

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra betonových a zděných konstrukcí



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh zastřešení kostela Lesná

Studijní program:	Stavební inženýrství
Studijní obor:	Konstrukce pozemních staveb
Vedoucí práce:	Ing. Martin Típka Ph.D.

Matěj Kukla


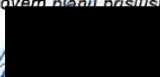
Praha 2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Kukla	Jméno: Matěj	Osobní číslo: 476323
Zadávací katedra: K133 - Katedra betonových a zděných konstrukcí		
Studijní program: (N3607) Stavební inženýrství		
Studijní obor/specializace: (3608T008) Konstrukce pozemních staveb		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: <u>Návrh konstrukce zastřešení kostela Lesná</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>Desing of roof structure of Lesná church</u>	
Pokyny pro vypracování: Rešerše na téma železobetonových skořepin Příklady realizací sakrálních staveb se zaměřením na použitý konstrukční systém Variantní návrh zastřešení kostela Lesná v Brně Výkresy výtzuže řešených konstrukčních prvků	
Seznam doporučené literatury: ČSN EN 1990, ČSN EN 1991, ČSN EN 1992 Procházka, Šmejkal: Modelování a vyztužování železobetonových konstrukcí. ČVUT 2020 Procházka, Šmejkal: Betonové stropní a schodišťové konstrukce. ČVUT 2017 Archiv časopisu Beton TKS Další vhodná samostatně vyhledaná literatura	
Jméno vedoucího diplomové práce: <u>Ing. Martin Típka, Ph.D.</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>22.9.2022</u>	Termín odevzdání DP v IS KOS: <u>9.1.2023</u> <small>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</small>
 Podpis vedoucího práce	 Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

<u>22.9.2022</u> Datum převzetí zadání	 Podpis studenta(ky)
---	--

SPECIFIKACE ZADÁNÍ

Jméno diplomanta: Bc. Matěj Kukla

Název diplomové práce: Návrh konstrukce zastřešení kostela Lesná

Základní část: BZK podíl: 100 %

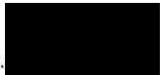
Formulace úkolů:

Rešerše na téma železobetonových skořepin

Příklady realizací sakrálních staveb se zaměřením na použitý konstrukční systém

Variantní návrh zastřešení kostela Lesná v Brně

Výkresy výztuže řešených konstrukčních prvků

Podpis vedoucího DP: 

Datum: 27.9.2022

Případně další části diplomové práce (části a jejich podíl určí vedoucí DP):

2. Část: _____ podíl: _____ %

Konzultant (jméno, katedra): _____

Formulace úkolů: _____

Podpis konzultanta: _____

Datum: _____

3. Část: _____ podíl: _____ %

Konzultant (jméno, katedra): _____

Formulace úkolů: _____

Podpis konzultanta: _____

Datum: _____

4. Část: _____ podíl: _____ %

Konzultant (jméno, katedra): _____

Formulace úkolů: _____

Podpis konzultanta: _____

Datum: _____

Poznámka:

Zadání včetně vyplněných specifikací je nedílnou součástí diplomové práce a musí být přiloženo k odevzdané práci. (Vyplněné specifikace není nutné odevzdat na studijní oddělení spolu s 1. stranou zadání již ve 2. týdnu semestru)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl všechny použité zdroje informací.

V Praze dne

.....

Matěj Kukla

Poděkování

Děkuji panu Ing. Martinu Típkovi Ph.D. za cenné rady a připomínky, které mi pomohly při vypracování této práce. Dále děkuji své rodině za morální podporu v době psaní práce.

Abstrakt

Předmětem této diplomové práce je variantní návrh zastřešení kostela Lesná v Brně. Práce je rozdělena na rešeršní a konstrukční část.

První část rešerše se zabývá vlivem technologie železobetonu na konstrukční uspořádání sakrálních staveb. Představuje vybrané sakrální stavby a specifika užití železobetonu pro architektonické a konstrukční možnosti prvků. Vyzdvihuje vliv nové technologie na změnu způsobu návrhu a tento vliv ukázat na reálných konstrukcích.

Druhá část rešerše je zaměřena na problematiku skořepinových konstrukcí. Zabývá se zejména úvodem do této problematiky a klasifikací skořepin podle různých kritérií.

Náplní konstrukční části práce je návrh dvou konstrukčních variant zastřešení vybraného kostela. Varianty jsou vzájemně porovnány a vyhodnoceny z hlediska efektivnosti a proveditelnosti.

Klíčová slova: kostel, sakrální stavba, konstrukce, skořepinová konstrukce, železobeton

Abstract

The subject of this thesis is a roof variant design for the Lesná church in Brno. The work consists of research and subsequent construction portions.

The first part of the research deals with the influence of reinforced concrete technology on the structural arrangement of sacred buildings. It presents selected sacred buildings and the individual nuances in the use of reinforced concrete with respect to the architectural and structural elements. It highlights the influence of new and developing technologies on design, and to show how this influence presents itself in real-world constructions.

The second part of the research is focused on the issue of shell structures. It deals mainly with the introduction to this issue and the classification of shells according to various criteria.

The structural part of the work consists of two structural design variants of the selected church. Variants are compared and evaluated in terms of effectiveness and feasibility.

Key words: church, sacral building, construction, shell structure, reinforced concrete

Obsah

1	Úvod	8
2	Sakrální stavby	8
2.1	Komunitní kostel Bagsværd.....	10
2.2	Kaple Panny Marie Utěšitelky	13
2.3	Kaple světla	16
2.4	Mariánský kostel	17
2.5	Kostel Milosrdného Boha Otce	19
3	Skořepiny	21
3.1	Dělení skořepin dle křivosti.....	21
3.1.1	Skořepiny s kladnou křivostí	22
3.1.2	Skořepiny s nulovou křivostí.....	23
3.1.3	Skořepiny se zápornou křivostí.....	25
3.1.4	Skořepiny s různou křivostí dle polohy na skořepině	26
3.2	Dělení skořepin dle namáhání.....	27
4	Konstrukční návrh zastřešení kostela Lesná v Brně	29
4.1	Konstrukční uspořádání	29
4.2	Výpočetní model konstrukce	31
4.2.1	Návrh sloupů.....	32
4.2.2	Návrh vzepětí kruhové kupole.....	34
4.2.3	Návrh prstence kruhové klenby.....	35
4.3	Zatížení modelu konstrukce	36
4.4	Varianta č. 1 – monolitická kopule.....	38
4.5	Varianta č. 2 – prefabrikovaná kopule	40
4.6	Porovnání variant	47
5	Závěr	48
6	Seznam použité literatury	49

Přílohy:

Příloha 1: Statický výpočet

Příloha 2: Výkres (schéma) tvaru kopule

Příloha 3: Schéma výztuže kopule – dolní povrch

Příloha 4: Schéma výztuže kopule – horní povrch

Příloha 5: Schéma výztuže prstence

Příloha 6: Schéma výztuže dvojice sloupů

Příloha 7: Výkres (schéma) sestavy dílců

Příloha 8: Střešní prefabrikát – tvar + schéma výztuže

Příloha 9: Vnitřní prstenec – tvar + schéma výztuže

Příloha 10: Schéma spojů – střešní prefabrikát/prstence

1 ÚVOD

„Když mi někdo řekne, že se mu v mém kostele dobře modlí, znamená to, že jsem jako architekt nezklamal.“

Mario Botta švýcarský architekt 1943

Ačkoliv je Česká republika jednou z nejvíce ateistických zemí na světě, nemůžeme tak rychle zavrhnout náš historický vývoj. Většina našich tradic a hodnot vychází více či méně z myšlenek různých náboženství. Na našem území se nachází nespočet staveb přímo spojených s náboženstvím. A ačkoliv se hlásím k většinové české společnosti ve vztahu k náboženství, chovám k těmto stavbám značný obdiv. Zejména pokud jsou tyto stavby kombinovány s mým oblíbeným stavebním materiálem, betonem.

Hlavním předmětem této diplomové práce je návrh zastřešení církevních staveb. Strukturu práce tvoří dvě na sebe navazující části, a to část rešeršní a konstrukční. První část rešerše přibližuje změnu v pojetí sakrálních staveb po příchodu nového konstrukčního materiálu, betonu. Následuje výčet několika sakrálních staveb s vyzdvižením jejich konstrukčních systémů. Druhá část rešerše se věnuje obecnému dělení skořepin dle jejich tvaru a subtility konstrukce. Tato část vytváří základní podklad pro problematiku skořepinových konstrukcí, které jsou následně řešeny v návazné části konstrukční.

Konstrukční část se zabývá vybraným objektem, kterým je železobetonový kostel jakožto součást stávající budovy Duchovního centra umístěného na sídlišti Lesná v Brně. Hlavní pozornost je upřena na konstrukci zastřešení kostelní části, její variantní řešení a na možnosti případné prefabrikace jednotlivých prvků konstrukce.

2 SAKRÁLNÍ STAVBY

Historie sakrálních staveb je velmi dlouhá. Stavby, které reflektují svou dobu, náboženství či lidi kteří se podíleli na jejich vzniku, jsou pro nás významným historickým vodítkem a významných pojítkem s našimi dějinami. A proto by i doba ve které žijeme měla mít nějaký významný rukopis. A tímto rukopisem je dle mého využití technologie železobetonu v oblasti sakrální architektury.

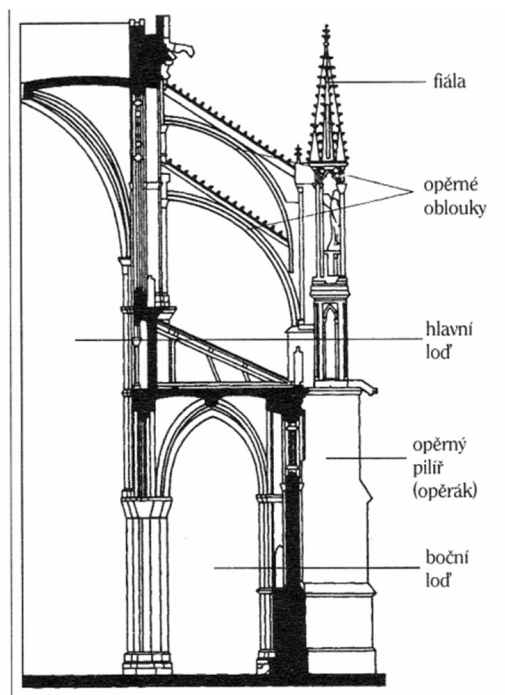
Ačkoliv je beton znám již od starého Říma, jeho hlavní rozvoj nastal až ve 20. století. Od této doby se dá považovat za hlavní stavební materiál pro širokou škálu konstrukcí. Propojení oceli a betonu dalo vzniknout konstrukčnímu materiálu, který nemá v historii obdoby. Výrazně lepší konstrukční vlastnosti – oproti tradičním stavebním materiálům (kámen, zdivo, dřevo) - pomohly rozvolnit architektonické i stavební možnosti a překonat historicky zažitě konstrukční uspořádání staveb.

Již nebylo nutné dodržovat nepsaná konstrukční pravidla jako např. užití dřeva pro menší kostely a kostelíky, kdy je konstrukce tvořena z masivních trámů či příhradovinou s omezenou možností rozměrové dispozice – viz Obr.1.



Obr. 1: Kostel sv. Mikuláše [31]

Proti tomu stáli monumentální kamenné a zděné kostely tvořené masivními konstrukcemi nosných stěn a sloupů, pro zachycení vodorovných a svislých sil. Období gotiky přineslo pokrok v podobě subtilnějších řešení (konstrukční systémy katedrál), problém vodorovných sil však přetrvával. Poznávacím znakem těchto konstrukcí je jednoduchý nebo i násobný vnější opěrný systém – viz Obr. 2.

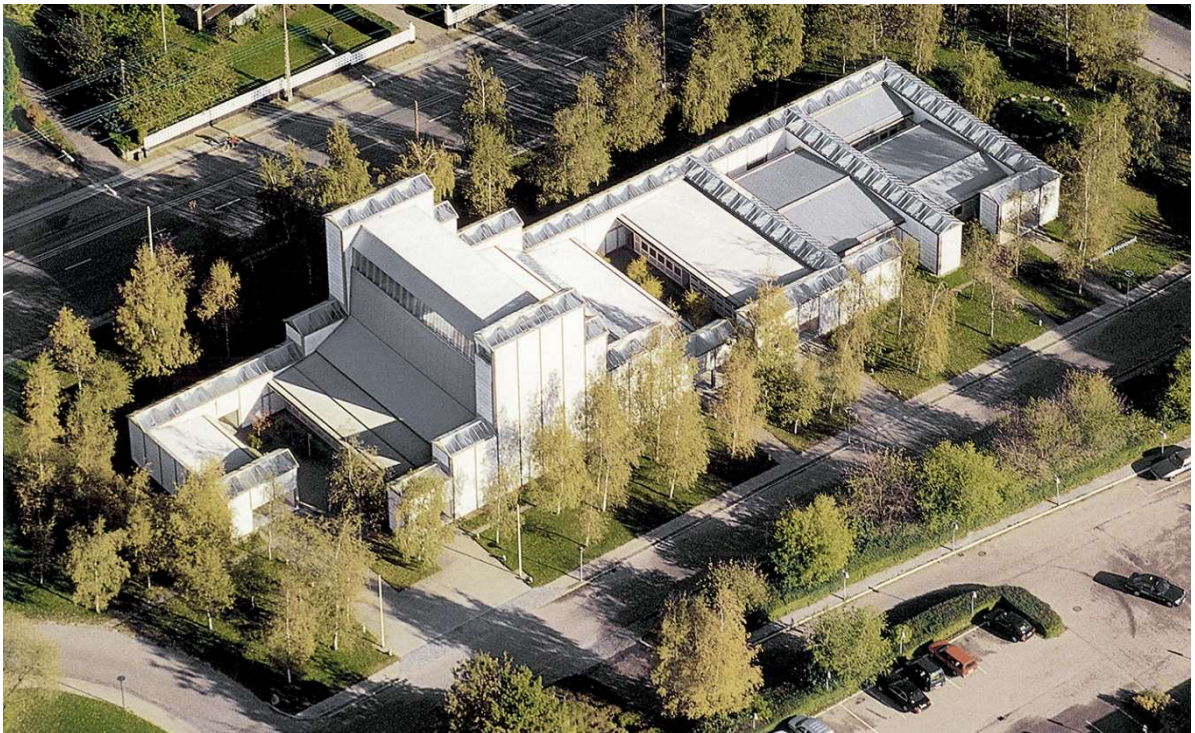


Obr. 2: Vnější opěrný systém gotické katedrály [32]

Až nástup betonu o dalších 400 let umožnil úplně nová konstrukční uspořádání. Umožnil vytvoření subtilnějších konstrukcí s možností tvarování do různých volných tvarových dispozic, zavedení rozponů a dimenzí konstrukcí, o kterých nemohlo být dříve ani uvažováno. A postaral se o celkovou větší volnost a různorodost sakrálních staveb. Následující kapitola přibližuje několik konstrukcí, u kterých došlo k propojení flexibility betonu v jeho konstrukčním uspořádání a požadavků duchovních staveb.

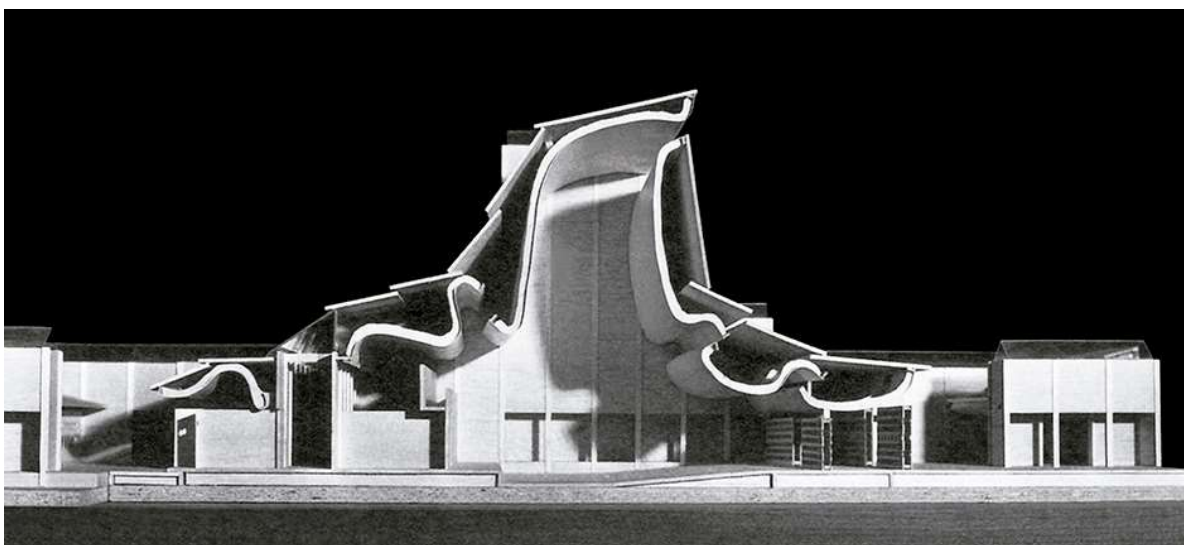
2.1 KOMUNITNÍ KOSTEL BAGSVÆRD

místo: Kodaň, Dánsko
autor: Jørn Utzon
realizace: 1967-1976



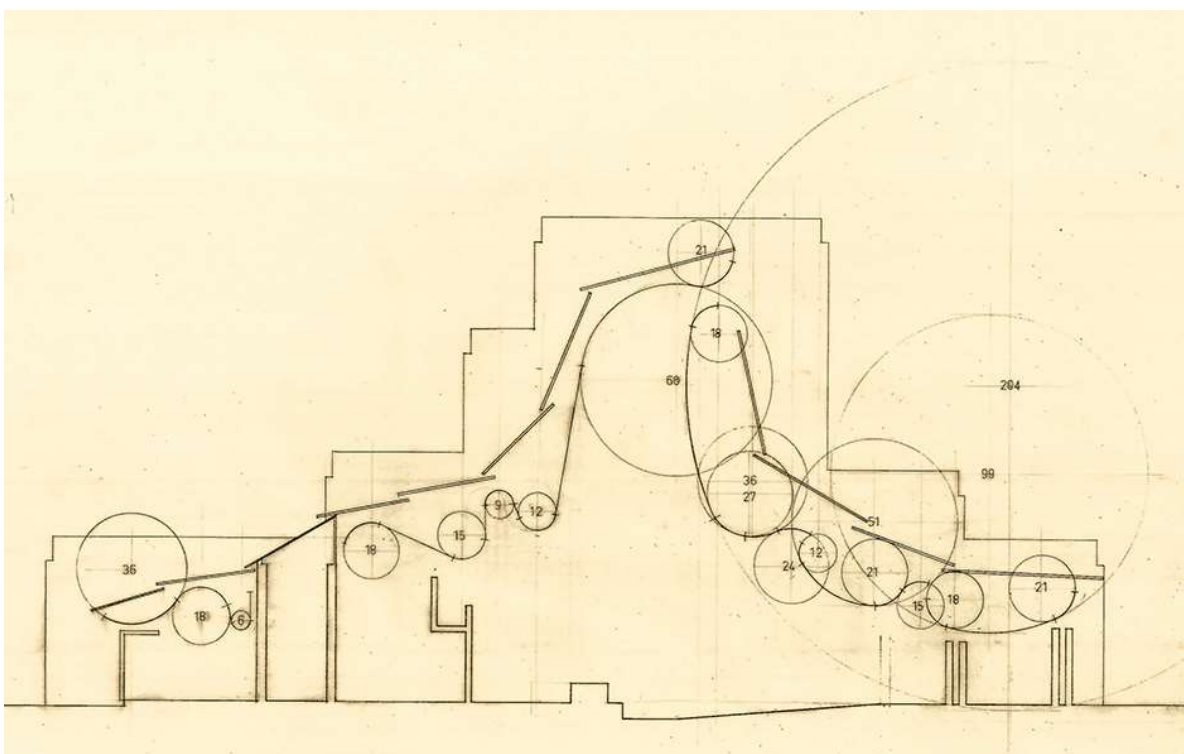
Obr. 3: Pohled na budovu kostela Bagsværd [17]

První přestavovanou sakrální stavbou je luteránský kostel nacházející se v obytné čtvrti Bagsværd na severním předměstí Kodaně. Kostel stojí na úzkém pozemku v blízkosti městské obytné zástavby. Jeho obvodový plášť je tvořen bílými prefabrikovanými betonovými panely a glazovanými dlaždicemi, doplněnými jednoduchou hliníkovou střechou. Pro přísun denního světla je budova vybavena prosklenými světlíky nad jednotlivými atrií a také vysokým oknem prosvětlující hlavní loď kostela – viz Obr. 3.



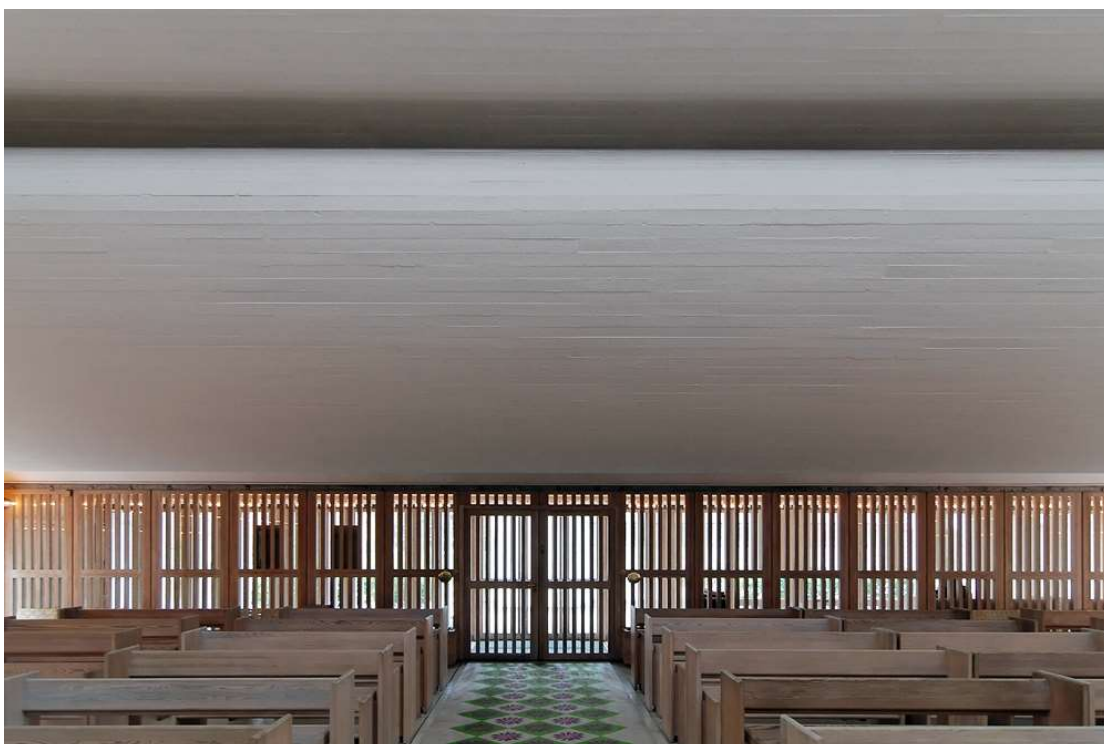
Obr. 4: Řez modelem konstrukce [17]

Vnitřní část kostela se skládá z hlavní lodě, sakristie, kanceláří, učeben, společenských místností a celé jedné zóny určené pro aktivity mládeže. Většina konstrukcí má přísný pravoúhlý charakter, pro tuto práci je však nejdůležitější kontrastní dynamická sekce tvořená vlnitým stropem zalamovaným v kruhových liniích.



Obr. 5: Poloměry zalomení stropní konstrukce [17]

Konstrukce zvlněné desky má tloušťku 150 milimetrů a je provedena z vláknobetonu stříkaného na místě na ocelové pletivo provizorně položené na dřevěném bednění. Dřevěné bednění určilo konstrukci nejenom jeho tvar, ale tvoří také strukturu jeho povrchu s jednotlivými viditelnými prolisovanými prkny – viz Obr. 6.



Obr. 6: Struktura dřevěného bednění konstrukce zastřešení [16]

Celá konstrukce je podporována dvěma řadami betonových monolitických sloupů v osových rozstupech 2,25m. Tato vzdálenost je hlavním podélným rozponem definujícím v celočíselných násobcích téměř všechny rozměry nosných i nenosných konstrukcí objektu.



Obr. 7: Stropní konstrukce z vláknobetonu, v pozadí sloupy typického rozponu, který zde například definuje i rozměr varhan [16]

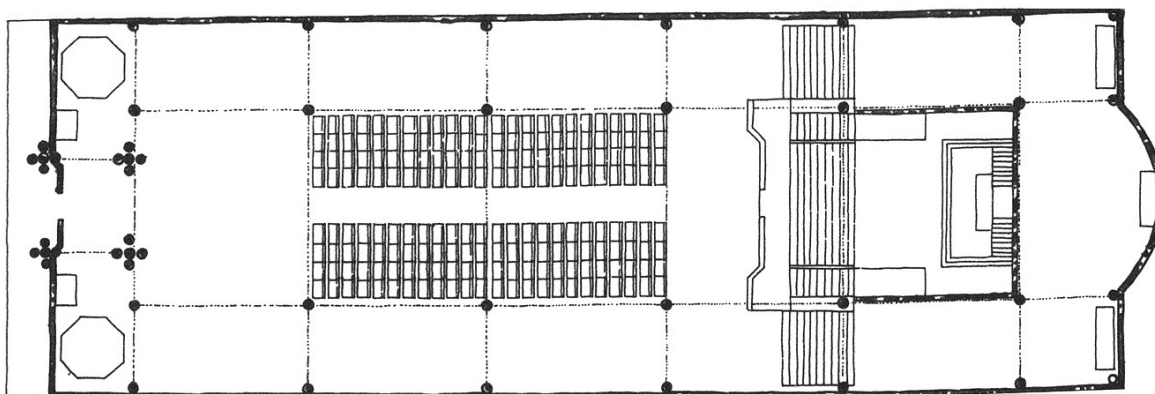
2.2 KAPLE PANNY MARIE UTĚŠITELKY

místo: Le Raincy, Francie
autor: Auguste Perret, Gustave Perret
realizace: 1922-1923



Obr. 8: Betonová věž se zvonící [19]

Druhou prezentovanou sakrální stavbou je katolická kaple Panny Marie Utěšitelky, která se nachází v malém městečku Le Raincy na předměstí Paříže. Hlavní inženýrskou dvojicí byli bratři Perretové, jejichž inženýrská kancelář navrhovala betonové stavby již na začátku 20. století. Dle jejich návrhu vznikl první železobetonový kostel ve Francii. Konstruktivní systém stavby je ve velké míře inspirován gotikou. Hmotnost konstrukce je tedy minimalizována a je dán na obdiv celý konstruktivní systém stavby.



Obr. 9: Půdorys nosné konstrukce kaple Panny Marie Utěšitelky [18]

Průčelí dominuje 43 metrů vysoká betonová věž se zvonící přecházející ve 14 metrů vysoké zastřešení hlavní loď. Zastřešení loď je z klenbových pruhů s rozpony 10 metrů, podporované 28 subtilními sloupy. Sloupy výšky 10 metrů mají proměnný kruhový průřez, který se zužuje z 450 mm u paty po 350 mm ve vrcholu. Ve vrcholu tvoří tyto sloupy lokální podpory pro klenby zastřešení. Krajní klenební pruhy mají podélný směr, zatímco střední klenba má směr opačný. Oba prvky nosné konstrukce vytváří dohromady velmi subtilní a velmi vzdušný prostor – viz Obr. 10.



Obr. 10: Konstrukce zastřešení z klenbových pruhů a štíhlých sloupů [20]

Nenosná konstrukce obvodového pláště je rovněž z betonu. Je tvořena kombinací prefabrikovaných betonových tvárnic 5 druhů (kříž, diamant, kruh, čtverec a obdélník), které vytváří nejenom nosný obvodový plášť vitrážových oken, ale sloužily i při bednění klenbových pásů – viz Obr. 10 a 11.



Obr. 11: Nosná konstrukce věže a nenosné betonové tvárnice [20]

2.3 KAPLE SVĚTLA

místo: Ibaraki, Japonsko

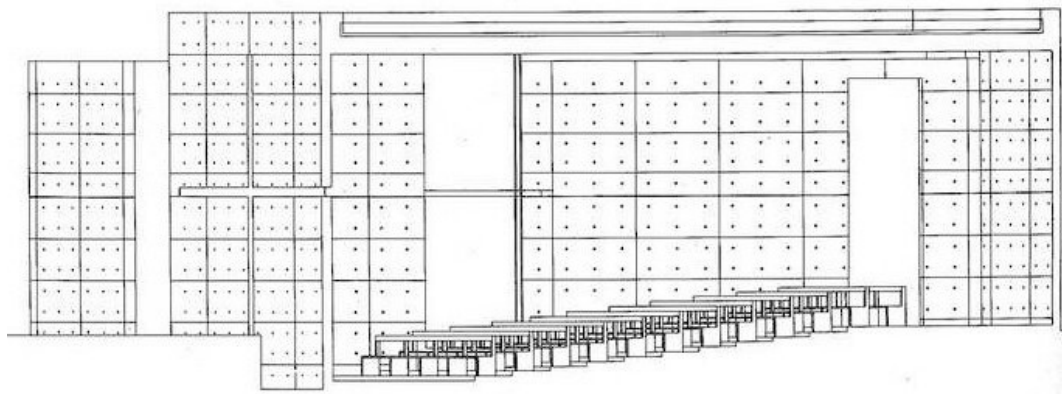
autor: Tadao Ando

realizace: 1987-1990



Obr. 12: Interiér kaple s dominantou v podobě okna ve tvaru kříže [22]

Rozměrově nejskromnější stavba od japonského minimalisty Tadaa Ando se nachází na severním předměstí Ósaky. Minimalistická konstrukce křesťanské kaple je tvořena pravoúhlým betonovým kvádrem z hladkého monolitického betonu protnutým v úhlu 15 stupňů volně stojící betonovou stěnou. Celkové vnější rozměry jsou skromných 17,7 metru na délku a shodných 5,9 metru na výšku a šířku. Konstrukce zastřešení je tady tvořena prostou železobetonovou deskou podporovanou po obvodu monolitickými železobetonovými stěnami.



Obr. 13: Řez konstrukcí kaple [22]

2.4 MARIÁNSKÝ KOSTEL

místo: Neviges, Německo

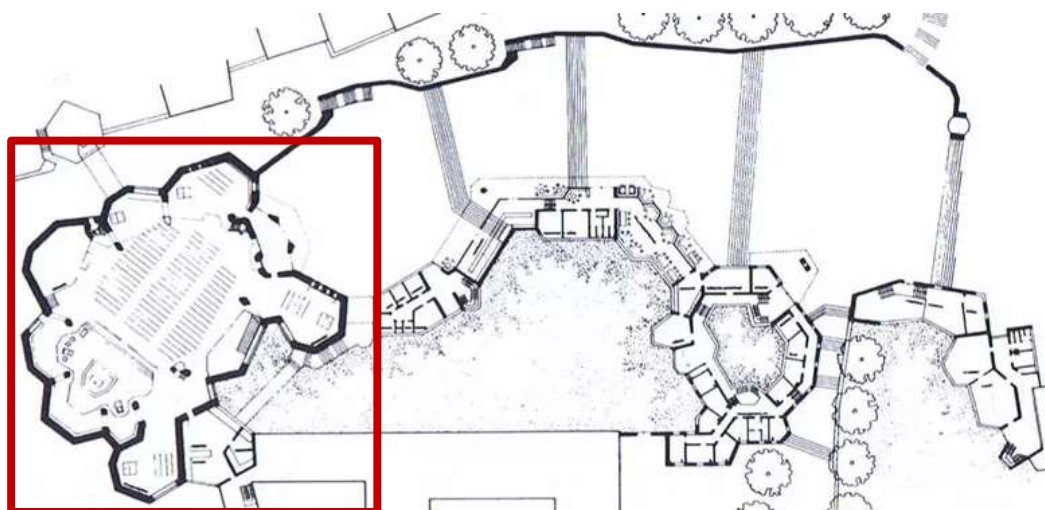
autor: Gottfried Böhm

realizace: 1962-1968



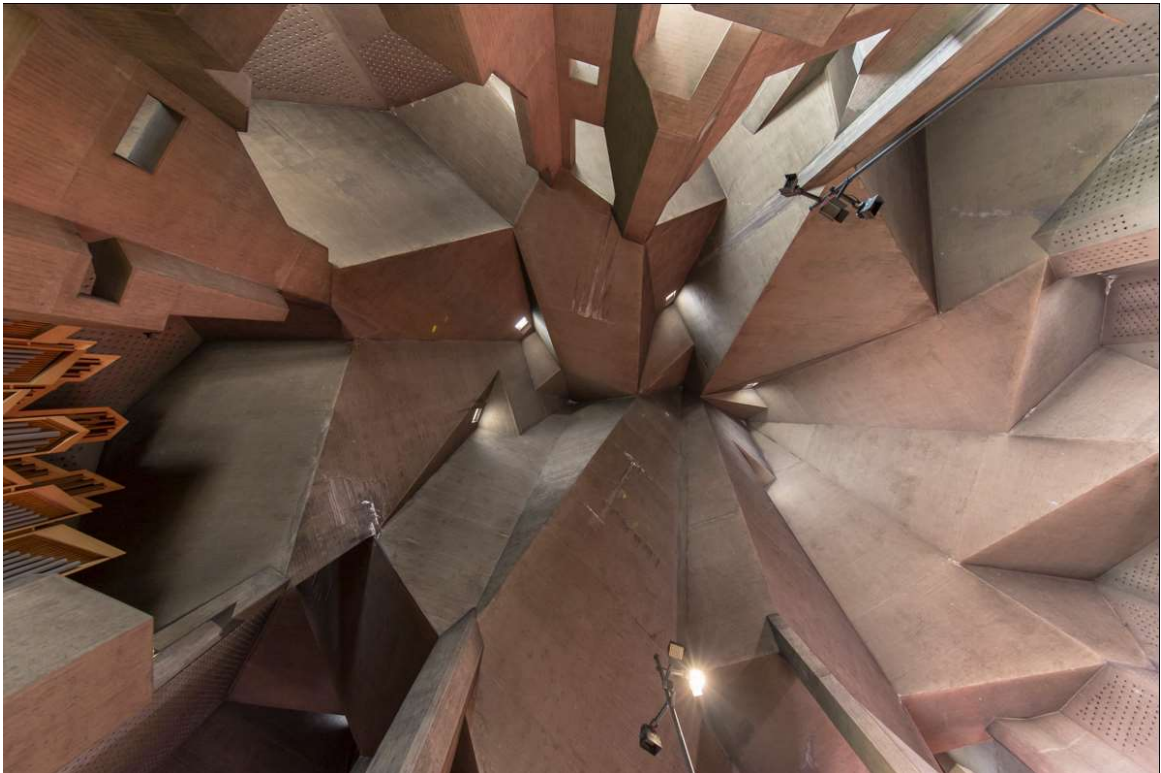
Obr. 14: Budova kostela s přiléhajícím ubytováním a křížovou cestou [24]

Římskokatolický kostel v Neviges, připomínající pohoří či plátěný stan, je opravdovým brutalistním obrem. S kapacitou 6000 míst je druhou největší sakrální stavbou v místní arcidiecézi. Volný polygonální půdorys je doplněn skládanou betonovou střechou bez výraznějších vnitřních podpor. Významnou změnou pro zastřešení bylo upuštění od skládané konstrukce, která měla být tvořena vrstvami betonu s tepelnou a hydroizolační vrstvou.



Obr. 15: Půdorys celého komplexu budov (půdorys kostela vyznačen červeně) [25]

Skládaná betonová skořepina byla nakonec vybetonována pouze z jedné vrstvy vodonepropustného betonu, což mělo za následek její brzké poškození již v řádu let. Problematickými místy byly zejména záhyby a úžlabí v betonové skořepině, kde docházelo skrz trhliny k zatékání vody do konstrukce. Vlhkost poškodila hlavně komplikované rohy a přechody mezi stěnami a střechou. K výraznému poškození také přispělo příliš nízké krytí výztuže a její předčasná degradace působením vlhkosti.



Obr. 16: Betonová skládaná skořepina zastřešení – pohled zdola [27]

Konstrukce nyní prochází rozsáhlou opravou střešního pláště. Je sanována ochranou vrstvou z betonu s textilní vložkou z karbonových vláken. Sanační vrstva by měla pomoci zacelit trhliny v betonové konstrukci a zamezit dalšímu zatékání vody do konstrukce.

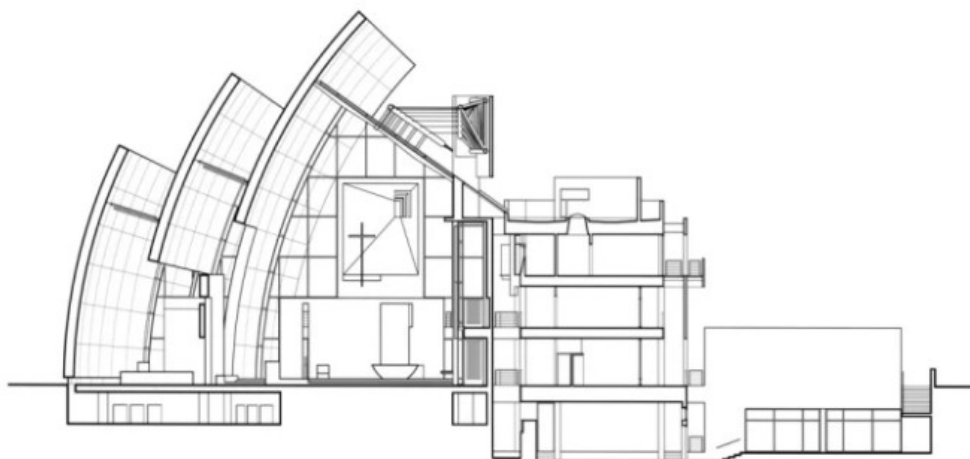
2.5 KOSTEL MILOSRDNÉHO BOHA OTCE

místo: Řím, Itálie
autor: Richard Meier
realizace: 1998-2003



Obr. 17: Pohled na kostel s dominantními třemi zaoblenými stěnami [28]

Poslední zmíněnou stavbou je kostel Milosrdného Boha Otce v Římě. Kostel je umístěn na trojúhelníkovém pozemku okrajového římského sídliště v obklopení parkovišť a vysoké městské zástavby. Konstrukce se snaží co nejvíce o hru se světlem, je tedy protkána velkými skleněnými plochami, které neruší kontakt s venkovním prostředím. Prosklení je doplněné nosnými konstrukcemi z bílého betonu, který dodává objektu celkovou světlost – viz Obr. 17.



Obr. 18: Řez konstrukcí kostela [29]

Hlavní dominantou kostela jsou tři zaoblené samonosné stěnové skořepiny výšky 17 až 27 metrů, které mají symbolizovat plachty. Kvůli komplikovanému tvaru a požadavkům na jakost a trvanlivost konstrukce bylo upuštěno od monolitické varianty a jednotlivé skořepiny jsou poskládány celkem z 256 kusů (38 typů) prefabrikovaných segmentů – viz Obr. 19.

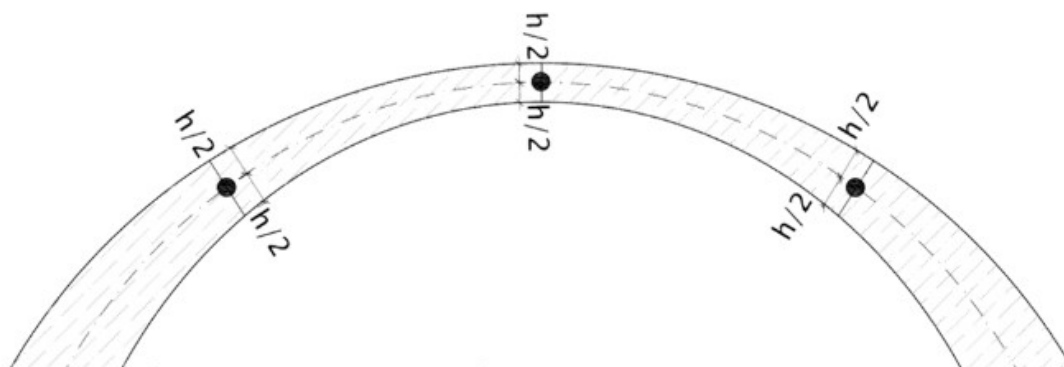


Obr. 19: Spínání segmentové konstrukce pomocí ocelových lan [30]

Jednotlivé segmenty byly sestavovány na stavbě pomocí speciálně upraveného jeřábu a fixovány prostřednictvím velkého množství ocelových lan. Lana zaručují stabilitu jednotlivých skořepin a spolupůsobení segmentů, ze kterých jsou jednotlivé skořepiny složeny.

3 SKOŘEPINY

Skořepina, jakožto konstrukční prvek, je charakterizována jako prvek plošný, podobný stěnám a deskám, avšak obecnějšího charakteru (využívá předností obou konstrukčních prvků). Významný je nepoměr tloušťky ku délce a šířce, kdy je tloušťka konstrukce mnohonásobně menší než zbývající dva rozměry konstrukce ($h \ll l, b$). Pro popis tvaru konstrukce se používá střednicová plocha skořepiny - množina bodů popsaná jako střed dané tloušťky konstrukce – viz Obr. 20.



Obr. 20: Střednicová plocha skořepiny [15]

Obecnější pojetí konstrukčního prvku je doprovázeno možnými proměnnými tloušťkami konstrukce, možností zakřivovat danou plochu ve všech směrech v prostoru, i značnou volnost při využití různých stavebních materiálů (beton, ocel či plastové hmoty). Nalezneme tak konstrukce s konstantní tloušťkou i s tloušťkou proměnnou (zvětšující se zejména ke krajům nosné konstrukce). Existují skořepiny symetrických geometrických tvarů, rotačních či úplně volných obecných s množstvím proměnných zakřivení. Ačkoliv teoreticky existuje mnoho tvarových možností, vždy je nutné myslet na ekonomičnost a proveditelnost konstrukce. Proto ve skutečnosti nalézáme zejména konstrukce symetrické a ve značném měřítku také konstrukce inspirované přírodou a jejími skořepinami (skořápky vajec, ulity plžů či mlžů).

Pokud se podíváme na typy skořepin, rozlišujeme 2 hlavní hlediska dělení:

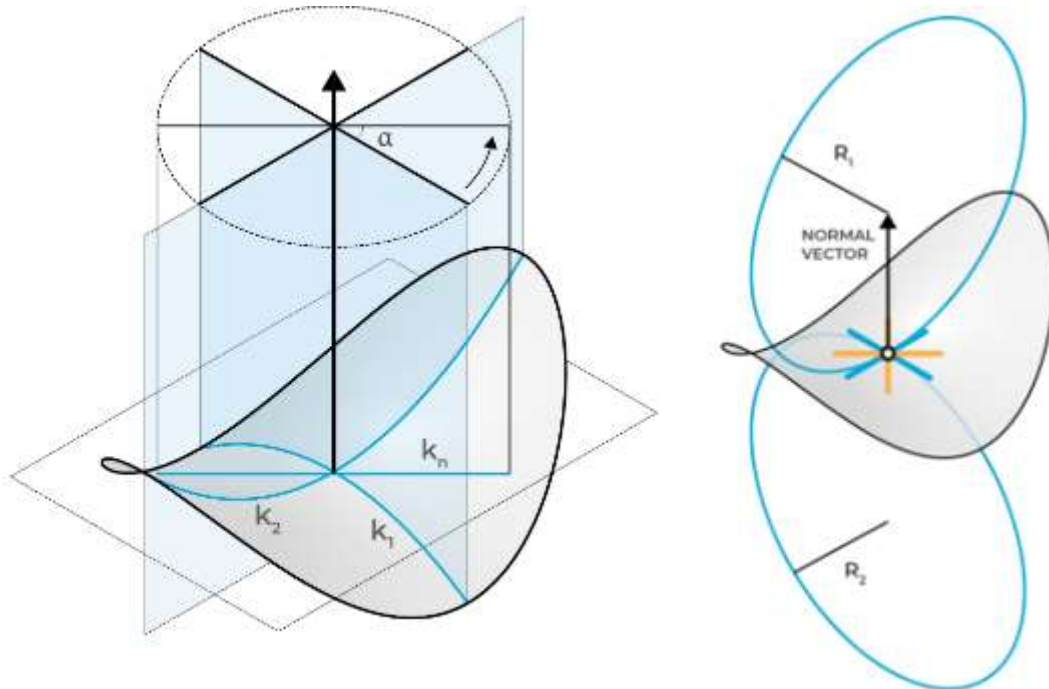
- dle tvaru konstrukce (střednicové roviny) = dle křivosti
- dle způsobu namáhání

3.1 DĚLENÍ SKOŘEPIN DLE KŘIVOSTI

Při dělení konstrukcí dle křivosti rozlišujeme skořepiny obecné a skořepiny nějakým způsobem symetrické (nejčastěji rotačně symetrické). Pro popis jednotlivých bodů konstrukce tak pro konstrukci jako celek používáme tzv. Gaussovu křivost K .

$$K = k_1 * k_2 = \frac{1}{R_1} * \frac{1}{R_2}$$

Gaussova křivost K je vyjádřena jako součin jednotlivých křivostí k_1 a k_2 v daném bodě, resp. jako součin převrácených hodnot hlavních křivostních poloměrů R_1 a R_2 . R_1 a R_2 představují největší a nejmenší z poloměrů křivosti ve vybraném bodě – viz Obr. 21. Tyto dva poloměry se nachází v navzájem kolmých rovinách.

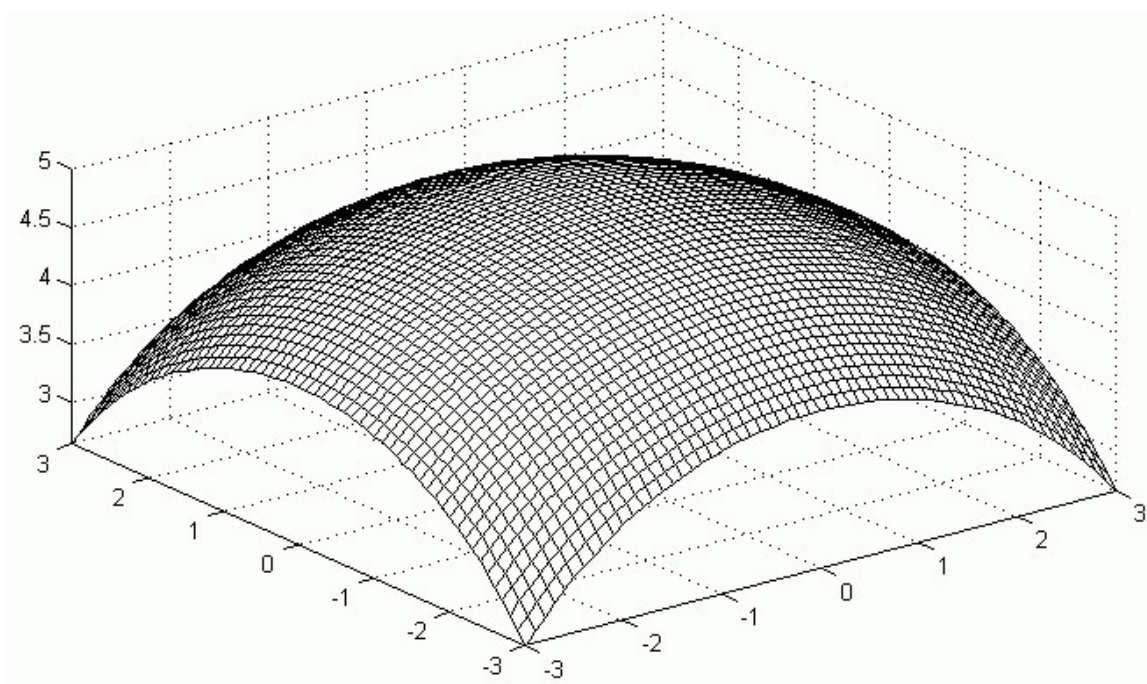


Obr. 21: Parametry Gaussovy křivosti k_1 a k_2 , resp. poloměry R_1 a R_2 [12]

Jak bylo řečeno, křivost je vztažena ke každému jednotlivému bodu. Konstrukce tedy nemusí být reálně tvořena pouze body se shodnou křivostí, i když i takové můžeme nalézt (koule, válec). U obecných konstrukcí se můžou křivosti lišit všechny body konstrukce.

3.1.1 Skořepiny s kladnou křivostí

Skořepiny s kladnou křivostí ($K > 0$) jsou tvořeny množinou eliptických bodů, ve kterých mají hlavní křivosti skořepiny stejné znaménko. Do této skupiny řadíme všechny bodově rotačně symetrické konstrukce. Jedná se zejména o skořepiny tvaru koule, či jejího fragmentu, např. kopule, klenby (česká placka, česká klenba) – viz Obr. 22 a 23.



Obr. 22: Skořepina z eliptických bodů [13]

Tento typ skořepin je ve stavebnictví velmi oblíbený, zejména pro svoji jednoduchost (konstrukce mohou být navržena jako převážně tlačené či tažené). Tyto skořepiny nalézáme nejenom u staveb velkého historického významu (sakrální stavby, reprezentativní budovy), ale běžně i u staveb obytných či zemědělských (chlívy pro domácí zvířata) – viz Obr. 23.

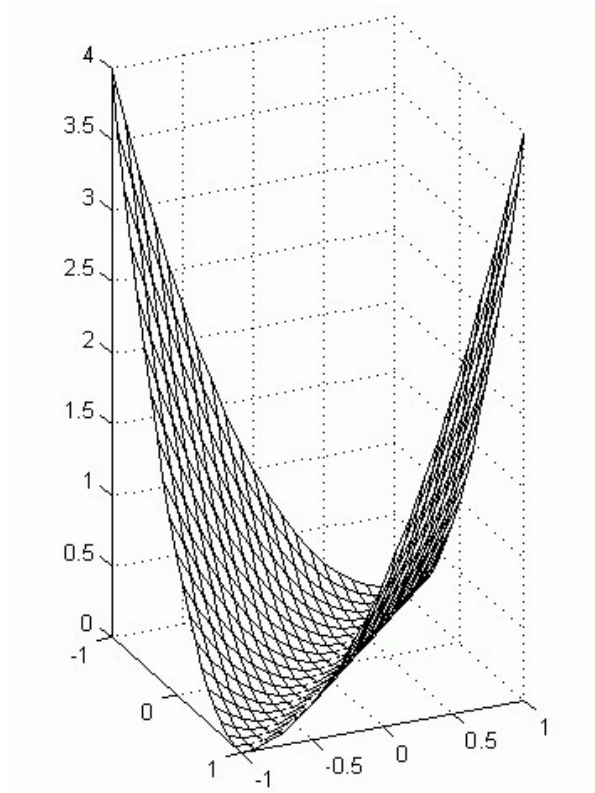


Obr. 23: Zděná klenba typu česká placka [33]

3.1.2 Skořepiny s nulovou křivostí

Skořepiny s nulovou křivostí představují typ konstrukce, kde minimálně jedna z hlavních křivostí je rovna nule ($K = 0$). Pokud jsou obě hlavní křivosti rovny nule, jedná se o množinu planárních

bodů a výsledným tvarem je prostá rovina (u konstrukcí deska či rovná stěna). Pokud je alespoň jedna křivost nenulová mluvíme o množině z tzv. parabolických bodů – viz Obr. 24.



Obr. 24: Skořepina z parabolických bodů [13]

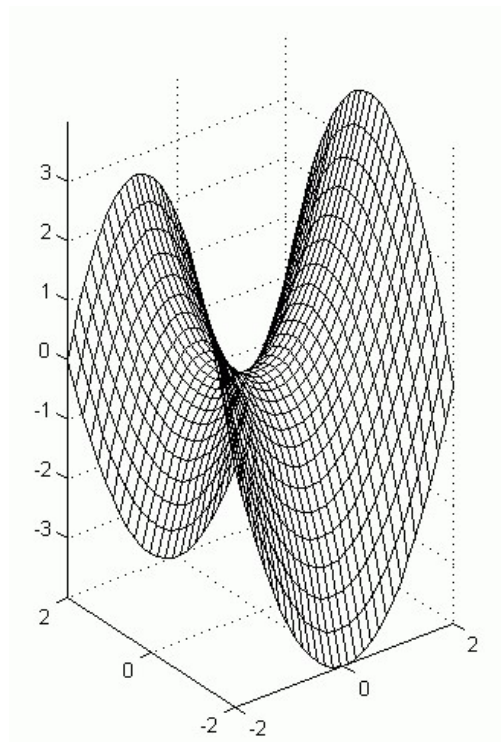
Nejjednodušší konstrukcí s nulovou křivostí je válcová plocha. Ve stavebnictví nalezneme jak konstrukce s uzavřenou válcovou plochou (komíny či stožáry), tak konstrukce s částí válcové plochy, např. klenby (valená, křížová, klášterní) – viz Obr. 25.



Obr. 25: Valená klenba [34]

3.1.3 Skořepiny se zápornou křivostí

Skořepiny se zápornou křivostí jsou tvořeny množinou bodů uspořádaných do hyperbolického tvaru ($K < 0$). V těchto bodech mají hlavní křivosti skořepiny opačné znaménko. Pro stavebnictví je nejdůležitějším tvarem zastupujícím tuto kategorii rotační hyperboloid. Můžeme ho nalézt jak u konstrukcí značného architektonického významu, tak i u konstrukcí čistě technického charakteru (chladicí věže elektráren).



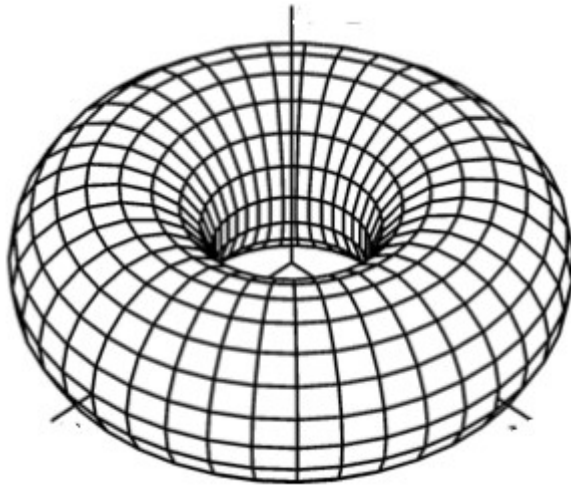
Obr. 26: Skořepina z hyperbolických bodů [13]



Obr. 27: Chladicí věže tvaru rotačního hyperboloidu [35]

3.1.4 Skořepiny s různou křivostí dle polohy na skořepině

Do této kategorie řadíme všechny konstrukce, které nesplňují kritéria předchozí. Jedná se jak o čistě obecné konstrukce (volné architektonické plochy), tak o konstrukce symetrické. Takovým tvarem je například anuloid, který je po vnějším obvodu tvořen eliptickými body ($K > 0$), kdežto na vnitřním obvodu je tvořen body hyperbolickými ($K < 0$).



Obr. 28: Skořepina z obecných tvarů (anuloid/torus) [14]



Obr. 29: Věž s expanzní nádrží na vodu tvaru anuloidu [36]

3.2 DĚLENÍ SKOŘEPIN DLE NAMÁHÁNÍ

Druhým způsobem dělení skořepin je dle způsobu namáhání. V tomto případě nerozhoduje tvar konstrukce, ale zjednodušeně jde o poměr mezi tloušťkou konstrukce a jejím poloměrem křivosti. Změna tohoto poměru má za následek jinak uvažované rozdělení vnitřních sil dle různých teorií. Přecházíme tedy od velmi složitých výpočtů tlustostěnných konstrukcí dle Mindlinovy teorie (rozložení napětí po výšce průřezu není lineární) až po teorii membránovou, u které v konstrukci vznikají pouze normálové síly (ohybové momenty jsou zde velmi malé a v některých případech až zanedbatelné). Dle způsobu namáhání (použité teorie výpočtu) tedy rozdělujeme skořepiny:

- a) tlustostěnné
- b) tenkostěnné
- c) nelineární tenkostěnné
- d) membrány

Tlustostěnné skořepiny představují konstrukce, u kterých je tloušťka skořepiny srovnatelná s minimálním poloměrem křivosti. Napětí po výšce skořepiny není lineární, neplatí pro ně tudíž Kirchhoffova teorie tenkých desek. Řešení konstrukcí je velmi složité (blíží se Mindlinově teorii pro tlusté desky), a proto se nejčastěji využívá výpočetní metody konečných prvků (MKP). Tlustostěnné skořepiny nalezneme např. u ŽB věžových vodojemů či u ocelových tlustostěnných trubek.

Tenkostěnné skořepiny mají oproti tomu velmi malou tloušťku v porovnání s poloměrem křivosti. U těchto skořepin lze zanedbat vliv smykových sil na deformaci normálového napětí ke střednicové ploše. U těchto konstrukcí uvažujeme lineární rozdělení normálového napětí po průřezu (Kirchhoffova teorie). Řešení konstrukcí je tedy podstatně jednodušší než u výpočtu dle Mindlinovy teorie. Mezi tenkostěnné konstrukce řadíme např. chladicí věže elektráren či betonové nádrže – viz Obr. 30.



Obr. 30: Předpjaté betonové nádrže [37]

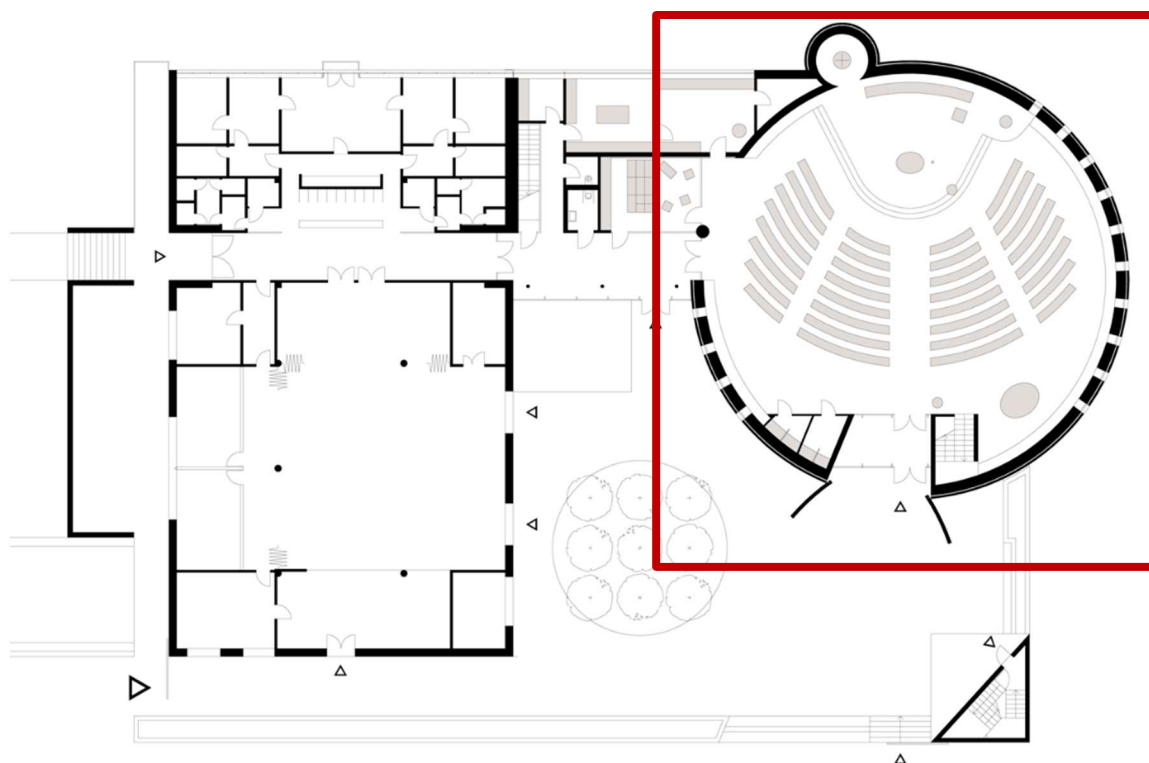
Nelineární tenkostěnné skořepiny jsou podskupinou tenkostěnných skořepin s velmi malou tloušťkou, u kterých je velikost deformace srovnatelná s tloušťkou konstrukce. U takovýchto skořepin musíme uvažovat při řešení konstrukce geometrické nelinearity. Analytické řešení je kvůli tomu výrazně složitější, a proto se i u těchto konstrukcí využívá metody konečných prvků (MKP).

Skořepiny, klasifikované jako **membrány**, jsou namáhány pouze normálovými či smykovými silami. Nevyskytují se u nich žádné momentové síly od ohybu ani kroucení. Rovnoměrné rozdělené napětí po tloušťce konstrukce se nazývá membránová napjatost. Jedná se o stav konstrukce určený jejím tvarem, zatížením a podmínkami uložení. Je tedy důležité navrhnout takový detail uložení, který umožní volné natočení (aby nevznikaly momenty) i přenos působících membránových sil. Většina membránových konstrukcí je tvořena kombinací materiálů. Nalezneme tedy hlavně konstrukce z textilních membrán v kombinaci s ocelovými lany či konstrukce z prefabrikovaných betonových prvků zavěšených a stabilizovaných lanovou ocelovou sítí – viz Obr. 31.



Obr. 31: Membránová konstrukce z prefabrikovaných prvků [38]

průchod mezi kostelem a stávajícím duchovním centrem a také o sérii vysokých obdélníkových oken pro přísun vnějšího světla do objektu – viz Obr. 33.



Obr. 33: Půdorys sakrálního komplexu (půdorys kostela vyznačen červeně) [40]

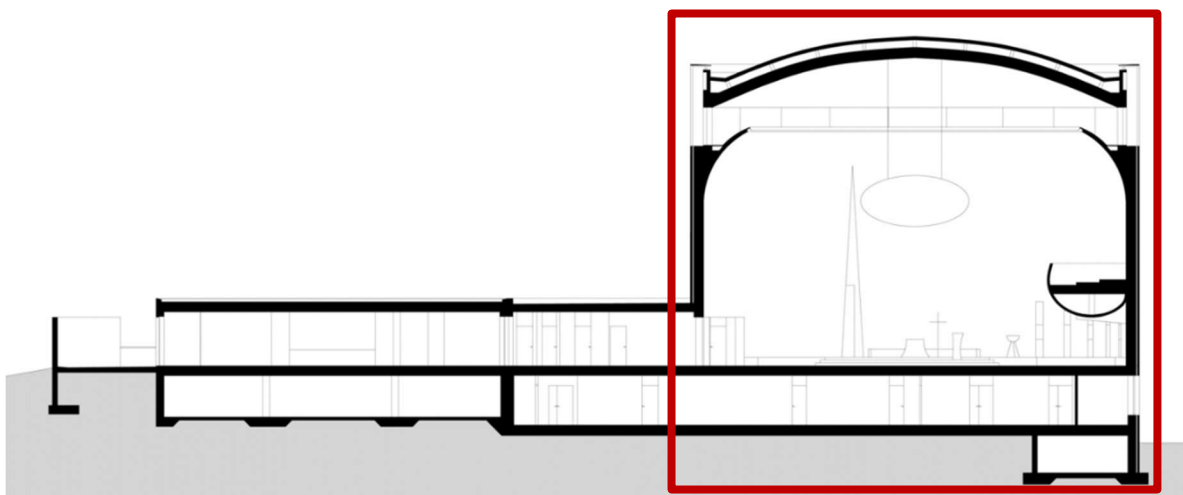
Kostel lze rozdělit na 3 základních část:

- a) suterén
- b) dřík
- c) konstrukce zastřešení

V oblasti suterénu, který se nachází pod kostelem i stávajícím centrem, se nachází parkovací stání, byty, archiv a technická místnost

Dřík (válcová skořepina) přechází ze suterénu až do výšky cca 11 metrů a následně přechází na část zastřešení. Z konstrukce dříku jsou vykonzolovány 2 vnitřní balkóny (kúry). První z nich je umístěn nad vchodovými dveřmi a slouží pro umístění varhan. Druhý je umístěn o metr výše a je určen pro lid a chór – viz Obr. 34. V horní části dříku se ještě nachází ochoz navazující lávkou na vyhlídkovou věž – viz Obr. 32.

Poslední částí je konstrukce zastřešení. Ta je tvořena kruhovou sérií sloupů, které navazují na konstrukci dříku, a samotnou kruhovou kopulí s vnějším prstencem. Válcová kopule je ve vrcholu doplněna otvorem poloměru 1,5 metru pro přísun slunečního svitu do prostoru hlavní loď – viz Obr. 47.

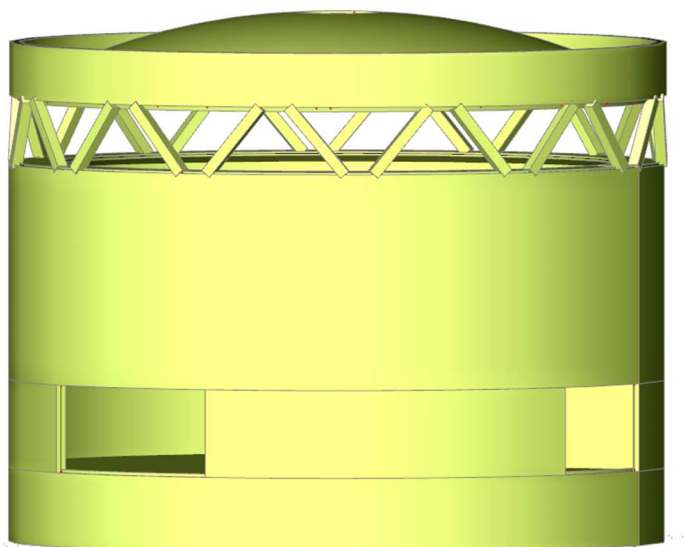


Obr. 34: Řez sakrálního komplexu (část s kostelem vyznačena červeně) [40]

Předmětem diplomové práce je pouze návrh konstrukce zastřešení kostela.

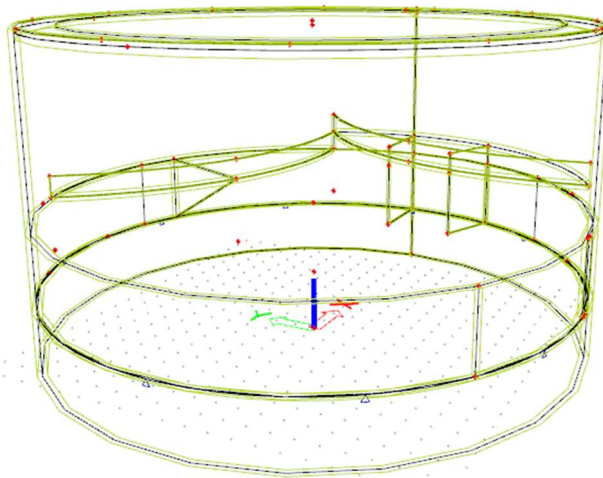
4.2 VÝPOČETNÍ MODEL KONSTRUKCE

Pro návrh, výpočet a posouzení sloupů, kopule a prstence zastřešení byl vytvořen 3D výpočetní model v programu SCIA Engineer. Konstrukce kostela byla modelována jako celek s doplněním o významné otvory a konzoly v oblasti dříku, ale bez navazujících konstrukcí duchovního centra.



Obr. 35: Boční pohled na 3D model

V oblasti dříku jsou namodelovány jak obě konzoly balkónů s předpokládanými podporami (podpora parapetním nosníkem zábradlí doplněná o nosné stěny či stěnové nosníky). Dřík je v modelu oslaben dvěma otvory - jedním je otvor pro vstup, druhý otvor slouží jako průchod do navazujícího duchovního centra. Na horním okraji dříku je model doplněn o konstrukci ochozu – viz Obr. 36. Tato část modelu slouží v následujících výpočtech pouze jako podpora pro přenos bodového zatížení od sloupů konstrukce zastřešení a její podrobnější návrh není předmětem diplomové práce.



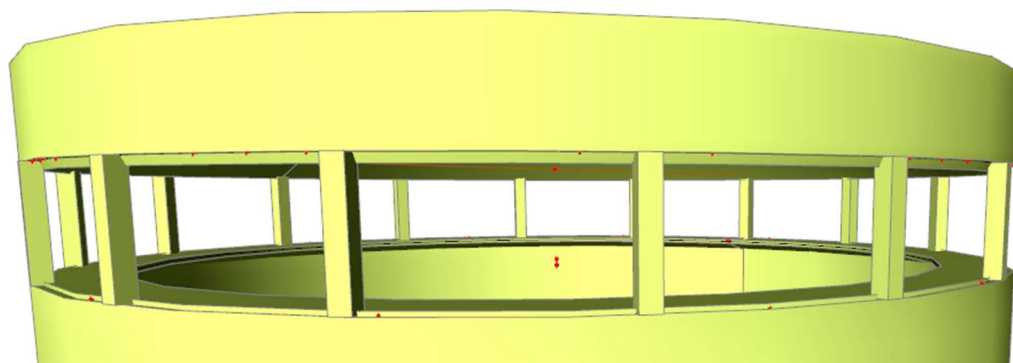
Obr. 36: Model dříku s balkóny, otvory a ochozem

Přesnější geometrické modelování dříku však umožnilo vyhodnotit jeho vliv na výše navazující konstrukci zastřešení. Dle modelu bylo zjištěno, že část dříku vykazuje značnou tuhost (vliv otvorů ani přesná modelace balkónů neměla na výsledky rozhodující vliv). Díky tomuto zjištění bylo možné zanedbat vliv nerovnoměrného sedání základů konstrukce a také se již více nezabývat přesným modelováním všech konstrukcí a vztahů k navazujícím objektům. Založení objektu předpokládá základové pasy pod obvodovými stěnami, které nebudou mít zásadní vliv na chování střešní konstrukce. Z toho důvodu nebyly základy podrobněji navrhovány.

Dále se v práci zabývá výhradně částí konstrukce zastřešení, variantním návrhem nosné konstrukce ve vztahu k prefabrikaci, ale také variantnímu návrhu jednotlivých prvků konstrukce vzhledem k jejímu konstrukčnímu uspořádání.

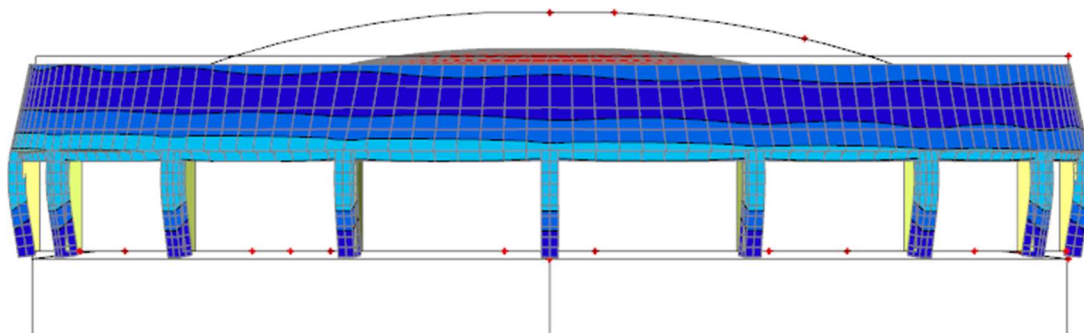
4.2.1 Návrh sloupů

Prvními řešenými prvky společnými pro obě varianty, jsou sloupy propojující dřík s prstencem kruhové kopule. Výška svislých sloupů je 2,5 metru (výškový rozdíl mezi horní hranou dříku a spodní hranou prstencem je 2,5 metru). Jsou navrženy čtvercového průřezu o rozměrech 300 x 300 mm (rozměr 300 mm je shodný s tloušťkami dříku a prstence). Jednotlivé sloupy jsou od sebe vzdáleny cca 4,7 metru (rozměr odpovídá pootočení o 22,5 stupně podle svislé osy). Dle tohoto rozvržení se na konstrukci nachází celkem 16 sloupů – viz Obr. 37.



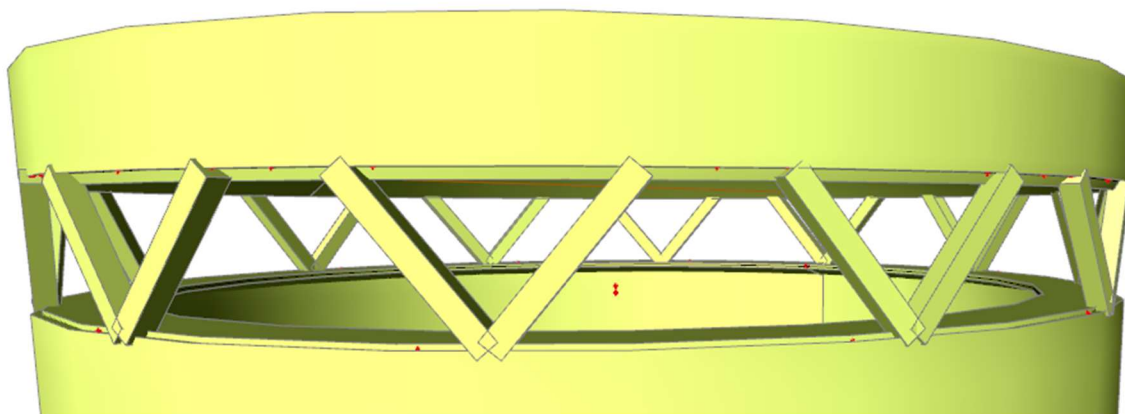
Obr. 37: Rozmístění svislých sloupů po obvodu konstrukce

Ačkoliv vykazoval první návrh slibné výsledky, bylo od něj nakonec upuštěno. Svislé štíhlé sloupy nevykazovaly dostatečnou tuhost v podélném (radiálním) směru – viz Obr. 38. Působení bočního větru či jiného činitele by mohlo výrazně vychýlit horní část konstrukce, což by mohlo vést k poškození či kolapsu konstrukce.

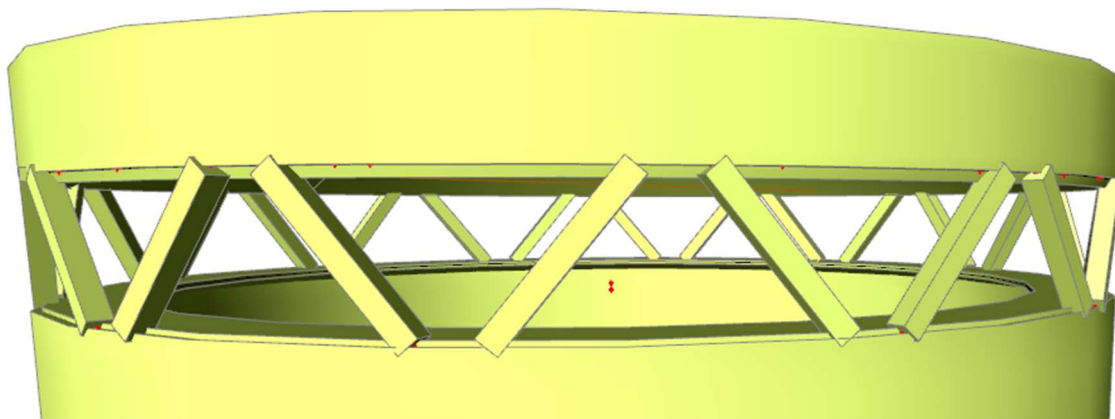


Obr. 38: Deformace svislých sloupů od svislého zatížení

Bylo tedy navrženo řešení v podobě kruhového sloupořadí tvořeného šikmými sloupy (inspirace podpurnými sloupy chladicích věží). Zprvu se jednalo o dvojici sloupů tvaru V s rozestupy 6,25 metru – viz Obr. 39 (paty sloupů svírají na ose konstrukce úhel 30° - viz Výkres tvaru). Nakonec došlo ještě k posunutí levého sloupu z dvojice do tvaru \sphericalangle o 2,1 metru (10 stupňů) – viz Obr. 40. Tato změna byla z důvodu omezení lokálních napjatostí pod patou dvojsloupu tvaru V.

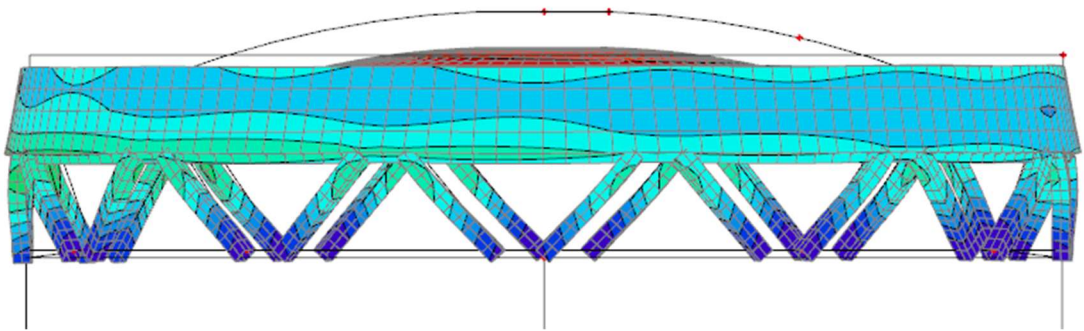


Obr. 39: Sloupy tvaru V



Obr. 40: Sloupy tvaru \sphericalangle

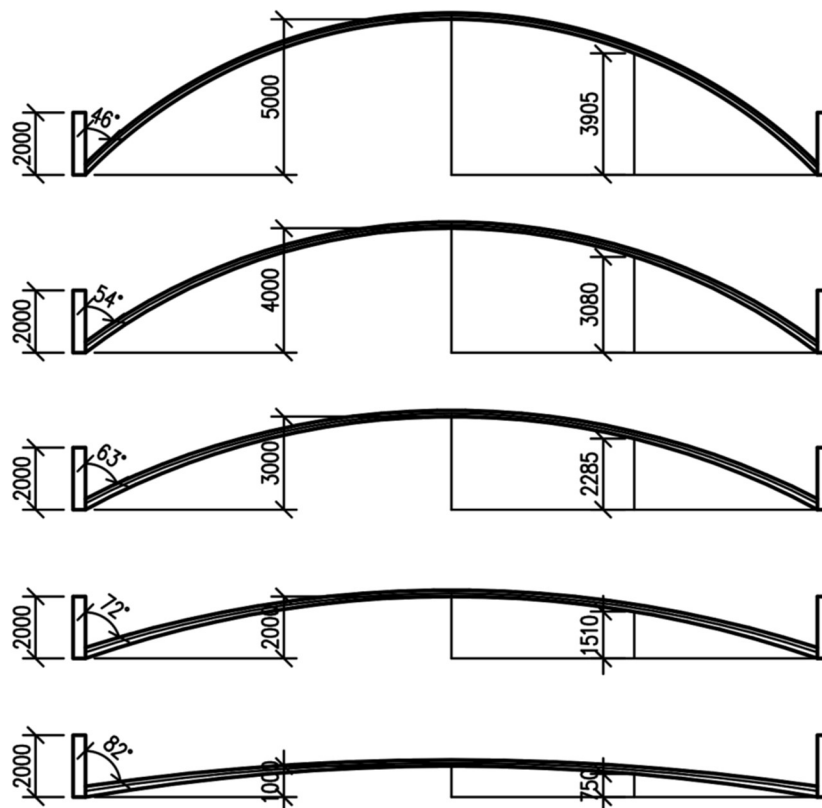
Konečným návrhem jsou dvojice sloupů ukloněné pod úhlem 50 stupňů od vodorovné roviny. Světlá délka jednoho sloupu je 3,26 metru se zachováním původního průřezu 300 x 300 mm. Takovýchto dvojic se po obvodu konstrukce nachází celkem 12. Výsledkem je konstrukce s menšími rozpory, zhuštěnou dispozicí, ale s vyšší tuhostí a menším lokálním namáháním v oblastech styku sloupů a dřívku, resp. prstence – viz Obr. 41.



Obr. 41: Pružná deformace šikmých sloupů od svislého zatížení

4.2.2 Návrh vzepětí kruhové kupole

Dalším důležitým parametrem byla volba vhodného vzepětí (výšky) kupole. K řešení této problematiky se již běžně nepoužívají žádné empirické vztahy. Pro výběr vhodného vzepětí byla vytvořena série kruhových kupolí vzepětí 1 až 5 metrů (poloměru 12 metrů), které byly následně vymodelovány v programu SCIA Engineer – viz Obr. 42.

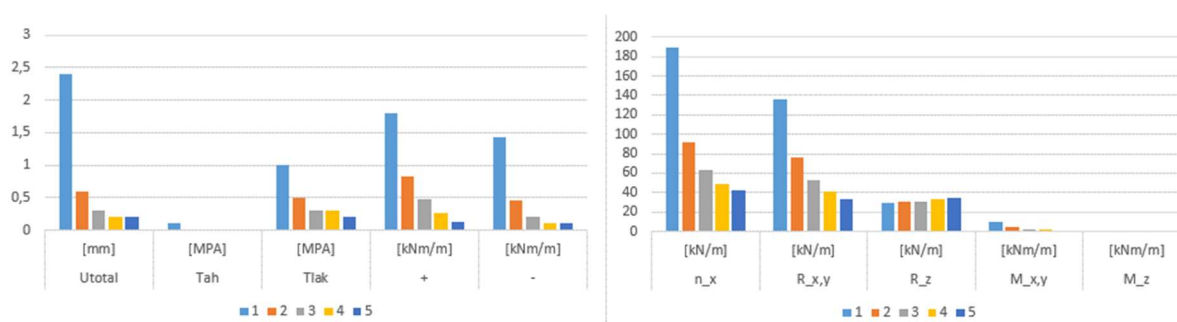


Obr. 42: Kupole vzepětí 1 až 5 metrů

Výsledné průhyby, napjatosti, hodnoty momentů i dalších vnitřních sil jsou uvedeny v Tabulce 1. Grafické porovnání namáhání jednotlivých variant je patrné z Obr. 43.

Bez zatížení - pouze vlastní tíha										
Vzepětí	Utotal	Napětí		Moment		n_x	R_x,y	R_z	M_x,y	M_z
		Tah	Tlak	+	-					
[m]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[kNm/m]	[kNm/m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]	[kNm/m]	[kNm/m]
1	2,4	0,1	1	1,8	1,43	189,16	136,63	29,63	9,79	0
2	0,6	0	0,5	0,82	0,45	92,14	75,75	30,24	4,45	0
3	0,3	0	0,3	0,47	0,21	62,62	53,01	31,26	2,57	0
4	0,2	0	0,3	0,27	0,11	49,28	41,06	32,69	1,5	0
5	0,2	0	0,2	0,12	0,1	42,04	33,45	34,55	0,72	0

Tabulka 1: Průhyby, napjatosti a síly dle vzepětí konstrukce



Obr. 43: Grafy hodnot z tabulky 1

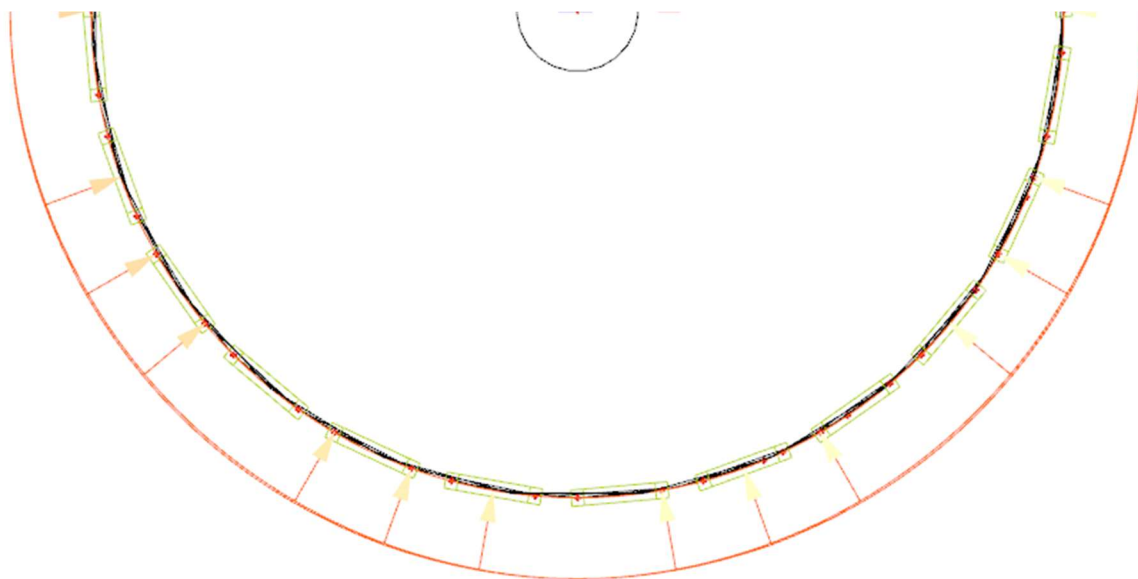
Z hodnot jednoznačně vychází, že vzepětí 1 metr je výrazně nevýhodné (konstrukce byla i opticky příliš plochá – desková). Hodnota průhybu byla téměř čtyřnásobná oproti hodnotě při vzepětí 2 m. Zbylé hodnoty vykazovaly směrem k vyššímu vzepětí lepší (příhodnější) hodnoty, ale nebyly mezi nimi již tak velké rozdíly jako mezi vzepětími 1 a 2 metry.

Po zvážení vícero hledisek (optický tvar konstrukce, výška nad prstencem, poměrný průběh hodnot dle grafů) bylo pro konstrukci nakonec vybráno vzepětí 4 metry. S tímto vzepětím je dále uvažováno ve všech výpočetních modelech pro variantu monolitickou i prefabrikovanou.

4.2.3 Návrh prstence kruhové klenby

Posledním řešeným prvkem je konstrukce prstence. Jedná se opět o válcovou plochu shodného poloměru jako dřík (12 metrů). Zvolený průřez prvku je 2000 x 300 mm. Hlavní funkcí prstence je zachycení vodorovných sil od kruhové klenby, zároveň však napomáhá rovnoměrnému roznosu sil do šikmých sloupů.

Kvůli výrazným vodorovným silám byla zvažována možnost vnesení předpětí do konstrukce pomocí lan dodatečně předpjatých kabelů. V modelu nebyly vyneseny jednotlivé pruty (kabely), předpětí bylo modelováno pouze jako centricky působící zatížení na konstrukci – viz Obr.44.



Obr. 44: Síla vyvozená předpětím na prstenec

Po vnesení všech zatížení (kap 4.3) bylo zjištěno, že předpětí sice velmi pozitivně pomáhá s průběhy vnitřních sil, ale jeho přítomnost není nezbytně nutná. Další faktorem hovořícím v neprospěch předpětí jsou výrazné ztráty způsobené tvarem konstrukce. Např. pouze ztráta třením dosahuje, při rozdělení předpětí na 3 úseky, hodnot 25 – 40% z předpínací síly (v závislosti na způsobu předpínání - z jednoho konce/z obou konců).

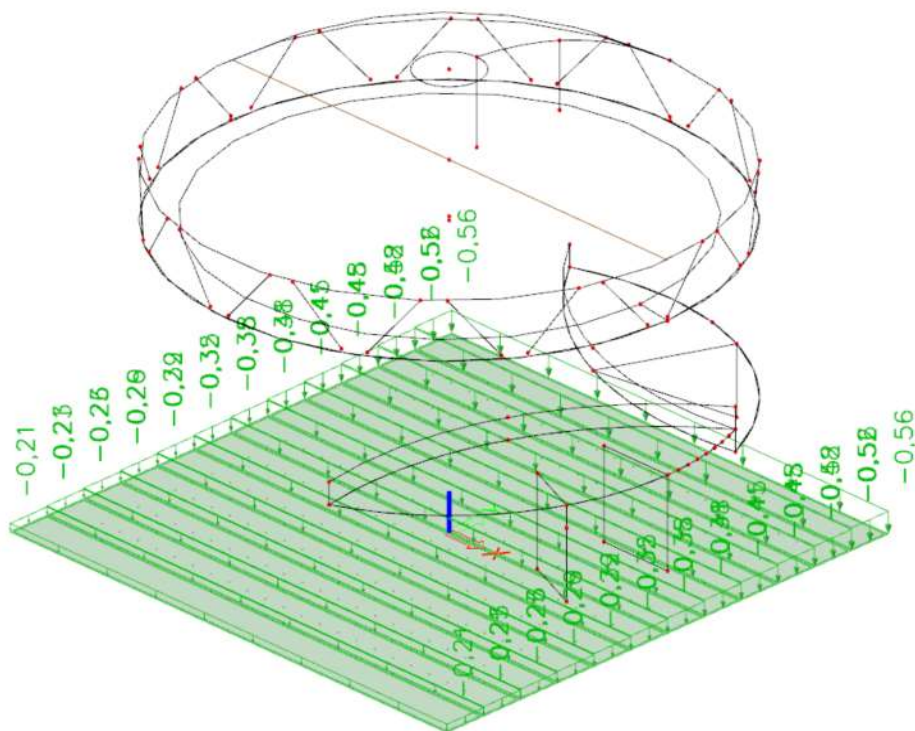
Dalším negativem předpjeté varianty je vyšší technologická náročnost spojená s nutností zaměřit se na oblast kotevních prvků. V návrhu by muselo být uvažováno s lokálním rozšířením konstrukce pro umístění předpínací kotvy, posouzení podkotevních oblastí a také s řešením problematiky postupného předpínání konstrukce.

4.3 ZATÍŽENÍ MODELU KONSTRUKCE

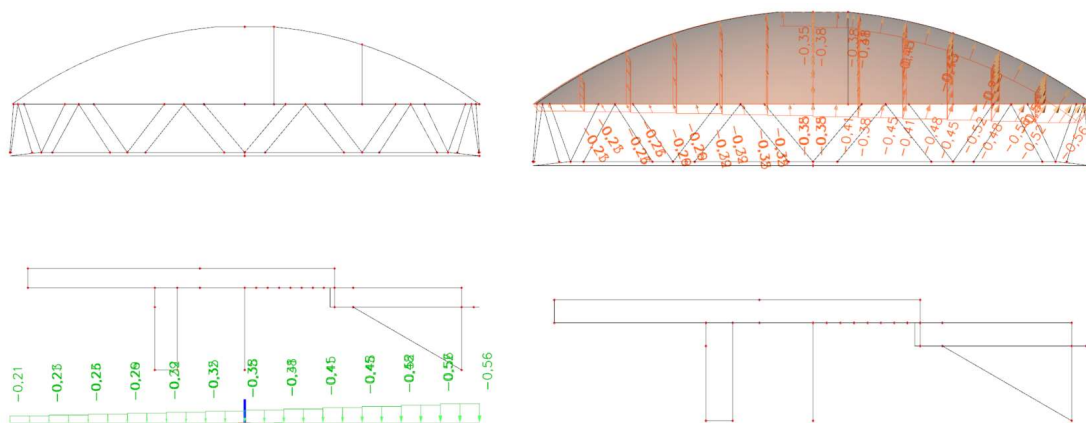
Pro modelování zatížení konstrukce bylo v programu SCIA Engineer vytvořeno celkem 10 různých zatěžovacích stavů. Kromě automaticky generovaného stálého zatížení (zatížení hmotou modelované konstrukce) byly všechny ostatní zatížení zadávány ručně. Program SCIA Engineer sice disponuje funkcí 3D generace zatížení sněhem a větrem, ale ten funguje pouze pro „běžné“ rovinné konstrukce. Pro konstrukce rotačních skořepin nemohl být tento pomocný nástroj použit.

Na konstrukci jsou modelovány síly od užitého a stálého zatížení [2.1] a od zatížení klimatického (působení sněhu [2.2], větru [2.3] a teploty [2.4]). Účinek smršťování konstrukce je do modelu vnesen jako fiktivní zatížení změnou teploty - viz. statický výpočet. Vzhledem ke značné symetrii konstrukce bylo zatížení větrem modelováno pouze v jednom působícím směru. Zatížení sněhem bylo modelováno ve dvou zatěžovacích stavech, jako sníh navátý a nenavátý.

Zatížení sněhem a větrem nemohla být kvůli tvaru konstrukce zadávána na konstrukci přímo. Působení bylo modelováno jako průmět sil do vybrané roviny (vztažené k vybrané ose konstrukce – viz Obr. 45), která byla následně programem přepočítána na vybrané prvky konstrukce. Díky této metodě je možné dosáhnout rozložení působících sil na vybrané prvky, a to jak dle globální souřadnicové soustavy (GSS), např. pro zatížení sněhem, tak také dle lokálních souřadnicových soustav jednotlivých prvků (LSS), např. pro zatížení větrem – viz Obr. 46.



Obr. 45: Zatížení kupole větrem – zatížení v rovině XY

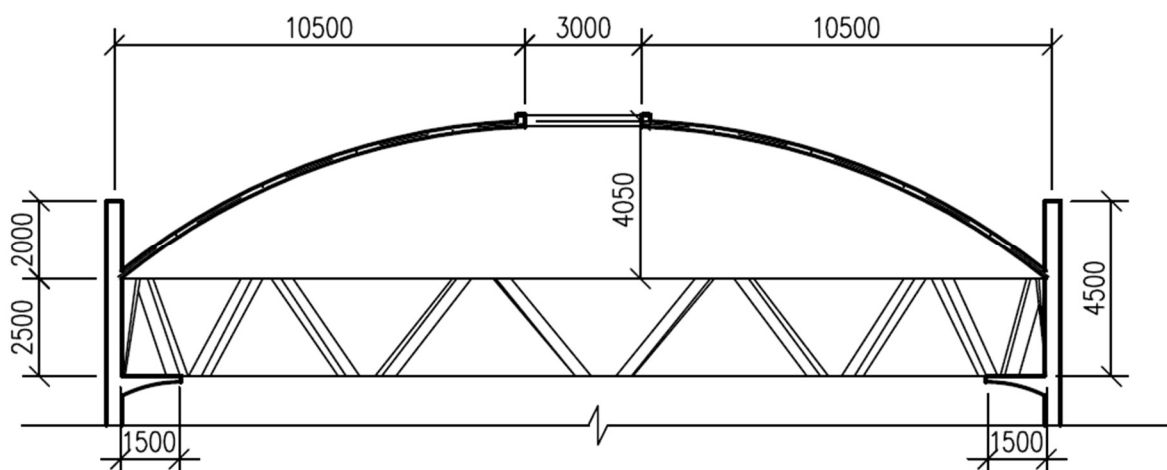


Obr. 46: Převod sil z roviny XY (zeleně) na kupoli dle lokálního souřadného systému (oranžově)

4.4 VARIANTA Č. 1 – MONOLITICKÁ KOPULE

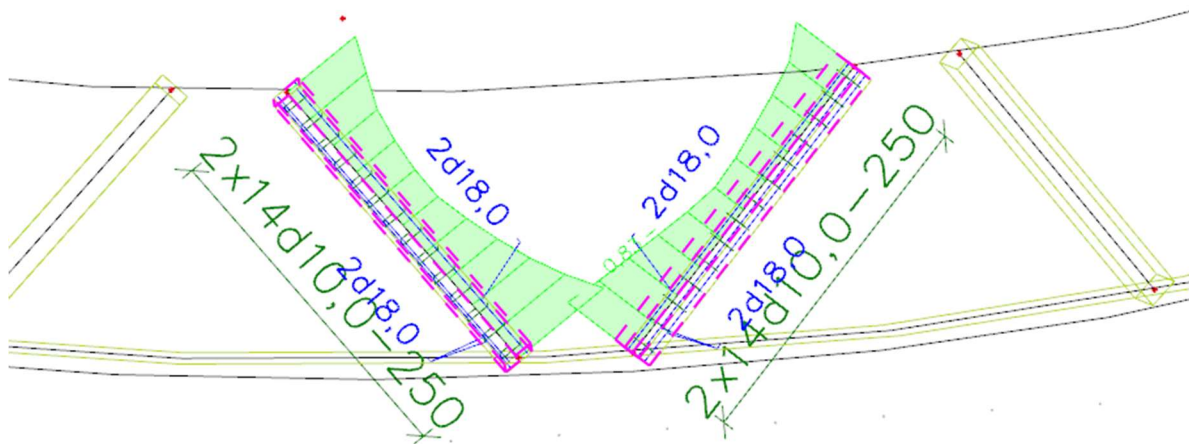
Po vytvoření finálního modelu (tvar sloupů, nadvýšení kopule, nutnost předpětí prstence) dle kapitoly 4.2 a po vnesení vnějších zatížení dle kapitoly 4.3 se práce zaměřuje na použitou technologii výroby. První variantou je čistě monolitická konstrukce, zatímco druhá se zaměřuje na fenomén prefabrikace prvků a na jejich využití v co nejvyšším měřítku.

První variantou je čistě monolitická konstrukce z betonu C30/37. Konstrukce zastřešení se v tomto případě skládá z kopule konstantní tloušťky 150 mm s vnějším poloměrem 12 metrů, poloměrem vnitřního otvoru 1,5 metru a s celkovou výškou (nadvýšením) 4 metry – viz Obr. 47. Kupole je po obvodu olemována prstencem shodného poloměru (12 metrů) o tloušťce 300 mm a výšce 2000 mm. Prstenec je po obvodu podporován 12 dvojicemi sloupů, které přenášejí zatížení do konstrukce dřívku.



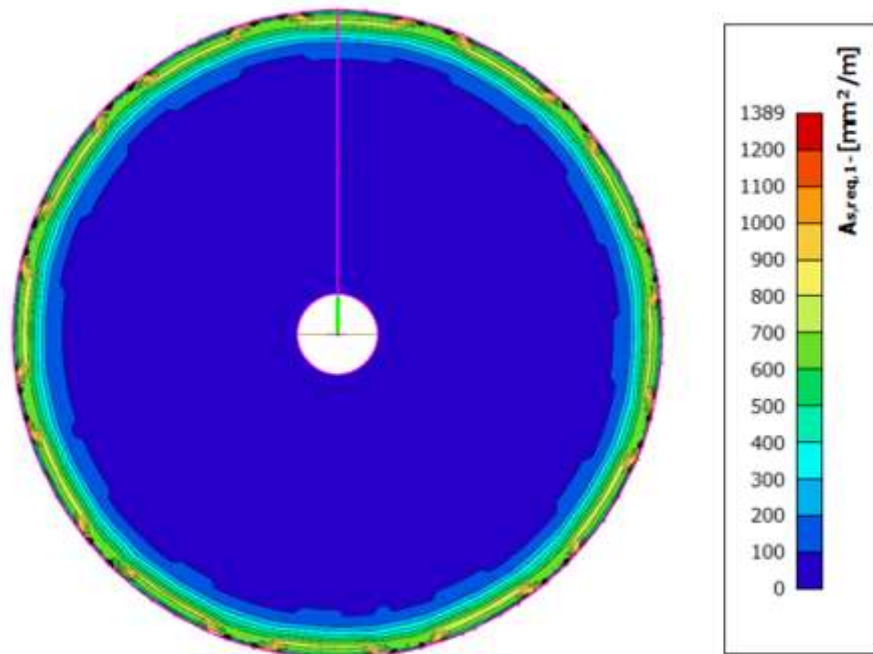
Obr. 47: Řez kopule – monolitická varianta

Po zatížení konstrukce dle kombinací zatěžovacích stavů 6.10a a 6.10b (viz statický výpočet) byl proveden návrh vyztužení jednotlivých prvků konstrukce. Sloupy byly navrženy i posouzeny celkově dle programu SCIA Engineer modulem pro návrh betonových prvků (SCIA Concrete Section) – viz Obr. 48.



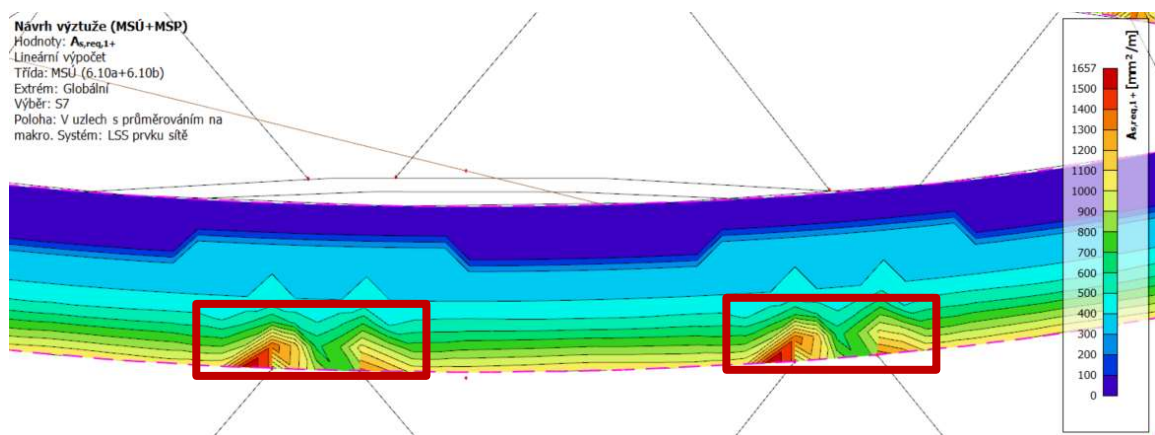
Obr. 48: Posouzení sloupů – SCIA Concrete Section

Pro návrh zbylých konstrukcí (kopule a prstence) byly použity potřebné plochy výztuže také dle programu SCIA Engineer. Program umožňuje vykreslit hodnotu požadované plochy výztuže dle povrchu (horní, spodní) a dle směrů výztuže (výztuž uvažována v kolmém rastru) – viz Obr. 49.



Obr. 49: Požadovaná plocha výztuže pro spodní povrch (-) a první/hlavní vrstvu výztuže (1)

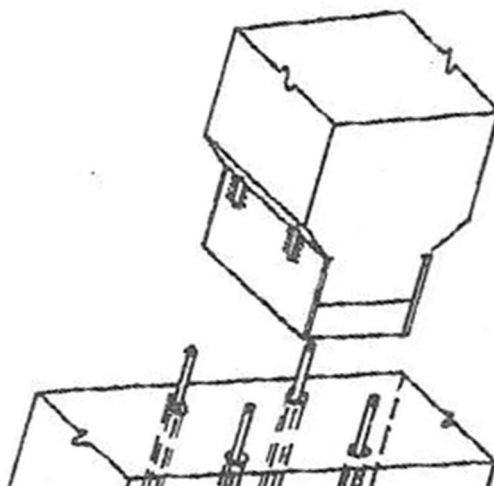
Při návrhu výztuže bylo přihlédnuto k problematice propojení jednotlivých druhů prvků konstrukce ve 3D modelu. Model kombinuje 2D plošné prvky (rotační skořepiny) a 1D dílce (sloupy). Bodové propojení sloupů a skořepin generuje nereálně vysoké napětí v místě styků. V těchto místech je pak požadována nereálně vysoká hodnota požadované výztuže – viz Obr. 50. Klasické využití průměrovacích pásů pro tyto body není možné z důvodu zakřivené plochy konstrukce. Redukce těchto vysokých hodnot (špiček) je prováděna ručně, požadovaná plocha výztuže je brána až ve vzdálenosti přibližně tloušťky prstence od těchto „problematických“ bodů.



Obr. 50: Požadovaná plocha výztuže – problematické styky sloupů a skořepiny označeny červeně

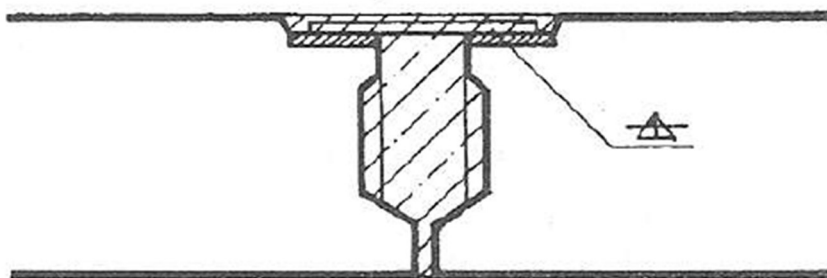
4.5 VARIANTA Č. 2 – PREFABRIKOVANÁ KOPULE

Druhá varianta se zaměřuje na možnosti efektivní prefabrikace jednotlivých prvků konstrukce. U sloupů by se, vzhledem k jejich tvaru a opakovatelnosti (všechny sloupy jsou stejné tvarem i výztuží), dalo k efektivní prefabrikaci přistoupit již u varianty první, monolitické. Ušetřila by se problematika bednění šikmých sloupů a došlo by k urychlení a zjednodušení postupu výstavby. Možným napojením sloupů na monolitický dřík je např. přivaření výztuže vyčnívající z dříku k ocelové botce v patě sloupu – viz Obr. 51.



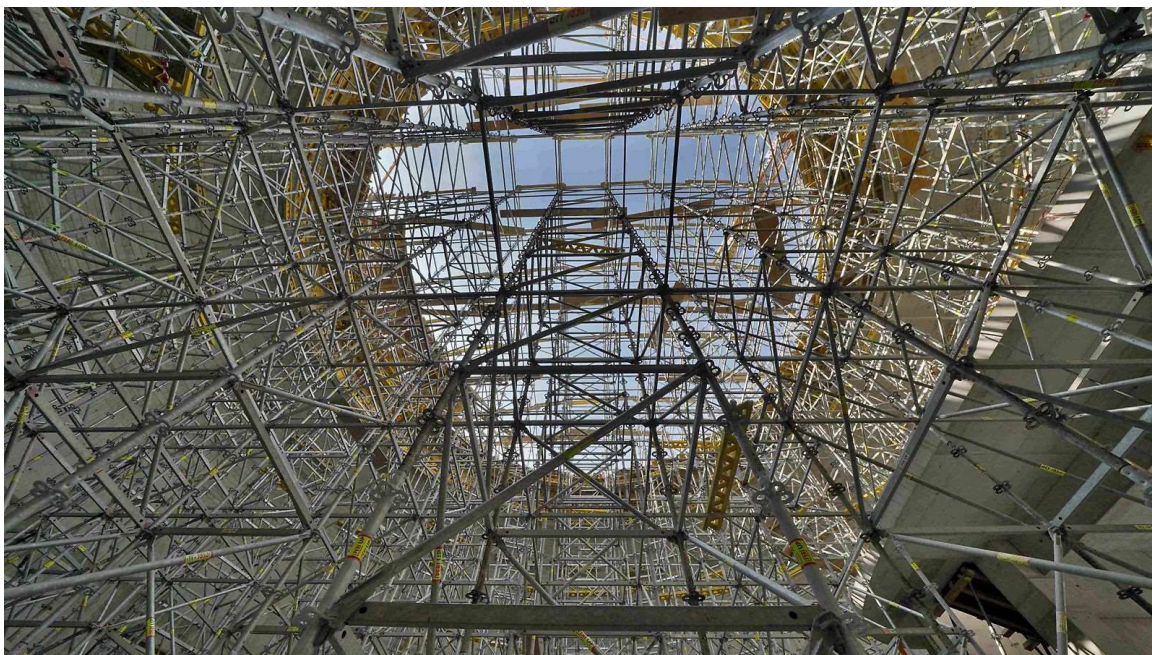
Obr. 51: Možný detail napojení sloupu na monolitický spodek [9]

Konstrukce prstence je proti tomu konstrukcí působící v tahu. Vzhledem k jeho značným rozměrům (poloměr 12 metrů) by muselo dojít na rozdělení na několik menších částí. Hlavním problémem by v tomto případě bylo spolehlivé (tuhé) spojení jednotlivých dílců prstence. Předpokládaným řešením by bylo propojení jednotlivých dílců dodatečně injektovanou „kapsou“ s provařenou výztuží na vnějším povrchu prstence s případným propojením pomocí dodatečně předepnuté výztuže – viz Obr. 52. Problematika propojení jednotlivých dílců prstence není v práci dále více řešena.



Obr. 52: Možný detail propojení jednotlivých dílců prstence [9]

Hlavní pozornost je v tomto případě upřena na možnost prefabrikace kopule. Výhodou prefabrikace tohoto konstrukčního prvku je omezení mokrého procesu na stavbě a s tím spjatého celoplošného oboustranného bednění užitého při betonáži monolitické varianty – viz Obr. 53.



Obr. 53: Nevýhoda potřeby celoplošného bednění pro monolitickou variantu kupole [39]

Plošný prefabrikát střešní kupole:

Prefabrikovaná varianta uvažuje rozdělení kopule na jednotlivé dílce a vnitřní tlačení prstencem. Velký důraz byl kladen na efektivní rozdělení kupole a s tím spjaté parametry jednotlivých dílců. Hodnotícími parametry byla opakovatelnost (počet) dílců, hmotnost a vnější rozměry dílce (pro hledisko dopravy) a velikost styčných ploch mezi dílcem a vnitřním prstencem.

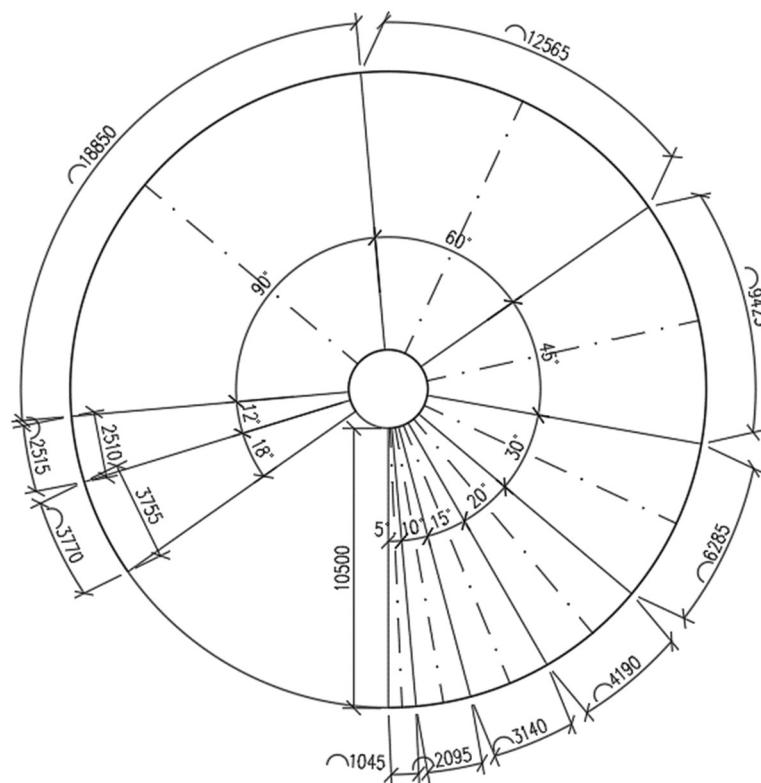
Pro rozdělení kupole byly užity stupňové výšky dávající celočíselný počet dílců na celou konstrukci kupole – viz Tabulka 2.

Dělení dle stupňů	Počet kusů	Poloměr		Délka tětivy	Pro jednotlivý dílec		
		Vnitřní	Vnější		Plocha	Objem	Hmotnost
[°]	[ks]	[m]	[m]	[m]	[m ²]	[m ³]	[t]
5	72	0,1	1,0	1,0	6,71	0,81	2,09
10	36	0,3	2,1	2,1	13,42	1,61	4,19
12	30	0,3	2,5	2,5	16,10	1,93	5,02
15	24	0,4	3,1	3,1	20,13	2,42	6,28
18	20	0,5	3,8	3,8	24,15	2,90	7,54
20	18	0,5	4,2	4,2	26,84	3,22	8,37
22,5	16	0,6	4,7	4,7	30,19	3,62	9,42
30	12	0,8	6,3	6,2	40,26	4,83	12,56
45	8	1,2	9,4	9,2	60,38	7,25	18,84
60	6	1,6	12,6	12,0	80,51	9,66	25,12
90	4	2,4	18,8	17,0	120,77	14,49	37,68
360	1	9,4	75,4	0,0	483,07	57,97	150,72

Tabulka 2: Parametry dílců po rozdělení na stupňové výšky

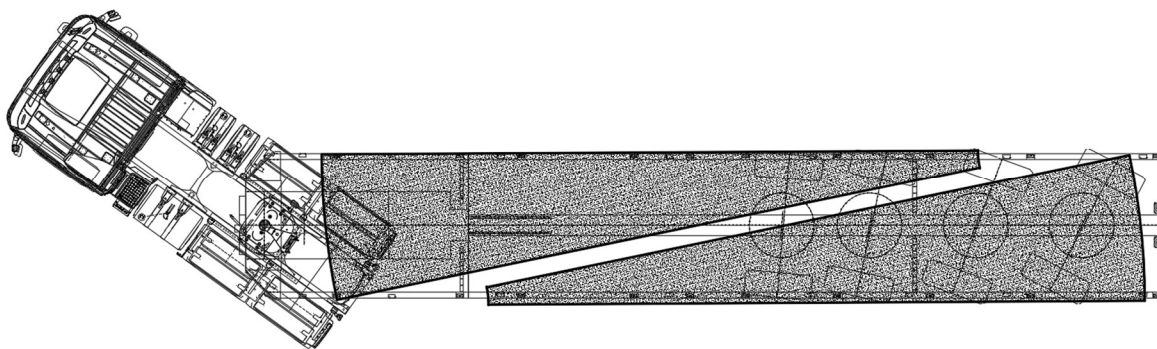
Prvotní návrh uvažoval s rozdělením kopule dle hodnot kolem 20° (v Tabulce 2 žlutě). Tyto prvky zaručovaly dostatečnou (efektivní) opakovatelnost a velikost styčné plochy mezi dílci a prstencem dostatečnou pro návrh vyztužení. Nevýhodou tohoto rozdělení se stala šířka přepravované konstrukce (v tabulce jako délka tětivy). Dílce šíře 4,2 metru vyžadují zvýšené nároky na dopravu (nadměrná přeprava), což by mohlo, v případě stavby umístěné uprostřed sídliště s úzkými uličkami, vést k logistickým problémům. Ze stejného důvodu nejsou reálné ani varianty s větším vrcholovým úhlem.

Druhý konec intervalu (dílce s vrcholovým úhlem 5° nebo 10°) zaručuje dílce užší se sníženými nároky na dopravu. Výhodou je také jejich nižší hmotnost a s tím spjatá potřeba menšího jeřábu pro manipulaci s prvky. Hlavní nevýhodou je zmenšení styčné plochy mezi dílcem a vnitřním prstencem, která u hodnot jednotek stupňů neumožňuje řádné vyztužení.



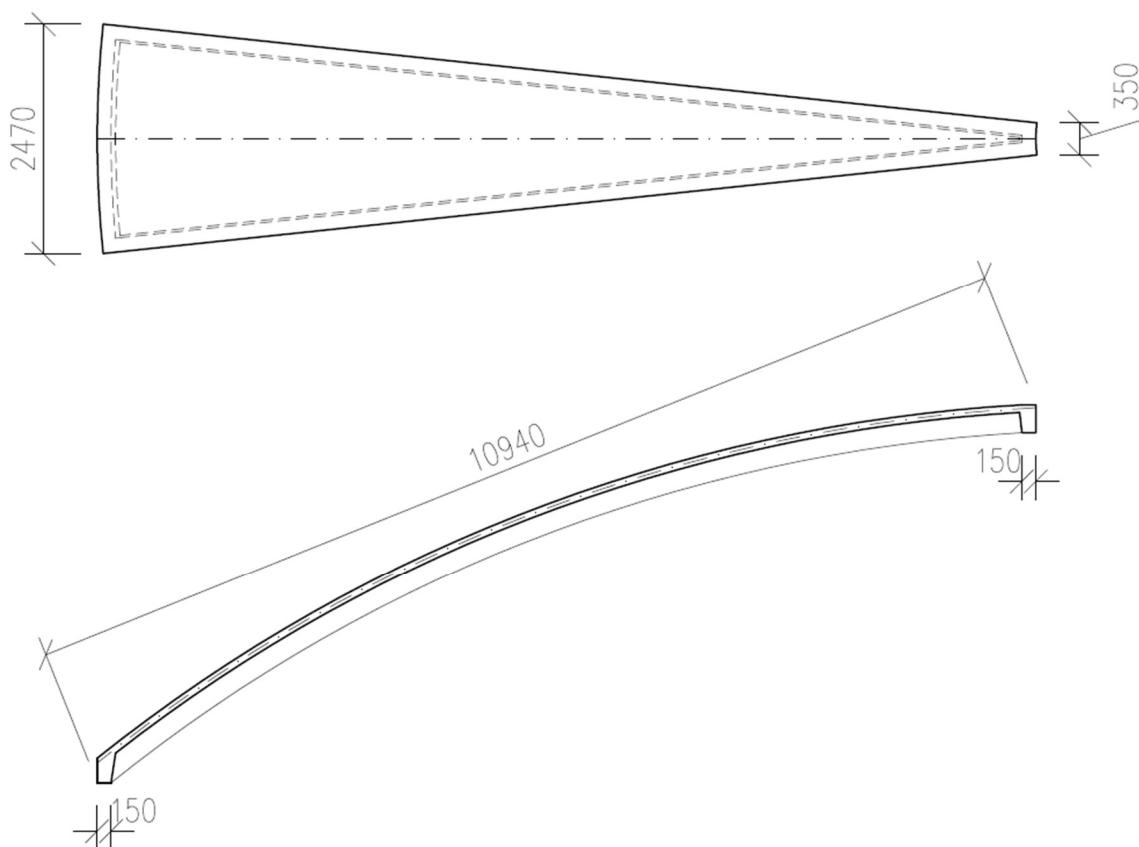
Obr. 54: Varianty rozdělení kopule na dílce dle stupňů

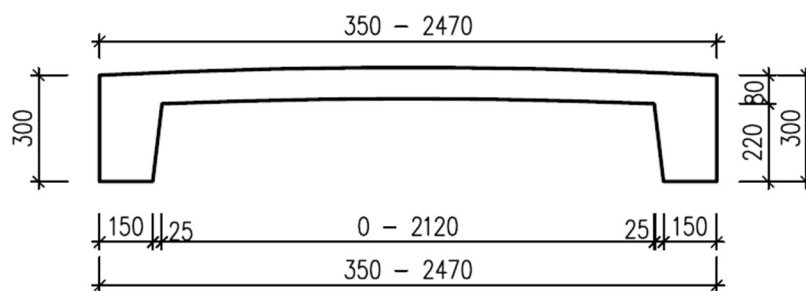
Jako optimální návrh bylo vybráno rozdělení na 30 stejných kusů s vrcholovým úhlem 12° (v Tabulce 2 vyznačeno zeleně). Zmenšení výseku na 12° mělo za následek snížení hmotnosti na 4190 kg a vnější maximální rozměry na 11,5 x 2,5 m. Pro přepravu prvků již není uvažováno s nadměrnou přepravou a předpokládá se přeprava dvou kusů na jeden nákladní automobil – viz Obr. 55. Celkové zmenšení rozměrů dílce má za následek zmenšení styčné plochy mezi dílcem a vnitřním prstencem (šíře v oblasti styku cca 0,35m). Této oblasti je při návrhu věnována zvýšená pozornost.



Obr. 55: Předpokládané umístění dvou kusů dílců na jeden nákladní automobil

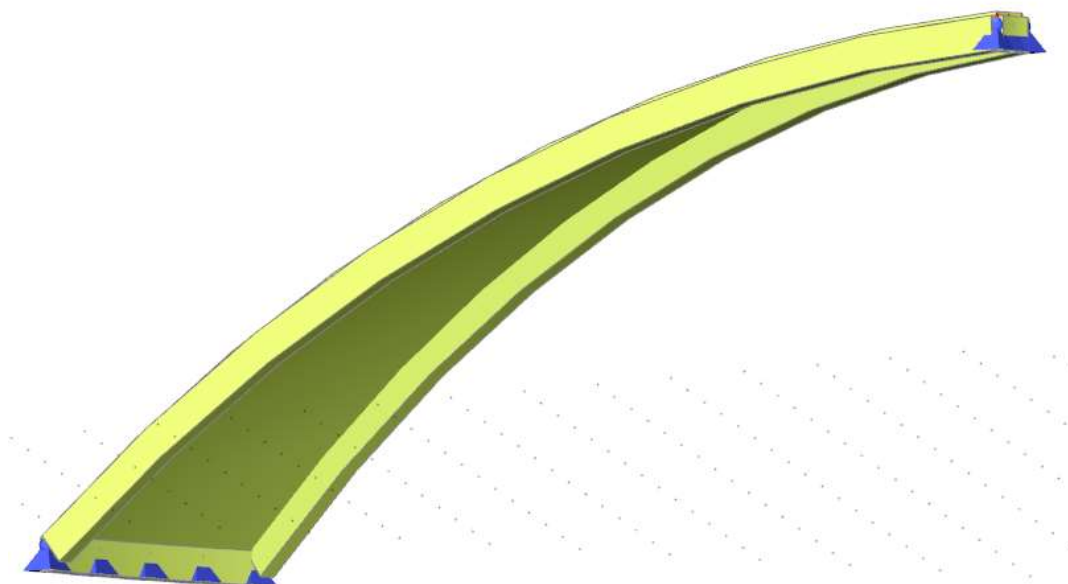
Kvůli jinému chování konstrukce a jednotlivých dílců není pro návrh a posouzení dílců použitý celkový 3D model. Návrh je zaměřen na jeden typický dílec střešního prefabrikátu, který se dokola opakuje po celé konstrukci. S tím je spjatá potřeba jiného průřezu prvku, který musí odolávat více návrhovým situacím (výroba, manipulace s prvkem, umístění na stavbě, působení ve finální konstrukci).





Obr. 56: Půdorys a řezy střešním prefabrikátem

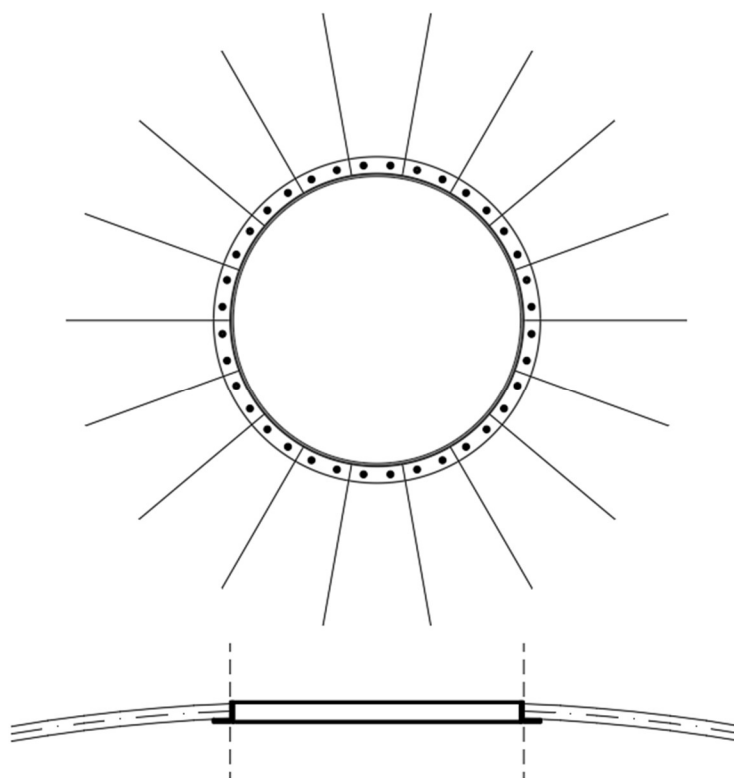
Na základě statických požadavků je navržen dílec tloušťky 80 mm z betonu C50/60 po obvodu lemovaný kónickými žebry výšky 300 mm a šířky při spodním okraji 150 mm – viz Obr. 56. Pro návrh a posouzení výztuže desky a žebek byl samostatný 3D model – viz Obr. 57.



Obr. 57: 3D model typického dílce střešního prefabrikátu

Vnitřní prstenec:

Dalším řešeným prvkem je **vnitřní tlačný prstenec** a způsob propojení mezi ním a prvky kupole. Tento prvek byl zprvu uvažován jako ocelový úhelník propojený s jednotlivými střešními prefabrikáty pomocí šroubovaných spojů – viz Obr. 58. Tento úhelník by ležel na stavbě na vrchu věžového lešení, v místě svého trvalého umístění. Jednotlivé dílce by pak byly pokládány na ozub vnějšího prstence a na připravené trny na vnitřním prstenci.



Obr. 58: Vnitřní ocelový prstenec a schéma propojení s jednotlivými dílci

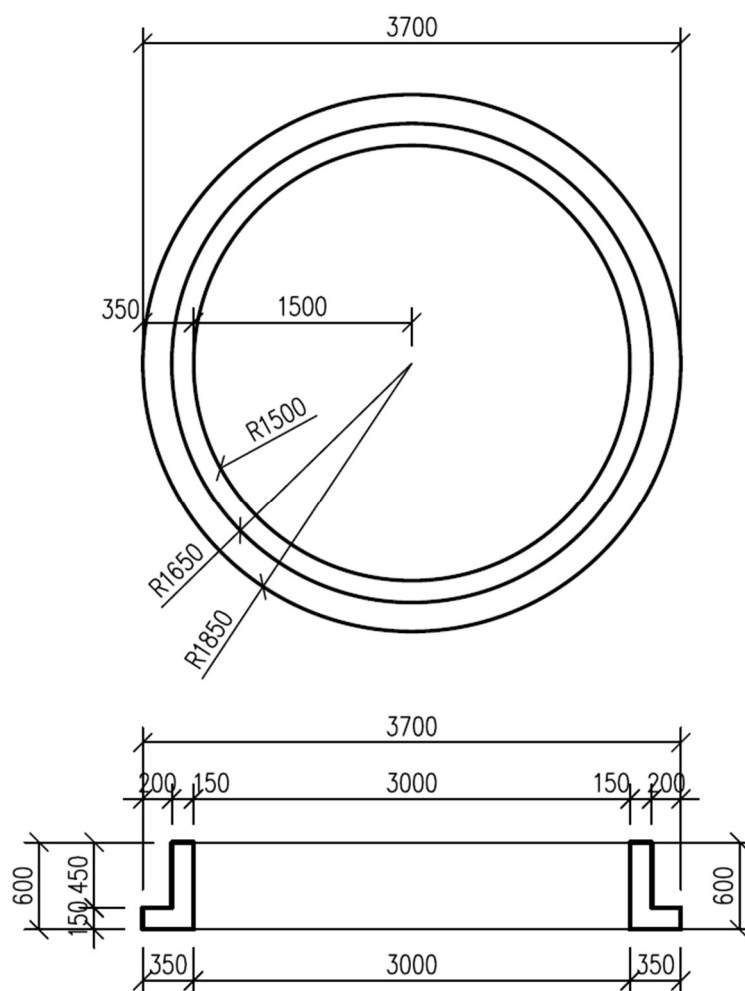
Výhodou ocelového prvku je jeho výrazně nižší než hmotnost prvku betonového – viz. Obr 59. Oproti tomu jeho hlavní nevýhodou je nízká požární odolnost, která nakonec vedla k upřednostnění prstence betonového prefabrikovaného.

Materiál	Poloměr		Pro jednotlivý dílec		
	Vnitřní	Vnější	Tloušťka	Objem	Hmotnost
[-]	[m]	[m]	[mm]	[m ³]	[t]
Ocel	1,50	1,85	150	1,221	3,051
Beton	1,50	1,72	20	0,154	1,213

Tabulka 3: Parametry ocelového a betonového prstence

Prstenec je navržen průřezu L, výšky 600 mm, šířky 350 mm a tloušťky 150 mm. Poloměr vnitřního líce prstence kopíruje rozměr otvoru monolitické varianty (R1500) – viz Obr. 59. Zprvu bylo uvažováno rozdělení prstence na 2 kusy. Dělený prstenec by se lépe přepravoval, ale vyžadoval by náročnější návrh propojení, které by v konečném hledisku nemělo ani takovou tuhost (jako jednokusová varianta). Proto byla upřednostněna varianta jednokusového prefabrikátu.

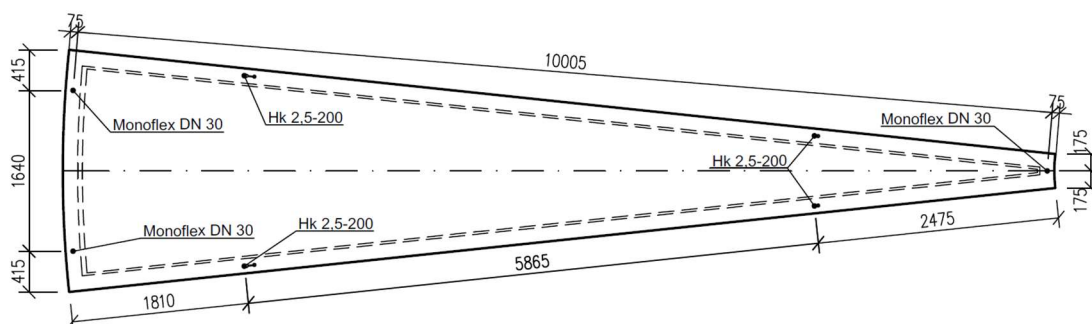
Prefabrikát bude manipulován pomocí třech hřebíkových kotev se závitem Kontakt SK Hk 2,5-200. Dále bude obsahovat 30 děrovaných objímek Kontakt SK Rd 12x43, pro umístění závitových tyčí pro propojení se střešními prefabrikáty.



Obr. 59: Tvar vnitřního prstence

Propojení střešních prefabrikátů a prstenců:

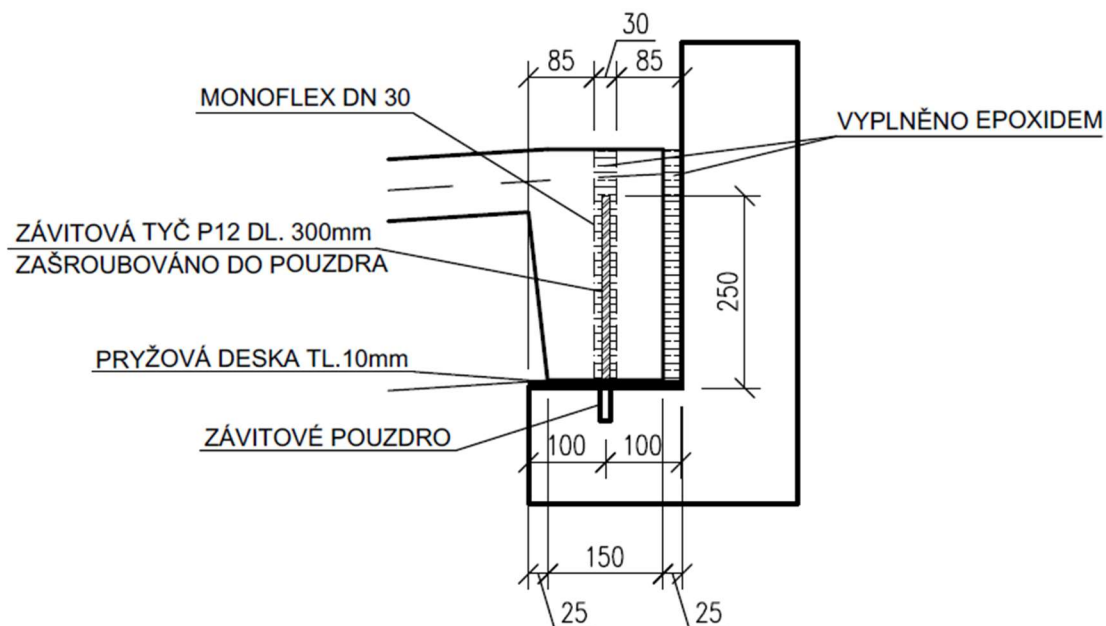
Každý střešní prefabrikát bude opatřen 3 otvory (1 na straně vnitřního prstence, 2 na straně vnějšího prstence) vytvořen zabetonovanými trubkami Monoflex DN 30 – viz Obr. 60.



Obr. 60: Zabetonované prvky střešního prefabrikátu

Jednotlivé dílce budou na stavbě osazeny na pryžové desky umístěné na konzolách vnějšího a vnitřního prstence, otvory na připravené závitové tyče – viz Obr. 59. Po osazení všech střešních

prefabrikátů bude otvor se závitovou tyčí a prostor mezi prstencem a střešními prefabrikáty zalit zálevkovou hmotou (epoxidem) – viz Obr. 61. Po zalití dojde k vyššímu propojení mezi prvky konstrukce a zaručí spoji přenos malých momentových sil, které mohou v dílcích vznikat.



Obr. 61: Schéma spoje střešního prefabrikátu a vnitřního prstence

4.6 POROVNÁNÍ VARIANT

Obě varianty se nakonec ukázaly jako proveditelné, i když každá skýtá se své výhody a nevýhody.

První konstrukční varianta byla navržena jako monolitická osově symetrická kopule. Výhodou této konstrukční varianty je spolupůsobení jednotlivých prvků konstrukce vlivem monolitické technologie. Nevýhodou je potřeba celoplošného oboustranného bednění, mokrý proces na stavbě a delší zrání betonové kopule.

Druhou konstrukční variantu představuje sestava prefabrikovaných střešních prefabrikátů a vnitřního prefabrikovaného prstence. Výhodou této varianty je hlavně možnost prefabrikace prvků. S tím je spjatá možnost užití betonů vyšší pevnosti, vyšší technologická kázeň při výrobě a výroba prvků v předstihu. Dovezené vyzrálé prvky je možné sestavit v kratším čase bez potřeby masivního celoplošného bednění a s omezením mokrého procesu. Nevýhodou je složitější transport prvků na stavbu a nižší tuhost spojů mezi prvky.

5 ZÁVĚR

V rámci rešeršní části práce byly představeny vybrané sakrální betonové stavby. Cílem bylo představit vliv užití betonu na architektonické, technické a konstrukční možnosti jednotlivých staveb. Rešerše dále pokračovala základním úvodem do problematiky skořepinových konstrukcí a dělením skořepin dle tvarových a výpočtových uspořádání.

Technologie železobetonu není pro sakrální stavby v dnešní době ničím novým. S nástupem této technologie došlo k rozvolnění architektonického i konstrukčního potenciálu staveb. Tvarová volnost, subtilnější konstrukce a možnost nevídaných rozponů přispěla k výstavbě ohromujících staveb, o kterých nemohlo být dříve ani uvažováno. Důležitým parametrem je tvar konstrukce a její subtilita. Při návrhu „správného“ tvaru konstrukce lze dosáhnout působení výrazně tlačného a využít tak maximálního potenciálu betonu, a to pevnosti v tlaku.

V rámci konstrukční části práce byl proveden postupný variantní návrh prvků konstrukce následovaný 2 konstrukčními variantami zastřešení vybraného kostela. Obě konstrukční varianty jsou navrženy jako betonové, liší se statickým působením a užitou technologií. Návrh a výpočty byly prováděny pomocí statických softwarů (verze dostupné pro studenty) a pomocí vlastnoručně vyrobených výpočetních programů.

První konstrukční varianta byla navržena jako monolitická osově symetrická kopule. Výhodou této konstrukční varianty je spolupůsobení jednotlivých prvků konstrukce vlivem monolitické technologie. Nevýhodou je potřeba celoplošného oboustranného bednění, mokrého procesu na stavbě a delší zrání betonové kopule.

Druhou konstrukční variantu představuje sestava prefabrikovaných střešních prefabrikátů a vnitřního prefabrikovaného prstence. Výhodou této varianty je hlavně možnost prefabrikace prvků. S tím je spjatá možnost užití betonů vyšší pevnosti, vyšší technologická kázeň při výrobě a výroba prvků v předstihu. Dovezené vyzrálé prvky je možné sestavit v kratším čase bez potřeby masivního celoplošného bednění a s omezením mokrého procesu. Nevýhodou je složitější transport prvků na stavbu a nižší tuhost spojů mezi prvky.

Jednotlivé konstrukční varianty mají své přednosti a úskalí. Návrh jednotlivých prvků není zdaleka konečný, dále by se dalo pokračovat v optimalizaci jednotlivých konstrukčních variant, což by mělo za následek efektivnější užití konstrukce, snížení hmotnosti a nižší finanční náklady. Výběr konstrukční varianty by záležel zejména na bližších požadavcích investora.

6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

Normy:

- [1] ČSN EN 1990 Zásady navrhování konstrukcí
- [2.1] ČSN EN 1991 – 1 – 1 Zatížení konstrukcí – Obecná zatížení
- [2.2] ČSN EN 1991 – 1 – 3 Zatížení konstrukcí – zatížení sněhem
- [2.3] ČSN EN 1991 – 1 – 4 Zatížení konstrukcí – zatížení větrem
- [2.4] ČSN EN 1991 – 1 – 5 Zatížení konstrukcí – zatížení teplotou
- [3] ČSN EN 1992 – 1 – 1 Navrhování betonových konstrukcí – obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby

Použitá literatura:

- [4] ŠEJNOHA, Jiří a Jitka BITTNAROVÁ. *Skořepiny: doplňkové skriptum*. Praha: ČVUT, 1999. ISBN 978-80-01-01944-3.
- [5] PROCHÁZKA, Jaroslav a Jiří ŠMEJKAL. *Modelování a vyztužování železobetonových konstrukcí*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2020. ISBN 978-80-01-06771-0.
- [6] ŠEJNOHA, Jiří a Jitka BITTNAROVÁ. *Stabilita skořepin: doplňkové skriptum*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. ISBN 80-01-02016-9.
- [7] VALID, Roger. *The nonlinear theory of shells through variational principles: From elementary algebra to differential geometry*. Chichester: Wiley, 1995. ISBN 978-0-471-85484-1.
- [8] PROCHÁZKA, Jaroslav a Jiří ŠMEJKAL. *Betonové stropní a schodiškové konstrukce*. V Praze: České vysoké učení technické, 2017. ISBN 978-80-01-06323-1.
- [9] WITZANY, Jiří. *Konstrukce pozemních staveb 70: prefabrikované konstrukční systémy a části staveb*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 978-80-01-02656-4.
- [10] ZICH, Miloš a Zdeněk BAŽANT. *Montované betonové konstrukce*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2018. ISBN 978-80-7204-983-7.
- [11] Závěrečná práce: Mgr. Jiří Novotný: *Vývoj religiozity v České republice*. Informační systém [online]. Dostupné z: https://is.muni.cz/th/316753/esf_m/
- [12] gridshell – WeWantToLearn.net. WeWantToLearn.net – Diploma Studio 10 at Westminster University School of Architecture [online]. Dostupné z: <https://wewanttorearn.wordpress.com/tag/gridshell/>
- [13] Havel, D. (n.d.). Gaussova Křivost ploch a její vizualizace. 2023, [online]. [cit. 02.01.2023]. Dostupné z: <http://www.davidhavel.wz.cz/uni/gpm/referat/gauss.html>
- [14] Anuloid / [online]. Copyright © [cit. 02.01.2023]. Dostupné z: http://slovak.evlm.stuba.sk/elearning/elearning_files/anuloid.pdf
- [15] L. Vráblík, “Skořepinové konstrukce,” *Betonové konstrukce* 3. http://people.fsv.cvut.cz/~vrabluk/Prednasky/B03CK_2-Skořepinove_konstrukce.pdf.

- [16] archiweb.cz - Bagsværd Community Church. archiweb.cz [online]. Copyright © Archiweb, s.r.o. 1997 [cit. 02.01.2023]. Dostupné z: <https://www.archiweb.cz/en/b/komunitni-kostel-bagsv-rd-bagsv-rd-kirke>
- [17] Arquitectura Viva. (2021, April 29). Bagsværd Church, Copenhagen - jørn utzon . Arquitectura Viva. [online]. Copyright © 2023 [cit. 02.01.2023]. Dostupné z: <https://arquitecturaviva.com/works/iglesia-de-bagsvrd-8>
- [18] archiweb.cz - Kaple Panny Marie Utěšitelky v Le Raincy. archiweb.cz [online]. Copyright © Archiweb, s.r.o. 1997 [cit. 02.01.2023]. Dostupné z: <https://www.archiweb.cz/b/kaple-panny-marie-utesitelky-v-le-raincy-eglise-notre-dame-du-raincy>
- [19] Notre Dame du Raincy by Auguste Perret – New Church Architecture. New Church Architecture – Sacred buildings in the modern world [online]. Dostupné z: <https://newchurcharchitecture.wordpress.com/2014/02/05/notre-dame-du-raincy/>
- [20] Santiago, E. (2019, December 1). Notre-Dame du Raincy and the Great War. University of California Press. [online]. Copyright © 2023 [cit. 02.01.2023]. Dostupné z: <https://online.ucpress.edu/jsah/article/78/4/454/106980/Notre-Dame-du-Raincy-and-the-Great-War>
- [21] Church of the Light | Architectuul. Architectuul. Architects, Architecture - Building Knowledge! [online]. Copyright © 2023 Architectuul [cit. 02.01.2023]. Dostupné z: <https://architectuul.com/architecture/church-of-the-light>
- [22] Shaping the light. Church of Light by Tadao Ando | The Strength of Architecture | From 1998. METALOCUS | Sobre Arquitectura y más | Desde 1998 [online]. Copyright © 2023 [cit. 02.01.2023]. Dostupné z: <https://www.metalocus.es/en/news/shaping-light-church-light-tadao-ando>
- [23] archiweb.cz - Church of Light . archiweb.cz [online]. Copyright © Archiweb, s.r.o. 1997 [cit. 02.01.2023]. Dostupné z: <https://www.archiweb.cz/b/church-of-light>
- [24] Heilsversprechen in Beton Architektur | Espazium. Redirecting to <https://www.espazium.ch/de> [online]. Dostupné z: <https://www.espazium.ch/de/aktuelles/heilsversprechen-beton>
- [25]  Neviges Pilgrimage Church - Data, Photos & Plans - WikiArquitectura. WikiArquitectura - The World's Largest Architecture Encyclopedia [online]. Dostupné z: <https://en.wikiarquitectura.com/building/neviges-pilgrimage-church/>
- [26] Zum Tod von Gottfried Böhm (gest. 9. Juni 2021): Der Mariendom von Neviges: Experiment und Baustelle | CHRIST IN DER GEGENWART . Herder.de | Bücher auf Rechnung | Themen | Zeitschriften [online]. Copyright © Foto [cit. 02.01.2023]. Dostupné z: <https://www.herder.de/cig/cig-ausgaben/archiv/2019/40-2019/experiment-und-baustelle/>
- [27] Experience the "Brutal Faith" of Gottfried Böhm's Pilgrimage Church in Neviges | ArchDaily. ArchDaily | Broadcasting Architecture Worldwide [online]. Copyright © All rights reserved. ArchDaily 2008 [cit. 02.01.2023]. Dostupné z: <https://www.archdaily.com/795837/lobby-magazine-5-brutal-faith-gottfried-bohm-pilgrimage-church-mariendom-neviges-germany>

- [28] La chiesa del Giubileo di Richard Meier: una nave verso il nuovo millenio | SacArch. SacArch [online]. Dostupné z: <http://sacrark.altervista.org/richard-meier-chiesa-del-giubileo/>
- [29] Jubilee Church, Rome, Italy – Richard Meier – Modern Architecture: A Visual Lexicon. Modern Architecture: A Visual Lexicon – University of Hong Kong, Department of Architecture [online]. Dostupné z: <https://visuallexicon.wordpress.com/2017/10/03/jubilee-church-richard-meier-partners/>
- [30] KOSTEL MILOSRDNÉHO BOHA OTCE V ŘÍMĚ | Ebeton. eBETON neboli SVĚT BETONU [online]. Copyright © Svaz výrobců betonu ČR [cit. 02.01.2023]. Dostupné z: https://www.ebeton.cz/wp-content/uploads/2017-1-44_0.pdf
- [31] Dřevěný kostel svatého Mikuláše - Dřevostavitel.cz. Dřevostavby a bydlení | nezávislý portál Dřevostavitel [online]. Dostupné z: <https://www.drevostavitel.cz/clanek/fascinujici-drevene-kostely-ktere-preckaly-staleti/6801>
- [32] Gotický Sloh v evropě - intranet.zamecek.cz. (n.d.). [online]. [cit. 02.01.2023]. Dostupné z: https://intranet.zamecek.cz/dum/DVK21/20-VY_32_INOVACE_DVK2120.pdf
- [33] Obnova kleneb | Chatař Chalupář. Chatař Chalupář [online]. Copyright © Časopisy pro volný čas s.r.o., Domažlická 1256 [cit. 02.01.2023]. Dostupné z: <https://www.chatar-chalupar.cz/obnova-kleneb/>
- [34] Wow! so eine decke hätten wir auch gerne! wenn Spanndecken, dann vom Doktor! (2017, January 22). [online]. [cit. 02.01.2023]. Dostupné z: <https://www.doktorspanndecke.de/2017/01/22/wow-so-eine-decke-h%C3%A4tten-wir-auch-gerne/>
- [35] Francouzi k dostavbě Dukovan: České firmy znají místní prostředí, chceme s nimi spolupracovat | iROZHLAS - spolehlivé zprávy. iROZHLAS - spolehlivé a rychlé zprávy [online]. Copyright © 1997 [cit. 02.01.2023]. Dostupné z: https://www.irozhlas.cz/ekonomika/dukovany-elektrarna-dostavba-tendr-francouzi-francie-edf-vakis-ramany_2105191851_ako
- [36] About the Park. Park Nauki Torus w Ciechanowie [online]. Dostupné z: <https://parknaukitorus.pl/en/about-the-science-park/>
- [37] Návrh konstrukce a postup výstavby tvoří jeden celek | Ebeton. eBETON neboli SVĚT BETONU [online]. Copyright © Svaz výrobců betonu ČR [cit. 02.01.2023]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/navrh-konstrukce-a-postup-vystavby-tvori-jeden-celek/>
- [38] Scotiabank Saddledome: History, Capacity, Events & Significance. All About Sports | Sport Solutions | Sports Community | Sports Website [online]. Copyright © 2022 [cit. 02.01.2023]. Dostupné z: <https://sportsmatik.com/sports-corner/sports-venue/scotiabank-saddledome>
- [39] Duchovní centrum - kostel Brno-Lesná. PERI Česká republika - Bednění Lešení Služby [online]. Dostupné z: <https://www.peri.cz/projekty/kulturni-stavby/duchovni-centrum-kostel-brno-lesna.html>

- [40] archiweb.cz - Kostel blahoslavené Marie Restituty. *archiweb.cz* [online]. Copyright © Archiweb, s.r.o. 1997 [cit. 03.01.2023]. Dostupné z: <https://www.archiweb.cz/b/kostel-blahoslavene-marie-restituty-rimskokatolicka-farnost-brno-lesna>
- [41] Stavbaweb.cz – Kostel blahoslavené Marie Restituty. *Stavbaweb.cz – odborný portál o architektuře a stavebnictví* [online]. Dostupné z: <https://www.stavbaweb.cz/kostel-blahoslavene-marie-restituty-23199/clanek.html>
- [42] Brandejský, I. arch. P. (2022, December 25). Nový Kostel Pro Sídliště Lesná na Ulici Nezvalově. TZB. Retrieved January 3, 2023, from <https://stavba.tzb-info.cz/architektura-staveb/19578-novy-kostel-pro-sidliste-lesna-na-ulici-nezvalove>

Programy:

- [43] SCIA Engineer 21.1 64bit, studentská verze
- [44] Autodesk AutoCAD 2017, studentská verze
- [45] SCIA Concrete Section 11.1 64bit, studentská verze
- [46] Microsoft Office 365, studentská verze
- [47] C&S, Program pro výpočet smršťování a dotvarování betonu