno podprte membranske konstrukcije. Opis (lat. membrana = koža) se nanaša po eni strani na funkcijo, ki jo opravlja, po drugi pa na dimenzijo, saj označuje material, ki je tanek kot koža. Ti materiali so v gradbeništvu poznani kot tehnične membrane. V to skupino sodijo tako tehnične tkanine (prevlečene ali ne) kot tudi tehnične folije (termoplastni kopolimeri) (Seidel, 2009).

4.1.1 Tehnične tkanine

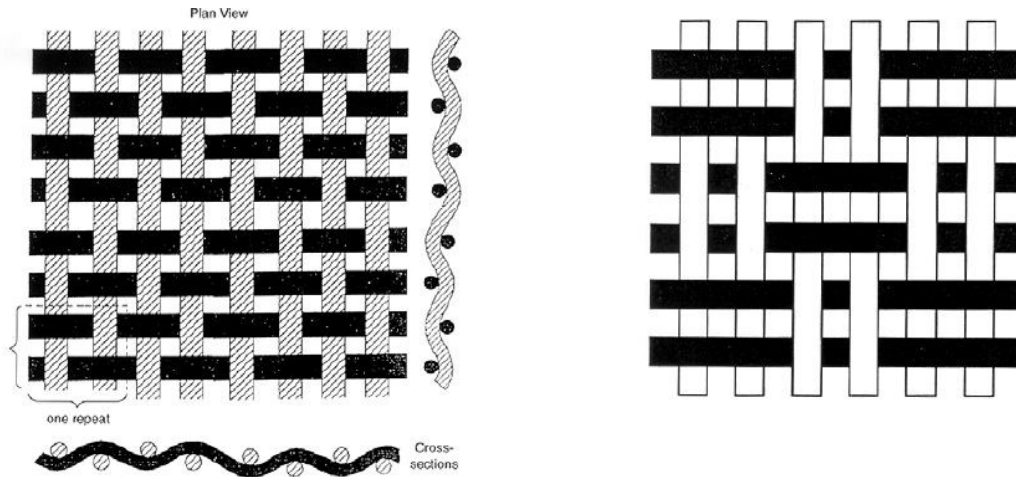
Tehnične tkanine so kompozitni materiali, sestavljeni skupaj po plasteh tako, da lahko opravljajo vse namenske funkcije za katere so bile predvidene (velike razpone, odpornost na obremenitve, atmosferske vplive, temperaturo). Grobo bi ga lahko razdelili na tri sloje. Sredinski del, narejen iz tkanine, opravlja nosilno funkcijo, ki pa bi imel zelo kratko življenjsko dobo, če ne bi bil zaščiten. Zato se na zgornjo in spodnjo stran tkanine nanese premazna plast, ki ščiti tkanino pred različnimi viri poškodb (UV žarki, obraba, atmosferski vplivi), omogoča vodotesnost, stabilizira sicer nestabilno tovarniško geometrijo in omogoča stikovanje membrane z metodo varjenja (Forster in sod., 2004)

Tehnične tkanine so narejene iz med seboj pravokotno pletenih prej, ki so sestavljene iz posameznih bodisi vzporednih ali zasukanih niti. Značilni smeri v katerih se prepletata se imenujeta osnovna in votkovna (prečna) smer. Osnovna smer je tista, v kateri so prejne niti pod napetostjo v statvi; tiste niti, ki pa se vstavljajo prečno nad in pod osnovne niti pa so votkovne niti.



Slika 20: Levo: enostavni prikaz vezenja (Oman, 2006). Desno: razlika med osnovno in votkovno smerjo (Warp and ..., 2014)

Obstaja več načinov prepletanja preje, vendar sta pri izdelavi tehničnih membran v uporabi pretežno samo dva. Platno vezava je najbolj enostavna vezava, kjer se prepletajo posamezne niti preje. Panama vezava pa je način prepletanja, pri katerem se med seboj prepletajo pari niti. Razlika med enim in drugim je ta, da se pri panama vezavi niti manj gubajo (Forster in sod, 2004).



Slika 21: Prikaz dveh različnih vezav platna. Levo platno vezava, desno panama vezava (Forster in sod., 2004) Zaradi procesa tkanja imajo osnovne in votkovne niti različno geometrijo. Osnovne niti imajo zaradi napenjanja v statvah bolj razpotegnjeno krivuljo, medtem ko imajo votkovne niti bolj nagubano krivuljo, so s tem mehkejše in manj napete od osnovnih niti, kar pomeni da ima material različne lastnosti v obeh smereh. Tehnične tkanine so tkane na avtomatskih statvah v širinah do približno 5 m. Normalna širina role je od 2.05 m do 2.50 m, dolžina pa je lahko tudi do 2200 m. V odvisnosti od tipa vezave, debeline niti in širine role, traja tkanje 1000 m role od enega do tri dni in je to najbolj časovno potrošen proces pri izdelavi membrane (Seidel, 2009).

Ta struktura se nato obdelava z dodatnimi spojinami, prevleče s posebnimi sloji in površinsko obdelava, da se zaščiti pred zunanjimi vplivi. Vplivi so lahko odvisni od obtežbe kot so velikost in spreminjanje napetosti in lezenje ali pa so neodvisni od obtežbe kot so staranje, naravni klimatski in atmosferski vplivi, biološki in kemični vplivi ter požar. Odpornost proti tem vplivom se doseže z vrsto ukrepov med proizvodnjo, vendar je nemogoče izdelati popolno membrano. Zato se izdeluje namenske membrane, ki se v nekaterih pogojih bolje obnesejo kot v drugih.

Najpogosteje sta v uporabi dve vrsti kompozitov:

- Poliestrske tkanine prevlečene s PVC premazom (PET/PVC).
- Visoko nosilna tkanina iz steklenih vlaken prevlečene s PTFE premazom (FG/PTFE).

Med drugim se uporabljajo tudi tkanine iz steklenih vlaken prevlečene s silikonom, aramidne tkanine s PVC premazom in poliestrske tkanine s fluoro-polimernim premazom.

4.1.1.1 PET/PVC

Pri tkaninah prevlečenih s PVC premazom se najpogosteje uporabljajo sintetično polimerna vlakna (polietilen tereftalat = PET). Vlakna imajo velik vpliv na materialne lastnosti tkanine. Njihova največja prednost je dimenzijska stabilnost na kemijske in fizikalne vplive in da ne gnijejo. PET spada med skupino delno kristaliziranih termoplastov, ki se topijo pri 265 °C. Nad to temperaturo se začne material mehčati in dobi viskozne lastnosti (Seidel, 2009). Preja za tkanino je dobljena s sukanjem stopljenih vlaken polimerov pri 265 °C potisnjenih skozi vrtečo predilko. Med ohlajanjem se makromolekulske verige usmerjajo in ukrivljajo. Preja gre nato še skozi serijo valjčkov, ki jo razvlečejo in s tem še povečajo vrednost elastičnega modula in trdnosti. Tako dobljena preja se prepleta med seboj v dveh smereh, da dobimo tkanino. PVC sloj, ki se ga nanese na tkanino je termoplast in je različnih debelin. Prav debelina tega sloja določa, koliko je tkanina zaščitena. Večja kot je debelina, bolj je tkanina zaščitena. Običajne debeline so od 0,08 mm do 0,25 mm. Pri tekstilu tipa 1 je npr. skupna teža tega sloja 500 g/m², pri čemur je 200 g/m² nanese spodaj, 300 g/m² pa zgoraj. Na PVC sloj se nanese še sloje, ki površino dodatno obdelajo tako, da ga zaščitijo pred umazanijo, vlago in izgubo plastifikatorjev (Seidel, 2009). PET/PVC tehnični tekstili se delijo v pet različnih tipov. Predstavljeni so v naslednji preglednici.

Preglednica 1: Klasifikacija PET/PVC membran (Forster in sod., 2004).

Tip	1	2	3	4	5
Teža (g/m ²)	800	900	1050	1300	1450
Natezna trdnost osnova/votek (kN/m)	60/60	88/79	115/102	149/128	196/166

4.1.1.2 FG/PTFE

Če so potrebne posebne zahteve za trajnost in požarno odpornost se uporabi FG/PTFE tkanino. Steklena vlakna so UV odporna, vendar slabo reagirajo ob stiku z vodo. Proizvaja se jih podobno kot PET vlakna, s to razliko, da se steklena vlakna najprej ohladijo in nato zvijejo v prejo. Preja se nato prepleta v enega izmed prej omenjenih vzorcev. Med proizvodnjo se premažejo z vodno PTFE emulzijo, ki jo izpostavijo infrardečim žarkom, da voda popolnoma izhlapi, in nato še sintrajo. PTFE je negorljiv in se ga lahko uporablja med -270 °C in 300 °C brez stabilizatorjev in plastifikatorjev. Sloj PTFE se zaradi karamelizacije po nanosu premaza obarva rahlo rjavkasto, kar pa po parih mesecih uporabe izgine zaradi izpostavljenosti UV žarkom. Slabost te vrste membrane je dovzetnost za gubanje, kar zahteva posebni detajl na njenem robu. Poleg tega so občutljive za pregibanje, zato niso primerne za uporabo pri montažnih konstrukcijah. Zahtevna je tudi montaža, ker je tak material zelo tog v strigu in se lahko postavi le pri temperaturah nad 5 °C brez poškodb (Seidel, 2009). FG/PTFE tehnični tekstili se delijo v sedem različnih tipov. Predstavljeni so v naslednji preglednici.

Preglednica 2: Klasifikacija FG/PTFE membran (Forster in sod., 2004).

Tip	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7
Teža (g/m^2)	500	420	800	1000	1200	1500	1600
Natezna trdnost osnova/votek (kN/m)	26/22	43/28	70/70	90/72	124/100	140/120	170/158

4.1.2 Tehnične folije

Druga skupina materialov so tehnične plastike narejene iz fluoro-termo plastik v obliki folije. Ker so skoraj popolnoma transparentne in zelo lahke, vedno bolj pridobivajo na popularnosti. Imajo pa v primerjavi s tehničnimi tkaninami slabost, da nimajo tolikšne nosilnosti, zato se jih ne more uporabljati za velike razpone, ampak morajo biti pogosteje podprte s primarnimi ali sekundarnimi nosilnimi elementi (Seidel, 2009). Najbolj poznani foliji sta THV in EFTE. Najbolj uporaben je EFTE, ki je kopolimer etilena in tetrafluoroetilena in se topi pri 250-270 °C. Njegove prednosti so 90 % transparentnost, visoka absorpcija radiacije in nizka absorpcija UV in vidne svetlobe (Forster in sod., 2004). EFTE folije imajo elastično izotropno obnašanje, nekatere lastnosti pa so vidne iz naslednje tabele.

Preglednica 3: : Klasifikacija EFTE membran (Forster in sod., 2004).

Debelina (mikroni)	Teža (g/m^2)	Natezna trdnost vzdolžno/prečno (kN/m)	Natezna deformacija vzdolžno/prečno (%)	Odpornost proti trganju (N)
50	87,5	64/56	450/500	450/450
80	140	58/54	500/600	450/550
100	175	58/57	550/600	430/440
150	262,5	58/57	600/650	450/430
200	350	52/52	600/600	430/430
250	437,5	>40/>40	>300/>300	>300/>300

4.2 Metode spajanja

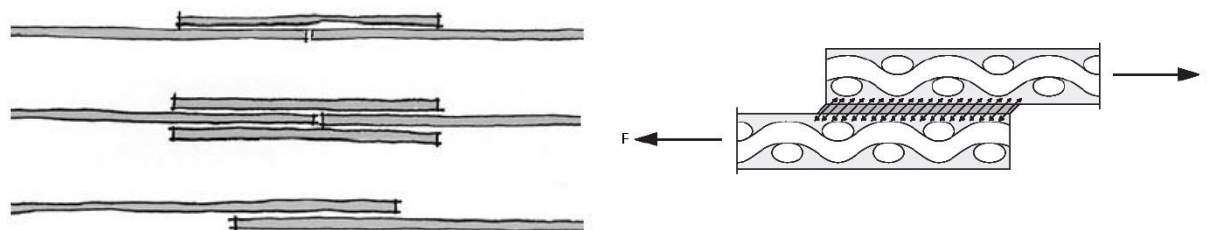
Trakove, ki jih izrežemo iz materiala, dobljenega v roli, moramo združiti, da dobimo nosilno površino. Trajni stiki se navadno naredijo v tovarni, montažni stiki pa na mestu vgradnje.

4.2.1 Trajni stiki

Obstaja več izvedb trajnih stikov; lahko so varjeni, šivani, varjeni in šivani ali lepljeni. Stik izbiramo glede na material in konstrukcijske zahteve. Trajni stiki so navadno fleksibilni stiki, vendar obstaja razlika v togosti med stikom in stikovanim materialom. Ker se stiki manj deformirajo, to povzroča nepravilnosti v obliki konstrukcije.

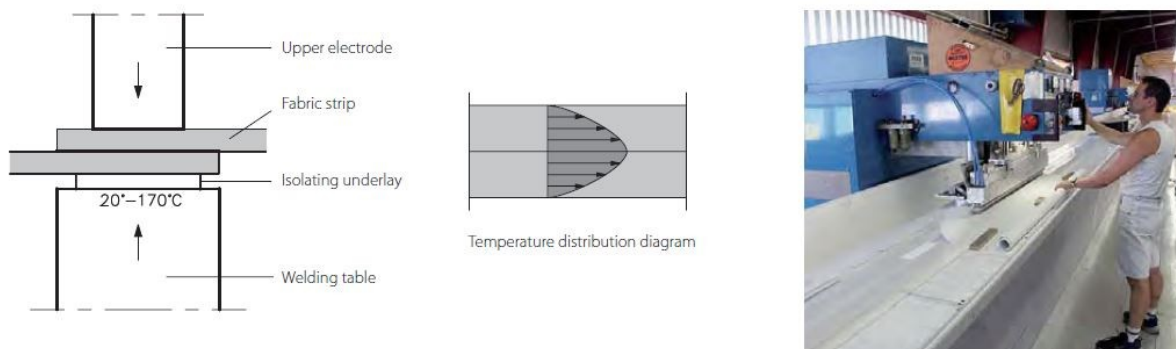
Varjeni stiki

To je najpogosteje uporabljen način stikovanja v membranskih konstrukcijah. Izvaja se jih v delavnici s prekrivanjem dveh kosov materiala na različne načine ali pa s čelnim stikom, ki ga prekriva vezni trak. Nosilnost takih stikov je odvisna od procesa in temperature varjenja in znaša med 60 % in 95 % nosilnosti stikovanega materiala. Sila se v stiku iz enega kosa na drugega prenaša s strigom med dvema slojema premaza.



Slika 22: Načini varjenja (levo) in prikaz prenosa sile v zvaru (desno) (Forster in sod., 2004).

Poznamo dva načina varjenja in oba izkoriščata toploto in pritisk za stikovanje: visokofrekvenčno in toplotno varjenje. Visokofrekvenčno varjenje je možno pri določenih termoplastih. Če se tak material položi v polje visokofrekvenčnega sevanja in stisne, se zaradi oscilacij molekul začne segrevati in viskozno teči. Ko sevanje preneha se mora stik ohladiti, da se stopljena masa strdi. Stiki v PET/PVC membrani dosežejo 90 % nosilnosti materiala pri sobni temperaturi in 60 % pri 70 °C. Povprečne širine stikov so med 50 in 80 mm. Nekatere PET/PVC membrane imajo zaključne premaze, ki vsebujejo fluor, kot npr. PVDF. Ti imajo zelo visoko temperaturo taljenja zato se stik ne more združiti. Pred varjenjem je zato potrebno zbrusiti premaz na mestu varjenja.

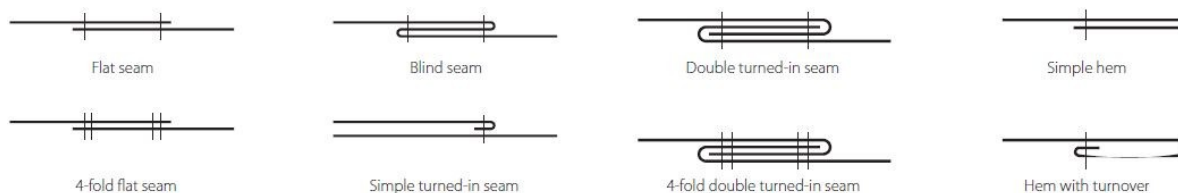


Slika 23: Diagram visokofrekvenčnega varjenja (levo in sredina) in praktični prikaz (desno) (Seidel, 2009).

FG/PTFE tkanine se vari s toplotnim varjenjem. Tukaj se dosejajo višje temperature kot pri visokofrekvenčnem varjenju vendar kljub temu premazi niso dovolj tekoči, da bi se dve plasti združile. Zato se med dve plasti doda termoplastična folija in pritisne s 50 N/cm^2 za 30-40 sekund. Med ohlajanjem se tvori kemična vez med obema premazoma, ki dosega 80 – 90 % nosilnosti tkanine. Tudi EFTE folije se vari na podoben način, vendar pomoč termoplastične folije ni potrebna. Včasih je treba membrano zvariti na gradbišču samem, npr. pri dokončevanju detajlov ali popravilih. Takrat se uporabi prenosne varilne aparate. Pri membranah s PVC premazi se navadno uporablja pištola na vroči zrak, ki lahko segreje material od 50 do 600 °C. Lahko bi se sicer uporabljala tudi pri PVDF premazih, ampak se pri tem sprošča strupena para. Zato se tovrstne membrane na licu mesta vari z ročnimi likalniki ali prenosnimi magnetnimi napravami (Seidel, 2009)

Šivani

Šivani spoj, ki je tradicionalen stik pri šotorastih konstrukcijah, omogoča povezavo med tkaninami dveh stikovanih delov, kar naredi stik zelo močan. Vendar se pri membranskih konstrukcijah zelo redko uporablja, ker luknje poškodujejo površino in zato ni več vodotesna. Potrebna je ponovna zatesnitev na licu mesta z varjenjem dodatne folije.



Slika 24: Vrste šivov (Seidel, 2009).

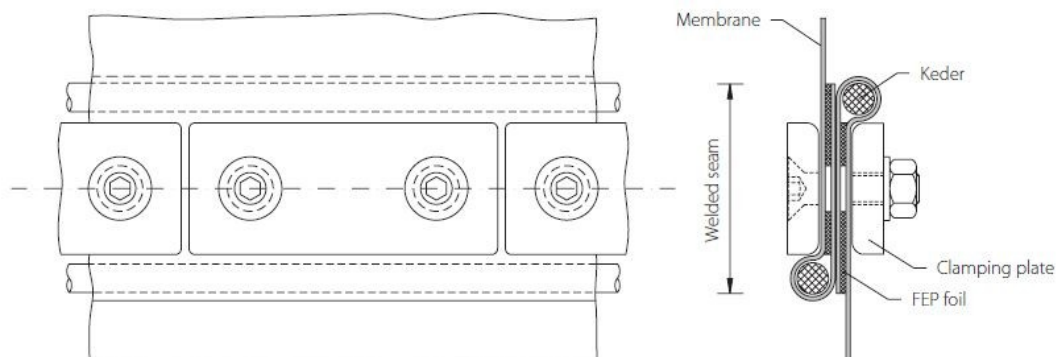
Lepljeni

Ti stiki se dandanes uporabljajo le pri združevanju redko uporabljenih silikonsko prevlečenih tkaninah iz steklenih vlaken, ker se zaradi svoje narave ne more variti. Površino na stiku najprej pripravimo s topilom, da razbijemo molekulske vezi v silikonu, nato naneseemo lepilo in zlepimo. Ob uporabi pravih lepil lahko dosežemo enako nosilnost stika kot je nosilnost samega materiala.

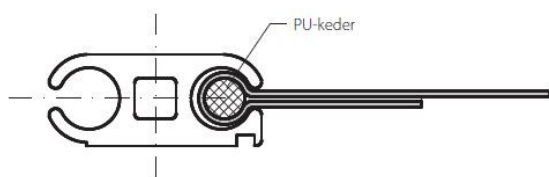
4.2.2 Montažni stiki

Pri izdelavi zračno podprtih konstrukcij smo omejeni z velikostjo delavnice, transporta in načina montaže. Zato ne moremo vedno zvariti celotne konstrukcije v delavnici, ampak se jo zvari po delih in stikuje na gradbišču. Takrat se na teh mestih uporabijo montažni stiki. Delimo jih na vijáčene in vezane. Vijáčene spoje naredimo s pomočjo jeklenih ali aluminijastih ploščic, ki stisneta dva sloja membrane skupaj, ali pa s keder tračnicami. Pri takšnih stikih morata imeti membrani keder rob. Keder je vrv narejena iz PU ali PVC, ki se jo privari na rob membrane tako, da se membrana zaviha

okoli kedra. Vezani spoji so uporabni kadar ni velikih obremenitev, naredi pa se jih tako, da se rob membrane opremi z nerjavečimi obročki ali ploščicami z luknjami skozi katere spletemo vrv.



Slika 25: Vijačen spoj z veznimi ploščicami (Seidel, 2009).



Slika 26: Keder tračnica (Seidel, 2009).



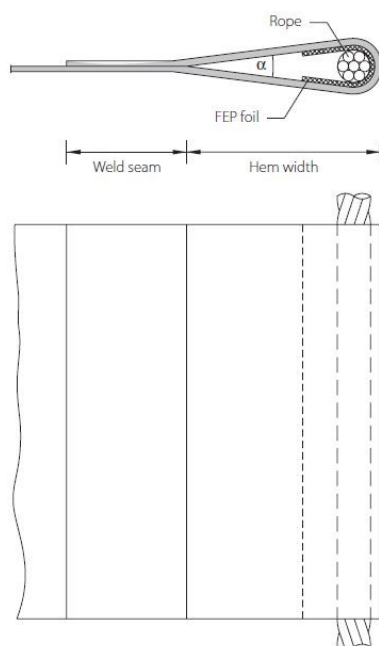
Slika 27: Vezan montažni stik z vrvjo spleteno med dvema deloma (levo) in zankni sistem (desno) (Seidel, 2009).

4.3 Prenos sil na rob membrane in v temelje

Sile iz membrane se morajo prenesti preko robov v temelje. Poznamo dve vrsti prenosa sil in sicer preko fleksibilnega ali togega roba. Če robni element teče po robu membrane in zbira sile iz

membrane v ukrivljeni liniji, ki se konča v temeljih, potem je to fleksibilen rob. Togi rob je takšen, pri katerem se sile iz membrane prenesejo direktno ali preko več točk v togo linijsko podporo.

Najpogosteje uporabljen element za fleksibilni rob je jeklena vrvi v žepku membrane. Pri zračno podprtih konstrukcijah se tak detajl uporablja pri odprtinah, kjer se temelj prekine, ali pri nenadnih spremembah ukrivljenosti v obliki konstrukcije.



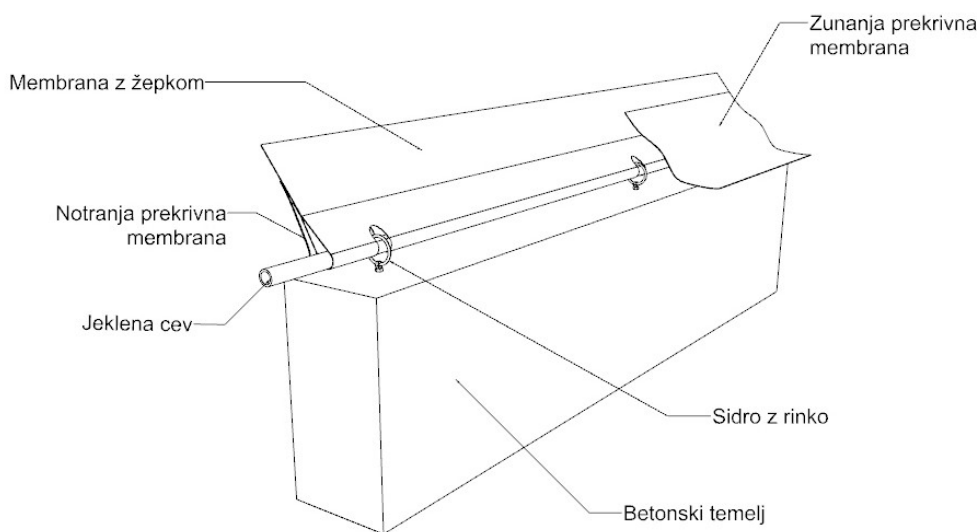
Slika 28: Fleksibilen detajl jeklene vrvi v žepku membrane (Seidel, 2009).



Slika 29: Primer dveh fleksibilnih robov na primeru pokritja bazena (Canobbio, 2003). Prvi je pri odprtini za vrata, drugi pa pri spremembi ukrivljenosti (med zeleno in belo membrano).

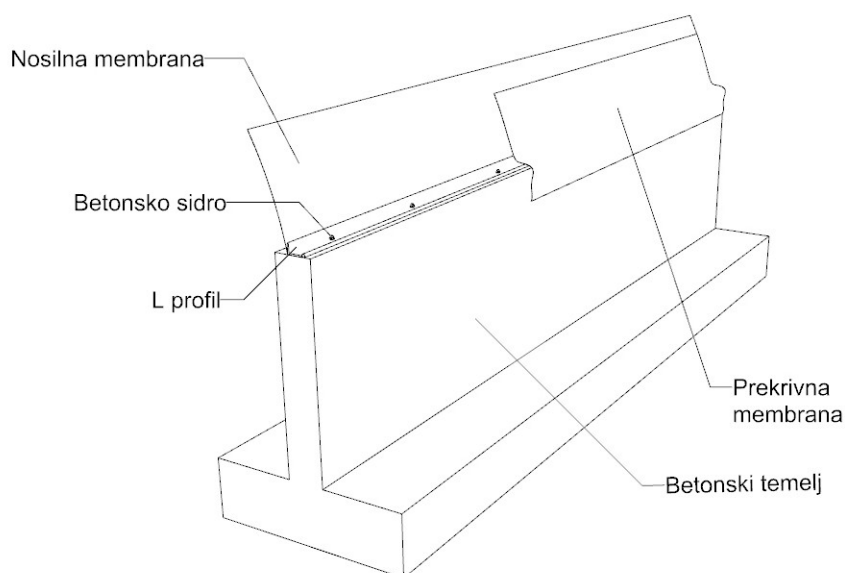
Najbolj uveljavljena detajla za pritrnitev membrane na temelj preko togega robu sta dva. Eden je jeklena cev v žepku membrane, ki je točkovno pritrjena na betonski temelj kot na sliki 30. V delavnici se zvari žepek iz membrane tako, da se membrano zaviha nazaj. Na gradbišču se na mestih rink z

nožkom zareže v membrano, da se ustvari prostor za rinko, nato se v žepek in skozi rinke vstavi jeklena cev. Ta detajl je primeren za manjše konstrukcije, kjer sile niso tako velike.



Slika 30: Detajl pritrditve membrane na temelj z jekleno cevjo v membranskem žepku.

Drugi detajl je pritrditev z jeklenim profilom. V delavnici se v rob membrane privari keder. Na mestu montaže se nato jeklen profil, ki je lahko U ali pa L oblike, položi na rob membrane in pritrdi z betonskimi sidri v predhodno izvrtane luknje. Membrana se zagozdi med jeklen profil in beton. Detajl je viden na slikah 31 in 90. Takšna izvedba se uporablja pri večjih konstrukcijah z večjimi silami v membrani.



Slika 31: Detajl pritrditve membrane na temelj z jeklenim L profilom.

Možnih je še veliko različnih variant, omeniti velja predvsem pritrditev direktno v zemljino z zemeljskimi sidri, ki pa se, presenetljivo, v praksi ne uporablja veliko.

4.4 Strojnice

Zrak pod pritiskom je glavni nosilni element. Zanesljiv konstrukcijski material je samo, če se prepreči njegovo uhajanje ali če se ga stalno dovaja. Zrakotesnost in ventilatorji imajo torej pomemben vpliv na delovanje zračno podprtih konstrukcij. Zračne izgube se dogajajo zaradi prepustnosti uporabljenega materiala, prepustnosti tal, še posebej pri peščenih, gramoznih ali prodnatih podlagah. Izgube so tudi zaradi uhajanja zraka pri vratih, zasilnih izhodih, ventilacijskih sistemih, pri stikih membrane s temelji itd. Izgube zraka se lahko določijo z meritvijo količine zraka, ki ga je potrebno dovesti, da se ob normalnih pogojih zagotovi predpisani notranji pritisk. Po postavitvi konstrukcije je priporočljivo opraviti te meritve, ker se tako dobi povratne informacije o zrakotesnosti in se lahko odpravi morebitne napake in s tem izboljša zrakotesnost. Popolnoma zrakotesno konstrukcijo je nemogoče narediti, zato je potrebno v fazi načrtovanja določiti dovolj veliko kapaciteto ventilatorjev, ki pokrijejo izgube zraka. Večinoma se isti ventilatorji uporabljajo tudi za prezračevanje prostora, zato mora biti njihova zmogljivost v vsakem primeru večja, kot samo za vzdrževanje notranjega pritiska. Kapaciteta ventilatorjev se določi glede na namembnost objekta. Skladišče potrebuje veliko manjšo izmenjavo zraka kot npr. bazen. Pri določitvi potrebnih izmenjav zraka si lahko pomagamo z različnimi standardi, kot je npr. SIST EN ISO 13790:2008-Toplotne značilnosti stavb.

V zračno podprtih konstrukcijah se najpogosteje uporabljajo centrifugalni ventilatorji. Njihov pogon mora biti narejen tako, da lahko deluje več let brez vzdrževanja in mora biti zaščiten pred umazanijo in izpadi električne napetosti.



Slika 32: Centrifugalni ventilator (Novovent, 2014).

Ventilatorji, ki so gnani na elektriko ne hajo obratovati ob izpadih iz električnega omrežja. To se velikokrat zgodi ravno kadar divjajo snežna ali vetrovna neurja, ko je potreba po stabilnem in celo povišanem notranjem pritisku največja, zato je nujno, da se zagotovi rezervno napajanje z električnim generatorjem ali rezervni dovod zraka npr. z motorji na notranje izgorevanje. Navadno se uporabi več ventilatorjev, ki potiskajo zrak vsak v svoj zračni kanal ali pa v skupnega. Strojna enota mora biti narejena tako, da zrak, kadar enota ne obratuje, ne more uhajati iz konstrukcije. Skupaj z ventilatorjem se v strojno enoto navadno vgrajuje tudi ogrevalna enota, ki skrbi za ogrevanje zraka v prostoru. V praksi se uporabljajo različni viri toplote, lahko so to plinski ali dizelski gorilniki, daljinsko ogrevano omrežje na vročo vodo ali lesna biomasa. Sodobne izvedbe ogrevanja so narejene tako, da zrak kroži

iz notranjosti nazaj v strojno enoto, kjer se dogreva in nato nazaj v prostor, obenem pa ogreva tudi sveži zrak iz zunanosti. Delujoče ogrevanje je nujno v krajih z veliko snega, saj mora staliti sneg, ki se lahko nabira na membrani. To predpostavijo tudi projektanti med načrtovanjem, s tem ko zanemarijo vplive zaradi snega. Strojno enoto je potrebno opremiti tudi s požarno loputo, ki ima temperaturno občutljivo varovalko, v primeru, da se enota vname.

4.5 Vrata

Vzdrževanje zrakotesnosti je tesno povezano s tipom in številom odprtih in s pogostostjo njene uporabe. Manjše konstrukcije imajo večji delež odprtih kot večje konstrukcije in so posledično manj zrakotesne. Mogoče so različne izvedbe vrat. Pri zelo majhnih konstrukcijah se lahko uporabi kar zadrga, ki je vgrajena v membrano. Pri večjih konstrukcijah pa so najboljša rešitev krožna vrata, vendar je njihova uporabnost omejena pri večjem številu ljudi. Krožna vrata so dobra rešitev, ker se izgubi zelo malo notranjega pritiska in ni potrebna velika sila za vrtenje. Druga rešitev pa so hodniki z vrati na vsakem koncu oz. ti. dvojna vrata. Odpiranje takšnih vrat mora potekati tako, da so na enkrat odprta le ena vrata. Primerna so predvsem kot tovorna vrata.

4.6 Montaža zračno podprtih membranskih konstrukcij

Gradnja zračno podprtih konstrukcij se začne s prefabrikacijo membrane v delavnici. Krojne pole se s pomočjo računalniško vodene rezalne mize izrežejo iz dobavljenega materiala, ki je v roli. Odvisno od zahtevnosti konstrukcije se material lahko testira z nateznim ali dvonateznim preizkusom, če kvaliteta ustreza nazivni kvaliteti. Pole se nato zvari po načrtu v kose, ki so velikosti, kot jih dopuščata delavnica in transport. Posamezne kose konstrukcije se po končanju varjenja zloži ali zvije, tako da ustrezajo standardnim transportnim dimenzijam, in transportira na gradbišče. Preden se membrana položi in razvije, je potrebno po celotnem tlorisu razgrniti zaščitno folijo, navadno se to naredi s PVC folijo, da se membrana ne umaže in navlaži. Šele nato se čeznjo razgrnejo kosi membrane. Razvitje membrane je fizično zahteven proces, zato se potrebuje večje število ljudi. Posamezni kosi se nato spojijo preko montažnih šivov. Membrano se nato pritrdi na temelje, vrata in strojne enote in napihovanje se lahko začne. Samo napihovanje poteka slabo uro. Če piha premočan veter, napihovanje membrane ni možno. Med celotnim procesom, od razgrinjanja membrane do postavitve, ne sme biti padavin (dež, sneg), ker potem ni možno dvigniti membrane ali pa pride do zbiranja vode ali snega na določenih delih konstrukcije, kar predstavlja veliko težavo. Če med tem vseeno dežuje ali sneži, je potrebno padavine odstraniti. Celoten proces postavitve membrane od transporta do konca traja od enega do 14 dni, odvisno od velikosti, kompleksnosti montaže in vremena. Strojna oprema potrebna za montažo ni zahtevna, potrebuje se viličarja za premikanje zvitih koncev membrane po gradbišču in mogoče kakšno dvižno ploščad za pritrdjevanje stvari na membrano. Membrano je potrebno občasno vizualno preverjati in kontrolirati. Pozornost je potrebna pri zrakotesnosti, notranjem pritisku in stanju membrane.

5 PROCES NAČRTOVANJA NAPIHLJIVIH KONSTRUKCIJ

5.1 Iskanje oblike

Iskanje oblike je po definiciji iskanje geometrije površine, ki jo dobimo pri delovanju notranjega pritiska brez delovanja ostalih obtežb. Poglavitna zahteva je, da so vse napetosti v materialu natezne. Potreben, a ne zadosten pogoj je tudi ta, da mora vsaj en glavni radij ukrivljenosti gledati navznoter (Otto in sod., 1982). Iz filozofskega stališča bi se zdelo smiselno, da iščemo takšno obliko, pri kateri dobimo konstantne napetosti po celotni površini – tako dobljena površina bi bila minimalna površina, kot npr. milni mehurček. Pri dolgotrajnem prednapetju se pojavljata lezenje materiala in relaksacija prednapetja. Če je velika razlika med prednapetji v osnovni in votkovni smeri, se bolj napeta smer bolj relaksira in material sam teži k izenačenju dvoosnega napetostnega stanja. Poleg tega se bo celotna površina pri konstantnem razporedu notranjih sil bolj enakomerno deformirala, kot pa bi se pri nekonstantni razporeditvi, kjer bi se lokalno lahko bolj kot ostali deli površine in bi prišlo do gubanja (Forster in sod., 2004). Minimalna površina je zelo zaželena oblika pri antiklastičnih membranskih konstrukcijah

Preden so prišli v uporabo zmogljivejši računalniki je iskanje oblike potekalo s fizičnim modeliranjem (razen v redkih primerih z analitičnimi rešitvami). Modeli so nastajali s pomočjo milnih mehurčkov, ali pa s hidrostatičnim napenjanjem raztegljivih gumijastih materialov. Dandanes za iskanje oblike zadostuje že osebni računalnik z ustreznim programom. Osnova večine računalniških programov za iskanje oblike so ravnotežne enačbe. Ravnotežne enačbe zračno podprte konstrukcije podajajo razmerje med napetostmi in geometrijo površine. Najbolj uporabljene metode iskanja oblike so:

- a) metoda gostote sil,
- b) nelinearna metoda končnih elementov,
- c) dinamična relaksacija.

Te delujejo v principu tako, da se konstrukcijo najprej diskretizira na mrežo elementov, ki ima poznane samo lege fiksnih vozlišč, ostale imajo le približne koordinate. Prednapetje zaradi pritiska, ki deluje po celotni površini, se zbere v posameznih vozliščih diskretiziranega sistema in izračuna neuravnotežene vozliščne sile. Ravnotežje se potem išče s spreminjanjem lege vozlišč - z iterativnim postopkom premikanja vozlišč, dokler ravnotežje ni zagotovljeno. Prednosti teh metod pri iskanju oblike je olajšanje naknadne analize notranjih sil zaradi prednapetja in zunanje obtežbe. Omogočajo tudi vključevanje ostalih tipov elementov, kot so stebri, nosilci, lupine itd. Vse te metode se združujejo v različne CAD pakete za analizo membranskih konstrukcij (Forster in sod., 2004).

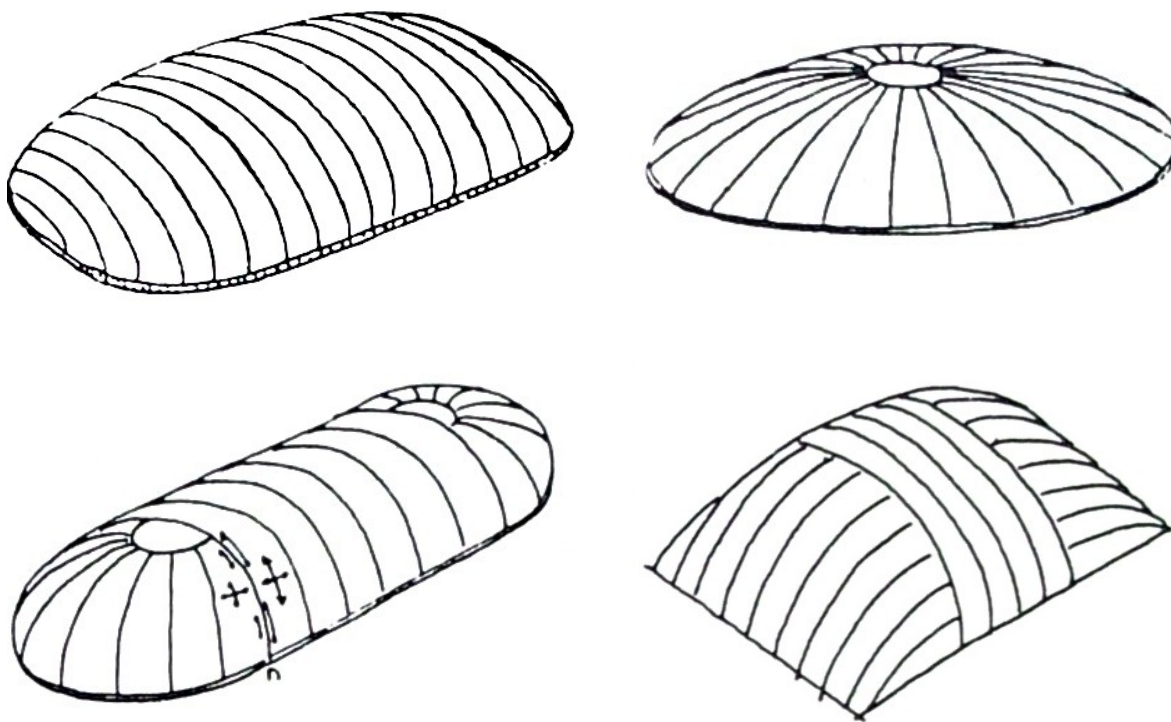
Minimalna površina ni nujno najboljša izbira s stališča arhitekture ali izkoriščenosti prostora, zato si lahko obliko izberemo iz nabora oblik, ki sem jih opisal v poglavju 3.2, pri čemer moramo biti pozorni na to, da bo takšna oblika ostala tudi po dolgotrajnem delovanju notranjega pritiska.

5.2 Krojenje membrane

Krojenje membrane pomeni definirati raspored, obliko in stikovanje krojnih pol. V splošnem se krojenje izvede na končni obliki konstrukcije, v primeru zračno podprtih konstrukcij, na obliki, ki je dosežena po tem, ko se material stabilizira po dolgotrajni obtežbi notranjega pritiska. Krojenje ima pomemben vpliv na uporabnost, ceno in izgled konstrukcije.

5.2.1 Raspored krojnih pol

Krojne pole lahko razporejamo na veliko načinov. Najpogosteje uporabljen raspored so paralelni, radialni, kombinacija paralelnega in radialnega in izmenično paralelni raspored. To je odvisno od oblike konstrukcije, ali je simetrična ali nesimetrična, ali ima vzporedne ali radialne doline, ali je ravna, sinklastična ali antiklastična.



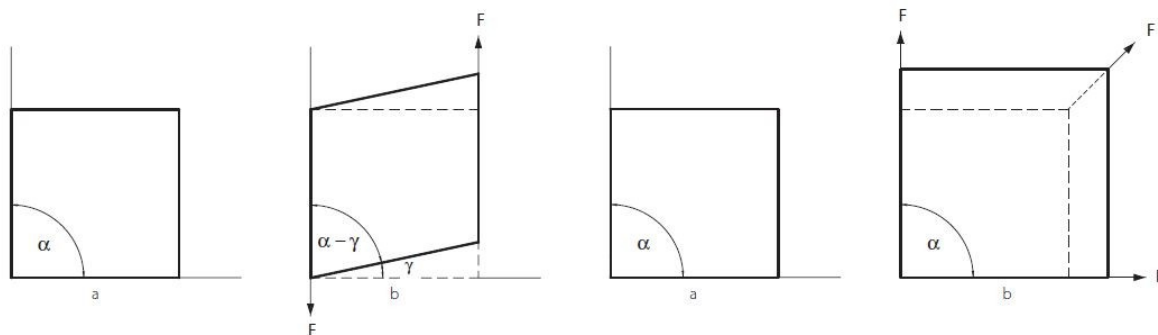
Slika 33: Prikaz možnosti razporejanja krojnih pol (Otto in sod., 1982).

Posamezne krojne pole so ali ravne ali eno- ali dvoosno ukrivljene. Napetosti v dvoosno ukrivljenih krojnih polah so v splošnem različne na robovih in na sredini pole. Razporeditev napetosti po poli je odvisna tudi od vrste materiala, ki ga uporabljamo. Mnogo materialov lahko dvoosno ukrivimo le na silo, npr. kovinske folije. Medtem ko mreže in tehnične tkanine dopuščajo nekoliko večjo dvoosno ukrivljenost zaradi možnosti kotne rotacije med vlakni, ki pa je tudi omejena zaradi premaza. Kotna rotacija je možna sprememba kota med osnovno in votkovno smerjo in posredno določa strižno togost materiala. V tehničnih tkaninah ta lahko znaša med 5° in 10° , ki pa je seveda odvisna od vrste pletenja in količine premaza. Če želimo imeti čim manj odpadka pri rezanju membrane in se izogniti gubam na površini, morajo sredina pole in njeni robovi slediti geodetskim črtam na površini. To so črte, ki

nakazujejo najkrajšo razdaljo med dvema točkama na površini. Zelo pomemben je tudi podatek o razporeditvi napetosti v konstrukciji, saj bi bilo idealno, če bi bili osnovna in votkovna smer poravnani s smerema glavnih napetosti (Otto in sod., 1982).

5.2.2 Razvoj krojne pole

Ko imamo narejen raspored krojnih pol po površini konstrukcije, moramo vsako krojno polo preslikati na ravnino, da jih lahko izrežemo iz rol, ki imajo širino od 2 do 5 metrov. Ta proces imenujemo razvoj krojne pole. Ploskev lahko razvijemo na ravnino le, če je njena Gaussova ukrivljenost enaka nič. Prednapete in zračno podprte membranske konstrukcije pa imajo to ukrivljenost skoraj vedno različno od nič. Zato pri razvoju krojnih pol pride do določenih popačenj. Uporabljata se dve vrsti razvoja krojne pole: projekcija z ohranjanjem dolžin za tehnične tkanine in projekcija z ohranjanjem kotov za folije.



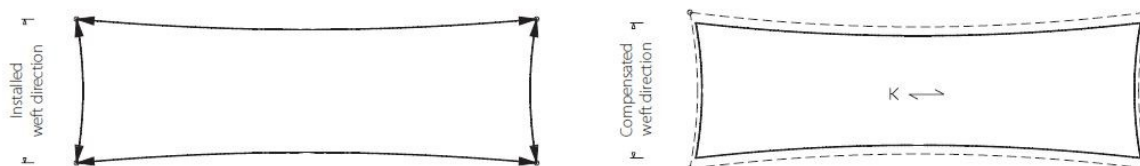
Slika 34: Projekcija z ohranjanjem dolžin (prvi dve risbi) in projekcija z ohranjanjem kotov (drugi dve risbi) (Seidel, 2009).

Prva projekcija uspeva le pri materialih z majhno strižno togostjo kot so tehnične tkanine in povzroča nič ali pa zelo malo dodatnih napetosti v materialu. Druga projekcija pa uspeva pri folijah, ampak povzroča nehomogene deformacije v materialu. Pri obeh metodah torej lahko ocenimo, kakšno bo to popačenje, vrsto metode pa si izberemo glede na material. Poleg zahteve, da mora biti odpadka pri izrezovanju pole čim manj, pa na razvoj krojne pole zelo vpliva tudi širina role. Razvoj je navadno bolj zapleten pri manjših konstrukcijah, ker je največja širina pole proporcionalno večja glede na celotno konstrukcijo kot pri večjih konstrukcijah in je zato popačenje večje (Seidel, 2009).

5.2.3 Kompensacija

Ker se prožni materiali deformirajo zaradi vplivov stalne obtežbe (konstrukcijske deformacije) in reologije (lezenje, relaksacija), je potrebno te deformacije predvideti s testi in nato dimenzije posameznih krojev popraviti tako, da je oblika konstrukcije po izvršitvi vseh deformacij takšna, kakršno smo si zamislili. Popravke geometrijsko razvitih površin ali krojnih pol zaradi delovanja obtežbe in reologije imenujemo kompensacija. Zaradi različnih materialnih lastnosti v osnovni in votkovni smeri se kompensacija vrši različno v obeh smereh. Osnovna smer je navadno bolj toga kot votkovna, zato se jo kompensira manj kot votkovno. Lahko pride tudi do negativne kompensacije

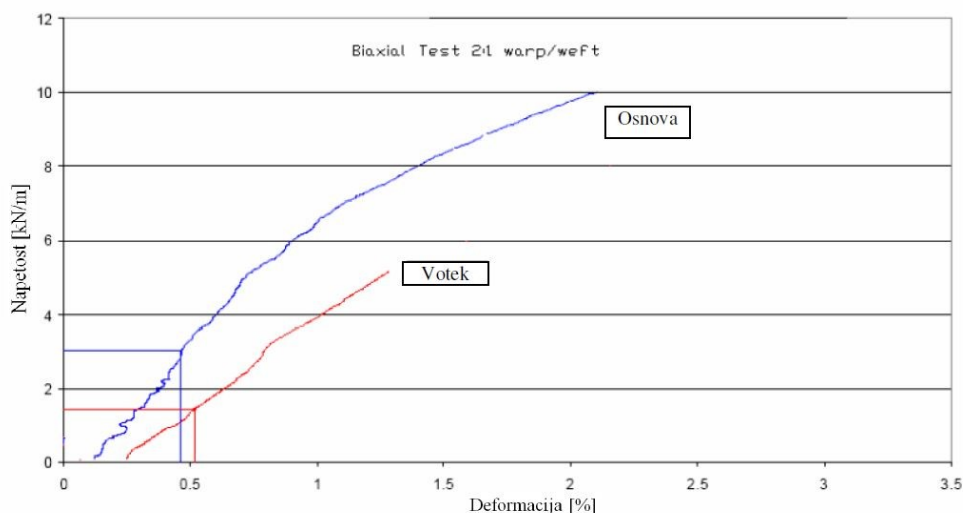
zaradi interakcije med nitmi, kar imenujemo dekompenzacija (Seidel, 2009). Velikost kompenzacije izražamo s kompenzacijskimi faktorji, ki so izraženi v obliki procenta ali nekega deleža in jih moramo načeloma določiti za vsak del konstrukcije posebej. Poleg tega, ni nujno da mora biti kompenzacija enaka po celi krojni poli, saj je nekje lahko nič, npr. pri robovih togih vpetij, in narašča proti sredini pole. Pri upoštevanju nelinearnega obnašanja membrane, lezenja in relaksacije je lahko določevanje kompenzacijskega faktorja zelo zahtevna naloga in jo je posledično zelo težko natančno modelirati (Gründig in sod., 1996). Kot pravijo avtorji programa MPanel iz podjetja Meliar Design v navodilih za uporabo programa, se lahko kompenzacijski faktorji za enako membrano in enake napetostne razmere razlikujejo, zato je nesmiselno določevati kompenzacijske faktorje s preveliko natančnostjo (Calculating ..., 2011).



Slika 35: Kompenzacija kroja (Seidel, 2009).

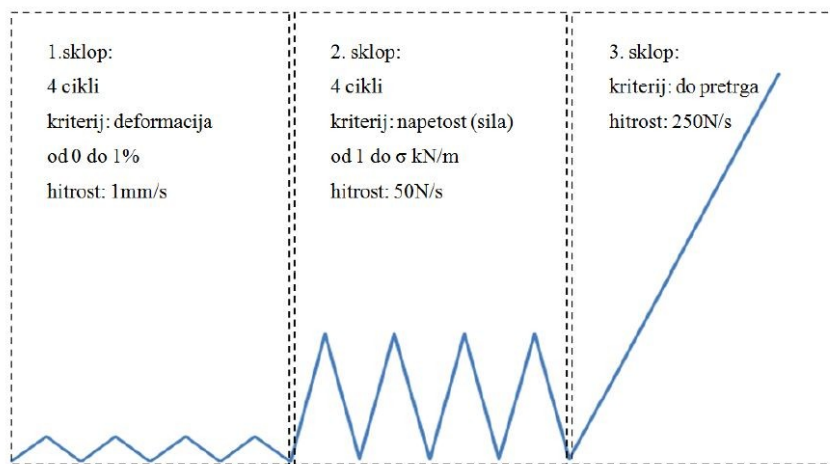
Nepazljivosti ali celo zanemarjanje kompenzacije se je v nekaj primerih pokazala kot glavni razlog porušitvi konstrukcije. V teh primerih so bile deformacije zaradi zunanje obremenitve večje kot pričakovane, zato je prišlo do stika med notranjo opremo in do trganja membrane, ki je imelo za posledico porušitev (Otto in sod., 1982).

Kompenzacijske faktorje se razbere iz grafa, ki prikazuje odvisnost napetosti od deformacij in ga dobimo s preizkusom v laboratoriju. Na sliki 36 vidimo rezultat nekega dvoosnega preizkusa in kako se lahko poenostavljeno odčita kompenzacijske faktorje. Ker poznamo prednapetje, ki ga bomo uporabili, lahko odčitamo, kakšna deformacija se zgodi pri tem prednapetju. Kompenzacijski faktor je tej deformaciji.

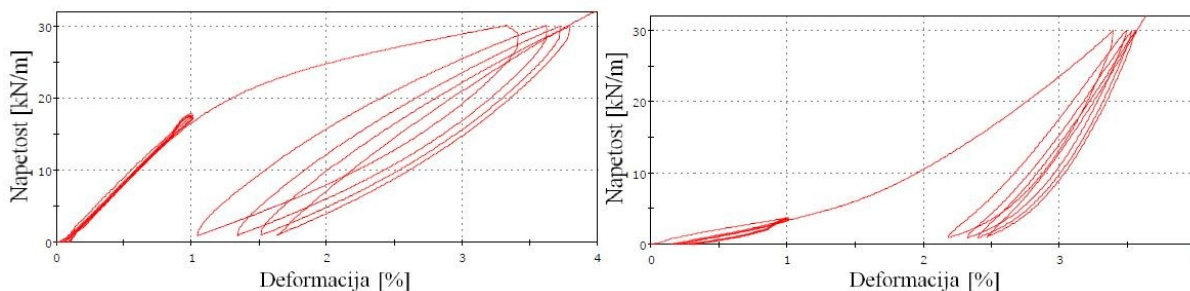


Slika 36: Rezultat dvoosnega nateznega preizkusa pri razmerju napetosti med osnovo in votkom 2:1 (Kovačević, 2012).

Membrana je v svojem življenjskem obdobju izpostavljena različnim obremenitvam (sneg, veter itd.), zato se v membrani večkrat poruši napetostno razmerje in sama velikost napetosti. Poleg tega membrana izkazuje izrazito nelinearne lastnosti v obeh smereh. Na sliki 38 vidimo rezultate enoosnega nateznega preizkusa v osnovni smeri narejenega na dveh preizkušancih, ki sta bila ciklično obremenjena z različnimi velikostmi napetosti, kot je prikazano na sliki 37.



Slika 37: Potek obremenjevanja preizkušancev (Kovačević, 2012).



Slika 38: Primera obnašanja membrane v enoosnem nateznem preizkusu (osnovna smer). Levo je primer PET/PVC membrane, desno pa FG/PTFE membrana (Kovačević, 2012).

Rezultati kažejo, da je togost pri obremenjevanju različna kot togost pri razbremenjevanju, poleg tega ostane določena trajna deformacija pri razbremenjevanju. Vse to upoštevamo pri določevanju kompenzacijskih faktorjev. Za določitev kompenzacije moramo poznati velikost prednapetja v obeh smereh, razmerje med prednapetji v osnovni in votkovni smeti in obnašanje materiala po večkratnem obremenjevanju in razbremenjevanju. Narediti se mora posebna preiskava v laboratoriju, kjer se zajame vse prej omenjene faktorje.

5.3 Vplivi na zračno podprte membranske konstrukcije

5.3.1 Notranji pritisk

Določevanje notranjega pritiska je nekaj, s čimer se v gradbeništvu inženir ne sreča pogosto. Njegova naloga je, da poleg ostalih strukturnih elementov predpiše tudi zmogljivosti strojne opreme, ki zagotavlja notranji pritisk. Oblika membrane in notranji pritisk določata napetosti v membrani in na njenih robovih. Notranji pritisk se lahko šteje kot stalna obtežba, kot na primer lastna teža ali prednapetje. Zahteve za najmanjši in največji pritisk so odvisne od mnogih dejavnikov. Najpomembnejši so oblika konstrukcije in zunanje obtežbe, še posebej sneg in veter. Zahteve za notranji pritisk so v veliki meri neodvisne od razpona konstrukcije, kar pa ne velja za zelo velike konstrukcije, kjer je lahko pritisk manjši. Notranji pritisk, ki se meri v barih, milibarih, milimetrih vodnega stolpca, paskalih oz. N/m^2 , naj bi bil 30-50 % večji kot je največja vetrna ali snežna obtežba, v primerih zelo visokih zračno podprtih membranskih konstrukcij pa je lahko celo 80-100 % večji. Splošna priporočila standardov pravijo, da bi moral biti notranji pritisk vsaj 50% pritiska pri sunkih vetra, in vsaj 110 % obtežbe snega. Običajni pritisk, ki zadostuje za večino napihljivih hal, je 300-500 Pa. Nižji pritiski od 300 Pa naj ne bi bili priporočljivi, vendar se jih ob določenih pogojih lahko dopusti, če so objekti postavljeni samo poleti, če so postavljeni v notranjih prostorih, če je omogočeno taljenje snega itd. Kadar gre za zelo izpostavljeno napihljivo halo ali veliko razstavno halo pa se mora notranji pritisk v primeru opozorila pred nevihto povečati na 500 do 800 Pa, včasih tudi do 1200 Pa (Otto in sod., 1982).

S povečevanjem notranjega pritiska povečujemo napetosti v membrani in jo tako delamo bolj togo in stabilno. To nam omogoča manjše deformacije membrane, vendar na račun vzdrževanja večjega

pritiska in tudi močnejše membrane. Pri izbiri notranjega pritiska se moramo odločati med manjšimi deformacijami ali manjšimi notranjimi silami. To pa je seveda odvisno od namena konstrukcije in želja investitorja.

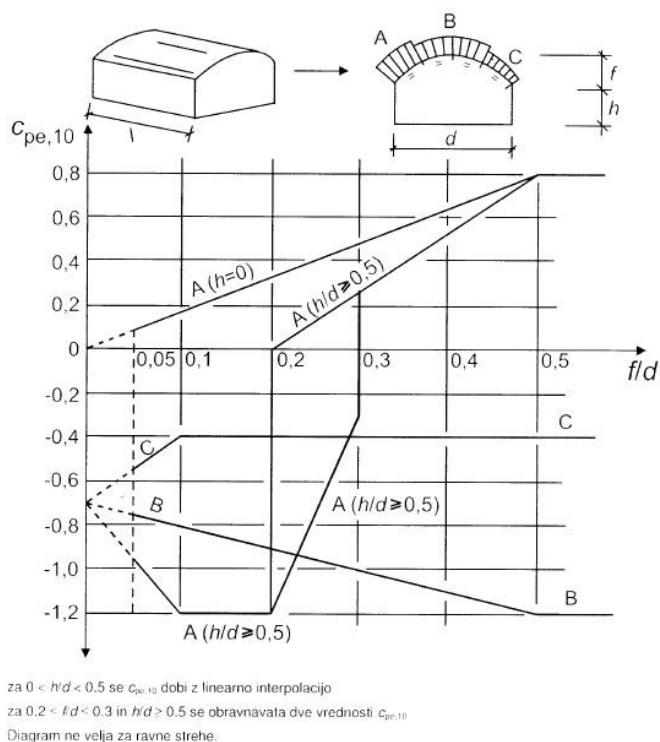
Sodobne tehnologije omogočajo sprotno uravnavanje notranjega pritiska glede na zunanje obremenitve. Okoljsko in ekonomsko neupravičeno je vzdrževanje visokega pritiska v membranski konstrukciji ves čas, tudi ko to ni potrebno. Za normalno obratovanje napihljive hale zadostujejo manjši pritiski, v času napovedanih neurij in snega pa lahko pritisk povečamo in zagotovimo ustrezno stabilnost. Primer takšne tehnologije je »pametna hiša«, kjer lahko s pomočjo sodobnih mobilnih tehnologij in inštrumentov za opazovanje vremena, v kombinaciji s splošnimi vremenskimi opozorili, predvidimo nevšečnosti in ustrezno reagiramo celo na daljavo.

5.3.2 Veter

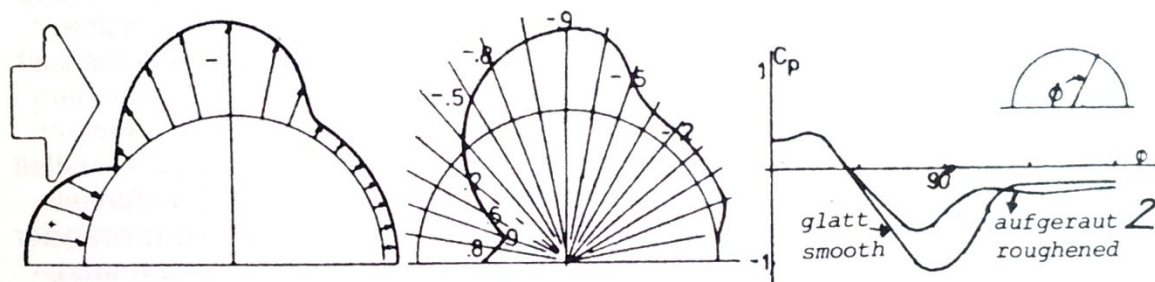
Ocena in analiza obremenitve z vetrom zahteva posebno znanje, saj ima veter na zračno podprte konstrukcije drugačen učinek, kot na zelo toge konstrukcije. Obstoječi predpisi, ki predpisujejo razporeditev vetra na toge konstrukcije, so kljub temu lahko pomemben vir informacij. Poleg tega, da so tam zbrane osnovne informacije o modeliranju vplivov vetra na objekte, nam povedo vsaj še, kje je tista meja, kjer je toga konstrukcija še varna. Zato je pomembno, da pregledamo vse obstoječe predpise o zračno podprtih konstrukcijah, kot tudi ostale predpise togih konstrukcij (Otto in sod., 1982).

Večina zračno podprtih konstrukcij je skromne velikosti in njihova glavna privlačnost je nizka cena. Neprimerno bi bilo izvajati drage analize za njihovo projektiranje, zato so tako kot ostale konstrukcije, projektirane z uporabo nadomestnega statičnega pritiska vetra. Po drugi strani pa lahko z zračno podprtimi konstrukcijami pokrijemo zelo velike razpone in oblikujemo vsemogoče oblike, zato bi bilo mogoče ekonomsko neupravičeno in celo nevarno, če bi uporabili nadomestni statični pritisk vetra, ampak je bolj smotno zajeti tudi dinamične učinke vetra.

Princip določanja nadomestne statične obtežbe je že dobro uveljavljen in vključuje najprej oceno projektne hitrosti vetra, bodisi s statistično obdelavo podatkov bližnje vremenske postaje bodisi z uporabo kart, ki jih predpisujejo nacionalni standardi.



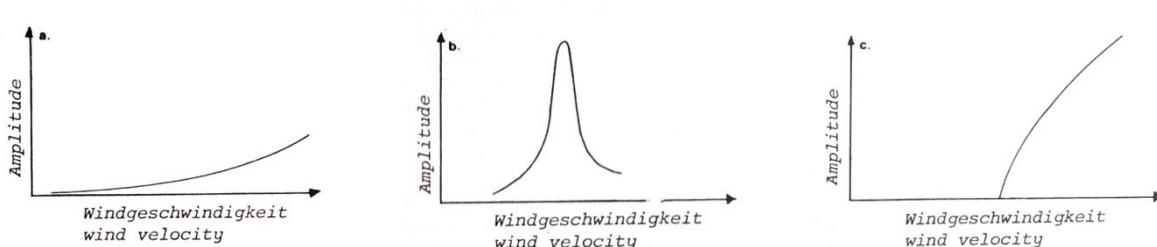
Slika 39: Razporeditev pritiska vetra po kupolasti konstrukciji, kot ga predlaga Evrokod 1, del 4.



Slika 40: Primeri razporeditev pritiska vetra v polkrožnem cilindru iz ostale literature (Otto in sod, 1982).

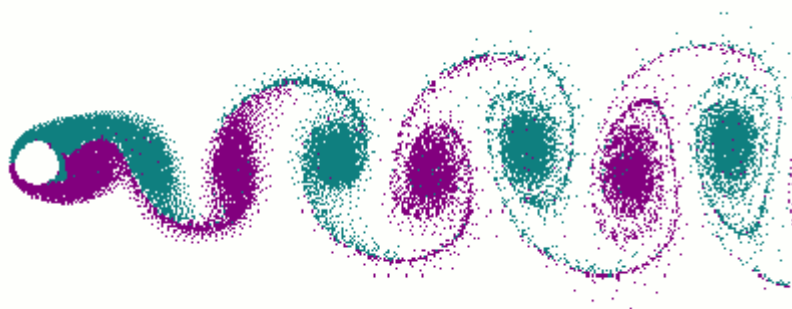
Pri oceni projektne hitrosti vetra je pomembno, da upoštevamo tudi življenjsko dobo objekta in možne posledice porušitve. Običajna življenjska doba zračno podprtih konstrukcij je 15 do 20 let, zato je primerno, če za projektno hitrost vetra vzamemo veter s povratno dobo 20 let. Poznati moramo razporeditev pritiska na konstrukciji, kar v običajni praksi zajamemo s koeficienti C_p . Nekatere študije so bile narejene v vetrovnikih na togih modelih, v laminarnem in turbulentnem vetru. Predpostavljeno je bilo, da so tako pridobljene vrednosti na varni strani za membranske konstrukcije, kar bi lahko držalo, saj deformacija konstrukcije ne spremeni zelo toka vetra. Nekatere raziskave fleksibilnih modelov v vetrovnikih pa nakazujejo, da deformacija membrane poveča srke in zmanjša pritiske. Trenutno dosegljivi podatki nam omogočajo dovolj dobro modeliranje nadomestne statične obtežbe vetra, čeprav jih je treba uporabljati zelo previdno.

V realnosti veter seveda ni statičen, ampak ga sestavljata konstantna komponenta in nihajoča komponenta in obe s časom spreminjata svojo intenziteto. Odziv konstrukcije na spreminjajočo obtežbo vetra lahko razdelimo v tri kategorije, kot je pokazano na sliki 41.



Slika 41: Prikaz treh različnih odzivov konstrukcije glede na hitrost vetra. Na abscisi je hitrost vetra, na ordinati pa moč odziva konstrukcije. Prvi graf prikazuje odziv, ki je posledica turbulentnega udarjanja vetra. Drugi graf je odziv konstrukcije, kot posledica odlepljanja vrtincev, tretji pa kot aerodinamična nestabilnost ali galopiranje (Otto in sod, 1982).

Pri zračno podprtih konstrukcijah je prevladujoči odziv kot na grafu 1 slike 41, ostala odziva se ne pojavljata. Ta odziv je značilen za vse konstrukcije, kjer odziv raste s kvadratom hitrosti vetra. Drugi odziv – odlepljanje vrtincev se v zračno podprtih konstrukcijah ne more pojavljati, ker tla preprečujejo nastanek lepo organiziranih simetričnih vrtincev v valovih (Otto in sod., 1982).

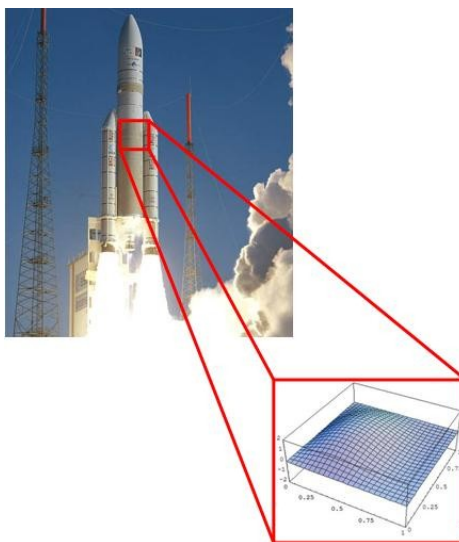


Slika 42: Prikaz odlepljanja vrtincev za krožnim profilom v laminarnem toku (Karman ..., 2014). Pri tem pojavu lahko pričakujemo odziv kot na drugem grafu slike 41.

K zaviranju prispeva tudi dušenje konstrukcije, ki je v primeru zračno podprtih konstrukcij zelo veliko. Zaradi tega tudi ne pride do galopiranja konstrukcije, ki je eden izmed najpogostejših pojavov aerodinamične nestabilnosti in ustreza odzivu na tretjem grafu na sliki 41 (Otto in sod., 1982).

Za razliko od globalnih odzivov, ki so manj verjetni, pa so lokalni odzivi pogostejši. Najpogostejši je posledica relativno majhnih sunkov vetra, ki se pojavljajo s frekvenco 0,1 do 1 Hz. Takšni vetrovi lahko povzročajo močne lokalne depresije membrane ali nekakšne balončke, ki potujejo po površini. Naslednji pojav je »panel flutter« ali valovanje panela. To si lahko predstavljamo tako, da neko ploščo fiksno podpremo na vseh robovih in nato spustimo močan tok vetra vzdolž ene njene površine. Panel bo čez čas začel nihati izven svoje ravnine. Ta pojav najpogosteje opazujemo v letalstvu, pri zračno podprtih konstrukcijah pa se lahko pojavi na mestih, kjer je majhna natezna napetost v eni smeri in pri

srednjih hitrostih vetra. Nihanje se prekine, ko se doseže dovolj veliko dvoosno napetostno stanje na površini (Otto in sod., 1982).



Slika 43: »Panel flutter« je pogost pojav v letalstvu, včasih tudi pri zračno podprtih konstrukcijah (Abdala, 2014).

Pri prednapetih dvojno ukrivljenih membranskih konstrukcijah lahko dobro odzivnost konstrukcije na dinamične učinke dosežemo z dovolj veliko ukrivljenostjo, alternativa pa je lahko tudi dovolj veliko prednapetje. Naslednja enačba predstavlja dober indikator togosti (D), ki nudi odpor takšnim učinkom. Izražena je z razmerji prednapetij v osnovni (N_{osnova}) in votkovni (N_{votek}) smeri in pripadajočima ukrivljenostma (R_{osnova} in R_{votek}).

$$D \doteq \frac{N_{osnova}}{R_{osnova}} + \frac{N_{votek}}{R_{votek}}$$

Dvojno ukrivljene konstrukcije z dobrim obnašanjem se štejejo tiste, ki imajo $D = 0,3 \frac{kN}{m^2}$. Na tistih konstrukcijah, ki imajo $D = 0,15 \frac{kN}{m^2}$ je moč opaziti potovanja valov na membrani zaradi vetra. Pri konstrukcijah, ki imajo $D < 0,2 \frac{kN}{m^2}$ na večjih površinah, se lahko pojavijo povesi zaradi dinamičnih učinkov vetra in jih je potrebno dodatno analizirati. Pri membranskih konstrukcijah (torej tudi pri zračno podprtih konstrukcijah), je togost D kar enaka notranjemu pritisku p_i . Kadar vzdržujemo nižji pritisk zaradi zmanjšanja operativnih stroškov, lahko opazimo potovanje valov po membrani tudi že pri zmernih vetrovih (Forster in sod., 2004). Dinamična analiza vplivov vetra je lahko precej zahtevna (Otto in sod., 1982).

5.3.3 Sneg

Količina zapadlega snega, ki ostane na membrani, je odvisna od geografske lokacije objekta, oblike strehe, hrapavosti površine, toplotne prehodnosti konstrukcijskega sklopa, notranje temperature in vetra. Kot navajajo Otto in sod. (1982) je zelo malo strinjanja o količini in razporeditvi snega na

zračno podprtih konstrukcijah. Če se lahko zagotovi dovolj velika notranja temperatura (12 °C), potem do sprijemanja snega na površini membrane ne pride. To lahko predpostavimo, ker imajo zračno podprte konstrukcije zelo veliko toplotno prehodnost ($U \geq 5 \frac{W}{m^2K}$). Enako trdi tudi standard SIST EN 13782:2006, po katerem lahko snežno obtežbo popolnoma zanemarimo, če upoštevamo določene pogoje. Deloma se tega drži tudi ISO 4355, ki določa postopke za določitev snežne obremenitve na strehah, saj omogoča redukcijo obtežbe, ampak največ za 57 %, kar pa še vedno pomeni precejšnjo obremenitev; npr. to znaša za Ljubljano še vedno 52 kg/m². Najzanesljivejša referenca za velikost obremenitev, ki jih povzroča sneg na zračno podprte konstrukcije, je bila dobljena v severnejših državah. Opazovanja so pokazala, da kadar je notranja temperatura večja kot 12 °C in kadar je vzpostavljeno močno kroženje zraka, lahko obremenitev snega zelo zmanjšamo. V arktičnih conah so ogrevane zračno podprte konstrukcije zdržale pritiske snega kljub temu, da je bil notranji pritisk le 250 Pa.

Največji vpliv snega ni nujno takrat, kadar je največja enakomerna snežna obremenitev, ampak je lahko takrat, ko je sneg neugodno razporejen. Zelo neugodno je lahko kopičenje snega na temenu strehe, ker se lahko vrh pogrezne in povzroči zdrs okoliškega snega v to poglobitev. To lahko preprečimo oz. popravimo z dovolj velikim notranjim pritiskom. Sneg lahko tudi zdrsne z membrane. Membrana ima zelo majhen koeficient trenja, zato za zdrs zadostuje že naklon 30 stopinj. Pri tem lahko pomaga tudi veter, ki neposredno deluje tako, da sneg potisne z membrane, posredno pa tako, da povzroča tresljaje membrane, kar pomaga snegu, da se odlepi od membrane in lažje zdrsne. Sneg, ki se zbira po zdrsu, ni kritičen za dimenzioniranje. Če želimo zmanjšati te pritiske in omogočiti lažje odstranjevanje snega, lahko celotno membransko konstrukcijo dvignemo za pol do enega metra, tako da je os sidranja nad terenom (Otto in sod., 1982).

Negotovost pri določevanju snežne obtežbe se še vedno rešuje s stališča ekonomije, ki pravi, da je trenutno še vedno neekonomično projektirati glede na polno obtežbo snega (Otto in sod., 1982).

5.3.4 Ostale obtežbe

Lastna teža

Za zračno podprto membransko konstrukcijo je lastna teža natančno poznana in lahko določljiva. Zaradi njenega majhnega vpliva jo v analizah večinoma zanemarjamo.

Stalna obtežba zaradi pritrditev

Na membrano lahko z ustreznim detajlom pritrdimo različne predmete. V zračno podprtih konstrukcijah so to navadno luči za razsvetljavo skupaj z električnimi razvodi, ventilatorji za destratifikacijo zraka, razne razdelilne mreže med igrišči in podobno. Pri pritrdjevanju je potrebno paziti, da ne ustvarjamo prevelikih koncentracij napetosti in morebitnih območij zbiranja vode na položnejših delih membrane. Pritrjene morajo biti tako, da se lahko premikajo skupaj z membrano in

da njihovo lastno premikanje ne poškoduje le-te. Njihova teža ni prevladujoči vpliv, lahko pa se jo pa upošteva v numeričnih analizah konstrukcije.

Potres

Zračno podprte konstrukcije so izredno varne pri potresih. Zaradi njihove majhne lastne teže (in zaradi majhne stalne obtežbe) potres nanje nima pomembnejšega vpliva.

Ljudje na membrani

Pri montaži ali popravilih je potrebno stopiti na konstrukcijo. Površina mora takrat biti suha in čim manj poškodovana zaradi sonca, da se lahko oprimemo. Če stopimo na zelo degradirano površino, obstaja nevarnost, da se membrana predre in da pademo skoznjo. Zgodi se lahko tudi, da nas zaradi vzbujenega gibanja membrane le-ta izvrže v stran, zato je nujno da smo zavarovani z vrvjo in da hodimo z mehкими čevlji, ki imajo dober oprijem.

Vroč zrak

Če je konstrukcija visoka, lahko vroč zrak deluje kot obtežba, ki pritiska na zgornji del membrane med 10 in 50 Pa. Takrat zračno podprta membranska konstrukcija deluje kot balon na vroči zrak. Zračni pritisk je največji na vrhu in ga lahko izračunamo iz razlik v gostotah zraka.

Zastajanje vode

Pri konstrukcijah, kot so navadni šotori, se to pogosteje dogaja. Pri zračno podprtih konstrukcijah voda zastaja na mestih, kjer nima kam steči. Če se zbere veliko vode, lahko njen pritisk preraste notranjega in tako pogloblja mesto zastajanja.

Žled

Ta pojav se zgodi kadar zmrznjen dež pada na površino, ki je izpostavljena vetru. Dosežejo se lahko obtežbe do $300 \frac{N}{m^2}$. Do sedaj še ni znan primer nastanka žledu na zračno podprti membranski konstrukciji, če pa bi nastal, bi se ob ogrevanju ali tresljajih hitro strl in zdrsel po membrani navzdol. Pri tem obstaja nevarnost za poškodbe membrane, ljudi in predmetov.

5.3.5 Deformacije

Najpomembnejše deformacije se dogajajo med napihovanjem, med dobo obratovanja konstrukcije in pri zunanjih obtežbah. Obstajata dve vrsti deformacij, ki se večinoma pojavljata istočasno:

- a) neodvisne od materiala,
- b) odvisne od materiala.

Pri zračno podprtih membranskih konstrukcijah so prevladujoče deformacije neodvisne od materiala (Otto in sod., 1982). To so deformacije, ki nastanejo zaradi zunanje obtežbe in so odvisne od razmerja med zunanjo obtežbo in notranjim pritiskom. Zaradi manjše togosti tovrstnih konstrukcij prihaja do

veliko večjih pomikov kot pri klasičnih konstrukcijah iz betona, lesa ali jekla. Druga vrsta deformacij pa je posledica krčenja in raztezanja materiala zaradi vplivov zunanje obtežbe in reoloških učinkov, kot je npr. lezenje. Te so v primerjavi s prvimi veliko manjše ampak imajo vpliv predvsem na izgled konstrukcije (npr. pojavljanje gub). Pri načrtovanju se te deformacije, ob upoštevanju projektnega notranjega pritiska in poznavanja obnašanja materiala pri dolgotrajni obtežbi, zajamejo s procesom kompenzacije.

Deformacije, ki so neodvisne od materiala, so zelo pomembne pri določevanju potrebnih odmikov opreme od membrane zračno podprte konstrukcije in določevanje notranjega pritiska. Za standardne oblike zračno podprtih konstrukcij se potrebne odmike oz. potreben notranji pritisk določi približno in se jih lahko odčita v standardih. Pri zahtevnejših konstrukcijah pa je potrebno narediti nelinearno numerično analizo ali pa ustrezen preizkus v vetrovniku.

5.4 Predpisi

5.4.1 Splošno o varnosti

Kot navajajo Forster in sodelavci (2004) se princip varnosti membranskih konstrukcij razlikuje od tistega pri klasičnih konstrukcijah. Evrokodi in večina nacionalnih standardov temelji na metodi mejnih stanj, npr. za različne kombinacije faktorirane obtežbe morajo konstrukcija in njeni deli ustrezati določenemu pogoju nosilnosti in za določene kombinacije »delovne« obtežbe morajo deformacije ustrezati predpisanim oz. dogovorjenim. Predhodnik tega principa je bila metoda dopustnih napetosti, kjer napetosti pri največji »delovni« kombinaciji vplivov niso smele preseči določene dopustne vrednosti. Za konstrukcije, za katere predpostavimo linearno-elastično obnašanje, praktično ni razlike med tema principoma, kadar gre za nosilnost. Pri konstrukcijah, za katere je značilno plastificiranje in poškodovanje materiala (npr. plastifikacija jekla in pojav razpok v betonu), ki se kaže skozi nelinearno obnašanje konstrukcij, je lahko metoda mejnih stanj varnejša in bolj točna. Pri konstrukcijah, ki izkazujejo močno geometrijsko nelinearnost kot so npr. prednapete membranske konstrukcije, pa metoda mejnih stanj ni najbolj primerna, saj je geometrija konstrukcije odvisna od razporeda in velikosti obtežbe. Dodaten razlog za to je veliko nihanje materialnih karakteristik in veliki varnostni faktorji, ki morajo zajeti to nihanje, degradacijo zaradi okolja in poškodb zaradi rokovanja med izdelavo in montažo. Zato Forster in sodelavci (2004) predlagajo, da za namene določevanja trdnosti prednapetih membranskih konstrukcij vzamemo karakteristične (nefaktorirane) obtežbe, posamezne elemente pa nato preverimo po principu dopustnih napetosti, kjer poleg varnostnih faktorjev za material uporabimo tudi varnostne faktorje glede na tip obtežbe. Celotni varnostni faktorji so tako od 5 do 7 za trdnost tehničnih tekstilov, 2,5 za jeklene kable in 3 za jermene.

5.4.2 Evrokodi

Evrokod standardi so nastali kot posledica namere Evropske komisije, da odstrani tehnične ovire pri trgovanju in uskladi tehnične specifikacije v gradbeništvu znotraj Evropske Unije. Vsebuje skupek tehničnih pravil za projektiranje gradbenih elementov. Program konstrukcijskih Evrokodov obsega več standardov, za nas sta pomembna predvsem SIST EN 1990 oz. Evrokod 0, ki določa osnove projektiranja konstrukcij, in SIST EN 1991 oz. Evrokod 1, ki določa vplive na konstrukcije.

Tukaj velja omeniti posebnost pri določanju vpliva snega, saj se s tem redkeje srečujemo pri projektiranju. Ker je zračno podprta membranska konstrukcija narejena iz materiala, ki ima zelo veliko toplotno prehodnost ($U \geq 5 \frac{W}{m^2K}$) se lahko upošteva pravilo 8 točke 5.2 Evrokoda 1, ki pove, da lahko toplotni koeficient C_t določimo po standardu ISO 4355. Če zagotovimo temperaturo zraka v prostoru vsaj 18 °C in če je $U \geq 4,5 \frac{W}{m^2K}$ se lahko toplotni koeficient zmanjša na največ 0,43.

5.4.3 SIST EN 13782:2006

Področje uporabe tega standarda zajema vse vrste začasno postavljenih pokravnih konstrukcij kot so npr. šotori. V njem so zajete varnostne zahteve, ki morajo biti izpolnjene pri načrtovanju, izračunu, izdelavi, postavitvi, vzdrževanju, času obratovanja, pregledih in testiranjih za mobilne, začasne konstrukcije, ki imajo tlorisno površino večjo kot 50 m². Te konstrukcije so mišljene kot konstrukcije, ki jih lahko večkrat postavimo in odstranimo ne da bi se izgubila njihova osnovna funkcija in so lahko postavljene kratkoročno ali dolgoročno.

Standard predpisuje obvezno izdajo »šotorske knjige«, ki mora biti na voljo na lokaciji postavitve. Vsebovati mora opise o projektu, načinu delovanja konstrukcije, glavne načrte, načrte glavnih detajlov, statično analizo, poročila o pregledih ter popravilih in navodila o postavitvi, uporabi in vzdrževanju konstrukcije.

Glede načina dokaza varnosti standard priporoča navodila ustreznega dela standarda Evrokod 1, ki predpisuje analize mejnih stanj. Kar se tiče projektnih vplivov na konstrukcije standard priporoča navodila Evrokodov SIST EN 1991-1-1, SIST EN 1991-1-2, SIST EN 1991-1-3 in SIST EN 1991-1-4, vendar predpisuje določene izjeme. Za nas so pomembni vplivi vetra in snega na zračno podprte membranske konstrukcije, ostali vplivi se večinoma lahko zanemarijo.

Vplivi vetra se morajo, glede na ta standard, upoštevati kot v SIST EN 1991-1-4, vendar se lahko določijo tudi na poenostavljen način, če je referenčna hitrost vetra manjša kot 28 m/s. Privzamemo lahko vrednosti: $c_{TEM} = 0,8$; $T_r = 10 \text{ let}$; $c_d = 1$; $c_{ALT} = 1$ in vrednosti za pritisk q iz preglednice 4.

Preglednica 4: Vetrna obtežba na poenostavljen način glede na SIST EN 1991-1-4.

Višina: h m	Pritisk: q N/m^2
$h \leq 5$	500
$5 < h \leq 10$	600
$10 < h \leq 15$	660
$15 < h \leq 20$	710
$25 < h \leq 25$	760

Za razliko od vrednosti, navedenih v preglednici, lahko za konstrukcije, ki so ožje kot 10 m in nižje od 5 m, vzamemo vrednost 300 N/m².

Pri določevanju vplivov snega, standard ravno tako priporoča upoštevanje Evrokoda 1 del 3, vendar dopušča veliko večje odpustke. Trdi namreč, da lahko vplive snega zanemarimo za konstrukcije:

- ki so postavljene na območjih, kjer ni verjetnosti snega ali,
- so postavljene samo v letnem času, kadar ni verjetnosti snega ali,
- so z načrtovanjem in z operativnimi pogoji preprečene možnosti sprijema snega s konstrukcijo;
- kjer lahko z vnaprej planiranimi operativnimi postopki preprečimo sprijemanje snega s konstrukcijo.

Zadnji pogoj lahko dosežemo z:

- vgradnjo dovolj zmogljive ogrevalne strojne opreme, ki je pripravljena za uporabo,
- začetkom ogrevanja pred začetkom sneženja,
- ogrevanjem šotora na način, da ima membrana zunanjo temperaturo vsaj + 2 °C,
- gradnjo in napenjanjem konstrukcije na način, da se voda, ki odteka ne more zbirati, ampak da lahko odteče brez zastajanja.

Alternativno lahko upoštevamo tudi zmanjšano obtežbo snega 0,2 kN/m² po celotni konstrukciji, če lahko zagotovimo, da debelina snežne odeje po konstrukciji v katerem koli času ne preseže $h = 8 \text{ cm}$ (z odstranjevanjem snega).

Standard posebno pozornost namenja tudi obtežnim kombinacijam in delnim varnostnim faktorjem. Predpisuje namreč kombiniranje na naslednji način:

$$\gamma_G G_k + \gamma_F Q_{k,1},$$

$$\gamma_G G_k + \sum \gamma_F Q_{k,j}.$$

Pri čemer so:

$\gamma_G = 1,35$... delni varnostni faktor za neugodne stalne vplive,

$\gamma_G = 1,0$... delni varnostni faktor za ugodne stalne vplive,

$\gamma_F = 1,5$... delni varnostni faktor za en sam spremenljiv vpliv,

$\gamma_F = 1,35$... delni varnostni faktor za več spremenljivih vplivov.

Pri dokazovanju nosilnosti tehničnih tekstilov in njihovih stikov se držimo enakega principa, kot ga določa Evrokod, s tem da za določanje karakteristične trdnosti materiala in varnostne faktorje upoštevamo priporočila tega standarda. Enačba, ki določa projektno odpornost tehničnih tekstilov, se glasi:

$$f_d = \frac{f_{tk}}{\gamma_m}$$

kjer so

f_d ... projektna odpornost (MSN),

f_{tk} ... karakteristična natezna trdnost v kratkotrajnem enoosnem nateznem testu pri 23 °C,

γ_m ... varnostni faktor za material podan v preglednici 5.

Karakteristične vrednosti so določene v skladu s SIST EN 1991-1-1. Če testi ne zadostujejo za izračun f_{tk} , lahko predpostavimo, da je $f_{tk} = 0,8 f_{tm}$, kjer je f_{tm} povprečna natezna trdnost dobljena s kratkotrajnim enoosnim nateznim testom pri 23 °C.

Preglednica 5: Varnostni koeficienti za material iz PET/PVC in visokofrekvenčno varjene stike po standardu SIST EN 13782:2006.

	Proizvod v skladnosti z EN 10204:2004, 2.2	Proizvod v skladnosti z EN 10204:2004, 3.1
<u>Material</u>		
stalna obtežba	2,5	2,5
kratkotrajno delujoča obtežba	2,5	2
ob prisotnosti snega	2,5	2

Se nadaljuje ...

Nadaljevanje preglednice 5 ...

<u>Varjeni stiki prvega razreda</u>		
stalna obtežba	---	7
kratkotrajno delujoča obtežba	---	3
ob prisotnosti snega	---	2,5
<u>Varjeni stiki drugega razreda</u>		
stalna obtežba	15	12
kratkotrajno delujoča obtežba	6	5
ob prisotnosti snega	6	5
OPOMBA:		
»kratkotrajno delujoča obtežba« pomeni obtežbo pri visoki temperaturi.		
»ob prisotnosti snega« pomeni obtežbo brez visoke temperature.		

Te vrednosti so veljavne samo, če testiranja stikov potrdijo 70 % natezne trdnosti materiala pri 23 °C in 70 °C. Če ti pogoji niso zagotovljeni in če se uporablja drugačen material kot PET/PVC, je potrebno izvesti dodatne preiskave glede vpliva temperature in stalne obtežbe. V aneksu C tega standarda so razloženi razredi stikov in sicer:

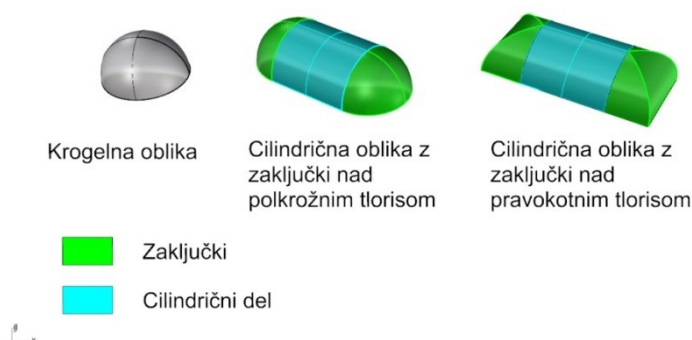
- stiki prvega razreda: stiki, ki jih izvede kvalificiran proizvajalec (z uporabo metodologije, ki jo predpiše (okarakterizira vse parametre in delovne pogoje) proizvajalec tehničnih tekstilov ali sestavljaavec membran), ki sproti izvaja teste za določitev f_{tk} v skladu z EN 1991-1-1,
- stiki drugega razreda: stiki, ki jih izvede kvalificirano osebje z uporabo metodologije, ki jo predpiše (okarakterizira vse parametre in delovne pogoje) proizvajalec tehničnih tekstilov ali sestavljaavec membran; stiki so na začetku testirani in sproti preverjeni z vizualnim preizkusom odlepljenja,
- stiki tretjega razreda: stiki izvedeni na katerikoli način za izvedbo sekundarnih elementov, katerih porušitev ne povzroča zmanjšanje varnosti celotne konstrukcije.

Razložiti je potrebno še standard EN 10204:2004, ki je omenjen v preglednici 5. To je mednarodni standard, ki predpisuje različne tipe certifikatov kontrole, ki jih je potrebno dostaviti kupcu, v skladju z zahtevami naročila za dobavo kovinskih izdelkov, vendar velja tudi za nekovinske izdelke. Tako mora proizvajalec za proizvod, ki je skladen s točko 2.2 tega standarda, izdati dokument, v katerem trdi, da je proizvod skladen z zahtevami naročila in v katerem poda rezultate splošnih testov, ki jih lahko opravi sam. Enako velja za skladnost s točko 3.1, vendar mora podati dokument, v katerem trdi, da je proizvod skladen z zahtevami naročila in v katerem poda rezultate specifičnih testov, ki jih izvede neodvisni pooblaščen certifikacijski urad.

Poleg vsega do sedaj naštetega standard SIST EN 13782:2005 priporoča tudi kriterije za izdelavo, dobavo in preglede tovrstnih konstrukcij v njenih različnih življenjskih dobah, usmerja projektanta k predpisom o požarni varnosti in predlaga zahteve za zasilne izhode in poti.

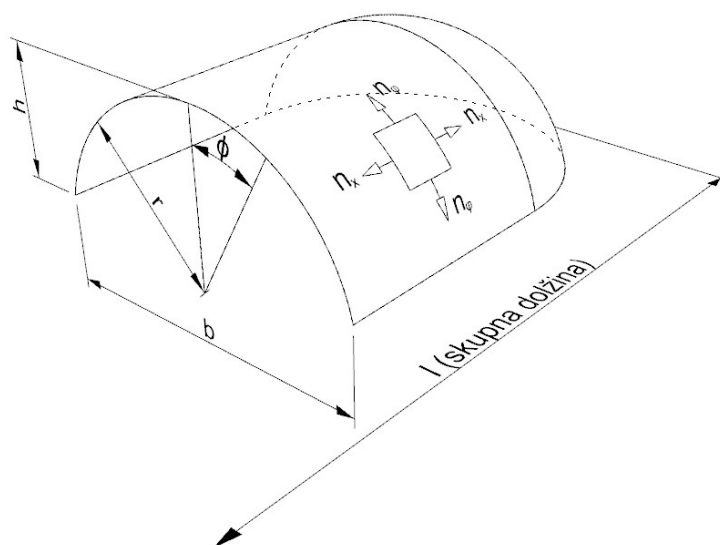
5.4.4 DIN 4134

Nemški standard, ki je prišel v veljavo februarja 1983, pokriva področje projektiranja, izdelave in delovanja zračno podprtih membranskih konstrukcij postavljenih nad krožnim tlorisom, pravokotnim tlorisom ali pravokotnikom tlorisom s polkrožnimi zaključki.

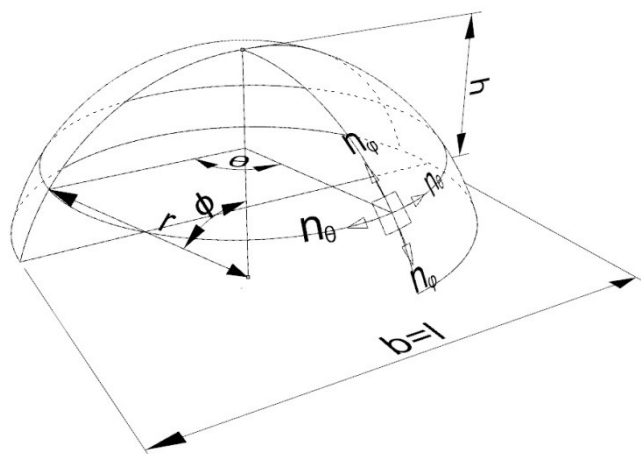


Slika 44: Prikaz treh tipov zračno podprtih membranskih konstrukcij, ki jih pokriva DIN 4134.

V njem so definirani vplivi, ki jih moramo upoštevati, način določevanja notranjih sil in maksimalni pomiki, ki jih lahko pričakujemo. Deluje po metodi mejnih stanj, kjer na eni strani fakturiramo obtežbe, rezultate pa primerjamo z odpornostjo materiala in dopustnimi pomiki. Daje tudi navodila za ustvarjanje in vzdrževanje notranjega pritiska, za upravljanje tovrstnih objektov in o požarni varnosti. Obstaja še cela vrsta ostalih standardov, kot so japonski, ameriški, britanski in celo vzhodno nemški, vendar sem za obravnavo izbral tega, ker je najsodobnejši in najbolj kompleten.



Slika 45: Definicija koordinatnega sistema in notranjih količin pri cilindričnih konstrukcijah po DIN 4134.



Slika 46: Definicija koordinatnega sistema in notranjih količin pri sferičnih konstrukcijah po DIN 4134.

5.4.4.1 Vplivi na konstrukcijo

Vplivi, ki jih zajema standard, so lastna teža, notranji pritisk (p_i), veter (q), sneg (s) in temperaturni vplivi. Lastno težo in temperaturne vplive lahko zanemarimo, saj imata zanemarljiv vpliv na konstrukcijo.

Glede določevanja projektnega notranjega pritiska standard pravi, da mora biti takšen, da se v primeru najmanj ugodne kombinacije ostalih vplivov zagotovita stabilnost in oblika konstrukcije. Ta pogoj se lahko zagotovi, če se projektni notranji pritisk določi iz preglednice 6.

Preglednica 6: Notranji pritisk p_i pri cilindričnih konstrukcijah z zaključki nad polkrožnim ali pravokotnim tlorisom in pri sferičnih konstrukcijah po DIN 4134.

Tip konstrukcije	Projektni notranji pritisk $p_i \left[\frac{kN}{m^2} \right]$	
<u>Cilindrična konstrukcija z zaključki nad polkrožnim ali pravokotnim tlorisom</u>		
Tričetrtinski cilinder $h/r = 1,5$	$\geq 0,80 q$	$\geq 1,6 s$
Polovični cilinder $h/r = 1$	$\geq 0,60 q$	$\geq 1,3 s$
Položni cilinder $h/r \leq 0,75$	$\geq 0,50 q$	$\geq 1,1 s$
<u>Sferična oblika</u>		
Tričetrtinska sfera $h/r = 1,5$	$\geq 0,80 q$	$\geq 1,6 s$
Polovična sfera $h/r = 1$	$\geq 0,60 q$	$\geq 1,3 s$
Sferični izsek $h/r \leq 0,75$	$\geq 0,50 q$	$\geq 1,1 s$
OPOMBA: Za definicijo b, l, h in r glej sliki 45 in 46 Interpolacija med vrednostmi je dovoljena.		

V splošnem projektni notranji pritisk ne sme biti nižji od $0,3 \text{ kN/m}^2$. Če je konstrukcija manjša od 20 m in če se zagotovi, da v času jakosti vetrov 8 po Beaufortevi lestvici (kar znaša nekje med 10 in 20 m/s), notri ni ljudi in da ni možnosti poškodovanja membrane, lahko predpostavimo projektni notranji pritisk kar $0,3 \text{ kN/m}^2$. Lokalno gubanje membrane v takšnih primerih ni škodljivo.

Veterni pritisk w je produkt tlaka pri največjih sunkih vetra q in koeficienta tlaka c_p . Standard določa poenostavljeno določanje največjega tlaka pri sunkih vetra v preglednici 7:

Preglednica 7: Tlak ob sunkih vetra v odvisnosti od višine konstrukcije glede na DIN 4134.

Višina konstrukcije nad tlemi $h \text{ [m}^2\text{]}$	Tlak ob sunkih vetra $q \left[\frac{kN}{m^2} \right]$
Do 8	0,5
Nad 8 do 20	$0,3 + 0,025 h$
Nad 20	$0,725 + 0,00375 h$

Pri konstrukcijah, katerih površina horizontalne projekcije pravokotno na vzdolžno os presega 500 m^2 , lahko uporabimo še sledeče redukcijske koeficiente pri določanju tlaka ob sunkih vetra.

Preglednica 8: Redukcijski koeficienti tlaka ob sunkih vetra glede na DIN 4134.

Površina [m^2]	Redukcijski koeficient
500 do 3000	$(1,05 - \frac{A}{10000})$
≥ 3000	0,75

Če se notranje sile ne določijo, kot bo predstavljeno v naslednjem poglavju, so potrebna dodatna testiranja za določitev koeficientov tlaka.

Glede določevanja snežne obremenitve DIN 4134 določa izjemo k standardnemu postopku določevanja snežne obremenitve, opisanem v Evrokodu. Če se zagotovi mehansko odstranjevanje snega na delih konstrukcije, ki imajo manjši naklon kot 70° , potem lahko vzamemo obremenitev $s = 0,25 \frac{kN}{m^2}$.

5.4.4.2 Določevanje notranjih sil in obtežne kombinacije

Standard navaja, da je potrebno notranje sile določiti ob upoštevanju velikih deformacij membrane, vendar se lahko notranje sile za podane tri oblike določi po naslednjih izrazih. Nič ne pove o sami razporeditvi pritiska vetra po konstrukciji (o koeficientih c_p), ampak poda zgolj navodilo, kako izračunati največje notranje sile. Največje notranje sile v zračno podprti membranski konstrukciji lahko dobimo iz naslednjih enačb:

Za cilindrični del:

$$n_{\phi,w} = \alpha_{\phi} * q * r$$

$$n_{\phi,p} = p_i * r$$

$$n_{x,w} = \alpha_x * q * r$$

$$n_{x,p} = p_i * \frac{r}{2}$$

Za zaključke konstrukcij nad polkrožnim in pravokotnik tlorisom in pri sferičnih membranah:

$$n_{\phi,w} = \alpha_{\phi} * q * r$$

$$n_{\phi,p} = p_i * \frac{r}{2}$$

$$n_{\theta,w} = \alpha_{\theta} * q * r$$

$$n_{\theta,p} = p_i * \frac{r}{2}$$

Pri tem simboli pomenijo:

n ... notranja sila v membrani,

α ... koeficient za notranjo silo zaradi vetra,

ϕ, x, θ ... indeksi, ki označujejo smer delovanja sile, kot je označeno na slikah 45 in 46,

w, p ... indeksa, ki označujeta h kateremu obtežnemu primeru pripada sila, w za veter in p za notranji pritisk.

Koeficienti α so v odvisnosti od b/l in h/r podani v preglednicah 9 in 10. Kot je navedeno v samem standardu so bili dobljeni deloma s poizkusi, deloma z numeričnimi modeli po metodi končnih elementov.

Preglednica 9: Koeficienti α za določitev notranje sile zaradi vetra pri cilindričnih konstrukcijah nad pravokotnim tlorisom glede na DIN 4134.

b/l		h/r					
		0,5		0,75		1	
		α_ϕ	α_x oz. α_θ	α_ϕ	α_x oz. α_θ	α_ϕ	α_x oz. α_θ
0,25	Cilindrični del	0,9	0,9	1,0	0,9	1,1	0,9
	Zaključki	1,2	0,9	1,2	0,9	1,2	0,9
0,5	Cilindrični del	0,8	0,8	0,9	0,8	1,0	0,8
	Zaključki	1,0	0,8	1,0	0,8	1,1	0,8
0,75	Cilindrični del	0,8	0,7	0,9	0,7	1,0	0,7
	Zaključki	0,8	0,7	0,9	0,7	1,0	0,7

OPOMBA:
 Za definicijo b, l, h in r glej slike 45 in 46
 Interpolacija med vrednostmi je dovoljena

Preglednica 10: Koeficienti α za določitev notranje sile zaradi vetra pri cilindričnih konstrukcijah z zaključki nad polkrožnim tlorisom in sferičnih konstrukcijah glede na DIN 4134.

b/l		h/r					
		0,5		0,75		1	
		α_ϕ	α_x oz. α_θ	α_ϕ	α_x oz. α_θ	α_ϕ	α_x oz. α_θ
0,25	Cilindrični del	0,9	1,3	1,0	1,3	1,1	1,3
	Zaključki	1,5	1,2	1,6	1,3	1,6	1,3
0,5	Cilindrični del	0,8	1,2	0,9	1,2	1,0	1,2
	Zaključki	1,4	1,1	1,4	1,1	1,5	1,2
0,75	Cilindrični del	1,3	1,0	1,4	1,1	1,5	1,2
	Zaključki	1,3	1,0	1,4	1,1	1,5	1,2

OPOMBA:
 Za definicijo b, l, h in r glej slike 45 in 46
 Interpolacija med vrednostmi je dovoljena

Enake enačbe veljajo tudi pri računu sil v podporah tj. na mestih sidranja konstrukcije. Izjemi sta sili n_ϕ za zaključke pri cilindričnih konstrukcijah z zaključki nad polkrožnim tlorisom in sferične konstrukcije, ki ju lahko izračunamo na sledeč način :

Pri cilindričnih konstrukcijah z zaključki nad polkrožnim tlorisom:

$$n_{\phi} = 0,8 * \alpha_{\phi} * q * r + p_i * \frac{r}{2}$$

Pri sferičnih konstrukcijah:

$$n_{\phi} = 0,6 * \alpha_{\phi} * q * r + p_i * \frac{r}{2}$$

Pri tem je potrebno paziti na smer v kateri deluje ta sila. Na privetni strani lahko pri cilindričnih in sferičnih konstrukcijah smer odčitamo iz preglednice 11. Na zavetni strani cilindričnih konstrukcij ter na pri- in zavetni strani zaključkov pa lahko predpostavimo nedeformirano obliko.

Preglednica 11: Kot med tangento na membrano v podpori in vodoravnico, ki nakazuje smer delovanja sile v podporah na privetni strani glede na DIN 4134.

$\frac{p_i}{q}$	Kot v podpori [°]			
	h/r			
	0,5	0,75	1	1,25
0,6	36	46	55	58
0,8	37	48	58	62
1,0	38	50	60	66
OPOMBA: Za definicijo b, l, h in r glej slike 45 in 46 Interpolacija med vrednostmi je dovoljena				

Obtežne kombinacije, ki jih priporoča ta nemški standard, so sledeče:

Obtežna kombinacija A (»zimsko neurje«)

$$1,0 n_g + 1,1 n_p + 1,6 n_w \leq n_{T=20,t=0}$$

Obtežna kombinacija B (»poletno neurje«)

$$1,0 n_g + 1,1 n_p + 0,7 n_w \leq n_{T=70,t=0}$$

Obtežna kombinacija C (»življenjska doba«)

$$1,0 n_g + 1,3 n_p \leq n_{T=20,t=\infty}$$

Pri čemer so:

$n_{T=20,t=0}$... natezna trdnost materiala pri 20 °C pri kratkotrajni obtežbi

$n_{T=70,t=0}$... natezna trdnost materiala pri 70 °C pri kratkotrajni obtežbi

$n_{T=20,t=\infty}$... natezna trdnost materiala pri 20 °C pri dolgotrajni obtežbi

5.4.4.3 Varnostni faktorji po Mintu (1981)

V standardu DIN 4134 sicer ni ničesar omenjenega o delnih varnostnih faktorjih, ki bi jih morali upoštevati pri določevanju odpornosti materiala. Kot pravijo Forster in sodelavci (2004) se v nemški praksi uporablja disertacija Mintu (1981), v kateri so predlagani varnostni faktorji na podlagi številnih testov. V nadaljevanju je postopek, kot ga predlagajo istoimenski avtorji, ki temelji na metodi dopustnih napetosti. Napetost v materialu, dobljena s kombiniranjem karakterističnih obtežb, mora biti manjša od dovoljene napetosti (f_d). Ta se izračuna po naslednji enačbi:

$$f_d = \frac{f_{tk}}{\gamma_f \gamma_M A_i} = \frac{f_{tk}}{A_{res}}$$

Simboli v enačbi pomenijo:

f_{tk} ... natezna trdnost materiala,

γ_f ... faktor obtežnega primera,

γ_M ... materialni varnostni faktor; $\gamma_M = 1,4$ za sam material in $\gamma_M = 1,5$ za stike,

A_i ... kombinacija redukcijskih faktorjev, ki so med drugim odvisni tudi od obtežnega primera

Ker kombiniranje različnih vplivov (stalna, sneg, veter) na linearen način ni realistično, so predlagani faktorji obtežnega primera za vsako nelinearno kombinacijo karakterističnih vrednosti vplivov posebej:

- stalna (prednapetje in lastna teža): $\gamma_f = 1,5$,
- neurje (prednapetje, lastna teža in veter): $\gamma_f = 1,6$,
- maksimalni sneg (prednapetje, lastna teža in sneg): $\gamma_f = 1,5$.

Faktorji A_i so sledeči (v okepaju je vrednost, ki velja za stike):

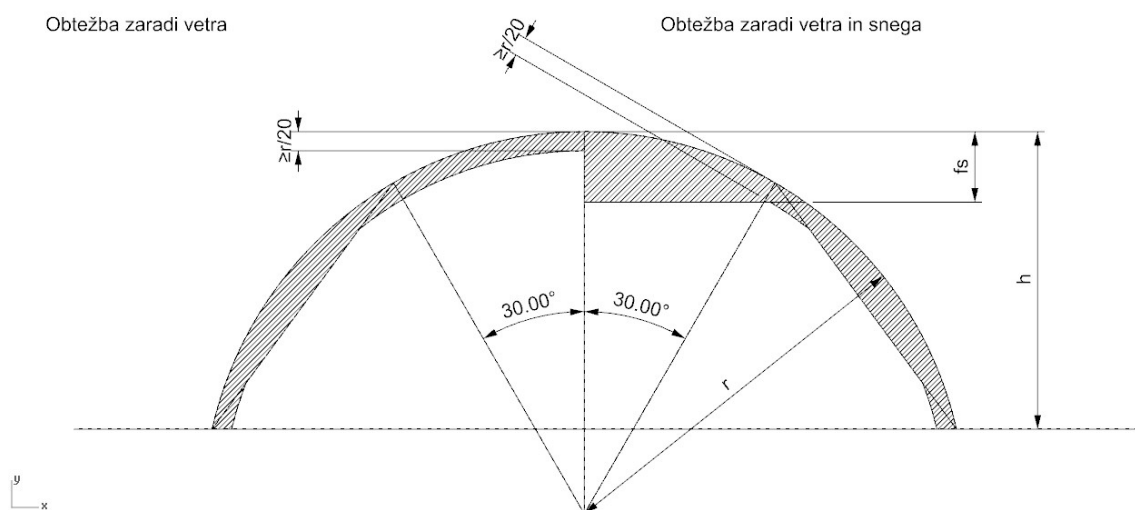
- $A_0 = 1,0 - 1,2$ (1,2) ... Redukcijski faktor, ki zajame pojav, da se pri enoosnem preizkusu natezne trdnosti izkažejo za večje kot pri dvoosnem preizkusu.
- $A_1 = 1,6 - 1,7$ (1,5 – 3,4) ... Redukcijski faktor za dolgotrajne obtežbe; pri stikih zelo vpliva širina stika.
- $A_2 = 1,1 - 1,2$ (1,2) ... Redukcijski faktor za onesnaženost in degradacijo materiala.
- $A_3 = 1,1 - 1,25$ (1,4 – 1,95) ... Redukcijski faktor za obtežne primere s povišanimi temperaturami).

Tako lahko zaključimo, da globalni varnostni faktor za posamezne obtežne primere znaša (v oklepaju je vrednost, ki velja za stike):

- Stalna: $A_{res} = \gamma_f * \gamma_M * A_0 * A_1 * A_2 * A_3 = 4,9 - 6,4 (6,8 - 22,9)$
- Neurje: $A_{res} = \gamma_f * \gamma_M * A_0 * A_2 = 2,9 - 3,2 (3,2 - 3,5)$
- Maksimalni sneg: $A_{res} = \gamma_f * \gamma_M * A_0 * A_1 * A_2 = 4,4 - 5,1 (4,9 - 11,8)$

5.4.4.4 Deformacije

Standard ne podaja točnih pomikov in deformacij membrane, ampak se tega loti na drugačen način. Podaja dovoljene odmike ostalih predmetov od membrane oz. varnostno razdaljo, da lahko poteka nemoteno obratovanje objekta. Za tipične konstrukcije, obravnavane v tem standardu, mora varnostna razdalja od membrane pri obremenitvi vetra znašati vsaj $\frac{r}{20}$. Pri obremenitvi s snegom pa moramo zagotoviti tudi dovolj veliko razdaljo od vodoravnice skozi vrh konstrukcije. Če se sneg odstranjuje z ogrevanjem membrane ali z mehanskim odstranjevanjem, tega ni potrebno upoštevati. Razdalje, ki jih moramo zagotoviti, lahko odčitamo iz preglednice 12. Za razlago posameznih razdalj, pa si lahko pomagamo s sliko 47. Razdalje se lahko zmanjšajo za eno tretjino, če so predmeti znotraj membrane zaobljeni ali obloženi.



Slika 47: Potrebna varnostna razdalja od membrane za obtežbe vetra in obtežbe zaradi vetra in snega. Leva polovica predstavlja kombinacijo brez snega, desna pa zajema oba vpliva (DIN 4134).

Preglednica 12: Relativna razdalja f_s/r za primer snežne obtežbe, kadar se sneg zaradi ogrevanja ne stopi, glede na DIN 4134.

$\frac{p_i}{s}$	Relativna razdalja f_s/r			
	$\frac{h}{r}$			
	0,5	0,75	1	1,25
1,0	0,15	0,23	0,30	0,38
1,5	0,05	0,1	0,15	0,20
2,0	0,03	0,05	0,09	0,12
3,0	0,02	0,03	0,05	0,07

OPOMBE:
 Za definicijo b, l, h in r glej sliki 45 in 46
 Interpolacija med vrednostmi je dovoljena
 Večje relativne razdalje kot $f_s/r = 0,20$ niso dopustne

5.4.4.5 Zahteve za strojno opremo in upravljanje z objektom

Standard podaja tudi navodila in zahteve za strojno opremo, ki mora biti vgrajena, kar je za gradbenega inženirja, ki se s tem ne srečuje pogosto, zelo priročno. Vpihovalna strojna oprema mora biti nameščena na razdalji vsaj treh metrov od membrane na zunanji strani zaradi preprečevanja požara. Razdalja je lahko tudi manjša in sicer vse do enega metra, če je zračno podprta konstrukcija narejena iz negorljivih materialov oz. ustreznih požarno varnih materialov. Zahteve za zagotavljanje notranjega pritiska so odvisne od velikosti, namena uporabe in števila ljudi, ki jih lahko sprejme zračno podprta konstrukcija. Tako morajo imeti večje konstrukcije 100 % zračno rezervo v primeru odpovedi primarne strojne opreme. Rezerva mora biti narejena tako, da se sama zažene v primeru okvare primarne strojne opreme in da lahko zagotavlja enak notranji pritisk. Če je primarna oprema napajana z električno energijo, se predlaga rezerva z drugačnim virom energije, na primer z motorjem na notranje izgorevanje. Takšne konstrukcije morajo imeti tudi vgrajen alarmni sistem, ki obvesti upravnika in uporabnike o padcu pritiska ali okvari. Alarm mora delovati tudi, če pride do okvare glavnega napajalnega sistema. Notranji pritisk se mora prilagajati vetrovnim razmeram avtomatsko preko merilnih naprav, ali pa ročno z ukrepanjem upravnika. Zagotoviti se mora, da pritisk v hali ne preseže 110 % in da ne pade pod 50 % projektne pritiska, vendar ne pod 0,18 kN/m². Znižanje notranjega pritiska na spodnjo mejo je dovoljeno, če je vgrajen sistem za avtomatsko regulacijo pritiska in ta reagira tako, da ko zunanji veter doseže 50 % projektne vetra, vzpostavi nazaj projektni pritisk in na to obvesti s svetlobnim ali zvočnim signalom. Če ni sistema za avtomatsko uravnavanje pritiska, ampak samo alarmni sistem, ki opozarja na hitrost vetra, lahko to stori upravnik objekta.

Naloge upravnika so tudi izvajanje rednih tedenskih pregledov objekta in strojne opreme. V zimskem času mora biti poskrbljeno za pravočasen vklop ogrevanja, da se zagotovi minimalna temperatura za topljenje snega ali pa, da je orodje za mehansko odstranjevanje snega usposobljeno in takoj uporabljeno.

5.4.5 Design Manual For Ground-Mounted Air-Supported Structures

Ta priročnik za projektiranje zračno podprtih membranskih konstrukcij je bil izdan leta 1969 in je bil namenjen industriji in dobaviteljem vojske in vlade Združenih držav Amerike, da bi imeli ustrezne in zanesljive podatke za projektiranje zračno podprtih membranskih konstrukcij. Podatki in projektne informacije v tem priročniku so bili dobljeni na podlagi analitičnih izrazov in testiranj v vetrovniku, izvedenih na sferičnih in cilindričnih (eno- in dvostenskih) zračno podprtih konstrukcijah. Rezultati testiranj so grafi in preglednice iz katerih odčitamo brezdimenzijske koeficiente za aerodinamične sile, pomike, materialne napetosti, sile v temeljih, velikost pakiranja in težo. Za nas je zanimivo predvsem kako določa pomike, materialne napetosti, sidrno silo in zahteve za ventilator.

5.4.5.1 Pomiki

Priročnik v grafih podaja največje pomike dobljene zaradi vetra hitrosti 49 m/s in pri notranjem pritisku, ki je enak pritisku, ki jih povzroča takšen veter, to je 1,5 kN/m². Primer takšnega grafa je na sliki 48. Na ordinatni osi imamo podana razmerja med višino in premerom cilindrične hale (h/d) na abscisni osi pa razmerje med največjim pomikom in polmerom hale (δ/r). Podobno kot pri nemškem standardu DIN 4134, moramo tudi tukaj jemati pomike kot omejitve za maksimalen uporaben radij hale (r'). Tega lahko po odčitnem rezultatu dobimo iz naslednje enačbe:

$$r' = r \left(1 - \frac{\delta}{r}\right)$$

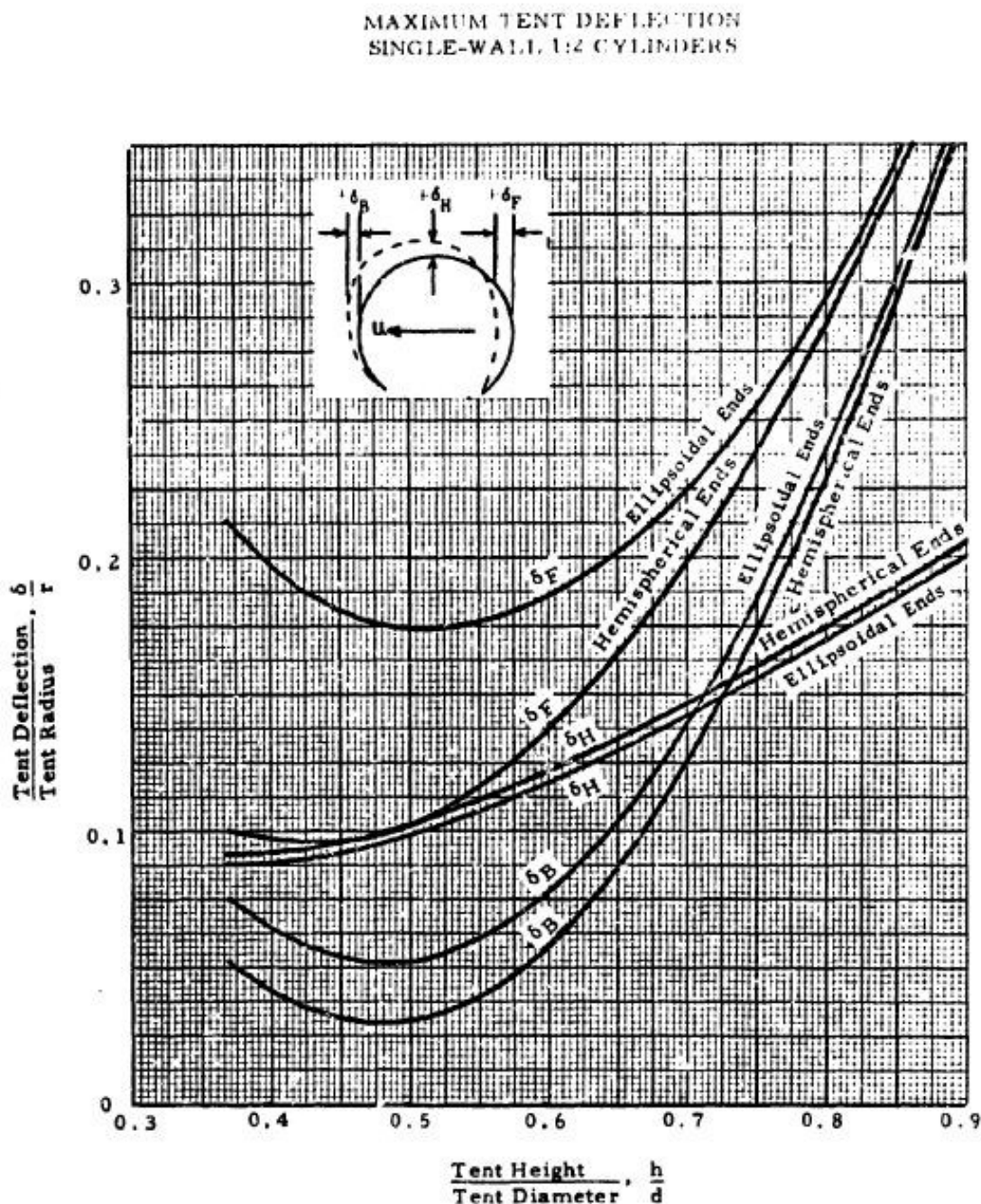


Figure 16. Comparison of Non-Porous Tent Deflection with Shape (Cylindrical Single-Wall Tents, 1:2 W/ ϵ_h)

Slika 48: Primer grafa za maksimalne pomike po Design manual ... (1969).

5.4.5.2 Sidrna sila

Pri določanju sile, ki je potrebna za sidranje (P_{AL}), moramo sešteti sili zaradi vetra (P_{WL}) in notranjega pritiska (P_{IL}). Sila zaradi vetra je zmnožek pritiska vetra, tlorisne površine hale (A_p) in koeficienta C_{AL} , ki ga spet odčitamo iz grafa, medtem ko je sila zaradi notranjega pritiska enaka zmnožku

notranjega pritiska (P_e) in tlorisne površine hale. Dobljeni rezultat le še delimo z obsegom hale in dobimo potrebno sidrno silo na tekoči meter.

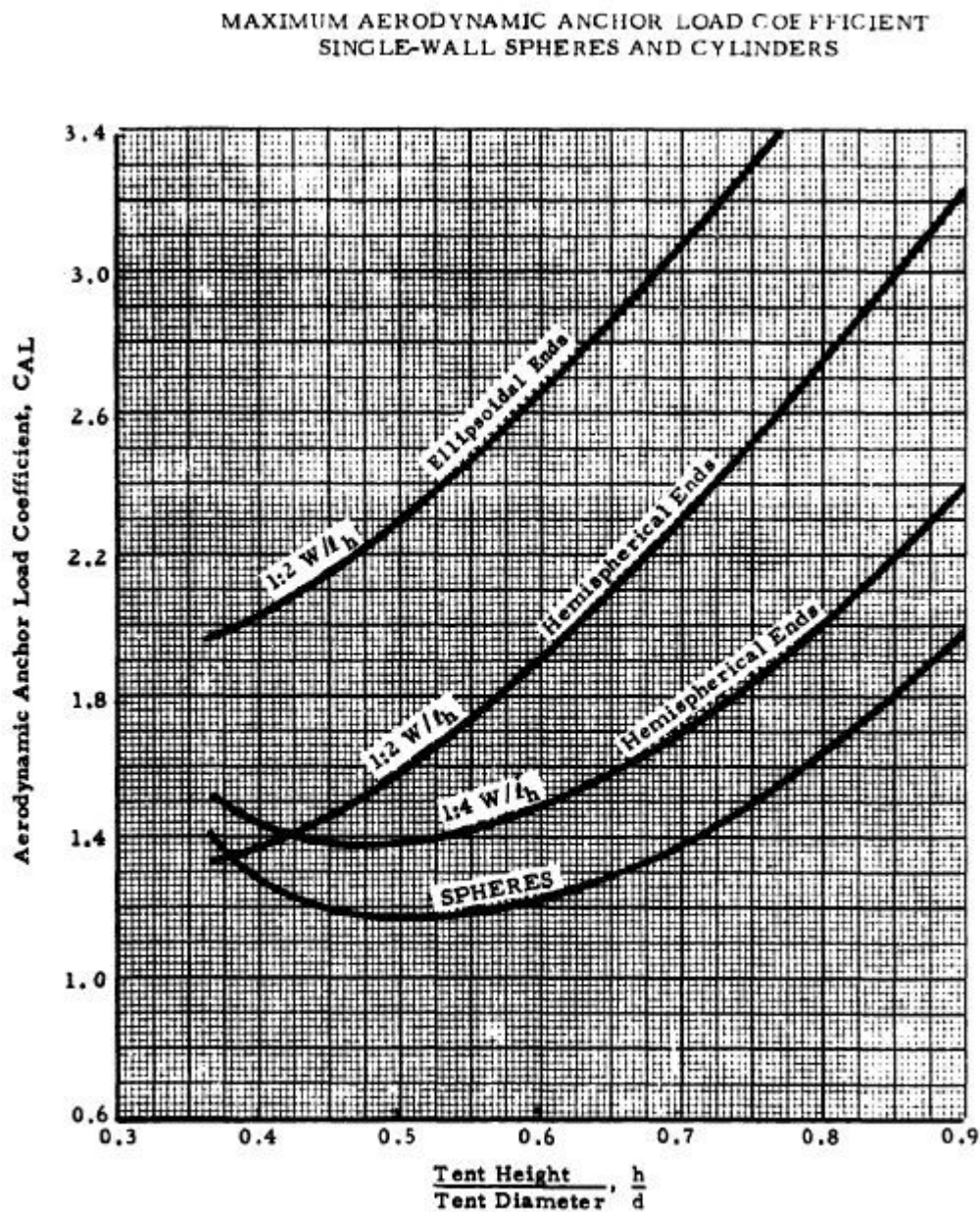


Figure 20. Variation of Anchor Load Coefficient with Shape (Spherical and Cylindrical Single Wall Tents, 1:2, 1:4 W/h)

Slika 49: Primer grafa za določanje koeficienta C_{AL} po Design manual ... (1969).

5.4.5.3 Notranje sile in določevanje materiala

Razporeditev napetosti v membrani je bila narejena s pomočjo meritev razporeda napetosti v vetrovniku in z uporabo primerne teorije lupin. Rezultati tega so podani kot grafi v katerih odčitamo koeficiente, kot so $\frac{N_\phi}{q r}$, $\frac{N_\theta}{q r}$, $\frac{N_{\phi\theta}}{q r}$ in podobni, ki so podani v odvisnosti od različnih količin, kot na primer od razmerja med širino in dolžino konstrukcije, pritiska vetra, razmerja med notranjim pritiskom in

pritiskom vetra in podobno. Priročnik, tako kot DIN 4134, ne pove, kako je razporejen pritisk vetra po konstrukciji, ampak podaja samo navodila za določitev največjih notranjih sil. Postopek za določitev notranjih sil se sicer razlikuje za posamezne oblike konstrukcije, ampak v splošnem zgleda nekako tako:

1. Iz projektnih zahtev določi velikost in obliko konstrukcije.
2. Iz ustreznega grafa (primer takšnega grafa je na sliki 50) odčitaj koeficient $\frac{N_i}{q r}$, pri čemer indeks i označuje $\phi, \theta, \phi\theta$ ali x za pripadajoči del konstrukcije, bodisi cilindrični del ali zaključek.
3. Te koeficiente pomnoži s pritiskom vetra (q) in radijem (r), da dobiš notranje sile zaradi vetra (v enotah sila na tekoči meter):

$$N_i = \frac{N_i}{q r} q r$$

4. Notranje sile zaradi vetra in pritiska dobiš tako, da notranjim silam iz točke 3 prištejemo še vpliv zaradi notranjega pritiska:

$$\bar{N}_i = N_i + \beta P_e r$$

Pri čemer je $\beta = 1$ za $i = \phi$ pri cilindričnem delu konstrukcije in $\beta = 0$ za $i = \phi\theta$, drugače pa je $\beta = 0,5$.

Tako izračunane notranje sile so podane v ortogonalnem koordinatnem sistemu: sferičnem, elipsoidnem ali cilindričnem. Samo v cilindričnem sistemu se koordinate ujemajo z osnovno in votkovno materialno smerjo, drugje pa še ne vemo kakšna bo orientacija vlaken v materialu, zato moramo dimenzionirati tako, da bo material prenesel največjo glavno silo. To lahko določimo z enačbo za glavne napetosti:

$$N_{max} = \frac{1}{2} (\bar{N}_\phi + \bar{N}_\theta) + \frac{1}{2} \sqrt{(\bar{N}_\phi + \bar{N}_\theta)^2 + 4 \bar{N}_{\phi\theta}^2}$$

Notranje sile se po tem priročniku kontrolirajo po metodi dopustnih napetosti, kar pomeni, da upoštevamo karakteristične vrednosti vplivov pri določitvi notranjih sil. Pri izbiri materiala moramo glede na ta priročnik upoštevati še varnostne faktorje zaradi imperfektnosti materiala, okoljskih vplivov in rokovanja. Vse te je potrebno skrbno oceniti s pomočjo literature in podatkov proizvajalca, če pa ti podatki niso na voljo, priročnik priporoča uporabo varnostnega faktorja 3, ki je pravzaprav tudi celotni varnostni faktor.

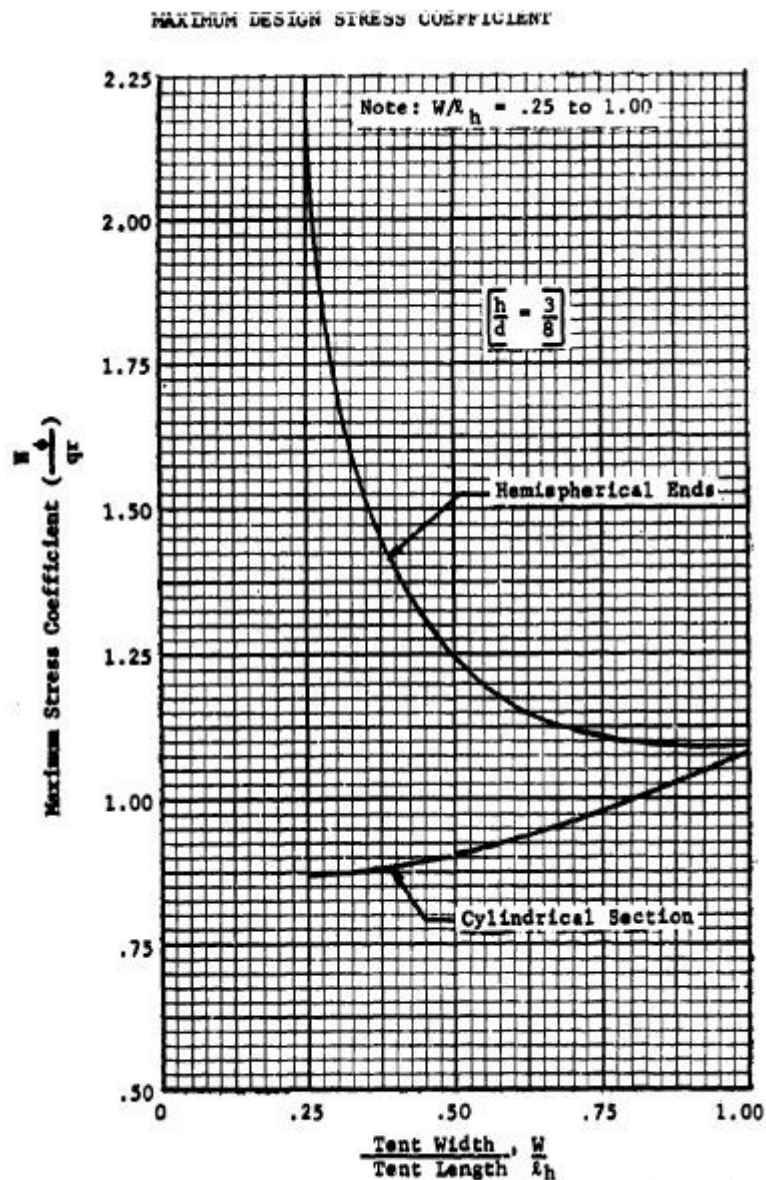


Figure 26. Variation of Maximum Design Stress Coefficient With Tent Width-to-Length Ratio; $h/d = 3/8$, N_ϕ/qr

Slika 50: Primer grafa koeficientov notranjih sil po Design manual ... (1969).

5.4.5.4 Notranji pritisk in karakteristike vpihvalne enote

Priporočilo priročnika je, da se za notranji pritisk vzame enako vrednost (P_e) kot je pritisk vetra (q), zaradi zagotavljanja dobre stabilnosti konstrukcije in zmanjšanja pomikov. Manjši pritiski kot q so dopustni s stališča stabilnosti, vendar se moramo zadovoljiti z večjimi pomiki in manj uporabnega prostora.

Vpihvalna enota mora zagotavljati dovolj veliko količino zraka, da pokriva zračne izgube skozi razne odprtine in kljub temu vzdržuje pritisk. Zračne izgube nastajajo zaradi poroznosti tekstila, prezračevalnih odprtin, slabega tesnjenja na stikih membrane s temelji, pri vratih in ostalih elementih,

ki so nujni za obratovanje zračno podprte konstrukcije. Zaradi različnih konstrukcijskih detajlov je nemogoče podati splošno oceno zračnih izgub, zato je potrebno to določiti za vsak primer posebej.

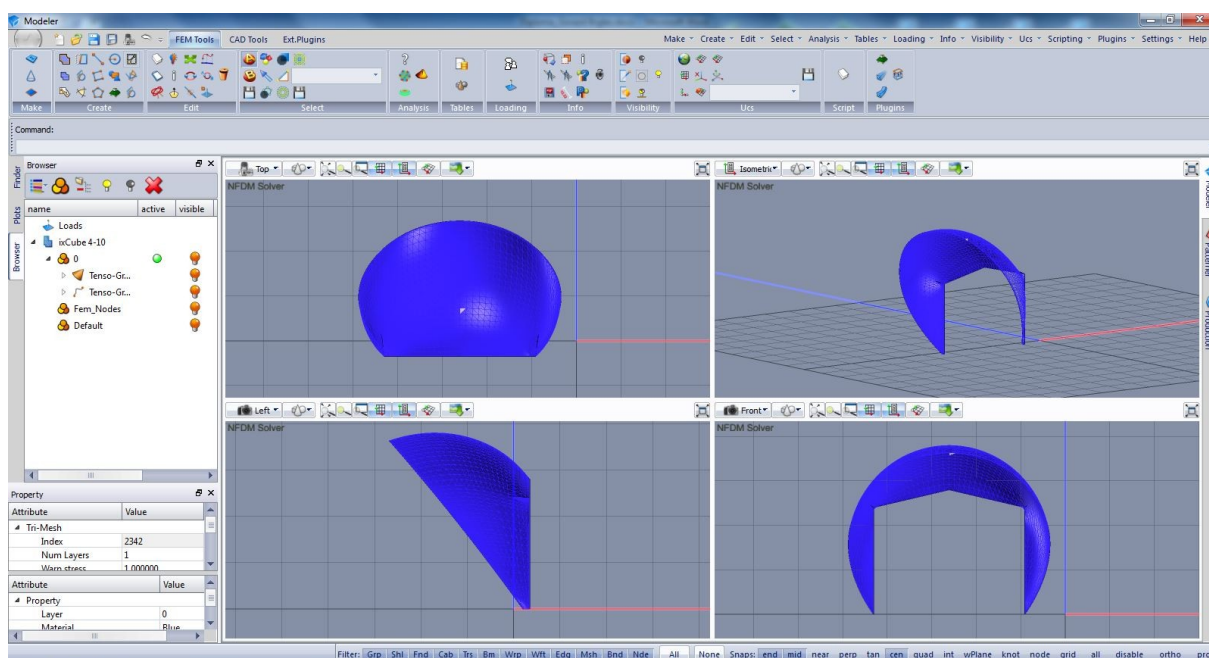
5.4.5.5 Komentar

Priročnik je predvsem primeren za projektiranje tipskih konstrukcij, kot sta prvi in drugi tip na sliki 44. Za to imamo skoraj dovolj informacij, za ostale vrste, med drugim tudi za cilindrično obliko z zaključki nad pravokotnim prerezem, ki je najbolj uporabljena oblika, pa ne podaja dovolj informacij za projektiranje. Ravno tako povsem zanemari vpliv snega na določevanje notranjega pritiska, notranjih sil in pomikov. Za inženirja, ki projektira kakršno koli konstrukcijo, je to kritičen podatek. Zamudno je lahko tudi pretvarjanje med imperialnimi in metričnimi enotami. Ta priročnik je po mojem mnenju uporaben predvsem za primerjavo rezultatov notranjih sil, ki so posledica vetra, dobljenih z numeričnimi modeli in ostalimi standardi, za ostalo pa je bolje, da uporabimo drugo literaturo.

6.3 IxCube 4-10

IxCube 4-10 je program, ki ga je izdelal Gerry D'Anza in je naslednik programa ixForteen 4000. Trenutno je še v razvoju in sem ga za potrebe svoje diplomske naloge dobil kot beta verzijo. Sestavljen je iz treh modulov: Modeler, Patterner in Production.

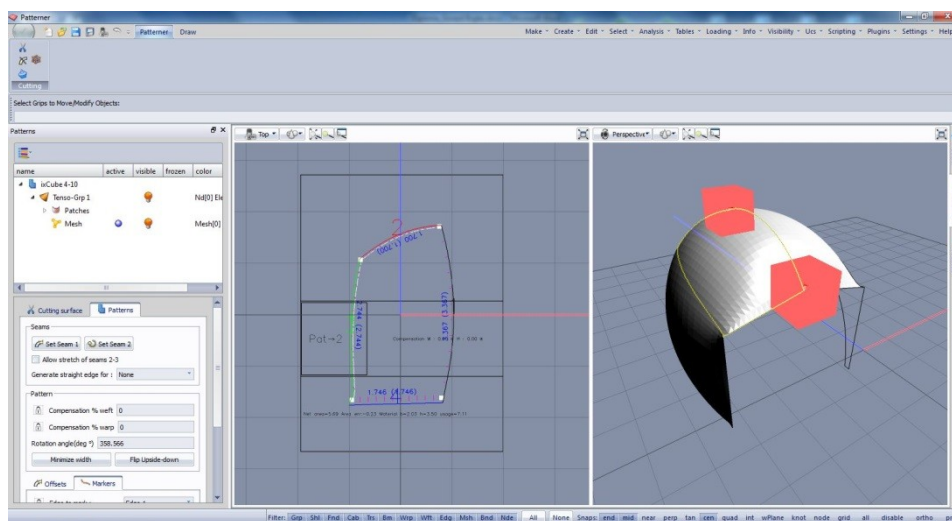
Z modulom Modeler lahko iščemo oblike in opravljamo nelinearne analize konstrukcij. Za iskanje oblike se lahko odločamo med tremi metodami: Force Density Method (FDM) (Schek, 1974), Natural Force Density Method (NFDM), ki je nadgradnja FDM (Pauletti in Pimenta, 2008) in Updated Reference Strategy (URS) (Bletzinger in Ramm, 1999). Priporočilo avtorja je bilo, da uporabljam NFDM metodo. Poleg teh metod lahko uporabljamo tudi klasično nelinearno metodo končnih elementov (NLMKE).



Slika 52: Prikaz modula Modeler med iskanjem oblike za priklop na transportni vhod.

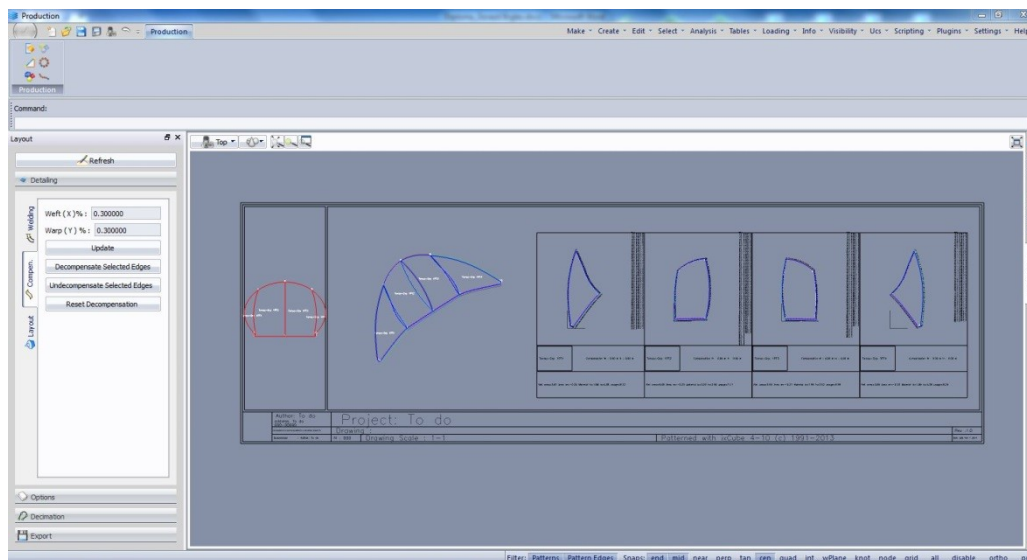
Dobra lastnost programa je, da lahko naenkrat analiziramo tako fleksibilne dele konstrukcije (membrana, kabli) kot toge dele konstrukcije (stebri, nosilci itd.). Pri tem moramo biti pozorni tudi na pravilno izbiro končnega elementa za modeliranje. Če izberemo element FF-Deformable (Form-Find Deformable), se bo obnašal kot fleksibilen element, ki mu še moramo poiskati začetno obliko, če pa izberemo element Stiff-Deformable, pa se bo obnašal kot togi element z definirano geometrijo. Prednost tega programa pred drugimi je, da je zelo povezan s programom Rhinoceros. Začetno obliko lahko najprej narišemo v Rhinocerosu in jo kopiramo direktno v IxCube (in obratno); vse rezultate analiz lahko prenesemo nazaj v Rhinoceros, kjer lahko vizualiziramo objekt z renderiranjem. IxCube zna sam določiti mrežo končnih elementov, ki ni nujno strukturirana, in je kar se tega tiče veliko bolj uporaben kot MPanel. Splošen problem, ki sem ga opazil pri modeliranju, je konvergenca

nelinearnega računa. Potrebno je bilo veliko testiranja, da sem naredil dovolj dober model, ki je konvergirал z dovolj majhno napako.



Slika 53: Prikaz modula Patterner, med krojenjem priklopa na transportni vhod.

V modulu Patterner krojimo membrano. Stvar poteka tako, da se model iz Modelerja prenese v Patterner, kjer nato določimo razrez površine. Razrezne krivulje lahko naknadno premikamo in sproti kontroliramo končni izgled v različnih perspektivah. Tukaj lahko določimo še kompenzacijo in debelino stikov. Stvar se nato prenese v modul Production, kjer pripravimo krojne pole za proizvodnjo, tako da nam jih program nariše v vnaprej pripravljene formate z glavami in vsemi potrebnimi podatki. Riske lahko izvozimo v DWG format.



Slika 54: Prikaz modula Production. Na sliki so krojne pole za transportni vhod.

Ker je program še v testni različici, sem z njim imel nemalo težav. Ustavljanje programa sredi dela, težave s prijemanjem objektov (object snap), slabo razvita funkcija za razveljavitev operacije (undo) in mnogo drugih problemov lahko marsikoga napeljejo k razmišljanju o nepravilnem delovanju celotnega programa, kar po moje ni res. Verjamem, da bo avtorju uspelo pomanjkljivosti odpraviti.

7 NOGOMETNO IGRIŠČE V LJUBLJANI

Načrtovanje zračno podprtih membranskih konstrukcij se razlikuje glede na zahtevnost konstrukcije. Za standardne zračno podprte membranske konstrukcije se potrebuje vsaj CAD program in orodje za kreiranje krojnih pol. Statična analiza se lahko naredi brez uporabe računalniških programov, npr. z uporabo enačb iz standardov. Za bolj kompleksne projekte, pa je potrebno imeti tudi orodje za iskanje oblike in nelinearno statično analizo takšne konstrukcije.

V tem poglavju sem naredil primer standardne zračno podprte membranske konstrukcije. Načrtovanje je zajemalo iskanje oblike, določevanje obtežb, statično analizo, dimenzioniranje membrane in stikov ter krojenje.

Iskanje oblike sem naredil s programom Rhinoceros 5, kjer sem s kombiniranjem prisekanega valja dobil obliko, ki je v praksi najbolj uporabljena. Za določevanje oblike priklopov z vrat na glavno membrano pa sem si pomagal s programom ixCube 4-10; program je poiskal minimalno obliko nad določeno začetno geometrijo.

Določevanje obtežb je potekalo v skladu z Evrokodom 1. Glavna vpliva, ki delujeta na konstrukcijo sta veter in sneg. Koeficiente za porazdelitev pritiska vetra po konstrukciji sem dobil s pomočjo Evrokoda 1, del 4, ki določa razporeditev pritiskov po kupolastih konstrukcijah. Določevanje snežne obremenitve je bilo določeno po standardu SIST EN 13782:2006, ki pravi, da je lahko obtežba snega enaka nič, če so izpolnjeni določeni pogoji.

Statična analiza je bila narejena na dva načina. Prvi način je bil prikaz določitve notranjih sil glede na nemški standard DIN 4134, drugi pa s pomočjo programa ixCube 4-10. Pri obeh načinih so bile upoštevane karakteristične vrednosti vplivov, kot je priporočilo evropskega priročnika za dimenzioniranje membranskih konstrukcij (Forster in sod., 2004). Naredil sem naslednje kombinacije vplivov:

1. notranji pritisk,
2. notranji pritisk '+' veter v smeri X,
3. notranji pritisk '+' veter v smeri Y,
4. notranji pritisk '+' nenakopičen sneg.

Pri četrti kombinaciji sem želel le prikazati, kako se obnaša konstrukcija, če je obremenjena z nekaj snega, za samo dimenzioniranje pa ni bila merodajna. V tem delu je predstavljeno tudi, kakšno obliko zavzame konstrukcija pri teh obtežbah.

Dimenzioniranje membrane je potekalo tako, da so morale biti napetosti, dobljene v različnih življenjskih obdobjih, manjše od napetosti, ki jih prenese uporabljen material. Varnostni faktorji so bili privzeti po priporočilih Minta (1981) in so bili določeni za vsako življenjsko obdobje posebej. Dimenzioniranje jeklenih elementov je potekalo tako, da sem obremenitve, dobljene s statično analizo,

najprej pomnožil z varnostnim faktorjem 1,6, kot je priporočilo evropskega priročnika za dimenzioniranje membranskih konstrukcij, kadar je prevladujoča obtežba veter (Forster in sod., 2004). Nadalje je dimenzioniranje potekalo skladno z ustreznim poglavjem Evrokoda 3.

Krojenje glavnega dela membrane sem naredil v programu Rhinoceros 5, ker so to enojno ukrivljene oblike, ki jih lahko razvijemo v ravnino brez popačenja. Kompenzacija ni bila upoštevana, ker sem predhodno analiziral, kakšno obliko zasede membrana po napihovanju in tudi, ali pride do gubanja. Poleg tega bi lahko imeli veliko težav pri montaži, saj bi morali robove raztegovati, da bi ustrezali dimenzijam sidrišča. Ker je prednapetje veliko, so veliki tudi kompenzacijski faktorji. Celotno membrano bi morali skrčiti za približno 6 m po daljši osi in približno enako po krajši osi, kar je ogromno. Za napenjanje bi potrebovali drago hidravlično opremo, kar ni v interesu investitorja, saj je glavna prednost tovrstnih konstrukcij nizka investicijska cena. Krojiti sem poskušal tako, da je bilo čim manj odpadka. Luknje za vrata lahko izrežemo s pomočjo šablone naknadno iz že zvarjene membrane. Krojenje priklopov ni bilo možno izvesti v Rhinocerosu, ker je oblika dvojno ukrivljena, ampak sem to storil z ixCube 4-10.

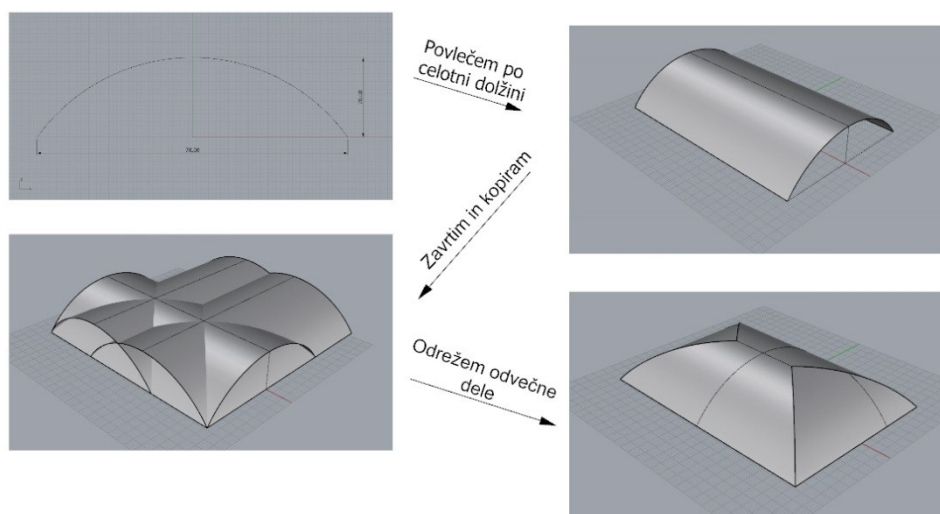
7.1 Zasnova

Želja investitorja je pokriti nogometno igrišče dimenzij 105 m krat 68 m. Nahaja se na obrobju Ljubljane, kar ustreza terenu kategorije III glede na standard Evrokod. Pokrito bi bilo skozi celo leto za obdobje 10 let. Zaželeno notranja temperatura je vsaj 8 °C v času najnižjih pričakovanih temperatur. Na lokaciji je možnost priklopa na toplovodno omrežje. Vhod v objekt mora imeti kapaciteto prehoda vsaj 50 ljudi na minuto in dovolj zasilnih izhodov za primer nezgode.

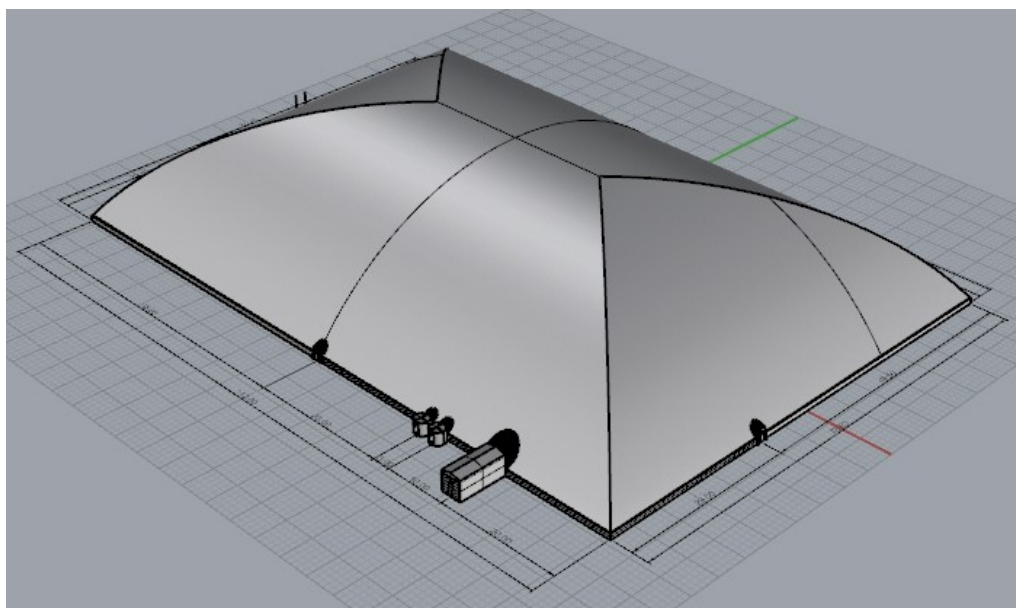
Tlorisne dimenzije osi sidranja membrane v temelj bodo 112 m v dolžino in 78 m v širino. To nam omogoča dovolj razdalje do stranskih črt za normalno igranje nogometa. Os sidranja bo dvignjena od tal za 1 m, ker je tako lažje odstranjevati sneg, ki pade iz membrane. Ocenjujem, da bo dvoje krožnih vrat s premerom 2,4 m zadostovalo za želeno kapaciteto ljudi. Šest zasilnih izhodov, razporejenih po celotnem obsegu objekta, zadostuje za takojšnji izhod vseh ljudi v primeru nezgode. Dodal bom tudi transportni vhod, ki se ga lahko uporabi za prenos večjih predmetov v objekt (npr. golov). Za zagotovitev minimalne temperature in določitev moči vpihavalno grelnih naprav je potrebno narediti analizo energetskih izgub objekta, vendar bom v nalogi te izgube samo ocenil. Ocenjujem, da bi zadostovale tri naprave, vsaka z grelno močjo 500 kW in pretokom zraka 45000 m³/h. Omogočati morajo notranji pritisk vsaj 300 Pa. Za zagotovitev neprekinjenega delovanja teh naprav se dobavi še električni dizelski agregat moči 45 kVA. Za primer okvare iz kakršnega drugega razloga se zagotovi še dve zasilni dizelski vpihavalni enoti, vsaka s pretokom zraka 45000 m³/h, ki lahko nadomestita največ dve redni napravi. Ti dve zasilni enoti imata tudi funkcijo ohranjanja notranjega pritiska v primeru, da ta pade iz kakršnega koli razloga.

7.2 Izbira oblike na podlagi izkušenj

Navdih za to obliko sem dobil iz prakse, kjer je to najpogosteje uporabljena oblika, še posebej za pokritje športnih igrišč. Svoj odtis je pustila tudi v standardih po celem svetu. Obliko bom dobil s kombiniranjem enostavnih teles. Za kreiranje oblike sem uporabil program Rhinoceros 5. Za osnovo vzamem krožni lok z razponom 78 m in višino 20 m. Lok povlečem po celotni dolžini 112 m, tako da dobim prisekan valj. S kopiranjem in vrtenjem tega valja tvorim tudi zaključke, tako dobim obliko, ki je enaka kot tista na sliki 44, ki jo obravnava standard DIN 4134. Temu lahko sedaj dodamo še ostale komponente, kot so temelji, naprave in vrata.

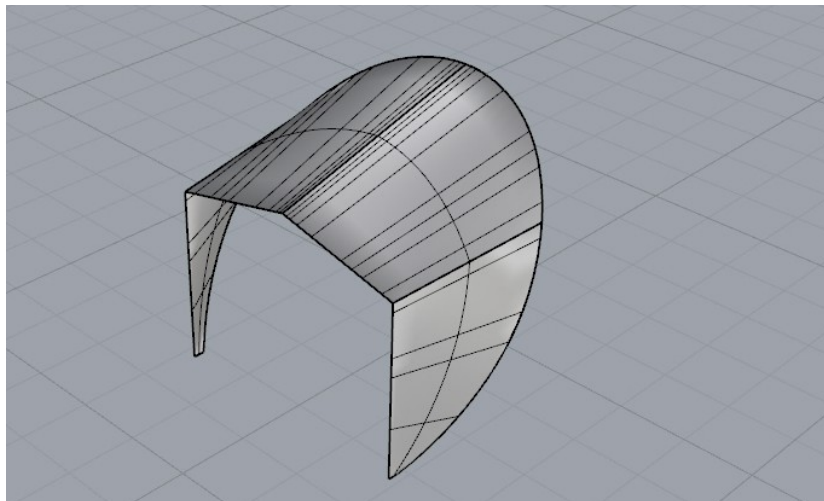


Slika 55: Prikaz postopka oblikovanja cilindrične oblike z zaključki nad pravokotnim tlorisom.



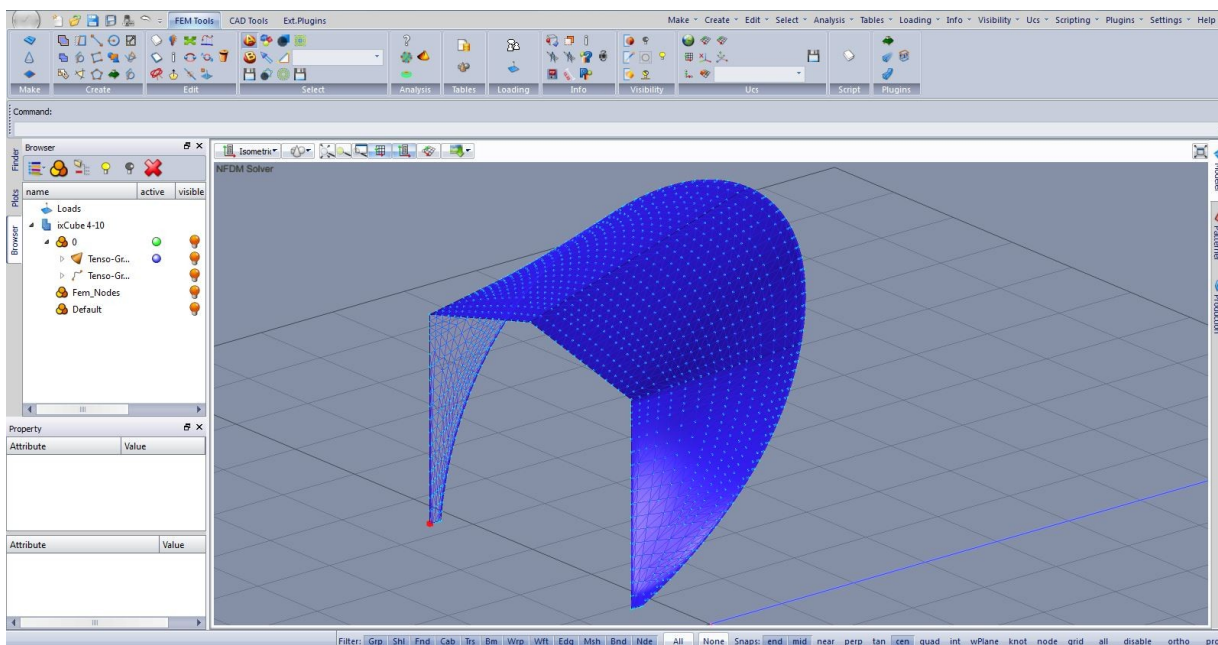
Slika 56: Vizualizacija zračno podprte konstrukcije dobljene z enostavnimi oblikami.

Na pozicijah zasilnih izhodov, krožnih vrat in transportnega vhoda moram dodati priklpe na membrano. Njihovo obliko lahko poiščem tako, da poiščem minimalno površino nad definiranim okvirjem s programom IxCube 4-10. Ta program potrebuje začetno obliko iz katere nato izhaja, zato si jo najprej izrišem v Rhinocerosu.

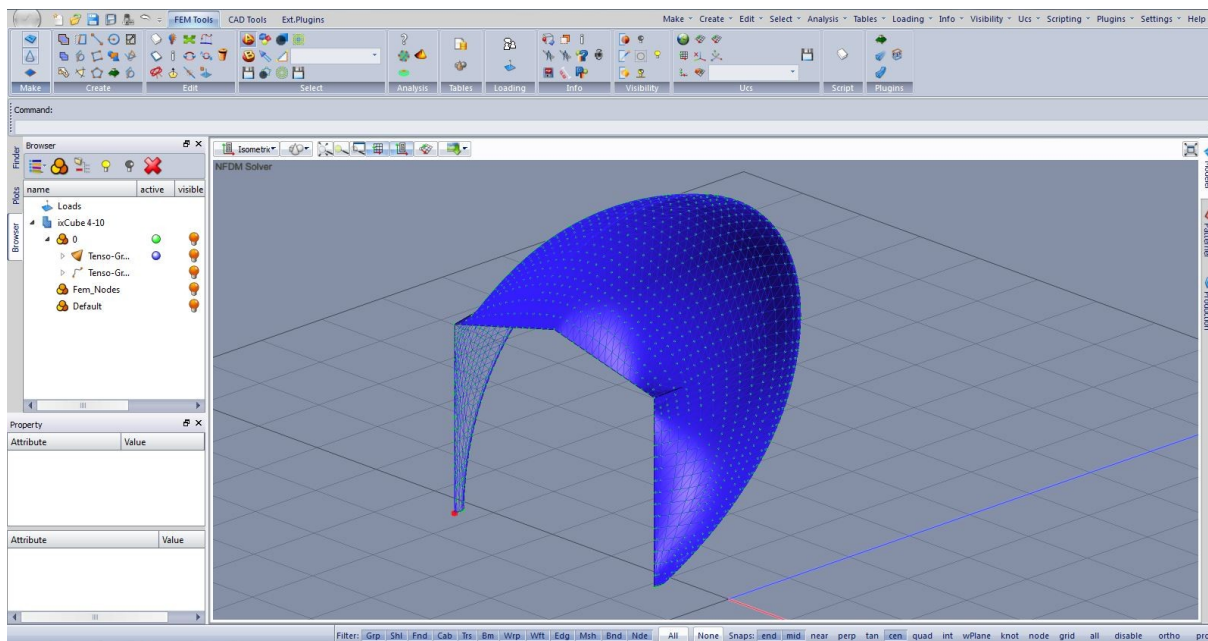


Slika 57: Oblika priklpa na transportni vhod, ki služi kot vhodni podatek za ixCube 4-10.

To obliko uvozim v ixCube. Program sam določi mrežo končnih elementov. Moram le še definirati vrsto končnega elementa (izberem FF-Deformable) in fiksno vpeti robove. Želeno obliko dobim s spreminjanjem notranjega pritiska in velikosti prednapetja.

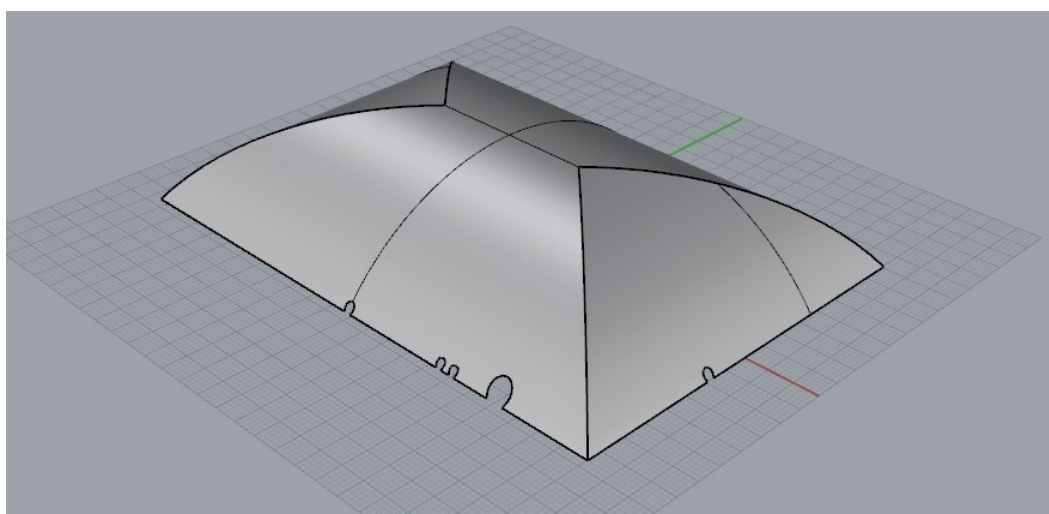


Slika 58: Začetna mreža končnih elementov za priklp na transportni vhod v ixCube 4-10 iz katere iščemo zeleno obliko.



Slika 59: Oblika priklopa za transportni vhod dobljena s programom ixCube 4-10.

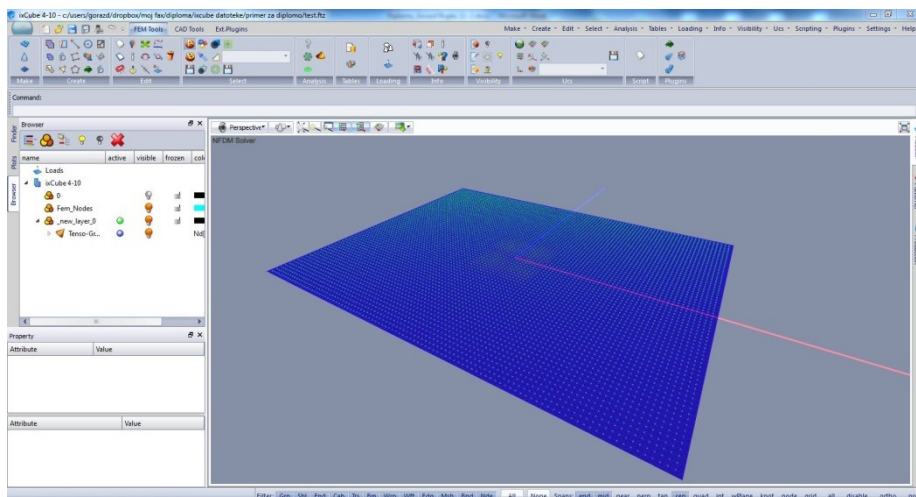
Postopek ponovim še za ostale priklope. Na mestih priklopov izrežem iz glavne membrane luknje za priklope in dobim končno obliko glavne membrane. To je torej naša izhodiščna membrana na katero bom nanesele notranji pritisk in ki jo bom krojil.



Slika 60: Oblika membrane, ki se bo krojila z izrezanimi luknjami za priklope.

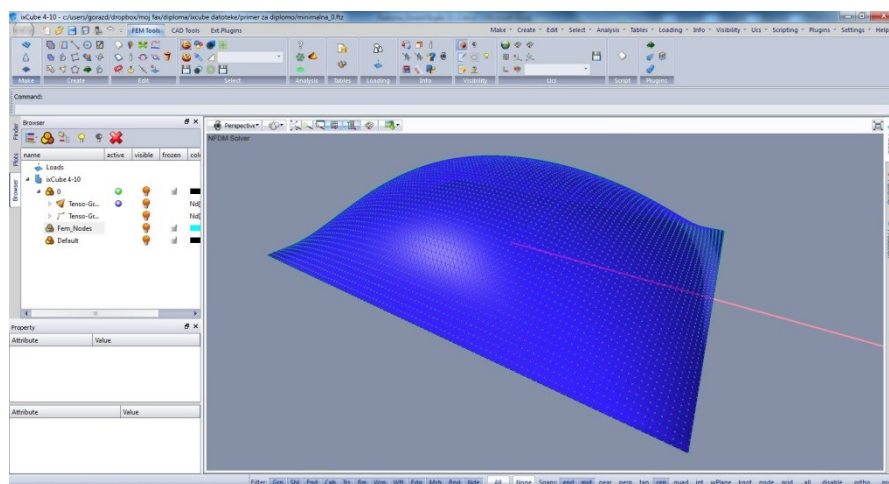
7.3 Določitev oblike z algoritmom za iskanje oblike pri predpisanem pritisku

Obliko lahko dobim tudi tako, da poiščem minimalno površino nad dano geometrijo pri predpisanem pritisku. Za to sem uporabil IxCube 4-10. Začnem tako, da v program narišem začetno obliko, v mojem primeru je to pravokotna ploskev dimenzij 112 m krat 78 m. Program sam generira mrežo končnih elementov. Na robovih vozlišča fiksno podprem.



Slika 61: Začetna površina, ki jo uporabim za iskanje oblike.

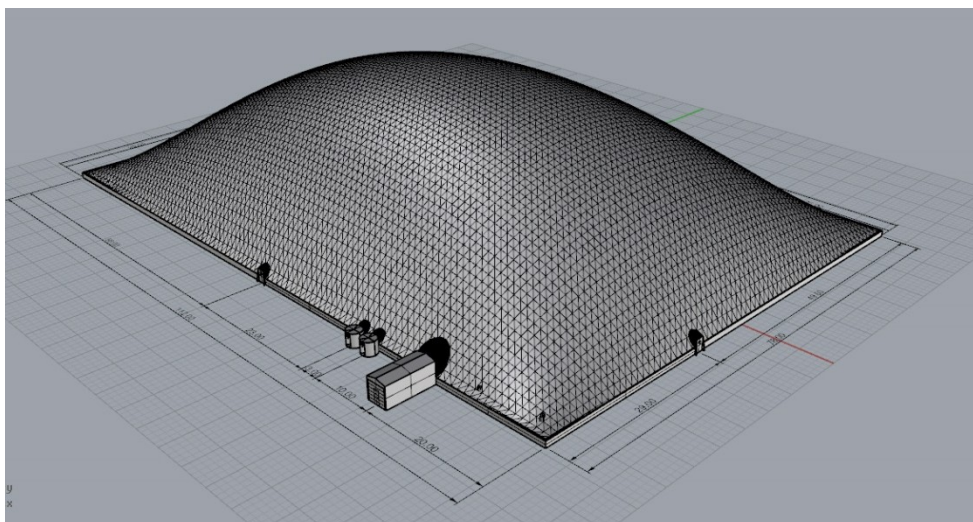
Preden poženem iskanje oblike moram v program podati notranji pritisk in prednapetje membrane. Ker imam notranji pritisk podan, moram izbrati tako prednapetje, da bo končna oblika membrane takšna, kot si jo želim. Pri oceni prednapetja membrane si lahko pomagam s kotelno formulo, ki pravi, da je napetost enaka zmnožku notranjega pritiska in radija. Da bo najvišja točka membrane 20 m nad osjo sidranja, potrebujem radij približno 48 m. Torej potrebujem prednapetje $\sigma = p_i * r = 0,3 \frac{kN}{m^2} * 48m = 14,4 \frac{kN}{m}$. V program vnesem to prednapetje za osnovno in votkovno smer in po prvem izračunu dobim prenizko obliko. Zato zmanjšam prednapetje in po par poskusih ugotovim, da zadostuje prednapetje $10 \frac{kN}{m^2}$ v obeh smereh.



Slika 62: Oblika, ki jo dobim z algoritmom za iskanje oblike v programu IxCube 4-10. Dobljena površina je minimalna površina.

Tako dobljena površina je pripravljena za krojenje, vendar moramo krojne pole kompenzirati za vrednost deformacije, ki jo povzroči to prednapetje, če želimo dobiti točno to obliko. Če krojnih pol ne bi kompenzirali, bi v končnem stanju dobili večjo površino kot je prikazana na sliki 62 in nekoliko

spremenjen razpored notranjih sil zaradi notranjega pritiska. Primerjava te oblike in oblike, ki jo dobimo, ko napihnemo obliko iz poglavja 7.2, je narejena v poglavju 7.6.3.



Slika 63: Vizualizacija zračno podprte konstrukcije dobljene z minimalnimi površinami.

7.4 Analiza obtežb

7.4.1 Lastna, stalna in koristna obtežba

Vse te obtežbe lahko zanemarimo, saj prispevajo zelo malo h končnemu rezultatu. Takšno konstrukcijo navadno sestavljajo membrane tipa 3 ali 4, ki imajo lastno težo od 1 kg/m^2 do 2 kg/m^2 , kar je v primerjavi z ostalimi obtežbami zanemarljivo. Ni mišljeno, da bi koristna obtežba delovala na takšnem tipu objekta. Lahko se zgodi, da posameznik spleza na objekt, ampak to ni kritična obremenitev za dimenzioniranje objekta.

$$\boxed{\text{Lastna teža je } g = 0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}}$$

7.4.2 Veter

Osnovna hitrost vetra v Ljubljani znaša $v_{b,0} = 20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Privzamem naslednja faktorja za smer in letni čas $c_{dir} = 1, c_{season} = 1$. Iz tega lahko izračunam osnovno hitrost vetra, ki je enaka:

$$v_b = c_{dir} c_{season} v_{b,0} = 1 * 1 * 20 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Za izračun srednje hitrosti vetra nad tlemi potrebujemo faktorja hrapavosti $c_r(z)$ in hribovitosti $c_0(z)$. Za faktor hribovitosti vzamem priporočeno vrednost 1, faktor hrapavosti pa izračunam po izrazih:

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

$$c_r(z) = k_r \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = 0,23 * \ln\left(\frac{21 \text{ m}}{0,3 \text{ m}}\right) = 0,92$$

Srednja hitrost vetra je:

$$v_m(z) = c_0 c_r v_b = 1 * 0,92 * 20 \frac{m}{s} = 18,30 \frac{m}{s}$$

Izračunamo še intenziteto turbulence za dano območje:

$$I_v(z) = \frac{k_l}{c_0 \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} = \frac{1}{1 * \ln\left(\frac{21 m}{0,3 m}\right)} = 0,24$$

Tako lahko sedaj izračunamo tlak pri največji hitrosti ob sunkih vetra:

$$q_p(z) = [1 + 7 I_v(z)] \frac{1}{2} \rho v_m^2(z) = [1 + 7 * 0,24] * \frac{1}{2} * 1,25 \frac{kg}{m^3} * \left(18,30 \frac{m}{s}\right)^2 = 554 \frac{N}{m^2} = 0,55 \frac{kN}{m^2}$$

Tlak ob sunkih vetra je $q = 0,55 \frac{kN}{m^2}$

7.4.3 Sneg

Standard SIST EN 13790:2006 pravi, da lahko obremenitev snega zanemarimo, če vnaprej zagotovimo, da se sneg ne sprime s streho konstrukcije. Izpolnjeni morajo biti naslednji štirje pogoji:

1. **Vgrajena mora biti dovolj zmogljiva oprema za ogrevanje zraka in biti pripravljena za uporabo.** To storimo tako, da s predhodnimi računi o toplotnih izgubah predvidimo potrebno moč ogrevalnih naprav. Zagotoviti je potrebno tudi rezervno napajanje z električno energijo v primeru izpada glavnega napajanja z ustreznim dizelskim električnim agregatom, ki mora imeti poln rezervoar goriva. Poskrbeti je potrebno za redno vzdrževanje in servisiranje opreme.
2. **Ogrevanje se mora začeti pred začetkom sneženja.** Upravnik objekta mora redno spremljati vremensko napoved in ustrezno reagirati v primeru sneženja. Lahko se tudi vgradi sistem »pametne hiše«, ki sam spremlja vremensko napoved in avtomatsko vklopi gretje kadar je snežni alarm. Seveda je potrebno zagotoviti neprekinjeno delovanje takšnega sistema z ustreznimi strojnimi in informacijskimi rešitvami.
3. **Konstrukcija mora biti ogrevana tako, da ima celotna streha temperaturo vsaj + 2 °C.** Temperatura vpihanega vročega zraka iz grelnih naprav je v takšnih konstrukcijah od 40 do 60 °C. Vpih bomo usmerili navzgor tako, da bo zrak takoj, ko zapusti grelno napravo, potoval po notranji strani membrane navzgor do vrha in se nato spustil na drugi strani spet navzdol. Takrat morajo prenehati delovati tudi ventilatorji, ki skrbijo za destratifikacijo vročega zraka v objektu.
4. **Konstrukcija mora biti zgrajena in napeta na način, da se voda, ki odteka ne more zbirati, ampak da lahko odteče brez zastajanja.** To storimo tako, da povečamo pritisk v objektu na maksimalno dovoljenega in ohranimo sinklastično obliko membrane.

Vsi štirje operativni postopki morajo biti zapisani v navodilih za uporabo in razloženi uporabniku. Dosedanje izkušnje kažejo, da ti ukrepi zadostujejo, če se jih dosledno drži. Konstrukcija je sicer sposobna prevzeti tudi določen pritisk snega, vendar ne tolikšnega, kolikšna je normalna obremenitev za Ljubljano. Če bi želeli, da konstrukcija zdrži obremenitev po SIST EN 1991-1-3, ki za Ljubljano znaša $s = \mu_i C_e C_t s_k = 0,8 * 1 * 1 * 1,51 \frac{kN}{m^2} = 1,21 \frac{kN}{m^2}$, bi potrebovali notranji pritisk vsaj 110 % snežne obremenitve, kar znaša $1,33 \text{ kN/m}^2$! To bi pomenilo, da bi bilo potrebno uporabiti močnejšo membrano, večje temelje in sidrne profile in bolj zmogljivo strojno opremo.

$$\text{Snežna obremenitev je } s = 0 \frac{kN}{m^2}$$

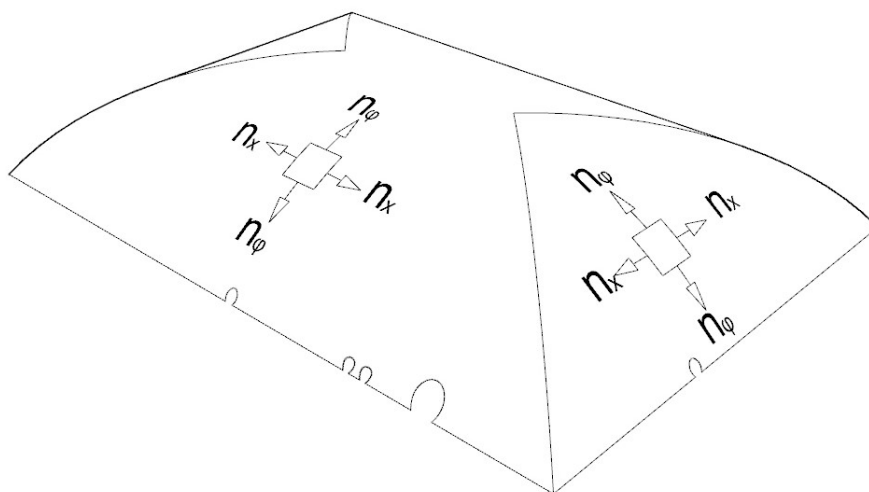
7.4.4 Notranji pritisk

Ko imam določene obtežbe vetra in snega, lahko določim notranji pritisk. Tukaj se bom naslonil na priporočila standarda DIN 4134, točko 4.2.3, ki pravi, da mora biti notranji pritisk minimalno $0,3 \text{ kN/m}^2$ ali 50 % obtežbe vetra, kar znaša $0,28 \text{ kN/m}^2$.

$$\text{Izberemo notranji pritisk } p_i = 0,30 \frac{kN}{m^2}$$

7.5 Določitev notranjih sil po standardu DIN 4134

Moja naloga je, da odčitam koeficiente α_ϕ , α_x za cilindričen del in za zaključke in nato poračunam notranje sile po enačbah, ki so zapisane v poglavju 5.4.4.2. Te enačbe nam ne povedo nič o razporeditvi tlakov in srkov zaradi vetra po konstrukciji, ampak povedo samo največje notranje sile, ki jih lahko pričakujemo.



Slika 64: Prikaz smeri notranjih sil v našem primeru.

Cilindrični del:

$$(l = 112 \text{ m}; b = 78 \text{ m}; h = 21 \text{ m}; r = 48 \text{ m}) \rightarrow \left(\frac{b}{l} = 0,7; \frac{h}{r} = 0,44 \right) \xrightarrow{\text{interpolacija}} \alpha_{\phi} = 0,72; \alpha_x = 0,72$$

$$q = 0,554 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}, p_i = 0,30 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$n_{\phi,p} = p_i * r = 0,3 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 48 \text{ m} = 14,41 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$n_{\phi,w} = \alpha_{\phi} * q * r = 0,72 * 0,554 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 48 \text{ m} = 19,17 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$n_{x,p} = p_i * \frac{r}{2} = 0,30 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * \frac{48 \text{ m}}{2} = 7,20 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$n_{x,w} = \alpha_x * q * r = 0,72 * 0,554 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 48 \text{ m} = 19,17 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Zaključka:

$$(l = 112 \text{ m}; b = 78 \text{ m}; h = 21 \text{ m}; r = 48 \text{ m}) \rightarrow \left(\frac{b}{l} = 0,7; \frac{h}{r} = 0,44 \right) \xrightarrow{\text{interpolacija}} \alpha_{\phi} = 0,84; \alpha_x = 0,72$$

$$q = 0,554 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}, p_i = 0,30 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$n_{\phi,p} = p_i * \frac{r}{2} = 0,30 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * \frac{48 \text{ m}}{2} = 7,20 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$n_{\phi,w} = \alpha_{\phi} * q * r = 0,84 * 0,554 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 48 \text{ m} = 22,36 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$n_{x,p} = p_i * \frac{r}{2} = 0,30 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * \frac{48 \text{ m}}{2} = 7,20 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$n_{x,w} = \alpha_x * q * r = 0,72 * 0,554 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 48 \text{ m} = 19,17 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Še preglednejši zapis v preglednici:

Preglednica 13: Povzetek rezultatov računa notranjih sil po DIN 4134.

	Cilindrični del $\left[\frac{kN}{m}\right]$		Zaključki $\left[\frac{kN}{m}\right]$	
	ϕ	x	ϕ	x
Notranji pritisk	14,41	7,20	7,20	7,20
Veter	19,17	19,17	22,36	19,17
Skupaj	33,57	26,37	29,56	26,37

Največja sila v podpori je tako kar največja sila v ϕ smeri ($33,57 \frac{kN}{m}$) in deluje pod kotom na nedeformirani obliki (54°) ali na deformirani obliki pod kotom, ki ga odčitamo iz preglednice 11:

$$\left(p_i = 0,3 \frac{kN}{m^2}; q = 0,554 \frac{kN}{m^2}; h = 21 m; r = 48 m\right) \rightarrow \left(\frac{p_i}{q} = 0,54 \approx 0,6; \frac{h}{r} = 0,44 \approx 0,5\right) \rightarrow$$

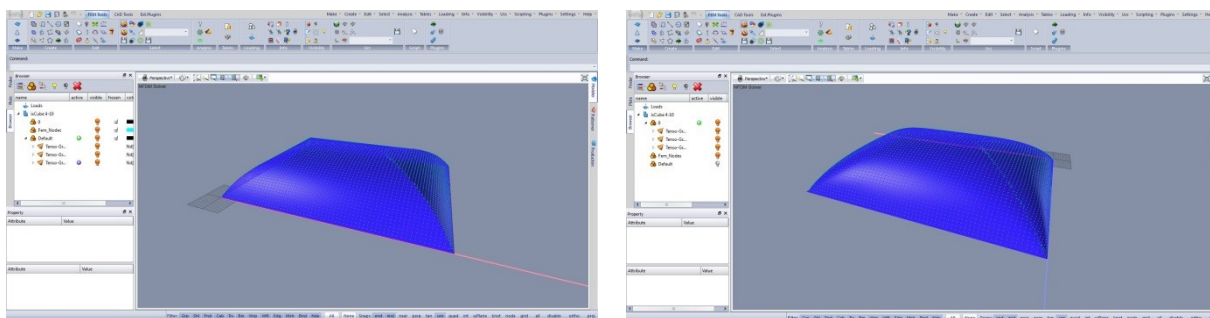
$$\phi \approx 36^\circ$$

7.6 Določitev notranjih sil s programom ixCube 4-10.

Končno obliko membrane, ki sem jo dobil v poglavju 7.2, kopiram v program ixCube. Vzamem obliko brez lukenj zaradi priklopov. Program sam generira mrežo končnih elementov. Na vpetju membrane v temelj vozlišča fiksno podprem. Za ploskovne končne elemente izberem vrsto elementa Stiff-Deformable, obenem pa definiram še neko malenkostno prednapetje - toliko da togostna matrika postane nesingularna, ker uporabljam trikotne končne elemente za membrano - in določim material. Izberem Mehlerjev VALMEX FR 1400 MEHATOP F tip IV.

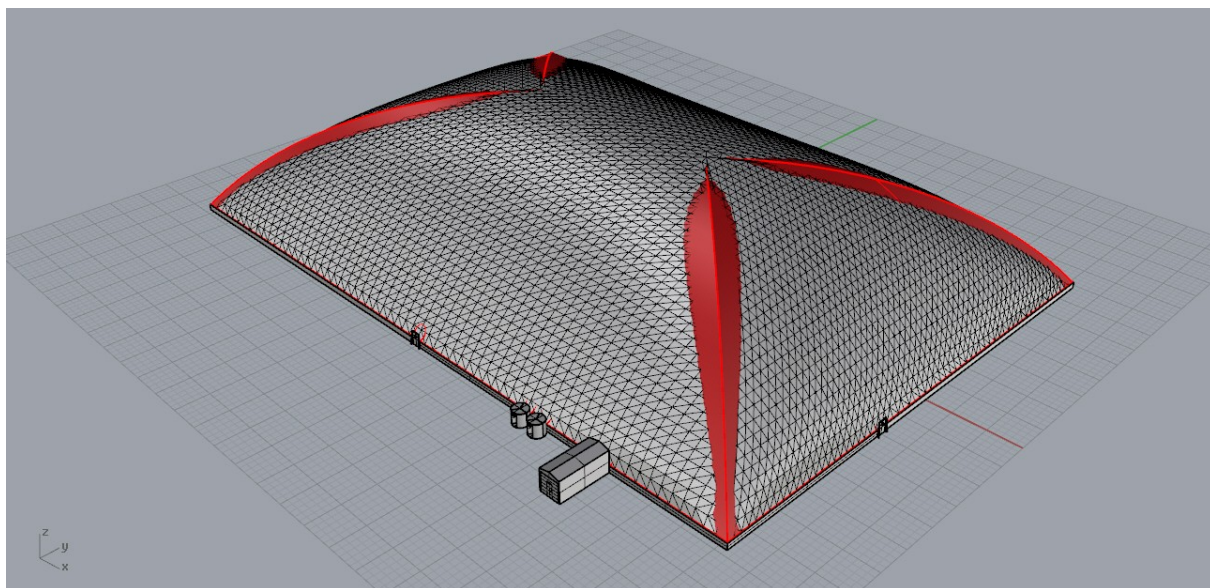
7.6.1 Določitev deformirane oblike

V prvi fazi poiščemo obliko, ki jo tako krojena membrana dobi, če je notranji pritisk $p_i = 0,30 \frac{kN}{m^2}$. Tukaj naj opozorim, da ta proces ni iskanje oblike (če bi počel to bi uporabil vrsto končnega elementa FF-Deformable) ampak samo deformacije zaradi notranjega pritiska.



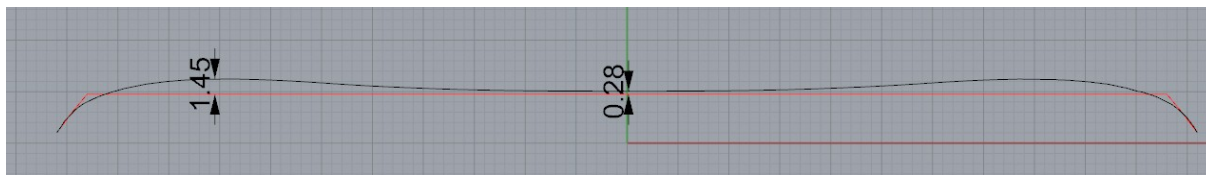
Slika 65: Nedeformirana oblika (levo) in deformirana oblika (desno) dobljena s programom ixCube 4-10.

Če dobljeno obliko kopiram nazaj v Rhinoceros lahko primerjam, kaj se je zgodilo z začetno obliko. Opazim lahko, da so se ostri robovi potegnili proti notranjosti, vse ostalo pa se je premaknilo navzven. Nazorno je prikazano, da se membrana raztegne in s tem zaobjame nekoliko večji volumen kot prej. Skupni volumen se poveča za približno 5 %.

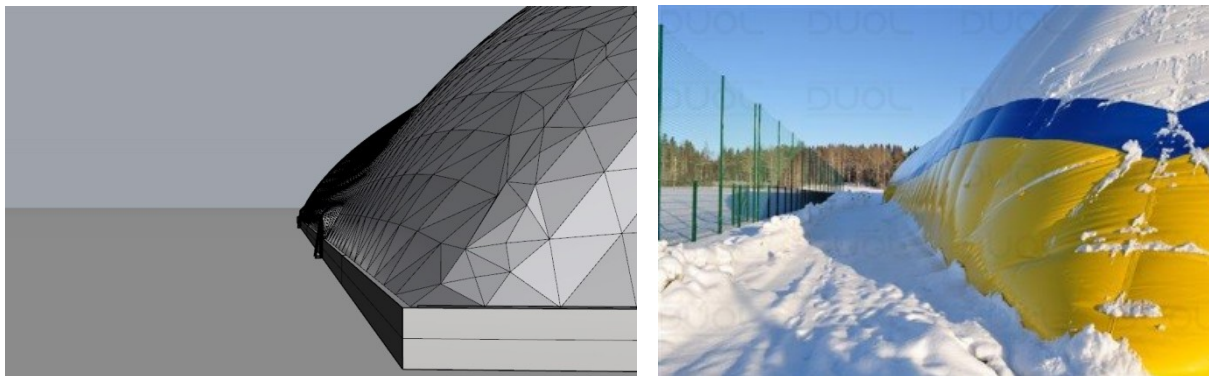


Slika 66: Primerjava začetne (rdeča barva) in deformirane oblike (mreža) v programu Rhinoceros.

Očitna je deformacija, ki sem jo poimenoval »sedlo«. Opazna je na sliki 67, dobro pa se jo vidi tudi na sliki 68. Če bi želeli obesiti zaščitno mrežo za žoge po dolgi stranici tri metre stran od vhoda, bi morali mrežo krojiti po črni črti na sliki 67 in ne po rdeči. Če bi storili to, bi imeli na nekem koncu kar 1,45 m prekratko mrežo.



Slika 67: Prerez skozi začetno (rdeča) in deformirano (črna) obliko po daljši strani tri metre stran od osi sidranja.



Slika 68: Sedlasta deformacija cilindričnih zračno podprtih membranskih konstrukcij z zaključki nad pravokotnim prerezemom v računskem modelu (levo) in v praksi (desno) (Duol, 2014).

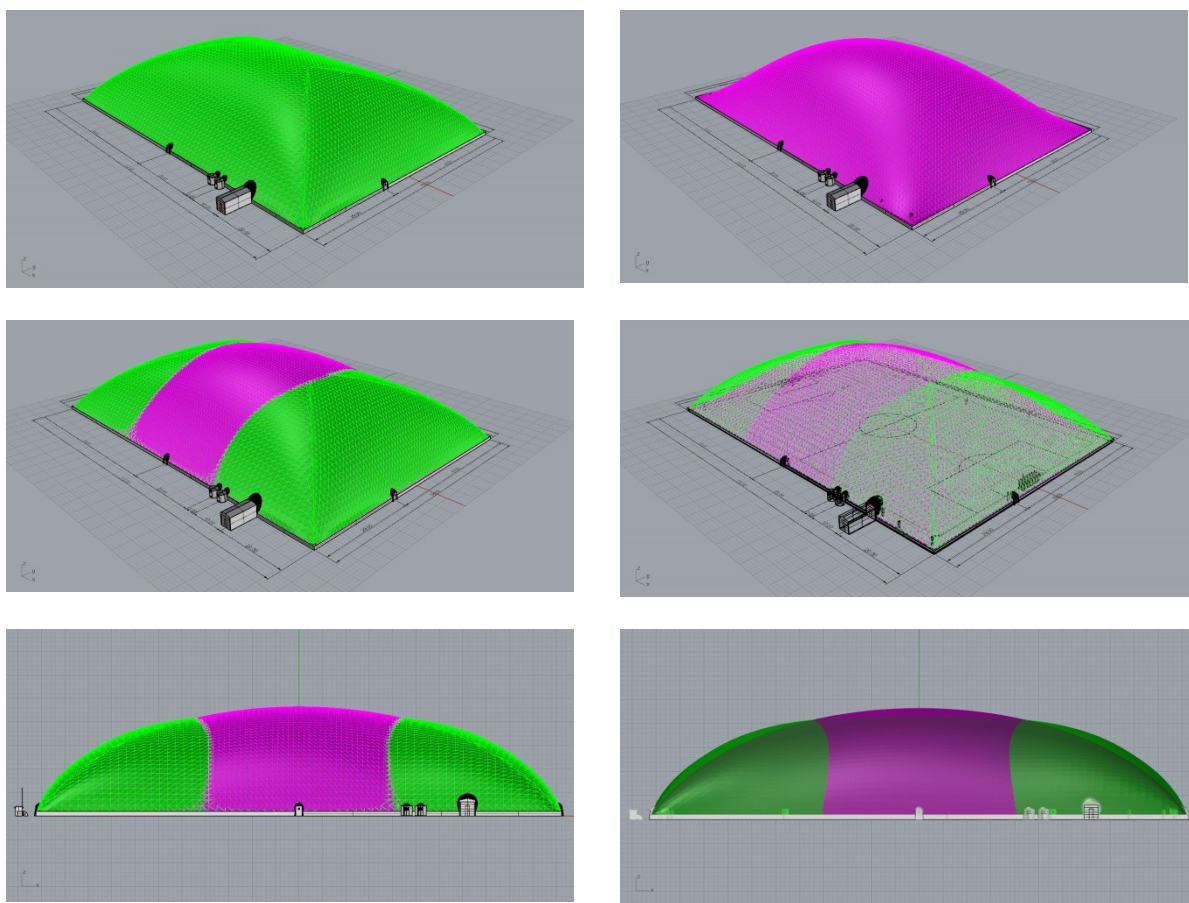
Ker se membrana raztegne tako, da se pomakne navzven, to vpliva tudi na priklope. Obliko priklopov sem iskal na nedeformirani obliki, zato je jasno, da se bodo priklopi premaknili proti vratom. To se dogaja tudi v praksi, kar se vidi na sliki 69. Začnejo se gubati pri vpetju na vrata, kar seveda ni dobro s stališča trajnosti in obrabe, poleg tega lahko ovira tudi odpiranje vrat na zasilnih poteh. Je pa to dobro ob velikih vetrovnih obremenitvah, saj se preklap lahko poda brez odpora in tako ne poškoduje vrat in membrane, na katero je priklopljena.



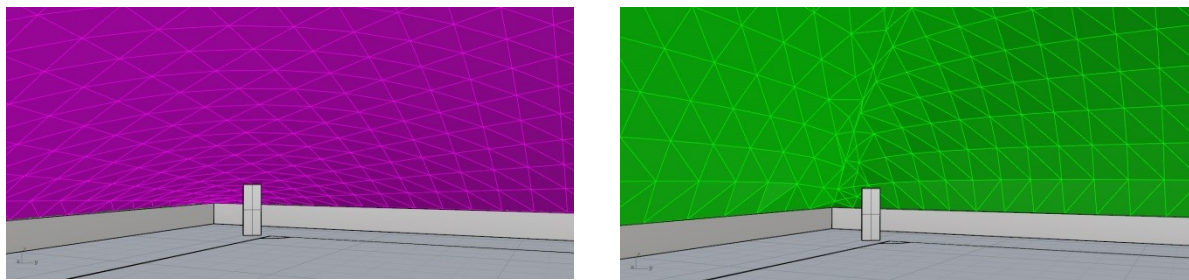
Slika 69: Prikaz gubanja priklopov na konstrukciji (Teloni Abiti, 2014).

7.6.2 Primerjava oblike izbrane na podlagi izkušenj in tiste dobljene z algoritmom za iskanje oblike

Sedaj ko vemo, kako se oblikuje naša membrana, jo lahko primerjamo s tisto, ki smo jo dobili z algoritmom za iskanje oblike v programu IxCube 4-10. Naslednja serija slik prikazuje razlike med obema oblikama. Zelena barva prikazuje obliko dobljeno z izkušnjami, vijolična pa minimalno površino. V prvi vrsti sta prikazani obe obliki, v drugi vrsti sta pogleda iz perspektive, na prvi sliki je neprosojen pogled, na drugi pa prosojen. Tretja vrsta prikazuje enako kot druga vrsta, le da je pogled iz strani.

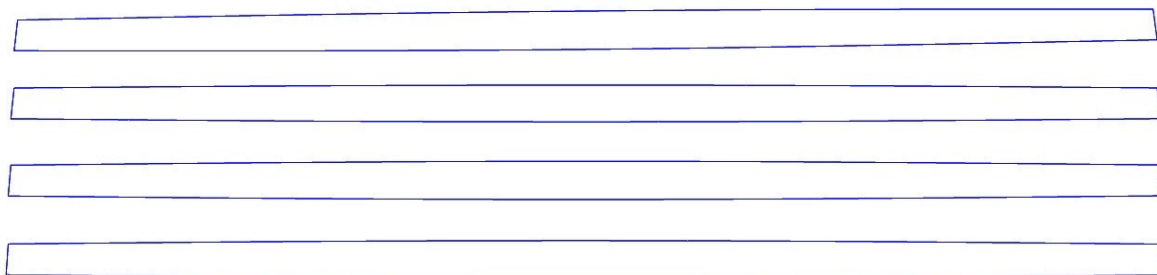


Slika 70: Razlike med oblikama. Zelena barva prikazuje obliko dobljeno z izkušnjami, vijolična pa minimalno površino.



Slika 71: Pomanjkanje prostora pri minimalni površini. Kvader v kotu predstavlja 2 m visokega človeka
Uporabljene barve so enake kot na sliki 70.

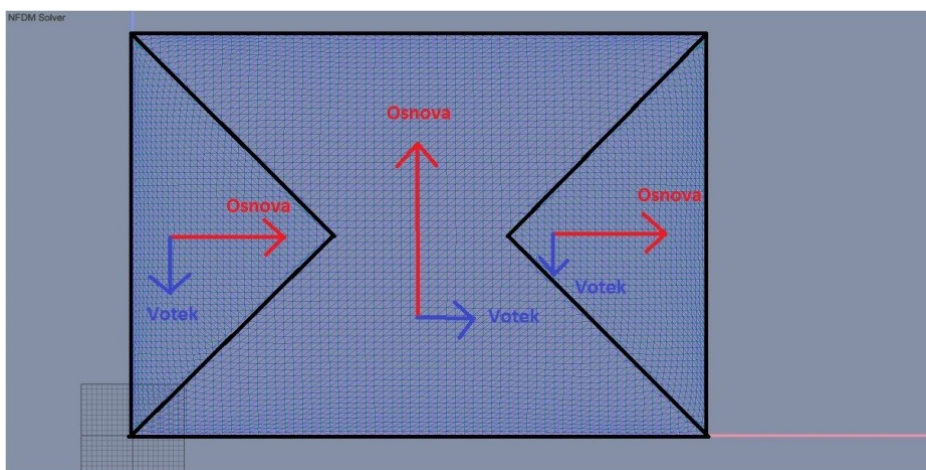
Prednosti minimalne površine so, da zasede manjši volumen nad površino (manj ogrevanja zraka) in da so napetosti v membrani enake v vsaki točki v vseh smereh ($10 \frac{kN}{m^2}$). Slabost pa je ta, da v vogalih primanjkuje prostora za izvajanje kota, zato bi morali povečati tlorisne gabarite ali povišati temelj v vogalu za meter ali dva. Večja je tudi poraba materiala, ker krojne pole niso ravne, ampak so na sredini širše kot na začetku in koncu, za razliko od pol pri drugi obliki (glej poglavje 7.10). To je tudi glavni razlog, da v nadaljevanju obravnavamo le obliko dobljeno iz enostavnih oblik.



Slika 72: Primer štirih krojnih pol minimalne površine dobljenih z IxCube 4-10.

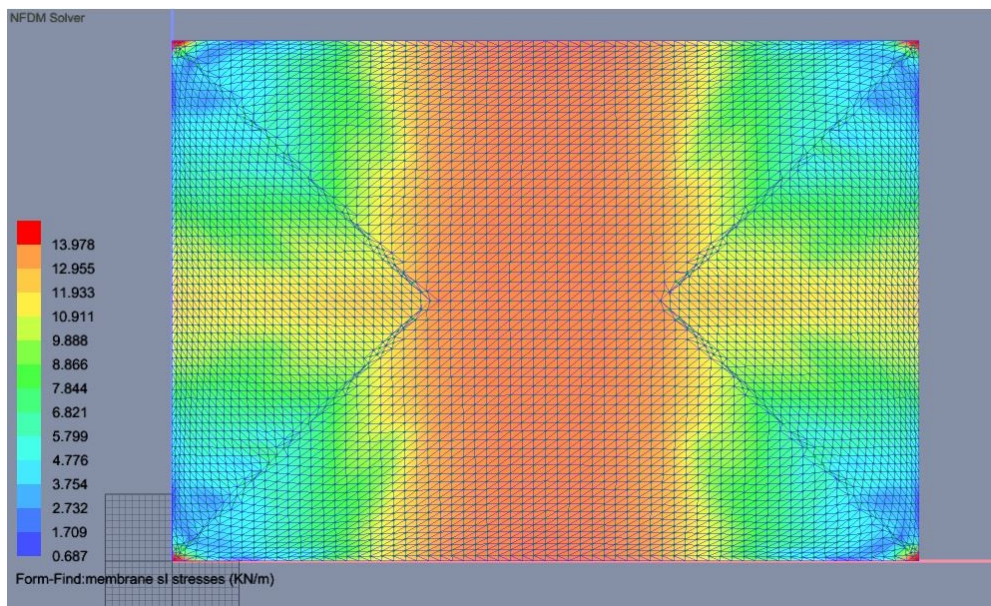
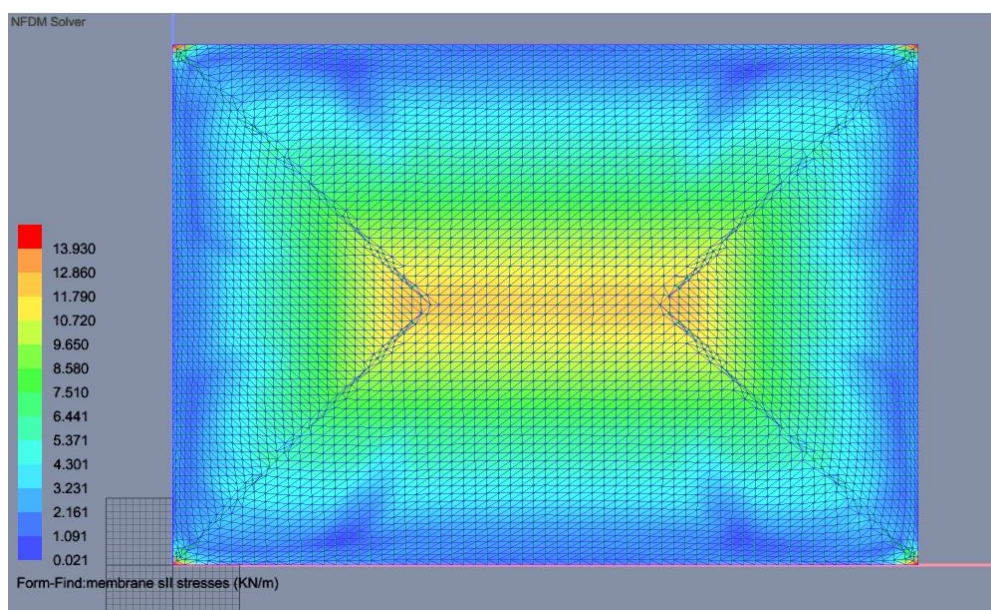
7.6.3 Notranje sile zaradi pritiska

V tej fazi lahko pogledamo notranje sile zaradi notranjega pritiska. Pred analizo sem usmeril membrano na sredinskem delu tako, da gleda osnovna smer membrane prečno na dolgo os, na zaključkih pa ravno obratno.



Slika 73: Prikaz usmeritve membrane.

Rezultati analize so razvidni iz slik 74 in 75. Na prvi sliki so notranje sile v osnovni smeri. Lepo se vidi formiranje nosilnega križa, ki gre po sredini v obeh smereh. V kotih so napetosti manjše, kar je posledica oblike. Bolj kot bi se oblika približevala minimalni obliki, bolj bi bile napetosti konstantne po membrani. Na kotih je torej največje odstopanje od minimalne oblike. Razlike v napetostih se v praksi kažejo tako, da če se naslonimo na membrano v kotu, se ta veliko bolj poda, kot če bi se naslonili na sredinskem delu. Koncentracije napetosti v vogalih so velikostnega reda 24 kN/m, več kot kaže merilo na sliki. Ta problem se lahko reši s podvajanjem slojev membrane na mestu večjih napetosti. Na drugi sliki so prikazane sile v votkovni smeri. Videti je, da z višino naraščajo, kar je posledica tega, da se z višino vedno bolj približamo nosilnemu križu. V preglednici 14 so izpisane največje sile zaradi notranjega pritiska.

Slika 74: Glavne napetosti sI [kN/m] zaradi notranjega pritiska 0,3 kN/m².Slika 75: Glavne napetosti sII [kN/m] zaradi notranjega pritiska 0,3 kN/m².Preglednica 14: Notranje sile v smereh ϕ in x zaradi notranjega pritiska dobljene v programu ixCube 4-10

	Cilindrični del [$\frac{kN}{m}$]		Zaključki [$\frac{kN}{m}$]	
	ϕ	x	ϕ	x
Notranji pritisk	13,58	11,56	12,33	11,79

7.6.4 Notranje sile zaradi vetra in notranjega pritiska

Veter sem na konstrukcijo podal v dveh smereh: v smeri daljše (X smer) in krajše (Y smer) stranice. Koeficienti C_p so odčitani iz Evrokoda 1 del 4, v poglavju, ki predpisuje razporeditev pritiska vetra na kupolastih konstrukcijah in se vidi tudi na sliki 39. Največji pritisk ob sunkih vetra smo že določili v poglavju 7.4.2.

Za razmerje $\frac{f}{d} = 0,26$ in $h = 0$ (oznake kot na sliki 39) odčitam koeficiente:

$$C_{pe,10,A} = 0,41$$

$$C_{pe,10,B} = -0,96$$

$$C_{pe,10,C} = -0,40$$

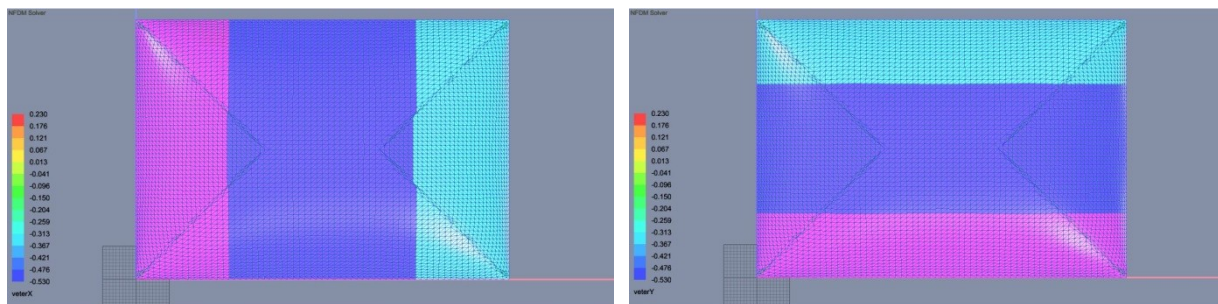
Tako dobim obremenitve za posamezne dele konstrukcije:

$$w_A = C_{pe,10,A} * q = 0,41 * 0,55 \frac{kN}{m^2} = 0,23 \frac{kN}{m^2}$$

$$w_B = C_{pe,10,B} * q = -0,96 * 0,55 \frac{kN}{m^2} = -0,53 \frac{kN}{m^2}$$

$$w_C = C_{pe,10,C} * q = -0,40 * 0,55 \frac{kN}{m^2} = -0,22 \frac{kN}{m^2}$$

To obremenitev nanese na konstrukcijo v X in Y smeri

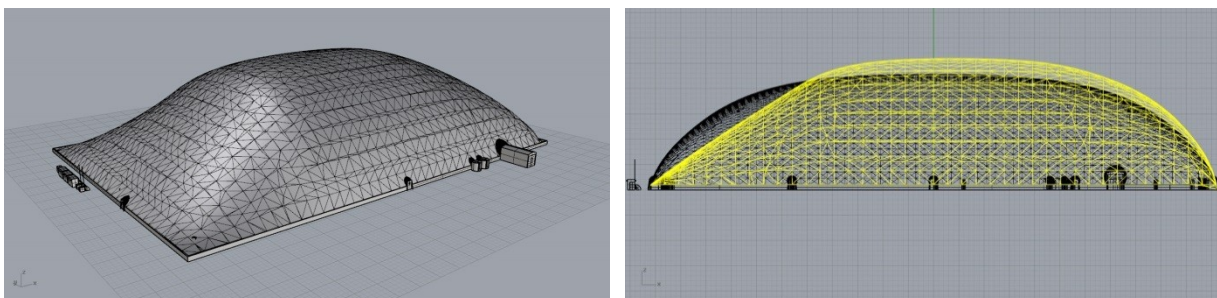


Slika 76: Prikaz obtežbe vetra na konstrukcijo v X smeri (levo) in Y smeri (desno).

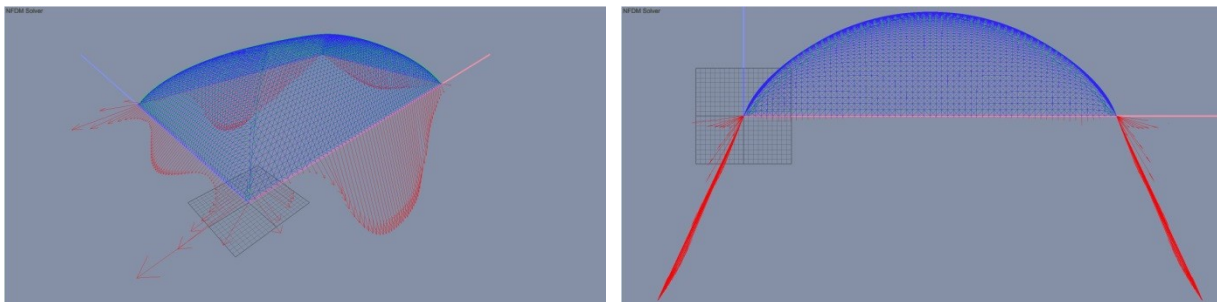
Po analizi dobim naslednje rezultate:

Veter X in notranji pritisk

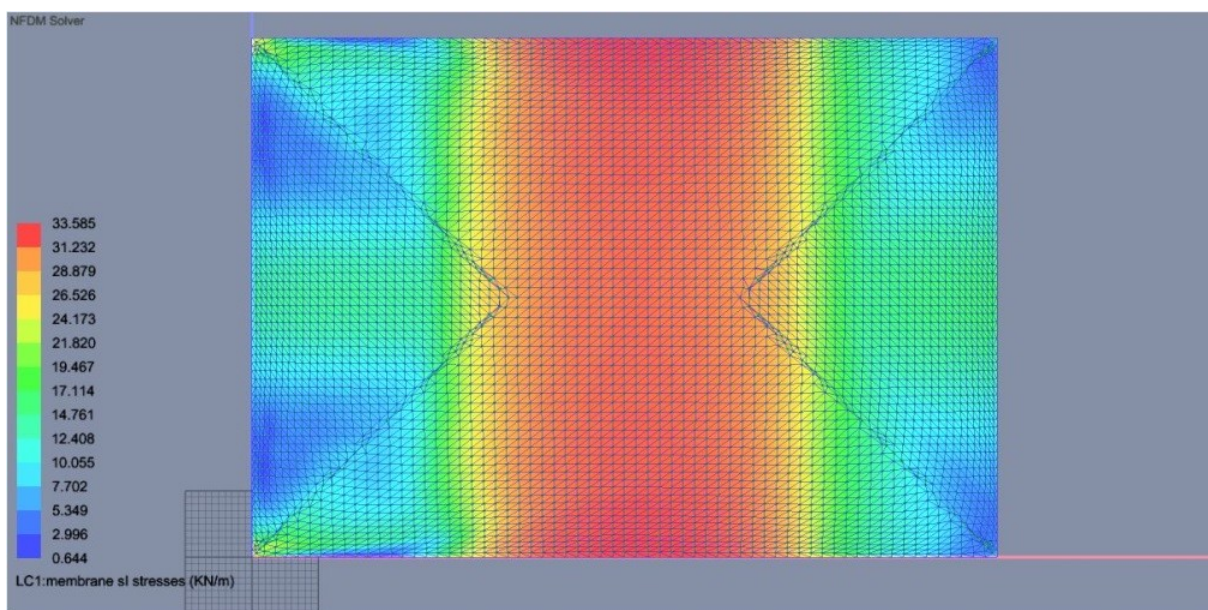
Deformirano obliko membrane sem dobil tako, da sem rezultate analize uvozil v Rhinoceros 5 kot točke in iz njih interpoliral površino. Opazim lahko, da se prednji del močno deformira proti notranjosti, medtem ko se sredinski del, kot posledica srka, pomakne navzven. V tem delu konstrukcije nastanejo tudi največje notranje sile in posledično tudi največje reakcije v vpetju. Slednje delujejo pod kotom 65° . Tlakov v membrani ne dobim. V preglednici 15 so izpisane največje notranje sile pri tem obtežnem primeru, v preglednici 16 pa največje reakcije.



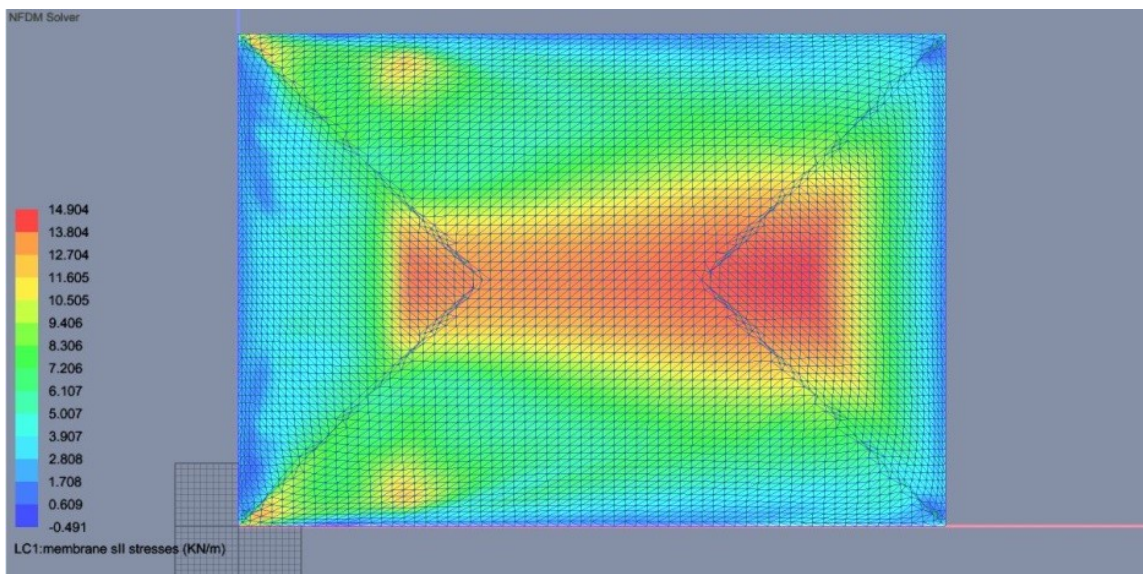
Slika 77: Deformacije konstrukcije zaradi statične obremenitve vetra v X smeri.



Slika 78: Prikaz smeri in razporeda reakcij zaradi notranjega pritiska $0,3 \text{ kN/m}^2$ in vetra v X smeri.



Slika 79: Glavna napetost SI [kN/m] zaradi notranjega pritiska $0,3 \text{ kN/m}^2$ in vetra v X smeri.



Slika 80: Glavna napetost s_{II} [kN/m] zaradi notranjega pritiska $0,3 \text{ kN/m}^2$ in vetra v X smeri.

Preglednica 15: Izpis največjih notranjih sil v smereh ϕ in x zaradi notranjega pritiska in vetra v X smeri.

	Cilindrični del $[\frac{kN}{m}]$		Zaključki $[\frac{kN}{m}]$	
	ϕ	x	ϕ	x
Notranji pritisk in veter v smeri X	33,58	14,14	14,90	28,78

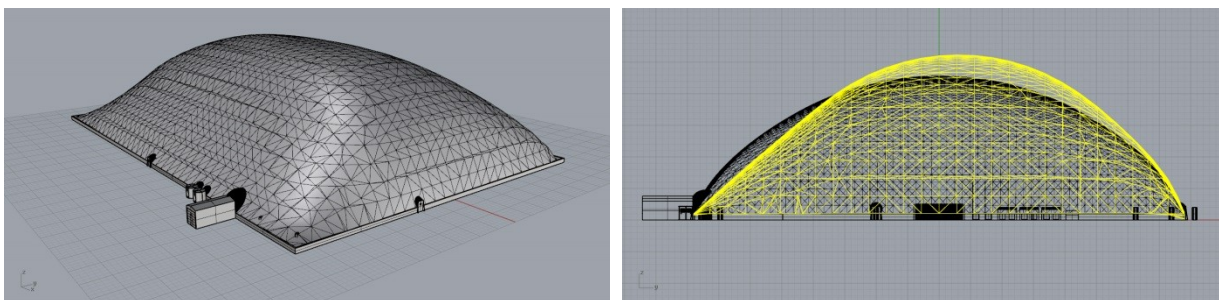
Reakcije so bile v programu izračunane kot točkovne sile, ker so delovale v fiksno podprtih točkah mreže. Rezultati v tabeli pa so linijske reakcije, ki so dobljene tako, da točkovno silo delim s povprečno razdaljo med dvema sosednjima vozliščema. Reakcije so izpisane tako, da so po vrsticah izpisane sile in kot, ki ga oklepajo sile glede na vodoravnico. Vse štiri sile so lahko merodajne za dimenzioniranje, zato je za vsako silo izpisana njena vrednost in vrednost ostalih komponent. Sile F_x , F_y in F_z so sile v smereh X (daljša os), Y (krajša os) in Z (gravitacija), F_v pa je rezultanta vseh treh.

Preglednica 16: Izpis največjih reakcij v vpetju in njenih pripadajočih vrednosti zaradi notranjega pritiska in vetra v smeri X.

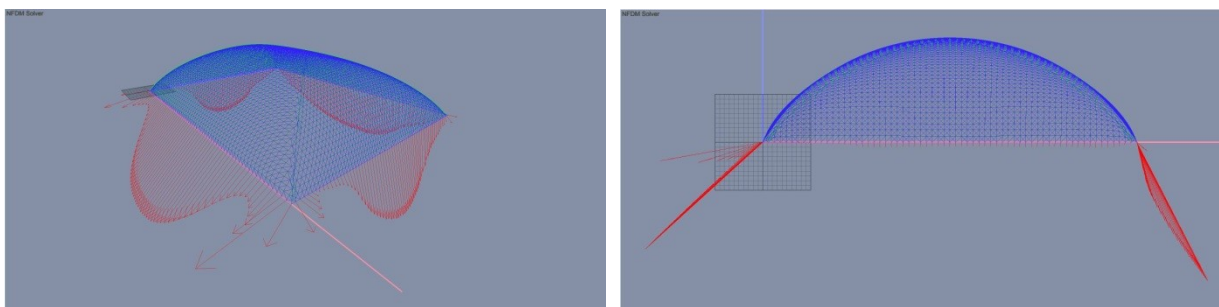
Pripadajoča vrednost $[\frac{kN}{m}]$	F_v	F_x	F_y	F_z	Kot F_v glede na vodoravnico
Prevladujoča sila					
F_v	35,35	0,88	14,95	32,02	65 °
F_x	29,45	29,29	0,28	3,16	6 °
F_y	35,35	0,88	14,95	32,02	65 °
F_z	35,35	0,88	14,95	32,02	65 °

Veter Y in notranji pritisk

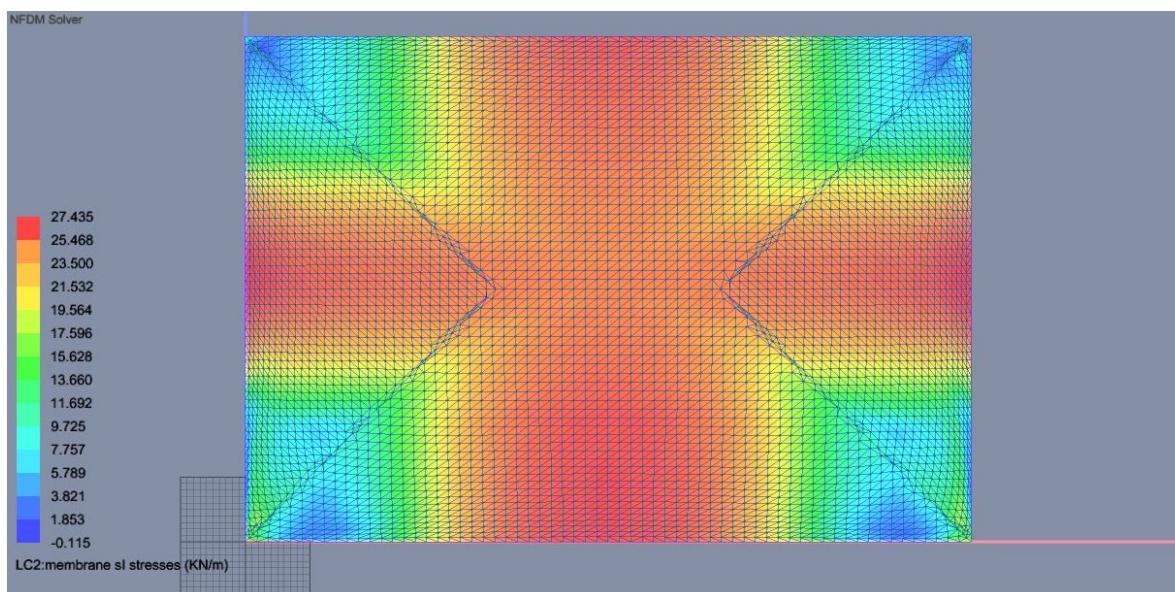
Konstrukcija se deformira podobno kot v prejšnjem primeru, vendar pri tem ne nastanejo tako velike notranje sile in reakcije. Poleg tega največje reakcije delujejo pod različnimi koti. Na privetni strani oklepajo kot 42° , na zavetrni pa 63° . Tlakov tudi v tem primeru ne dobim. Opaziti je tudi, da se, za razliko od prejšnjega obtežnega primera, tokrat največje napetosti porazdelijo tudi po zaključkih in tvorijo nekakšen križ čez konstrukcijo. Tako večine obremenitve ne prenaša le sredinski del.



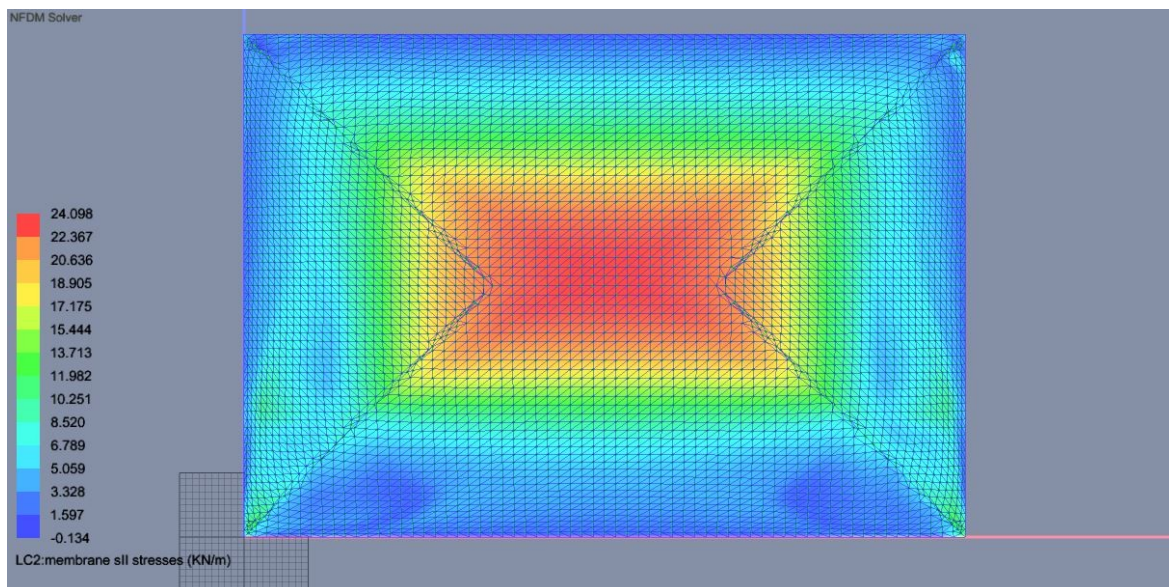
Slika 81: Deformacije konstrukcije zaradi statične obremenitve vetra v Y smeri.



Slika 82: Prikaz smeri in razporeda reakcij zaradi notranjega pritiska $0,3 \text{ kN/m}^2$ in vetra v X smeri.



Slika 83: Glavna napetost SI [kN/m] zaradi notranjega pritiska $0,3 \text{ kN/m}^2$ in vetra v Y smeri.



Slika 84: Glavna napetost sII [kN/m] zaradi notranjega pritiska $0,3 \text{ kN/m}^2$ in vetra v Y smeri.

Preglednica 17: Izpis največjih notranjih sil v smereh ϕ in x zaradi notranjega pritiska in vetra v Y smeri.

	Cilindrični del $[\frac{kN}{m}]$		Zaključki $[\frac{kN}{m}]$	
	ϕ	x	ϕ	x
Notranji pritisk in veter v smeri Y	26,68	24,10	27,44	21,48

Še tabela največjih reakcij:

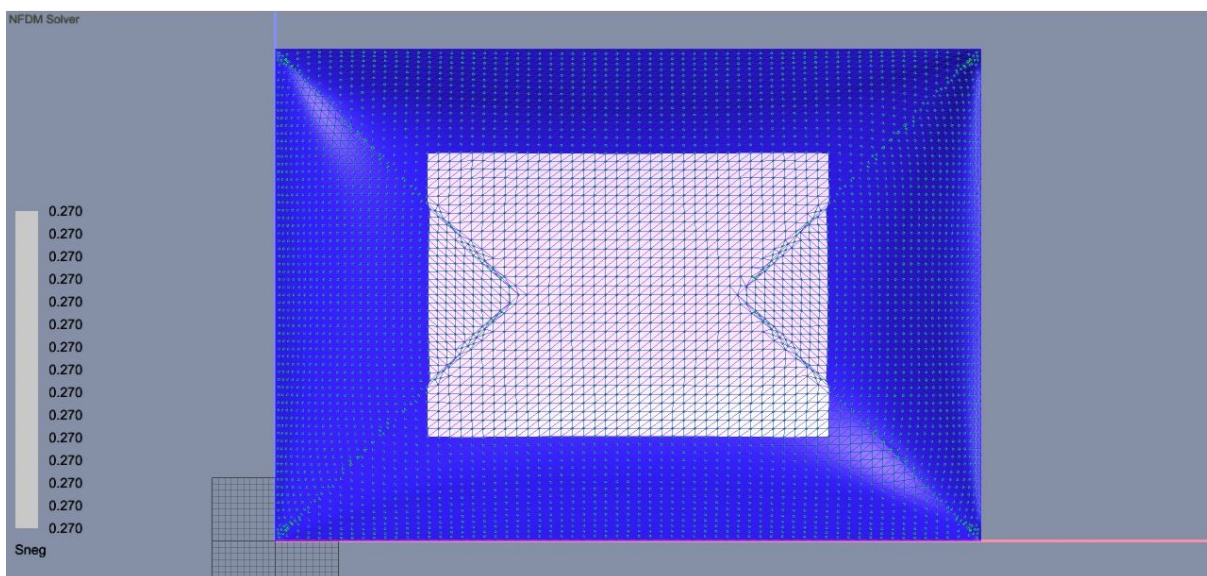
Preglednica 18: Izpis največjih reakcij v vpetju zaradi notranjega pritiska in vetra v Y smeri.

Pripadajoča vrednost $[\frac{kN}{m}]$	F_v	F_x	F_y	F_z	Kot F_v glede na vodoravnico
Prevladujoča sila					
F_v	27,47	0	20,33	18,46	42 °
F_x	10,43	10,08	2,16	1,62	9 °
F_y	27,47	0	20,33	18,46	42 °
F_z	26,83	0	-12,24	23,89	63 °

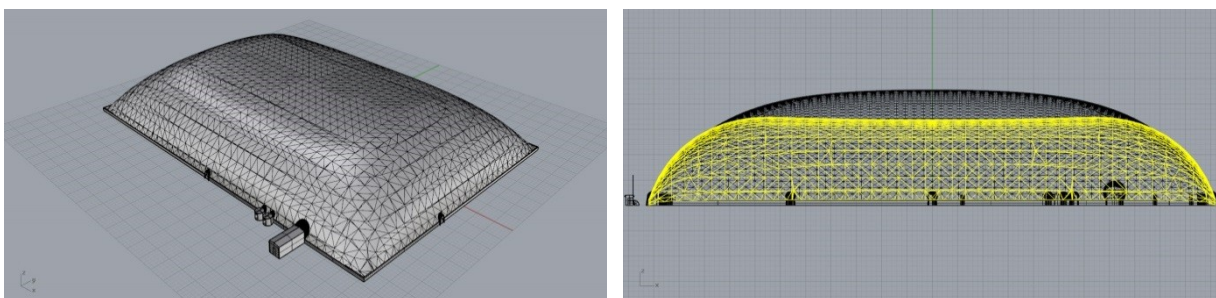
7.6.5 Notranje sile zaradi snega in notranjega pritiska

Čeprav sem pri analizi obtežb predpostavil, da se na membrani ne zbira sneg, sem vseeno izračunal, kako bi se obnašala konstrukcija, če bi bila obtežba snega približno 90 % notranjega pritiska. Sneg sem na konstrukcijo nanese tako, kot če na membrani ostane samo sneg, ki ne zdrsne. Predpostavil sem, da za zdrs zadostuje že naklon 30° .

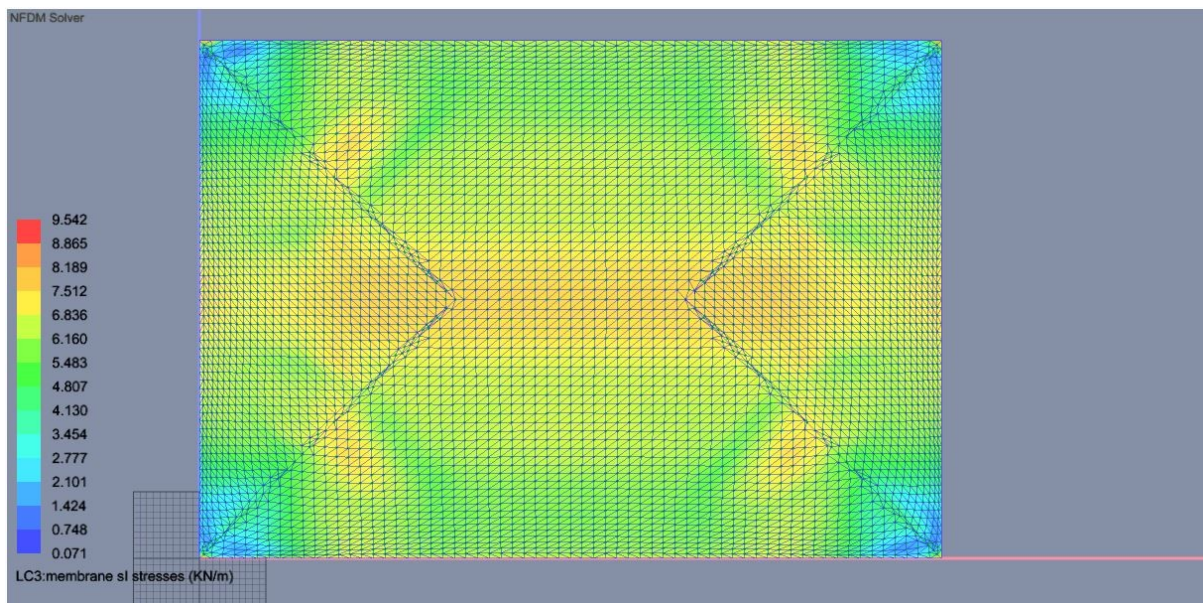
Kot je razvidno iz naslednjih slik, vidimo, da sneg deluje ugodno na razpored notranjih sil. Njihove vrednosti se zmanjšajo, zato za dimenzioniranje membrane niso merodajne. Opazimo pa, da so izredno veliki pomiki membrane. Če bi postala obtežba snega večja, kot je notranji pritisk, bi se porušila. Tukaj vidimo, zakaj je nujno, da se sneg odstranjuje z membrane. Obstaja tudi nevarnost, da bi se membrana poglobila tako, da sneg in kasneje voda ne bi mogla odteči. Tako nastane nerešljiva situacija in moramo membrano spustiti na tla, da ročno odstranimo nezaželeno obtežbo.



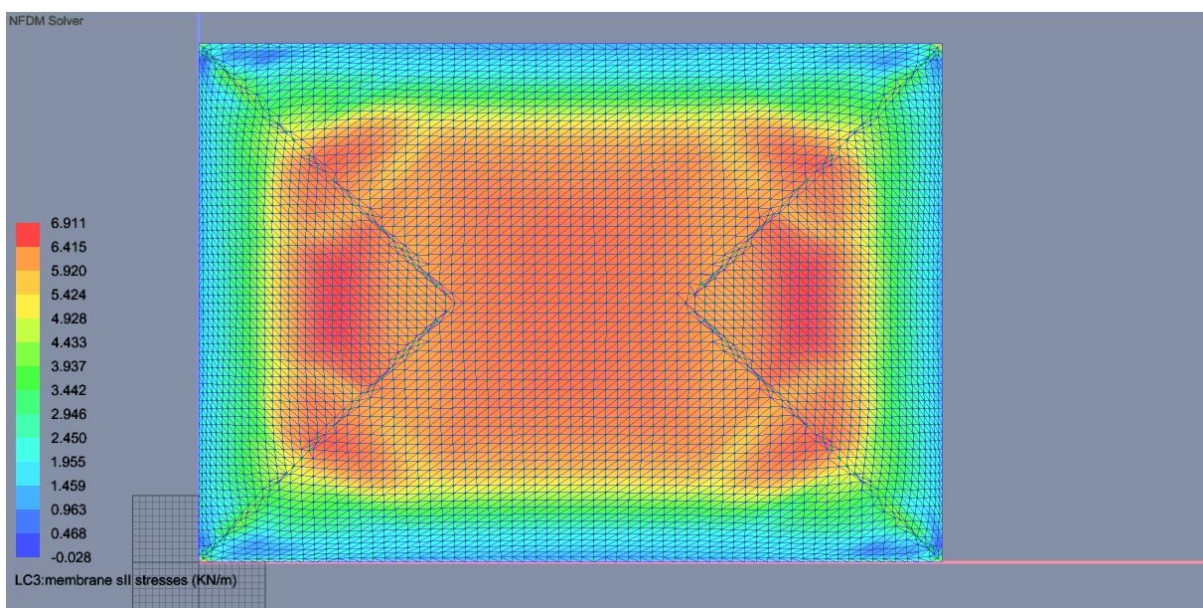
Slika 85: Obtežba snega na konstrukciji.



Slika 86: Deformacije ob hkratnem delovanju notranjega pritiska in obtežbe snega.



Slika 87: Glavna napetost s_I [kN/m] zaradi notranjega pritiska $0,3 \text{ kN/m}^2$ in snega.



Slika 88: Glavna napetost s_{II} [kN/m] zaradi notranjega pritiska $0,3 \text{ kN/m}^2$ in snega.

7.7 Pomiki

Standard DIN 4134 določa, da mora biti odmik od membrane vsaj dvajsetino radija, kar znaša 2,4 m. Z numerično analizo sem v X smeri dobil podobne rezultate, v Y smeri pa so rezultati precej na varni strani.

7.8 Primerjava rezultatov analize po DIN 4134 in s programom ixCube

Vzel sem večje vrednosti izmed obtežnih primerov veter X in veter Y iz programa ixCube.

Preglednica 19: Primerjava notranjih sil dobljenih s standardom DIN 4134 in programom IxCube 4-10.

	Cilindrični del [$\frac{kN}{m}$]				Zaključki [$\frac{kN}{m}$]			
	ϕ		x		ϕ		x	
	DIN	ixCube	DIN	ixCube	DIN	ixCube	DIN	ixCube
Notranji pritisk	14,41	13,58	7,20	11,56	7,20	12,33	7,20	11,79
Notranji pritisk in veter	33,57	33,58	26,37	24,10	29,56	27,47	26,37	28,78

Dobim dobro ujemanje rezultatov po obeh metodah. Nekaj večjih razlik nastane pri primerjavi notranjih sil zaradi notranjega pritiska. To je predvsem zato, ker sem v programu odčitil rezultate zelo blizu cilindričnega dela konstrukcije, kjer so notranje sile večje in ne na sredini zaključka. Pri kombinaciji notranjega pritiska in vetra je ujemanje dokaj dobro. Razlike so v rangi 10 %. Ta podatek nam pove, da se lahko zanesemo na enačbe, ki jih predpisuje nemški standard.

Pri reakcijah je tudi opaziti določeno ujemanje, vendar so večje razlike pri smeri v kateri deluje reakcija. Razlika je zato, ker program zajame raztezanje membrane zaradi notranjega pritiska, DIN standard pa ne. Zato so koti, kot jih izračunamo po standardu, manjši.

Preglednica 20: Primerjava reakcij v podporah dobljenih s standardom DIN 4134 in programom IxCube 4-10.

	Reakcija [$\frac{kN}{m}$]			
	F_v		Kot F_v glede na vodoravnico	
	DIN	ixCube	DIN	ixCube
Privetna stran	33,57	27,47	36 °	42 °
Zavetna stran	33,57	35,35	54 °	65 °

7.9 Dimenzioniranje

Membrana

Izberem največje notranje količine, ki jih dobim po obeh metodah. Uporabljena bo membrana VALMEX FR 1400 MEHATOP F tip IV proizvajalca Mehler, ki ima natezno trdnost $f_{t,I,k}/f_{t,II,k} = 160/140 \frac{kN}{m}$. Oznaka I označuje osnovno smer, oznaka II pa votkovno. Poravnani sta s smerema notranjih sil, ki delujejo v smeri ϕ in x . Varnostni faktorji so dobljeni po priporočilih Minta (1981), ki so opisani v poglavju 5.4.4.3. Za vsako obtežno kombinacijo se določi svoj varnostni faktor. Izbiral sem jih po inženirski presoji.

- Notranji pritisk (stalna obtežba):

$$n_{\phi,Ed} = 14,41 \frac{kN}{m}, n_{x,Ed} = 11,79 \frac{kN}{m}$$

$$f_{t,I,Rd} = \frac{f_{t,I,k}}{(\gamma_F * \gamma_M * A_0 * A_1 * A_2 * A_3)} = \frac{160 \frac{kN}{m}}{(1,5 * 1,4 * 1,2 * 1,7 * 1,2 * 1,1)} = \frac{160 \frac{kN}{m}}{5,7} = 28,07 \frac{kN}{m}$$

$$f_{t,II,Rd} = \frac{f_{t,II,k}}{(\gamma_F * \gamma_M * A_0 * A_1 * A_2 * A_3)} = \frac{140 \frac{kN}{m}}{5,7} = 24,56 \frac{kN}{m}$$

$$n_{\phi,Ed} < f_{t,I,Rd} \Rightarrow 14,41 \frac{kN}{m} \leq 28,07 \frac{kN}{m}$$

$$n_{x,Ed} < f_{t,II,Rd} \Rightarrow 11,79 \frac{kN}{m} \leq 24,56 \frac{kN}{m}$$

- Notranji pritisk in veter (neurje):

$$n_{\phi,Ed} = 33,58 \frac{kN}{m}, n_{x,Ed} = 28,48 \frac{kN}{m}$$

$$f_{t,I,Rd} = \frac{f_{t,I,k}}{(\gamma_F * \gamma_M * A_0 * A_2)} = \frac{160 \frac{kN}{m}}{(1,6 * 1,4 * 1,2 * 1,2)} = \frac{160 \frac{kN}{m}}{3,2} = 50 \frac{kN}{m}$$

$$f_{t,II,Rd} = \frac{f_{t,II,k}}{(\gamma_F * \gamma_M * A_0 * A_2)} = \frac{140 \frac{kN}{m}}{3,2} = 43,75 \frac{kN}{m}$$

$$n_{\phi,Ed} < f_{t,I,Rd} \Rightarrow 33,58 \frac{kN}{m} \leq 50 \frac{kN}{m}$$

$$n_{x,Ed} < f_{t,II,Rd} \Rightarrow 28,48 \frac{kN}{m} \leq 43,75 \frac{kN}{m}$$

Membrana je stalno v nategu (do tlakov ne pride), kot je bilo povedano že v poglavju 7.6.4.

Zvar membrane

Membrana se vari tako, da zvar poteka v osnovni smeri materiala. Torej se lahko zvar poruši le v votkovni smeri in so zato merodajne obtežbe v tej smeri.

- Notranji pritisk (stalna obtežba):

$$n_{x,Ed} = 11,79 \frac{kN}{m}$$

$$f_{t,II,Rd} = \frac{f_{t,II,k}}{(\gamma_F * \gamma_M * A_0 * A_1 * A_2 * A_3)} = \frac{160 \frac{kN}{m}}{(1,5 * 1,5 * 1,2 * 2 * 1,2 * 1,5)} = \frac{140 \frac{kN}{m}}{9,7} = 14,43 \frac{kN}{m}$$

$$n_{x,Ed} < f_{t,II,Rd} \Rightarrow 11,79 \frac{kN}{m} \leq 14,43 \frac{kN}{m}$$

- Notranji pritisk in veter (neurje):

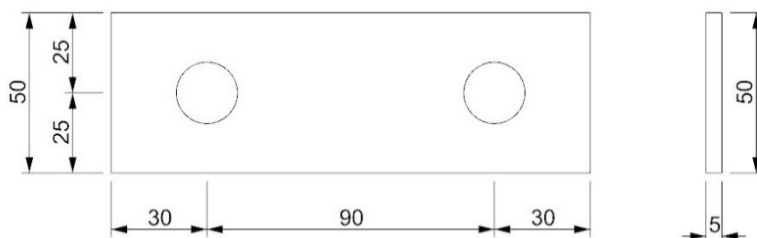
$$n_{x,Ed} = 28,48 \frac{kN}{m}$$

$$f_{t,II,Rd} = \frac{f_{t,II,k}}{(\gamma_F * \gamma_M * A_0 * A_2)} = \frac{160 \frac{kN}{m}}{(1,6 * 1,5 * 1,2 * 1,2)} = \frac{140 \frac{kN}{m}}{3,5} = 40 \frac{kN}{m}$$

$$n_{x,Ed} < f_{t,II,Rd} \Rightarrow 28,48 \frac{kN}{m} \leq 40 \frac{kN}{m}$$

Stik membrane z jeklenimi ploščicami

Izvede se detajl, kot je prikazan na sliki 25. Jeklena ploščica bo dimenzij l/b/t=150/50/5 mm in iz jekla kvalitete S235, vijaki pa M8 kvalitete 4.6. Pri stiku je potrebno narediti kontrolo strižne porušitve vijaka in kontrolo bočnih pritiskov. Do strižnega iztrga ne pride.



Slika 89: Vezna ploščica.

Projektna sila, ki odpade na en vijak, je:

$$F_{v,Ed} = \frac{n_{\phi,Ed} * l}{2} = \frac{33,57 \frac{kN}{m} * 0,15 \text{ m}}{2} = 2,52 \text{ kN}$$

Strižna odpornost vijaka in bočna odpornost pločevine sta:

$$F_{v,Rd} = \frac{0,5 f_{ub} * A_s}{\gamma_{M2} * \gamma_F} = \frac{0,5 * 40 \frac{kN}{cm^2} * 0,366 cm^2}{1,25 * 1,6} = 3,66 \text{ kN}$$

$$F_{b,Rd} = \frac{1,5 f_u * d * t}{\gamma_{M2} * \gamma_F} = \frac{1,5 * 36 \frac{kN}{cm^2} * 0,8 cm * 0,5 cm}{1,25 * 1,6} = 10,8 \text{ kN}$$

Kontrola:

$$F_{v,Ed} = 2,52 \text{ kN} \leq \min(F_{v,Rd}, F_{b,Rd}) = 3,66 \text{ kN}$$

Razlaga količin v enačbah:

f_{ub} ... projektna trdnost vijaka

f_u ... natezna trdnost jekla

t ... debelina pločevine

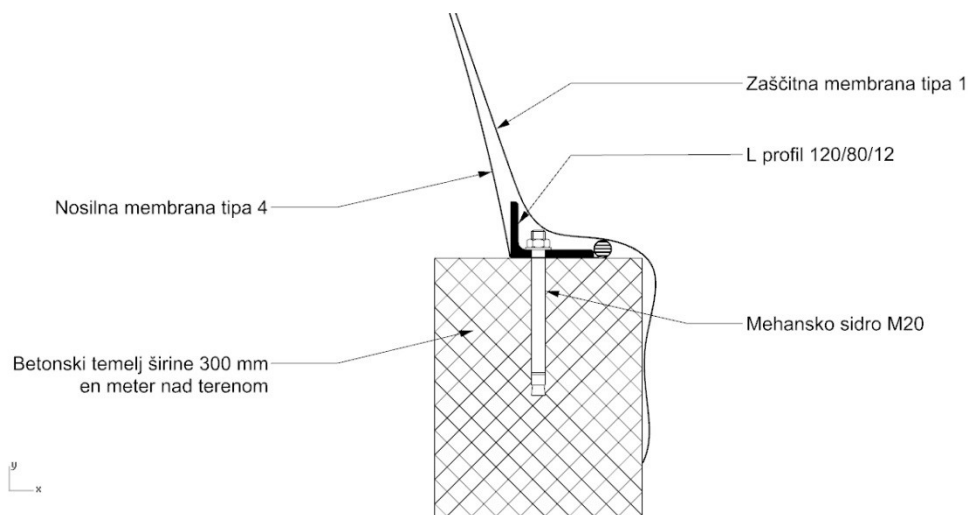
A_s ... površina prereza skozi vijak

d ... premer luknje

γ_{M2} ... delni varnostni faktor za vijak

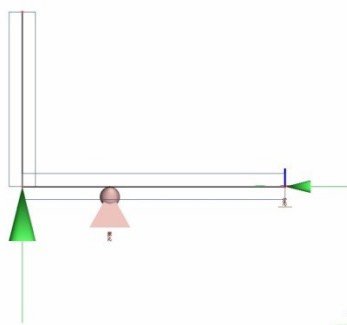
Detajl sidranja

Sidranje izvedem z L-profilom in betonskimi sidri razporejenimi na pol metra.



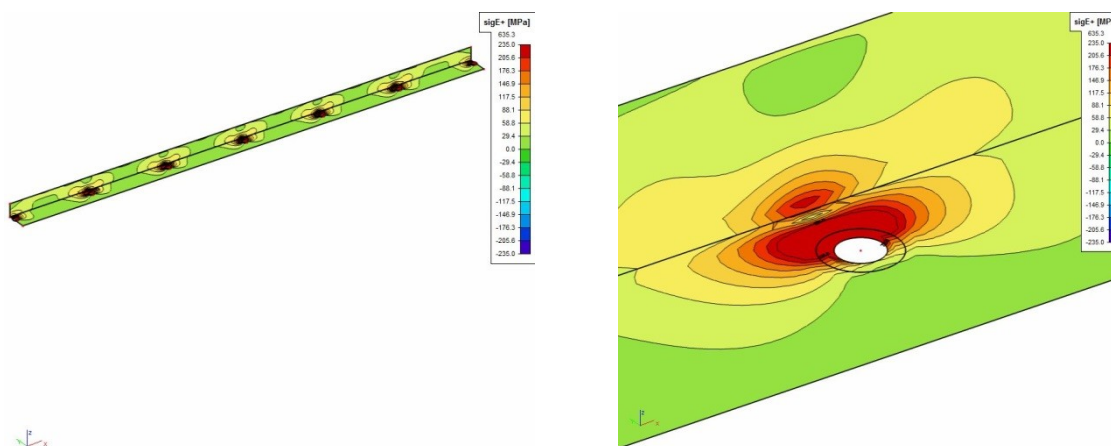
Slika 90: Detajl pritrditve membrane na togo sidrišče.

Pri dimenzioniranju L profila sem bil v dvomih, kakšen porušni mehanizem se ustvari, zato sem v programu Scia Engineer modeliral trimetrski L profil z lupinastimi končnimi elementi in pogledal, kaj se dogaja. Računski model je bil takšen, da je bil profil na mestih sider točkovno podprt tako, da so bili pomiki onemogočeni, rotacije pa dovoljene. Prav tako sem modeliral linijsko podporo vzdolž zunanjega roba tako, da so bili preprečeni pomiki v smeri gravitacije. Obremenitev sem podal kot linijsko obtežbo na notranjem robu, in sicer največjo navpično silo pomnoženo z varnostnim faktorjem 1,6 in njeno pripadajočo vrednost v vodoravni smeri na zunanji rob. Tako je znašala vertikalna obtežba $32,02 \frac{kN}{m} * 1,6 = 51,23 \frac{kN}{m}$, horizontalna pa $14,95 \frac{kN}{m} * 1,6 = 23,92 \frac{kN}{m}$.



Slika 91: Prerez skozi model jeklenega profila v Scia Engineer. Horizontalno komponenta sile se prenese na zunanji rob, vertikalna pa na notranjega.

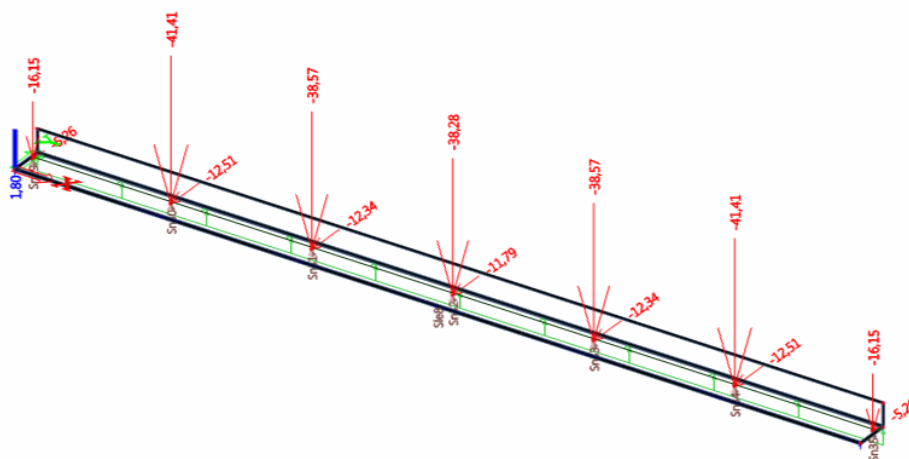
Po analizi sem videl, da se kritični porušni mehanizem tvori okoli sidra, kjer najprej pride do plastifikacije, na podlagi česar sem ugotovil, da bi lahko detajl dimenzioniral po metodi nadomestnih T-elementov. Nasprotno od mojih pričakovanj, porušni mehanizem zaradi upogiba nad sidri ali na sredini med sidri ni kritičen, saj so tam napetosti le 20 % napetosti na meji tečenja jekla. Nadalje sem model izboljšal tako, da sem na mestih sider dodal luknje, podložko in podprl profil na robu podložke. Tako sem upal na manjše koncentracije napetosti v eni sami točki. Dobil sem rezultat, ki prikazuje Von Misesove napetosti na površini elementa in je viden na sliki 92. Kar je obarvano v temno rdeče preseže napetost na meji tečenja, zato se tisti del začne plastificirati. S povečevanjem obtežbe, bi se plastifikacija okoli sidra povečevala, kar bi privedlo do iztrga pločevine v okolici sidra.



Slika 92: Prikaz Von Misesovih napetosti v L-profilu, kot podlaga za izbor porušnega mehanizma za dimenzioniranje L-profila.

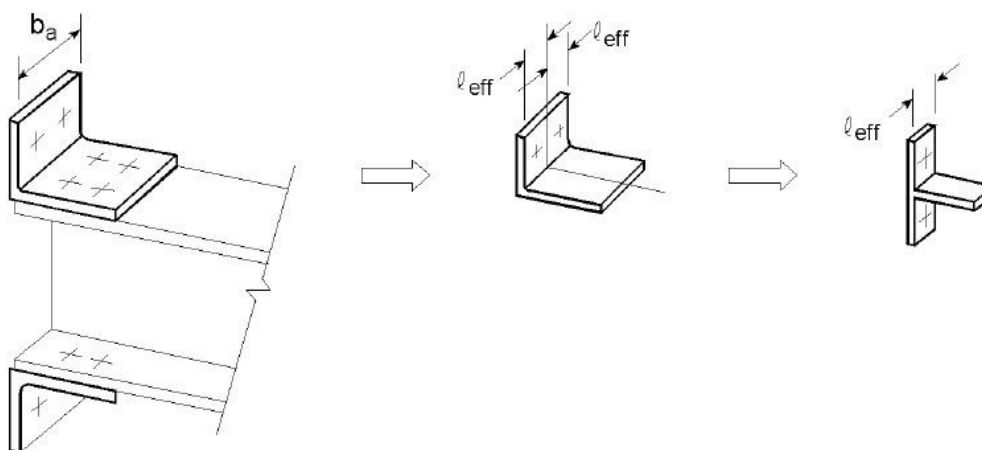
Izberem standardni L profil $b/h/t=120/80/8$ mm.

Pozicija sidra ne bo na sredini L-profila ampak 20 mm bližje stojini profila, ker s tem zmanjšamo ročico sile in dobimo manjšo obremenitev na sidro. Projektna obremenitev na sidro je kar reakcija v eni izmed podpor v prejšnjem modelu, ki so prikazane na sliki 93.



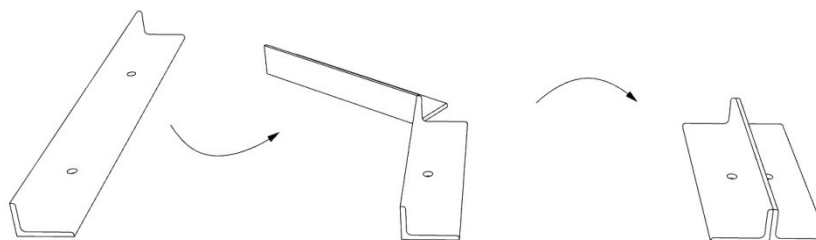
Slika 93: Reakcije v sidrnem L-profilu, pri največji vertikalni obremenitvi.

Račun po metodi nadomestnih T-elementov poteka po postopku opisanem v SIST EN 1993-1-8:2005 v poglavju 6.2.4. Zamisliti si moramo nadomestni T-element kot ga predlaga omenjeni standard in je prikazan na naslednji sliki.



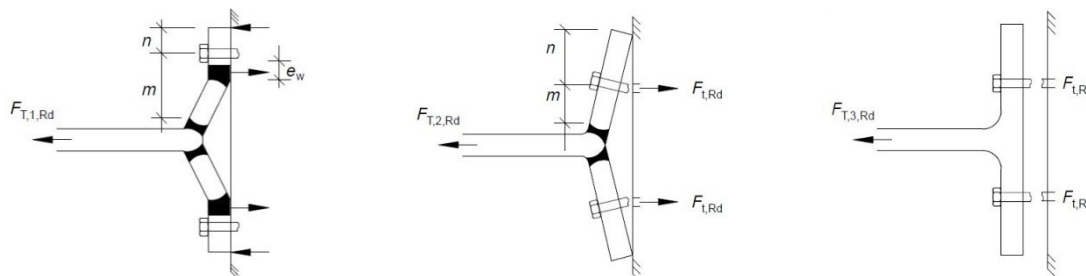
Slika 94: Vijachen kotnik v nategu, ki se ga preoblikuje v T-element (SIST EN 1993-1-8:2005).

Naš L-profil poteka po celotnem obsegu konstrukcije, zato si za analizo izberemo najbolj obremenjen meter L-profila. Lahko ga preuredimo tako, da dobimo nadomestni T-element.



Slika 95: Preureditev enega metra L-profila v nadomestni T-element.

Kot določa standard SIST EN 1993-1-8:2005, se lahko T-element poruši na tri načine, kot je prikazano na sliki 96. Za naš primer je merodajen le prvi porušni sistem, ker bomo zagotovili dovolj močna sidra, da do drugega in tretjega primera ne bo prišlo.



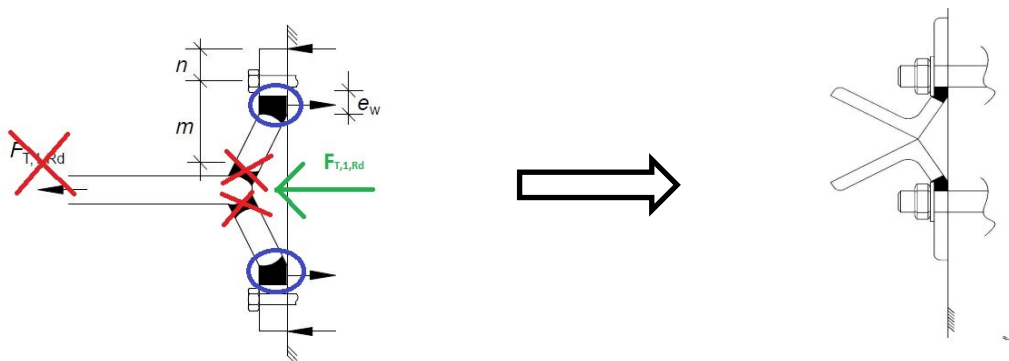
Slika 96: Trije načini porušitve T-elementa. Levo je popolna plastifikacija pasnic, v sredini hkratna plastifikacija pasnice in porušitev vijakov, desno pa samo porušitev vijakov (BCSA/SCI Connections Group, 2013).

Projektna nosilnost T-elementa za ta porušni mehanizem se določi iz preglednice 6.2 standarda SIST

EN 1993-1-8:2005 in znaša $F_{T,1,Rd} = \frac{4 M_{pl,Rd}}{m_x}$. To vrednost moramo zmanjšati za polovico, ker v

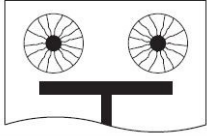
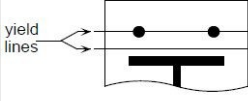
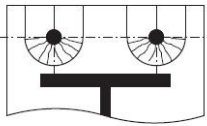
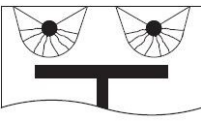
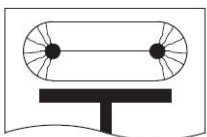
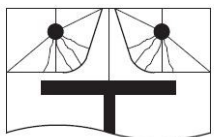
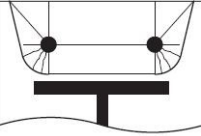
našem primeru ne moreta nastati plastična členka med stojino in pasnico, ker se stojina kotnika neovirano giblje. Ostaneta nam le še z modro obkrožena plastična členka na sliki 97. Ta sila mora biti večja kot dvakratnik največje reakcije.

$$F_{T,1,Rd} = \frac{2 M_{pl,Rd}}{m_x} > F_{Ed} = 2 * 38,57 \text{ kN} = 77,14 \text{ kN}$$



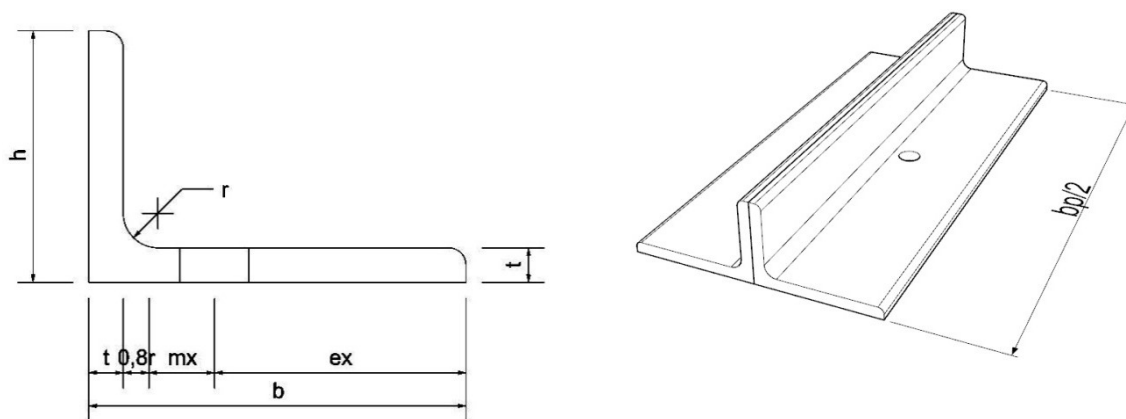
Slika 97: Prikaz našega porušnega mehanizma. Prijemališče sile $F_{T,1,Rd}$ je v našem primeru na stiku med stojino in pasnico, zato tam ne more nastati plastični členek.

Plastični odpornostni moment se izračuna po enačbi $M_{pl,Rd} = 0,25 \sum l_{eff} t^2 f_y / \gamma_{M0}$.

Circular patterns		Non-circular patterns	
	Circular yielding $l_{\text{eff,cp}} = 2\pi m_x$		Double curvature $l_{\text{eff,nc}} = \frac{b_p}{2}$
	Individual end yielding $l_{\text{eff,cp}} = \pi m_x + 2e_x$		Individual end yielding $l_{\text{eff,nc}} = 4m_x + 1.25e_x$
	Circular group yielding $l_{\text{eff,cp}} = \pi m_x + w$		Corner yielding $l_{\text{eff,nc}} = 2m_x + 0.625e_x + e$
			Group end yielding $l_{\text{eff,nc}} = 2m_x + 0.625e_x + \frac{w}{2}$

Slika 98: Vse možne porušitvene linije (BCSA/SCI Connections Group, 2013).

l_{eff} je efektivna dolžina porušne linije. Izbere se najmanjšo možno izmed nabora vseh linij na sliki 98. Čeprav na tej sliki ni narisano točno naš primer, veljajo l_{eff} tudi v našem primeru. Slika prikazuje krožne in poligonalne vzorce porušitve. Odpove lahko okolica posameznega vijaka ali okolica skupine vijakov. V našem primeru lahko odpovejo le okolice posameznih vijakov, kot prikazuje slika 92. Na naslednji sliki so pojasnjene oznake, ki se uporabljajo pri računu.



Slika 99: Razlaga oznak uporabljenih pri računu z nadomestnimi T-elementi.

$$F_{Ed} = 2 * 38,57 \text{ kN} = 77,14 \text{ kN}$$

$$e_x = 8 \text{ cm}$$

$$m_x = b - t - 0,8r - e_x = 12 \text{ cm} - 0,8 \text{ cm} - 0,8 * 1,1 \text{ cm} - 8 \text{ cm} = 2,32 \text{ cm}$$

$$b_p = 100 \text{ cm}$$

$$t = 0,8 \text{ cm}$$

$$l_{eff} = \min \begin{cases} 2 \pi m_x = 2 \pi 2,32 \text{ cm} = 14,58 \text{ cm} \\ \pi m_x + 2 e_x = \pi 2,32 \text{ cm} + 2 * 8 \text{ cm} = 23,29 \text{ cm} \\ 4 m_x + 1,25 e_x = 4 * 2,32 \text{ cm} + 1,25 * 8 \text{ cm} = 19,28 \text{ cm} = 14,58 \text{ cm} \\ 0,5 * b_p = 0,5 * 100 \text{ cm} = 50 \text{ cm} \end{cases}$$

$$M_{pl,Rd} = 0,25 \sum l_{eff} t^2 f_y / \gamma_{M0} = 0,25 * 2 * 14,58 \text{ cm} * (0,8 \text{ cm})^2 * \frac{23,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1} = 109,62 \text{ kNcm}$$

$$F_{t,1,Rd} = \frac{2 * M_{pl}}{m_x} = \frac{2 * 109,62 \text{ kNcm}}{2,32 \text{ cm}} = 94,50 \text{ kN}$$

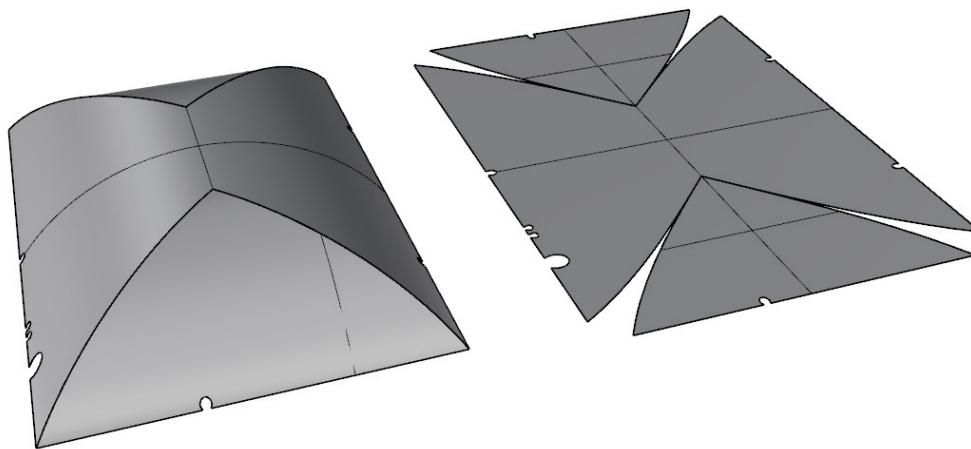
$$77,14 \text{ kN} \leq 94,50 \text{ kN}$$

Dimenzioniranje jeklenih sider sem izvedel s programom Hilti PROFIS Anchor 2.4.9, ki deluje po priporočilih za evropska tehnična soglasja za jeklena sidra, ki se uporabljajo v betonu, ETAG 001 Aneks C. Modeliral sem eno sidro, ki sem ga obremenil z reakcijo, ki sem jo dobil v programu Scia Engineer. Ugotovil sem, da širina vrha temelja ni ustrezna in jo je treba povečati za 20 mm na vsako stran. Dokaz varnosti je v prilogi A.

Izberem jekleno sidro M20, globina vgraditve 13 cm.

7.10 Krojenje membrane

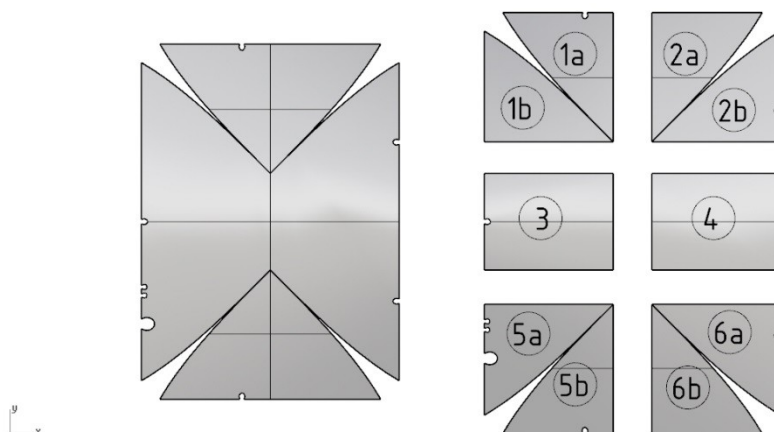
Membrano sem krojil z uporabo programov Rhinoceros 5 in ixCube 4-10. V Rhinocerosu se lahko izvede skoraj kompletno krojenje, ker se površine, ki tvorijo obliko membrane, lahko razvijejo na ravnino brez popačenja. Problem nastane le pri priklopih na membrano, kjer sem uporabil ixCube. Krojnih pol nisem kompenziral. Izhajal sem iz oblike na sliki 60, ki sem jo najprej razvil na ravnino.



Slika 100: Razvitje 3D oblike na ravnino (pogled iz perspektive).

Ker bi bila tako velika površina prevelika za varjenje v enem kosu - omejeni smo z velikostjo delavnice in dimenzijami transportnega vozila - sem jo moral razdeliti na več posameznih delov.

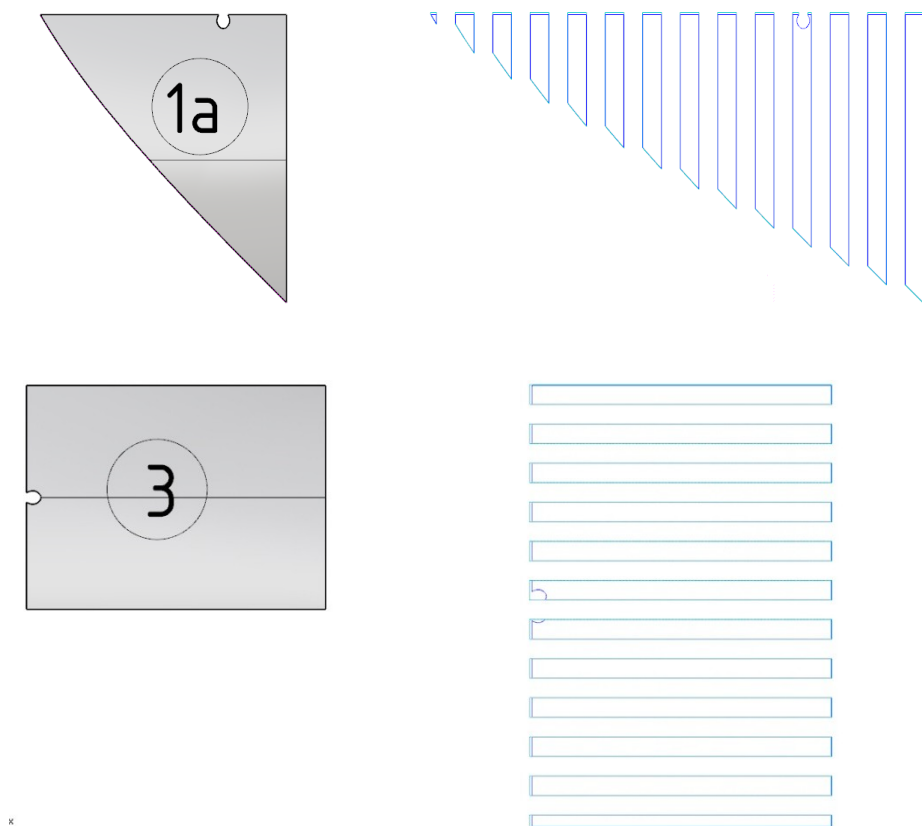
Razdelil sem jo na deset delov, vendar lahko opazim, da se dva dela ponavljata. Zato je potrebno krojiti le dva dela, to sta del *1a* in *3*, ostale lahko dobimo z zrcaljenjem. Vrata lahko izrežemo po varjenju tako, da si vnaprej pripravimo šablono, ki jo postavimo na mesto vrat.



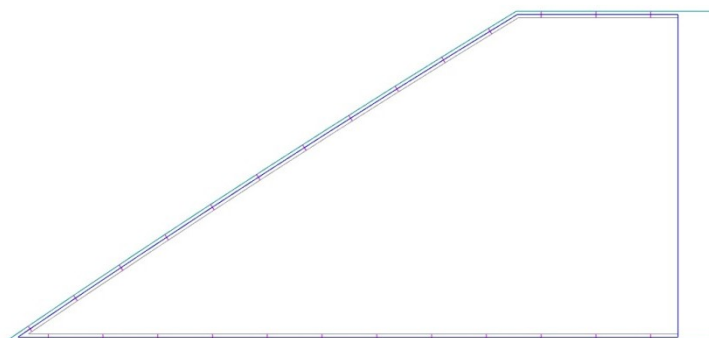
Slika 101: Razdelitev membrane na več delov.

Na mestih, kjer sem odrezal membrano, je potrebno dodati stike. Dele *a* in *b* sem združil z visokofrekvenčnim varjenjem v delavnici, ostale dele pa sem med seboj povezal z montažnim stikom na lokaciji postavitve, kot je prikazano na sliki 25. Po zunanjem obodu pa bo izveden stik, ki je prikazan na sliki 90.

Krojenje glavne membrane sem naredil s programom Rhinoceros 5 tako, da sem kar se da dobro izkoristil material. Na razpolago sem imel rolo širine 3 m, zato so vse pole široke toliko. To ima za posledico, da niso vsi zvari na enaki oddaljenosti med seboj, vendar to s prostim očesom ni opazno. Opazi se le pri delu 3, kjer nam na koncu ostane ena ožja pola. Poraba materiala pri takšnem krojenju je zelo dobra. Odpadnega materiala je samo 1 %.

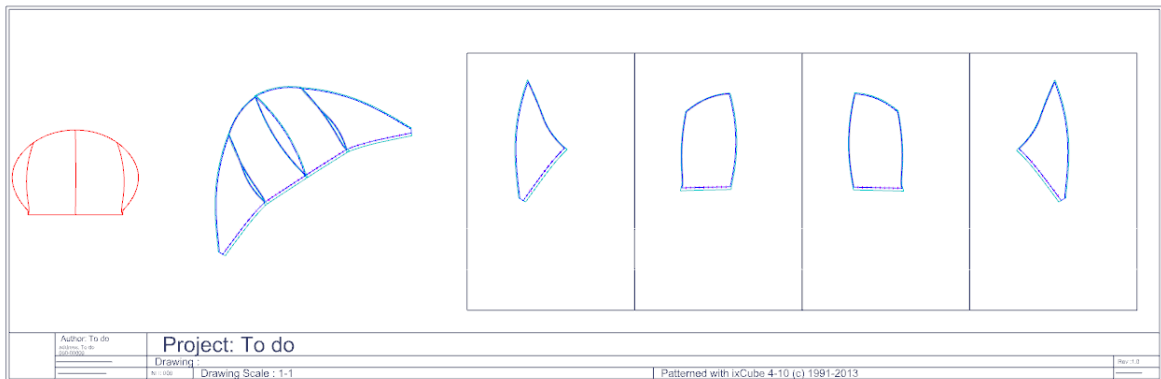


Slika 102: Krojne pole za 1a in 3.

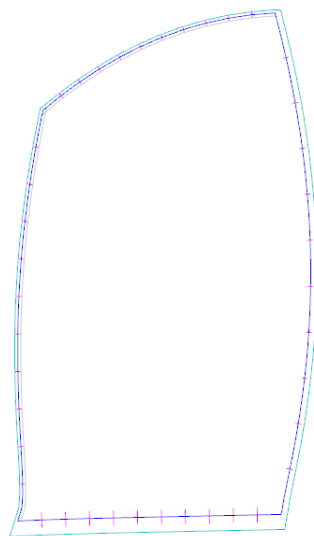


Slika 103: Primer kroja. Svetlo modra črta označuje odrezno linijo, temno modra je sistemska linija, siva označuje globino prekrivanja zaradi stika, kratke rdeče črtice pa so markerji, s katerimi si pomagamo pri poravnavi pol pri varjenju.

Krojenje priklopov je potekalo v programu IxCube 4-10. Rezultat je viden na naslednjih slikah, kjer so krojne pole za priklop na transportni vhod.



Slika 104: Izpis iz programa IxCube, kjer vidimo z rdečo tloris priklopa, zraven so razvite krojne pole na ravnino, v okvirčkih pa vsaka pola posebej.



Slika 105: Krojna pola za transportni vhod, kot jo izpiše program IxCube 4-10.

8 ZAKLJUČEK

V diplomski nalogi sem obravnaval zračno podprte membranske konstrukcije. Njihova razširjenost po Sloveniji in uspešna slovenska podjetja, ki jih tržijo, nakazujejo, da potrebujemo tudi slovensko literaturo s tega področja, ki je do sedaj v slovenščini še ni bilo. Nalogo sem skušal napisati čim bolj razumljivo in slikovito tako, da bi bila razumljiva tudi bralcu, ki ni iz gradbene stroke.

Kljub temu, da je tehnologija zračno podprtih konstrukcij relativno nov koncept, prve konstrukcije so se pojavile šele med Drugo svetovno vojno, so danes razvite že do te mere, da se jih da načrtovati varno. Kmalu po svojih začetkih, je stroka poskrbela za razvoj literature in standardov. V šestdesetih letih so v ZDA izšli prvi priročniki za načrtovanje, kmalu za tem pa so vzniknili tudi standardi v obeh Nemčijah, Veliki Britaniji, Franciji, ZDA in na Japonskem. Dandanes pogrešamo nek sodobnejši priročnik ali standard, ki bi bolj celovito uredil to področje z zadnjimi znanstvenimi ugotovitvami. Membranske konstrukcije bi bilo dobro umestiti v Evrokod standarde.

Zračno podprte konstrukcije za svoje delovanje potrebujejo tri komponente. Zrak, ki je glavni nosilni element, ventilator, ki ta zrak dovaja in neprepustni ovoj, ki ga zadržuje. Takoj, ko ena izmed teh komponent odpove, odpove celotna konstrukcija.

Zrak kot glavni nosilni element mora biti pod pritiskom, da lahko prenaša težo membrane, ki jo dviguje in stabilizira. Večji pritisk pomeni bolj stabilen ovoj in nudi boljši odpor na vpliva kot sta veter in sneg. Prevelik pritisk lahko ovoju tudi škoduje, ker ga lahko preveč napne, da le-ta popusti. Da to preprečimo, moramo vgraditi močnejši ovoj, kar podraži konstrukcijo. Pri izbiri pritiska moramo najti pravo ravnovesje med uporabnostjo in ceno.

Ventilator oz. strojne enote z ventilatorji bi si zaslužile svojo diplomsko nalogo, kjer bi bile razložene vse tehnične rešitve, v tej diplomski nalogi so predstavljene le na konceptualnem nivoju.

Največji poudarek v diplomi sem namenil načrtovanju nepropustnega ovoja, ker je ta v gradbenem smislu najbolj kompleksen. Nepropustni ovoj sestavljata tla in primerno pritrjena membrana. Najpogosteje se uporablja PET/PVC membrane. Načrtovanje zračno podprtih konstrukcij se razlikuje od načrtovanja klasičnih togih konstrukcij, ker so membrane nosilne samo v nategu. Membrane niso sposobne prevzeti niti momentov, zato se morajo najprej deformirati in vzpostaviti ravnotežje z nategom. Prav ta igra med obliko in notranjimi silami je poglobljena za razumevanje tovrstnih konstrukcij. Pri razumevanju si lahko pomagamo z minimalnimi površinami, kjer so napetosti enake v vsaki točki in v vseh smereh. Vsako odstopanje od minimalne površine spremeni razmerje notranjih sil v konstrukciji in obratno. Razlike so tudi v načinu določanja varnosti konstrukcij. Pri membranskih konstrukcijah je v uporabi »star« način določanja varnosti z metodo dopustnih napetosti, za razliko od trenutno uveljavljenega koncepta v Evrokod standardih – metodo mejnih stanj.

Ker so zračno podprte konstrukcije sorodne z antiklastičnimi membranami, za katere je napisane veliko literature, ki sem jo uporabil pri pisanju diplome, sem dobil precej znanja tudi na tem področju. Podobnosti si ne delita le po uporabljenem materialu in nosilnem sistemu, ampak tudi po načinu načrtovanja. Glavni koraki so iskanje oblike, statična analiza in krojenje membrane.

Podobnost velja predvsem za kompleksnejše zračno podprte membranske konstrukcije, za standardne konstrukcije pa lahko rečem, da sta načrtovanje in izdelava precej bolj enostavni. Če podkrepim to z argumenti: pri antiklastičnih membranah se daje velik poudarek na iskanje oblike (iskanje minimalne površine), testiranje uporabljenega materiala, kompenzacijo, razporedu krojnih pol, detajlom prenosa sile na rob itd. Za celotno analizo potrebujemo kompleksne in namenske računalniške programe, ki stanejo celo premoženje. Pri standardnih zračno podprtih konstrukcijah lahko veliko teh korakov poenostavimo. Iskanje oblike ni potrebno, ker lahko obliko dobimo s kombiniranjem enostavnih geometrijskih oblik. To lahko narišemo z roko na list papirja ali uporabimo računalniške programe kot so Rhinoceros, AutoCAD ipd. Minimalne površine, za iskanje katerih potrebujemo namenski program, se izkažejo za slabo obliko, ker navadno zmanjka svetle višine v vogalih. Testiranje materiala je potrebno le v tej meri, da se ugotovi njegova natezna trdnost. Lahko ga tudi izpustimo in zaupamo nazivni natezni trdnosti proizvajalca (vzamemo le nekoliko večji varnostni faktor). Dvoosni natezni preizkusi za določitev elastičnega modula in velikosti kompenzacije niso potrebni, ker elastičnega modula ne potrebujemo, kompenzacije na krojnih polah pa ne vršimo. Zakaj ne? Elastični modul potrebujemo pri izračunu pomikov, ki so odvisni od materiala, prevladujoči pomiki pa so tisti, ki so neodvisni od materiala. Pri sunku vetra se material ne bo imel časa raztegniti, pomiki se bodo vršili le na račun podajnosti konstrukcije, ki je v pretežni meri neodvisna od materiala. Za koliko moramo odmakniti opremo od membrane, da bo varno, odčitamo iz standarda, te vrednosti pa so neodvisne od uporabljenega materiala. Enak princip velja za kompenzacijo. Res je, da se membrana dodatno raztegne in na koncu ni točno takšne oblike, kot je bila zamišljena (je malo večja in deformirana), vendar to predvidimo. Če bi naredili kompenzacijo krojnih pol, bi bilo potrebno zvarjeno membrano raztegniti, da bi ustrezala dimenzijam togega sidrišča. Ker je prednapetje veliko večje kot pri antiklastičnih membranskih konstrukcijah, so veliko večji tudi kompenzacijski faktorji, posledično se membrana zelo skrči. Za napenjanje bi potrebovali drago hidravlično opremo ali pa drugačno izvedbo detajla sidranja, kar pa zadevo zelo podraži. Nadalje lahko izberemo tako obliko, da za razvoj krojne pole ni potreben specializiran računalniški program. Če je oblika samo enojno ukrivljena (kot je bila v mojem primeru), lahko krojenje naredimo s CAD programom. Detajli stikovanja membrane in detajli sidranja so enostavni in so enaki pri vsaki standardni zračno podprti konstrukciji, brez velikih variacij v podrobnostih. V diplomski nalogi je narejen predstavljen primer zračno podprte konstrukcije, kjer prikažem proces načrtovanja.

Zračno podprte membranske konstrukcije so se sprva uporabljale le za vojaške namene, kasneje pa so našle svoje mesto v pokritju športnih prizorišč in skladišč. Poglejmo, zakaj so privlačne za investitorje predvsem v teh panogah.

Prednosti:

- Nizka začetna investicija: cene tovrstnih konstrukcij po mojih izkušnjah ne presegajo 100 €/m², kar je v primerjavi z drugimi nosilnimi sistemi zelo ugodno. Pri večjih konstrukcijah se lahko ta vrednost še precej zmanjša.
- Veliki razponi: kot navajajo Forster in sodelavci (2004), bi lahko takšna konstrukcija premostila razpone več kilometrov. Doslej največja je bila postavljena v Južni Koreji in meri neverjetnih 215 m krat 215 m v tlorisu in 45 m v višino brez vmesnih podpor (glej sliko 8).
- Hitra montaža, demontaža in prenosljivost: manjši objekti so lahko postavljeni že v enem dnevu, medtem ko večji potrebujejo tudi do 14 dni, odvisno od vremena. Po demontaži se konstrukcijo lahko prestavi na drugo lokacijo.
- Potresno izredno varna konstrukcija: zaradi svoje majhne mase in majhne stalne obtežbe nanjo potres skorajda nima vpliva. Sposobna je tudi prenesti velike deformacije in posedke tal.
- Majhni posegi v okolje: temelji pri zračno podprtih konstrukcijah morajo prenesti le vzgonske sile, torej delujejo kot neke vrste balast. Uteži se lahko postavi na zemljinu brez izkopavanj, potrebno je le prilagoditi posamezne detajle.
- Velike možnosti oblikovanja: kot je dokazal Anish Kapoor na slikah 9, 10, 11 in 12, je lahko zračno podprta konstrukcija tudi umetnost.

Potrebno je poznati tudi slabosti:

- Večji obratovalni stroški: to je velika hiba zračno podprtih konstrukcij. Potrebuje stalno obratovanje ventilatorja za vzdrževanje pritiska. Drago je tudi ogrevanje zaradi velikih volumnov in slabe toplotne izolacije membrane.
- Slaba toplotna izolacija: enojna membrana ima zelo veliko toplotno prehodnost ($U \geq 5 \frac{W}{m^2 K}$). Pogosta izboljšava tega je, da se na notranjo stran membrane privari še ena membrana, tako da zvari med zunanjo in notranjo membrano sovpadajo. S tem se med membranami ustvari žep slabo prezračevanega zraka, ki poveča toplotno izolacijo. Nekatere trditve proizvajalcev so, da s tem lahko izboljšamo toplotno-izolativne lastnosti membrane za dvakrat. Vendar imamo še vedno veliko toplotnih mostov. Obstajajo tudi kompleksnejše rešitve pritrditve drugega sloja membrane brez toplotnih mostov. Če imamo predobro toplotno izolacijo, se sneg na membrani ne topi tako hitro, zato moramo najti nek drug sistem za odstranjevanje snega.
- Krajša življenjska doba: membrana s časom razpada. Stalna izpostavljenost UV-žarkom in ostalim vremenskim vplivom uničuje zaščitni sloj membrane. Trenutno stanje v industriji je takšno, da znajo narediti membrano, ki zdrži do 30 let.

- Nevarnost porušitve je veliko večja od togih konstrukcij: zelo so občutljive na sneg, ker se poruši takoj, ko je teža snega večja kot notranji pritisk. Zaščititi jo je treba tudi pred vandalizmom.
- Odvisnost od energije in energentov: zračno podprta konstrukcija je živa tvorba. To pomeni, da potrebuje stalno obratovanje strojnih naprav. Če strojni del odpove, odpove tudi konstrukcija. Stroji potrebujejo energijo (elektriko, fosilna goriva) in redno vzdrževanje.

Z napredkom tehnologije (razvoj novih materialov, neodvisnost od fosilnih goriv ...) bodo postale takšne konstrukcije še bolj privlačne za uporabo. Če se ozrem v daljno prihodnost in pustim domišljiji prosto pot, lahko da bodo prav takšne konstrukcije prve na drugih planetih, ker bodo lahko zadržale zrak, ki ga bo človek umetno ustvaril in bodo naredile mini atmosfero v sicer neprijaznem okolju.

VIRI

Askwith, A. 2014. (ni zadeve). Message to: Brglez, G. 21. 3. 2014. Osebna komunikacija.

BCSA/SCI Connections Group. 2013. Joints in steel construction: Moment-resisting joints to Eurocode 3. The Steel Construction Institute & The British Constructional Steelwork Association Limited: 172 str.

Bletzinger, K.-U., Ramm, E. 1999. A General Finite Element Approach to the Form Finding of Tensile Structures by the Updated Reference Strategy. *International Journal of Space Structures*. 14, 2: 131-145.

Calculating Panel Compensation. Meliar Design. 2011.
<http://www.meliar.com/comp.pdf> (Pridobljeno 1. 12. 2014.)

Design manual for ground-mounted air-supported structures (single- and double-wall) (revised). 1969. Dietz, A. E., Proffitt, R. B., Chabot, R. S., Moak, E. L. Hayes International Corporation. Tehnično poročilo: 129 str.

Forster, B. (ur.), Mollaert, M. (ur.). 2004. European Design Guide for Tensile Surface Structures. Bruselj, Vrije universiteit Brussel: 354 str.

Gründig, L., Ekert, L., Moncrieff, E. 1996. Geodesic and Semi-Geodesic Line Algorithms for Cutting Pattern Generation of Architectural Textile Structures. *Proceeding of Asia-Pacific Conference on Shell and Spatial Structures*, Peking.

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

Minte, J. 1981. »Das mechanische Verhalten von Verbindungen beschichteter Chemiefasergewebe«. Dizertacija. Aachen, RWTH Aachen.

Otto, F., Drüsedau, H., Dixon, M., Hennicke, J., in sod. 1982. IL 15 Air Hall Handbook. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für leichte Flächentragwerke (IL): 438 str.

Pauletti, R.M.O, Pimenta, P.M. 2008. The natural force density method for the shape finding of taut structures. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 197 (2008): 4419-4428

Seidel, M. 2009. Tensile Surface Structures. A practical Guide to Cable and Membrane Construction. Berlin, Ernst & Sohn: 229 str.

Standardi

DIN 4134. Tragluftbauten – Berechnung, Ausführung und Betrieb – Air-supported structures, structural design, construction and operation.

EN 10204:2004. Metallic products – Types of inspection documents.

ETAG 001 Annex C. Guideline for European Technical Approval of Metal Anchors for Use in Concrete. Annex C: Design Methods for Anchorages.

ISO 4355:1998. Bases for design of structures – Determination of snow on roofs.

SIST EN 13782:2006. Začasne konstrukcije – Šotori – Varnost.

SIST EN ISO 13790:2008. Toplotne značilnosti stavb – Računanje potrebne energije za gretje in hlajenje prostora (ISO 13790:2008)

SIST EN 1990:2004. Evrokod: Osnove projektiranja konstrukcij

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

SIST EN 1991-1-3:2004/oA101. 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. Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 1-4. del: Splošni vplivi – Vplivi vetra – Nacionalni dodatek.

SIST EN 1993-1-1:2005. Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – 1.1. del: Splošna pravila in pravila za stavbe.

SIST EN 1993-1-1:2005. Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – 1.8. del: Projektiranje spojev.

TSG-1-004:2010. Tehnična smernica. Učinkovita raba energije.

Ostali viri

Beg, D. 2011. Projektiranje jeklenih konstrukcij v skladu z Evrokodom 3. Kratek povzetek. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 111 str.

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

Debenjak, D. 1989. Nemško-slovenski in slovensko-nemški slovar – 7. izd. Ljubljana. Cankarjeva založba: 608 str.

Dunne, F. (ur). 2007. Football Stadiums – Technical recommendations and requirement. Zurich. FIFA Fédération Internationale de Football Association: 248 str.

Giugliano, P. 2010. Technical guideline to permanent tensile architectures. Mehler Technologies GmbH: 28 str.

Dodatni viri slik

Abdala, M. 2014. Maximisation of Panel Flutter Speed using the Variable Stiffness Concept. <http://www.lr.tudelft.nl/en/organisation/departments/aerospace-structures-and-materials/aerospace-structures-and-computational-mechanics/old/msc-students/mostafa-abdalla-project-1/> (Pridobljeno 23. 10. 2014)

Apen Group. 2014. Floor standing heaters designed to heat air-supported structures covering tennis courts, sports halls, swimming pools and warehouses. <http://www.apengroup.it/eng/pk-sport.html> (Pridobljeno 23. 10. 2014)

ArTech. 2014. <http://www.artech-ing.co.rs/en/galerija-biogas.php> (Pridobljeno 23. 10. 2014)

- ASATI. 2014. Construction dome interior.
<http://www.asati.com/photocommercial.html> (Pridobljeno 23. 10. 2014)
- Azzarello, N. 2013. »Ark Nova inflatable concert hall to tour Japan's flood-hit areas«. Designboom Architecture
<http://www.designboom.com/architecture/ark-nova-inflatable-concert-hall-to-tour-japans-flood-hit-areas/> (Pridobljeno 23. 10. 2014)
- Broadrec, DX. 2007. »The Intercity Baseball Tournament 2007 Tokyo Dome«. Wikimedia Commons.
http://en.wikipedia.org/wiki/Tokyo_Dome#mediaviewer/File:Tokyo_Dome_2007-1.jpg (Pridobljeno 23. 10. 2014)
- Caldera, L. 1998. »1998 Army Science and Technology Master Plan (ASTMP)«. Military Analysis Network. FAS.
<http://fas.org/man/dod-101/army/docs/astmp98/sec4f.htm> (Pridobljeno 23. 10. 2014)
- Canobbio. 2003. Imperia Swimming Pool
http://www.canobbio.com/impianti_sportivi_eng.php (Pridobljeno 23. 10. 2014)
- Duol. 2014. Soccer field inflatable structure - Klaukkala Finland
<http://www.archiexpo.com/prod/duol/soccer-field-inflatable-structures-67461-1454237.html>
(Pridobljeno 23. 10. 2014)
- Frearson, Amy. 2011. Leviathan by Anish Kapoor. Dezeen magazine.
<http://www.dezeen.com/2011/06/22/leviathan-by-anish-kapoor> (Pridobljeno 1. 12. 2014)
- Geiger, D. 1975. »Low-profile Air Structures in the USA«. Building Research and Practice, stran. 80
<http://www.columbia.edu/cu/gsap/BT/DOMES/OSAKA/o-lowpro.html> (Pridobljeno 23. 10. 2014)
- Goodman, D., N. 2009. »Pontiac Silverdome sold at auction for \$583,000«. The Associated Press.
http://www.nola.com/business/index.ssf/2009/11/pontiac_silverdome_sold_at_auc.html (Pridobljeno 23. 10. 2014)
- Gurganian, V. 2014. »Pontiac Silverdome: Want to buy a piece of Detroit Lions history«. Associated Press.
<http://www.csmonitor.com/Business/Latest-News-Wires/2014/0320/Pontiac-Silverdome-Want-to-buy-a-piece-of-Detroit-Lions-history> (Pridobljeno 23. 10. 2014)
- Karman vortex street. 2014.
http://en.wikipedia.org/wiki/K%C3%A1rm%C3%A1n_vortex_street (Pridobljeno 23. 10. 2014)
- Novovent. 2014. Centrifugal fan/double inlet.
<http://www.directindustry.com/prod/novovent/centrifugal-fans-double-inlet-19905-393509.html>.
(Pridobljeno 23. 10. 2014)
- Oman, A. 2006. Prikaz tkanja na male ročne namizne statve.
http://www.tkalstvo.com/mrs20_2.htm (Pridobljeno 23. 10. 2014)
- Plasteco Milano. 2014. Airdomes – Air-supported structures.
<http://www.plastecomilano.com/airdomes-air-supported-structures/> (Pridobljeno 23. 10. 2014)
- Poltrack, J. 2013. »Blast from the Past Thursday - Expo 70, Osaka Japan«. PoltrackNet Journal.
<http://blog.poltrack.net/2013/11/blast-from-past-thursday-expo-70-osaka.html> (Pridobljeno 23. 10. 2014)

Punnet, M. 2002. »The Building of the Telstar Antennas and Radomes«. IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 44, No. 2.
http://www.ieeeahn.org/wiki/index.php/First-Hand:Telstar..._and_some_personal_recollections
(Pridobljeno 23. 10. 2014)

Riddle, M. 2010. »Air domes: last of a dying breed?«. Fabric architecture.
http://fabricarchitecturemag.com/articles/0910_fl_air_domes.html (Pridobljeno 23. 10. 2014.)

Schek, H.J. 1974. The force density method for form finding and computation of general networks. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. Vol. 3, Issue 1: 115-134
Tracy, C. 2006. Haystack Observatory. DRAGON.
<https://wiki.maxgigapop.net/twiki/bin/view/DRAGON/HaystackObservatory> (Pridobljeno 21. 10. 2014)

Southern Inflatables. 2014.
<http://www.southerninflatables.net/air-supported-structures/> (Pridobljeno 23. 10. 2014)

Teloni Abiti. 2014. Pressostrutture.
<http://www.teloniabiti.com/it/prodotti/pressostrutture/> (Pridobljeno 23. 10. 2014)

Warp and Woof. Wikipedia. 2014.
http://en.wikipedia.org/wiki/Warp_and_woof (Pridobljeno 23. 10. 2014)

SEZNAM PRILOG

Priloga A: Hilti Design Report

PRILOGA A: HILTI DESIGN REPORT

(ta stran je namenoma prazna)

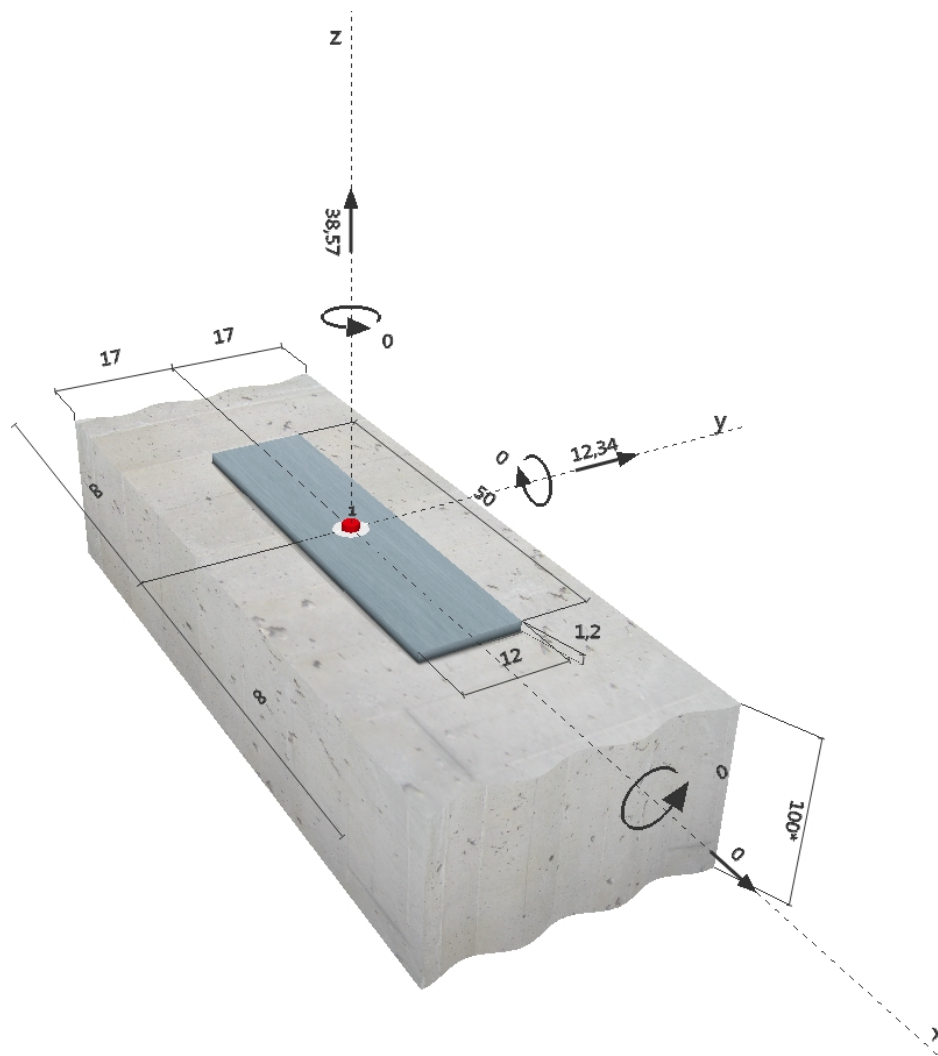
www.hilti.com

Company:
 Specifier: Gorazd Brglez
 Address:
 Phone | Fax:
 E-Mail: gorazd.brglez@gmail.com

Page: 1
 Project: Objekt Ljubljana
 Sub-Project | Pos. No.:
 Date: 14.10.2014

Specifier's comments:
1 Input data

Anchor type and diameter: HSA NG M20 hnom3
Dynamic set or any suitable annular gap filling solution
 Effective embedment depth: $h_{ef} = 11,5 \text{ cm}$, $h_{nom} = 13,0 \text{ cm}$
 Material:
 Evaluation Service Report: ETA 11/0374
 Issued | Valid: 19.7.2012 | 19.7.2017
 Proof: design method ETAG (No. 001 Annex C/2010)
 Stand-off installation: $e_b = 0,0 \text{ cm}$ (no stand-off); $t = 1,2 \text{ cm}$
 Anchor plate: $l_x \times l_y \times t = 50,0 \text{ cm} \times 12,0 \text{ cm} \times 1,2 \text{ cm}$; (Recommended plate thickness: not calculated)
 Profile: no profile
 Base material: uncracked concrete, C30/37, $f_{cc} = 37,00 \text{ N/mm}^2$; $h = 100,0 \text{ cm}$
 Reinforcement: no reinforcement or reinforcement spacing $\geq 150 \text{ mm}$ (any \emptyset) or $\geq 100 \text{ mm}$ ($\emptyset \leq 10 \text{ mm}$)
 no longitudinal edge reinforcement
 Reinforcement to control splitting according to ETAG 001, Annex C, 5.2.2.6 present.


Geometry [cm] & Loading [kN, kNm]


Company:
 Specifier: Gorazd Brglez
 Address:
 Phone | Fax: |
 E-Mail: gorazd.brglez@gmail.com

Page: 2
 Project: Objekt Ljubljana
 Sub-Project | Pos. No.:
 Date: 14.10.2014

2 Load case/Resulting anchor forces

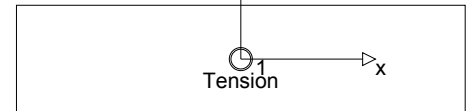
Load case: Design loads

Anchor reactions [kN]

Tension force: (+Tension, -Compression)

Anchor	Tension force	Shear force	Shear force x	Shear force y
1	38,570	12,340	0,000	12,340

max. concrete compressive strain: - [%]
 max. concrete compressive stress: - [N/mm²]
 resulting tension force in (x/y)=(0,0/0,0): 38,570 [kN]
 resulting compression force in (x/y)=(0,0/0,0): 0,000 [kN]



3 Tension load (ETAG, Annex C, Section 5.2.2)

	Load [kN]	Capacity [kN]	Utilization β_N [%]	Status
Steel Strength*	38,570	88,500	44	OK
Pullout Strength*	N/A	N/A	N/A	N/A
Concrete Breakout Strength**	38,570	49,519	78	OK
Splitting failure**	38,570	61,502	63	OK

* anchor having the highest loading **anchor group (anchors in tension)

3.1 Steel Strength

$N_{Rk,s}$ [kN]	$\gamma_{M,s}$	$N_{Rd,s}$ [kN]	N_{Sd} [kN]
123,900	1,400	88,500	38,570

3.2 Concrete Breakout Strength

$A_{c,N}$ [cm ²]	$A_{c,N}^0$ [cm ²]	$c_{cr,N}$ [cm]	$s_{cr,N}$ [cm]	$\psi_{s,N}$	$\psi_{re,N}$	k_1
1173,00	1190,25	17,3	34,5	0,995	1,000	10,100
$e_{c1,N}$ [cm]	$\psi_{ec1,N}$	$e_{c2,N}$ [cm]	$\psi_{ec2,N}$	$\psi_{s,N}$	$\psi_{re,N}$	k_1
0,0	1,000	0,0	1,000	0,995	1,000	10,100
$N_{Rk,c}^0$ [kN]	$\gamma_{M,c}$	$N_{Rd,c}$ [kN]	N_{Sd} [kN]			
75,765	1,500	49,519	38,570			

3.3 Splitting failure

$A_{c,N}$ [cm ²]	$A_{c,N}^0$ [cm ²]	$c_{cr,sp}$ [cm]	$s_{cr,sp}$ [cm]	$\psi_{h,sp}$	$\psi_{s,N}$	$\psi_{re,N}$	k_1
1360,00	1600,00	20,0	40,0	1,500	0,995	1,000	10,100
$e_{c1,N}$ [cm]	$\psi_{ec1,N}$	$e_{c2,N}$ [cm]	$\psi_{ec2,N}$	$\psi_{s,N}$	$\psi_{re,N}$	k_1	
0,0	1,000	0,0	1,000	0,995	1,000	10,100	
$N_{Rk,c}^0$ [kN]	$\gamma_{M,sp}$	$N_{Rd,sp}$ [kN]	N_{Sd} [kN]				
75,765	1,500	61,502	38,570				

Company:
 Specifier: Gorazd Brglez
 Address:
 Phone | Fax: |
 E-Mail: gorazd.brglez@gmail.com

Page: 3
 Project: Objekt Ljubljana
 Sub-Project | Pos. No.:
 Date: 14.10.2014

4 Shear load (ETAG, Annex C, Section 5.2.3)

	Load [kN]	Capacity [kN]	Utilization β_v [%]	Status
Steel Strength (without lever arm)*	12,340	68,640	18	OK
Steel failure (with lever arm)*	N/A	N/A	N/A	N/A
Pryout Strength**	12,340	173,317	8	OK
Concrete edge failure in direction y+**	12,340	37,603	33	OK

* anchor having the highest loading **anchor group (relevant anchors)

4.1 Steel Strength (without lever arm)

$V_{Rk,s}$ [kN]	$\gamma_{M,s}$	$V_{Rd,s}$ [kN]	V_{Sd} [kN]
85,800	1,250	68,640	12,340

4.2 Pryout Strength

$A_{c,N}$ [cm ²]	$A_{c,N}^0$ [cm ²]	$c_{cr,N}$ [cm]	$s_{cr,N}$ [cm]	k-factor	
1173,00	1190,25	17,3	34,5	3,500	
$e_{c1,v}$ [cm]	$\psi_{ec1,N}$	$e_{c2,v}$ [cm]	$\psi_{ec2,N}$	$\psi_{s,N}$	$\psi_{re,N}$
0,0	1,000	0,0	1,000	0,995	1,000
$N_{Rk,c}^0$ [kN]	$\gamma_{M,c,p}$	$V_{Rd,c1}$ [kN]	V_{Sd} [kN]		
75,765	1,500	173,317	12,340		

4.3 Concrete edge failure in direction y+

l_f [cm]	d_{nom} [cm]	k_1	α	β	
11,5	2,00	2,400	0,082	0,065	
c_1 [cm]	$A_{c,v}$ [cm ²]	$A_{c,v}^0$ [cm ²]			
17,0	1300,50	1300,50			
$\psi_{s,v}$	$\psi_{h,v}$	$\psi_{\alpha,v}$	$e_{c,v}$ [cm]	$\psi_{ec,v}$	$\psi_{re,v}$
1,000	1,000	1,000	0,0	1,000	1,000
$V_{Rk,c}^0$ [kN]	$\gamma_{M,c}$	$V_{Rd,c}$ [kN]	V_{Sd} [kN]		
56,404	1,500	37,603	12,340		

5 Combined tension and shear loads (ETAG, Annex C, Section 5.2.4)

β_N	β_v	α	Utilization $\beta_{N,v}$ [%]	Status
0,779	0,328	1,500	88	OK

$$\beta_N^{\alpha} + \beta_v^{\alpha} \leq 1$$

6 Displacements (highest loaded anchor)

Short term loading:

N_{Sk} = 28,570 [kN]	δ_N = 1,7625 [cm]
V_{Sk} = 9,141 [kN]	δ_v = 0,4291 [cm]
	δ_{Nv} = 1,8139 [cm]

Long term loading:

N_{Sk} = 28,570 [kN]	δ_N = 2,1335 [cm]
V_{Sk} = 9,141 [kN]	δ_v = 0,6529 [cm]
	δ_{Nv} = 2,2312 [cm]

Comments: Tension displacements are valid with half of the required installation torque moment for uncracked concrete! Shear displacements are valid without friction between the concrete and the anchor plate! The gap due to the drilled hole and clearance hole tolerances are not included in this calculation!

The acceptable anchor displacements depend on the fastened construction and must be defined by the designer!

Company:
Specifier: Gorazd Brglez
Address:
Phone | Fax: |
E-Mail: gorazd.brglez@gmail.com

Page: 4
Project: Objekt Ljubljana
Sub-Project | Pos. No.:
Date: 14.10.2014

7 Warnings

- Load re-distributions on the anchors due to elastic deformations of the anchor plate are not considered. The anchor plate is assumed to be sufficiently stiff, in order not to be deformed when subjected to the loading!
- Checking the transfer of loads into the base material is required in accordance with ETAG 001, Annex C(2010)Section 7! The software considers that the grout is installed under the anchor plate without creating air voids and before application of the loads.
- The design is only valid if the clearance hole in the fixture is not larger than the value given in Table 4.1 of ETAG 001, Annex C! For larger diameters of the clearance hole see Chapter 1.1. of ETAG 001, Annex C!
- The design method ETAG (filled holes) assumes that no hole clearance between the anchors and the fixture is present. This can be achieved by filling the gap with mortar of sufficient compressive strength (e.g. by using the Hilti Dynamic Set) or by other suitable means
- The accessory list in this report is for the information of the user only. In any case, the instructions for use provided with the product have to be followed to ensure a proper installation.

Fastening meets the design criteria!

www.hilti.com

Company:
 Specifier: Gorazd Brglez
 Address:
 Phone | Fax: |
 E-Mail: gorazd.brglez@gmail.com

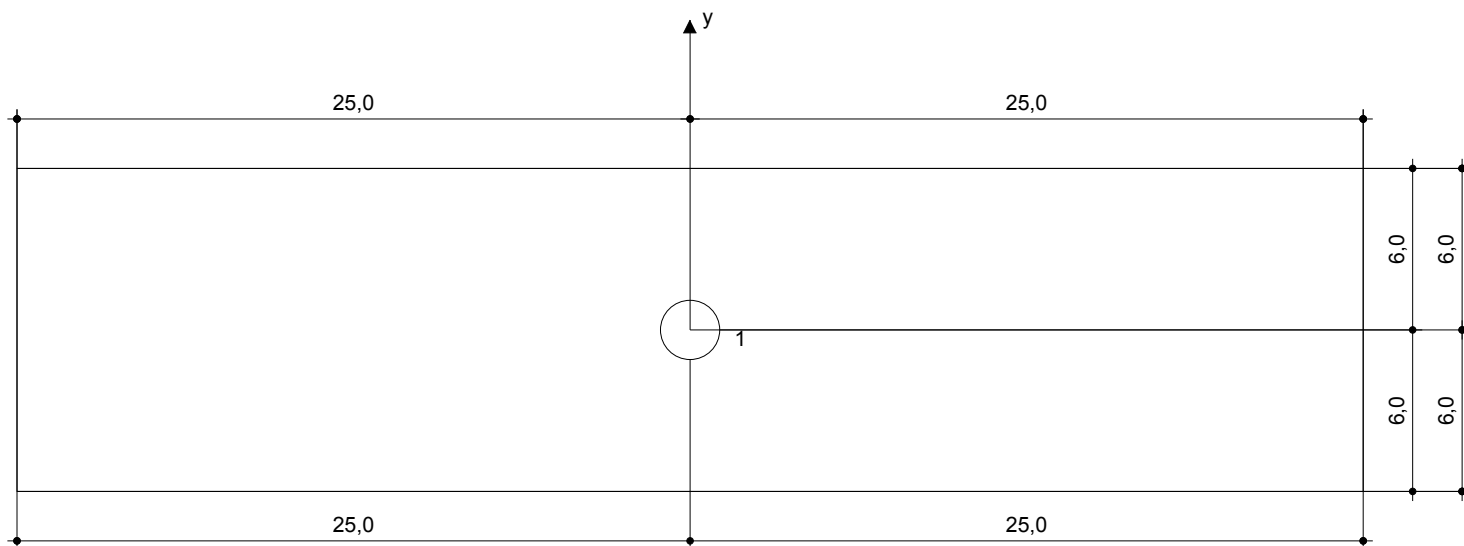
Page: 5
 Project: Objekt Ljubljana
 Sub-Project | Pos. No.:
 Date: 14.10.2014

8 Installation data

Anchor plate, steel: -	Anchor type and diameter: HSA NG M20 hnom3
Profile: no profile; 0,0 x 0,0 x 0,0 cm	Installation torque: 0,200 kNm
Hole diameter in the fixture: $d_f = 2,2$ cm	Hole diameter in the base material: 2,0 cm
Plate thickness (input): 1,2 cm	Hole depth in the base material: 13,8 cm
Recommended plate thickness: not calculated	Minimum thickness of the base material: 22,0 cm
Cleaning: Manual cleaning of the drilled hole according to instructions for use is required.	

8.1 Required accessories

Drilling	Cleaning	Setting
<ul style="list-style-type: none"> • Suitable Rotary Hammer • Properly sized drill bit 	<ul style="list-style-type: none"> • Manual blow-out pump 	<ul style="list-style-type: none"> • Dynamic set • Installation torque control bar with suitable screw driver or torque wrench • Hammer



Coordinates Anchor [cm]

Anchor	x	y	C_{-x}	C_{+x}	C_{-y}	C_{+y}
1	0,0	0,0	-	-	17,0	17,0

Company:
Specifier: Gorazd Brglez
Address:
Phone | Fax: |
E-Mail: gorazd.brglez@gmail.com

Page: 6
Project: Objekt Ljubljana
Sub-Project | Pos. No.:
Date: 14.10.2014

9 Remarks; Your Cooperation Duties

- Any and all information and data contained in the Software concern solely the use of Hilti products and are based on the principles, formulas and security regulations in accordance with Hilti's technical directions and operating, mounting and assembly instructions, etc., that must be strictly complied with by the user. All figures contained therein are average figures, and therefore use-specific tests are to be conducted prior to using the relevant Hilti product. The results of the calculations carried out by means of the Software are based essentially on the data you put in. Therefore, you bear the sole responsibility for the absence of errors, the completeness and the relevance of the data to be put in by you. Moreover, you bear sole responsibility for having the results of the calculation checked and cleared by an expert, particularly with regard to compliance with applicable norms and permits, prior to using them for your specific facility. The Software serves only as an aid to interpret norms and permits without any guarantee as to the absence of errors, the correctness and the relevance of the results or suitability for a specific application.
- You must take all necessary and reasonable steps to prevent or limit damage caused by the Software. In particular, you must arrange for the regular backup of programs and data and, if applicable, carry out the updates of the Software offered by Hilti on a regular basis. If you do not use the AutoUpdate function of the Software, you must ensure that you are using the current and thus up-to-date version of the Software in each case by carrying out manual updates via the Hilti Website. Hilti will not be liable for consequences, such as the recovery of lost or damaged data or programs, arising from a culpable breach of duty by you.