

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta stavební

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2020

Bc. Zbyněk Zajac



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

**ANALÝZA MEMBRÁNOVÝCH KONSTRUKCÍ
S RESPEKTOVÁNÍM VÝSTAVBY VE FÁZÍCH**

ANALYSIS OF MEMBRANE STRUCTURES WITH RESPECT TO CONSTRUCTION
STAGES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Zbyněk Zajac

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

M.Eng. Ing. ROSTISLAV LANG, Ph.D.

BRNO 2020



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav stavební mechaniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Zbyněk Zajac
Název	Analýza membránových konstrukcí s respektováním výstavby ve fázích
Vedoucí práce	M.Eng. Ing. Rostislav Lang, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2020
Datum odevzdání	15. 1. 2021

V Brně dne 31. 3. 2020

prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a výpočtem membránové konstrukce. Na membránovém zastřešení kónického tvaru byl demonstrován postup návrhu lehké a vzdušné konstrukce v programu RFEM. Konstrukce byla poté zatížena ve virtuálním větrném tunelu programu RWIND. Výsledky byly srovnány s hodnotami uvedenými v odborné literatuře. Vznikl tak ucelený návod doplněný o obecně platné poznatky, který lze využít při návrhu podobných konstrukcí. Následně byl s využitím již zmíněných poznatků demonstrován vliv konstrukčních fází na výsledný stav vnitřních sil. Právě membránové konstrukce jsou velmi citlivé na postup výstavby, jelikož není možné předeptnout všechna membránová pole najednou. Byl využit program od společnosti DLUBAL software s.r.o., který umožňuje provést form-finding v jednotlivých fázích výstavby.

KLÍČOVÁ SLOVA

membránová konstrukce, předpětí, form-finding, stříhové vzory, konstrukční fáze

ABSTRACT

This diploma thesis deals with problem of design and calculation of membrane structure. Design proces of light and airy structure was demonstrated on conical shaped roof in the finite element analysis program RFEM. The structure was loaded in the virtual wind tunnel in the program RWIND. Results were compared with the values given in the literature. A comprehensive guide for the design of membrane structures has been created. Subsequently, the influence of design stages on the internal forces was demonstrated. Membrane structures are very sensitive to construction stages, because it is not possible to prestress all membrane surfaces at once. Program by DLUBAL software s.r.o. was used for form-finding analysis during construction stages.

KEYWORDS

membrane construction, prestress, form-finding, cutting pattern, construction stages

ZAJAC, Zbyněk. *Analýza membránových konstrukcí s respektováním výstavby ve fázích*. Brno, 2021, 120 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky. Vedoucí práce: M.Eng. Ing. Rostislav Lang, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval M.Eng. Ing. Rostislavu Langovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné připomínky k práci. Jsem vděčný za jeho zájem a optimismus, kterým mne od začátku povzbuzoval. Také děkuji firmě Dlubal Software s.r.o. za možnost využití nejnovějších verzí programů, technickou podporu a pomoc. V neposlední řadě bych zde rád poděkoval své rodině, přátelům a studijní skupině Raketáci, kteří mě po celou dobu studia nezištně podporovali.

Brno

.....

podpis autora

Obsah

Úvod	13
I Teoretická část	14
1 Membránová architektura	15
1.1 Historie	15
1.2 Tvarová typologie	15
1.2.1 Základní tvary	16
1.3 Membránové materiály	17
1.3.1 Folie	17
1.3.2 Tkanina	17
1.4 Form-finding	19
1.4.1 Metody řešení a jejich vývoj	20
1.4.2 Force density method	21
1.4.3 Assumed geometric stiffness method (AGSM)	21
1.4.4 Updated reference strategy (URS)	22
1.5 Střihové vzory	22
1.5.1 Proces zploštění	23
1.6 Návrh membránových konstrukcí	25
II Praktická část	27
2 Membránové zastřešení přístaviště	28
2.1 Výpočetní model	29
2.2 Síť konečných prvků	32
2.3 Form-finding	33
2.3.1 Nastavení výpočtu	33
2.3.2 První volba předpětí	34
2.3.3 Druhá volba předpětí	36
2.4 Generování střihových vzorů	39
2.4.1 První volba dělení	39
2.4.2 Druhá volba dělení	41
2.4.3 Srovnání dělení	42
2.5 Statická analýza	45
2.5.1 Zatížení sněhem	45
2.5.2 Zatížení větrem stanovené normovým výpočtem	47

2.5.3	Zatížení větrem stanovené numerickým výpočtem	51
2.5.4	Srovnání výpočetních metod pro zatížení větrem	56
3	Membránové zastřešení tribuny	57
3.1	Výpočetní model	58
3.2	Sít konečných prvků	61
3.3	Form-finding	61
3.3.1	Předpětí bez zohlednění fází výstavby	62
3.4	Fáze výstavby	65
3.4.1	První varianta fází výstavby	66
3.4.2	Druhá varianta fází výstavby	70
3.4.3	Diskuze výsledků	74
3.5	Statická analýza	75
3.5.1	Zatížení sněhem	75
3.5.2	Zatížení větrem	78
4	Závěr	84
	Literatura	86
	Seznam příloh	88
A	Tlak větru na membránovou konstrukci v programu RWIND	89
B	Fáze výstavby varianta A	93
C	Fáze výstavby varianta B	107

Seznam obrázků

1.1	Frei Otto: Experiment s mýdlovými bublinami [8]	15
1.2	Tvarová typologie [16]	16
1.3	Výroba tkané membrány [16]	17
1.4	Důkaz anizotropního chování [16]	18
1.5	Biaxiální zkušební zařízení a pracovní diagram testu [16]	18
1.6	Vývoj a kategorie metod pro form-finding s klíčovými referencemi [17]	20
1.7	Schéma rozdělení membránové plochy na stříhové vzory [16]	22
1.8	Zakřivené segmenty: nahoře synklastický tvar, dole antiklastický [16]	23
1.9	Konfigurace pro generování stříhových vzorů [5]	24
1.10	Kolaps membránové střechy v Minneapolis [13]	25
1.11	Poškození membránové střechy železniční stanice Drážďany [9]	26
2.1	Membránová konstrukce v přístavišti Brněnské přehrady	28
2.2	Detaily membránové konstrukce u Brněnské přehrady	29
2.3	Model membránové konstrukce: detail podpor a jejich souřadných systémů	30
2.4	Model membránové konstrukce: pohled ve směru osy Y	31
2.5	Model membránové konstrukce: pohled ve směru osy X	31
2.6	Sít konečných prvků membránové konstrukce	32
2.7	Kolabující tvar membránové konstrukce při použití standardní metody	33
2.8	Výpočetní model membránové konstrukce	34
2.9	Form-finding první varianty předpjaté konstrukce: hlavní vnitřní síla n_1	35
2.10	Form-finding první varianty předpjaté konstrukce: hlavní vnitřní síla n_2	35
2.11	Form-finding první varianty předpjaté konstrukce: sklon plochy	36
2.12	Form-finding druhé varianty předpjaté konstrukce: hlavní vnitřní síla n_1	37
2.13	Form-finding druhé varianty předpjaté konstrukce: hlavní vnitřní síla n_2	37
2.14	Form-finding druhé varianty předpjaté konstrukce: sklon plochy	38
2.15	Stříhový vzor membránové konstrukce u Brněnské přehrady	39
2.16	První volba dělení: poměrná deformace ve směru x	40
2.17	První volba dělení: poměrná deformace ve směru y	40
2.18	Druhá volba dělení: poměrná deformace ve směru x	41
2.19	Druhá volba dělení: poměrná deformace ve směru y	42
2.20	První volba dělení: detail poměrné deformace ve směru x	43
2.21	Druhá volba dělení: detail poměrné deformace ve směru x	43

2.22	Stříhový vzor modelované membránové konstrukce	44
2.23	Zatížení membránové konstrukce sněhem: hlavní vnitřní síla n_1	46
2.24	Zatížení membránové konstrukce sněhem: hlavní vnitřní síla n_2	46
2.25	Zatížení membránové konstrukce sněhem: sklon	47
2.26	Zóny pro určení součinitele tlaku c_p na konstrukci kónického tvaru [7]	48
2.27	Rozdělení zatížení na výpočtovém modelu dle [7]	49
2.28	Zatížení membránové konstrukce větrem dle [7]: hlavní vnitřní síla n_1	50
2.29	Zatížení membránové konstrukce větrem dle [7]: hlavní vnitřní síla n_2	50
2.30	Numerická analýza proudění: rychlostní pole	51
2.31	Numerická analýza proudění: proudnice v pohledu ve směru osy X . .	52
2.32	Numerická analýza proudění: proudnice v izometrickém pohledu . . .	53
2.33	Numerická analýza proudění: tlak větru pod úhlem 0°	54
2.34	Numerická analýza proudění: rozložení zatížení (0°)	55
2.35	Numerická analýza proudění: hlavní vnitřní síla n_1 (0°)	55
2.36	Numerická analýza proudění: hlavní vnitřní síla n_2 (0°)	56
3.1	Membránové zastřešení tribuny [1]	57
3.2	Detail membránového zastřešení tribuny [1]	58
3.3	Membránové zastřešení tribuny: rozměry konstrukce	59
3.4	Membránové zastřešení tribuny: rozměry NURBS křivky	59
3.5	Membránové zastřešení tribuny: pohled ve směru osy X	60
3.6	Membránové zastřešení tribuny: půdorys	60
3.7	Membránové zastřešení tribuny: síť konečných prvků na vybraném poli	61
3.8	Membránové zastřešení tribuny: předpětí prvního pole	62
3.9	Membránové zastřešení tribuny: hlavní vnitřní síla n_1	63
3.10	Membránové zastřešení tribuny: globální deformace u	63
3.11	Membránové zastřešení tribuny: normálová síla N	64
3.12	Membránové zastřešení tribuny: sklon pole	64
3.13	Membránové zastřešení: 1. fáze výstavby, normálová síla N	66
3.14	Varianta A: 9. fáze výstavby, hlavní vnitřní síla n_1	67
3.15	Varianta A: 9. fáze výstavby, hlavní vnitřní síla n_2	67
3.16	Varianta A: 9. fáze výstavby, normálová síla N	68
3.17	Varianta A: 17. fáze výstavby, hlavní vnitřní síla n_1	68
3.18	Varianta A: 17. fáze výstavby, hlavní vnitřní síla n_2	69
3.19	Varianta A: 17. fáze výstavby, normálová síla N	69
3.20	Varianta B: 9. fáze výstavby, hlavní vnitřní síla n_1	70
3.21	Varianta B: 9. fáze výstavby, hlavní vnitřní síla n_2	71
3.22	Varianta B: 9. fáze výstavby, normálová síla N	71
3.23	Varianta B: 17. fáze výstavby, hlavní vnitřní síla n_1	72
3.24	Varianta B: 17. fáze výstavby, hlavní vnitřní síla n_2	72

3.25	Varianta B: 17. fáze výstavby, normálová síla N	73
3.26	Membránové zastřešení: zatížení sněhem, hlavní vnitřní síla n_1	76
3.27	Membránové zastřešení: zatížení sněhem, hlavní vnitřní síla n_2	76
3.28	Membránové zastřešení: zatížení sněhem, normálová síla N	77
3.29	Membránové zastřešení: zatížení sněhem, sklon	77
3.30	Membránové zastřešení: směr zatížení větrem	78
3.31	Membránové zastřešení: zatížení větrem proti směru globální osy Y .	79
3.32	Zatížení větrem proti směru globální osy Y , hlavní vnitřní síla n_1 . .	80
3.33	Zatížení větrem proti směru globální osy Y , hlavní vnitřní síla n_2 . .	80
3.34	Zatížení větrem proti směru globální osy Y , normálová síla N	81
3.35	Membránové zastřešení: zatížení větrem ve směru globální osy Y . . .	81
3.36	Zatížení větrem ve směru globální osy Y , hlavní vnitřní síla n_1	82
3.37	Zatížení větrem ve směru globální osy Y , hlavní vnitřní síla n_2	82
3.38	Zatížení větrem ve směru globální osy Y , normálová síla N	83
A.1	Numerická analýza v programu RWIND: tlak větru pod úhlem 45° . .	89
A.2	Numerická analýza v programu RWIND: tlak větru pod úhlem 90° . .	90
A.3	Numerická analýza v programu RWIND: tlak větru pod úhlem 135° .	90
A.4	Numerická analýza v programu RWIND: tlak větru pod úhlem 180° .	91
A.5	Numerická analýza v programu RWIND: tlak větru pod úhlem 225° .	91
A.6	Numerická analýza v programu RWIND: tlak větru pod úhlem 270° .	92
A.7	Numerická analýza v programu RWIND: tlak větru pod úhlem 315° .	92
B.1	Varianta A: 2. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2	93
B.2	Varianta A: 3. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2	94
B.3	Varianta A: 4. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2	95
B.4	Varianta A: 5. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2	96
B.5	Varianta A: 6. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2	97
B.6	Varianta A: 7. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2	98
B.7	Varianta A: 8. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2	99
B.8	Varianta A: 10. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2	100
B.9	Varianta A: 11. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2	101
B.10	Varianta A: 12. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2	102
B.11	Varianta A: 13. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2	103
B.12	Varianta A: 14. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2	104
B.13	Varianta A: 15. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2	105
B.14	Varianta A: 16. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2	106
C.1	Varianta B: 2. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2	107
C.2	Varianta B: 3. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2	108
C.3	Varianta B: 4. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2	109
C.4	Varianta B: 5. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2	110

C.5	Varianta B: 6. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2	111
C.6	Varianta B: 7. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2	112
C.7	Varianta B: 8. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2	113
C.8	Varianta B: 10. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2	114
C.9	Varianta B: 11. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2	115
C.10	Varianta B: 12. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2	116
C.11	Varianta B: 13. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2	117
C.12	Varianta B: 14. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2	118
C.13	Varianta B: 15. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2	119
C.14	Varianta B: 16. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2	120

Seznam tabulek

1.1	Klasifikace polyesterových tkanin pokrytých PVC [7]	19
2.1	Součinitel tlaku pro kónické tvary [7]	48
3.1	Pořadí napínání ploch membránového zastřešení tribuny	65
3.2	Hodnoty součinitele tlaku c_p dle experimentů ve větrném tunelu [7]	78

Úvod

Cílem této diplomové práce bylo shrnout poznatky o membránových konstrukcích a vytvořit návod, dle kterého by mohl čtenář provést návrh konstrukce podobného tvaru.

Po staletí byly membrány využívány pro zastřešení malých konstrukcí. Teprve v minulém století byl potenciál těchto konstrukcí řádně rozvinut. Malá tloušťka membrány umožňuje navrhnout tvary, kterých bychom s využitím klasických materiálů stěží dosáhli. Nejenže jsou tyto střechy lehké a vzdušné, ale i pevné a únosné. Při správném návrhu je limitujícím faktorem pouze architektova představivost.

Tyto konstrukce jsou navrhovány velice často na dobře viditelných místech, jelikož svým tvarem dokonale podtrhují vzhled přilehlé budovy či parku. Nynější doba směřuje k ekologii, jednoduchosti a minimalizaci, a to přesně membránová zastřešení splňují. Tyto konstrukce, ať už dočasné či stálé, umožňují kromě jiného efektivně využít zastřešený prostor, jelikož není třeba tolik podpor jako u konvenčních budov.

I přes velký rozmach membránových konstrukcí neexistuje evropská norma, která by návrh a posouzení zastřešila. Vznikla alespoň obecná doporučení [7], která napomáhají při volbě parametrů. Statik musí při své práci vycházet hlavně ze zkušeností a konstrukci navrhnout s citem. Nepatrné změny tvaru a předpětí často vedou k naprosto odlišným výsledkům. Z toho důvodu byly v teoretické části práce tyto poznatky shrnuty a sepsány v chronologickém pořadí, včetně příkladů špatně navržených střech.

Doposud opomíjenou částí návrhu bylo zohlednění výpočtu v konstrukčních fázích. Výsledné rozložení sil v konstrukci je totiž ovlivněno pořadím napínání membrán. Ačkoliv by se mohlo zdát, že rozdíly budou nepatrné, není tomu tak. Druhý příklad v praktické části byl vytvořen ve dvou verzích za účelem demonstrace významu zohlednění konstrukčních fází.

Část I

Teoretická část

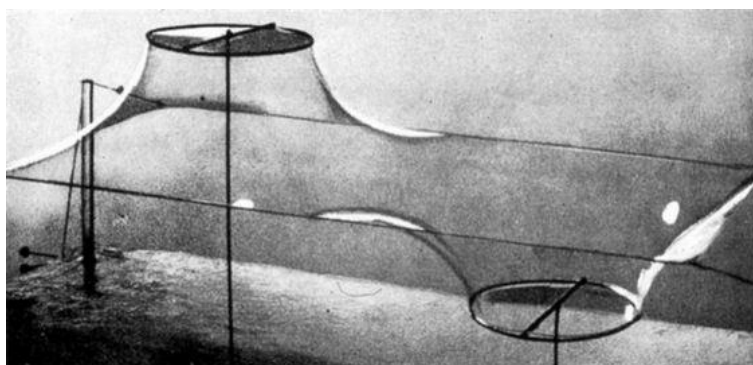
1 Membránová architektura

1.1 Historie

Ačkoli by se mohlo zdát, že vzhledem k náročnosti výpočtu a výstavby jsou membránové konstrukce záležitostí moderní doby, není tomu tak. Bylo dokázáno, že již ve starověkém období byly využívány tkané materiály pro zastřešení jednoduchých příbytků a stanů. Později byla využívána textilní zastřešení jako ochrana proti slunečnímu záření.

Ve 20. století byl zaznamenán největší rozmach lanových konstrukcí. Zprvu byla při návrhu velkých zastřešení využívána nosná lana. Tyto konstrukce využívaly tuhosti plochy dvojí křivosti vzniklé křížením lan. Díky vývoji v oblasti nosných textilních materiálů došlo k rozšíření membránových střech z tenké textilie. Tenká, ale pevná membrána se stala součástí nosné konstrukce. [11]

Bezpochyby největším průkopníkem dnešní doby v oblasti aplikace membránových konstrukcí je architekt, pedagog a teoretik Frei Otto. Proslul především svými experimenty na mýdlových bublinách a drátěných modelech. Tyto techniky mu pomáhaly odhalit optimální tvary navrhovaných konstrukcí.[14] Jeden z jeho experimentů je zachycen na obrázku 1.1.



Obr. 1.1: Frei Otto: Experiment s mýdlovými bublinami [8]

1.2 Tvarová typologie

Textilní membrány se aktivně zapojují do nosného systému v případě, že je vhodně zvolen tvar konstrukce. Subtilní membrána přenáší pouze tahová namáhání. Dvousměrným zakřivením je dosaženo stabilního tvaru. [11]

1.2.1 Základní tvary

Rozbor základních modelů mechanicky vypínaných konstrukcí zobrazených na obrázku 1.2 je uveden v následujících odstavcích.

Kónický tvar

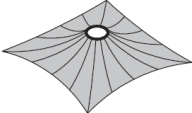
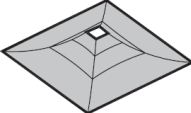
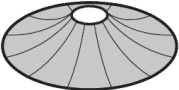
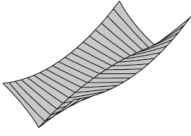
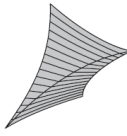
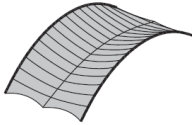
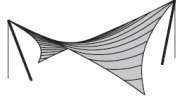
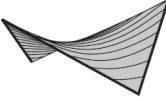
Pokud dva kruhy odlišného průměru ve zvolené vzdálenosti spojuje membrána, vznikne kónická plocha. Tah způsobený větrným zatížením je přenášen v tangenciálním směru. Naopak v radiálním směru je přenášen tlak od zatížení větrem a sněhem. [11]

Sedlo

Dvousměrné zakřivení zajišťují oblouky po stranách konstrukce. Membrána vypnutá mezi oblouky tak vytvoří tvar zachycený na obrázku 1.2 ve druhém řádku tabulky.

Hyperbolický paraboloid

V případě vypnutí membrány mezi čtyři body, které neleží v jedné rovině, vznikne tvar dvojí křivosti. Ten je v případě provedení dvou k sobě kolmých řezů plochou v jednom směru konvexní a v druhém konkávní. [11] Konvexní směr přenáší tlak větru a tíhu sněhu. Naopak konkávní směr přenáší sání větru.

Kónický tvar			
Sedlo			
Hyperbolický paraboloid			

Obr. 1.2: Tvarová typologie [16]

1.3 Membránové materiály

Materiály používané pro výstavbu membránových konstrukcí bychom mohli rozdělit do následujících kategorií.

1.3.1 Folie

První kategorií jsou průhledné ETFE¹, PES² či polykarbonátové fólie. Ty lze použít bez dodatečného vyztužení lankovou sítí pouze pro menší rozpory. Využívané jsou především u pneumatických polštářů. Jako architektonické prvky se používají v kombinaci se skleněnou fasádou z estetických důvodů.

1.3.2 Tkanina

Tento typ membrány je tvořen tkaným materiálem, který je pokryt chemicky odlišnou ochrannou vrstvou. Vlákná zaručují výsledné tkanině pevnost a normálovou tuhost. Zatímco ochranná vrstva zaručuje odolnost vůči klimatickým podmínkám a UV záření. Nejznámější kombinace materiálů jsou například polyesterová tkanina pokrytá polyvinylchloridem či tkanina ze skleněných vláken pokrytá polytetrafluorethylenem. Dále se také používá tkanina ze skleněných vláken pokrytá silikonem a PTFE vlákna potažená polytetrafluorethylenem.[7]



Obr. 1.3: Výroba tkané membrány [16]

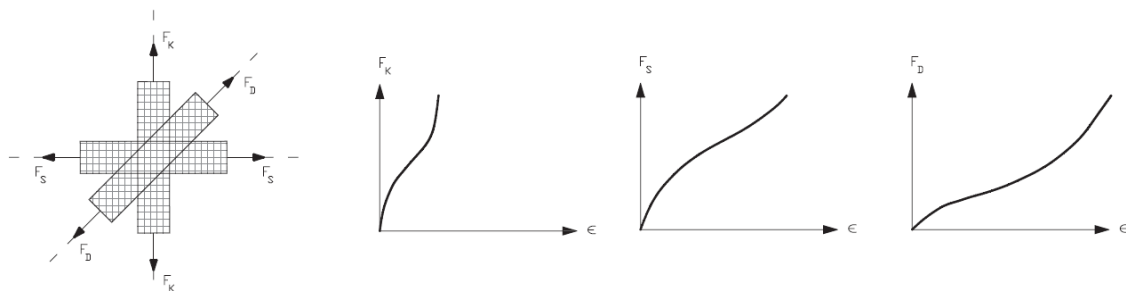
Mechanické vlastnosti

Potažené textilie se vyznačují anizotropním, nelineárním a neelastickým chováním. Normálová tuhost membrány v tahu je ve skutečnosti proměnná v závislosti na stavu

¹ethylen-tetrafluorethylen kopolymer

²polyethersulfon

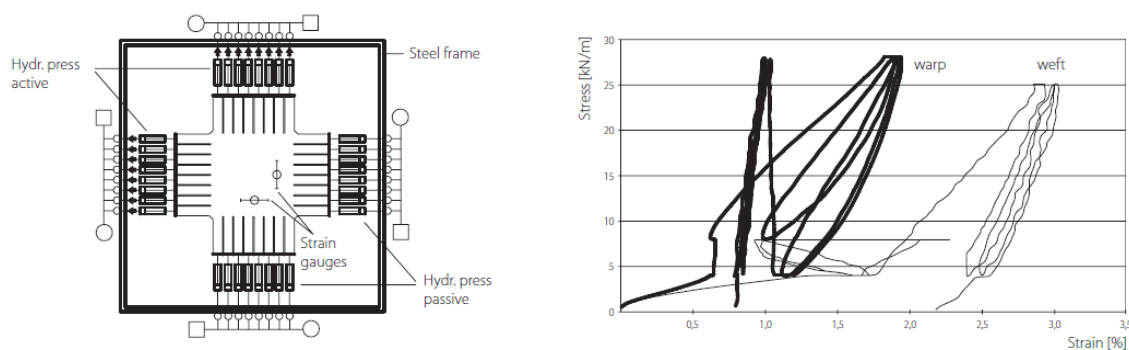
napjatosti. Pevnost materiálu může dosahovat až 260 kNm^{-1} . Anizotropní chování je způsobeno procesem výroby, při kterém se napínají vlákna osnovy a mezi ně se vplétají vlákna útku.[11] Důkazem anizotropního chování je záznam ze zkoušky na obrázku 1.4. Diagramy zachycují vztah působící síly a přetvoření, který závisí na směru působení zatížení. Z tohoto důvodu je nutné uvádět technické parametry, jako jsou pevnost a tuhost vyrobené membrány, společně se směrem.



Obr. 1.4: Důkaz anizotropního chování [16]

Zkoušení materiálů

Za účelem vyhodnocení mechanických vlastností materiálů jsou membrány podrobeny nejrůznějším zkouškám. Základními testy jsou uniaxiální a biaxiální zkoušky. Během nich jsou v požadovaných směrech měřena protažení pomocí tenzometrů. [11] Na obrázku 1.5 lze vidět zkušební zařízení pro biaxiální test. Vpravo je pak zachycen vypočtený pracovní diagram závislosti napětí na poměrném přetvoření.



Obr. 1.5: Biaxiální zkušební zařízení a pracovní diagram testu [16]

Uniaxiálními testy se ověřují krátkodobá chování jako jsou tahová pevnost materiálových přípojí, zátěžový deformační test a test přilnavosti. Z dlouhodobých chování jsou to pak tahová pevnost a zkouška dotvarování a relaxace

V rámci biaxiálních testů jsou vyhodnocována krátkodobá chování materiálu ze zkoušky tuhosti, smykové zkoušky, kompenzačního testu a zkoušky šíření trhliny. V případě dlouhodobého chování se pak jedná o zkoušku dotvarování a relaxace. [16]

Polyesterová tkanina pokrytá PVC

Jelikož existuje řada výrobců tohoto typu materiálu s unikátními vlastnostmi, byly vytvořeny klasifikace v rámci Working group for architecture at Messe Frankfurt a French design guide. V následující tabulce 1.1 byly shrnuty typy tkanin s ochrannou vrstvou z PVC. Jednotlivé typy se odlišují objemovou hmotností a únosností.

Tab. 1.1: Klasifikace polyesterových tkanin pokrytých PVC [7]

		I	II	III	IV	V
Objemová	$[\text{g}/\text{m}^2]$	800	900	1050	1300	1450
hmotnost						
Pevnost	$[\text{kN}/\text{m}]$	60/60	88/79	115/102	149/128	195/165
v tahu						
Smyková	$[\text{N}]$	310/350	520/580	800/950	1100/1400	1600/1800
pevnost						

1.4 Form-finding

Od doby, kdy Antoni Gaudí modeloval své stavby pomocí zavěšených lan, se možnosti návrhu konstrukcí v mnohém posunuly. Rozvoj počítačových technologií umožnil zautomatizovat doposud ruční výpočty a zefektivnit dřívější postupy. Práci, která by dříve zabrala týdny, je nyní možné s použitím výpočetní techniky zvládnout v řádu hodin či dní.

V případě lehkých membránových konstrukcí se namáhání přenáší pouze silami v rovině. Oproti konvenčním budovám nemají membránové konstrukce žádnou ohybovou tuhost. Platí zde jednoduché pravidlo, že tvar následuje sílu a naopak. Výsledný tvar není předem známý. Cesta hledání vhodného tvaru se nazývá form-finding. [17]

Obecná formulace problému form-finding využívá variační formulace principu virtuální práce 1.1. Na rozdíl od standardní analýzy kontinua zde však existuje podstatný rozdíl a to ten, že výsledné napětí není závislé na materiálových vlastnostech,

jelikož je předpokládáno jako vstupní parametr úlohy. Napětí je tedy obecně nezávislé na deformaci, avšak deformace vycházejí z definovaného napětí. Rovnice také zahrnuje externí zatížení v daném směru. [5]

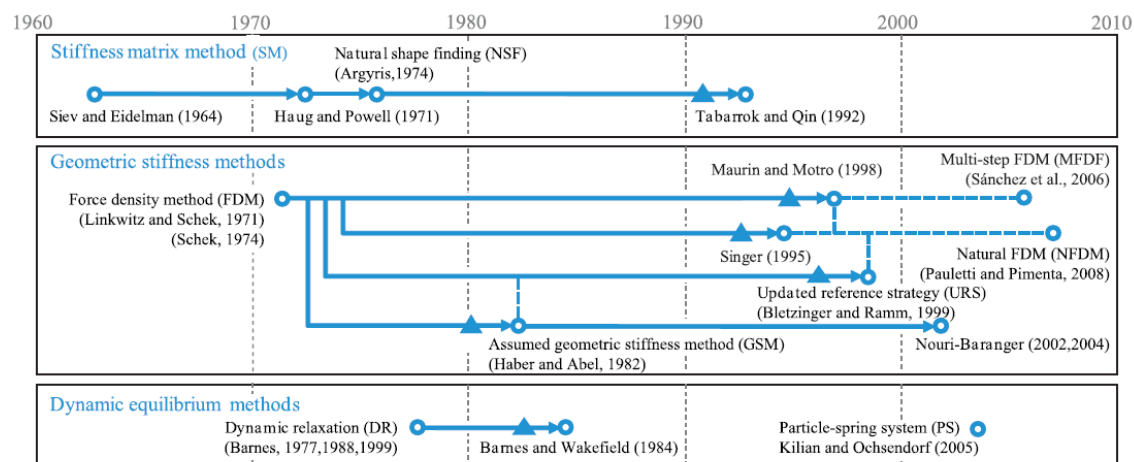
$$-\delta W = \delta W^{int} - \delta W^{ext} = t \cdot \int_{\Omega} \sigma : \delta \hat{e} \, d\Omega - \int_{\Omega} \vec{p} \cdot \delta u \, d\Omega = 0 \quad (1.1)$$

V rovnici 1.1 značí δW změnu virtuální práce, t tloušťku plochy, σ Cauchyho tenzor napětí, $\delta \hat{\epsilon}$ přírůstek Euler-Almansiho tenzoru deformace, $\vec{p}$ vnější zatížení, δu přírůstek deformace a Ω plochu.

Při hledání tvaru plochy je nejprve definován konečný stav napětí a až poté je stanoven rovnovážný stav. Tento postup lze označit jako inverzní ke klasické statické analýze. Přímé řešení této rovnice je singulární. Z tohoto důvodu byly vytvořeny stabilizační metody, které vedou na odlišné metody hledání tvaru. [5]

1.4.1 Metody řešení a jejich vývoj

Vývoj v oblasti lehkých membránových konstrukcí přinesl mnohé teorie. Dřívější metody hledání tvaru pracovaly s lanovými sítěmi. Až později byly tyto teorie rozšířeny o plošné prvky. V zásadě by se tyto metody daly rozdělit do následujících kategorií. [17] Vývoj jednotlivých metod je shrnut na obrázku 1.6. Šipky znázorňují generační potomky, tečkované čáry nezávislé, ale související metody a trojúhelníky značí vznik první formulace zahrnující 2D prvky.



Obr. 1.6: Vývoj a kategorie metod pro form-finding s klíčovými referencemi [17]

Stiffness matrix methods

Nejstarší metody hledání tvaru jsou založeny na standardních elastických a geometrických maticích tuhosti. Nevýhodou je, že zahrnují materiálové vlastnosti, což může vést k vyšším výpočetním nárokům a problémům s konvergencí.

Geometric stiffness methods

Obecně nejrozšířenější metody vycházející z metody hustoty sil jsou nezávislé na materiálu. Závisí pouze na geometrické tuhosti. Mezi nejznámější metody patří Force density method, Assumed geometric stiffness method či Updated reference strategy.

Dynamic equilibrium methods

Poslední kategorií jsou metody, které řeší problém dynamické rovnováhy za účelem nalezení ustáleného stavu. Jde o ekvivalent řešení statické rovnováhy. Tyto metody obsahují mnoho fiktivních parametrů, které je nutno zvolit.

1.4.2 Force density method

Z rovnic rovnováhy uzlů propojených lanovými prvky a ze vztahů mezi délkou a silou v laně byla odvozena metoda hustoty sil. Tato metoda se vyznačuje linearitou a rychlým výpočtem. Mnoho autorů se inspirovalo způsobem výpočtu (obr. 1.6) a rozšířili tuto metodu o vlastní myšlenky. [12] Rovnice rovnováhy pak mohou být zapsány následujícím způsobem, kde $\tilde{\mathbf{C}}$ a $\bar{\mathbf{C}}$ značí sloupce přiřazené k volným a pevným uzlům. Vektor polohy odděluje volné $\tilde{\mathbf{x}}_i$ a pevné $\bar{\mathbf{x}}_i$ uzlové pozice. $\mathbf{R}$ zahrnuje externí zatížení. Diagonální matice $\mathbf{Q}$ obsahuje hustoty sil.

$$\tilde{\mathbf{C}}^T \mathbf{Q} \tilde{\mathbf{C}} \tilde{\mathbf{x}}_i + \tilde{\mathbf{C}}^T \mathbf{Q} \bar{\mathbf{C}} \bar{\mathbf{x}}_i = \tilde{\mathbf{R}}_i \quad (1.2)$$

$$\tilde{\mathbf{D}} \tilde{\mathbf{x}}_i + \bar{\mathbf{D}} \bar{\mathbf{x}}_i = \tilde{\mathbf{R}}_i \quad (1.3)$$

$$\tilde{\mathbf{D}} \tilde{\mathbf{x}}_i = \tilde{\mathbf{R}}_i - \bar{\mathbf{D}} \bar{\mathbf{x}}_i \quad (1.4)$$

1.4.3 Assumed geometric stiffness method (AGSM)

Tato metoda je jedním z generačních potomků odvozených z Force density method. Autoři této metody R. B. Haber a J. F. Abel ji v roce 1982 vyvinuli za účelem implementace chování zakřivených kabelů a membrán s použitím jakéhokoliv typu konečného prvku. Z následující rovnice je vypočten vektor uzlových souřadnic x_{Δ}^k , kde $\mathbf{K}_{AA}$ je submatice matice tuhosti zahrnující volné uzly, $\mathbf{K}_{AB}$ představuje interakci

mezi volnými a pevnými parametry deformace, x_B je pozice známých pevných uzlů a R značí vektor zatížení.

$$\{\mathbf{x}_A\}^k = \left([K_{AA}]_{NL}^{(k-1)}\right)^{-1} \left(-\{\Delta R_A\}^{(k-1)} - [K_{AB}]_{NL}^{(k-1)} \{\mathbf{x}_B\}^k\right) \quad (1.5)$$

1.4.4 Updated reference strategy (URS)

Tvar membránových konstrukcí je dán rovnováhou sil v prostoru. Rovnice 1.6 popisuje virtuální práci s ohledem na neznámou finální pozici. Využívá znalosti finálního rozdělení napětí. Přímé řešení této rovnice není možné, protože v tangenciálním směru neznámé plochy se objeví singularita. [12]

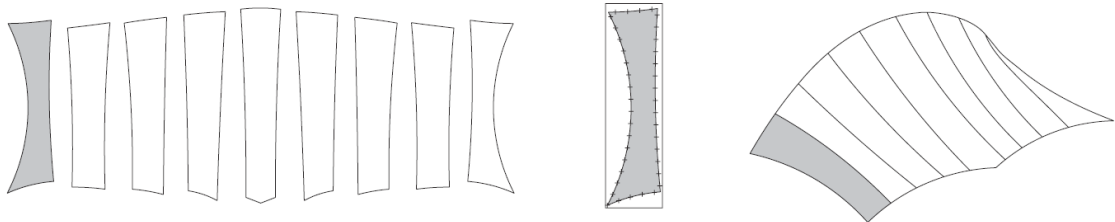
$$\lambda t \int_a \sigma : \delta e \, da + (1 - \lambda) t \int_A S : \delta E \, dA = R \quad (1.6)$$

Homotopní faktor λ vyjadřuje vztah mezi uživatelem předepsaným napětím ve známé a neznámé konfiguraci. Pokud je $\lambda > 0$, pak je řešení nelineární a vyžaduje iterační postup v rámci každého kroku výpočtu. V případě $\lambda = 0$ je metoda lineární v každém kroku výpočtu a principiálně shodná s Assumed geometric stiffness method.

1.5 Střihové vzory

Membránové konstrukce se vyznačují především prostorovým zakřivením. Z toho důvodu není možné rozvinout výsledný tvar do roviny. Pro výrobu membránové konstrukce je tedy zapotřebí rozdělit výsledný tvar na jednotlivé segmenty.

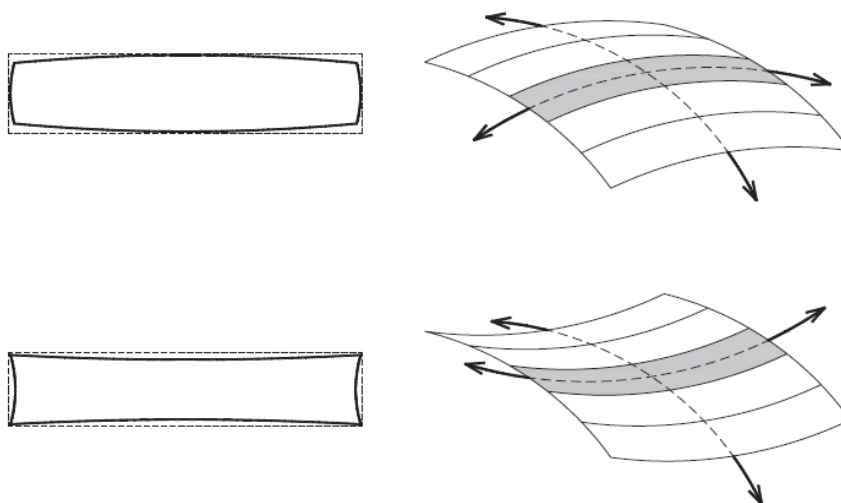
Tento proces sestává obecně ze dvou kroků. Nejdříve je nutné rozdělit 3D povrch za pomoci jednotlivých linií na dílčí 3D střihy bez zásahu do geometrie. V prvním kroku tedy nedojde ke zkreslení. Poté je nutno prostorové dílce aproximovat rovinnými dílci tak, aby došlo k minimalizaci zvoleného funkcionálu (např. rozdíl energií).



Obr. 1.7: Schéma rozdělení membránové plochy na střihové vzory [16]

V praxi se v prvním kroku pro dělení používají nejčastěji geodetické linie nebo průnik se zvolenou rovinou. Geodetické linie jsou definovány jako přímky v zakřivené rovině, což znamená, že po rozvinutí zakřivené rozvinutelné plochy do roviny vznikne z linie přímka. Mezi geodetické linie patří také nejkratší spojnice dvou bodů na povrchu.

Na následujícím obrázku 1.8 jsou zachyceny vytvořené stříhové vzory v závislosti na křivosti plochy. V případě synklastického tvaru, tedy ploch s kladnou Gaussovou křivostí, dojde k vytvoření vypouklých hran. Naopak u antiklastického tvaru, kdy má plocha křivosti opačného znaménka ve vzájemně kolmých směrech (záporná Gaussova křivost), dojde k vytvoření konvexních okrajů.



Obr. 1.8: Zakřivené segmenty: nahoře synklastický tvar, dole antiklastický [16]

1.5.1 Proces zploštění

Ve druhém kroku dojde k aproximaci prostorových dílců. Metody využívané pro zploštění 3D tvaru do 2D plochy jsou zařazeny do dvou kategorií.

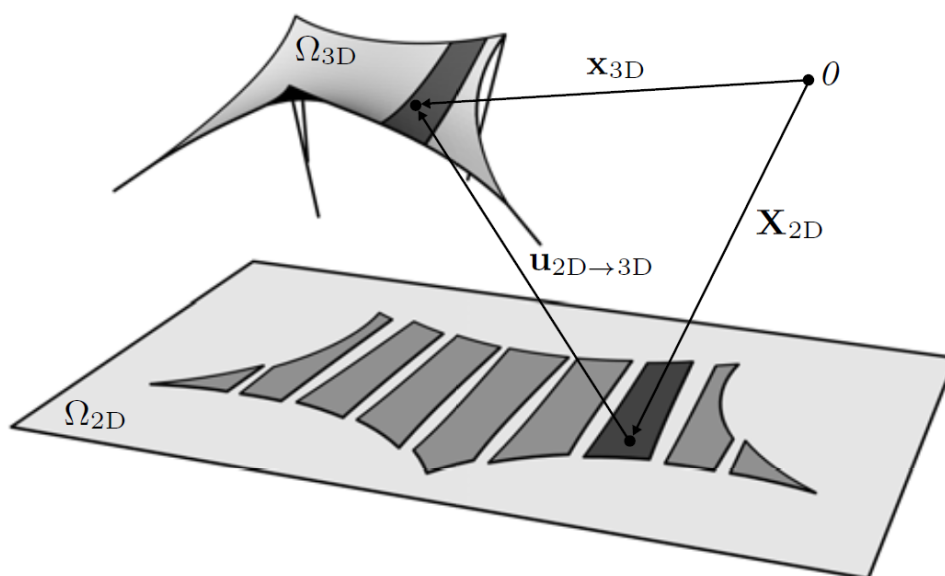
Mezi matematické metody patří geometrická triangulace, která s použitím speciální sítě aproximuje síť konečných prvků. Dále pak matematické zploštění, které využívá skutečnou síť, takže výsledek je přesnější než u předchozí metody. [12]

Druhou skupinou jsou metody fyzikální, které pracují s minimalizací sumy napjatostí či energií. Následující rovnice 1.7 zapsaná v maticové notaci je odvozena z rovnic popisujících rovnováhu mechaniky kontinua. [12]

$$\int_{t_V} {}^t C_t \varepsilon \delta_t \varepsilon^t dV + \int_{t_V} {}^t \sigma \delta_t \eta^t dV = {}^{t+\Delta t} R - \int_{t_V} {}^t \sigma \delta_t \varepsilon^t dV \quad (1.7)$$

Výsledná kvalita stříhových vzorů závisí především na výchozím tvaru prostorového vzoru. Proces je zachycen na obrázku 1.9. Vhodnou kombinací matematického a fyzikálního procesu lze dosáhnout optimální kombinace rychlosti a přesnosti výpočtu. V první iteraci je provedeno matematické zploštění, které lze chápat jako deformaci v první iteraci následně aplikované fyzikální metody výpočtu. Postupné deformování z prostorové konstrukce by negativně ovlivnilo výpočetní výkon. [12]

Poté, co je získán matematický odhad tvaru, je zahájen proces optimalizace. Procedura je nelineární, jelikož proces doprovází velké deformace. Tento výpočet může být proveden Newton Raphsonovou metodou. Je nutné zavést okrajové podmínky, abychom se vyvarovali singulárnímu řešení. [5]



Obr. 1.9: Konfigurace pro generování stříhových vzorů [5]

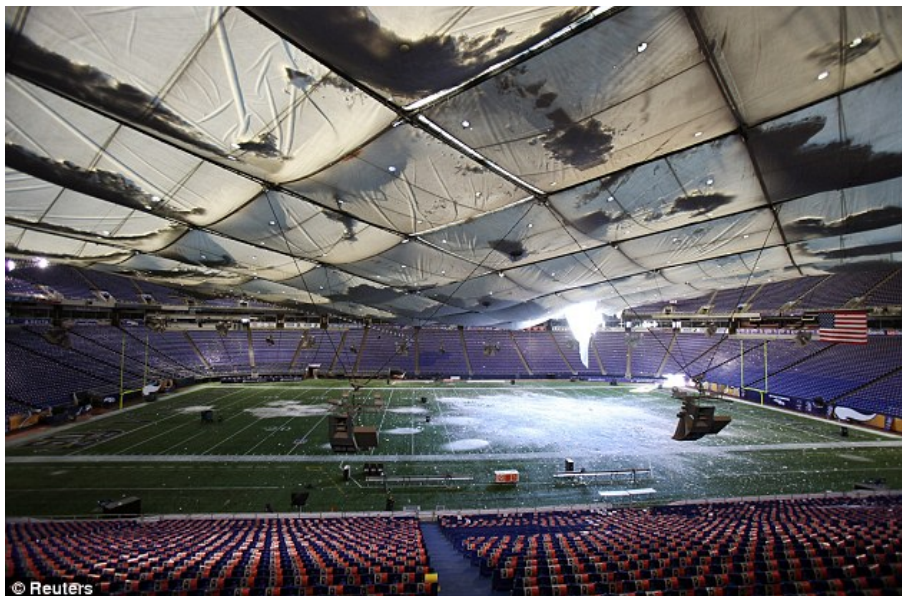
Správný návrh stříhových vzorů je důležitý, jelikož jejich podoba má vliv na kvalitu realizované konstrukce. Návrh lze také optimalizovat z ekonomického hlediska, protože textilie a fólie se vyrábí v rolích s omezenou šířkou. Posledním bodem je estetický vzhled konstrukce. Místa, kde se spojují dva segmenty, ať už svařováním či sešíváním, jsou na ploše dobře viditelná. Proto by měly být umístěny tak, aby neškodily celkovému vzhledu konstrukce.

1.6 Návrh membránových konstrukcí

Při návrhu lehkých membránových konstrukcí je nutné dbát na klimatické vlivy a dočasná zatížení. Membrány nedosahují svého 3D tvaru protažením materiálu, ale vytvořením z jednotlivých dílců. Proto musí mít okraje sousedních stříhů stejnou délku a vlákna stejný směr. Spojení je zajištěno v nenapjatém stavu šitím, svařováním a občas také lepením.

Od začátku návrhu je nutné brát v úvahu montáž celé konstrukce. Ta probíhá podle montážního schématu, které vytvoří projekční firma. Některé konstrukce vyžadují při výstavbě kromě tradičních pomůcek a strojů, jako jsou lešení a jeřáb, také netradiční řešení. S manipulací může pomoci například vrtulník, který dokáže vyzvednout plachtu do potřebné výšky.

Klimatické vlivy jsou dominantní složkou zatížení. V případě nesprávného návrhu hrozí vznik jevu zvaného *ponding effect*. Pokud by se dešťová voda či sníh hromadila na jednom místě, pak by se zde zatížení koncentrovalo. Napětí v membráně v dané kapse by mohlo překročit únosnou mez a konstrukce by se mohla zřítit. Pravděpodobně nejznámějším příkladem je zřícení stadionu v Minneapolis v roce 2010.



Obr. 1.10: Kolaps membránové střechy v Minneapolis [13]

V případě složitých tvarů zastřešení je nutné počítat s odvodem dešťové vody. Z toho důvodu se při návrhu dbá na eliminaci plochých míst při zatížení sněhem. Při velkorozponovém zastřešení je odvodnění často řešeno přímo tvarem konstrukce. Například tvary obráceného kuželu působí esteticky a přitom funkčně. Ačkoli je problém odvodnění vyřešen, vznikl problém s hromaděním sněhu, který dokáže vývod zablokovat. Následné porušení membrány je zachyceno na fotografii 1.11.



Obr. 1.11: Poškození membránové střechy železniční stanice Drážďany [9]

Část II

Praktická část

Druhá část závěrečné práce se věnuje návrhu a analýze dvou odlišných membránových konstrukcí. První z nich se zaměřuje na ucelený popis jednotlivých návrhových a výpočetních kroků, které jsou s tímto typem konstrukcí neododdělitelně spjaté. Tato konstrukce je inspirována membránovou konstrukcí kónického tvaru situovanou v brněnském přístavišti. Druhá membránová konstrukce bude zaměřena na detailní analýzu rozsáhlejší konstrukce se zohledněním fází výstavby.

2 Membránové zastřešení přístaviště

V rámci této kapitoly byl proveden návrh a výpočet konstrukce, která je inspirována zastřešením přístaviště Brněnské přehrady, realizované v roce 2011. Stavba zastřešuje odbavovací prostor výpravny lodí. Svou vzdušností a lehkostí podtrhuje sezónní charakter provozu přilehlých budov. Na obrázku 2.1 lze vidět stav konstrukce na konci léta roku 2020.



Obr. 2.1: Membránová konstrukce v přístavišti Brněnské přehrady

Proces návrhu membránových konstrukcí se od návrhu standardních konstrukcí značně odlišuje. V důsledku fyzikální povahy používaných materiálů není možné tvar těchto konstrukcí definovat bez ohledu na rovnováhu sil v prostoru, což vede na analýzu známou jako form-finding. Druhým specifickým krokem návrhu těchto konstrukcí je nutnost generování a výpočtu stříhových vzorů, ze kterých je konstrukce následně realizována.

Na počátku je vize architekta, který svou skicu předá statikovi. Ten provede zjednodušení na plochy, které vymodeluje ve specializovaném programu. Proces hledání tvaru konstrukce se nazývá form-finding a v současné době existuje několik programů, které tento tvar dokáží najít. Proces návrhu je iterativní proces, jehož výsledkem by mělo být nalezení shody mezi uměleckou představou architekta a technickým pohledem statika. V dalším kroku se konstrukce zatíží klimatickým zatížením a vytvoří se odpovídající kombinace. Po přezkoumání vnitřních sil je nutné rozhodnout, zdali konstrukce přenesle aplikované zatížení a popřípadě se provede zesílení nosných prvků. V posledním kroku se rozdělí membrána na stříhové vzory. Tento krok je důležitý z hlediska realizovatelnosti zastřešení, jelikož se textilie vyrábí v rolích s omezenou šířkou.

Jednotlivé výše zmíněné kroky návrhového procesu budou níže prezentovány na zvolené membránové konstrukci. Jak při návrhu tvaru, tak při tvorbě stříhových vzorů byly vždy provedeny dvě varianty řešení, které jsou vzájemně srovnány.

2.1 Výpočetní model

Výpočetní model byl sestaven na základě rozměrů získaných z veřejně dostupných zdrojů. Projekční firma se nevyjádřila k žádosti ohledně zapůjčení či nahlédnutí do projektové dokumentace. S konstrukcí jsem se také blíže seznámil během léta, kdy je nejvíce využívána. Na následujících obrázcích 2.2 lze vidět detaily konstrukce, které dokazují, že byly dodrženy obecné zásady pro navrhování uvedené v [7]. Jedná se především o zdvojení textilie u vrcholu, kde se nachází největší tahové síly. Dále pak vyztužení v rozích ocelovými prvky a stabilizaci rohu pomocí tlačného sloupu a dvou táhel.

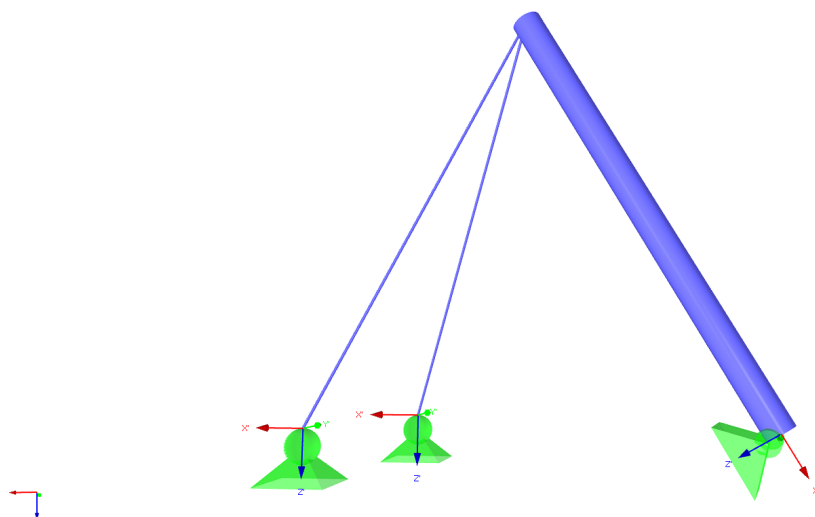


Obr. 2.2: Detaily membránové konstrukce u Brněnské přehrady

Pro modelování a výpočet byl zvolen program RFEM 5 společnosti Dlubal Software s.r.o., který v kombinaci s přídatnými moduly RF-FORM-FINDING a RF-CUTTING-PATTERN poskytuje komplexní nástroj pro návrh a analýzu těchto typů konstrukce.

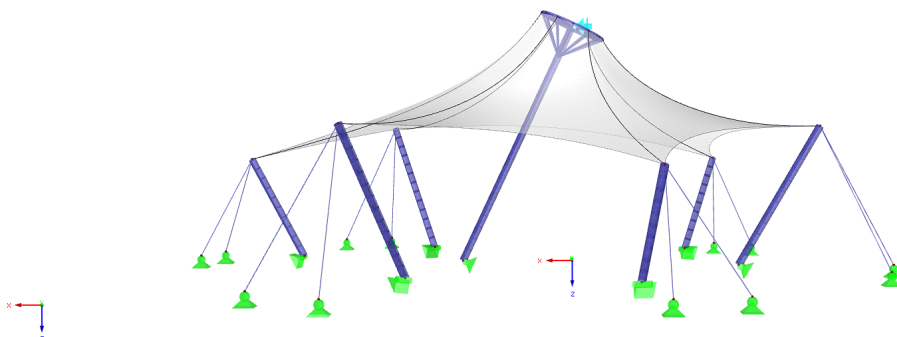
Při modelování byl nejprve navržen tvar střešní konstrukce. Středový sloup svírá s vertikální osou úhel 25° . Jeho průřez, stejně jako průřezy ostatních sloupů na konstrukci, byl zadán jako kruhový o průměru 219,1 mm s tloušťkou stěny 6,3 mm. Vytužení otvoru bylo provedeno dvanácti prutovými prvky v rovině otvoru a dalšími dvanácti skloněnými vzpěrami o kruhovém profilu s průměrem 60,3 mm a tloušťkou stěny 4,0 mm. Tyto vzpěry podporují ocelový prvek z pásoviny, který ohraničuje plochu textilie u horního okraje. Ten má tloušťku 20,0 mm a výšku 100,0 mm. Ohraničení ploch u dolního okraje je tvořeno ocelovými lany o průměru 10,0 mm. Pro textilií byl zvolen materiál PVC typ IV dle tabulky 1.1. Všechny ocelové prvky na konstrukci byly modelovány z oceli S235.

Každý z rohů membránové konstrukce byl podepřen tlačným sloupem a dvěma táhly. Podpory jsou zadány v lokálním souřadném systému jednotlivých sloupů, což umožnilo simulovat čepové spojení se základovou konstrukcí. Je tedy umožněno pootočení kolem lokální osy Y sloupu, aby se mohl celý sloup při vnášení napětí naklápět dle potřeby. Detail podpor s jejich souřadnými systémy je zachycen na obrázku 2.3. Lana jsou ukotvena ve všech třech směrech. Průměr kotevních lan je 22 mm.

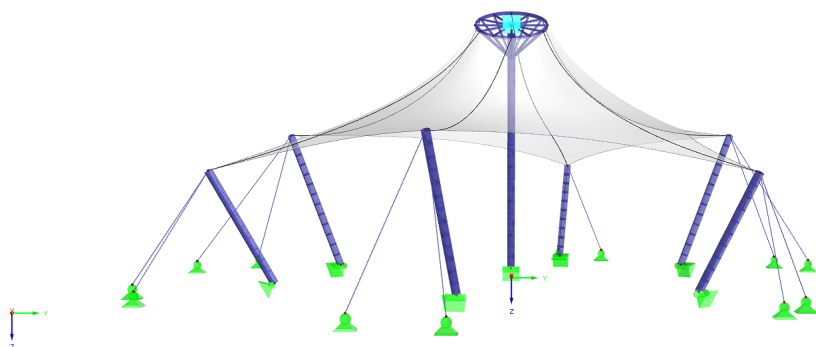


Obr. 2.3: Model membránové konstrukce: detail podpor a jejich souřadných systémů

Na obrázcích 2.4 a 2.5 je zachycen pohled na konstrukci ve směrech globální osy X a Y numerického modelu.



Obr. 2.4: Model membránové konstrukce: pohled ve směru osy Y



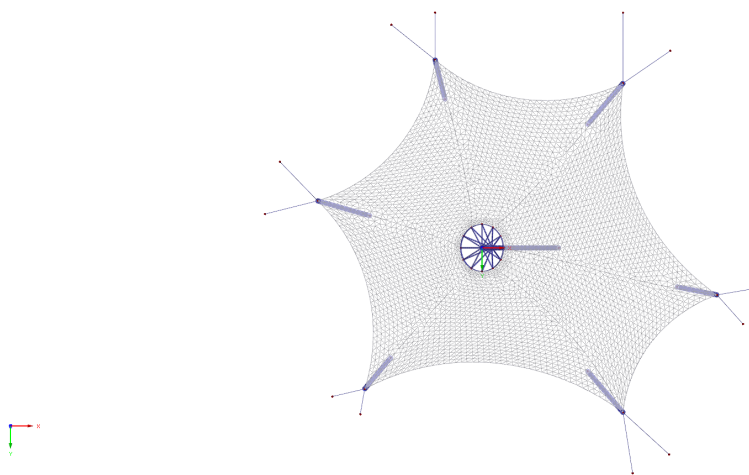
Obr. 2.5: Model membránové konstrukce: pohled ve směru osy X

V rámci této práce byl navržen výše zmíněný podpůrný systém. Dále budou prezentovány jednotlivé kroky návrhu a analýzy zvolené konstrukce.

2.2 Síť konečných prvků

Základem metody konečných prvků je diskretizace spojitého modelu na konečný počet prvků a následné řešení uzlových deformací. V případě membránových konstrukcí jsou konečné prvky zpravidla trojúhelníkové. Důležitým parametrem přesnosti analýzy je velikost konečných prvků. Příliš velké prvky neposkytují dostatečnou aproximaci přesného řešení. Naopak velké množství malých prvků nadměrně prodlužuje čas výpočtu bez dalšího přínosu.

Velikost prvků sítě výše uvedené konstrukce byla podrobena analýze. Prvky byly postupně zmenšovány o 50 mm a výsledky napětí zaznamenávány. Výsledná velikost prvků 250 mm byla zvolena v důsledku malé změny výsledků mezi dvěma následujícími výpočty. Tento rozdíl byl 1,20 % a byl zkoumán při hledání tvaru konstrukce. Výsledná síť konečných prvků je zobrazena na obrázku 2.6. Tento numerický model je složen z 656 1D a 7212 2D prvků, počet uzlů je 4106.



Obr. 2.6: Síť konečných prvků membránové konstrukce

2.3 Form-finding

Prvním krokem návrhu membránových konstrukcí je analýza tvaru vycházející ze zvoleného předpětí a definovaných okrajových podmínek.

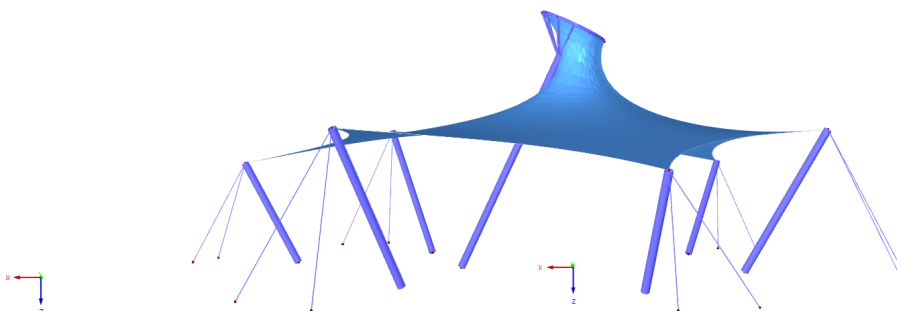
2.3.1 Nastavení výpočtu

Výpočetní metoda

V programu RFEM jsou dostupné dvě metody pro definici předpětí v rámci procesu form-finding. Pro analyzovanou konstrukci byla zvolena projekční metoda [12], která je vhodná pro kónické tvary. V tomto případě se předpětí n_x, n_y předepisuje v projekční rovině, ze které se transformuje do roviny prvku v prostoru n'_x, n'_y . Projekční metoda adaptuje napětí v membráně za účelem obrany proti kolapsu tvaru.

Naopak v případě standardní metody se předepisuje výsledné předpětí, které je v membráně požadováno. Problém nastává u výpočtu kónických tvarů, kdy dojde k tzv. zaškrčení membrány u vrcholu. [6]

Na obrázku 2.7 lze pozorovat důsledek špatné volby výpočetní metody.

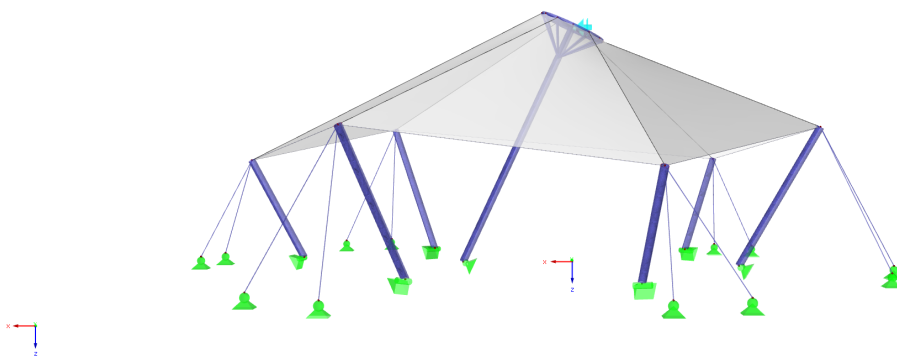


Obr. 2.7: Kolabující tvar membránové konstrukce při použití standardní metody

Předpětí

Vstupním parametrem pro výpočet je definované předpětí. Hodnota definovaná v projekční rovině může být v obou směrech stejná, ale i velmi rozdílná. Proto byly vytvořeny dvě varianty, na kterých lze rozdíly pozorovat. Form-finding samozřejmě zahrnuje do výpočtu také lana na okrajích ploch a rovněž celou podpůrnou konstrukci. Lanům je v procesu form-finding možné nastavit buď požadavek na geometrii, anebo výslednou sílu. Pro potřeby práce byl použit požadavek na výsledný průvřez o hodnotě 15 %.

Z důvodu simulace podepření centrálního sloupu při výstavbě a napínání byla do modelu přidána dočasná podpora ve vrcholu sloupu. Její barva je pro odlišení na obrázku 2.8 modrá. Tato podpora omezuje pohyb pouze ve vodorovné rovině XY. Je důležité zdůraznit, že tato podpora je přirozenou součástí i při samotné realizaci konstrukce, protože během procesu napínání musí být středový sloup kotven. To zcela odpovídá napínání při procesu form-finding a tomu, že bez podepření by středový sloup nebyl stabilní.

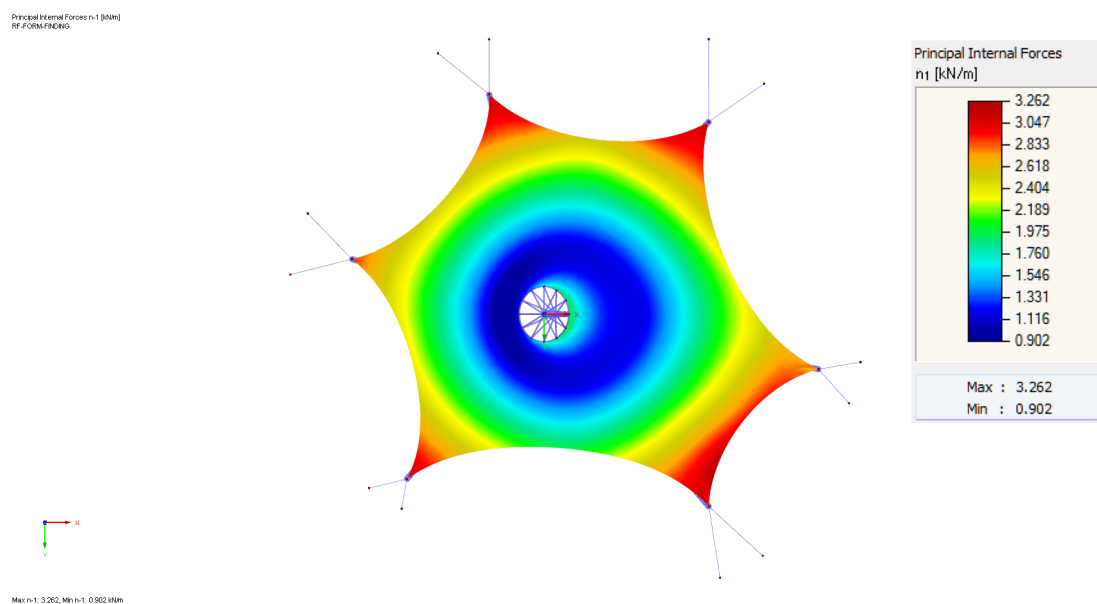


Obr. 2.8: Výpočetní model membránové konstrukce

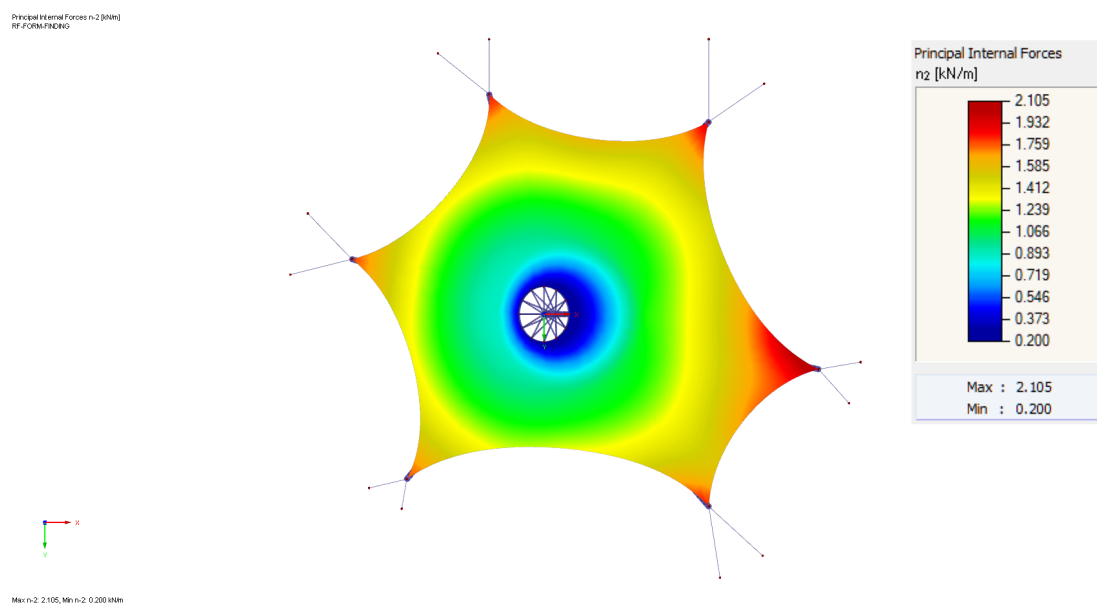
2.3.2 První volba předpětí

První variantou je anizotropní předpětí v projekční rovině s hodnotami $1,0 \text{ kNm}^{-1}$ v radiálním a $2,5 \text{ kNm}^{-1}$ v tangenciálním směru vztaženému k normále definující projekční rovinu samotnou. Z řady možností byly tyto hodnoty vybrány, protože reprezentují velikost rozsahu, ze kterého se hodnota předpětí obvykle volí. Zvolené rozpětí aplikovaného předpětí je závislé na volbě materiálu, ze kterého bude membrána vyrobena. [7]

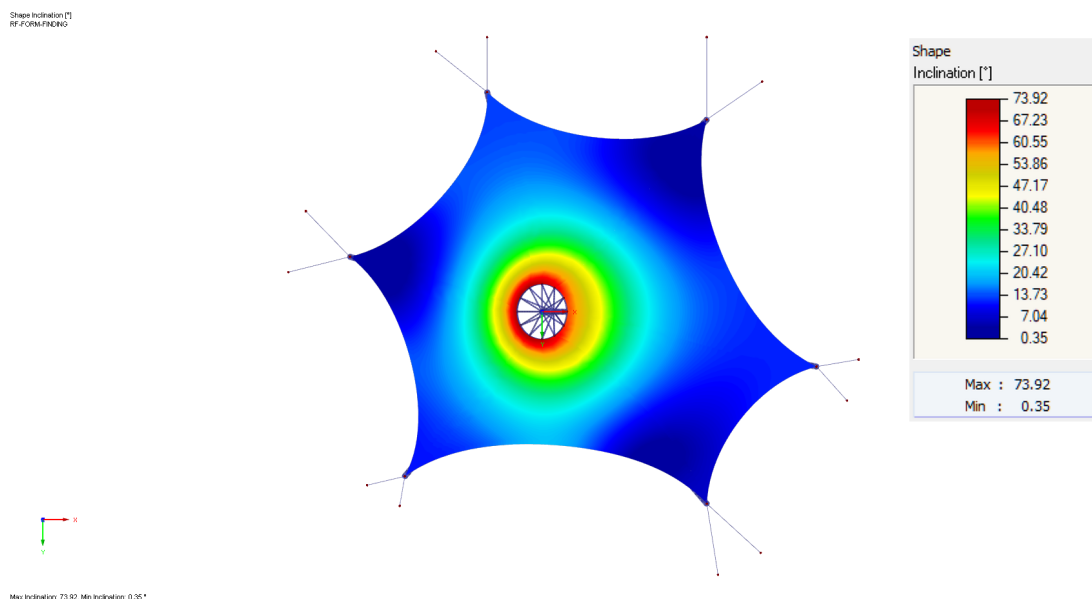
Následující obrázky zachycují hlavní vnitřní síly n_1 a n_2 . Na obrázku 2.9 lze pozorovat velmi nerovnoměrné rozložení vnitřních sil. V rozích tak vznikají extrémy, které by bylo nutné řešit zdvojením membrány či nahrazením ocelovým prvkem. V druhém případě (2.10) je rozložení o něco rovnoměrnější, nicméně stále nevhodné. Výsledný sklon (2.11) je zde velmi vysoký a po diskuzi byl tento způsob předpětí vyloučen.



Obr. 2.9: Form-finding první varianty předpjaté konstrukce: hlavní vnitřní síla n_1



Obr. 2.10: Form-finding první varianty předpjaté konstrukce: hlavní vnitřní síla n_2



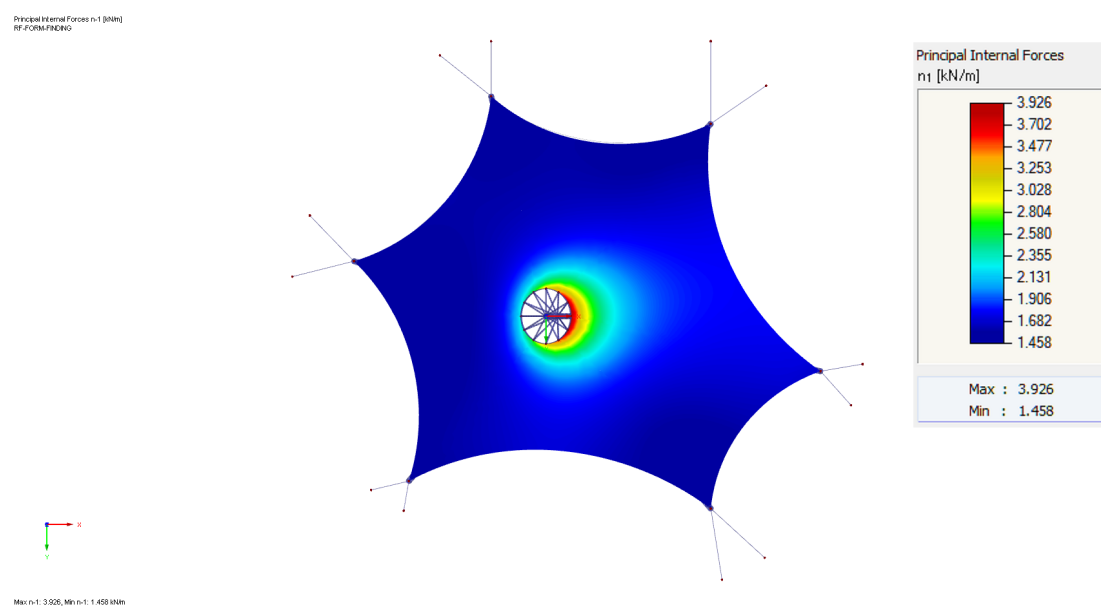
Obr. 2.11: Form-finding první varianty předpjeté konstrukce: sklon plochy

2.3.3 Druhá volba předpětí

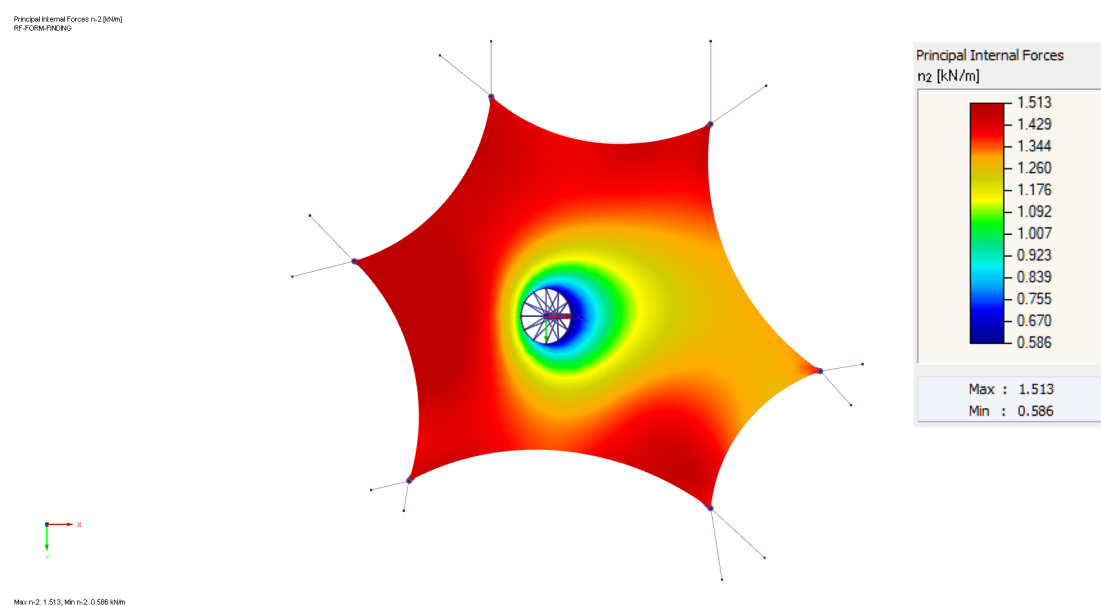
Ve druhé variantě je použito izotropní předpětí definované pro zvolenou projekční rovinu. Hodnoty byly postupně vylučovány a jako nejlepší se jevílo nastavení na $1,5 \text{ kNm}^{-1}$. Nutno dodat, že v důsledku projekce předpětí z definiční roviny dojde k nalezení tvaru s obecným anizotropním předpětím v prostorové poloze konstrukce.

Z obrázku 2.12 je patrné, že síly jsou rovnoměrněji rozloženy oproti obrázku 2.9. Extrém vzniká pouze u vrcholu kužele. V těchto místech je koncentrace napětí nevyhnutelná, a proto se vrchol membrány zesiluje dvojitou vrstvou textilie. Plocha je ukončena ocelovým prvkem, který zajistí stálost kruhového otvoru a přenesení síly z plochy do podpůrné konstrukce viz 2.2. U spodních okrajů nevznikají žádné extrémy, proto není nutno tyto oblasti zesilovat. Sklon je v tomto případě mírnější a dle obrázku 2.14 nevznikají žádné oblasti, kde by se mohla hromadit voda či nečistoty.

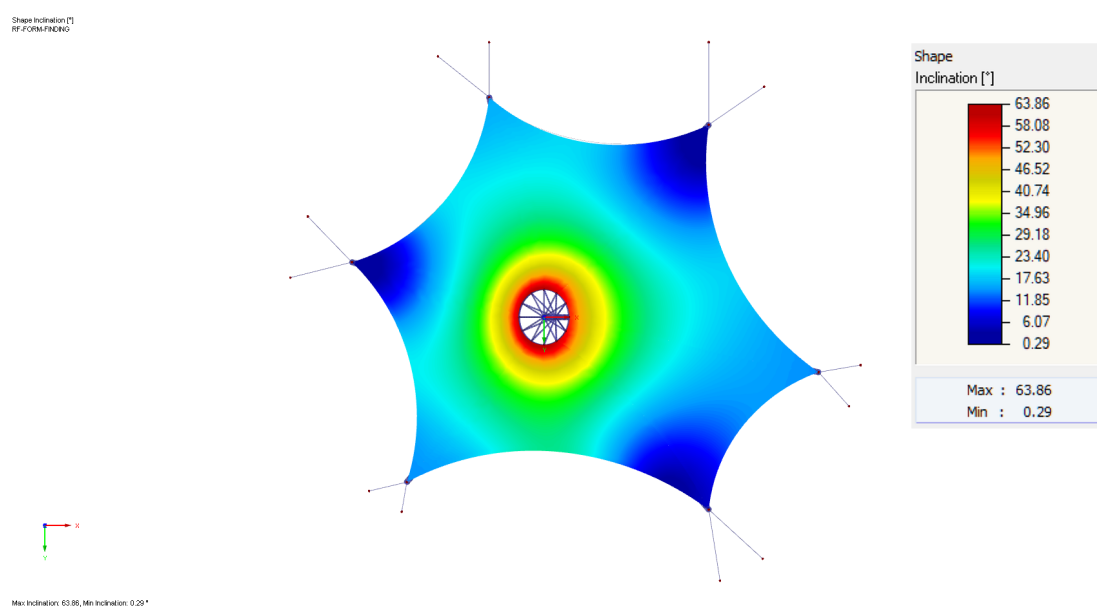
Tento způsob a hodnota předpětí byla vyhodnocena jako nejlepší pro danou konstrukci. Proto se v dalších výpočtech aplikuje vnější zatížení právě na tento tvar vyvolaný výše uvedeným předpětím.



Obr. 2.12: Form-finding druhé varianty předpjaté konstrukce: hlavní vnitřní síla n_1



Obr. 2.13: Form-finding druhé varianty předpjaté konstrukce: hlavní vnitřní síla n_2



Obr. 2.14: Form-finding druhé varianty předpjaté konstrukce: sklon plochy

2.4 Generování stříhových vzorů

Neméně důležitým bodem je návrh stříhových vzorů. Výsledný tvar plochy nelze vyrobit z jednoho kusu textilie, a proto je nezbytné provést rozdělení na jednotlivé segmenty, viz obrázek 2.15. Proces generování stříhových vzorů se principiálně skládá ze dvou kroků. Prvním krokem je definice řezných linií, druhým proces zploštění prostorových stříhů do stříhů rovinných.



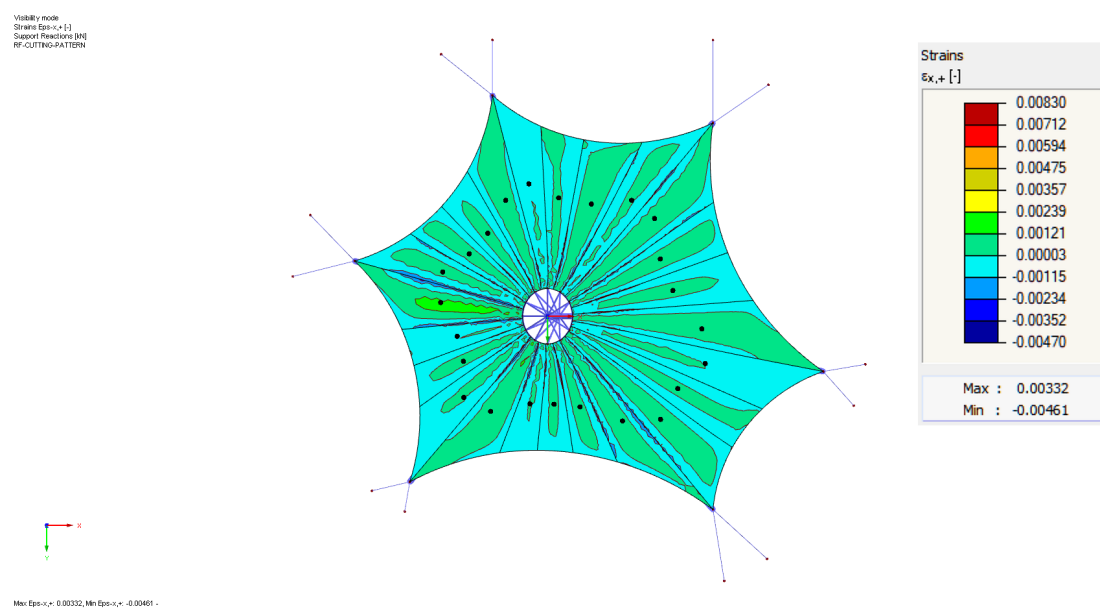
Obr. 2.15: Stříhový vzor membránové konstrukce u Brněnské přehrady

Byly vyhotoveny dvě varianty s ohledem na maximální šířku pruhu. Jak bylo uvedeno dříve, textilie se vyrábí v rolích s omezenou šířkou. Proto bylo zvoleno dělení plochy po přibližně 15° a 10° . Dělení bylo provedeno geodetickou čarou, což je přímá čára v tangenciálním směru zakřivené roviny. Byla také dodržena zásada, že do cípů membrány musí vést spoj stříhů. [7] V následujících sekcích byla sjednocena barevná škála výsledků za účelem jednoduššího srovnání poměrných deformací segmentů.

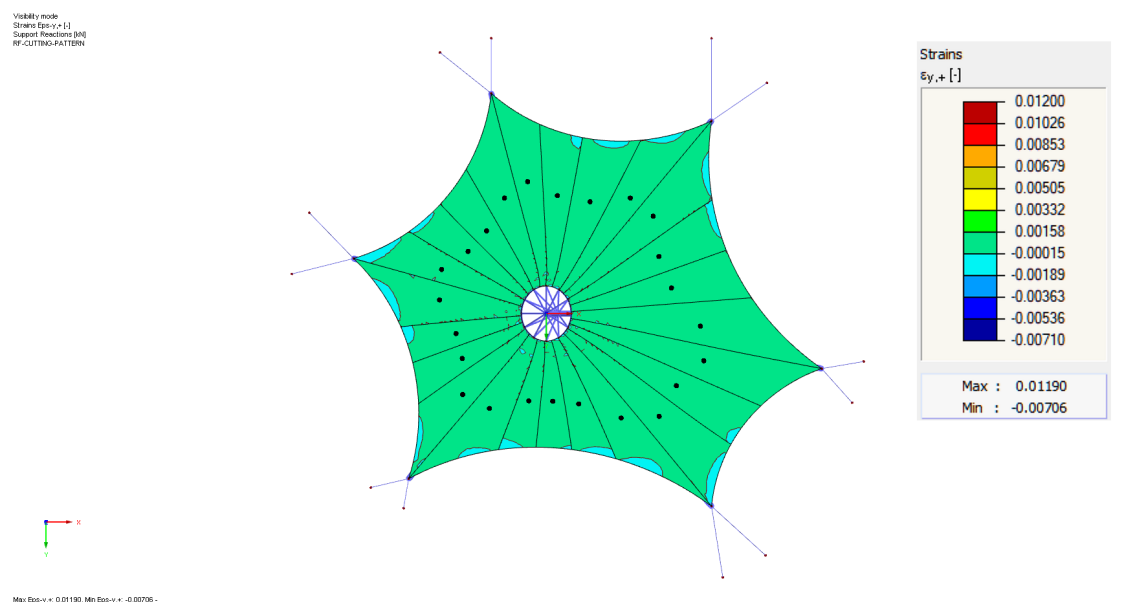
2.4.1 První volba dělení

První varianta je inspirována reálným vyhotovením stávající konstrukce. Z obrázku 2.15 je patrné, že výsledná membrána je složena z 24 segmentů. Dělení je tedy přibližně realizováno po přibližně 15° a maximální šířka segmentu je 2,4 m. Na obrázku 2.16 označují černé tečky segmenty, které jsou ohraničeny černými čarami. Právě v oblasti spoje jednotlivých segmentů lze pozorovat nerovnoměrnosti v rozdělení poměrných deformací. Ve směru osy x je hodnota poměrné deformace $\varepsilon_{x,+}$ -0,0047.

Naopak uprostřed segmentu dosahuje 0,0033. Ve směru osy y (obrázek 2.17) je rozdělení poměrných deformací rovnoměrnější, nicméně u okrajů lze pozorovat oblasti s vyššími hodnotami poměrné deformace $\varepsilon_{y,+}$.



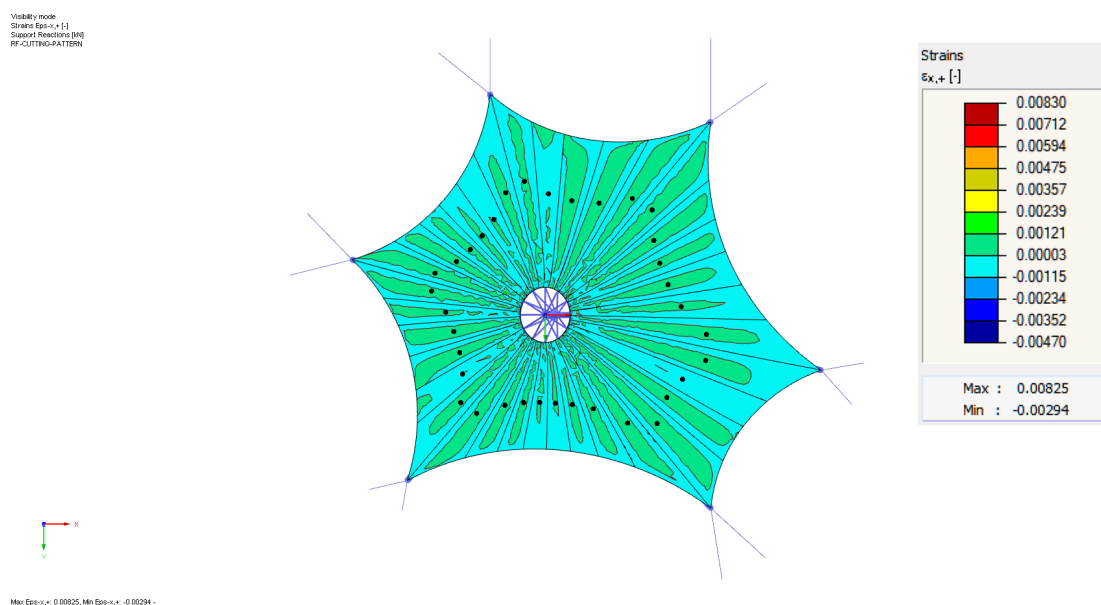
Obr. 2.16: První volba dělení: poměrná deformace ve směru x



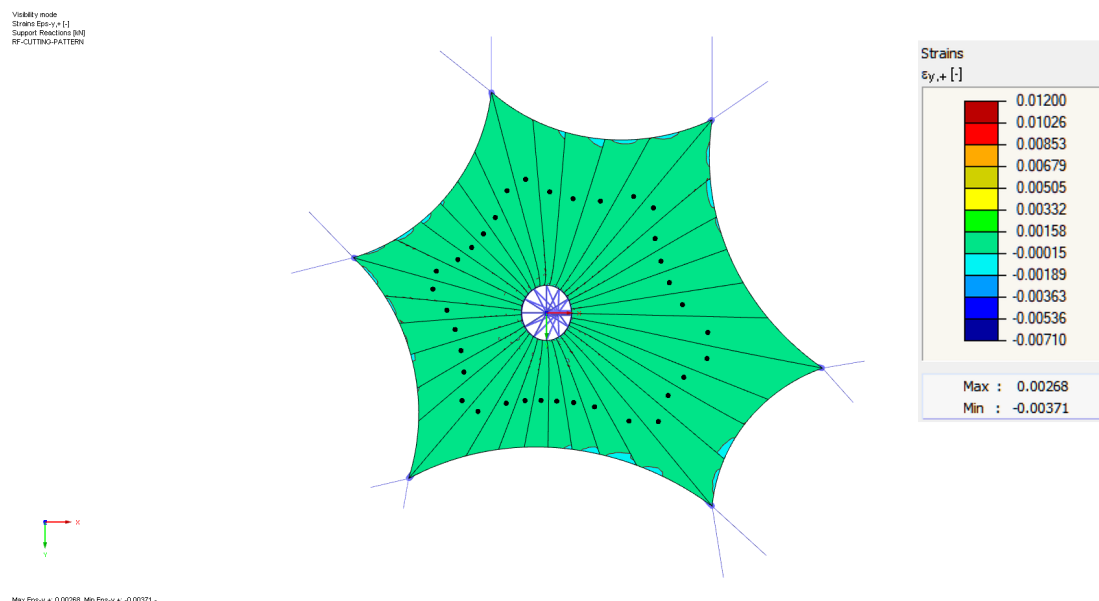
Obr. 2.17: První volba dělení: poměrná deformace ve směru y

2.4.2 Druhá volba dělení

Druhou variantou je demonstrován vliv zvýšení počtu segmentů při návrhu stejné konstrukce. Zúžením jednotlivých stříhů je dosaženo rovnoměrnějšího rozdělení poměrných deformací v obou směrech. Dělení bylo voleno přibližně po 10° a maximální šířka segmentu je 1,6 m. Třebaže lze na obrázku 2.18 pozorovat ohraničené oblasti s nižšími deformacemi, je zde patrné výrazné zlepšení v oblastech spojů segmentů oproti obrázku 2.16.



Obr. 2.18: Druhá volba dělení: poměrná deformace ve směru x

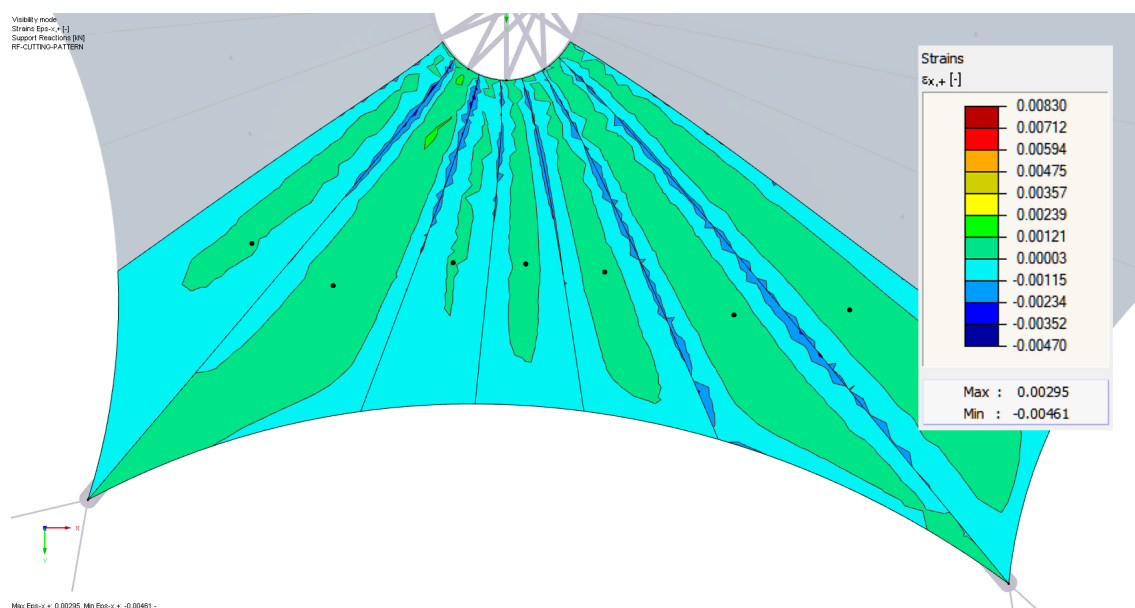


Obr. 2.19: Druhá volba dělení: poměrná deformace ve směru y

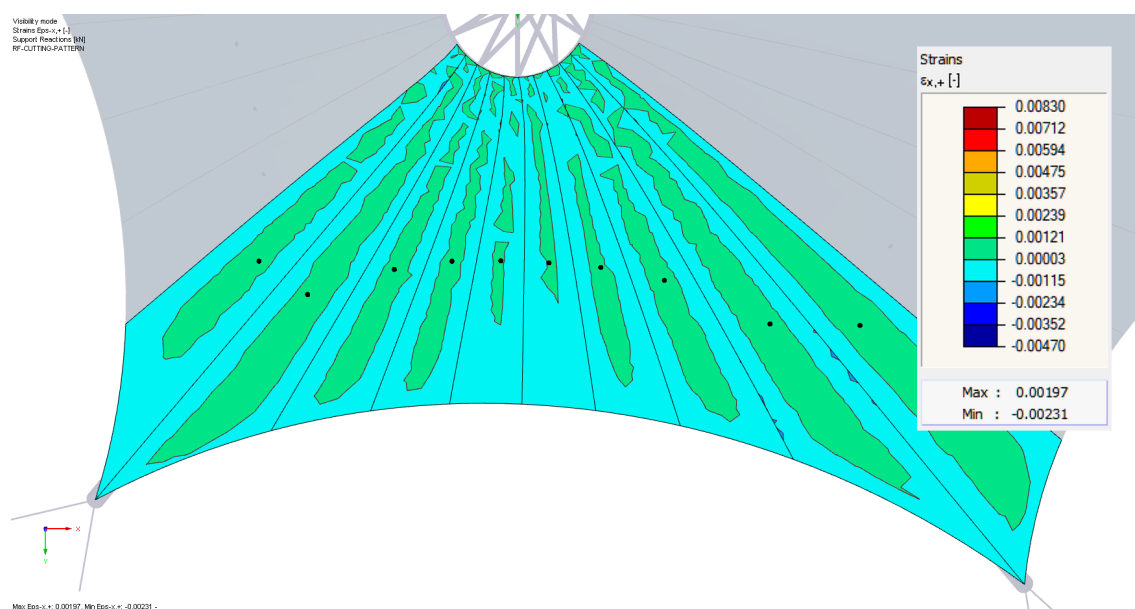
2.4.3 Srovnání dělení

Za účelem bližšího srovnání obou variant byla vybrána jedna část membránového zastřešení. Rozdíly mezi obrázky 2.20 a 2.21 jsou patrné na první pohled. Jde především o oblasti spojů jednotlivých segmentů, které jsou v druhém případě (2.21) rovnoměrněji deformovány. Z tohoto důvodu byla zvolena druhá varianta dělení po 10° . Nelze ale konstatovat, že je jedna z variant správná a druhá špatná. Je možné pouze říci, že jde o vhodnější variantu pro tuto konkrétní konstrukci z hlediska eliminace poměrných deformací, které následně ovlivňují stav napětí při realizaci. Naopak pro provádění by byla zajisté vhodnější první varianta, která obsahuje méně spojů. Finální podoba stříhových vzorů vždy závisí na zkušenostech a znalostech osob provádějících návrh konstrukce.

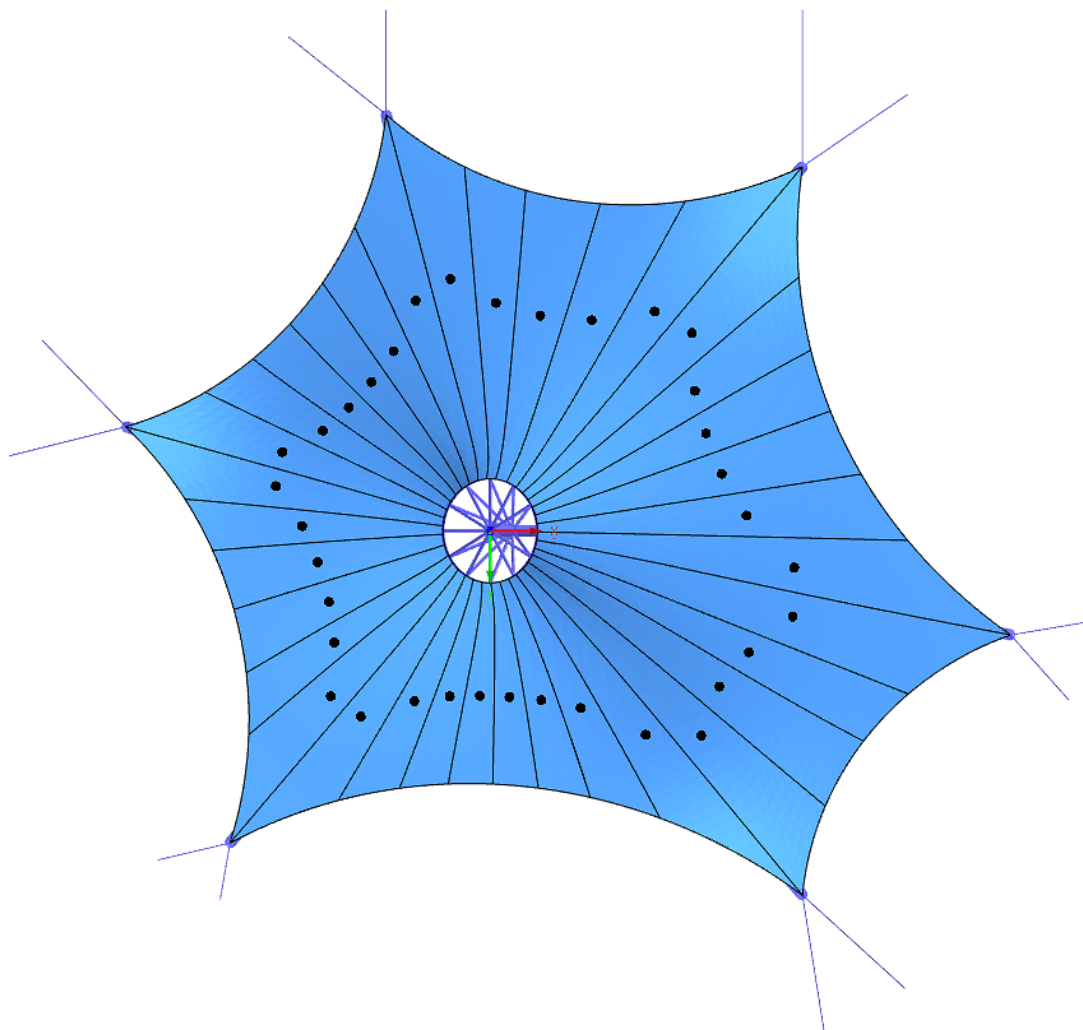
Výsledná podoba stříhových vzorů membránového zastřešení zvolená v této práci je zachycena na obrázku 2.22.



Obr. 2.20: První volba dělení: detail poměrné deformace ve směru x



Obr. 2.21: Druhá volba dělení: detail poměrné deformace ve směru x



Obr. 2.22: Střihový vzor modelované membránové konstrukce

2.5 Statická analýza

V rámci návrhu konstrukce kónického tvaru demonstrované v této práci byla rovněž provedena statická analýza. Dosavadní kroky, form-finding a generování střihových vzorů, se týkají pouze konstrukce v čase výstavby namáhané zejména předpětím. Nyní je nutné ověřit, jak se bude konstrukce deformovat při zatížení externími silami od klimatického zatížení. Pro potřeby této práce byla uvažována stejná poloha konstrukce, tj. v Brněnském přístavišti.

2.5.1 Zatížení sněhem

Zatížení sněhem je uvažováno dle platné normy ČSN EN 1991-1-3 [3]. Zatížení je zadáno svisle a vztaženo k půdorysné ploše střechy. Toto zatížení je kritické pro vznik jevu zvaného *ponding effect*. Vlivem nedostatečného předpětí a nevyhovující geometrie může dojít ke vzniku oblasti s větším průhybem, ve které se poté hromadí sníh. Zatížení se v této oblasti koncentruje. Hrozí překročení tahové únosnosti materiálu a následný kolaps konstrukce či její části.

Na mapě sněhových oblastí na území České republiky spadá Brněnské přístaviště do druhé oblasti. Charakteristická hodnota zatížení sněhem na zemi s_k je stanovena jako 2% kvantil ročních maximálních hodnot vodní tíhy sněhu. [3] Druhá oblast odpovídá charakteristickému zatížení $1,0 \text{ kNm}^{-2}$. Typ krajiny je uvažován otevřený, vzhledem k umístění na břehu přehrady. Součinitel expozice C_e nabývá hodnoty 0,8. Jelikož je sklon střechy proměnlivý od $0,29^\circ$ po $63,86^\circ$, byl tvarový součinitel zatížení sněhem μ konzervativně zvolen 0,8. Dle normy byl tepelný součinitel C_t zvolen 1,0.

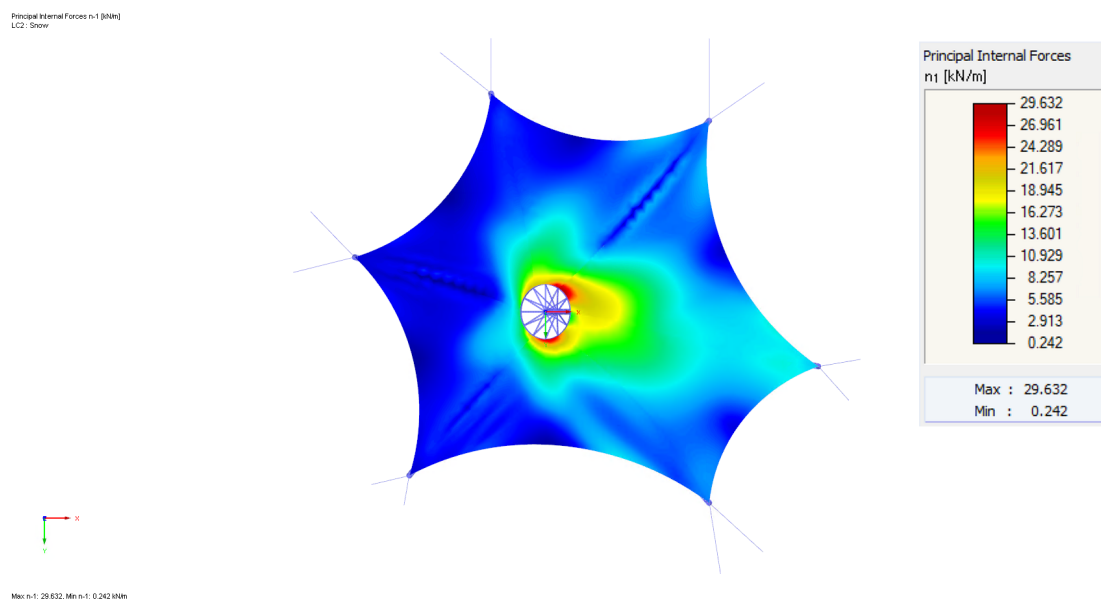
$$s = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k \quad (2.1)$$

Výsledná hodnota zatížení sněhem na střeše se vypočítá dle rovnice 2.1 a po dosazení je rovna $0,64 \text{ kNm}^{-2}$.

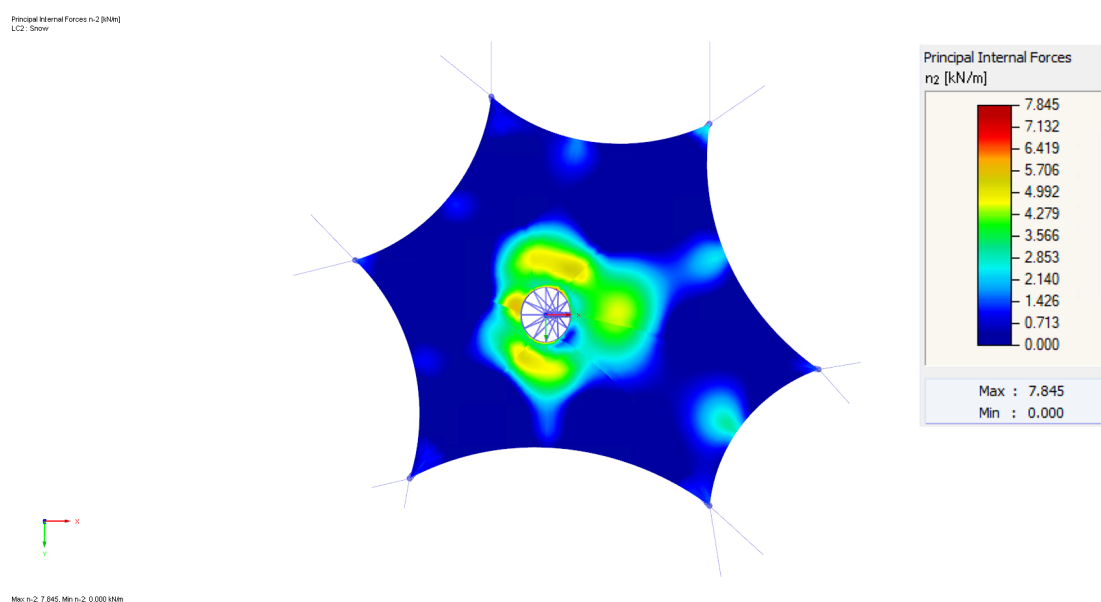
Výsledné hodnoty

Největší hodnota tahové síly n_1 v radiálním směru je na obrázku 2.23 u vrcholu konstrukce a dosahuje $29,632 \text{ kNm}^{-1}$.

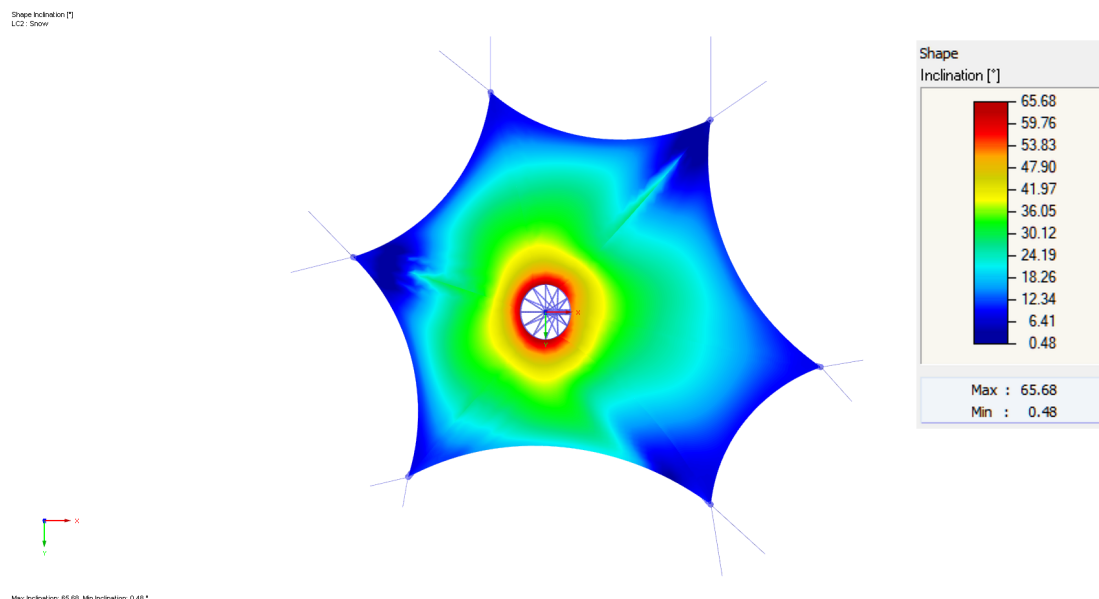
Na obrázku 2.25 je zachycen sklon z důvodu kontroly vzniku jevu *ponding effect*. Ten byl při bližším zkoumání vyloučen.



Obr. 2.23: Zatížení membránové konstrukce sněhem: hlavní vnitřní síla n_1



Obr. 2.24: Zatížení membránové konstrukce sněhem: hlavní vnitřní síla n_2



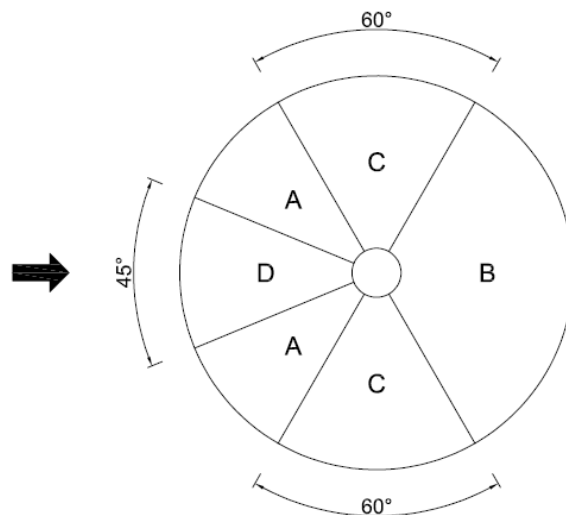
Obr. 2.25: Zatížení membránové konstrukce sněhem: sklon

2.5.2 Zatížení větrem stanovené normovým výpočtem

Obecně je zatížení větrem, především sání, kritický zatěžovací stav pro lehké membránové konstrukce. Ačkoli se jedná o dynamické namáhání, uvažuje se jako statické zatížení. Je vyjádřeno jako součin dynamického tlaku větru $q_p(z)$ a součinitele tlaku c_p . [7]

Dynamický tlak větru se stanoví dle [4]. Závisí především na oblasti a kategorii terénu. Brněnská přehrada spadá do oblasti II, takže výchozí základní rychlost větru $v_{b,0}$ je rovna 25 ms^{-1} . Stavba je situována na břehu jezera, spadá tedy do I. kategorie terénu. Výsledný dynamický tlak větru je roven $1,02 \text{ kNm}^{-2}$.

Problém nastává při stanovení součinitele tlaku c_p . ČSN EN 1991-1-4 uvádí součinitele pouze pro typické tvary střech. Proto byly provedeny testy ve větrném tunelu a výsledné hodnoty jsou uvedeny v European Design Guide for Tensile Surface Structures [7]. Zóny pro určení součinitele tlaku c_p na konstrukci kónického tvaru jsou zobrazeny na obrázku 2.26, kde šipka značí směr proudění větru. Vlastní hodnoty c_p jsou uvedeny v tabulce 2.1.

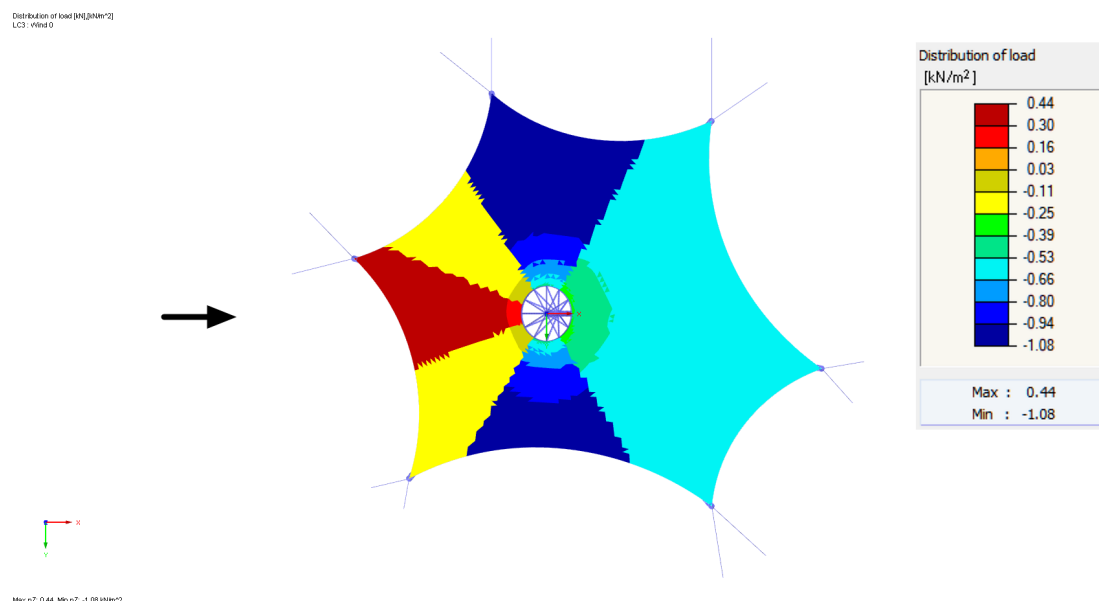


Obr. 2.26: Zóny pro určení součinitele tlaku c_p na konstrukci kónického tvaru [7]

Tab. 2.1: Součinitel tlaku pro kónické tvary [7]

Součinitel tlaku c_p		Zóny			
Typ konstrukce	Úhel sklonu	A	B	C	D
Otevřená	40	-0,15	-0,6	-1,0	+0,4/-0,2
Uzavřená	40	-0,41	-0,7	-1,0	+0,75/-0,6

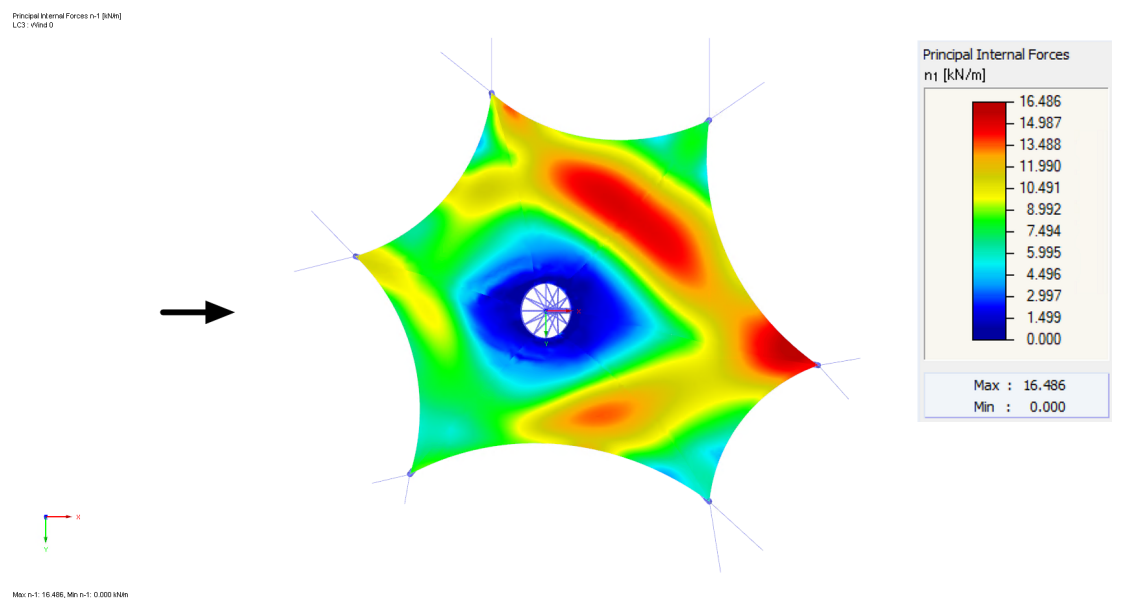
Zatížení bylo zadáno do programu RFEM jako volné proměnné zatížení po obvodu. Na obrázku je zachyceno rozdělení zatížení na membránovou konstrukci. Šipka zde znázorňuje směr proudění větru.



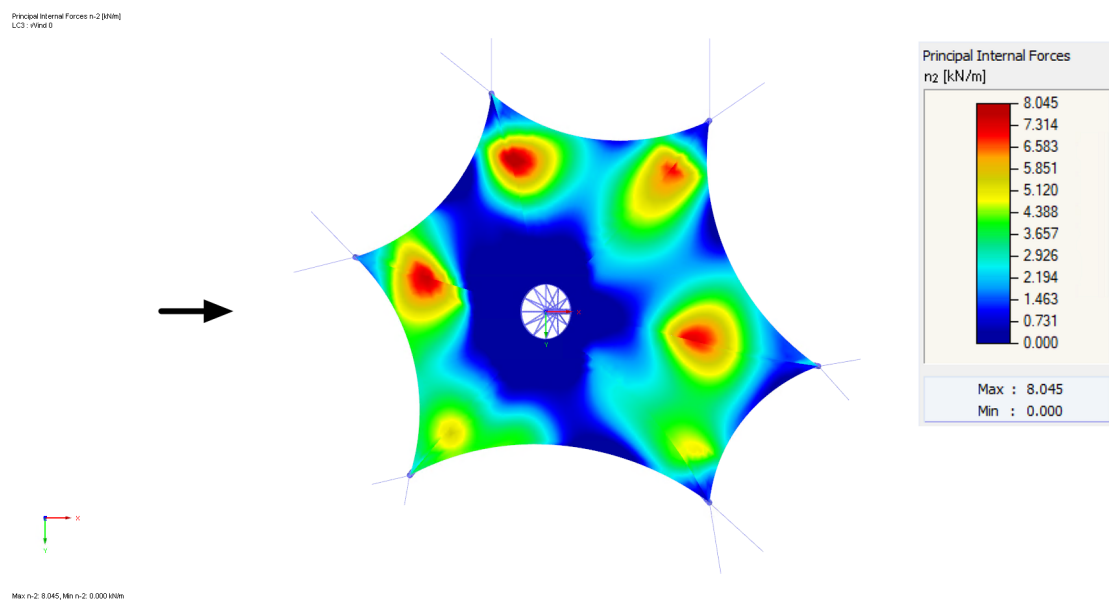
Obr. 2.27: Rozdělení zatížení na výpočtovém modelu dle [7]

Výsledné hodnoty

Na následujících obrázcích 2.28 a 2.29 jsou zachyceny hlavní vnitřní síly v konstrukci vyvolané vnějším charakteristickým větrným zatížením. Konstrukce je namáhána velkými tahovými silami na částech plochy, které mají nižší sklon. Největší hlavní vnitřní síla n_1 dosahuje hodnoty $16,486 \text{ kNm}^{-1}$.



Obr. 2.28: Zatížení membránové konstrukce větrem dle [7]: hlavní vnitřní síla n_1



Obr. 2.29: Zatížení membránové konstrukce větrem dle [7]: hlavní vnitřní síla n_2

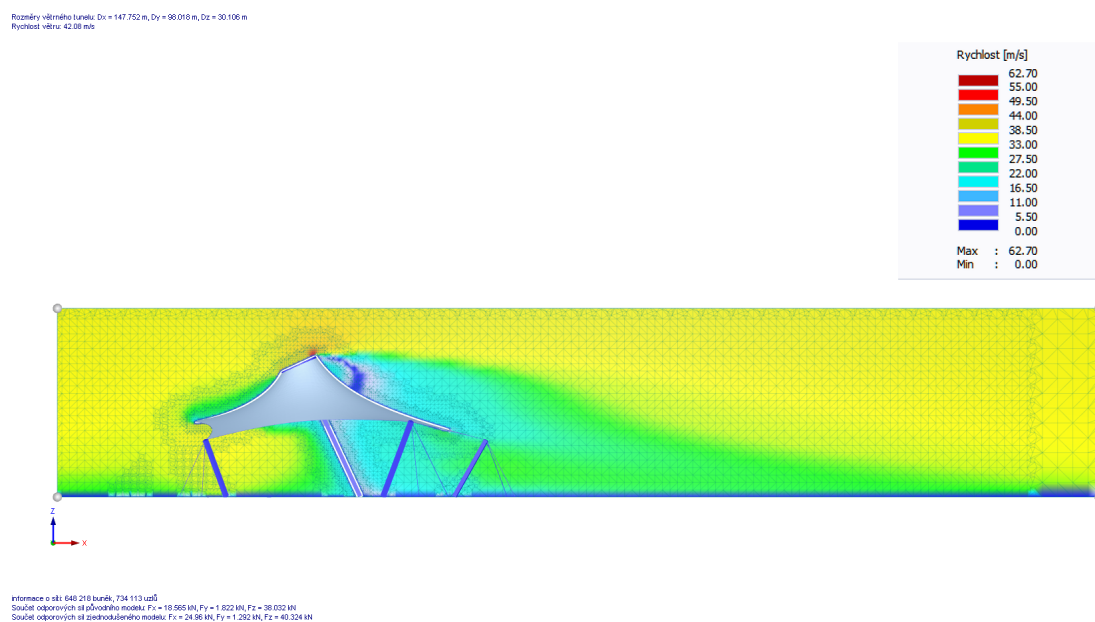
2.5.3 Zatížení větrem stanovené numerickým výpočtem

Zatížení větrem bylo stanoveno rovněž numerickým výpočtem. Model konstrukce byl exportován do virtuálního větrného tunelu. Byl zvolen program RWIND v1.23 z důvodu kompatibility s programem RFEM. Software RWIND byl vyvinut pro CFD¹ modelování proudění kolem konstrukce ve větrném tunelu.

Obecně by měly být rozměry větrného tunelu voleny tak, že konstrukce bude stínit maximálně 2 % plochy příčného řezu. Vzdálenost konstrukce od konce větrného tunelu by měla být minimálně $10 \cdot H$, kde H je výška konstrukce. Větrný tunel řešené konstrukce má délku 147,75 m, šířku 98,02 m a výšku 30,12 m.

Okolo konstrukce je vytvořena 3D síť konečných objemů. Hustota sítě se volí proměnlivá. Povrch modelu je pokryt jemnou sítí. Prvky se zvětšují se vzrůstající vzdáleností od konstrukce. Tímto opatřením se výrazně sníží počet uzlů modelu a také výpočetní čas bez ovlivnění výsledků analýzy. [2] Použitá síť obsahuje 648 218 buněk a 734 113 uzlů. Nejmenší rozměr prvku byl zvolen 0,10 m. Zjemnění sítě konečných objemů je demonstrováno na obrázku 2.30, kde je zachycena část větrného tunelu.

Pro výpočet zatížení větrem na konstrukci je v programu implementován řešič nestlačitelného turbulentního proudění. V této verzi je využita C++ sada nástrojů OpenFOAM, která dle autorů poskytuje nejlepší výsledky. [15]

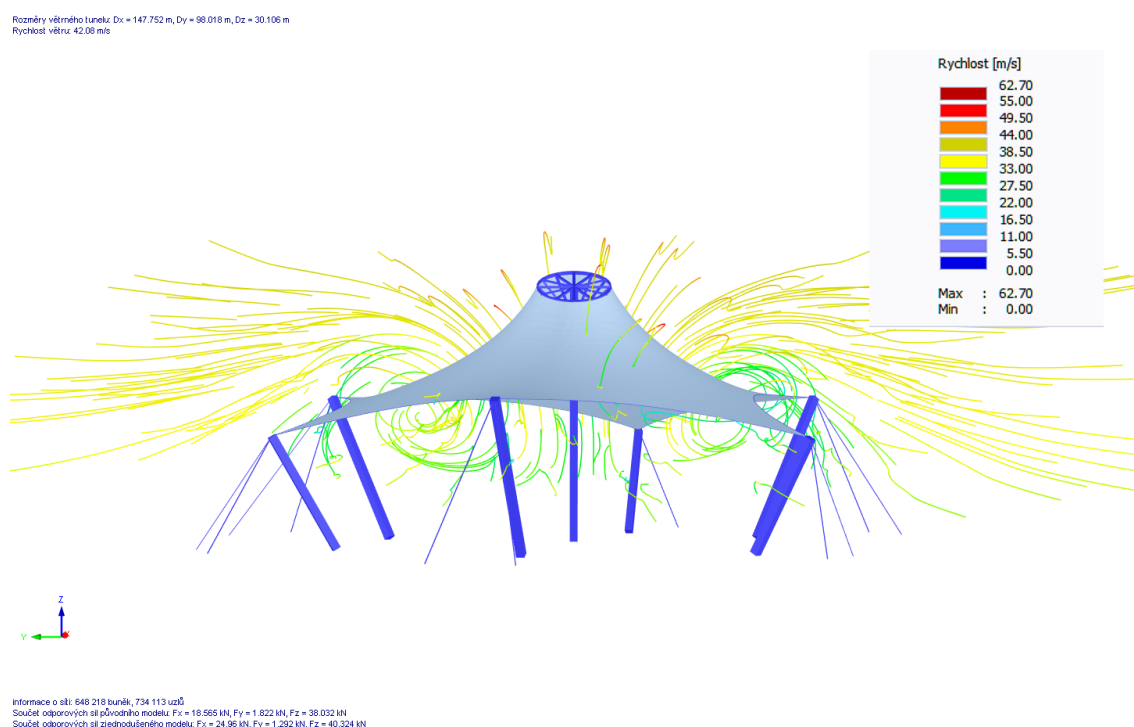


Obr. 2.30: Numerická analýza proudění: rychlostní pole

¹Computational Fluid Dynamics (CFD) je odvětví mechaniky tekutin, které využívá numerickou analýzu za účelem popisu proudění a interakcí s pevnými překážkami

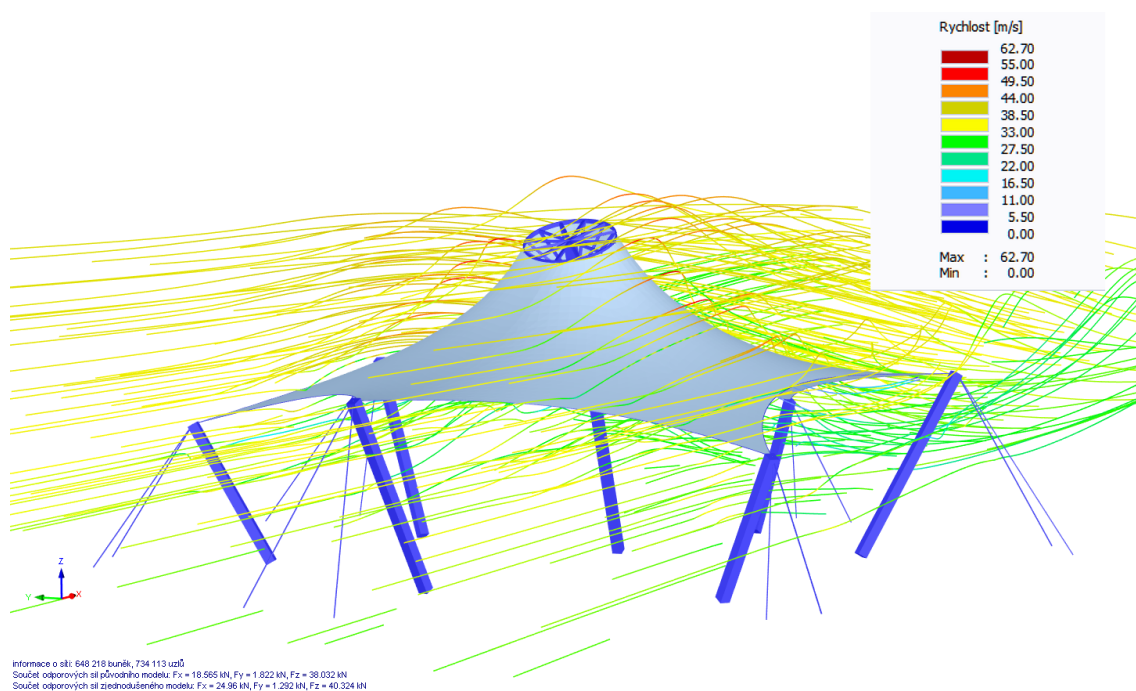
Vstupním parametrem simulace je větrný profil. Byl zvolen profil dle ČSN EN 1991-1-4 [4] s českou národní přílohou. Stejně jako v předchozí kapitole byla zvolena II. větrná oblast a I. kategorie terénu. Dále byla aktivována turbulence proudění s modelem k- ϵ . Hlavní výhodou semi-empirického modelu je rychlost výpočtu při adekvátní přesnosti.

Na následujících obrázcích 2.31 a 2.32 jsou zachyceny proudnice větru obtékajícího model konstrukce. Vítr dosahuje rychlosti $62,7 \text{ ms}^{-1}$ u zlomu ve vrcholu kónické konstrukce. Při pohledu ve směru osy X (2.31) lze pozorovat turbulentní víry, které vznikají v oblasti za konstrukcí. Tato oblast se označuje jako úplav. Vyznačuje se sníženou rychlostí proudu a zpětným prouděním. [10] Tento jev lze pozorovat v rychlostním poli na obrázku 2.30, konkrétně se jedná o zelenou oblast za konstrukcí.



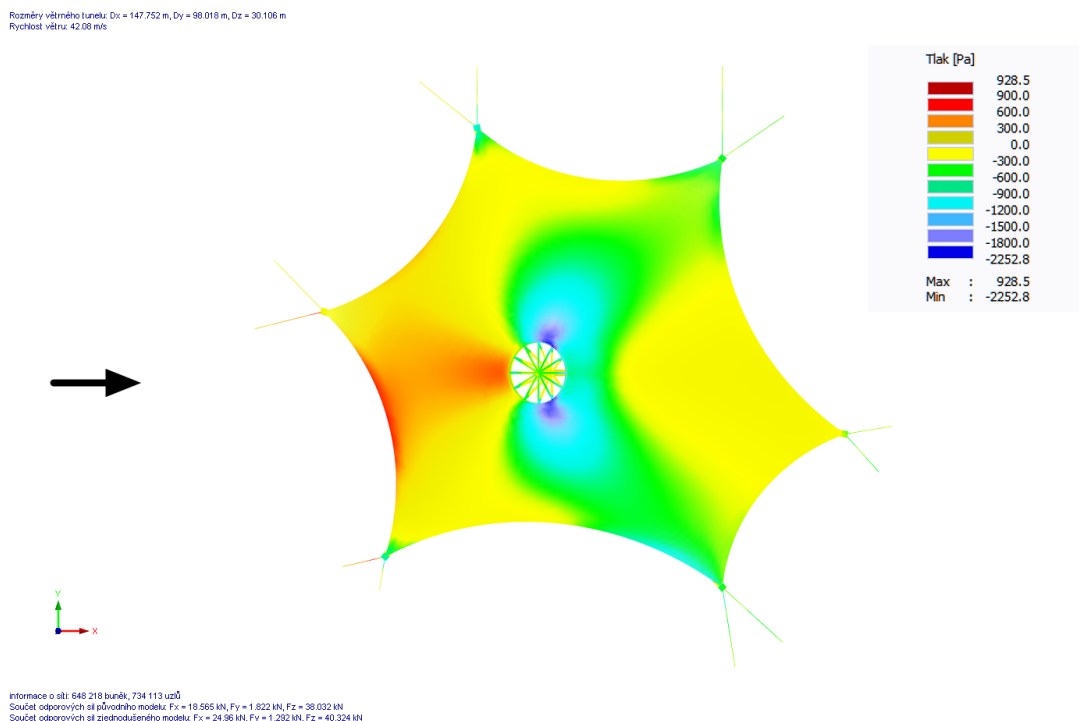
Obr. 2.31: Numerická analýza proudění: proudnice v pohledu ve směru osy X

Rozměry větrného tunelu: Dx = 147.752 m, Dy = 98.018 m, Dz = 30.106 m
Rychlost větru: 42.08 m/s



Obr. 2.32: Numerická analýza proudění: proudnice v izometrickém pohledu

Výsledný tlak na membránovou konstrukci je na obrázku 2.33. Jedná se o tlak vyvolaný větrem ve směru osy X označený jako 0° . Konstrukce byla postupně natáčena v rovině XY proti směru hodinových ručiček s krokem 45° . Rozložení tlaku větru působícího na konstrukci pod zbylými úhly jsou uvedeny v příloze A.

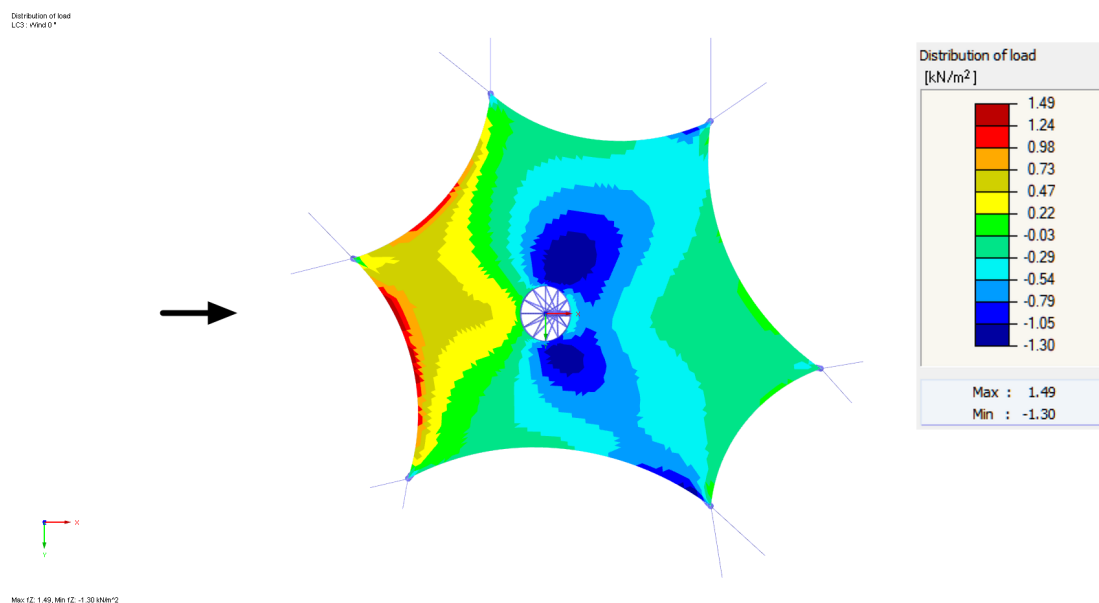


Obr. 2.33: Numerická analýza proudění: tlak větru pod úhlem 0°

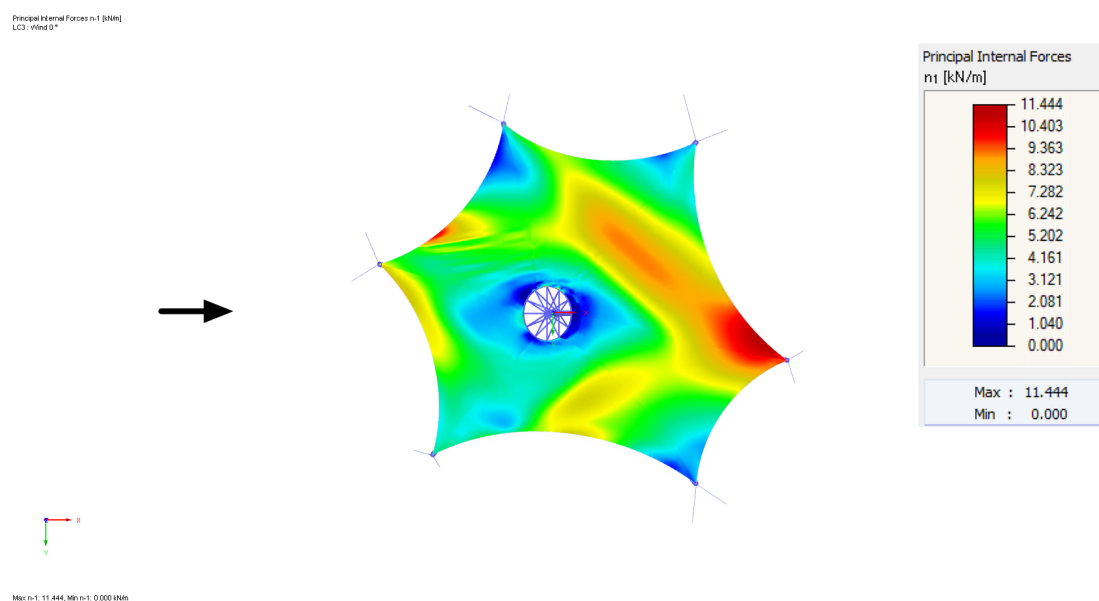
Po přenosu výsledků numerické analýzy do programu RFEM byla provedena statická analýza. Na obrázku 2.34 je vyobrazeno rozložení zatížení na membránové konstrukci. Ačkoli jsou zde patrná místa s vysokými hodnotami, lze identifikovat jednotlivé oblasti, které byly definovány v [7] a jsou uvedeny na obrázku 2.26. Velikost zatížení se při zanedbání extrémních hodnot obdržných z numerického výpočtu 2.34 blíží k hodnotám zatížení stanoveným dle [7], které jsou na obrázku 2.27.

Výsledné hodnoty

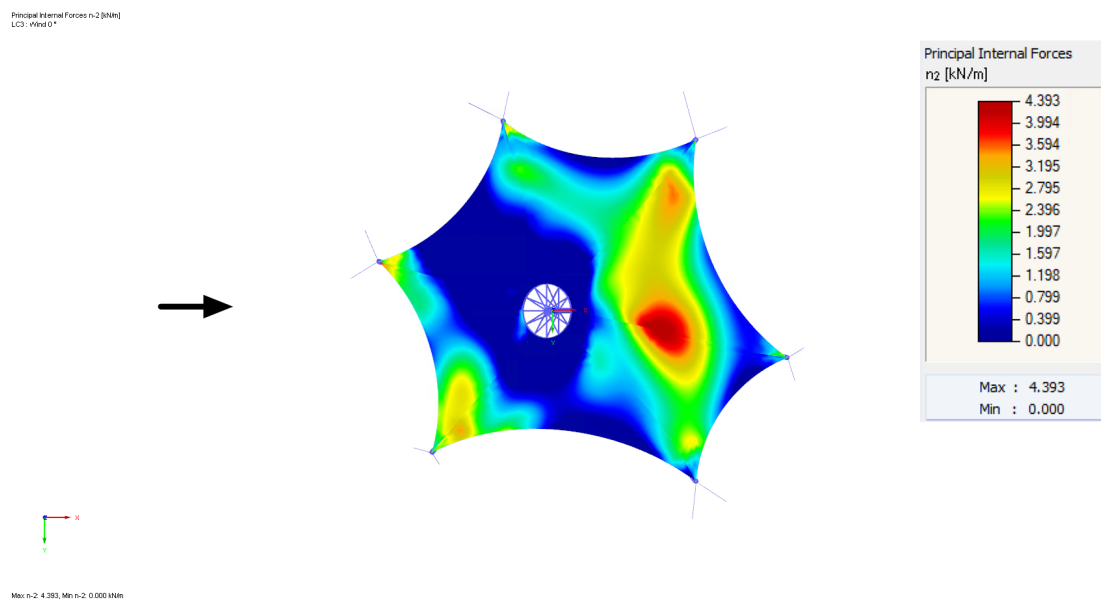
Hlavní vnitřní síly od vnějšího zatížení větrem jsou na obrázcích 2.35 a 2.36. Maximální hlavní vnitřní síla n_1 dosahuje hodnoty $11,444 \text{ kNm}^{-1}$.



Obr. 2.34: Numerická analýza proudění: rozložení zatížení (0°)



Obr. 2.35: Numerická analýza proudění: hlavní vnitřní síla n_1 (0°)



Obr. 2.36: Numerická analýza proudění: hlavní vnitřní síla n_2 (0°)

2.5.4 Srovnání výpočetních metod pro zatížení větrem

Při stanovení zatížení větrem numerickým výpočtem, je maximální hodnota o $5,042 \text{ kNm}^{-1}$ nižší, než při stanovení pomocí European design guide for tensile surface structures [7]. Srovnání lokálních maxim přesto není vypovídající. Pokud srovnáme průměrné hodnoty v ploše, lze prohlásit, že obě metody poskytují srovnatelné výsledky.

3 Membránové zastřešení tribuny

Druhý model membránové konstrukce řešený v této práci byl rovněž inspirován skutečnou konstrukcí. Membránové zastřešení tribuny na břehu Labe v Drážďanech na východě Německa bylo realizováno v roce 2019. Elegantní a vzdušná konstrukce je vytvořena z lepeného lamelového dřeva, oceli a textilní membrány. Podtrhuje tak kouzlo letních filmových nocí, které se na břehu řeky každoročně pořádají.



Obr. 3.1: Membránové zastřešení tribuny [1]

Ze stavebního hlediska se jedná o dvě totožné samostatně působící konstrukce o délce 48 m, šířce 13,5 m a výšce 6,5 m. Jedna část je zachycena na obrázku 3.1. Zastřešení má celkem 8 polí o délce 6 m spojených textilní membránou. Jednotlivé vazníky jsou podepřeny dvěma sloupy tvaru V. Podélné ztužení konstrukce tvoří ocelové trubkové profily.

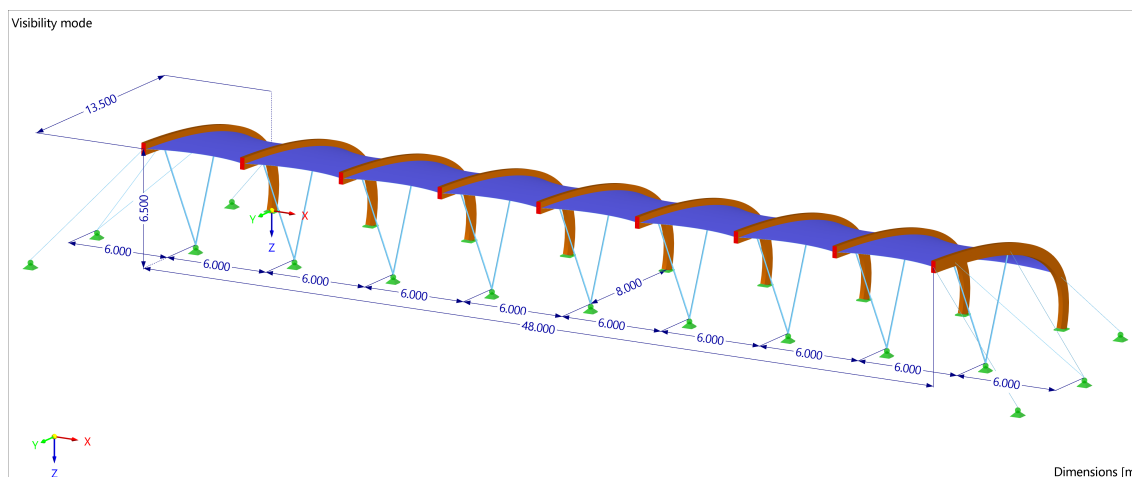


Obr. 3.2: Detail membránového zastřešení tribuny [1]

3.1 Výpočetní model

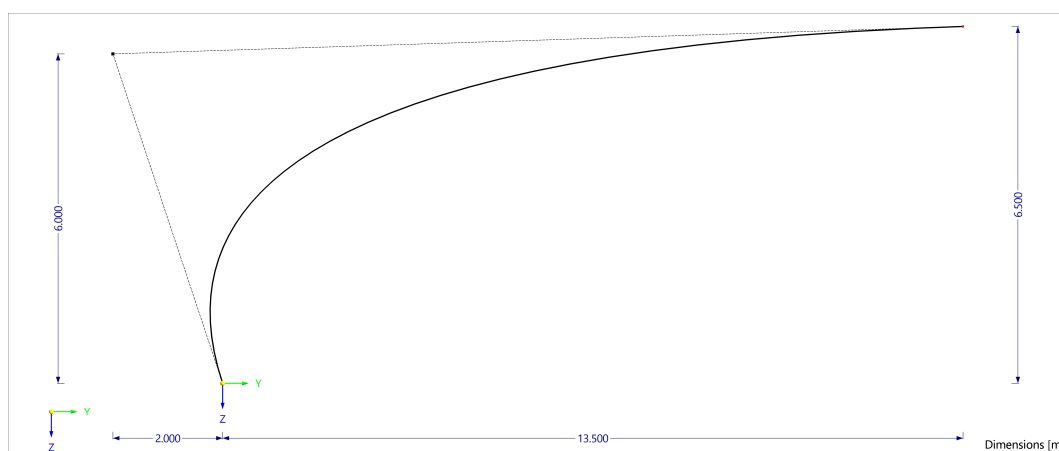
Podklady pro vytvoření výpočetního modelu jsou veřejně dostupné na webových stránkách firmy Dlubal Software [6], kde jsou zveřejněny se souhlasem realizační a architektonické společnosti.

Původně bylo pro analýzu této konstrukce použito více programů, které nejsou vzájemně kompatibilní. Model konstrukce zveřejněný v této práci byl vymodelován a analyzován v programu firmy Dlubal Software s.r.o. Program RFEM byl zvolen z důvodu možnosti provést komplexní analýzu včetně zavedení stavebních fází v rámci jednoho výpočtu. Bylo tak dosaženo přesnějších a reálnějších výsledků, které zohledňují vliv postupného předpínání a následného odebírání dočasných výztuh.



Obr. 3.3: Membránové zastřešení tribuny: rozměry konstrukce

Model se skládá z devíti identických vazníků z lepeného lamelového dřeva GL30h s charakteristickou pevností v ohybu 30 MPa. Průřez vazníku má šířku 260 mm a výšku 650 mm. Linie je vymodelována pomocí NURBS křivky s jedním kontrolním bodem o souřadnicích $[x; y; z] = [0; -2; -6]$. Detail zachycen na obrázku 3.4. Spojení vazníku a základu je realizováno jako vetknuté.



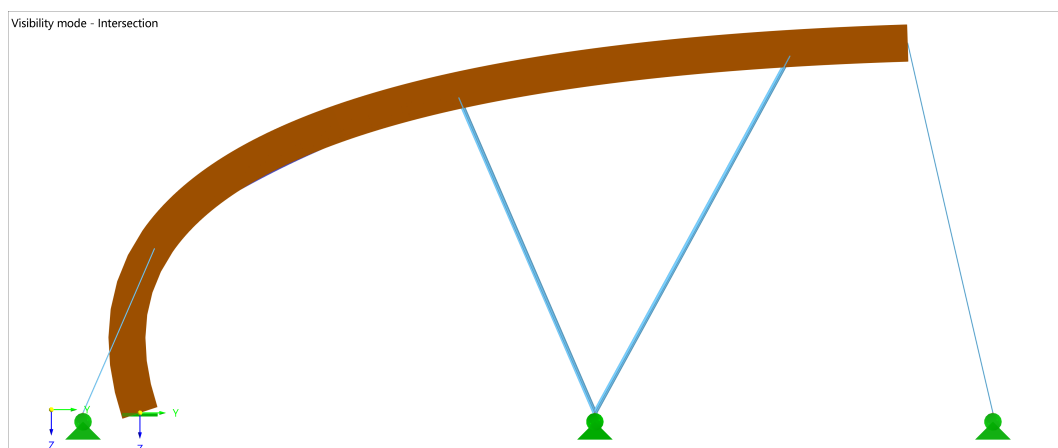
Obr. 3.4: Membránové zastřešení tribuny: rozměry NURBS křivky

Všechny ocelové části konstrukce byly navrženy z oceli S355. Dvojice sloupů ve tvaru písmene V je kloubově uložena a podpírá vazník ve vzdálenosti 2 m a 8 m od koncového bodu. Sloupy mají kruhový průřez o průměru 89 mm s tloušťkou stěny 8 mm. Podélné výztuhy, zajišťující spojení vazníků v době výstavby, mají kruhový profil o průměru 70 mm s tloušťkou stěny 2 mm. Výztuhy jsou celkem 4 v jednom poli. První a poslední vyztužují vazník na okrajích membrány. Prostřední byly

umístěny do místa připojení sloupů. Vyztužení okrajů membrán bylo vymodelováno pomocí ocelových lan s průměrem 10 mm.

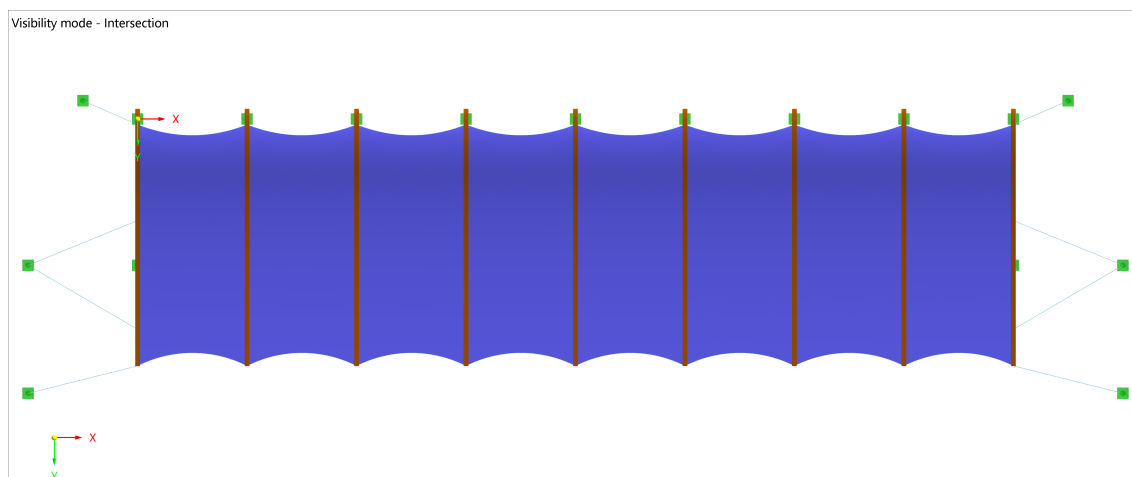
Plochy byly vymodelovány jako membrány z materiálu PVC typ IV. Tloušťka 1 mm byla zvolena dle obecných doporučení uvedených v [7].

Výše uvedené rozměry a prvky byly převzaty z realizované konstrukce. V rámci této práce byla konstrukce modifikována. Bylo přidáno osm krajních lan, které stabilizují celou konstrukci a brání naklonění v ose X. Předepnutá lana mají průměr 22 mm. Pohled na konstrukci ve směru osy X je na obrázku 3.5, kde lana splývají se zástupem sloupů ve tvaru V. Konstrukce tak byla stabilizována bez zásahu do estetického záměru architekta.



Obr. 3.5: Membránové zastřešení tribuny: pohled ve směru osy X

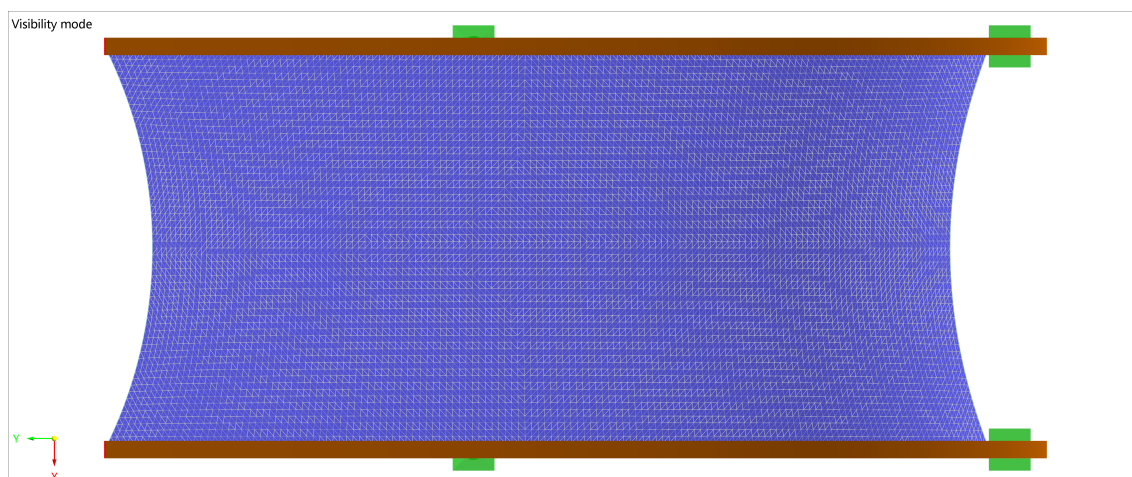
Na následujícím snímku 3.6 je zachycena finální podoba konstrukce v půdoryse.



Obr. 3.6: Membránové zastřešení tribuny: půdorys

3.2 Síť konečných prvků

V případě membránového zastřešení tribuny platí stejné zásady pro tvorbu sítě konečných prvků jako u předchozího modelu. Byla zvolena velikost prvků 100 mm. Na následujícím obrázku 3.7 je zachycena síť konečných prvků na jednom poli. Použitý numerický model má 3105 1D a 134 400 2D prvků. Celkem model obsahuje 68 699 uzlů.



Obr. 3.7: Membránové zastřešení tribuny: síť konečných prvků na vybraném poli

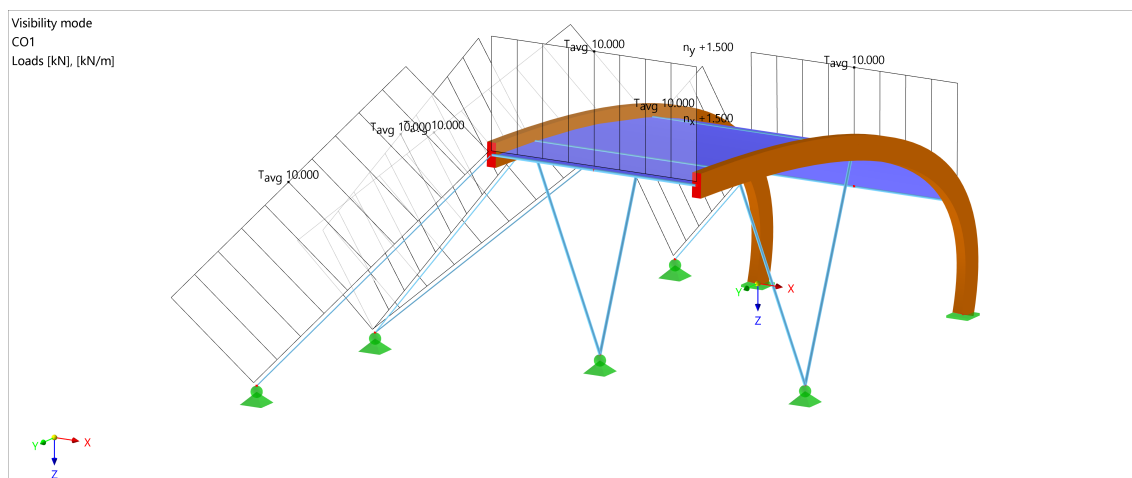
3.3 Form-finding

V následujících kapitolách byla provedena analýza tvaru membránové konstrukce s ohledem na fáze výstavby. Pro srovnání je zde uvedena také varianta hledání tvaru na celé konstrukci bez zohlednění fází.

Předpětí

V případě klasických membránových konstrukcí je pro výpočet v rámci programu RFEM využívána standardní metoda, u níž je předepisováno požadované výsledné předpětí n_x, n_y . To bylo po diskuzi s vedoucím diplomové práce zvoleno stejné v obou směrech 1, 5 kNm⁻¹. Kromě předpětí v membráně bylo nutné zvolit předpětí v okrajových lanech. V tomto případě bylo zvoleno zadání přímo požadované průměrné síly v lanech $T_{avg} = 10,0$ kN. Zvláštní pozornost byla věnována osmi krajním lanům, pro které bylo nutné najít vhodnou sílu počátečního předpětí. Ta byla stanovena za účelem zachování rovnováhy v konstrukci na 10,0 kN.

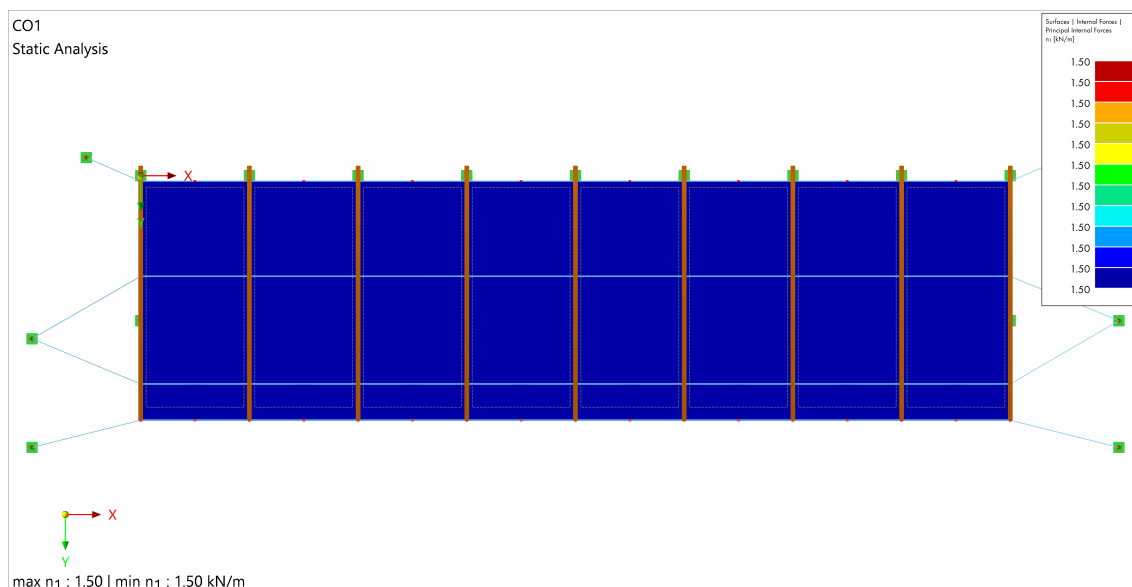
Na následujícím obrázku 3.8 je zachyceno zatížení předpětím na prvním poli zastřešení včetně krajních kotevních lan.



Obr. 3.8: Membránové zastřešení tribuny: předpětí prvního pole

3.3.1 Předpětí bez zohlednění fází výstavby

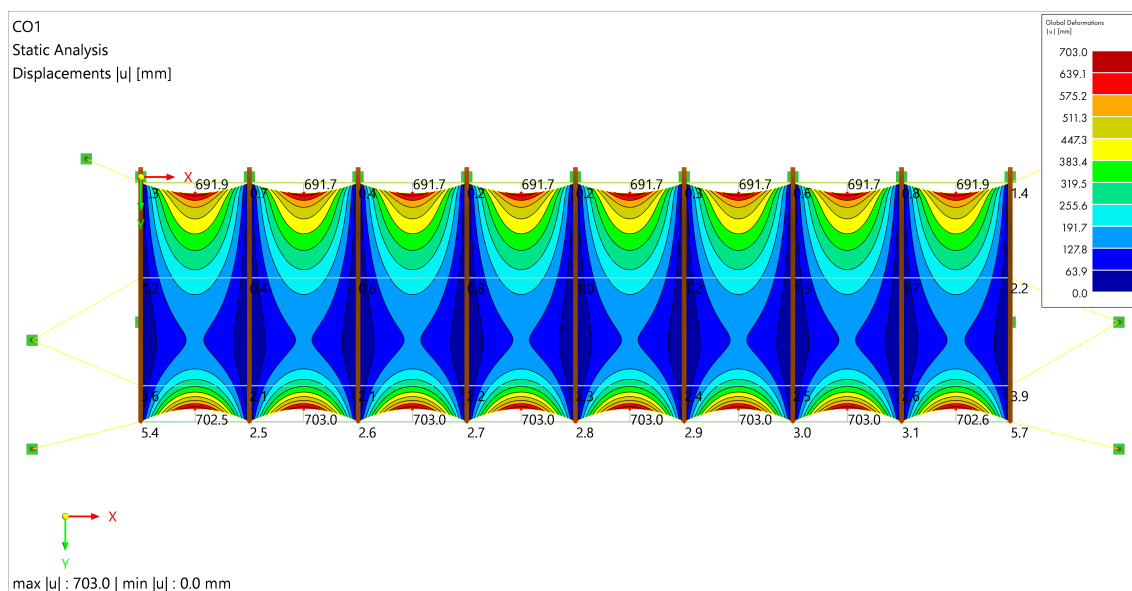
Pro demonstraci významu fází výstavby byla zahrnuta i tato sekce, ve které je předpětí do konstrukce vneseno během jedné fáze. Toto ovšem neodpovídá realitě, protože ve skutečnosti by byla membránová pole napínána postupně. Během výpočtu je do konstrukce vneseno předpětí, které ovlivní její chování při odebrání výztuh či podpor. Na obrázku 3.9 je zachyceno rozložení hlavních vnitřních sil n_1 , které je v případě stejného předpětí v obou směrech totožné s hlavní vnitřní silou n_2 .



Obr. 3.9: Membránové zastřešení tribuny: hlavní vnitřní síla n_1

Globální deformace znamenají v rámci analýzy tvaru rozdíl mezi počátečním a rovnovážným stavem, nikoli klasickou a fyzikální deformací.

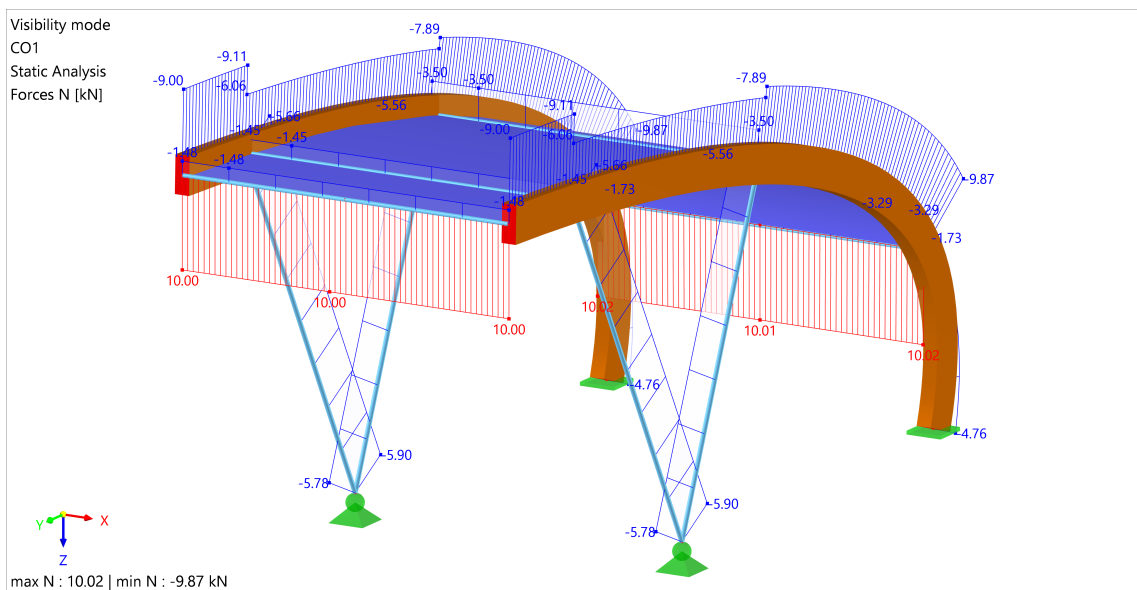
Na následujícím snímku 3.10 jsou globální deformace ve výsledku symetrické. Tento stav při výstavbě nemůže nastat z důvodu postupného napínání, při kterém je nutné umožnit manipulaci se sousední membránou.



Obr. 3.10: Membránové zastřešení tribuny: globální deformace u

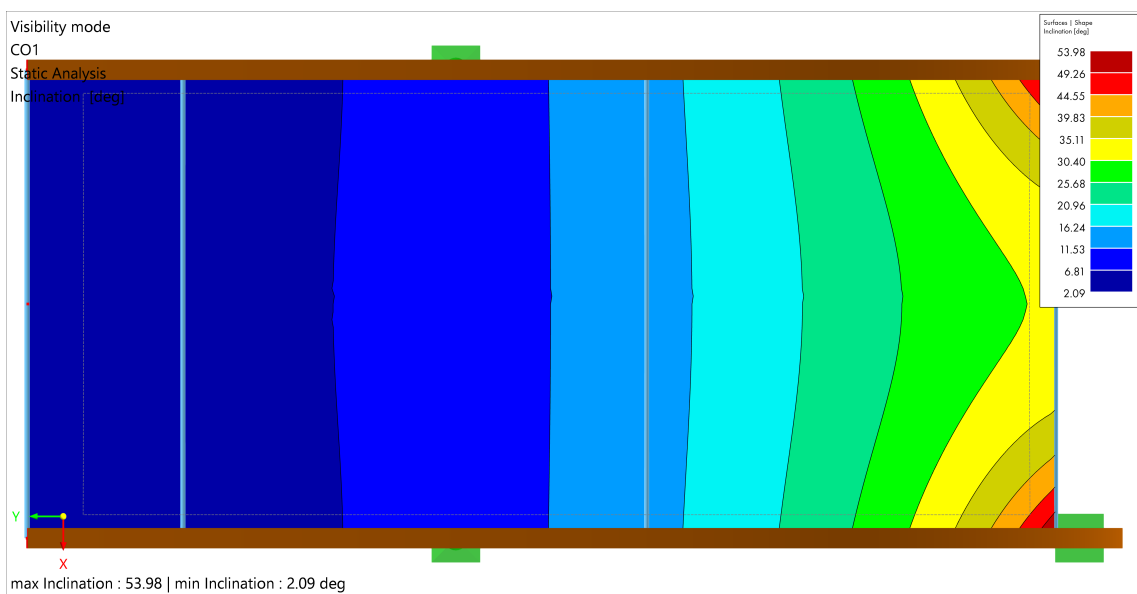
Při vyhodnocování analýzy vnitřních sil bylo zjištěno, že jsou také symetrické.

Vykreslení na nedeformovaném prostředním poli je zachyceno na obrázku 3.11.



Obr. 3.11: Membránové zastřešení tribuny: normálová síla N

Pro úplnost je zde uveden také sklon výsledné membrány na obrázku 3.12.



Obr. 3.12: Membránové zastřešení tribuny: sklon pole

Tato konstrukce byla vybrána z důvodu velké citlivosti na změny v průběhu výstavby. Ty budou demonstrovány v následujících kapitolách.

3.4 Fáze výstavby

V současné době je většina konstrukcí modelována a analyzována jako celek. Fáze výstavby byly uvažovány pouze u konstrukcí větších rozměrů, kde mají zásadní vliv na výsledné deformace a vnitřní síly. Na konstrukci v době výstavby působí mimo jiné montážní zatížení. V konstrukci vznikají deformace, které nelze ve výsledném stavu zanedbat především u předpínaných konstrukcí.

Konstrukční fáze byly ve spolupráci s firmou FEM consulting, s.r.o. implementovány do programu RFEM. Zde je možné vytvořit různá schémata výstavby a zahrnout do jednotlivých fází zatížení, která se mohou během výstavby vyskytnout. Důležitou funkcí je také možnost převzít výsledky z výpočtu stavebních fází a použít je jako počáteční stav konstrukce pro další statickou či dynamickou analýzu.

Pro účely této diplomové práce byly připraveny dvě varianty výstavby konstrukce, které jsou uvedeny v tabulce 3.1. Počátek výstavby byl převzat z výstavby reálné konstrukce. Nejprve byly vztyčeny vazníky podepřené sloupy, které ztužily podélné prvky. Poté se napínala jednotlivá pole. Cílem této práce je analyzovat působení membrány při různých schématech předpínání.

Tab. 3.1: Pořadí napínání ploch membránového zastřešení tribuny

Varianta	Pořadí napínání							
A	1	3	5	7	8	6	4	2
B	1	5	3	7	8	4	6	2

Obě varianty mají společnou první fázi zachycenou na obrázku 3.13. V té je do celé konstrukce vnesen tah. Krajiní kotevní lana jsou předepnuta na 10,0 kN. Tímto krokem je zvýšena tlaková únosnost jednotlivých prvků. Tento krok je důležitý také pro 10. fázi výstavby, kdy jsou postupně odstraňována podélná ztužidla. Vhodně zvolenou předpínací silou v lanech na začátku výstavby a předpětím v jednotlivých membránách bylo dosaženo téměř nulové síly v podélných ztužidlech. Přerozdělení sil po odstranění ocelových podélných prvků tak nemá zásadní vliv na celou konstrukci.

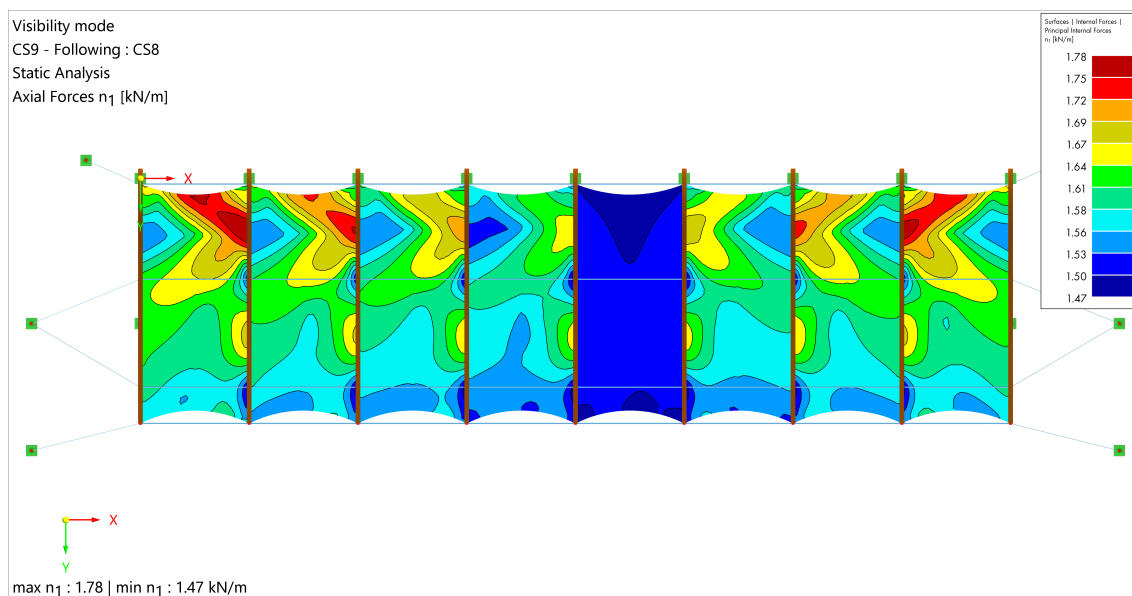


Obr. 3.13: Membránové zastřešení: 1. fáze výstavby, normálová síla N

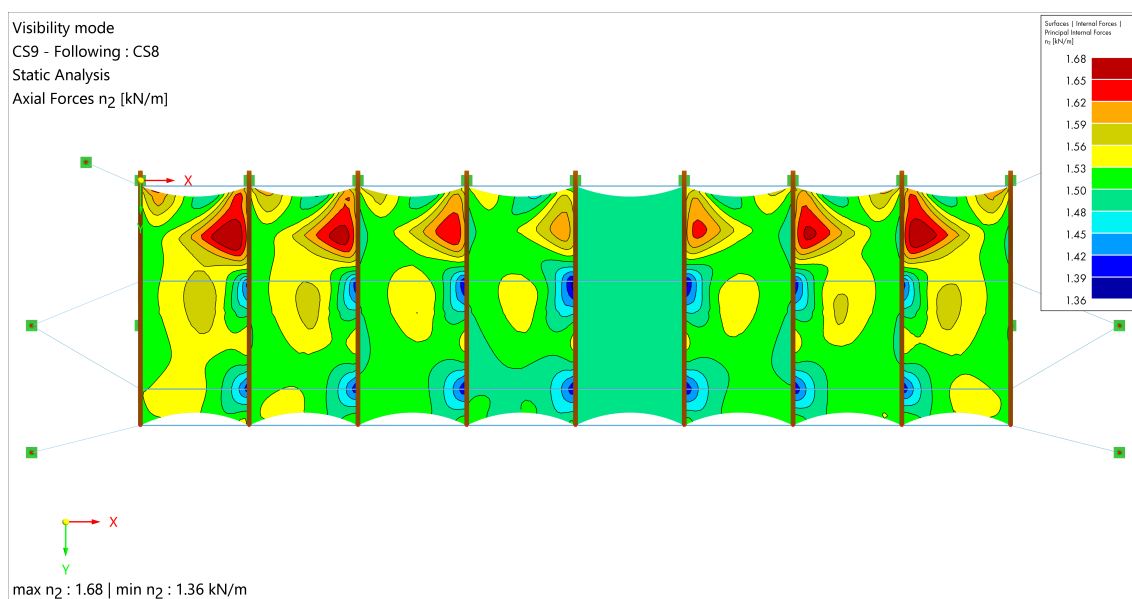
3.4.1 První varianta fází výstavby

Varianta A pracuje se schématem napínání dle tabulky 3.1, kde jednotlivé buňky značí pole a uvedené číslo pořadí napínání. V konstrukci byla nejprve předepnuta membrána na levém a poté na pravém okraji. V další fázi byla opět předepnuta membrána na levém okraji. Výstavba pokračovala tímto způsobem, dokud se plochy uprostřed rozpětí nespojily.

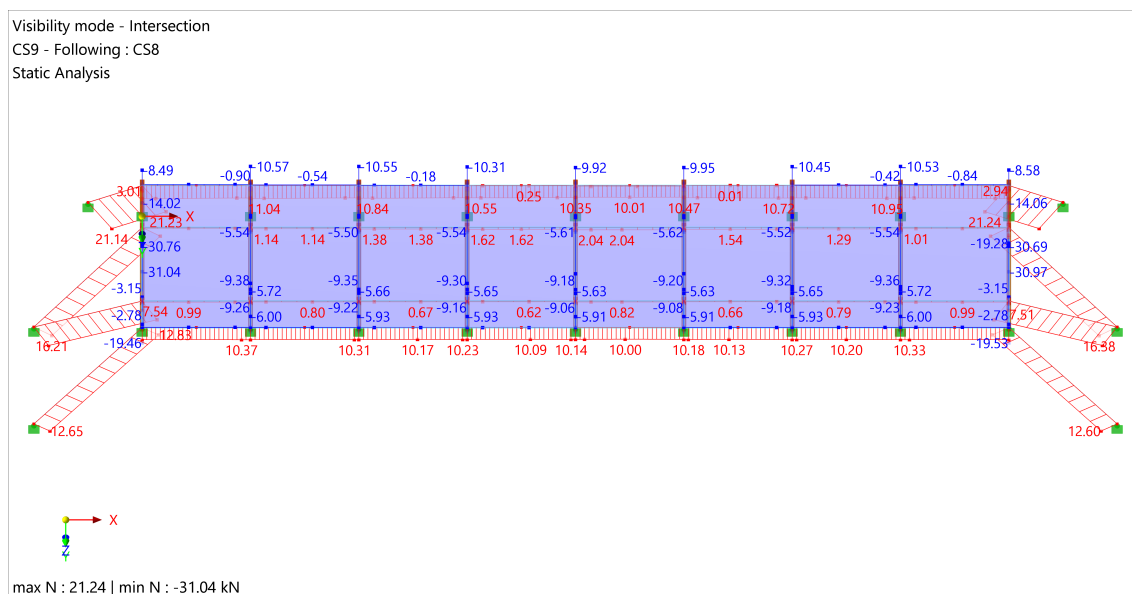
Proces form-finding byl ukončen v deváté fázi, kdy došlo k předepnutí poslední membrány. Tato fáze zahrnuje také podélná ztužidla. Na obrázcích 3.14 a 3.15 jsou zobrazeny hlavní vnitřní síly, které se pohybují okolo předepsané hodnoty $1,5 \text{ kNm}^{-1}$. Vliv výpočtu postupného napínání v konstrukčních fázích je patrný ve srovnání s rozdělením hlavních vnitřních sil na celé konstrukci na obrázku 3.9. Obrázek 3.16 zachycuje normálové síly v konstrukci v deváté fázi. Vhodným návrhem předpínacích sil bylo dosaženo téměř nulových hodnot normálových sil v podélných výztuhách. V lanech na okrajích membrán bylo naopak dosaženo předepsaných hodnot 10 kN .



Obr. 3.14: Varianta A: 9. fáze výstavby, hlavní vnitřní síla n_1

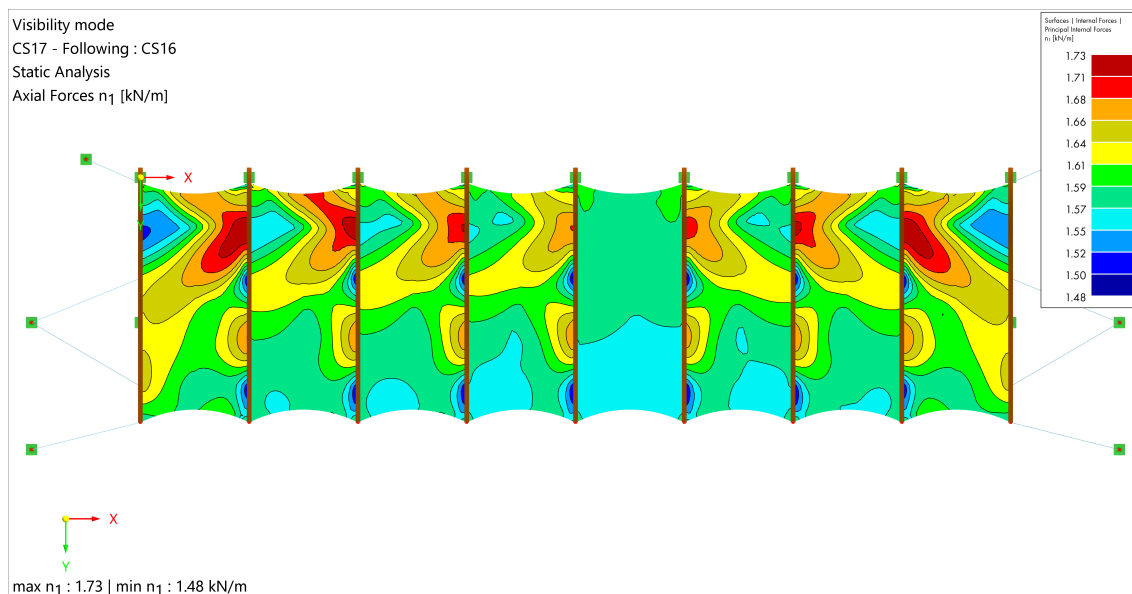


Obr. 3.15: Varianta A: 9. fáze výstavby, hlavní vnitřní síla n_2

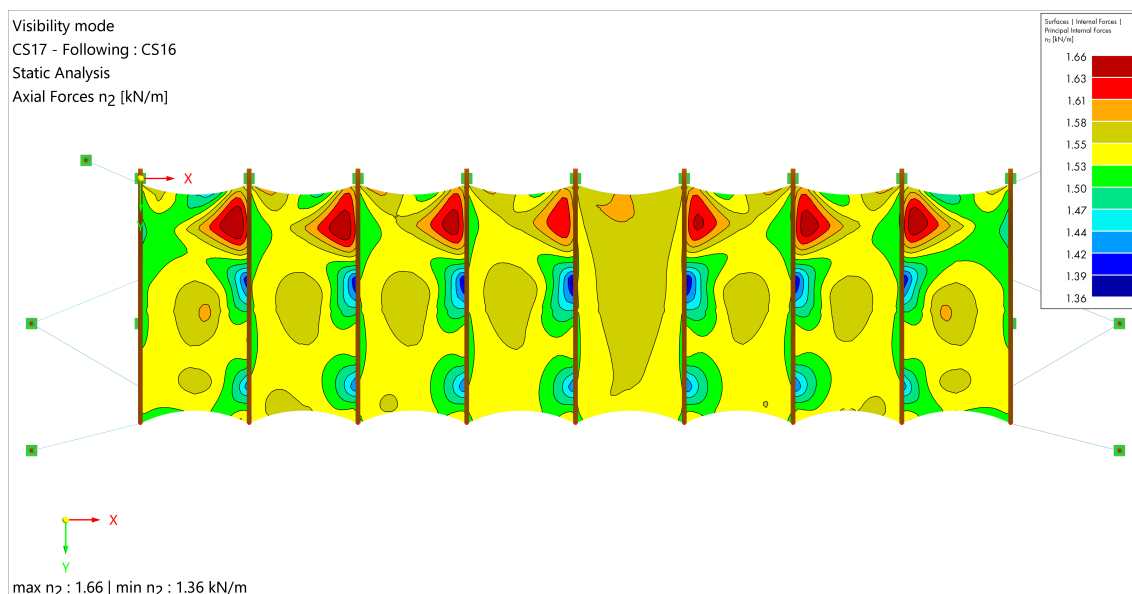


Obr. 3.16: Varianta A: 9. fáze výstavby, normálová síla N

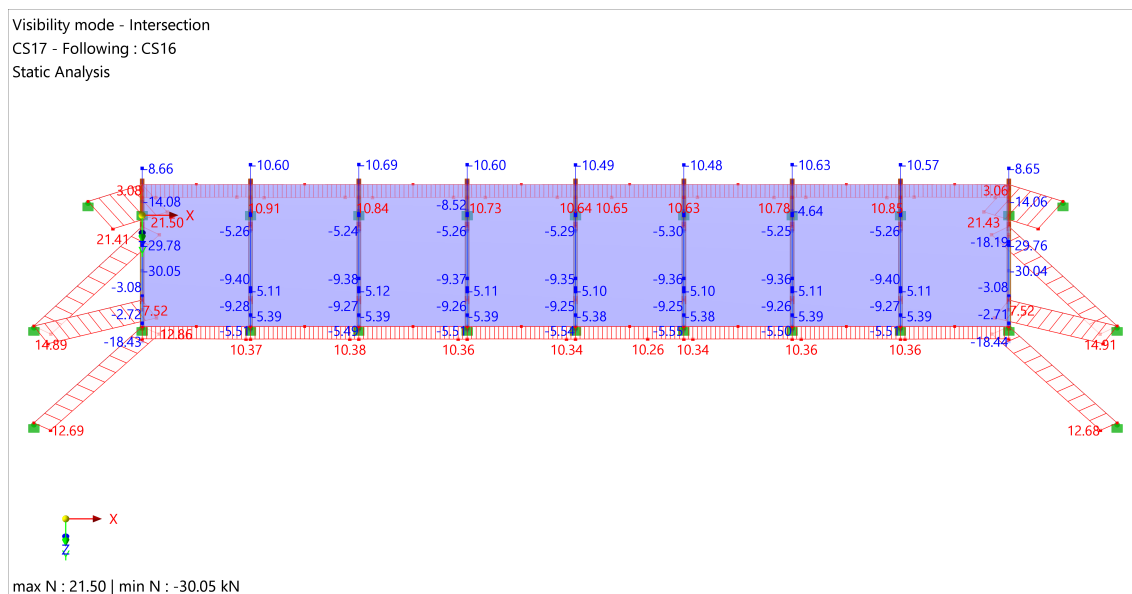
Následující fáze byly navrženy za účelem odstranění podélných výztuh a přenesení všech sil přes membránové plochy do kotevních lan. Dle totožného schématu A v tabulce 3.1 byly postupně odebírány podélné výztuhy v jednotlivých polích. Na obrázcích 3.17 a 3.18 jsou zobrazena konečná rozdělení hlavních vnitřních sil po odebrání všech výztuh. Zajímavé jsou především změny normálových sil v prutech a lanech na obrázku 3.19, kdy došlo k vnitřnímu přerozdělení.



Obr. 3.17: Varianta A: 17. fáze výstavby, hlavní vnitřní síla n_1



Obr. 3.18: Varianta A: 17. fáze výstavby, hlavní vnitřní síla n_2



Obr. 3.19: Varianta A: 17. fáze výstavby, normálová síla N

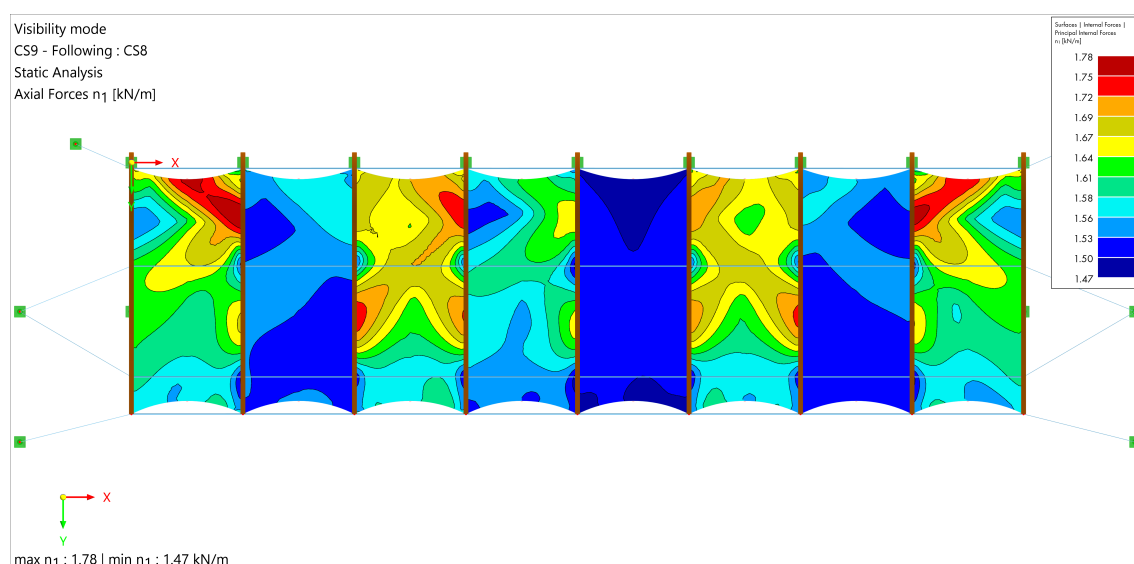
Výsledky z jednotlivých fází varianty A jsou uvedeny v příloze B této práce.

3.4.2 Druhá varianta fází výstavby

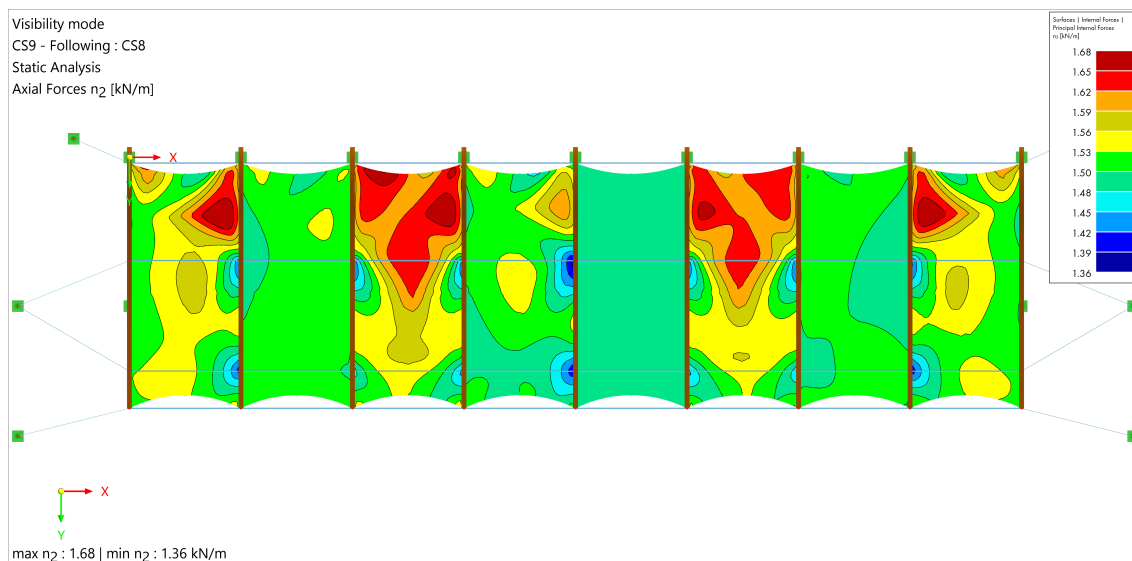
Varianta B pracuje se schématem napínání dle tabulky 3.1. Nejprve byly postupně předepruty krajní pole. Poté bylo jedno pole vynecháno a předeprnulo se až třetí v pořadí. Následovala pole druhá v pořadí od okrajů a poté pole středová. Tato varianta byla vyhodnocena jako nejvhodnější pro realizaci zvolené konstrukce.

Aby bylo možné srovnat navržené způsoby výstavby, byly dodrženy postupy definované pro výstavbu varianty A. Membrány byly postupně předpínány do deváté fáze, avšak s jiným, výše uvedeným pořadím. Poté se dle stejného postupu odstraňovaly podélné výztuhy.

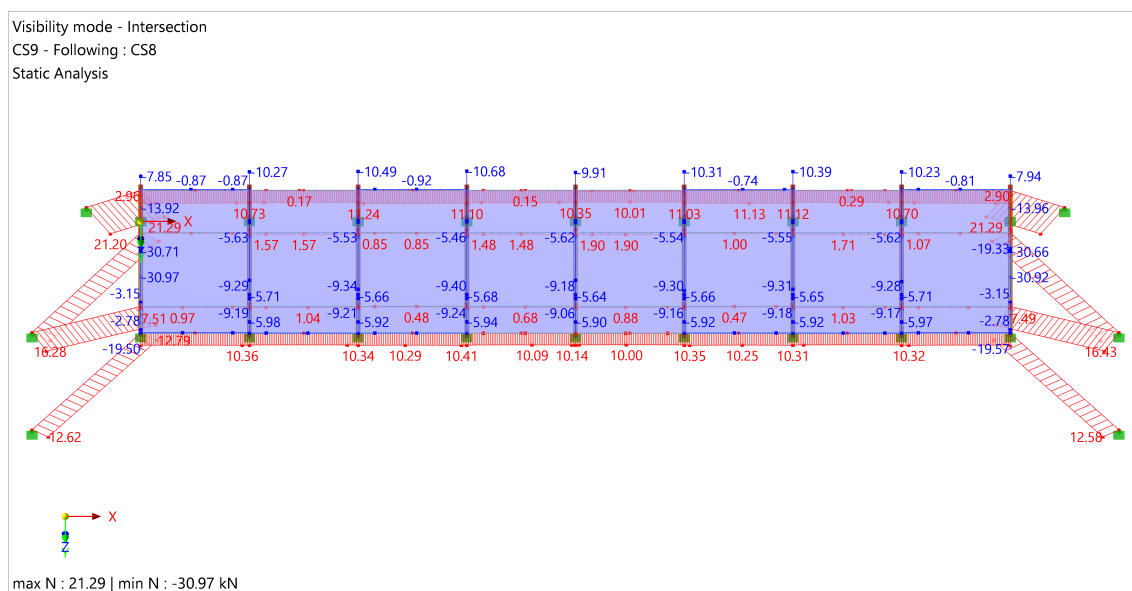
Na následujících snímcích 3.20 a 3.21 jsou zobrazeny hlavní vnitřní síly. Vhodným postupem při předpínání bylo docíleno nejen nízkých hodnot normálových sil v podélných výztuhách (obrázek 3.22), ale také rovnoměrnějšího rozdělení hlavních vnitřních sil v membránách.



Obr. 3.20: Varianta B: 9. fáze výstavby, hlavní vnitřní síla n_1

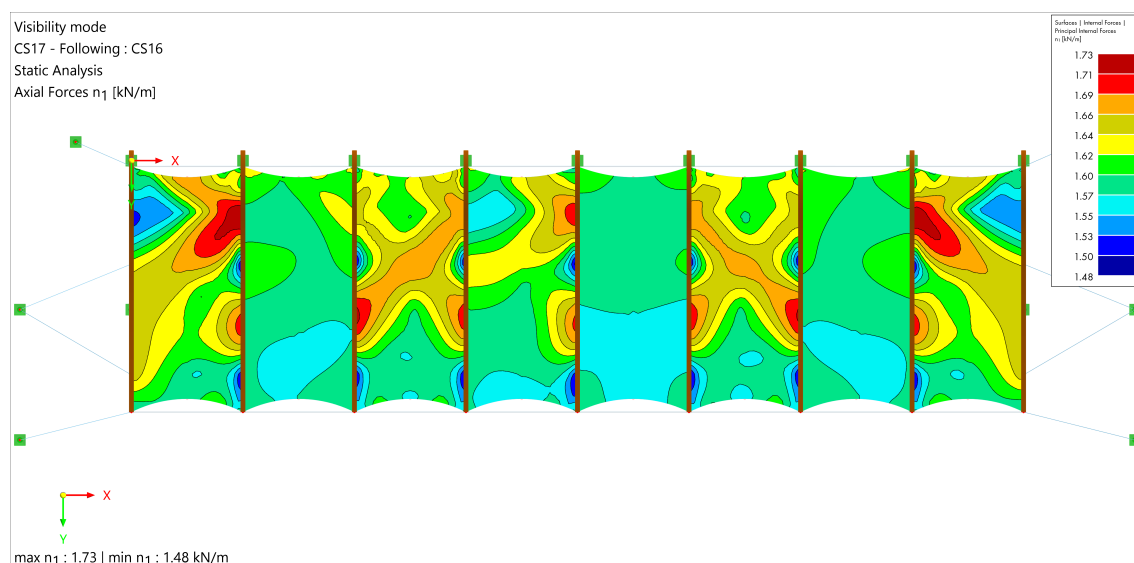


Obr. 3.21: Varianta B: 9. fáze výstavby, hlavní vnitřní síla n_2

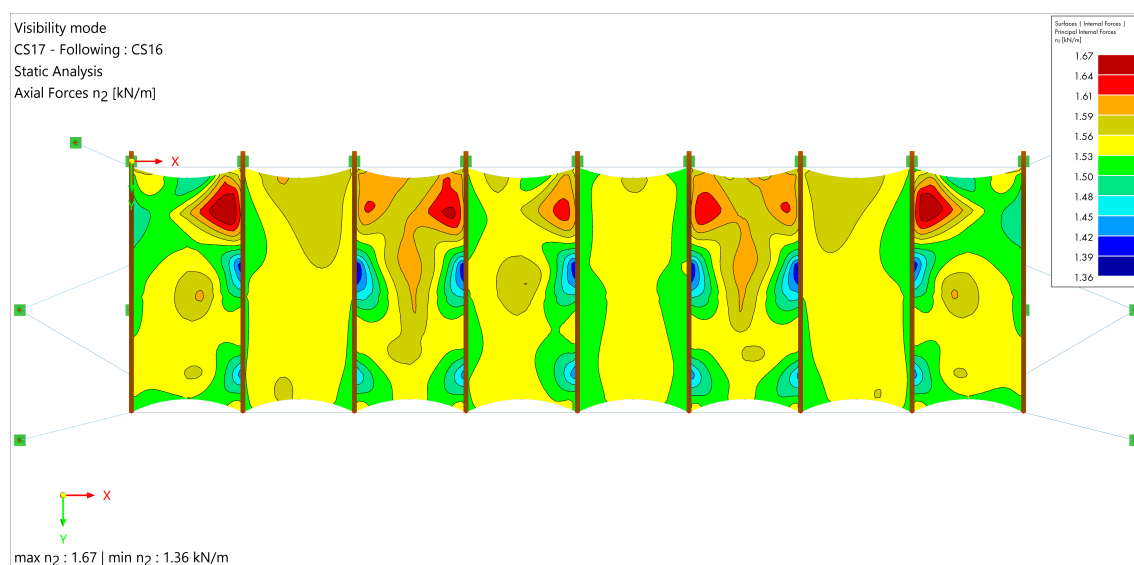


Obr. 3.22: Varianta B: 9. fáze výstavby, normálová síla N

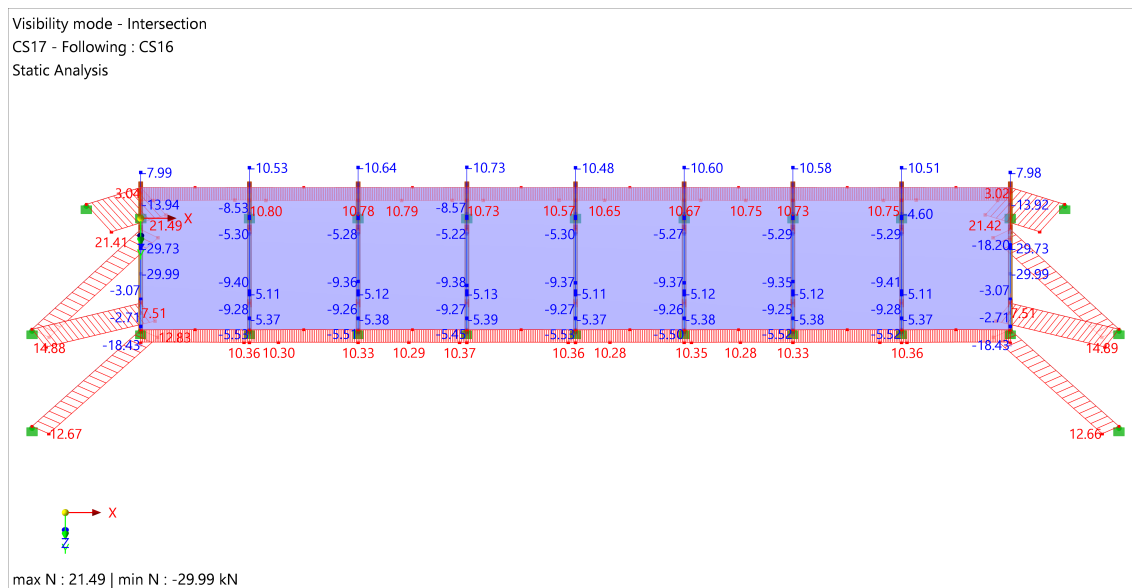
V dalších krocích byly postupně odstraňovány podélné výztuhy membránového zastřešení tribuny. Výsledné rozdělení hlavních vnitřních sil sedmnácté fáze je zachyceno na obrázcích 3.23 a 3.24.



Obr. 3.23: Varianta B: 17. fáze výstavby, hlavní vnitřní síla n_1



Obr. 3.24: Varianta B: 17. fáze výstavby, hlavní vnitřní síla n_2



Obr. 3.25: Varianta B: 17. fáze výstavby, normálová síla N

V příloze C této práce jsou uvedeny výsledky jednotlivých fází varianty B.

3.4.3 Diskuze výsledků

V předcházejících kapitolách byly prezentovány dvě varianty postupu výstavby membránového zastřešení tribuny. Zvolené varianty byly vybrány právě z důvodu demonstrace citlivosti konstrukce na zmíněný postup výstavby. Třebaže extrémy hlavních vnitřních sil v případě varianty A a B jsou téměř totožné, důležité je především rozdělení a procento výskytu extrémních hodnot na konstrukci.

Na obrázcích 3.14 a 3.15 lze pozorovat v deváté fázi varianty A směřování hlavních vnitřních sil do středu rozpětí. To bylo způsobeno postupným předpínáním konstrukce. Naopak u hlavních vnitřních sil deváté fáze varianty B na obrázcích 3.20 a 3.21 byl tento dostředný trend porušen vynecháním jednoho pole při předpínání konstrukce.

Po ukončení výstavby konstrukce použitím varianty A na obrázcích 3.17 a 3.18 je stále patrný dostředný trend. Je nutné podotknout, že procento výskytu maximálních hodnot hlavních vnitřních sil $n_1 \geq 1,70 \text{ kNm}^{-1}$ je téměř 1,50 %. Po porovnání s hlavními vnitřními silami poslední fáze varianty B na obrázcích 3.23 a 3.24 lze prohlásit, že při správné volbě výstavby lze dosáhnout rovnoměrnějšího a efektivnějšího rozdělení vnitřních sil. Snížil se také podíl extrémních hodnot na 0,74 %.

Následně bylo provedeno srovnání normálových sil obou variant v deváté fázi (obr. 3.16, 3.22) a v sedmnácté fázi (obr. 3.19, 3.25). Z vnitřních sil obou variant bylo vyhodnoceno, že pro danou konstrukci a možnosti výstavby nemá způsob předpínání zásadní vliv na finální normálové síly v prutech a lanech.

Jako vhodnější postup výstavby se jeví varianta B. Hlavní vnitřní síly jsou ve finální fázi rovnoměrněji rozděleny bez směrových trendů. Proto byla tato varianta vyhodnocena jako nejlepší a použita pro další statickou analýzu prezentovanou v následujících kapitolách.

3.5 Statická analýza

Stejně jako při návrhu konstrukce kónického tvaru byla v rámci návrhu membránového zastřešení tribuny provedena statická analýza. Finální fáze konstrukce byla ověřena na namáhání od klimatického zatížení.

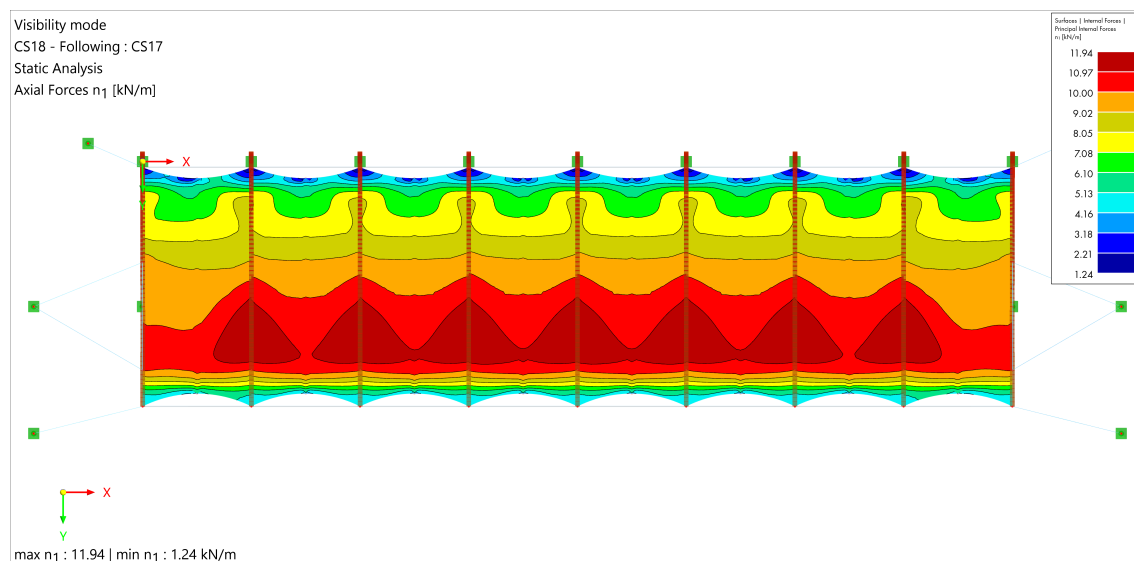
Při analýze výsledků bylo zjištěno, že barevné škály zahrnují také záporné hodnoty. Tlak je vyloučen z podstaty působení použitých materiálů. Záporné hodnoty jsou důsledkem průměrování a extrapolování při přednastaveném vyhlazování výsledků v programu. Tato skutečnost neovlivňuje správnost prezentovaných výsledků.

3.5.1 Zatížení sněhem

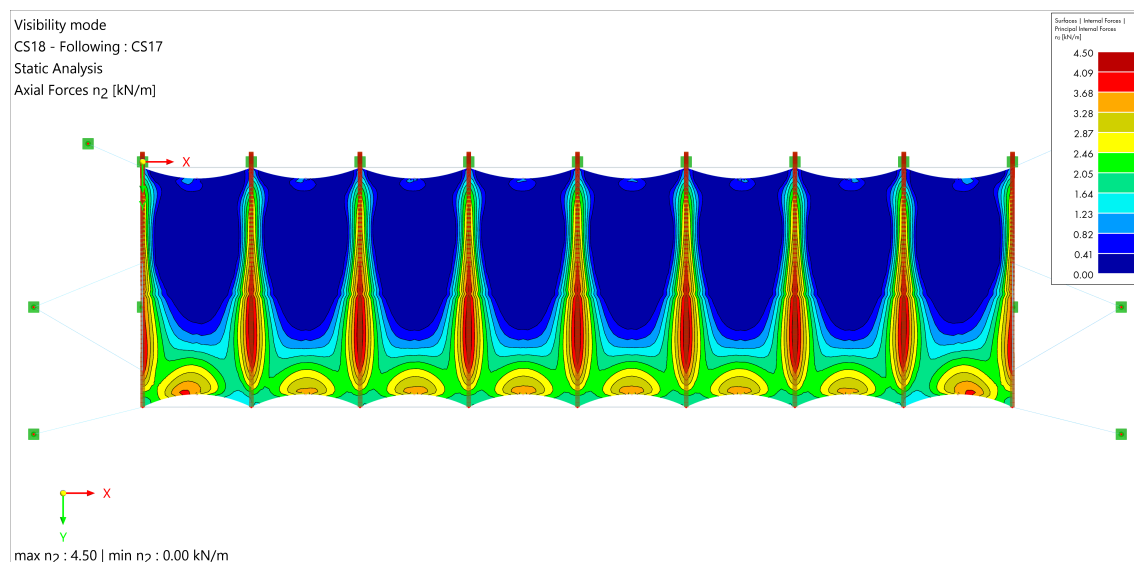
Zatížení sněhem bylo vypočteno dle platné normy ČSN EN 1991-1-3 [3]. Membránové zastřešení tribuny bylo dle tvaru zatříděno mezi válcové střechy. Zatížení sněhem se uvažuje pouze na části střechy se sklonem menším než 60° . Pro potřeby této práce bylo umístění konstrukce uvažováno v okolí Brna. Z toho vyplývá, že spadá do druhé sněhové oblasti, které odpovídá charakteristickému zatížení $1,0 \text{ kNm}^{-2}$. Typ krajiny na okraji Brna byl uvažován jako normální. Součinitel expozice C_e je roven 1,0. Dle odstavce 5.3.5(1) normy [3] byl použit tvarový součinitel μ_3 . Ten nabývá hodnoty 0,8 pro nenavátý sníh. Tepelný součinitel C_t byl zvolen 1,0. Zatížení sněhem na membránovém zastřešení tribuny nabývá hodnoty $0,8 \text{ kNm}^{-2}$.

Výsledné hodnoty

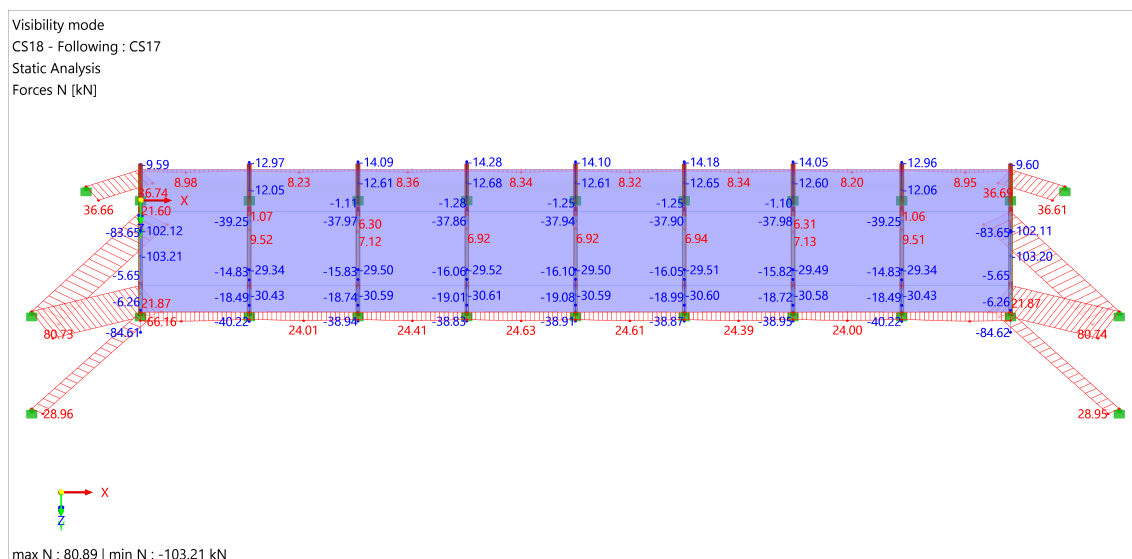
Největší tahová síla n_1 při zatížení sněhem nabývá hodnoty $11,94 \text{ kNm}^{-1}$. Největší normálová síla se nachází v kotevních lanech a je rovna $80,74 \text{ kN}$.



Obr. 3.26: Membránové zastřešení: zatížení sněhem, hlavní vnitřní síla n_1

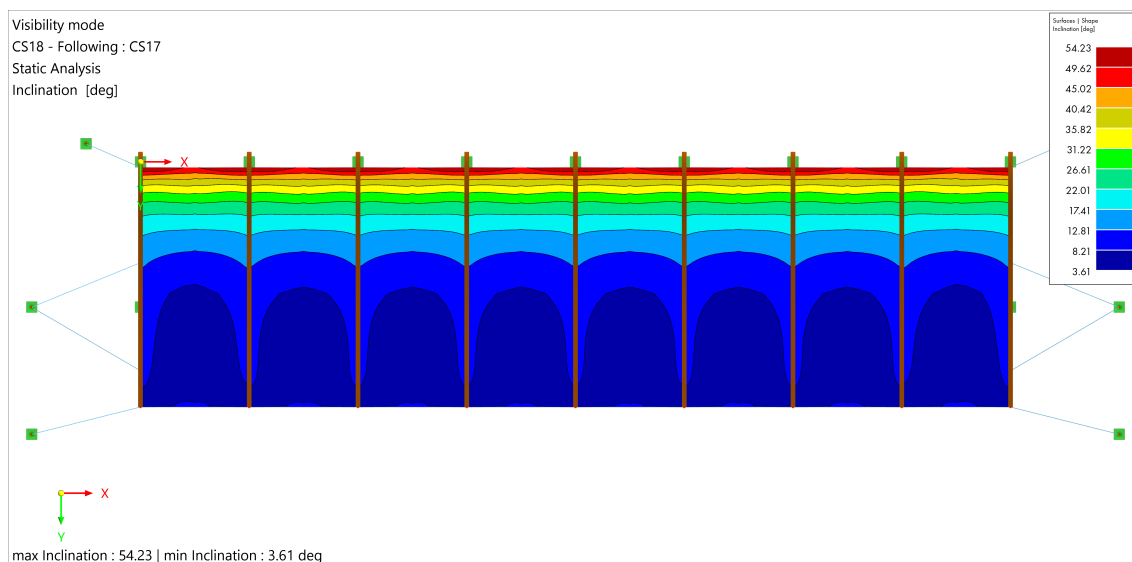


Obr. 3.27: Membránové zastřešení: zatížení sněhem, hlavní vnitřní síla n_2



Obr. 3.28: Membránové zastřešení: zatížení sněhem, normálová síla N

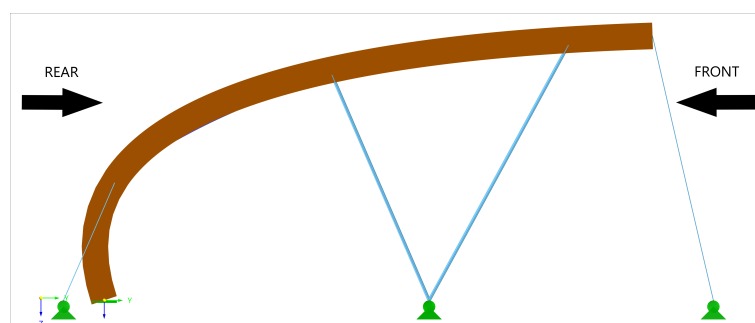
Při zatížení sněhem, které je zadáno svisle a vztaženo k půdorysné ploše střechy, je nutné kontrolovat vznik jevu *ponding effect*. Ten byl zkoumán nejdříve na výsledném sklonu membrány zachyceném na obrázku 3.29 a poté na sklonových směrech. Předpětí membrány a konstrukce bylo vhodně zvoleno. Vznik jevu byl v tomto případě vyloučen.



Obr. 3.29: Membránové zastřešení: zatížení sněhem, sklon

3.5.2 Zatížení větrem

Výpočet hodnot zatížení větrem byl převzat z kapitoly Membránová konstrukce kónického tvaru. Dynamický tlak větru je roven $1,02 \text{ kNm}^{-2}$. Součinitel tlaku c_p norma ČSN EN 1991-1-4 [4] pro tento typ konstrukce nestanovuje. Proto byly použity hodnoty z experimentu provedeném ve větrném tunelu na podobné konstrukci. Výsledné hodnoty jsou shrnuty v tabulce 3.30. Tyto hodnoty byly publikovány v European design guide for tensile surface structures [7]. Konstrukce byla nejprve zatěžována proudem větru proti směru globální osy Y (front) a poté po směru globální osy Y (rear). Směry proudění větru jsou zaznačeny na obrázku 3.30.



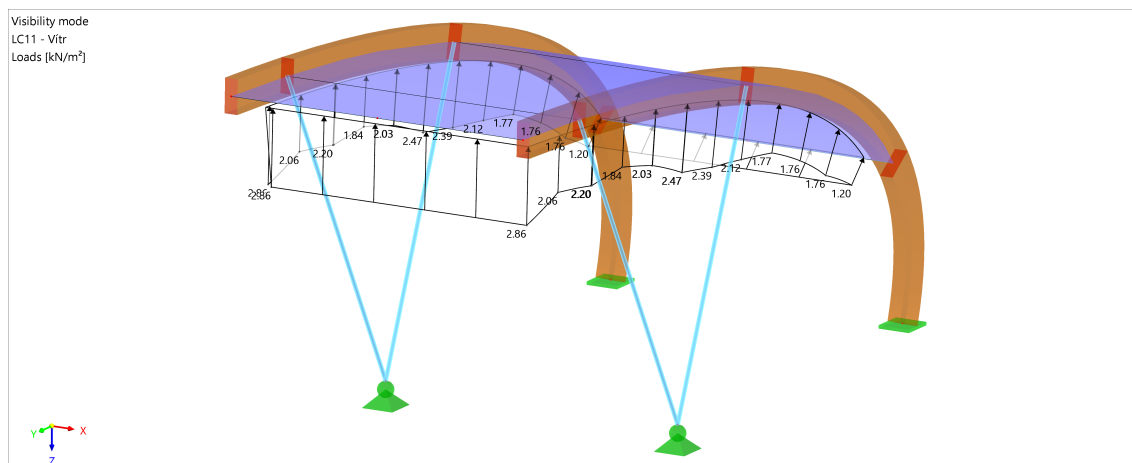
Obr. 3.30: Membránové zastřešení: směr zatížení větrem

Tab. 3.2: Hodnoty součinitele tlaku c_p dle experimentů ve větrném tunelu [7]

Globální souřadnice			Součinitel tlaku		Zatížení	
X [m]	Y [m]	Z [m]	Front	Rear	Front	Rear
0,000	0,309	-3,013	-1,18	0,69	-1,20	0,70
0,000	1,197	-3,918	-1,73	1,33	-1,76	1,35
0,000	2,282	-4,579	-1,73	0,66	-1,76	0,67
0,000	3,455	-5,071	-1,74	-0,24	-1,77	-0,24
0,000	4,671	-5,444	-2,09	-0,88	-2,12	-0,89
0,000	5,911	-5,733	-2,35	-1,09	-2,39	-1,11
0,000	7,163	-5,958	-2,43	-0,90	-2,47	-0,91
0,000	8,424	-6,134	-2,00	-0,68	-2,03	-0,69
0,000	9,689	-6,270	-1,81	-0,38	-1,84	-0,39
0,000	10,958	-6,373	-2,17	-0,04	-2,20	-0,04
0,000	12,228	-6,448	-2,03	0,07	-2,06	0,07
0,000	13,500	-6,500	-2,82	0,10	-2,86	0,10

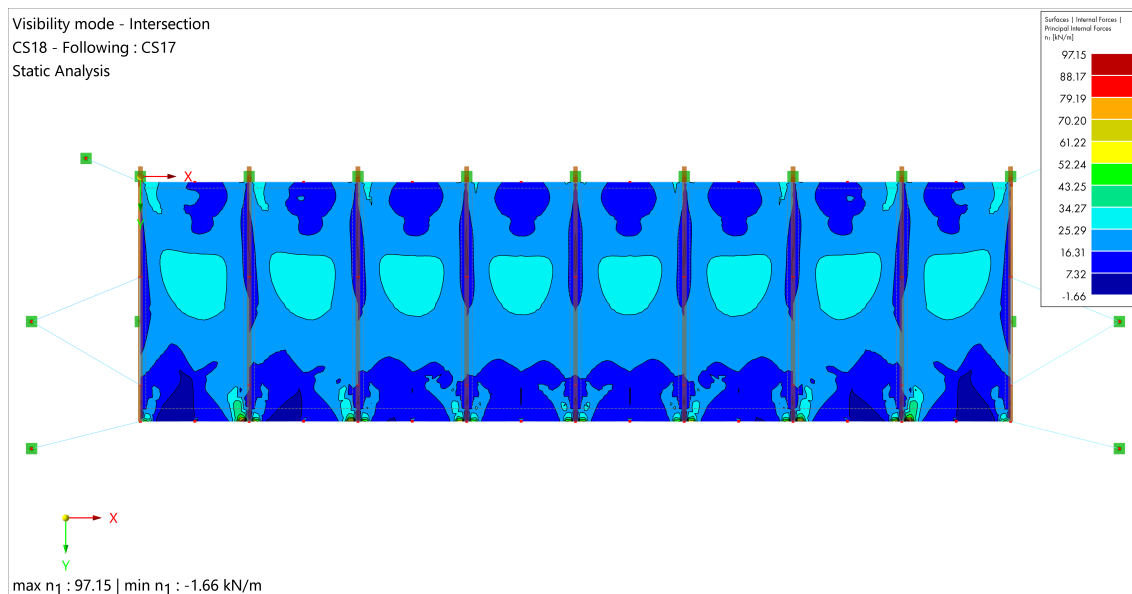
Zatížení větrem proti směru globální osy Y

Proudění větru v tomto směru je na obrázku 3.30 označeno jako FRONT. Vítr naráží na konstrukci zepředu. Z vnější strany působí na plochu membrány sání. Naopak z vnitřní strany vítr působí tlakové namáhání. Výsledné působení na konstrukci z tabulky 3.2 je zachyceno na obrázku 3.31.

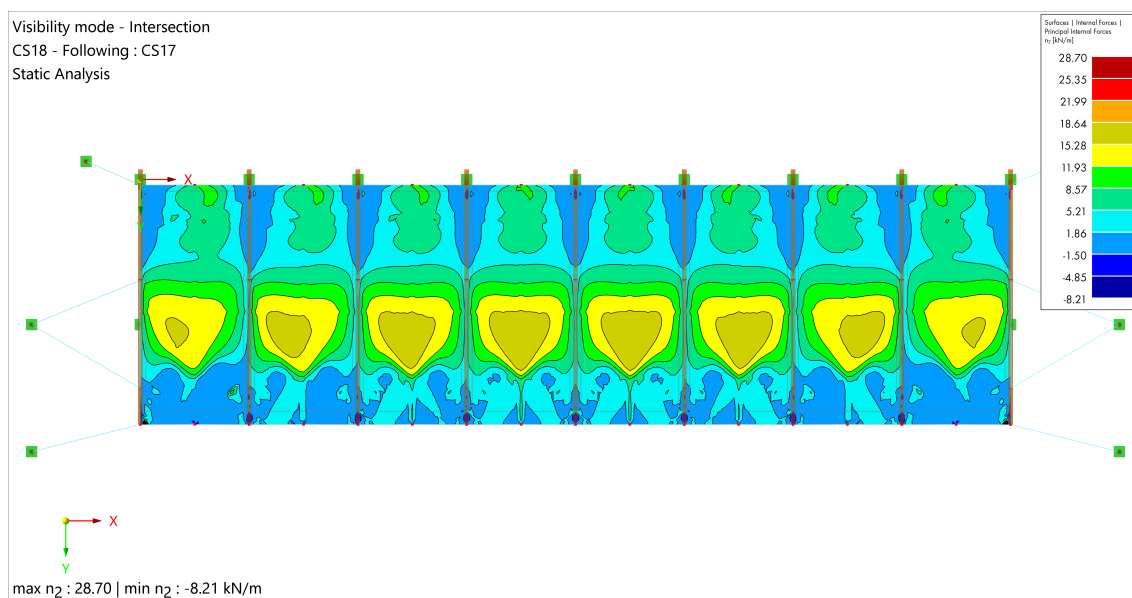


Obr. 3.31: Membránové zastřešení: zatížení větrem proti směru globální osy Y

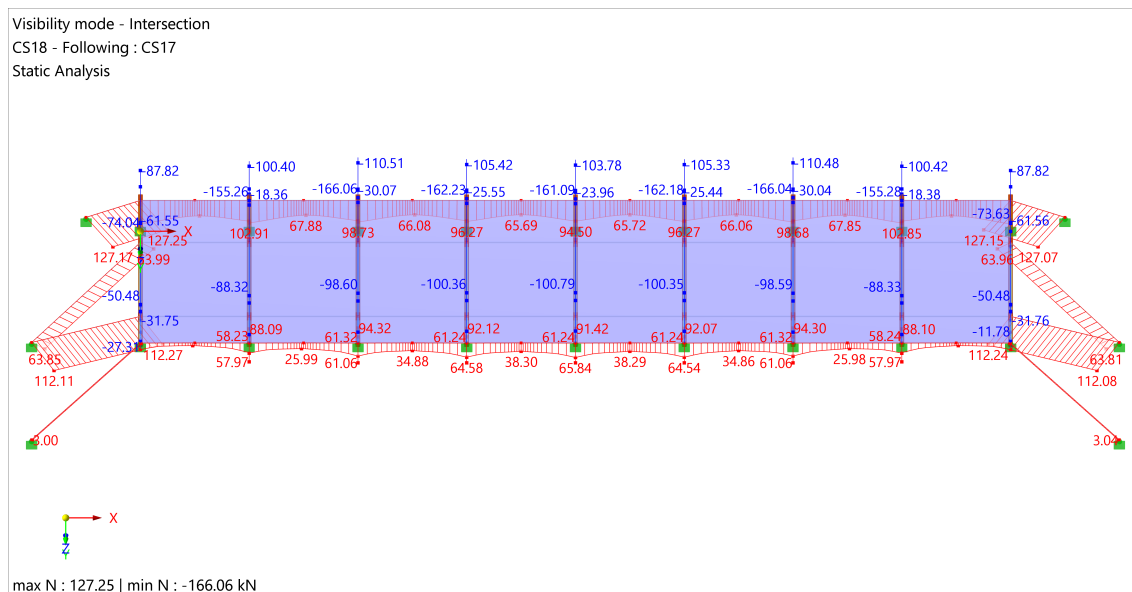
Hlavní vnitřní síly při zatížení větrem byly zachyceny na následujících obrázcích. Hlavní vnitřní síla n_1 na obrázku 3.32 dosahuje průměrné hodnoty 30 kNm^{-1} . Bližším zkoumáním bylo zjištěno, že extrémní hodnota z barevné škály nebyla na konstrukci nalezena.



Obr. 3.32: Zatížení větrem proti směru globální osy Y, hlavní vnitřní síla n_1



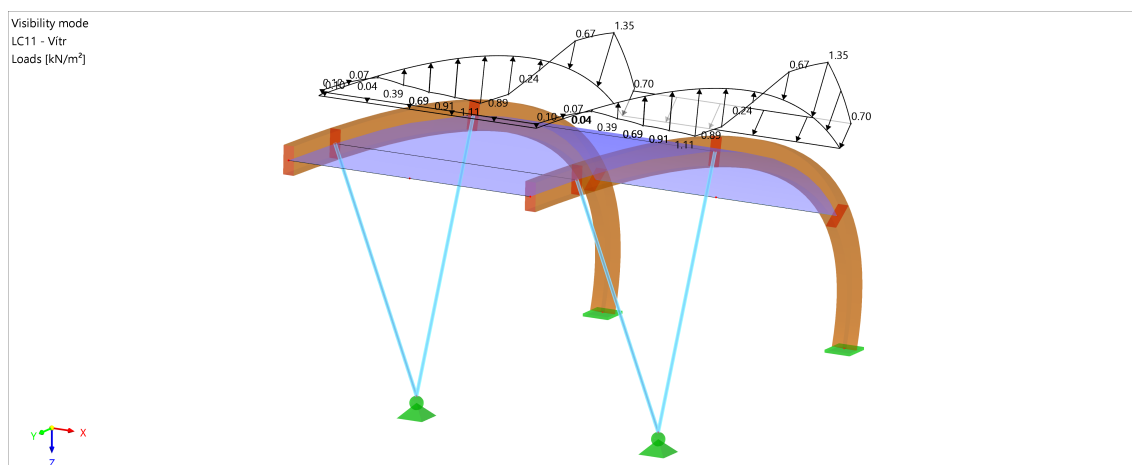
Obr. 3.33: Zatížení větrem proti směru globální osy Y, hlavní vnitřní síla n_2



Obr. 3.34: Zatížení větrem proti směru globální osy Y, normálová síla N

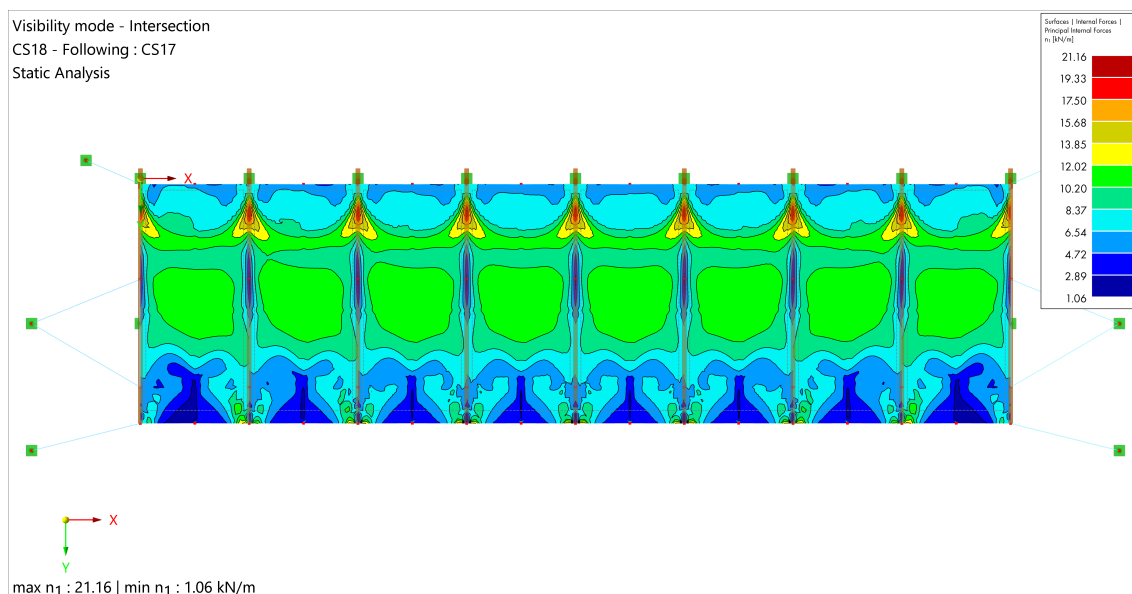
Zatížení větrem ve směru globální osy Y

V případě opačného proudění větru je situace komplikovanější. Vítr působí na konstrukci ze zadní strany dle obrázku 3.30 (REAR). Membrána je v závislosti na poloze z vnější strany tlačena a poté tažena. Z vnitřní strany působí na membránu sání. Kombinací namáhání z vnější a vnitřní strany bylo dosaženo zatížení, které je zachyceno na obrázku 3.35.

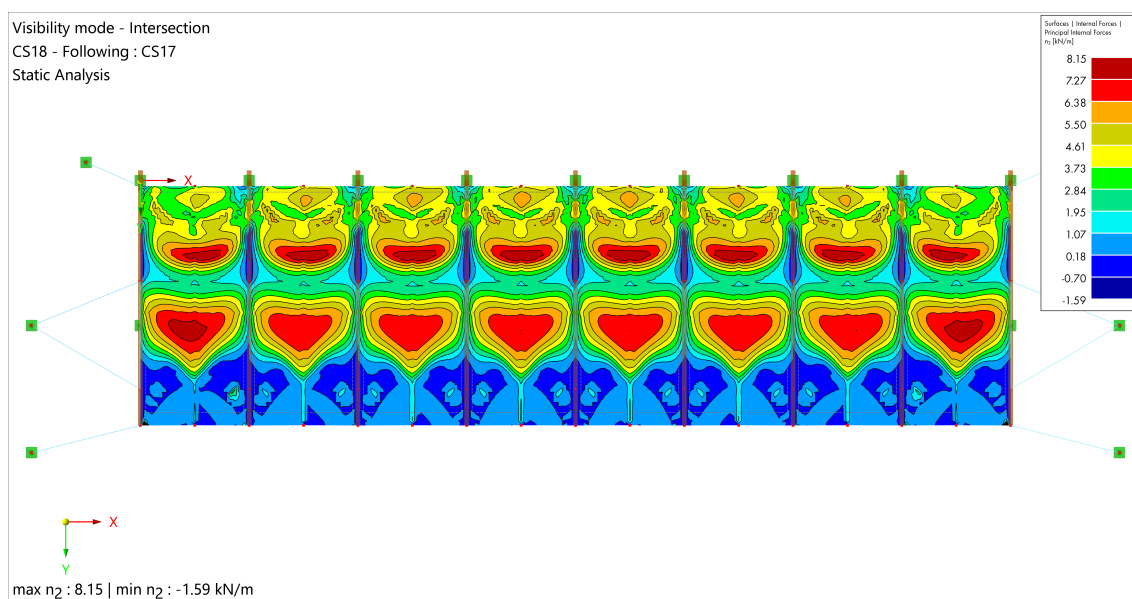


Obr. 3.35: Membránové zastřešení: zatížení větrem ve směru globální osy Y

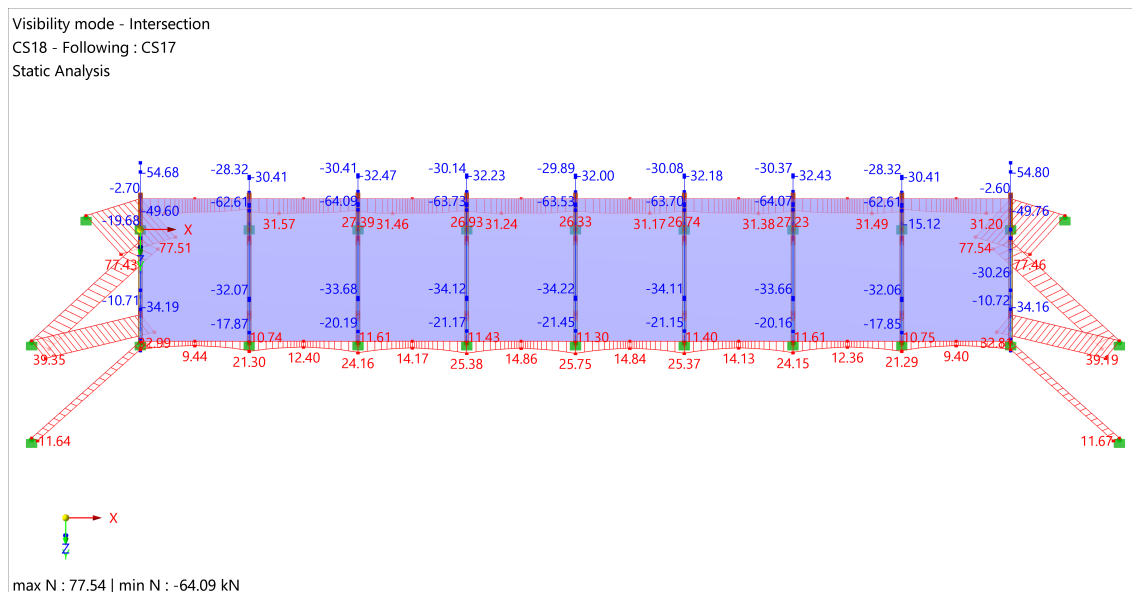
Na obrázcích 3.36 a 3.37 byly zaznamenány hlavní vnitřní síly. Maximální hodnota hlavní vnitřní síly n_1 byla 21,16 kNm⁻¹.



Obr. 3.36: Zatížení větrem ve směru globální osy Y, hlavní vnitřní síla n_1



Obr. 3.37: Zatížení větrem ve směru globální osy Y, hlavní vnitřní síla n_2



Obr. 3.38: Zatížení větrem ve směru globální osy Y, normálová síla N

Srovnání výsledků

Z výše uvedených hodnot hlavních vnitřních sil a normálových sil v konstrukci bylo zjištěno, že nejhorším namáháním je působení větru zepředu konstrukce. Při tomto působení se sčítají účinky na vnitřní a vnější straně membrány. Vysokých hodnot normálových sil dosahují lana na okrajích membrán uprostřed rozpětí. Kotevní lana jsou namáhána více než desetkrát větší silou než na jakou byla při výstavbě předeprnuta. Z tohoto důvodu je ověření na namáhání větrem nedílnou součástí analýzy lehkých membránových konstrukcí.

4 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo vytvořit stručný návod pro navrhování lehkých membránových konstrukcí. Práce informuje o úskalích a problémech, které mohou při návrhu a realizaci vzniknout.

V teoretické části práce byla provedena literární rešerše. Důležité poznatky byly shrnuty v šesti sekcích, které reflektují postup návrhu. Ten je popsán od volby tvaru a materiálu až po výpočet a rozdělení výsledné konstrukce na stříhové vzory. V závěru byly uvedeny příklady realizací, které při návrhu podcenily namáhání od klimatického zatížení.

V rámci této diplomové práce byl prezentován návrh a výpočet dvou odlišných membránových konstrukcí.

V první polovině praktické části byla analyzována membránová konstrukce kónického tvaru na břehu Brněnské přehrady. Nejprve byl demonstrován vliv volby výpočetní metody. Z důvodu eliminace zaškrcení membrány u vrcholu byla zvolena projekční metoda.

V následující kapitole byly prezentovány dvě volby předpětí. Anizotropní předpětí v průmětu vykazovalo rozložení vnitřních sil, kde v rozích vznikaly extrémy, které by bylo nutné řešit speciálními detaily. Naopak izotropním předpětím v průmětu bylo dosaženo rovnoměrnějšího rozložení vnitřních sil a mírnějšího sklonu u vrcholu konstrukce. V důsledku toho byla druhá volba předpětí vyhodnocena jako nejlepší pro danou konstrukci.

Dále byly z vybrané varianty vytvořeny stříhové vzory. S ohledem na omezenou šířku rolí byly vytvořeny segmenty různým dělením kónické konstrukce. Právě zúžením stříhů při vyšším počtu dělení bylo dosaženo rovnoměrnějšího rozdělení poměrných deformací v obou směrech. Výsledný stříhový vzor byl zachycen na obrázku 2.22.

Posledním prezentovaným krokem byla statická analýza. Nejprve se konstrukce zatížila sněhem a byl vyloučen vznik jevu známého jako *ponding effect*. Zatížení větrem na konstrukci bylo analyzováno dvěma způsoby. Nejprve se převzaly součinitele tlaku c_p stanovené v [7]. Poté byl model konstrukce exportován do virtuálního větrného tunelu programu RWIND. Z výsledků vyplynulo, že oba přístupy poskytují srovnatelné výsledky.

V druhé polovině praktické části byla prezentována konstrukce membránového zastřešení tribuny. U této konstrukce byla provedena analýza postupné výstavby, která poskytuje možnost hlouběji analyzovat odezvu konstrukce, která je ovlivněna zvolenou realizací. V rámci práce tak byly srovnány i dva z možných způsobů výstavby zvolené konstrukce.

Obě zvolené varianty postupné výstavby obsahovaly stejnou první konstrukční fázi. V té byla předepnuta krajní kotevní lana. Každá z variant se dále vyznačovala odlišným pořadím napínání dle tabulky 3.1.

Porovnáním výsledků byly zkoumány odlišné odezvy jednotlivých postupů. V případě varianty A sice nevznikaly příliš velké hodnoty, ale procento výskytu extrémních hlavních vnitřních sil bylo obecně vyšší. Jako nejvhodnější schéma napínání byla vyhodnocena varianta B především kvůli rovnoměrnějšímu rozdělení hlavních vnitřních sil a eliminaci dostředného trendu.

Výpočet membránového zastřešení tribuny byl zakončen statickou analýzou. Při vyhodnocování výsledků z programu RFEM je nezbytné brát v úvahu automaticky používanou extrapolaci vyhlazených výsledků. V rámci programu je možné průměrování a extrapolaci vypnout. To však vede k méně hladkým průběhům, a proto byla zvolena první varianta.

Ukázalo se, že konstrukce přenesla zatížení sněhem bez vývoje negativních jevů, jako například *ponding effect*, který by mohl zatížení nepříznivě ovlivnit. Tlakové součinitele c_p byly u této konstrukce převzaty z experimentu publikovaném v European design guide for tensile surface structures [7]. Byly prezentovány výsledky zatížení větrem působící na konstrukci ze přední a zadní strany. Bylo vyhodnoceno, že největší namáhání působí na konstrukci právě ze přední strany, kdy se účinky na vnitřní a vnější straně sčítají.

Cílem této práce bylo prezentovat pokročilou analýzu membránových konstrukcí. Kromě samotných specifických výpočetních úkonů (form-finding a generování stříhových vzorů) bylo zkoumáno rovněž zohlednění postupné výstavby. Tyto stavby se vyznačují svou jedinečností ať už v architektonickém, či stavebním řešení. Proto je nutné každou konstrukci posuzovat individuálně a s citem. Dále bylo potvrzeno, že i pro netypickou membránovou konstrukci kónického tvaru lze použít doporučení publikovaná ve veřejně dostupných zdrojích, a to bez větších odchylek od reálného působení. Postupy a doporučení byly shrnuty v této práci za účelem vytvoření jednoduchého schématu, dle kterého je možné konstrukce tohoto typu bezpečně navrhovat.

Literatura

1. *3dtex GmbH* [online]. Berlin, 2008. Dostupné také z: <https://www.3dtex.de/>. [cit. 2020-12-7].
2. CERMAK, J. E. *Studie budov a konstrukcí ve větrných tunelech*. Technická knižnice. Praha : Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě ČKAIT vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. ISBN 978-80-87093-87-0.
3. ČSN EN 1991-1-3 *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-3: Obecná zatížení - Zatížení sněhem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013. Třídící znak 73 0035.
4. ČSN EN 1991-1-4 *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-4: Obecná zatížení - Zatížení větrem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013. Třídící znak 73 0035.
5. DIERINGER, F. H. *Numerical Methods for the Design and Analysis of Tensile Structures*. 2014. Disertační práce. Technische Universität München.
6. *Dlubal Software GmbH* [online]. Tiefenbach, 2001. Dostupné také z: <https://www.dlubal.com/cs/podpora-a-skoleni>. [cit. 2020-10-13].
7. FORSTER, B.; MOLLAERT, M. *European design guide for tensile surface structures*. 1. vyd. Brusel : Tensinet, 2004. ISBN 90-8086-871-X.
8. *Frei Otto: Spanning the Future* [online]. USA, 2015. Dostupné také z: <http://www.freiottofilm.com/>. [cit. 2020-12-10].
9. GERLIC, K. Design Elements for Snow-Load Resistant Membrane Roofs. In: 2013.
10. JANALÍK, J.; ŠTÁVA, P. *Mechanika tekutin*. Ostrava : VŠB - Technická univerzita, 2002. ISBN 80-248-0038-1.
11. KOPŘIVA, M.; NETUŠIL, M.; ACHTEN, H.; HIRNŠAL, Z. *Membránová architektura*. 1. vyd. Praha : České vysoké učení technické, 2015. ISBN 978-80-01-05693-6.
12. LANG, R. *Algorithms for design and analysis of membrane structures*. 2019. Disertační práce. Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Department of Structural Mechanics.

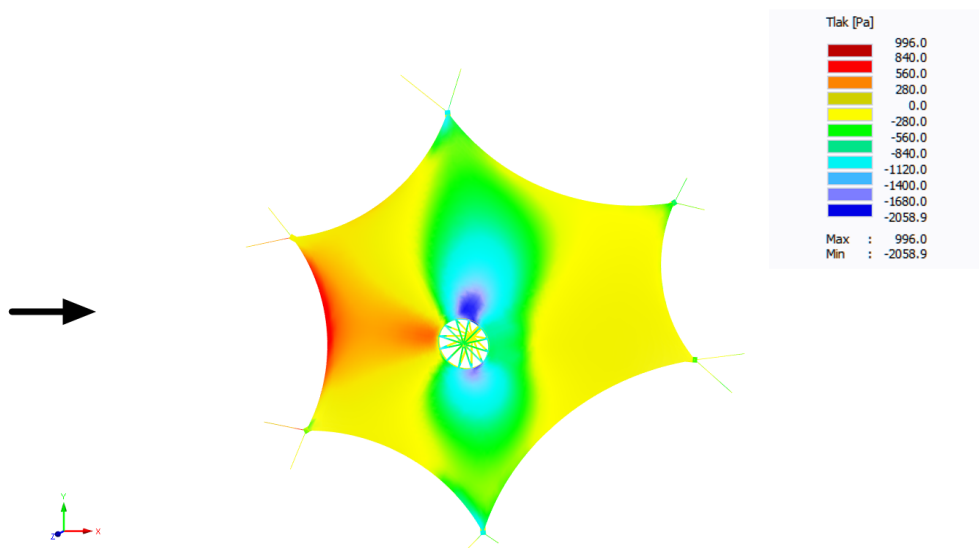
13. Minnesota Metrodome stadium roof to be replaced | Reuters. *Business & Financial News, U.S & International Breaking News / Reuters* [online]. Copyright Reuters. All Rights Reserved., 2011. Dostupné také z: <https://www.reuters.com/article/us-nfl-minnesota-metrodome/minnesota-metrodome-stadium-roof-to-be-replaced-idUSTRE7198WD20110210>. [cit. 2020-10-18].
14. OTTO, F.; RASCH, B. *Finding form*. Deutscher Werkbund Bayern, 1995. ISBN 3-930698-66-8.
15. *RWIND Simulation User Manual* [online]. 2020. Dostupné také z: <https://www.dlupal.com/cs/stahovani-a-informace/dokumenty/manualy>.
16. SEIDEL, M. *Tensile Surface Structures: A Practical Guide to Cable and Membrane Construction*. 1. vyd. Berlín : Ernst & Sohn, 2009. ISBN 978-3-433-02922-0.
17. VEENENDAAL, D.; BLOCK, P. An overview and comparison of structural form finding methods for general networks. *International Journal of Solids and Structures*. 2012, roč. 2012, č. 49, s. 3741–3753. ISSN 0020-7683.

Seznam příloh

A	Tlak větru na membránovou konstrukci v programu RWIND	89
B	Fáze výstavby varianta A	93
C	Fáze výstavby varianta B	107

A Tlak větru na membránovou konstrukci v programu RWIND

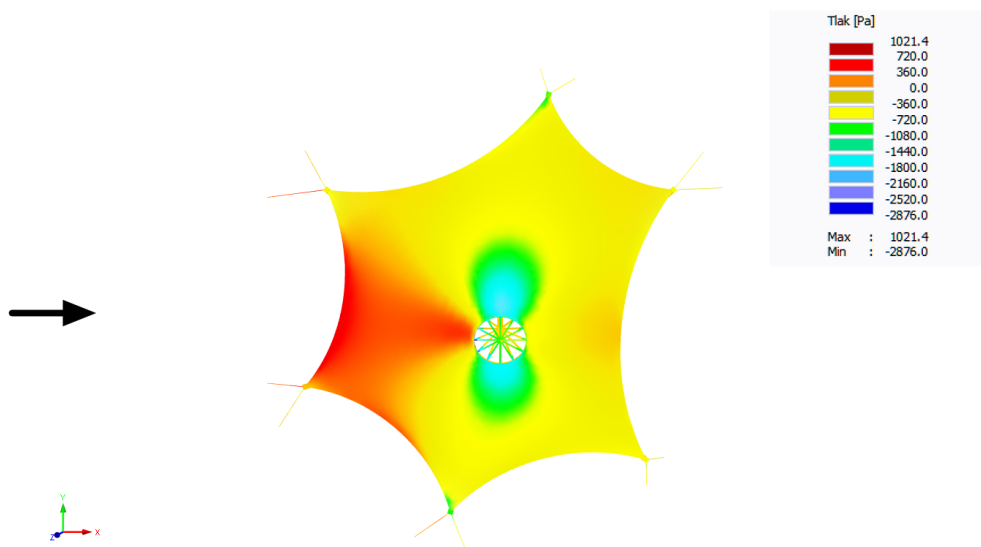
Rozměry větrného tunelu: Dx = 152.85 m, Dy = 102.983 m, Dz = 30.106 m
Rychlost větru: 42.08 m/s



Informace o síti: 609 037 buněk, 692 031 uzlů
Součet odporových síl původního modelu: Fx = 15.823 MN, Fy = 0.88 MN, Fz = -31.998 MN
Součet odporových síl zjednodušeného modelu: Fx = 22.347 MN, Fy = 0.84 MN, Fz = -33.285 MN

Obr. A.1: Numerická analýza v programu RWIND: tlak větru pod úhlem 45°

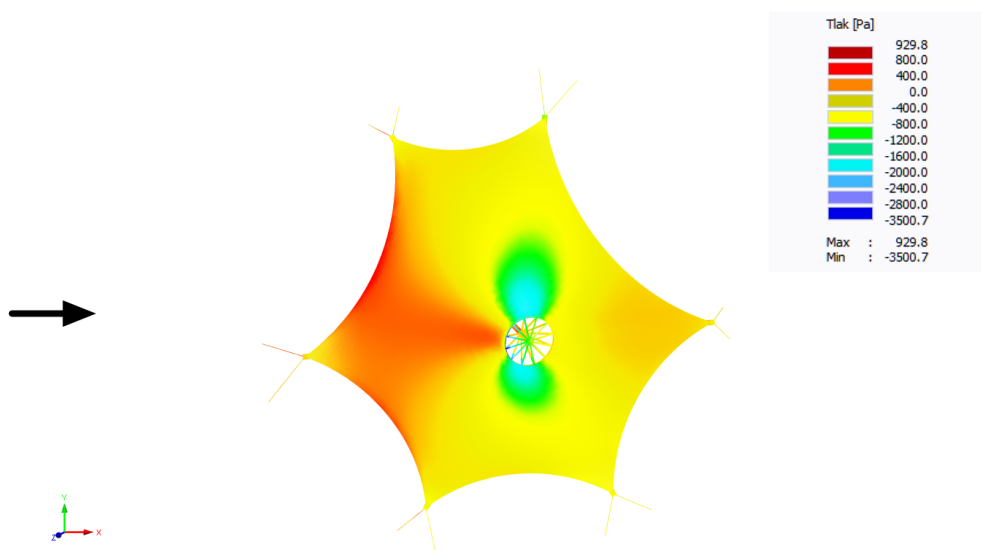
Rozměry větrného tunelu: Dx = 147.752 m, Dy = 103.968 m, Dz = 30.106 m
Rychlost větru: 42.08 m/s



Informace o síti: 730 406 buněk, 825 118 uzlů
Součet odporových síl původního modelu: Fx = 16.813 kN, Fy = 2.136 kN, Fz = 41.629 kN
Součet odporových síl zjednodušeného modelu: Fx = 23.595 kN, Fy = 0.747 kN, Fz = 44.506 kN

Obr. A.2: Numerická analýza v programu RWIND: tlak větru pod úhlem 90°

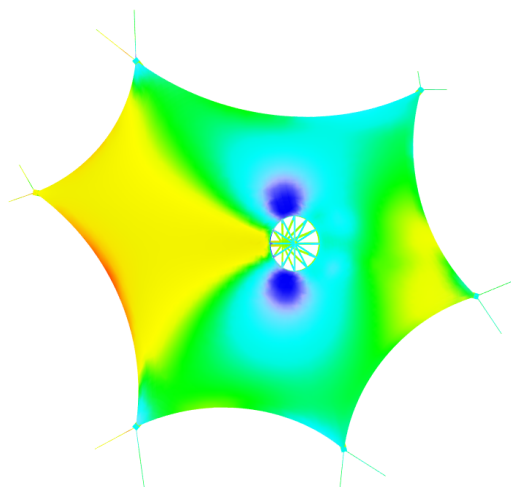
Rozměry větrného tunelu: Dx = 152.85 m, Dy = 106.508 m, Dz = 30.106 m
Rychlost větru: 42.08 m/s



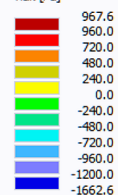
Informace o síti: 698 936 buněk, 788 729 uzlů
Součet odporových síl původního modelu: Fx = 15.703 kN, Fy = 1.339 kN, Fz = 40.55 kN
Součet odporových síl zjednodušeného modelu: Fx = 23.759 kN, Fy = 1.08 kN, Fz = 43.593 kN

Obr. A.3: Numerická analýza v programu RWIND: tlak větru pod úhlem 135°

Rozměry větrného tunelu: $D_x = 147.752 \text{ m}$, $D_y = 96.018 \text{ m}$, $D_z = 30.106 \text{ m}$
 Rychlost větru: 42.08 m/s



Tlak [Pa]

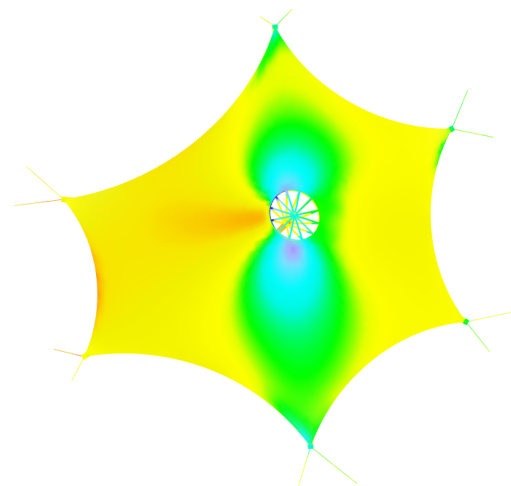


Max : 967.6
 Min : -1662.6

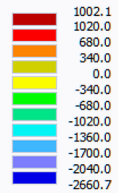
Informace o sítí: 648 068 bodů, 733 953 uzlů
 Součet odporových síl původního modelu: $F_x = 17.934 \text{ kN}$, $F_y = 1.26 \text{ kN}$, $F_z = 33.106 \text{ kN}$
 Součet odporových síl zjednodušeného modelu: $F_x = 26.02 \text{ kN}$, $F_y = 1.275 \text{ kN}$, $F_z = 34.461 \text{ kN}$

Obr. A.4: Numerická analýza v programu RWIND: tlak větru pod úhlem 180°

Rozměry větrného tunelu: $D_x = 152.85 \text{ m}$, $D_y = 102.983 \text{ m}$, $D_z = 30.106 \text{ m}$
 Rychlost větru: 42.08 m/s



Tlak [Pa]

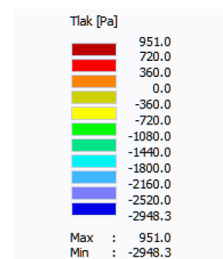
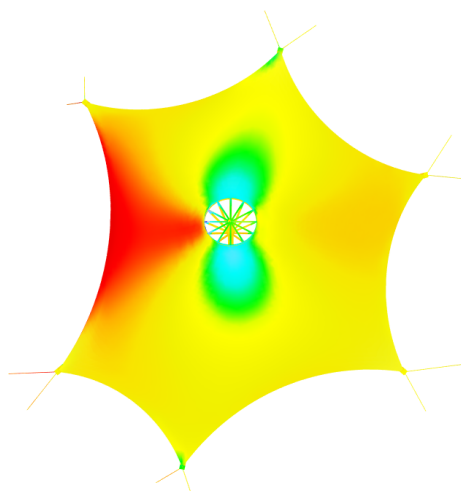


Max : 1002.1
 Min : -2660.7

Informace o sítí: 608 942 bodů, 691 890 uzlů
 Součet odporových síl původního modelu: $F_x = 14.93 \text{ kN}$, $F_y = -1.676 \text{ kN}$, $F_z = 41.422 \text{ kN}$
 Součet odporových síl zjednodušeného modelu: $F_x = 23.006 \text{ kN}$, $F_y = -1.077 \text{ kN}$, $F_z = 44.429 \text{ kN}$

Obr. A.5: Numerická analýza v programu RWIND: tlak větru pod úhlem 225°

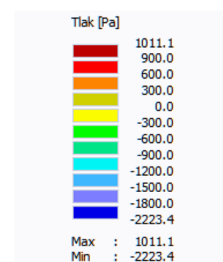
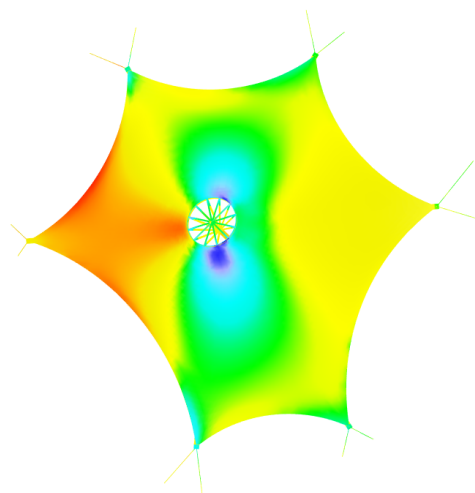
Rozměry větrného tunelu: Dx = 147.752 m, Dy = 103.968 m, Dz = 30.106 m
Rychlost větru: 42.00 m/s



Informace o síti: 730 453 buněk, 825 164 uzlů
Součet odporových sil původního modelu: Fx = 15.946 kN, Fy = -1.851 kN, Fz = 36.462 kN
Součet odporových sil zjednodušeného modelu: Fx = 22.893 kN, Fy = -0.693 kN, Fz = 39.277 kN

Obr. A.6: Numerická analýza v programu RWIND: tlak větru pod úhlem 270°

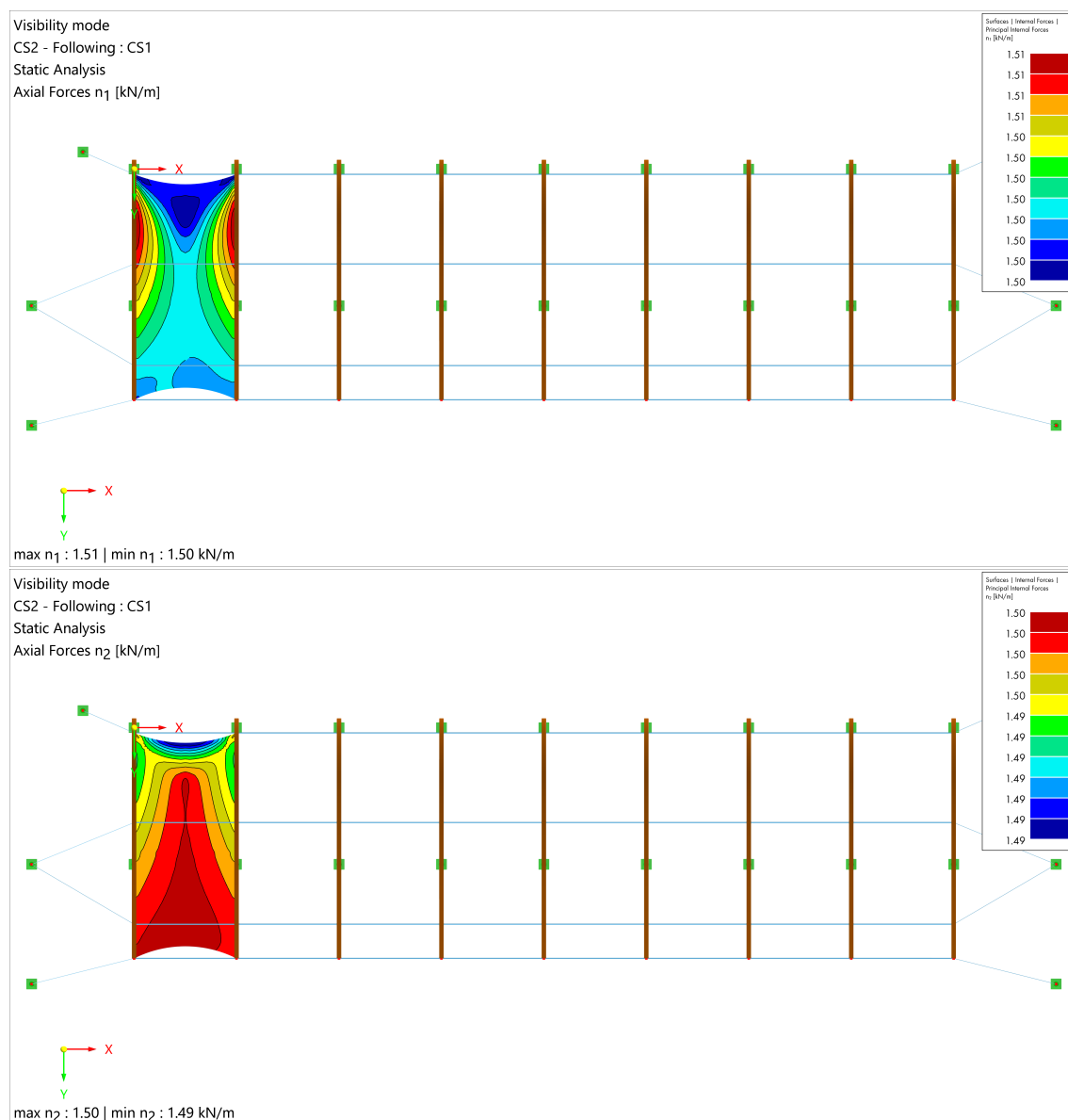
Rozměry větrného tunelu: Dx = 152.85 m, Dy = 106.508 m, Dz = 30.106 m
Rychlost větru: 42.08 m/s



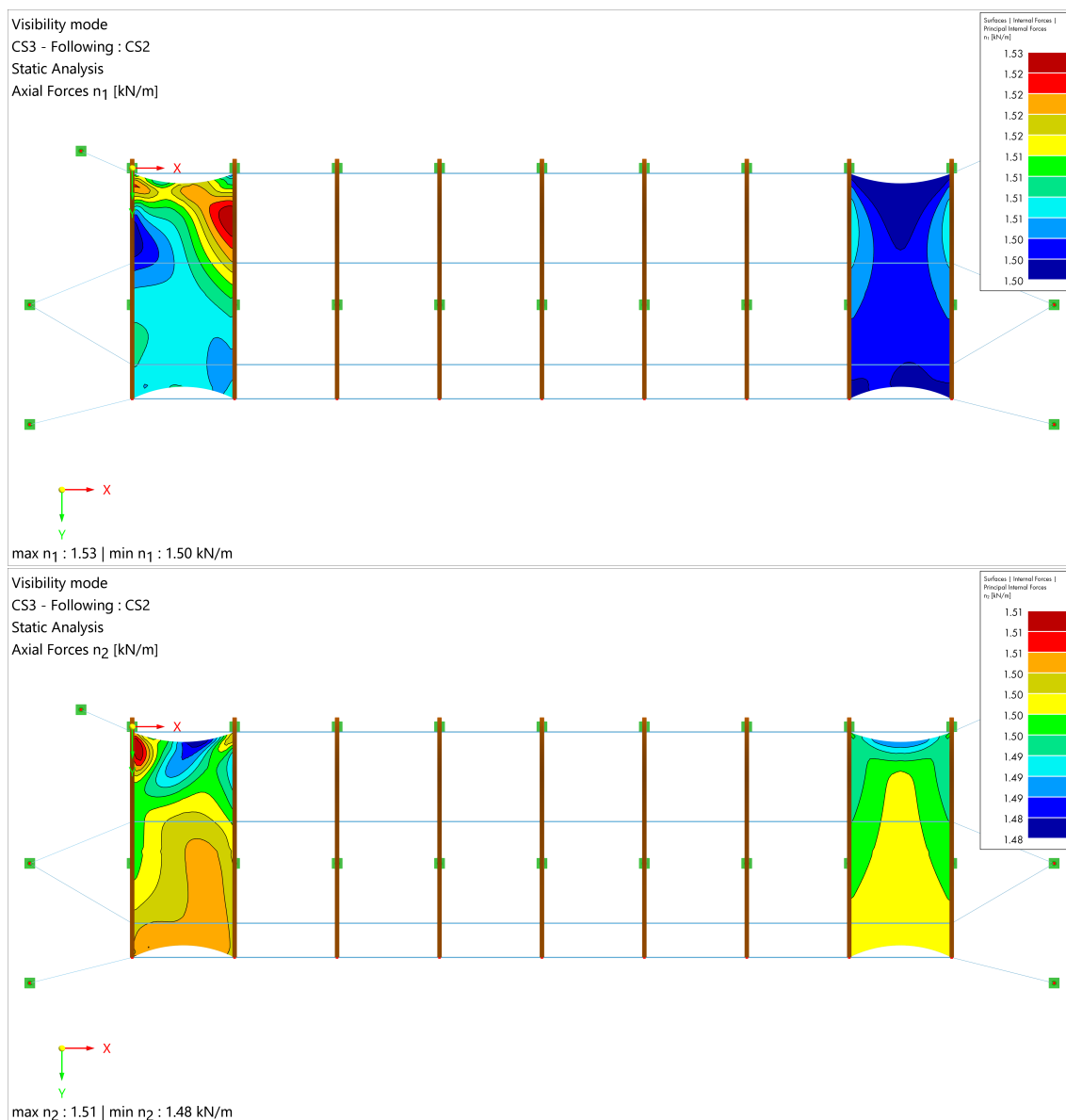
Informace o síti: 699 039 buněk, 788 812 uzlů
Součet odporových sil původního modelu: Fx = 18.453 kN, Fy = -1.986 kN, Fz = 44.385 kN
Součet odporových sil zjednodušeného modelu: Fx = 24.849 kN, Fy = -1.422 kN, Fz = 46.981 kN

Obr. A.7: Numerická analýza v programu RWIND: tlak větru pod úhlem 315°

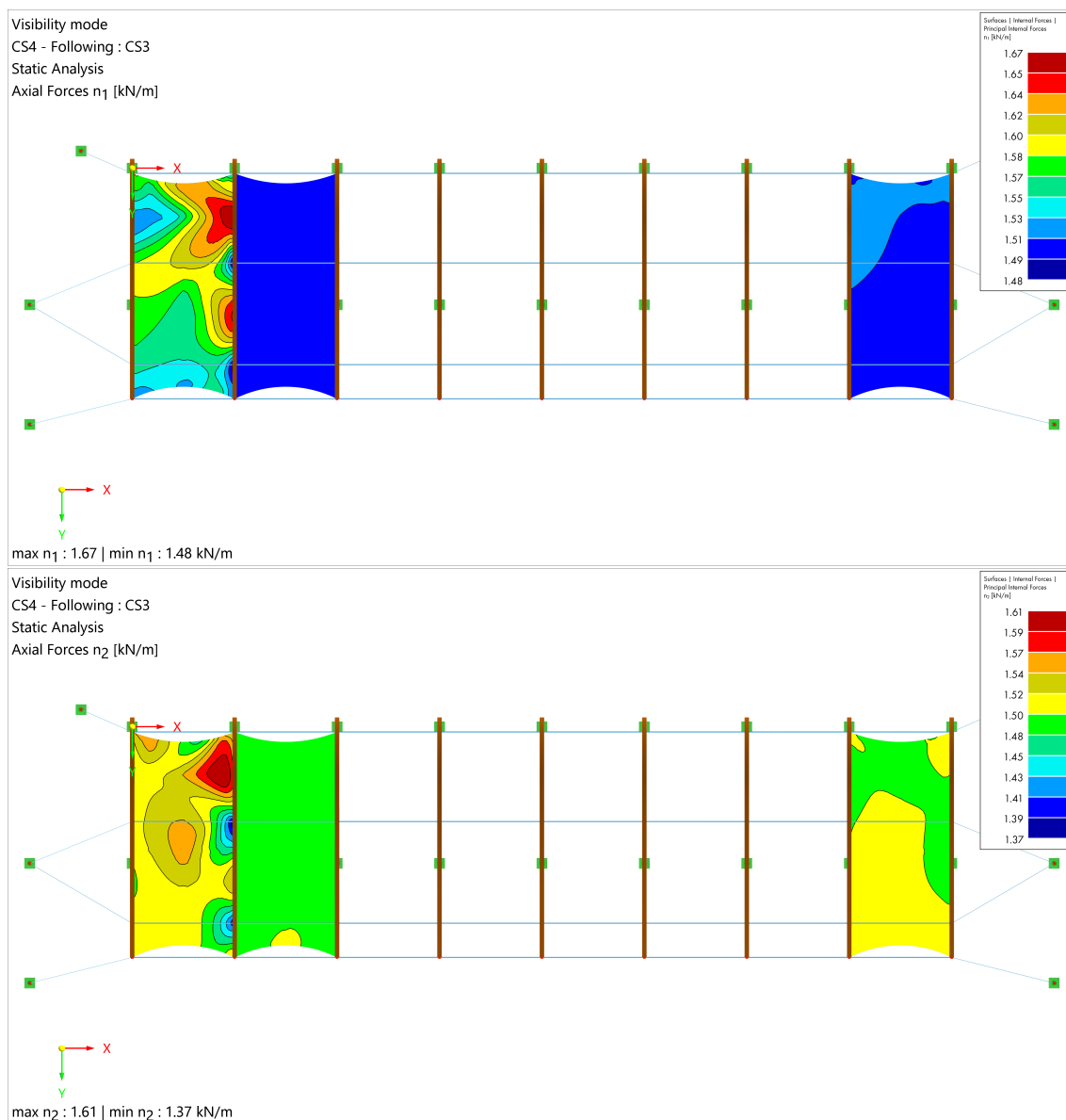
B Fáze výstavby varianta A



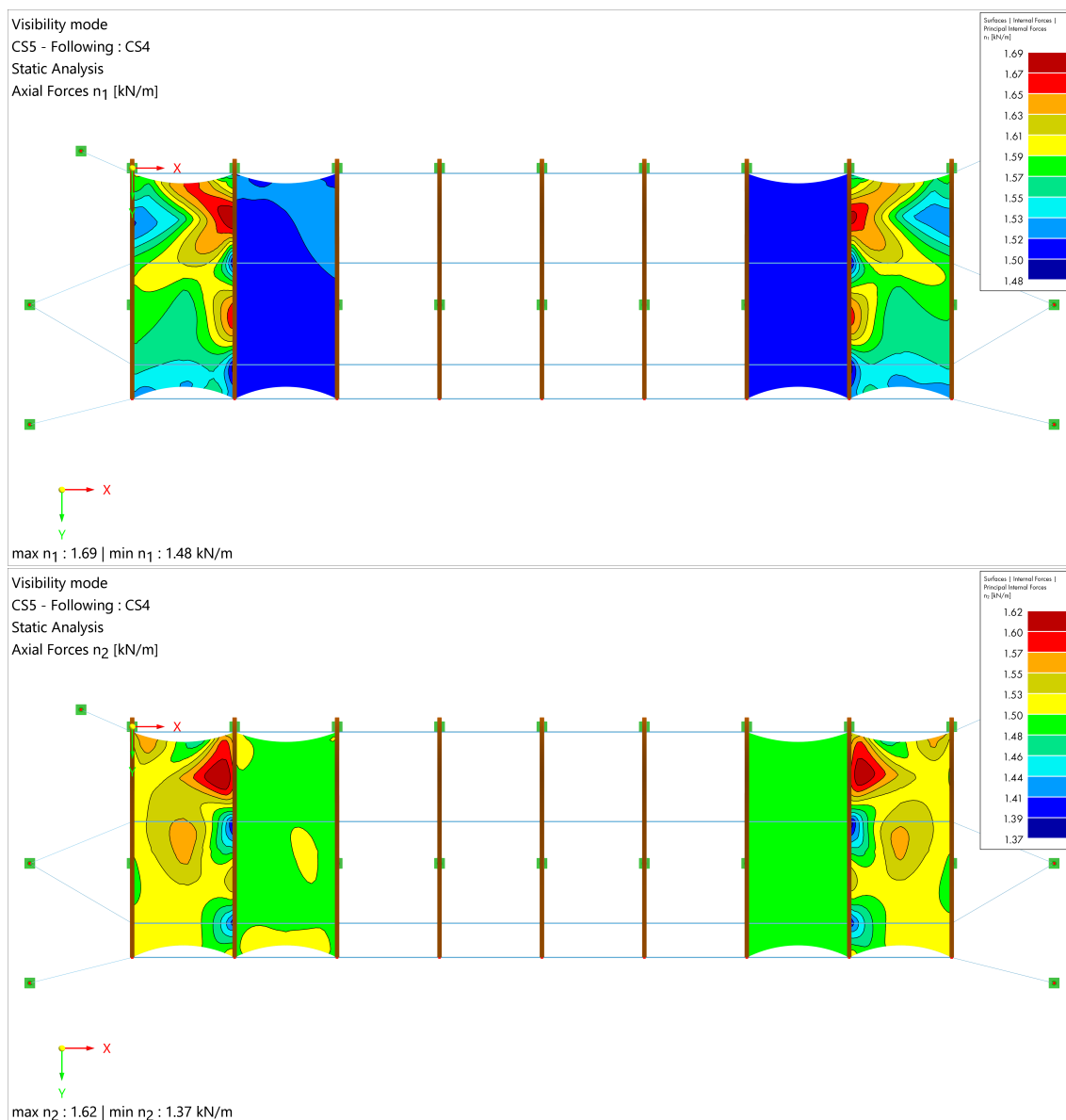
Obr. B.1: Varianta A: 2. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2



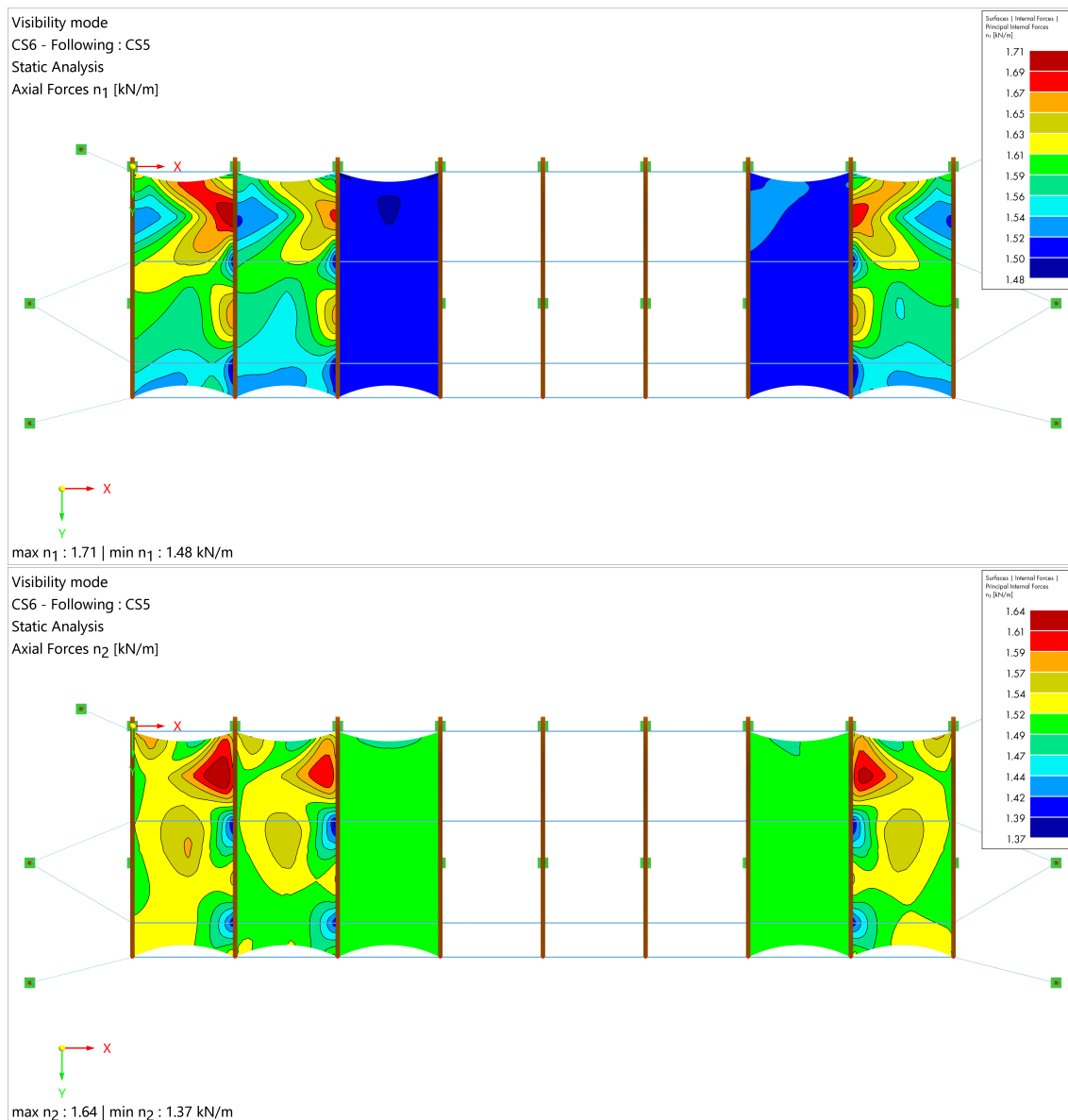
Obr. B.2: Varianta A: 3. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2



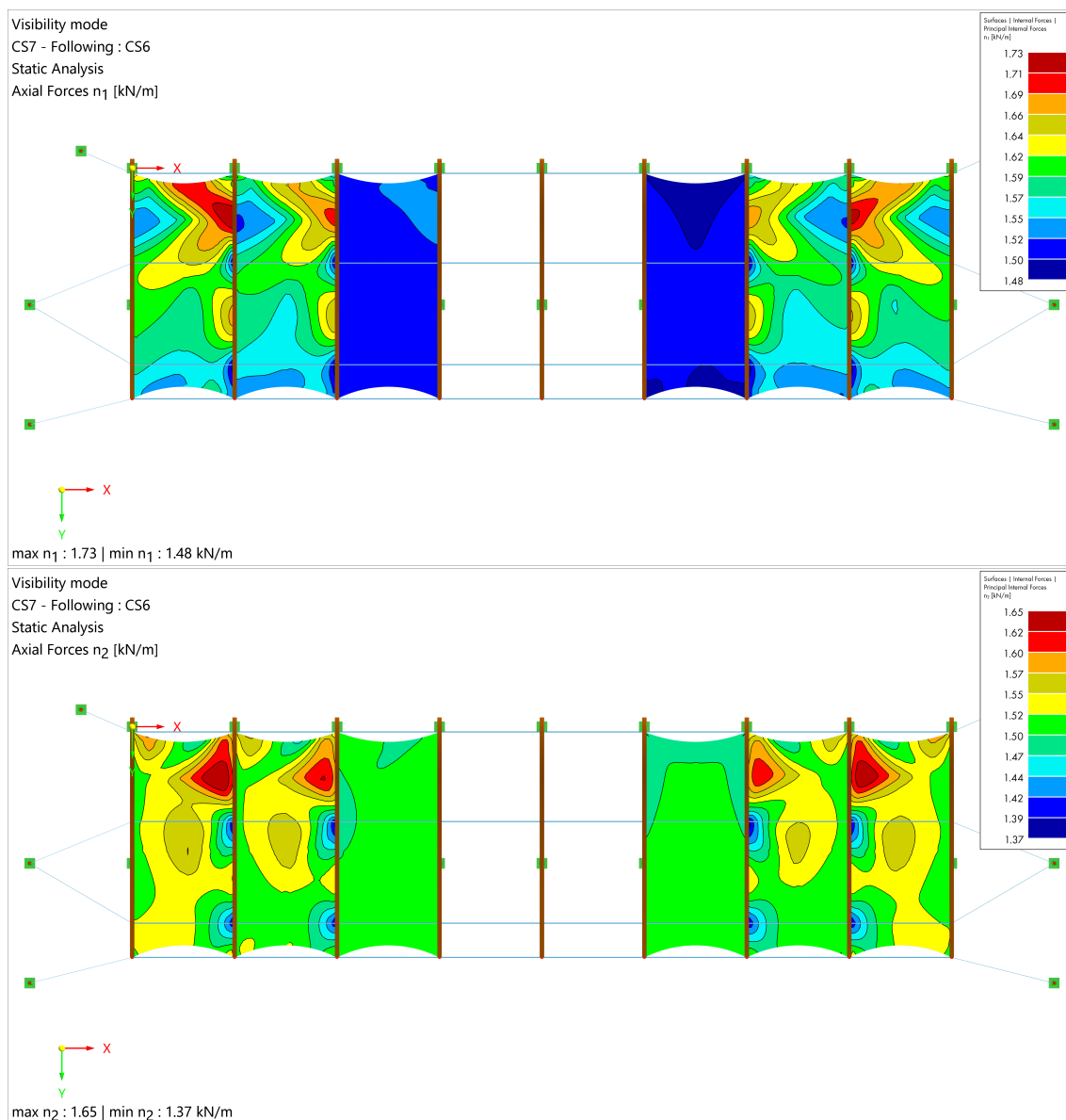
Obr. B.3: Varianta A: 4. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2



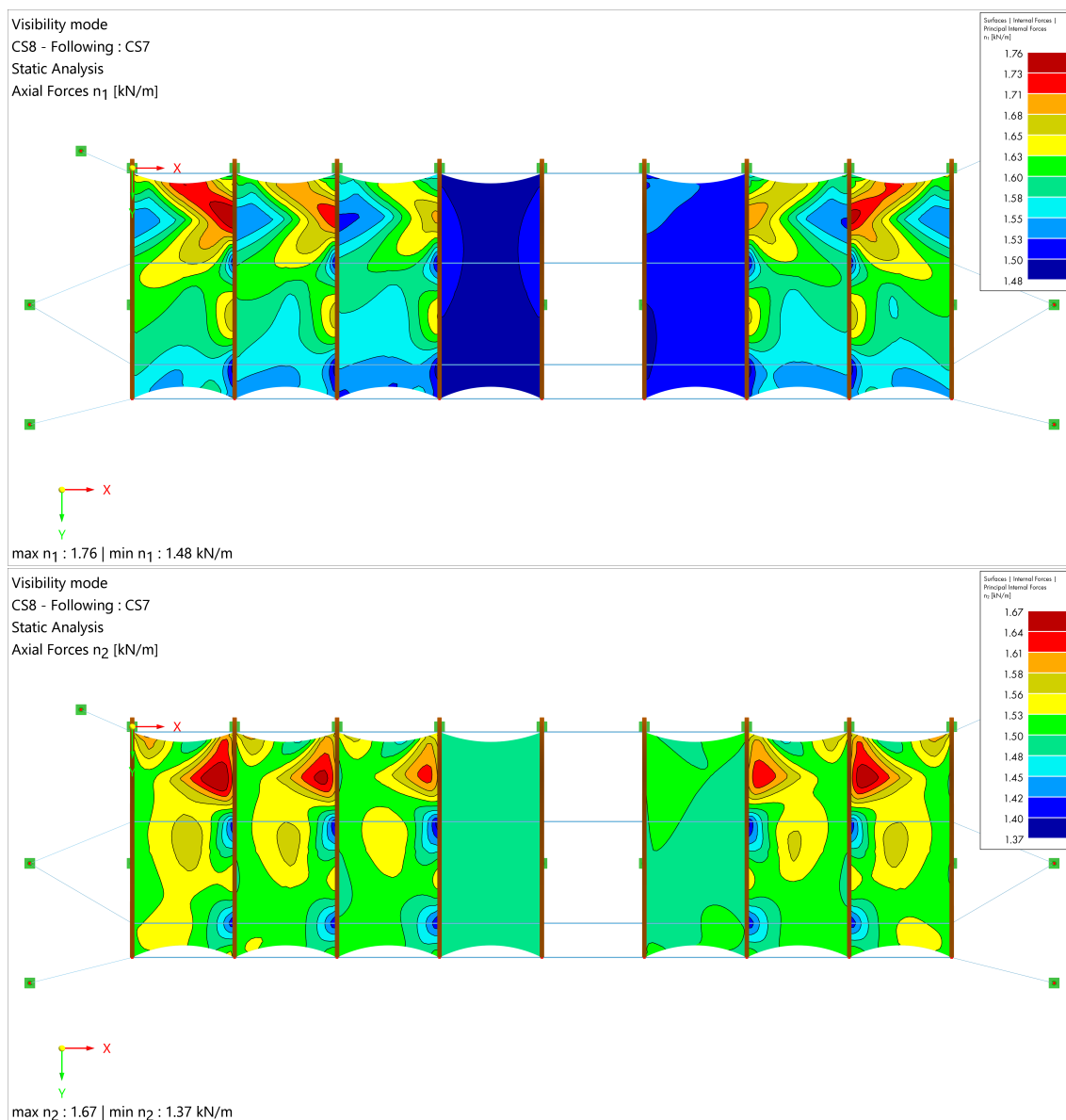
Obr. B.4: Varianta A: 5. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2



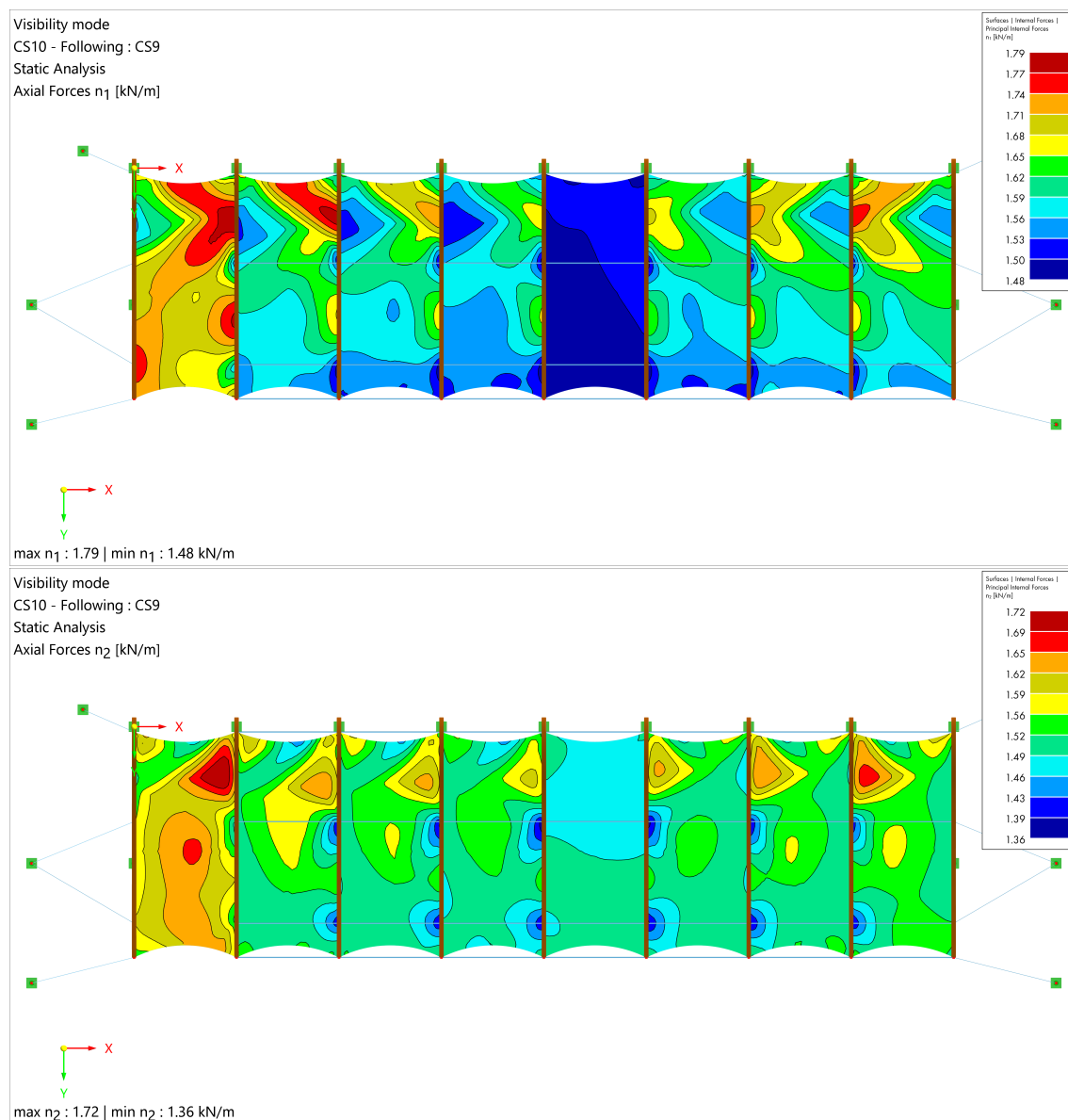
Obr. B.5: Varianta A: 6. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2



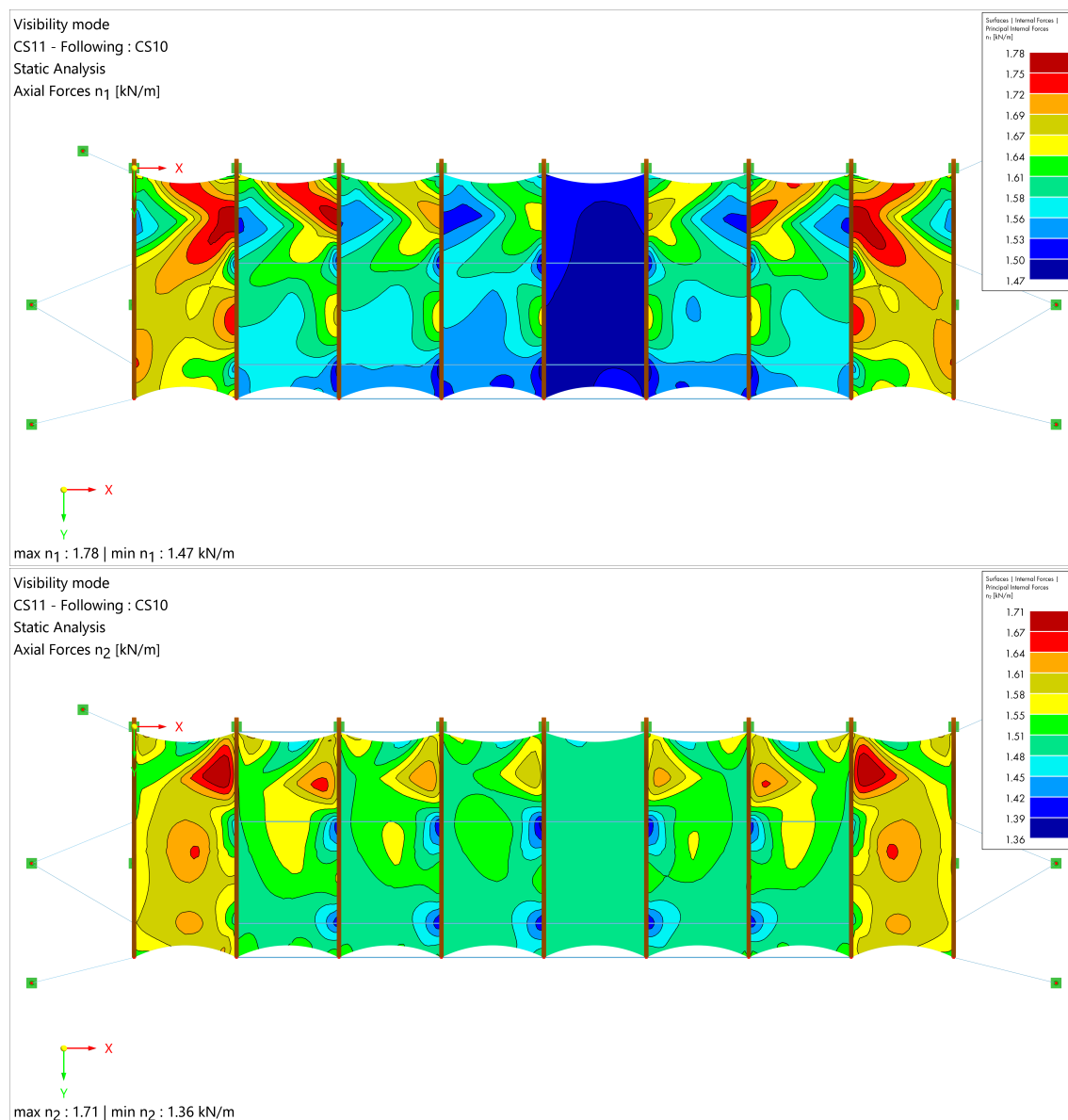
Obr. B.6: Varianta A: 7. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2



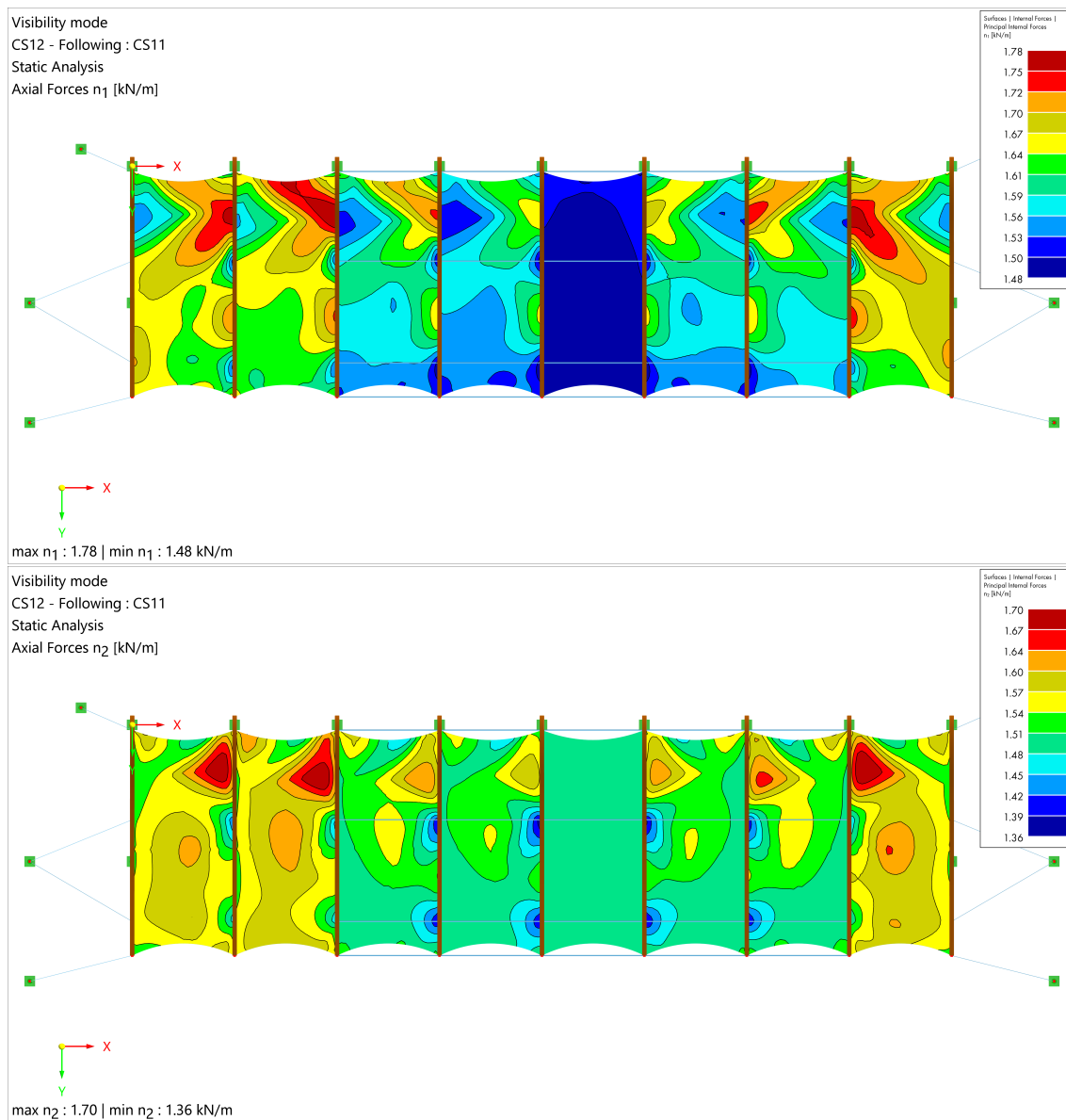
Obr. B.7: Varianta A: 8. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2



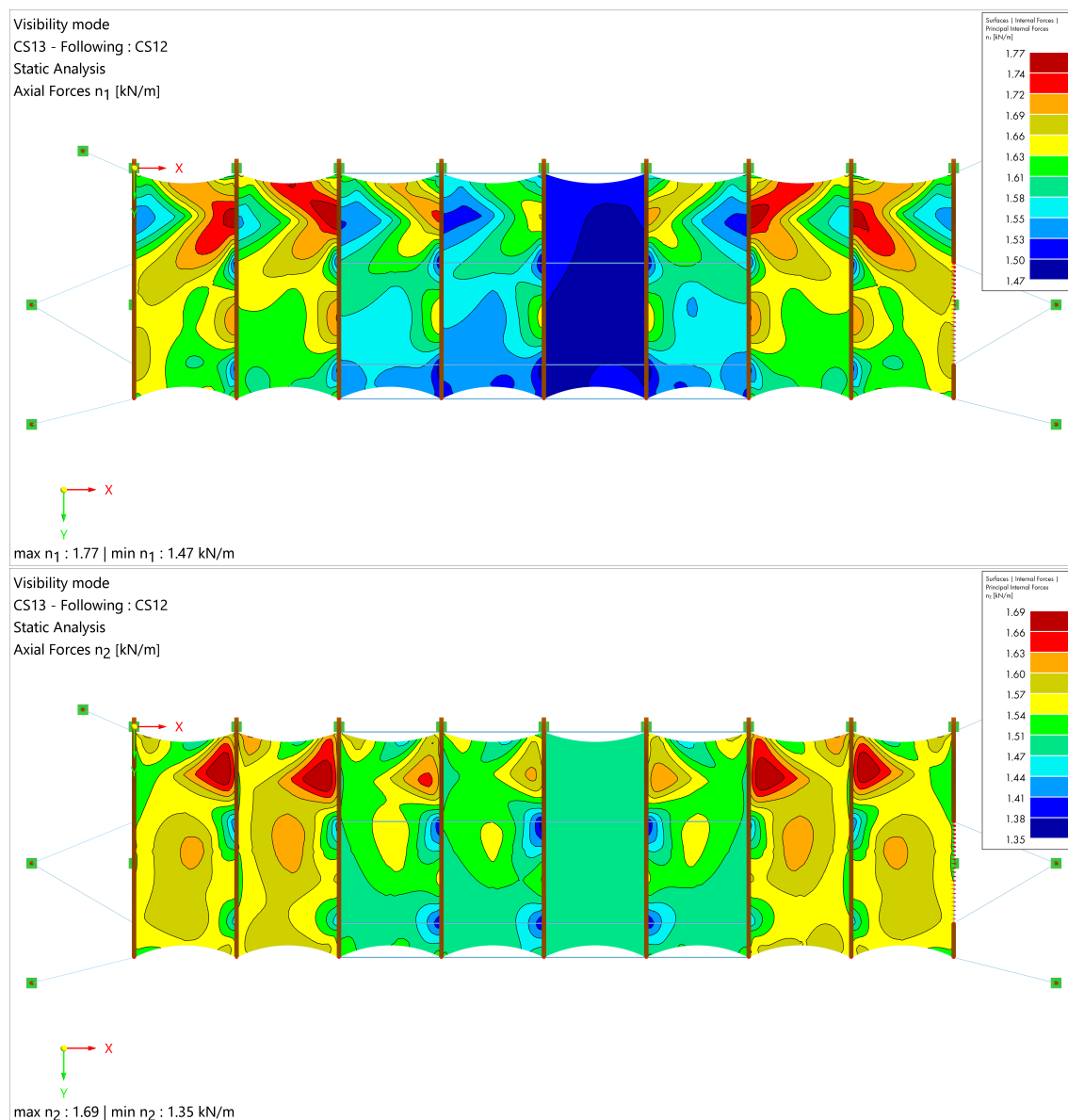
Obr. B.8: Varianta A: 10. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2



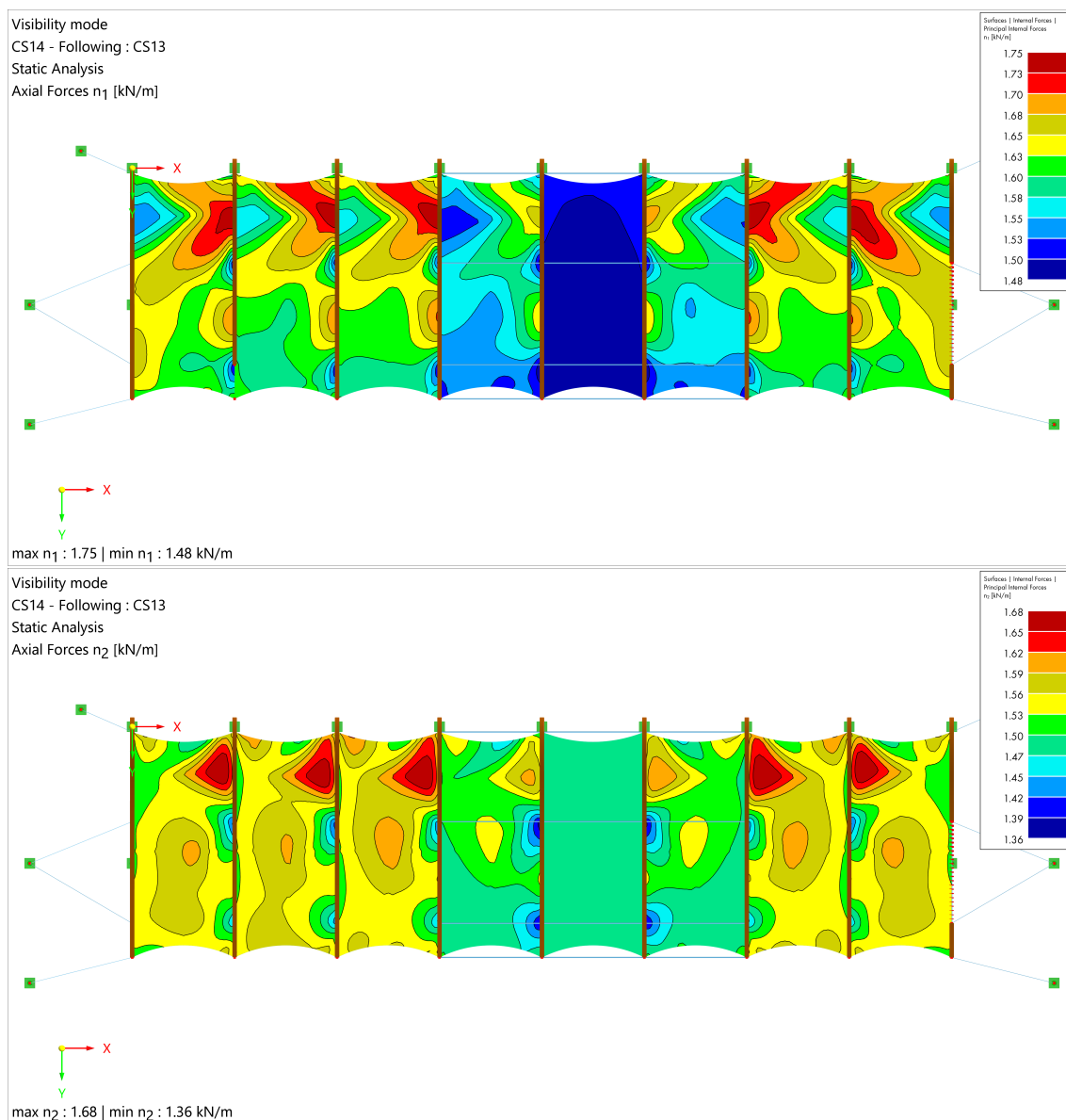
Obr. B.9: Varianta A: 11. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2



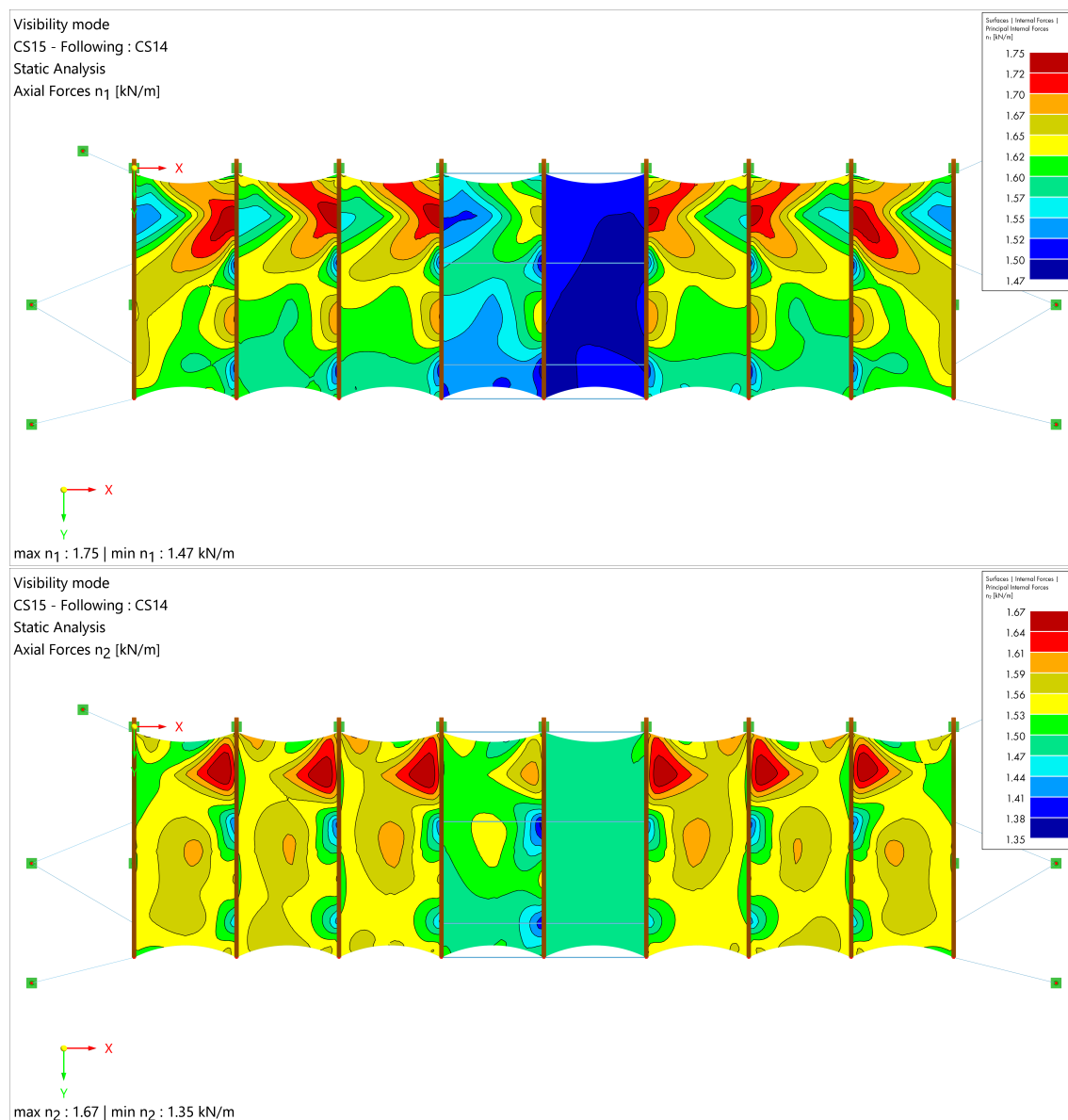
Obr. B.10: Varianta A: 12. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2



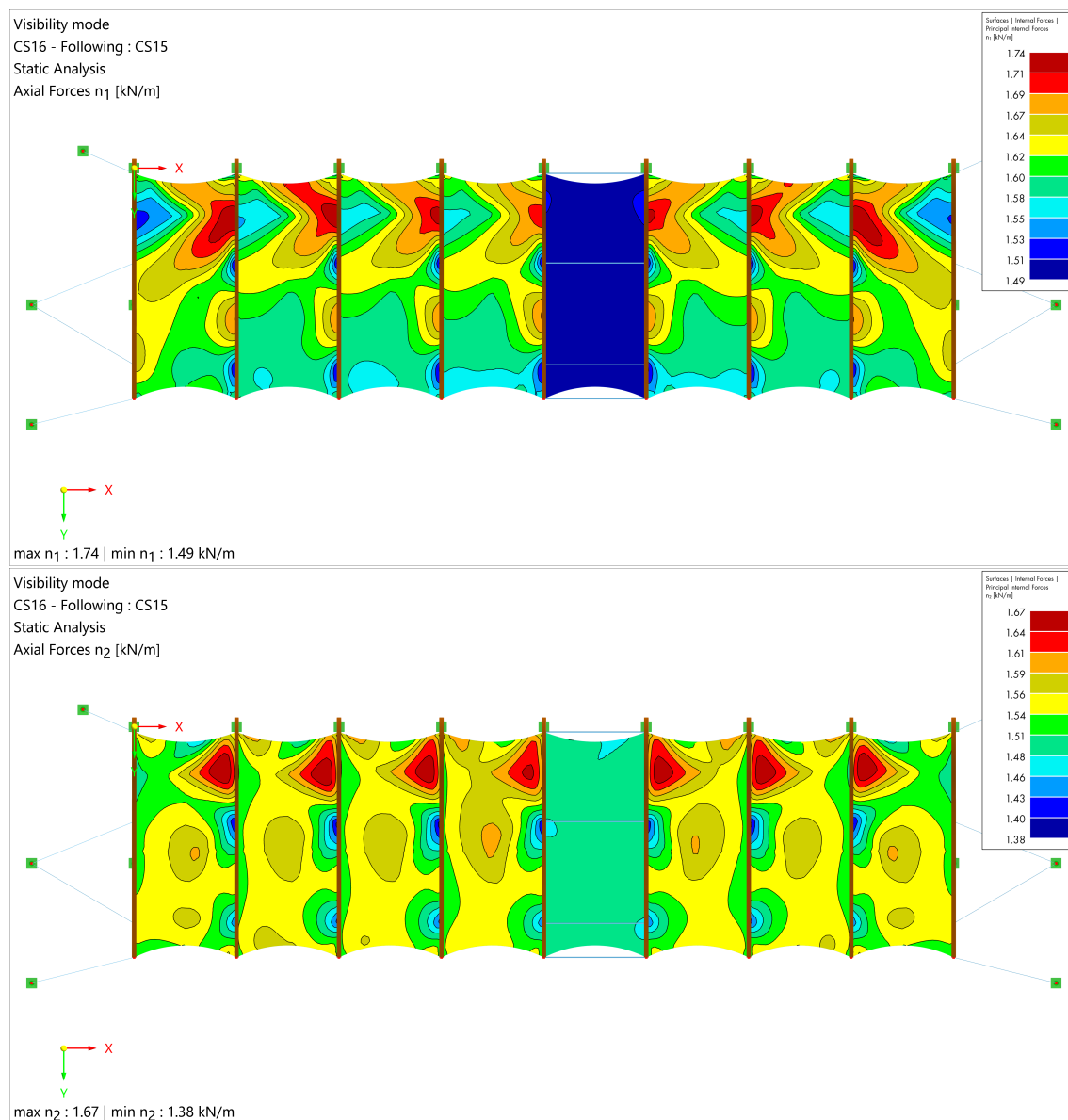
Obr. B.11: Varianta A: 13. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2



Obr. B.12: Varianta A: 14. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2

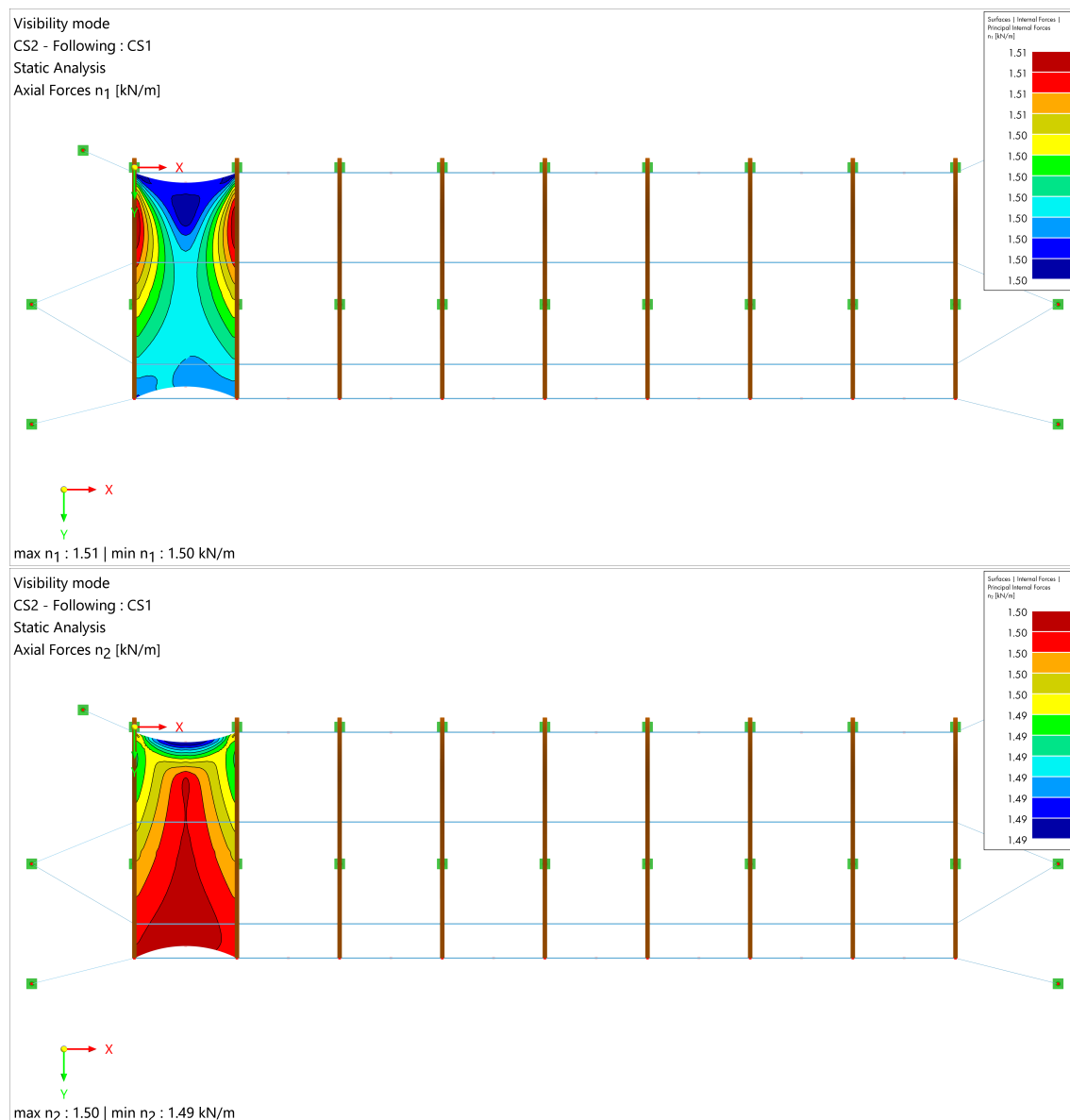


Obr. B.13: Varianta A: 15. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2

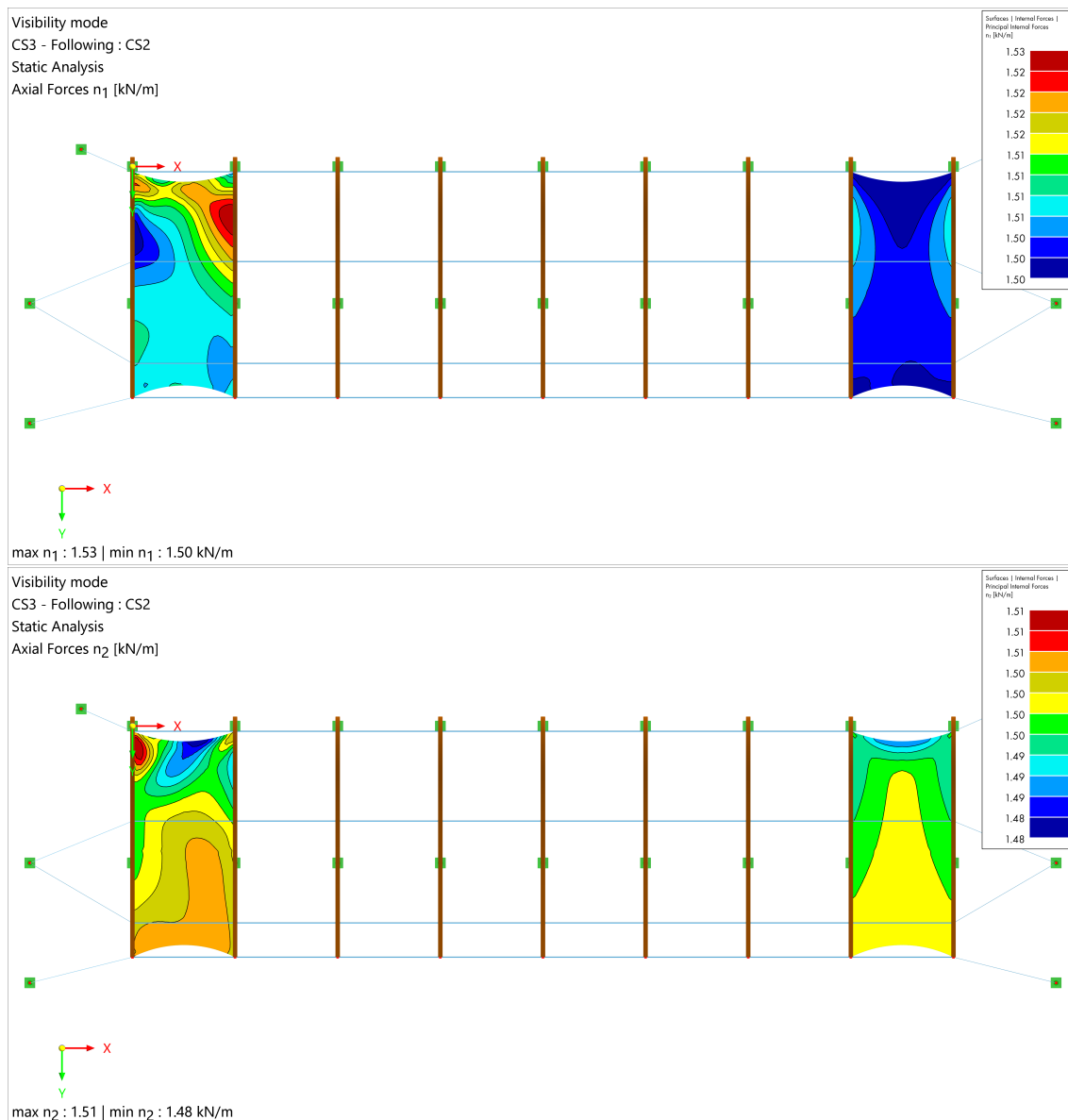


Obr. B.14: Varianta A: 16. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2

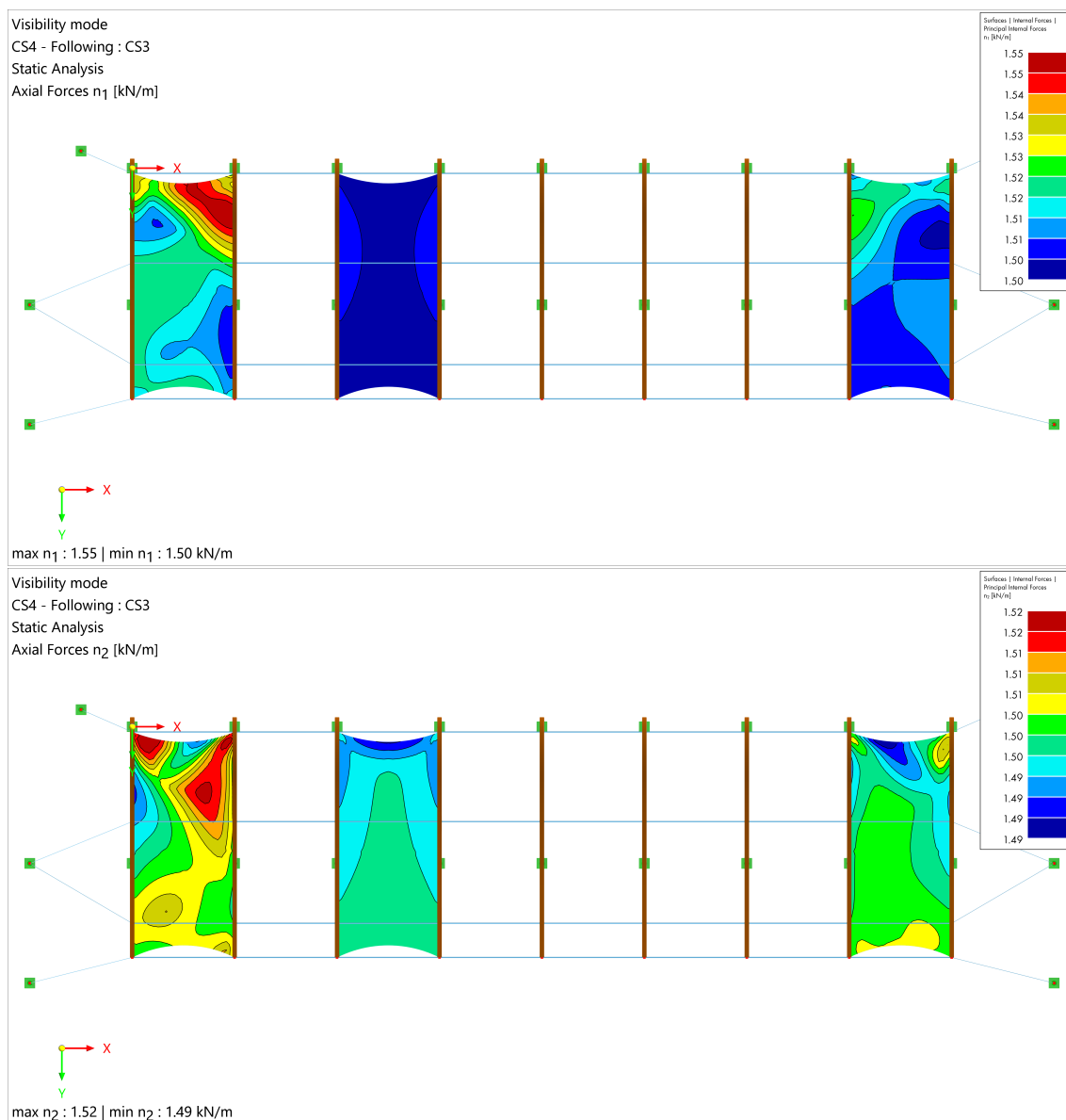
C Fáze výstavby varianta B



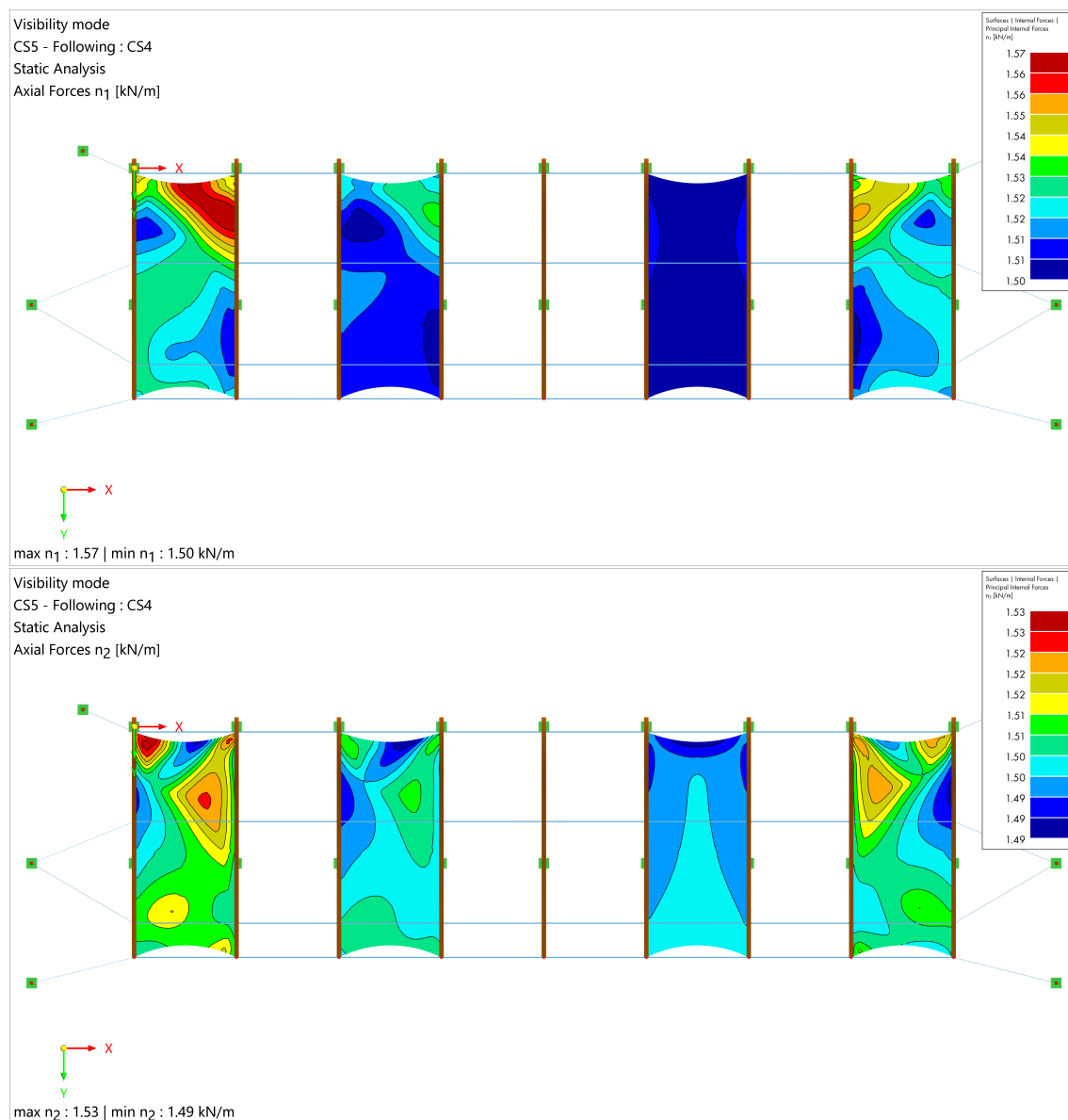
Obr. C.1: Varianta B: 2. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2



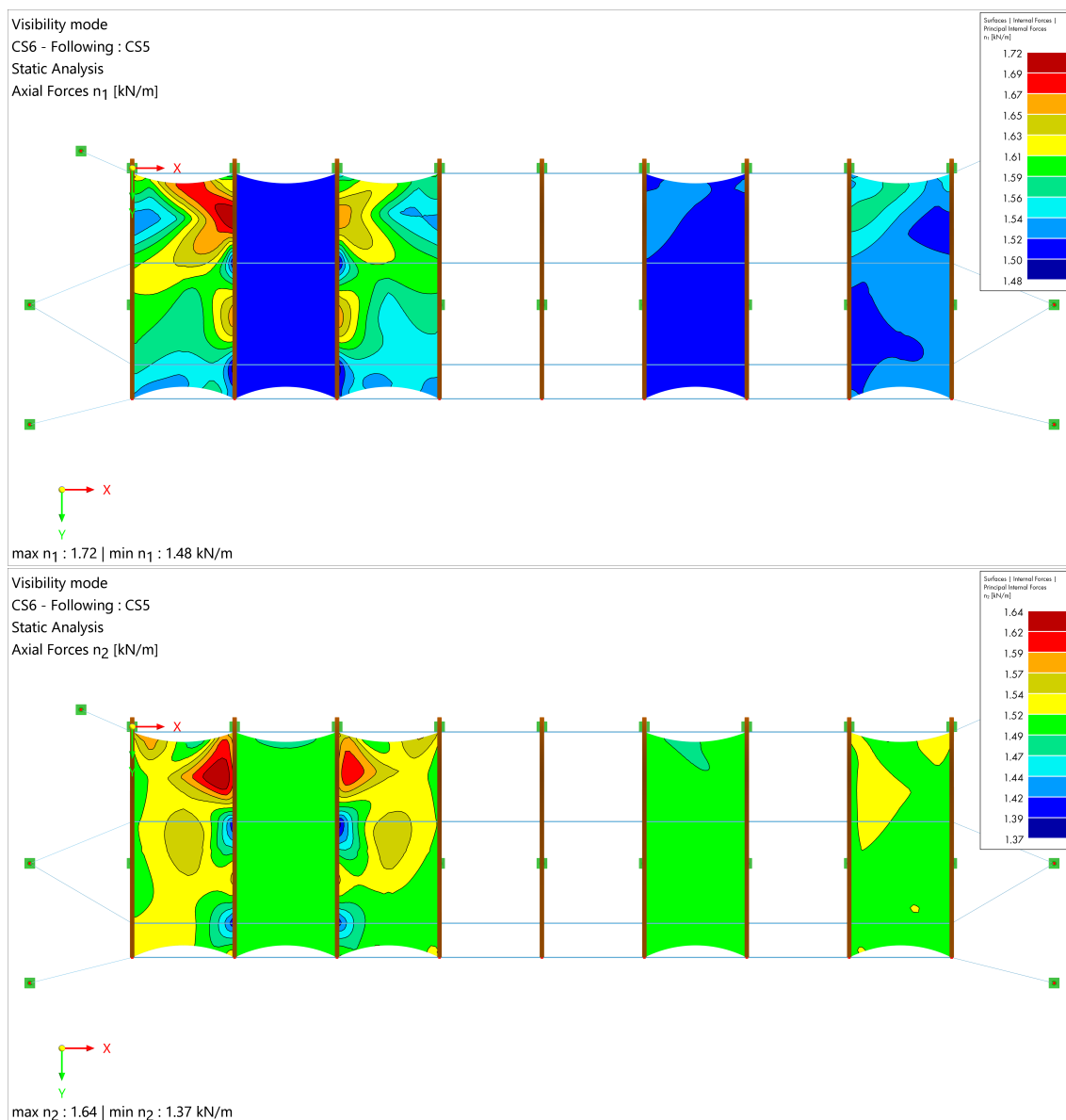
Obr. C.2: Varianta B: 3. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2



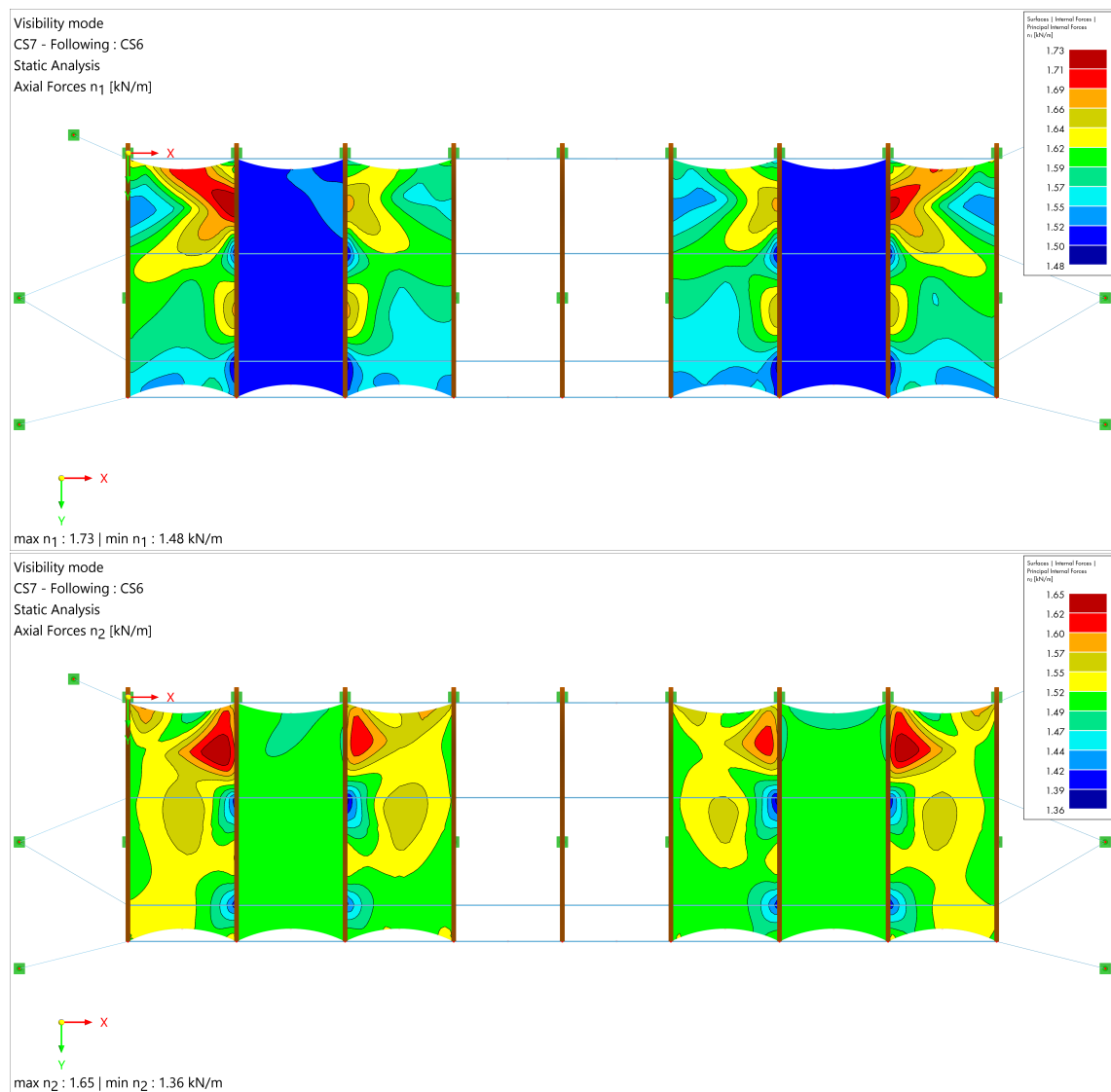
Obr. C.3: Varianta B: 4. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2



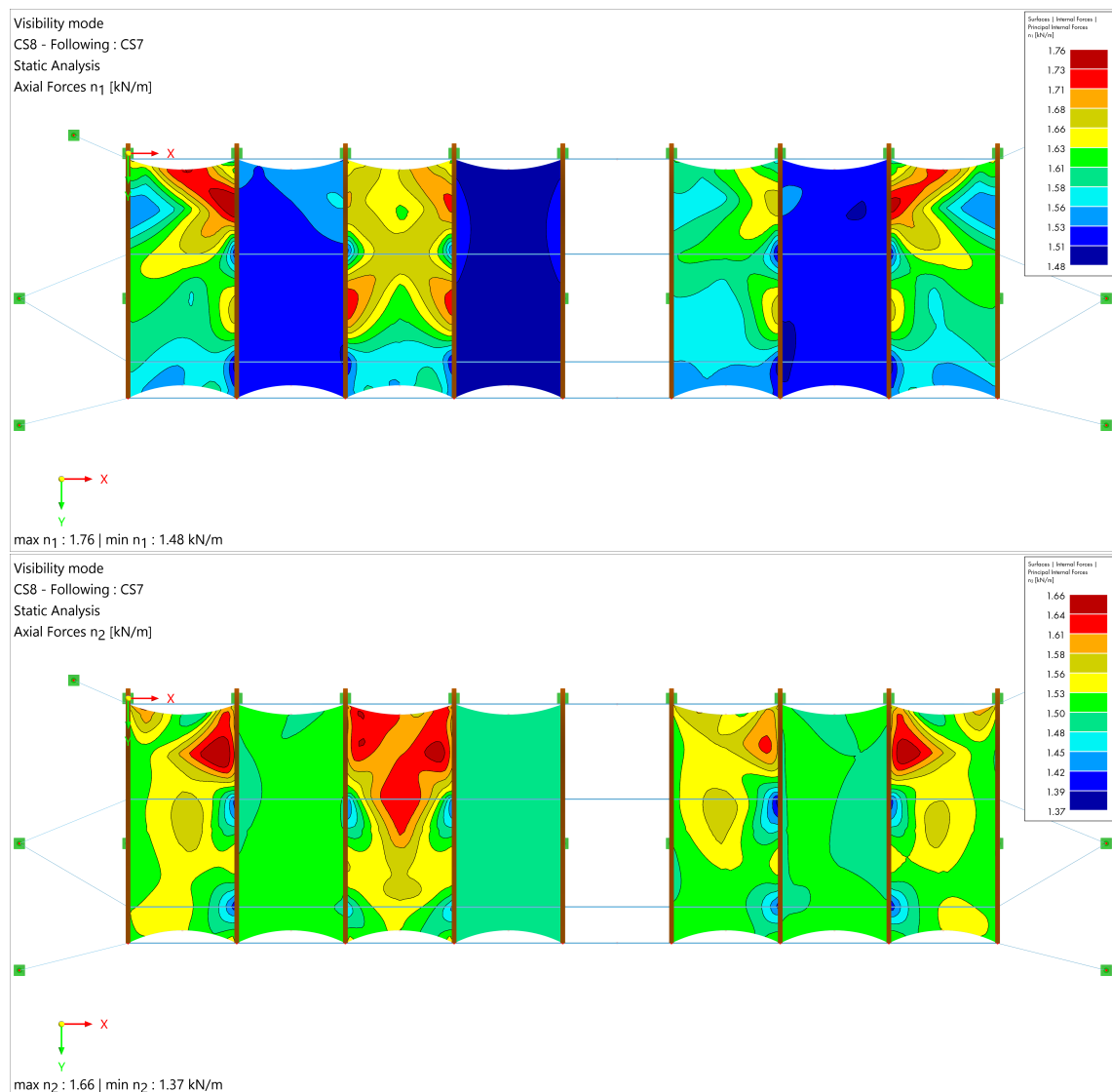
Obr. C.4: Varianta B: 5. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2



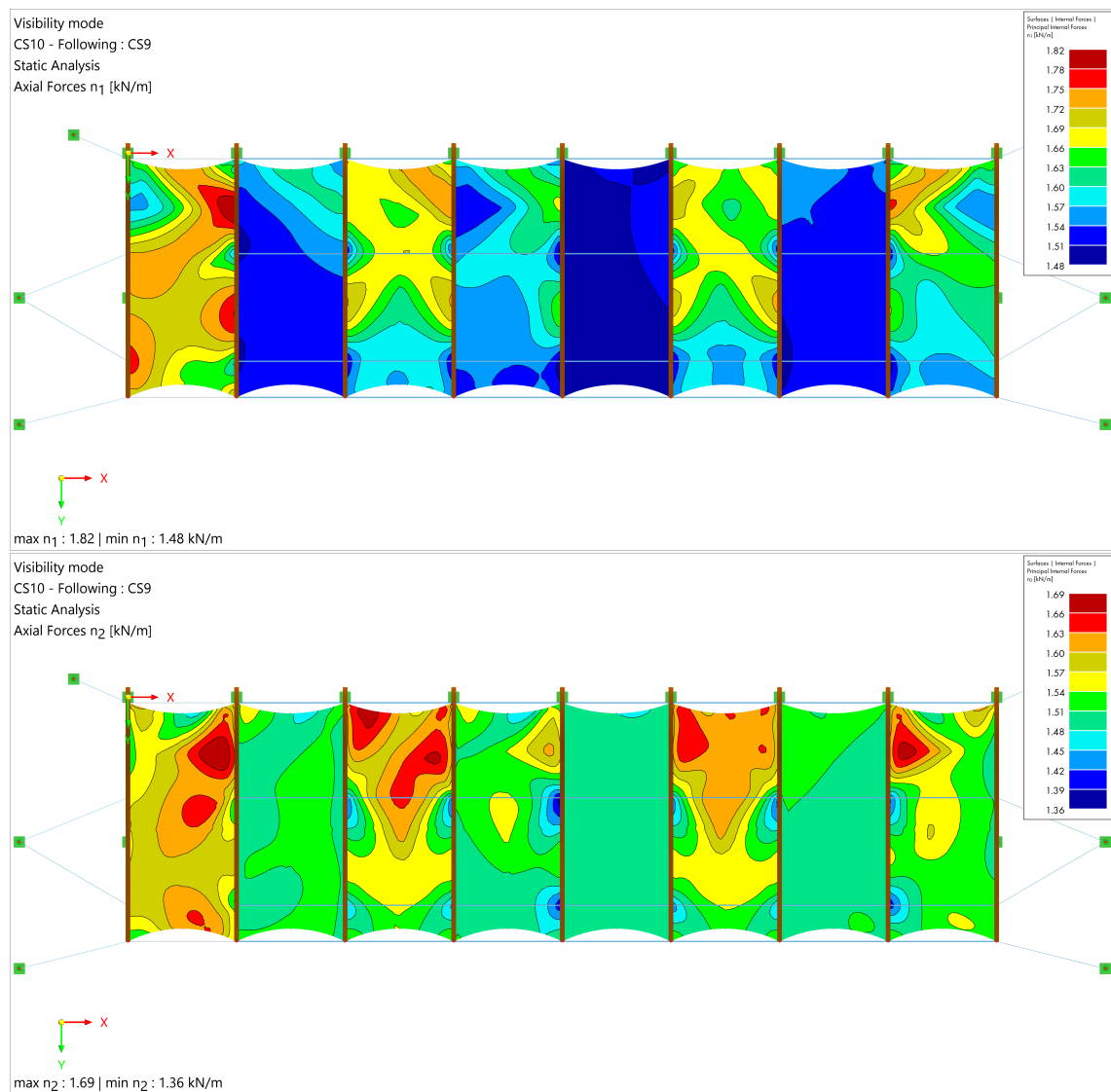
Obr. C.5: Varianta B: 6. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2



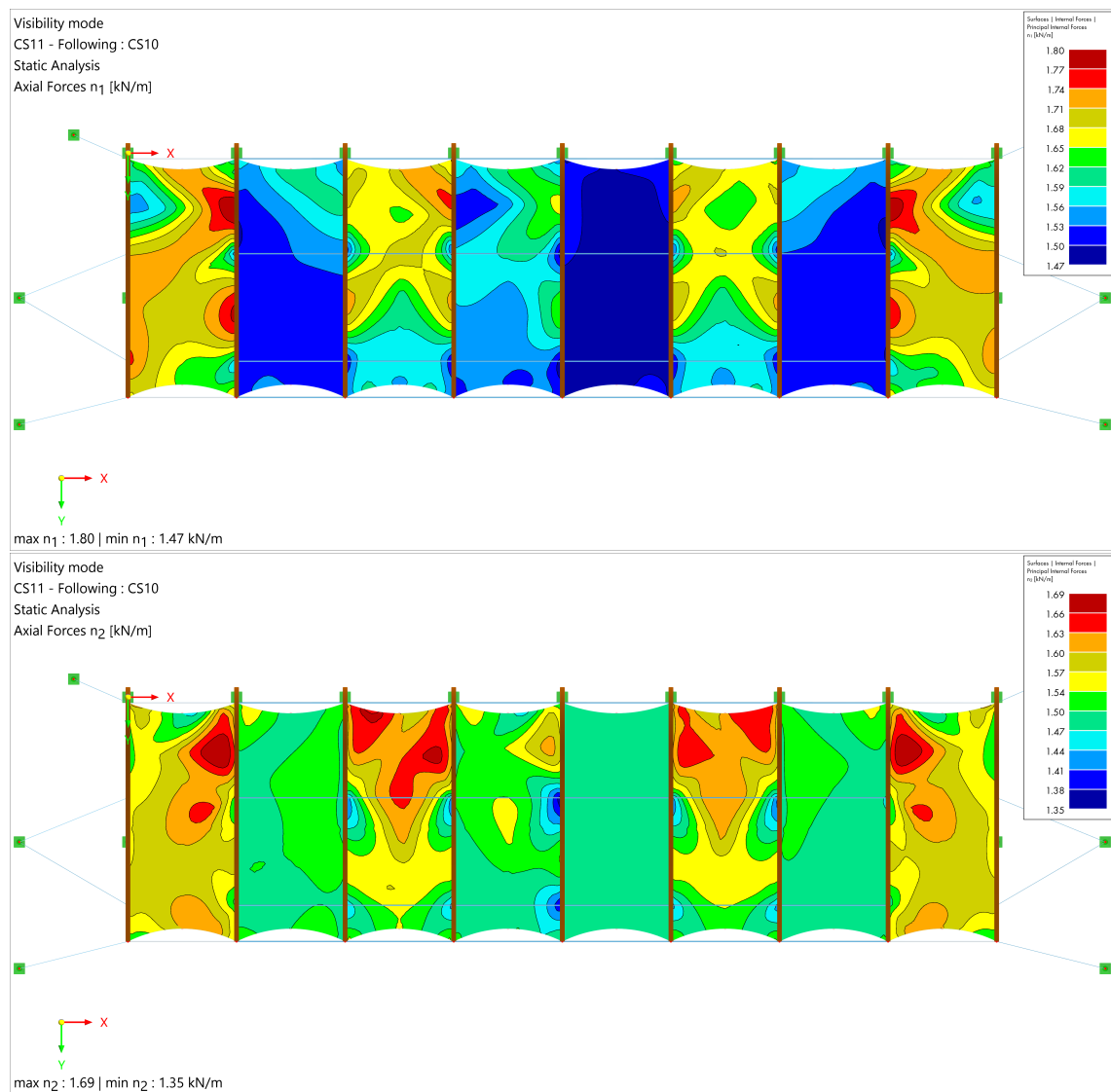
Obr. C.6: Varianta B: 7. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2



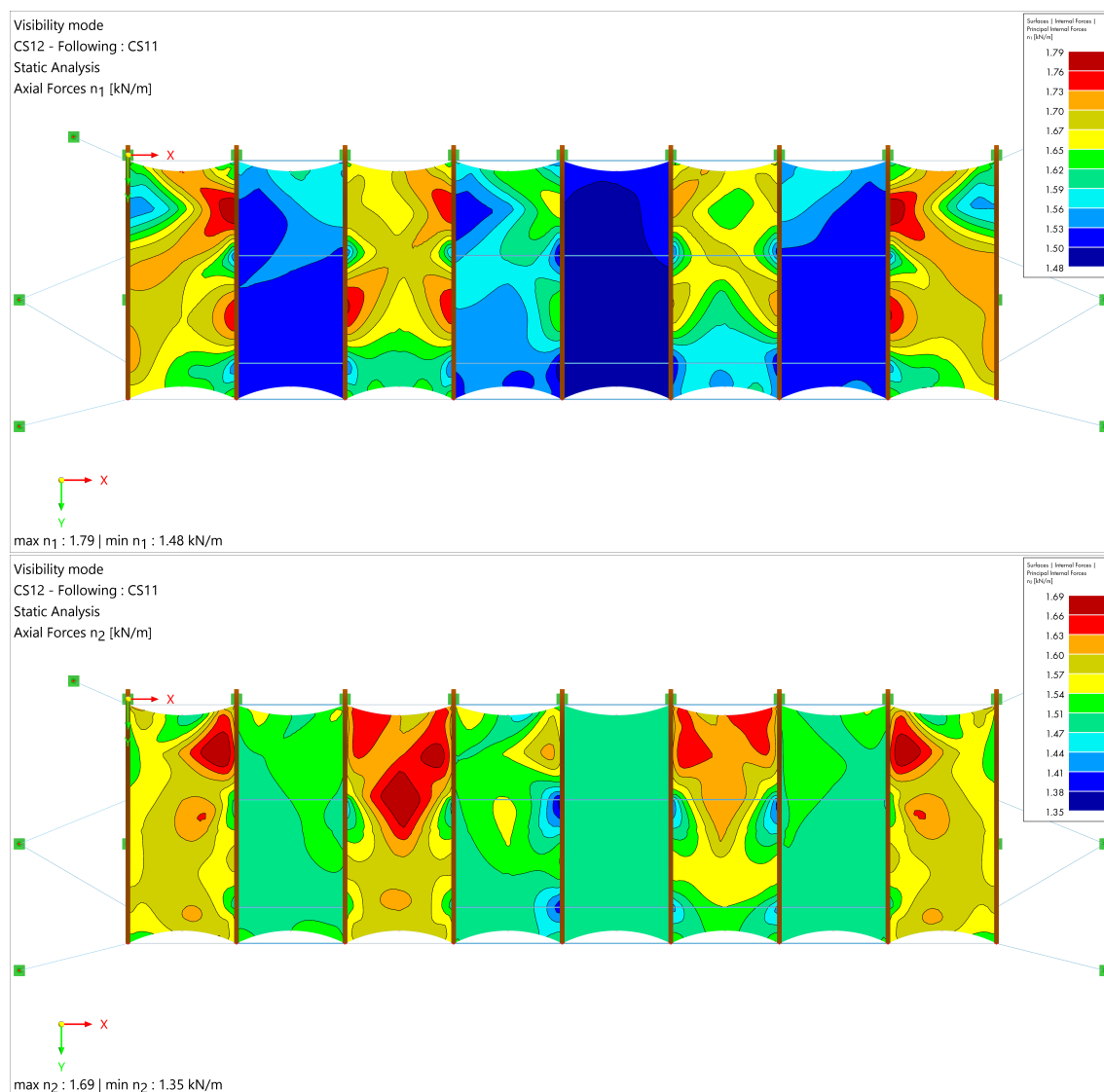
Obr. C.7: Varianta B: 8. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2



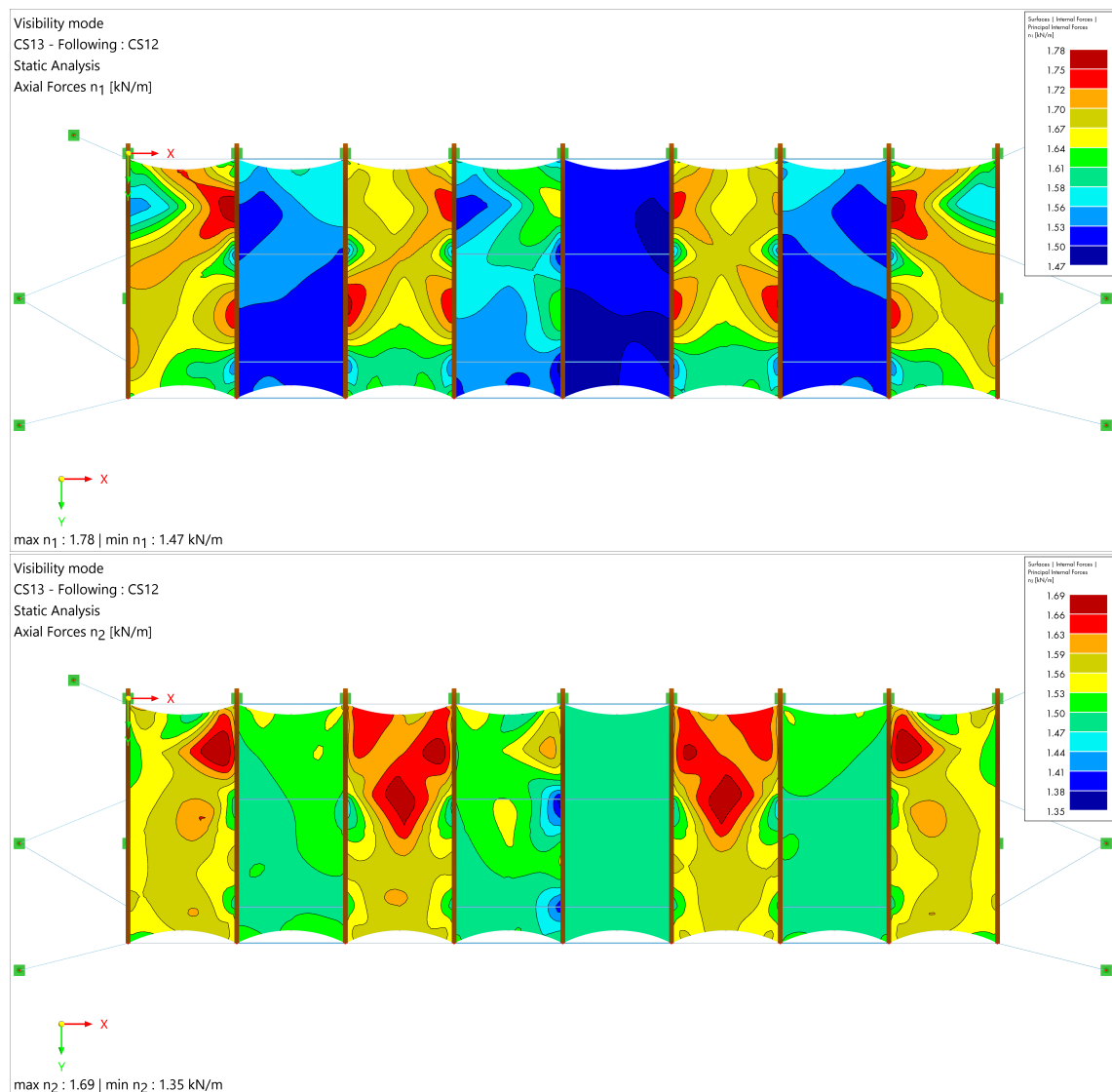
Obr. C.8: Varianta B: 10. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2



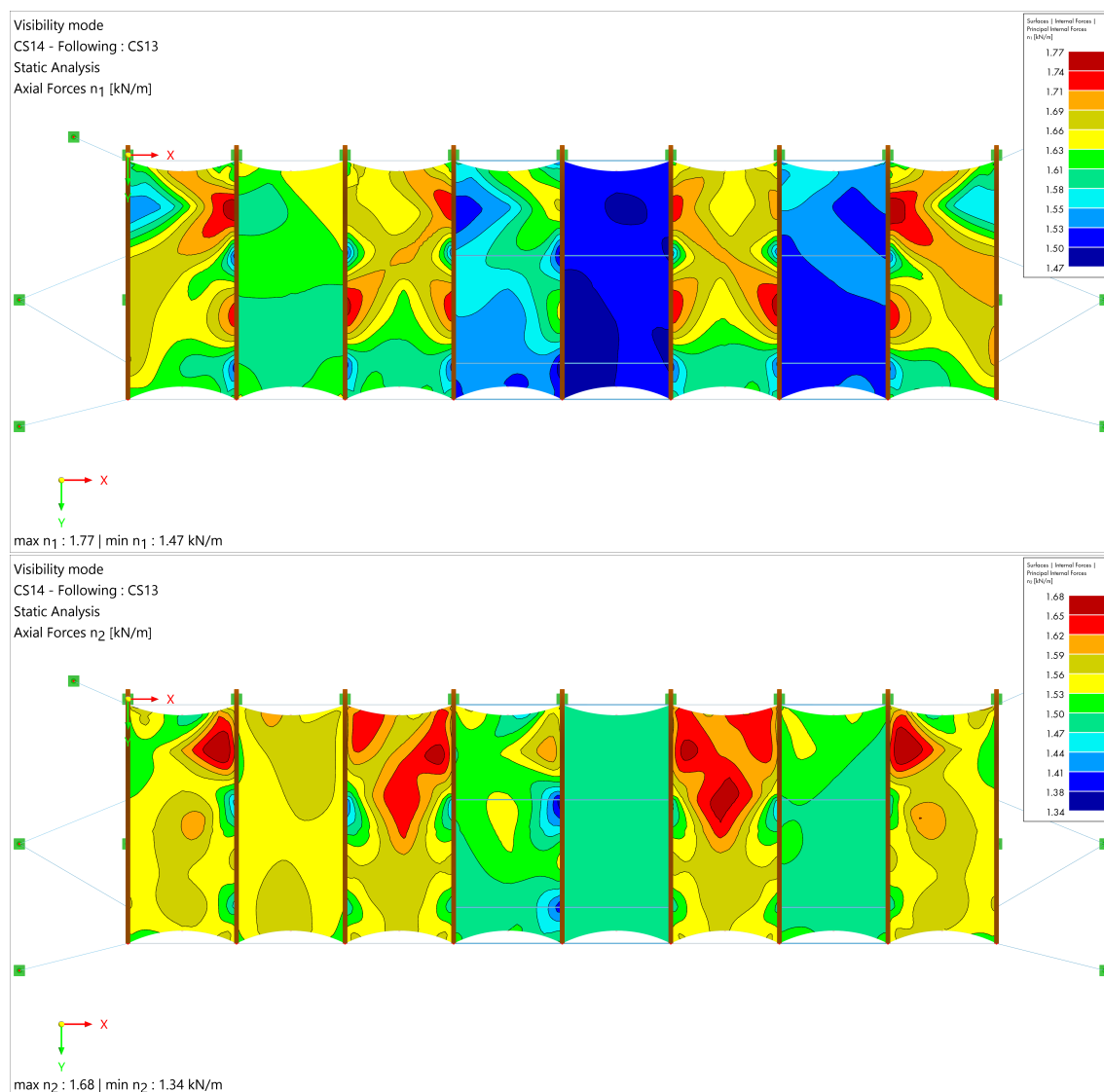
Obr. C.9: Varianta B: 11. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2



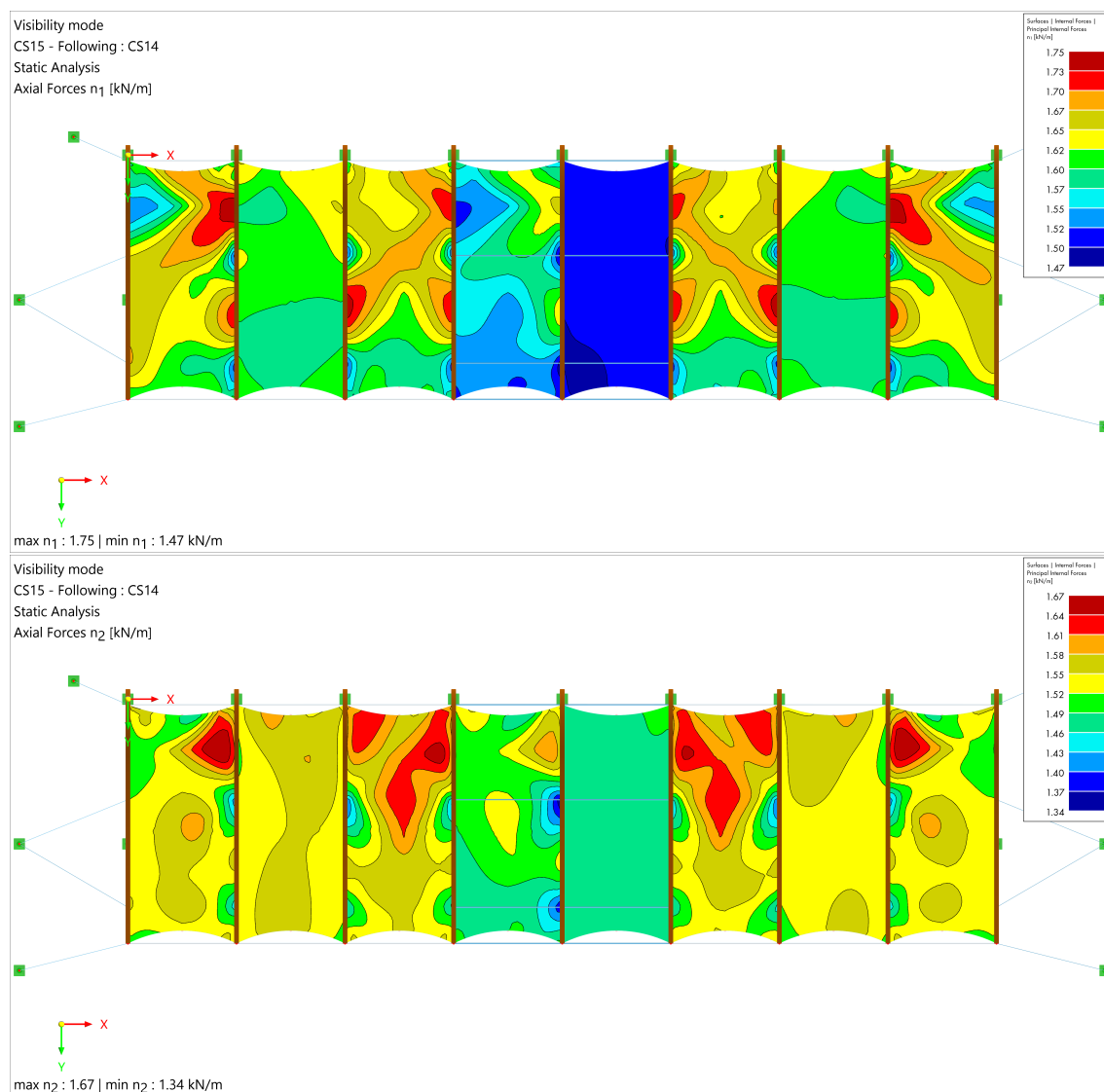
Obr. C.10: Varianta B: 12. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2



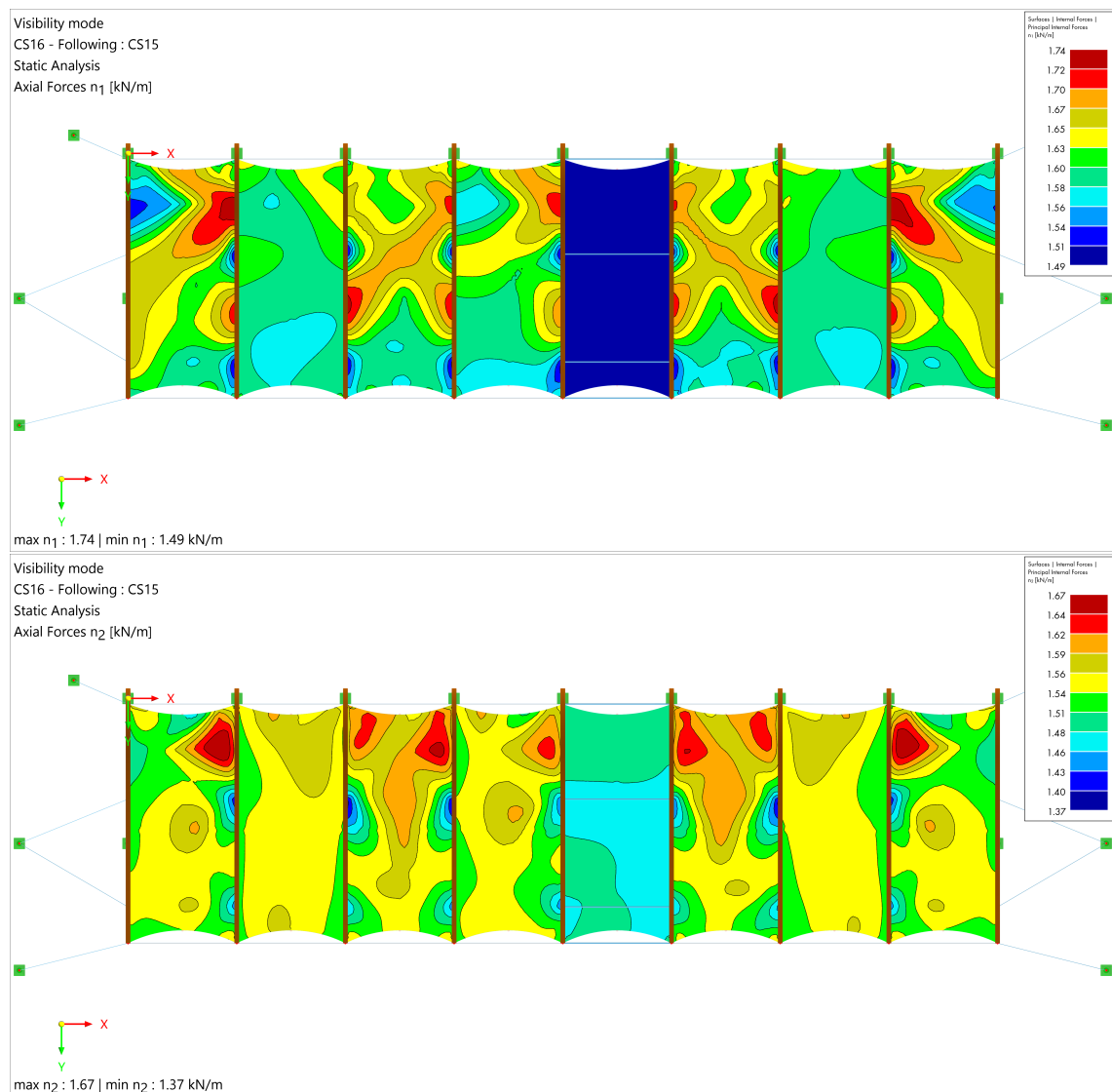
Obr. C.11: Varianta B: 13. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2



Obr. C.12: Varianta B: 14. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2



Obr. C.13: Varianta B: 15. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2



Obr. C.14: Varianta B: 16. fáze výstavby, hlavní vnitřní síly n_1 a n_2