



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta architektury
Ústav stavitelství I.

Inovativní dřevěné konstrukce

Innovative timber structures

Disertační práce

Doktorský studijní program:

P 3501 V003 Architektura a urbanismus

Studijní obor:

Architektura, stavitelství a technologie

Školitel:

prof. Ing. Miloslav Pavlík, CSc.

Ing. arch. Šárka Vomelová

Praha 2015

PŘEDMLUVA

Tato disertační práce vznikla v rozmezí let 2011-2015 na Ústavu stavitelství I. Fakulty architektury Českého vysokého učení technického v Praze.

Předně děkuji mému školiteli prof. Ing. Miloslavu Pavlíkovi, CSc. za iniciativu při zastřešení zvoleného tématu práce, za jeho vedení v průběhu studia a organizační podporu v závěrečné praktické části práce. Významně mi pomohly jeho rady a připomínky podložené obsáhlými profesními zkušenostmi.

Tato práce vznikla za podpory doktorského grantu GA ČR 103/09/H095 Udržitelná výstavba budov a udržitelný rozvoj sídel. Díky této podpoře mi bylo umožněno účastnit se několika konferencí a podniknout studijní cestu do Londýna. V této souvislosti bych také chtěla poděkovat kolegům doktorandům na Ústavu stavitelství I. a kolegům z doktorského grantu, jejichž projekty prezentované na společných pracovních setkáních mi byly podnětnou inspirací, a vzájemné diskuze pomohly vytrýbit směr zacílení práce.

Zvláštní dík patří docentu Ing. Jiřímu Litošovi, Ph.D. a pracovníkům Experimentálního centra Fakulty stavební ČVUT za poskytnutí prostoru pro sestavení prototypu, a profesionální provedení mechanických zkoušek, které poskytly výchozí experimentální data.

Zásadním přínosem pro vyhodnocení vlastností navržené konstrukce pak jsou numerické simulace Ing. Romana Gratzy, Ph.D. z Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně.

Profesoru Dr. Ing. Petru Horáčkovi a Ing. Václavu Seberovi z Lesnické a dřevařské fakulty Mendelovy university v Brně děkuji za obratem poskytnuté materiálové konstanty, které byly podkladem pro numerické simulace.

Závěrem děkuji svému partnerovi, rodině, přátelům a blízkým, za vazbu k reálnému životu, optimistický přístup a vytrvalou oporu, kterou mi poskytují nejen při zpracování této práce.

Šárka Vomelová
Praha, září 2015

ABSTRAKT

Tato práce se věnuje problematice inovace dřevěných konstrukcí v architektuře. Dřevo jako přírodní materiál z obnovitelného zdroje je prostředkem, který člověk ke stavění využíval od pradávna. Dnes, v době digitalizace procesu navrhování, technologických inovací a CNC (Computer Numeric Control) zpracování stavebních komponent se nabízí nový úhel pohledu na tento tradiční materiál. *Cílem této práce je nastínit nové možnosti uplatnění dřeva v soudobé architektuře a představit rozsah forem, které tento materiál nabízí při využití inovativních technologií.* Hledání nových forem inspirovaných přirozenými vlastnostmi materiálu v novém kontextu a zpracování, prověření technologií zpracování dřeva s přesahem mimo oblast stavebnictví má potenciál podpořit vývoj soudobých dřevěných konstrukcí.

Tato práce úvodem mapuje současné inovativní příklady uplatnění dřeva v architektuře, doplňuje jejich klasifikaci s ohledem na tři základní konstrukční aspekty (geometrie, statické působení, technologie zpracování materiálu) a podrobněji zkoumá vybrané technologie zpracování dřeva. Úvodní analýza slouží jako přehled aktuálních znalostí a možností na poli inovativních dřevěných struktur a současně jako odrazový můstek pro vlastní návrh klenebného konstrukčního systému z ohýbaného dřeva. Studium geodetických konstrukcí a variant členění sférické plochy je podkladem pro vznik série drobných experimentálních modelů, směřujících k vývoji inovativní klenebné konstrukce z ohýbaného dřeva a realizaci prototypu výsledného návrhu. Přirozená elasticita dřeva je vnímána jako doposud opomíjený inspirativní moment a nevyužitý potenciál - základním elementem navržené konstrukce je masivní ohýbaný dřevěný prvek o půdorysu kruhu. Fyzický model konstrukce z ohýbaných dílců dodaných společností TON a.s. byl sestaven v Laboratoři ocelových konstrukcí FSv ČVUT (Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze).

Na realizované konstrukci a jednotlivých kruhových elementech bylo následně provedeno několik zátěžových zkoušek ve spolupráci s Experimentálním centrem FSv ČVUT (Doc. Ing. Jiří Litoš, Ph.D.). Numerické simulace zátěžových stavů Ing. Romana Gratzy, Ph.D. zpracovávají naměřená data a přispívají k celkovému posouzení a vyhodnocení mechanických vlastností navržené konstrukce. Jedním z originálních přínosů práce jsou díky této mezioborové spolupráci zaměřené základní modifikované materiálové charakteristiky ohýbaného termálně plastifikovaného bukového dřeva (technologie ručního ohýbání TON a.s.).

Závěrem je prezentován potenciál navrženého systému pro uplatnění v architektuře (variantní prostorová schémata) a současně jsou naznačeny možnosti dále navázat na provedený výzkum. V neposlední řadě je podstatný také přínos práce jako vzoru generického postupu, který byl uplatněn a může sloužit jako podnětná badatelská inspirace pro obdobně experimentálně motivovaný vědecký postup, obecněji pro výzkum uplatňující kreativní tvorbu návrhu jako jednu ze složek vědecké práce.

ABSTRACT

This doctoral thesis deals with the issue of innovation of timber structures in architecture. Timber as a natural material of a renewable resource has been used as a structural material by our ancestors since the early days of building construction. Today, the digital design process, technological innovation and automated production of building components, provides a new angle of view of this “traditional” material. *The aim of this thesis is to illuminate new opportunities of timber applications provided with contemporary technology.* Form-finding, inspired with natural properties of the material, within the new context and processing, challenging the technology with overlap behind the boundary of civil construction, has the potential to initiate the development of innovative timber structures.

This thesis maps contemporary innovative timber applications in architecture, provides their classification with respect to the three basic structural aspects (geometry, structure, technology) and explores in detail selected technologies of timber processing. The introductory analysis acts as a review of contemporary knowledge and possibilities in the field of innovative timber structures at the same time as a starting point for the design of a structural system of curved timber. Study of geodetic structures and structuring of a sphere provides a basis for execution of a series of small-scale experimental models, resulting in development of innovative curved-timber vault structure and manufacturing of a prototype of the final design. Natural elasticity of timber is approached as an inspirational moment and omitted potential – the basic element of the structure is massive curved-timber component of a circular plan. Physical model of the structure of curved components produced by the company TON a.s. was assembled at the laboratory of steel structures FCE CTU, Prague (Faculty of Civil Engineering, Czech Technical University, Prague).

The final prototype as well as the individual curved-timber elements were further examined and tested in cooperation with The experimental centre FCE CTU (Doc. Ing. Jiří Litoš, Ph.D.). Numerical simulations of mechanical properties performed by Ing. Roman Gratza, Ph.D. process the measured data and provide the overall review and evaluation of mechanical properties of the designed structure. One of the original contributions of this work are measured basic material properties of thermally modified (plastified) beech timber (manual bending technology TON a.s.).

Finally, potential of the designed structural system for use in architecture is presented on a set of spatial schemes, as well as the possibilities of subsequent research. Last, but not least, the importance is noticed of the contribution of the work as an example of a generic process, that may serve as a framework and inspiration for analogous, experimentally-driven research process. Generally as a research technique employing the creative design process as one of the components of a scientific work.

OBSAH

1.	ÚVOD – IDENTIFIKACE TÉMATU.....	1
1.1	DŘEVĚNÉ KONSTRUKCE	1
1.2	INOVATIVNÍ DŘEVĚNÉ KONSTRUKCE	1
1.3	VÝZKUM NA POLI INOVATIVNÍCH DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍ.....	1
1.4	DEFINICE PROBLÉMU	3
1.5	FORMULACE CÍLE VÝZKUMNÉ PRÁCE	3
1.5.1.	KONSTRUKCE PRO VELKÉ ROZPONY.....	3
1.5.2.	DŘEVĚNÉ KONSTRUKCE PRO VELKÉ ROZPONY	4
1.5.3.	SHRNUTÍ	5
1.6	METODIKA ZPRACOVÁNÍ	5
2.	ANALÝZA.....	6
2.1	TECHNOLOGIE.....	6
2.1.1.	TECHNOLOGIE ZPRACOVÁNÍ DŘEVA	6
2.1.2.	VYBRANÉ TECHNOLOGIE POVRCHOVÉ ÚPRAVY DŘEVA	7
2.1.3.	TECHNOLOGIE OHÝBÁNÍ DŘEVA	7
2.2	KONSTRUKCE VOLNÝCH FOREM – REŠERŠE	8
2.2.1.	KONSTRUKCE MANNHEIMSKÉHO TYPU – ČTYŘVRSTVÁ SÍŤ Z NELAMINOVANÝCH DŘEVĚNÝCH LAMEL	9
2.2.1.1.	Mannheimská výstavní hala	9
2.2.1.2.	Savill Building.....	10
2.2.1.3.	Oranžerie hradu v Chiddingstone.....	10
2.2.1.4.	Weald and Downland Museum.....	11
2.2.1.5.	Apres Ski	11
2.2.2.	KONSTRUKCE DIAGONÁLNÍ DVOJVRSTVÉ SÍŤE Z LAMINOVANÝCH DŘEVĚNÝCH LAMEL	12
2.2.2.1.	Vyhlídková věž Korkesaari	12
2.2.2.2.	Hermes Boutique.....	12
2.2.3.	KONSTRUKCE SPOLUPŮSOBÍCÍCH ELEMENTŮ Z LAMINOVANÝCH DŘEVĚNÝCH LAMEL	13
2.2.3.1.	South Pond pavilon	13
2.2.3.2.	Dřevěná vlna.....	13
2.2.4.	KONSTRUKCE Z LAMINOVANÝCH DŘEVĚNÝCH LAMEL	14
2.2.4.1.	Golfový klub Haesley Nine Bridges.....	14
2.2.4.2.	Herbert Art Gallery	14
2.2.4.3.	Expo-dach Hannover	15
2.2.4.4.	Dálniční most Krusrak.....	16
2.2.5.	EXPERIMENTÁLNÍ VÝZKUMNÉ KONSTRUKCE	16
2.2.5.1.	Stuttgartský pavilon	16
2.2.5.2.	Hui&Wong pavilon	17
2.2.5.3.	“Packed” pavilon z papírové lepenky	17
2.2.5.4.	Reciprocal Frame.....	18
2.2.5.5.	Timber Fabric.....	18
2.2.6.	KONSTRUKCE VOLNÝCH FOREM – SHRNUTÍ	19

2.3	GEOMETRIE	19
2.3.1.	KRUH V ARCHITEKTUŘE	19
2.3.2.	GEODETICKÉ KUPOLE	21
2.3.3.	“CIRCLEPACKING” - TĚSNÉ USPOŘÁDÁNÍ IDENTICKÝCH KRUŽNIC NA KULOVÉ PLOŠE	26
2.3.4.	ČLENĚNÍ SFÉRIKÉ PLOCHY PRŮMĚTEM POLOPRAVIDELNÝCH MNOHOSTĚNŮ	28
2.3.5.	ČLENĚNÍ KULOVÉ PLOCHY – SHRNUÍ	30
3.	EXPERIMENTÁLNÍ MODELY KLENEBNÝCH KONSTRUKCÍ	30
3.1	MODELY KLENEB NAD OBDĚLNÝM PŮDORYSEM	31
3.2	MODELY KLENEB NAD KRUHOVÝM PŮDORYSEM	32
4.	IMPLEMENTACE ZVOLENÉHO SCHÉMATU	35
4.1	NÁVRH KLENEBNÉ KONSTRUKCE	35
4.1.1.	DIGITÁLNÍ 3D-MODEL KONSTRUKCE	35
4.1.2.	DETAILY KONSTRUKCE	37
4.1.2.1.	Montážní spojovací prvek ze sklolaminátu	38
4.1.2.2.	Spojovací prvek z oceli	39
4.1.2.3.	Možnosti konstrukčního řešení obvodového pláště	41
5.	VÝROBA PROTOTYPU A EXPERIMENT	42
5.1	POSTUP VÝROBY PROTOTYPU	42
5.2	VÝROBA PROTOTYPU	44
5.3	ZVOLENÍ ZPŮSOBU TESTOVÁNÍ	45
5.4	ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA	46
5.5	SHRNUÍ VÝSLEDKU ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKY	49
5.6	VÝVOJ OCELOVÉHO SPOJE	50
6.	STATICKÁ ANALÝZA	51
6.1	ZKOUŠKA MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ DŘEVĚNÝCH KRUŽNIC	51
6.1.1.	VÝSLEDKY ZKOUŠKY DŘEVĚNÝCH KRUŽNIC V TAHU A TLAKU	51
6.1.1.1.	Vzorek č.2 - TAH	52
6.1.1.2.	Vzorek č.3 - TAH	53
6.1.1.3.	Vzorek č.4 - TAH	54
6.1.1.4.	Vzorek č.5 - TLAK	55
6.1.1.5.	Vzorek č.6 - TLAK	56
6.1.1.6.	Vzorek č.7 - TLAK	57
6.2	NUMERICKÁ STUDIE ZKOUŠKY DŘEVĚNÝCH KRUŽNIC V TAHU A TLAKU - Autor Ing. Roman Gratza, Ph.D.	58
6.3	NUMERICKÁ STUDIE PRUTOVÉHO PROSTOROVÉHO MODELU SFÉRIKÉ KONSTRUKCE Z OHÝBANÉHO DŘEVA - Autor Ing. Roman Gratza, Ph.D.	65
6.4	SHRNUÍ NUMERICKÉ STUDIE	70

7.	SHRNUTÍ, DOPORUČENÍ A ZÁVĚR	72
7.1	ZHODNOCENÍ NAPLNĚNÍ CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE, POSOUZENÍ VĚDECKÉHO PŘÍNOSU PRÁCE	72
7.2	MOŽNOSTI VYUŽITÍ V PRAXI, POTENCIÁL OHÝBANÉHO DŘEVA PRO NOVÉ KONSTRUKČNÍ SYSTÉMY..	72
7.3	SHRNUTÍ, PŘEHLED NOVÝCH POZNATKŮ A VÝSLEDKŮ DISERTAČNÍ PRÁCE	76
8.	BIBLIOGRAFIE.....	79
9.	PUBLIKACE AUTORKY	81

1. ÚVOD – IDENTIFIKACE TÉMATU

1.1 DŘEVĚNÉ KONSTRUKCE

Dřevo je nahlíženo prizmatem aktuálních technologických možností a digitálních nástrojů z nového úhlu pohledu. Současně je chápáno jako materiál, nabízející odpověď na soudobou problematiku obnovitelnosti zdrojů a energetické náročnosti stavební produkce. Otázka závislosti naší společnosti na neobnovitelných přírodních zdrojích, především fosilních palivech, s jejichž spotřebou souvisí významně globální změny klimatu a frekvence výskytu přírodních katastrof, vyžaduje jasnou odpověď, jakým způsobem tento fakt reflektovat v soudobé architektuře. Dlouhodobé směřování k nízkoenergetické náročnosti budov, související s procesem technologické inovace a uspořádáním hodnot v souladu s principy trvalé udržitelnosti může být jednou z odpovědí. V konkrétní rovině tedy práce s lokálními zdroji, materiály a technologiemi, kulturním kontextem, respekt ke krajině - energeticky úsporná architektura jako příjemné a zdravé prostředí k životu.

Dřevo, jako materiál přírodní, zdravotně příznivý a obnovitelný, užívaný od prvopočátků stavitelské historie a známý především v tradičním kontextu je výzvou k prozkoumání jeho potenciálu v konstrukci soudobých architektonických forem. Technologické inovace v oblasti zpracování konstrukčního dřeva (ohýbání a lepení velkorozponových nosníků etc.) a jeho zabudování s ohledem na nízkoenergetickou náročnost staveb, posouvají hranice možností tvaru a konstrukčního uspořádání do oblastí, jejichž rozměr a význam ještě nebyl plně uplatněn a vyhodnocen. Dřevěné konstrukce s ohledem na dostupnost a vlastnosti tohoto materiálu s nízkou ekologickou stopou, odpovídající standardům trvalé udržitelnosti jsou významným tématem pro soudobou architekturu a stavebnictví.

1.2 INOVATIVNÍ DŘEVĚNÉ KONSTRUKCE

S postupem technologické inovace a digitálního navrhování rostou možnosti realizace dřevěných konstrukcí a objevuje se narůstající množství konstrukcí volných prostorových forem. V rámci členité skupiny vznikajících inovativních konstrukcí je patrná souvislost tří blízké souvisejících proměnných. Geometrie, statického působení a zpracování materiálu. Geometrie – prostorové uspořádání materiálu, kde tvar a statické vlastnosti jednotlivých elementů jsou určeny dostupnou technologií výroby. Statické působení – předurčené vlastnostmi materiálu a současně geometrickým uspořádáním konstrukčních elementů. Závěrem materiál, jehož vlastnosti jsou ovlivněny způsobem zpracování. Tyto tři proměnné jsou vzájemně neoddiskutovatelně propojeny. (1) Cílem mé disertační práce je s ohledem na tyto tři proměnné klasifikovat a charakterizovat soubor příkladů inovativních dřevěných konstrukcí a na základě této rešerše navrhnout a prověřit nový konstrukční systém rozšiřující dosavadní spektrum velkorozponových konstrukčních systémů.

1.3 VÝZKUM NA POLI INOVATIVNÍCH DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍ

Problematika aplikace dřeva v soudobé architektuře je středem zájmu výzkumu laboratoře dřevěných konstrukcí IBOIS, na Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, pod vedením Prof. Dr. Yves Weinanda. Základním zájmem je propojit v rámci týmové spolupráce široké spektrum specialistů – architekta, stavebního inženýra, matematika... a vytvořit tak multidisciplinární prostředí, schopné uplatnit svůj potenciál v oblasti inovativních konstrukcí z obnovitelných zdrojů. Stejný

důraz je kladen na technickou i architektonickou složku navrhování konstrukcí. Strategii výzkumu soudobých dřevěných konstrukcí je zde rovnocenné uchopení morfogenetických i strukturálních aspektů ve snaze generovat tak výjimečná konstrukční řešení. Výzvou trvale udržitelného rozvoje je otázka architektonické formy. Jakým způsobem přistupovat k procesu formální a technologické inovace z hlediska trvale udržitelnosti? (2), (3)

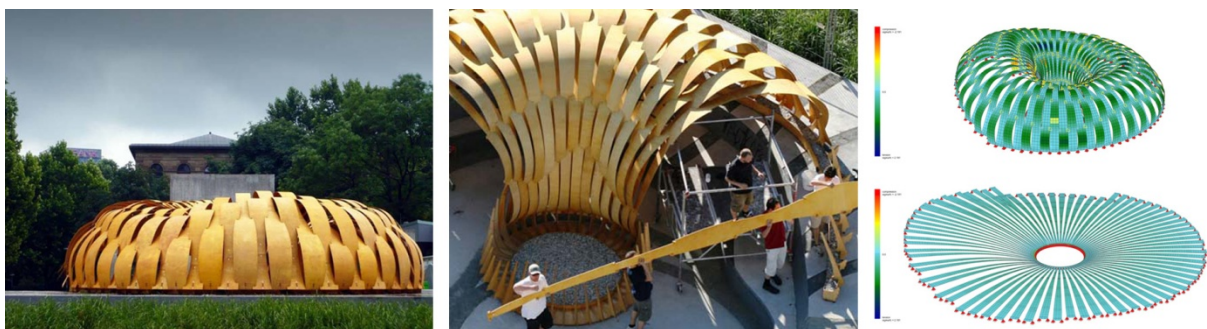
Výzkumný projekt "Timber fabric" se zabývá aplikací vzorů vazby textilních vláken v měřítku stavební konstrukce. Významová paralela mezi mikroskopickou strukturou vláken dřeva a textilní tkaniny je zde potenciálem pro vytvoření zcela bezprecedentních konstrukčních forem. Konstrukce zakřivených forem vykazuje díky interakci propojených elementů výsledný nárůst prostorové stability a pevnosti. Empirický přístup, testování prototypů zakřivených forem je provázen snahou vyvinout digitální nástroje, schopné tyto konstrukce přesně dimenzovat, optimalizovat a predikovat jejich chování pod vlivem zatížení.

Každý dílčí otestovaný prototyp poskytuje nové informace pro další kroky směřující k výslednému modelu. Problematika posunu z měřítka modelu do měřítka finální konstrukce sebou nese komplikace nepředvídatelných změn souvisejících s neměnnou mikroskopickou strukturou dřeva.



Obr.01) Timber Fabric_exteriér a schéma. Markus Hudert, Yves Weinand IBOIS/EPFL:Lausanne, 2009

Dlouhodobá snaha zabývat se inovativními dřevěnými konstrukcemi je patrná také na Stuttgartské univerzitě, kde každoročně vzniká experimentální dřevěný pavilon (o objemu cca 200 m³), podle návrhu týmu Institutu počítačového navrhování (ICD) ve spolupráci s Institutem stavebních konstrukcí a strukturálního designu (ITKE). (4)



Obr.02) Stuttgartský pavilon_exteriér, postup konstrukce a schéma. ICD/ITKE TEAM, University of Stuttgart_Stuttgart, 2010

1.4 DEFINICE PROBLÉMU

“Rapidní rozvoj nových technologií je předpokladem pro inovaci dřevěných konstrukcí. Jednou z možností vývoje je revize tradičních postupů v nových souvislostech. Tato práce si klade za cíl prověřit a nastinit jeden z možných směrů vývoje a rozšířit rozsah konstrukčních forem v oblasti dřevěných konstrukcí.”

Dřevo jako přírodní materiál z obnovitelného zdroje, je prostředkem, který člověk ke stavění využíval od pradávna. Dnes, v době digitální architektury, technologických inovací a CNC (Computer Numeric Control) zpracování stavebních komponent se nabízí nový úhel pohledu na tento tradiční materiál. Rozšíření možností uplatnění dřeva ve stavebních konstrukcích a pochopení rozsahu forem, které dřevo nabízí soudobé architektuře, má zásadní význam pro udržitelné stavitelství.

Dostupné soudobé technologie zpracování dřeva, umožňují jeho uplatnění v nových souvislostech. Příkladem potenciálu tohoto materiálu je narůstající množství realizací inovativních konstrukcí ze dřeva. Tato sféra moderních dřevěných konstrukcí není v současné době komplexně teoreticky zpracována. Chybí souhrnný přehled vstupních parametrů (jednotlivých technologií) a obecné povědomí o širí spektra možných výsledků (příklady inovativních dřevěných konstrukcí). Současně je podstatné prověřit nové možnosti využití dřevěných struktur pro velkorozponové konstrukce.

1.5 FORMULACE CÍLE VÝZKUMNÉ PRÁCE

Touha překonat konstrukcí ambiciózní rozpory provází stavitele odedávna. Vede k ní potřeba zaklenout velkorysé lodě chrámů, zastřešit prostory továrních hal, tržnic, koncertních sálů, překlenout volnou hladinu řek, spojit protější horské stěny. Podobně jako města soutěží o prvenství nejvyšší budovy, je patrná také snaha o dosažení maximálního rozponu. Hranice se posunují spolu s postupujícím stavem poznání a dostupnými technologiemi. Nejdelší mosty a nejvyšší mrakodrapy jsou tedy mj. také co se konstrukce týče obrazem vědecké a technické excelence své doby. Ze samé podstaty problému se s každou novou výzvou pohybujeme na samé hranici aktuálních technických možností a znalostí.

1.5.1. KONSTRUKCE PRO VELKÉ ROZPONY

Dnes všeobecně předpokládáme, že známe možnosti i limity materiálů jako je ocel, beton či dřevo, a pro případný další posun se obracíme k nanotechnologiím či materiálům na zcela nové bázi. Naskytá se však také příležitost návratu k těmto „tradičním“ materiálům v kontextu soudobých technologií a jejich revize v nových souvislostech. Považuji za podstatné zmínit několik tvůrců, kterým se podařilo právě tímto přístupem významně posunout architektonické a konstrukční možnosti své doby.

Konrad Wachsmann (1901-1980), autor projektu velkorozponových hangárů amerického letectva (1951-56) - ocelové velkorozponové konstrukce kompletně demontovatelné a znovusestavitelné. Základním požadavkem bylo dosáhnout maximálního rozponu bez mezilehlých svislých podpor. Univerzální spojovací prvek umožnil propojení až 20-ti tubulárních elementů v jednom styčnicku. Jako myslitel a vynálezce usilovně hledající architektonickou podobu vize na hraně technických a technologických možností své doby významně posunul hranice tehdejší stavební praxe. (5)

Richard Buckminster Fuller (1895-1983), vynálezce konstrukce geodetické sféry. Jeho úsilí bylo snahou nalézt odpověď na potřebu poskytnout levné, rychle sestavitelné velkorozponové zastřešení o minimálním povrchu. Jeho vědecké a

technické principy směřovaly k dosažení maximální možné užitelnosti s ohledem na úsporu energie a materiálu. Jednou z jeho realizovaných, dodnes stojících geodetických kupolí je Montreal Biosphere z roku 1967, rozponem překračující 70m. (6)

Robert Maillart (1872-1940), švýcarský inženýr, konstruktér železobetonových mostů, který nastínil rozsah konstrukčních forem železobetonu, tak jak jej známe dnes. Virtuozita mostu u města Schiers (Švýcarsko) z roku 1929, překonávající 90 m rozpon v obdobné výšce mezi skalami nad říčkou Salginabach může dnes být inspirativním vzorem pro soudobé železobetonové mosty. Dalším z jeho současníků, zabývajícím se železobetonovými konstrukcemi, jehož jméno je třeba zmínit je italský inženýr a architekt **Pier Luigi Nervi** (1891-1979). Jeho stavby překonávají obdobné rozpony se srovnatelnou elegancí (Výstavní hala B v Turíně 1949 – rozpon 71m, Malý a Velký palác sportu v Římě pro OH 1960). Francouzský inženýr **Eugène Freyssinet** (1879-1962), současník výše zmíněných velkých konstruktérů žb. staveb, se významně zasadil o uplatnění předpjatého železobetonu.

1.5.2. DŘEVĚNÉ KONSTRUKCE PRO VELKÉ ROZPONY

V oblasti dřevěných staveb se nejčastěji setkáme s velkorozponovou konstrukcí v tradiční sestavě z přímých prutových nosníků (masivní či lepené nosníky), rovinných či prostorových příhradových vazníků. Inovativním způsobem k tomuto zadání přistupuje v roce 1975 Otto Frei v případě výstavní haly v Mannheimu (viz. Kapitola 2.2.1). Aplikací čtyřvrstvé sítě zakřivených dřevěných lamel překonává obdivuhodný rozpon 20m, střechou tvaru nepravidelné dvojkřivé skořepiny. Na tento vzor dále naváže množství dnes aktuálních derivovaných síťových struktur (viz. Kapitola 2.2).

Za zmínku stojí také konstrukce Metropol Parasol (J. Mayer-H. architects, technické řešení Arup, dodavatel Finnforest-Merk GmbH), realizovaná v roce 2011 ve španělské Seville. Byť se v průběhu návrhu potýkala se značnými statickými obtížemi, a finální tvar je výsledkem kompromisu vzhledem k původnímu záměru, výsledek prezentuje zcela nový přístup k dřevěným konstrukcím pro velké rozpony. Nosným systémem je zde ortogonální síť laminovaných dřevěných panelů (Finnforest Kerto), uspořádaných do tuhých ráků, které plynule přecházejí z horizontální konstrukce střechy ve vertikální podpory. Stěžejním prvkem pro fungování konstrukce je řešení styčnicku dřevěných panelů, namáhaného extrémními klimatickými podmínkami. Dřevěná konstrukce je exponovaná povětrnostním vlivům (povrch panelů je upraven polyuretanovým nátěrem). Mimo nesporný socio-ekonomický přínos a aktivaci místa je Metropol Parasol posunem hranice možností na poli dřevěných konstrukcí pro velké rozpony.



Obr.03) Metropol Parasol. Photo David Franck Photographie. (7)

1.5.3. SHRNUŤÍ

Záměr návrhu inovativní klenebné konstrukce sdílí myšlenku a vizi nastíněnou v předešlých kapitolách. Vývoj inovativní, staticky efektivní konstrukce potenciálně využitelné pro velké rozpory.

Cílem je nastinit nové možnosti uplatnění dřeva v soudobé architektuře, představit rozsah forem, které tento materiál nabízí při využití inovativních technologií.

V disertační práci bude zpracován:

- přehled a klasifikace příkladů uplatnění dřeva v soudobé architektuře
- přehled vybraných technologií zpracování dřeva
- návrh a experimentální ověření inovativního konstrukčního systému
- prezentace potenciálu navržené konstrukce pro uplatnění v architektuře

1.6 METODIKA ZPRACOVÁNÍ

V rámci výzkumu je paralelně aplikováno několik metod. V úvodní studii byly vyhledány, analyzovány a zaříděny příklady inovativních dřevěných konstrukcí. Příklady byly charakterizovány z hlediska geometrie, konstrukce a materiálu (technologie). Byla provedena rešerše aktuálního stavu výzkumu na poli inovativních dřevěných konstrukcí a rozbor současných technologií zpracování dřeva (8), (2). Vznikla série skic podložených předchozím studiem tématu. Následně byla nastudována relevantní geometrie (sférické konstrukce, např. (9), (10), (11)) a odvozen matematický předpis pro sestavení prezentovaných modelů. Na exaktní matematický postup hledání geometrie navázal empirický experiment s architektonickými modely v různých měřících. Na modelech bylo prověřeno variantní uspořádání kružnic na reprezentativní geometrické ploše. V následujících fázích byl proveden návrh styčnicku sousedících dřevěných ohýbaných prvků a sestaven prototyp konstrukce. Tento prototyp bude testován a výsledky měření vyhodnoceny. Na základě poznatků z experimentálních modelů a testování prototypu styčnicku bude vyhodnocen přínos konstrukcí z ohýbaného dřeva pro stavební praxi a nastíněno další možné uplatnění obdobných struktur v architektuře.

2. ANALÝZA

S dřevěnou nosnou konstrukcí se setkáváme jak na stavbách menšího měřítka - sruby, dřevostavby z dřevěných panelů, sloupkových systémů a skelety, tak i ve větším měřítku v případě halových staveb, mostních konstrukcí, či rozhliden v podobě systémů z lepených lamelových nosníků, nebo prutových příhradových vazníků. Široké spektrum uplatnění materiálů na bázi dřeva ve stavebních konstrukcích odpovídá množství produktů, které jsou ze dřeva vyráběny. Zásadní roli zde hraje soudobá technologie zpracování.

2.1 TECHNOLOGIE

2.1.1. TECHNOLOGIE ZPRACOVÁNÍ DŘEVA

Dřevěné stavební materiály lze podle technologie zpracování, tvaru a povahy využití výsledného produktu rozdělit na přímé konstrukční dřevo (řezivo), dřevěné vícevrstvé panely, desky na bázi dřeva, vazníky a nosníky. Posledně zmíněné lze dále rozdělit na dřevěné příhradové vazníky, sbíjené či lepené (plošné či prostorové); tvarované (zakřivené) laminované nosníky a ohýbané (primárně přímé) prutové dřevěné prvky. V oblasti zakřivených dřevěných konstrukcí je patrný výrazný potenciál posunu od tradičních dřevěných staveb k inovativním konstrukcím volných forem (kapitola 2.2).

Následuje základní přehled dřevěných stavebních materiálů:

ŘEZIVO

- Konstrukční řezivo (neupravené řezivo základních profilů)
- Opracované řezivo (hoblované, vysušené)
- KVH (Konstruktionsvollholz) po délce nastavované hranoly spojené zubovým spojem, hoblované, vysušené, impregnované
- Lepené lamelové dřevo (profily lepené po vrstvách, nastavované po délce, hoblované, vysušené, impregnované), mj. také zakřivené nosníky (např. Metsä Wood (dříve Finnforest), Wiehag, Kasper CZ, etc.)

PANELY

- KLH/CLT panely (Kreuzlagenholz/Cross-laminated timber) křížem laminované vícevrstvé dřevěné panely z masivního dřeva
- Panely z masivních profilů sestavených na pero a drážku

DESKY

- MFP desky (Multi Function Panel) základní konstrukční deska bez povrchové úpravy
- OSB desky (Oriented Strand Board), konstrukční desky lisované pryskyřicí z orientovaných štěpek z jehličnatého dřeva (také s broušeným povrchem)
- DHF (Diffusionsoffene Holzfaserplatte) difuzně otevřená a vlhku odolná dřevovláknitá deska
- Dřevovláknité desky, desky na bázi dřevní hmoty, difuzně otevřená deska, vyráběná mokrou či suchou cestou
- Cementovláknité desky (Cembrit) fasádní desky
- Cementotřískové desky (Cetris) především fasádní desky
- Sádrovláknité desky, konstrukční a pohledové desky v interiéru
- Překližky, více vrstev křížem lepených dých, zpravidla používány pro interiérové obklady a nábytek

VAZNÍKY A NOSNÍKY

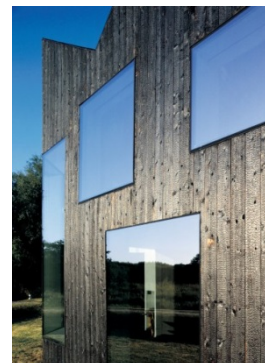
- Sbíjené prutové příhradové vazníky (plošné, prostorové)

- Skládané nosníky (např. "I" nosníky složené ze dvou dřevěných pásů spojených pásnicí z OSB desky)

2.1.2. VYBRANÉ TECHNOLOGIE POVRCHOVÉ ÚPRAVY DŘEVA

Přírodní dřevo lze dodatečně upravovat, ošetřit, či modifikovat (termálně či chemicky - impregnací, acetylací etc.) se záměrem podpořit jeho přednosti a omezit negativa. Jakoukoliv dodatečnou úpravu je nutné zvážit s ohledem na zachování minimální ekologické stopy a nezávadnosti materiálu. Vedle tradiční povrchové úpravy dřeva lazurou, lakem či nátěrem, stojí za zmínění několik ne zcela běžných technik pozměňujících vlastnosti dřeva.

Historicky zakotvená, a zcela přírodní je úprava dřeva opálením. Tento postup má kořeny v japonské tradici, nebyl však neznámý ani ve středověké Evropě. Opálením dřeva jsou z povrchové vrstvy odstraněny molekuly vodíku a kyslíku, zbývá převažující uhlík. Zuhelnatělý povrch zpevňuje a ochraňuje dřevo vůči povětrnostním vlivům a zlepšuje jeho trvanlivost a odolnost proti požáru. Příkladem aplikace opáleného dřeva na soudobé fasádě je projekt Hunsett Mill, Stalham v Anglii (ACME, 2010). (12)



Specifickou chemickou úpravou pozměňující mikrostrukturu dřeva s cílem dosažení větší odolnosti vůči povětrnostním vlivům, trvanlivosti a pevnosti dřeva je acetylace. Dřevo na molekulární úrovni obsahuje množství volných hydroxylových skupin OH. Volné hydroxyly absorbují a uvolňují vodu s ohledem na klimatické podmínky, jimž je dřevo vystaveno. Tento proces je hlavní příčinou rozpínání dřeva ve vlhku a jeho smršťování v suchu. Předpokládá se také, že rozklad dřeva způsobený enzymy, je iniciován právě v hydroxylových oblastech. Acetylace efektivně transformuje volné hydroxyly na acetylové skupiny. Dřevo je za předepsaných podmínek vystaveno působení acetickeho anhydridu, odvozeného od kyseliny octové. Nahrazením hydroxylové skupiny acetylovou skupinou je významně omezena schopnost dřeva vázat vodu, čímž vzniká produkt rozměrově stabilní a extrémně trvanlivý. Pohledová kvalita dřeva zůstává nezměněna. Tato úprava je vhodná především pro ošetření dřevěných prvků vystavených přímému působení povětrnostních vlivů, či kolísavým hodnotám vlhkosti. Acetylované dřevo Accoya bylo aplikováno např. na projektu dálničního mostu Krusrak v Holandsku (kapitola 2.2.4.4). (13)

2.1.3. TECHNOLOGIE OHÝBÁNÍ DŘEVA

Dřevo, jako přirozeně pružný materiál umožňuje ohyb. Pro zvýšení plasticity se nabízí více způsobů termální modifikace. Podle technologie zpracování rozlišujeme dřevo ohýbané zatepla (plastifikované), které po vychladnutí zachovává zafixovaný tvar (a současně vykazuje vyšší prostorovou tuhost), a dřevo ohýbatelné zastudena (trvale modifikované), které lze po provedené plastifikaci trvale ohýbat (za cenu snížené pevnosti).

Způsob ohýbání dřeva lze rozdělit podle geometrie ohybu na ohyb v jedné/více rovinách. Podle technologie ohýbání rozlišujeme ohýbání s volným uložením materiálu / ohýbání pomocí pásnice a tvárnice, resp. patrice a matrice (patent Michael Thonet). Ohýbatelnost, jako technologická vlastnost dřeva je pak definována jako schopnost ohýbání, vyjádřená min poloměrem ohybu, při kterém ještě nedochází k porušení materiálu. Měřítkem je koeficient ohýbatelnosti $k = h / r$ (kde h = tloušťka ohýbaného profilu, r = poloměr ohybu) (14). Plastifikace je úprava dřeva, vedoucí ke změně plasticity a dalších fyzikálně-mechanických vlastností dřeva, a ke změně jeho chemické struktury. Rozlišujeme plastifikaci chemickou,

hydrotermickou a elektromagnetickou, z nichž poslední dvě uvedené jsou předmětem zájmu současného dřevozpracování. Po hydrotermické plastifikaci lze dřevo dále upravit komprimací a výrazně tak zvýšit jeho plasticitu. Při komprimaci dochází k podélnému stlačení dřeva na 70 – 80% jeho původní délky. Komprimací se snažíme předejít porušení materiálu na vnější straně vláken v tahu za ohybu.

Tradiční způsob ohýbání dřeva pomocí pásnice a tvárnice, jímž lze docílit vícerovinného ohybu patentoval Michael Thonet v roce 1856:

- tyč z bukového dřeva se v parní lázni napaří za teplot vyšších než 100°C (plastifikace). Délka pobytu v lázni se určuje podle průměru tyče (1cm odpovídá cca 1 hodině v lázni).
- prvek se vyjme z lázně a zatepla, pomocí pásnice se ručně upevní do tvárnice
- pásnice přenesou neutrální osu ohýbaného dílce na styk kovové formy a dřeva, čímž zamezí praskání vláken na tažené straně průřezu
- čelní zarážky zamezí protažení prvku a vyvedí stlačení dřeva po průřezu
- výsledkem je houževnatý prostorově zakřivený prvek pevně fixovaného tvaru (15)

Soudobá technologie plastifikace dřeva umožňuje vícerovinné ohýbání modifikovaného dřeva Bendywood® v suchém stavu při běžných teplotách.

- hydrotermicky plastifikované dřevo je po délce stlačeno na 80% původní délky; v tomto stavu je zafixováno a vysušeno
- dochází ke změně mechanických a fyzikálních charakteristik dřeva (nárůst plasticity souvisí s poklesem pevnosti plastifikovaného dřeva)
- takto komprimované dřevo zůstává trvale plastické
- profily tl. cca 2 cm je možné ohýbat zastudena v ruce až do poměru 1:10 (tloušťka prvku/poloměr ohybu) (14) větší průřezy pak strojně
- dřevo Bendywood® lze běžnými způsoby opracovávat, není však vhodné pro využití v exteriéru, vzhledem k objemovým změnám a poklesu pevnosti při zvýšení vlhkosti okolního prostředí
- použití: lištování nábytku, schodišťová madla, modely, design a inovace...

Technologie ohýbání dřeva skýtá široké spektrum konstrukčních variací.

S ohledem na vysokou plasticitu lze modifikované dřevo efektivně zpracovávat a tvarovat. Potenciál skýtají konstrukce sestavené z dílčích propojených elementů. Cílem disertační práce je zhodnotit specifické charakteristiky materiálu, navrhnout a variantně prověřit inovativní konstrukce, realizované v modelech a posléze prototypu 1:1.

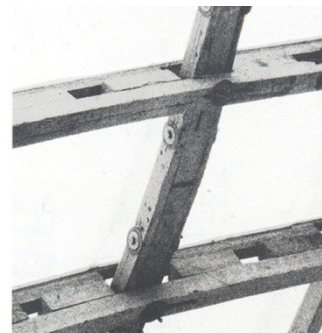
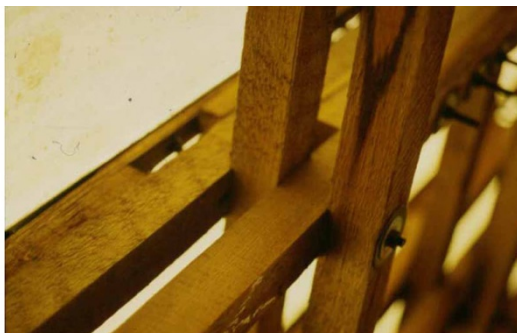
2.2 KONSTRUKCE VOLNÝCH FOREM – REŠERŠE

S postupem technologické inovace a digitálního navrhování rostou možnosti realizace zakřivených dřevěných konstrukcí a objevuje se narůstající množství konstrukcí volných forem. V rámci vybrané členité skupiny konstrukcí jsou sledovány tři blízké související proměnné. Definice geometrie, statické působení a zpracování materiálu (1). Geometrie – prostorové uspořádání materiálu, kde tvar a statické vlastnosti jednotlivých elementů jsou určeny dostupnou technologií výroby. Statické působení – předurčené vlastnostmi materiálu a současně geometrickým uspořádáním konstrukčních elementů. Závěrem materiál, jehož vlastnosti jsou ovlivněny způsobem zpracování. Následující příklady konstrukcí jsou rozděleny do pěti skupin, sestavených s ohledem na tyto tři proměnné. (16)

2.2.1. KONSTRUKCE MANNHEIMSKÉHO TYPU – ČTYŘVRSTVÁ SÍŤ Z NELAMINOVANÝCH DŘEVĚNÝCH LAMEL

2.2.1.1. Mannheimská výstavní hala

Otto Frei, Ove Arup, Ted Happold_Mannheim 1975



Obr.04) Mannheimská výstavní hala – interiér, detaily

Mannheimská výstavní hala Freie Otta, zbudovaná v roce 1974 je průkopnickým činem v navrhování dvojkřivých dřevěných skořepin a velkorozponových konstrukcí obecně. Princip čtyřvrstvé ortogonální sítě zakřivených dřevěných lamel lze v drobných obměnách sledovat na konstrukci Savill Building (Windsor, UK), Chiddingstone Castle Orangery (Chiddingstone, UK), Weald and Downland open air museum (Singleton, UK), projektovaných v Buro Happold. V abstrahované formě dvouvrstvé sítě na kupoli Apres Ski (Příchovice, CZ) Martina Rajniše a Jana Macha, či Korkeasaari tower (Helsinki, Finsko).

Při návrhu pracoval Otto Frei se zavěšeným drátovým modelem konstrukce v měřítku 1:100, pro odvození tvaru skořepiny s membránovým stavem napjatosti, eliminujícím ohyb. Výsledná struktura díky přirozeně formovanému tvaru přenáší zatížení především membránovými silami. Tlakové, tahové a smykové síly působí ve skořepině rovnoměrně rozloženy po průřezu, díky čemuž je umožněno efektivní dimenzování (Engel 1999: Tvarem působící konstrukční systémy jsou systémy pružné, nepevné podstaty, v nichž je uspořádání sil usměrněno návrhem přirozeně zaujaté formy a charakteristickou stabilizací. (16))

Dřevěná skořepina překlenuje 7200 m² maximálním rozponem 20m. Na dřevěnou lamelovou konstrukci byl osazen plášť na bázi PVC, opatřený tepelně reflexní vrstvou ze strany interiéru a UV filmem na vnějším povrchu. (17)

2.2.1.2. Savill Building

Glen Howells Architects, Buro Happold_Windsor, 2006

**Obr.05)** Savill Building – exteriér, interiér

Pavilon, sloužící jako vstup do Savill garden ve Windsorském parku je recepcí, restaurací, obchodem a prodejnou rostlin. Dřevěná skořepina střešní konstrukce, postavená z modřínového dřeva zastřešuje volný prostor bez podpor o rozměrech 100x25 m, a proměnlivém vzepětí 4,5 až 8,5m. Čtyřvrstvá síť lamel v rastru 1x1m o profilech 80x50 mm je analogií Mannheimské haly Freie Otta. Je vynesena ocelovým nosníkem lemující síť po odvodu, podporovaným dvojicí nakloněných sloupů kruhového průřezu. Střešní plášť je opatřen Al plechem na dubovém podkladu. Skladba střešní konstrukce a řešení detailů bylo ověřeno na modelu řezu střechou 1:1.

Postup realizace v ploše, na postupně spouštěném, tvarujícím lešení, je totožný s Downland Gridshell. (18)

2.2.1.3. Oranžerie hradu v Chiddingstone

Peter Hulbert, Buro Happold_Chiddingstone, 2007

**Obr.06)** Oranžerie hradu v Chiddingstone – exteriér, interiér, postup konstrukce, detail

Skořepina na eliptickém půdorysu, realizovaná nad stávající oranžerií Chiddingstonského hradu představuje další z konstrukcí, odvozených od Mannheimské haly Freie Otta. Novým přínosem je řešení zavětrování subtilními ocelovými lankami a svrchní plášť s bezrámovým zasklením. Skořepina je zabudována do stávající konstrukce, kterou ovšem nepřítěžuje – je založena na sloupech s nově zbudovanými základy.

Konstrukce skořepiny je uložena na eliptickém prstenci z lepeného dřeva, na horním líci osazeného ocelovou deskou, k níž jsou pod úhlem kotveny dřevěné lamely a ocelová zavětrovací lanka.

Síť lamel z ořechového dřeva ve čtyř vrstvách (o profilech 40x35 mm) je v bodech křížení fixována ocelovými svorníky, k nimž jsou současně kotvena ocelová lanka a úchyty skleněných panelů střešního pláště.

Skořepina byla zkonstruována jako plochá síť, zvedaná lany, vyvěšenými z lešení nad skořepinou až do pozice výsledné formy. Následně byly lamely v křížení zafixovány a zavětrování napnuto k obvodovému prstenci, podpůrné lešení demontováno a konstrukce spuštěna na ocelové podpory. (19)

2.2.1.4. *Weald and Downland Museum*

Edward Cullinan Architects, Buro Happold_Singleton, 2002



Obr.07) Weald and Downland Museum – interiér, exteriér, detail

Objekt muzea ve venkovském prostředí jižní Anglie skýtá zázemí archivu a workshopu náležícímu k přilehlému skanzenu tradiční dřevěné britské architektury. Konstrukce dvojkřivé skořepiny přejímá technologii Frei Otta z výstavní haly v Mannheimu a přináší efektivní inovaci detailu spoje.

In situ sestavena z čerstvého dubového dřeva v profilech 50x35 mm jako plochá síť diagonál ve 4 vrstvách na lešení, které pod ní bylo postupně demontováno tak aby síťovina zaujala výsledný tvar. Následně byla zakotvena na žb platformu spodní stavby. Použití čerstvého dubového dřeva s vysokou relativní vlhkostí a pevností umožnilo použít minimální profily a tím i pružné formování tvaru skořepiny. Styčníky nejsou šroubovány skrz dřevo, ale přes kovové příložky zajišťující přiměřený pohyb v konstrukci (dilatace). Prostorové ztužení zajišťuje dodatečné diagonální zavětrování (podélná a příčná žebra na horním líci konstrukce). (20)

2.2.1.5. *Apres Ski*

Jan Mach, Martin Rajniš_Příchovice, 2008



Obr.08) Apres Ski – exteriér, detail

Dřevěná kupole, přezdívaná podle dvojice autorů “Rajmachova báh” vznikla jako diplomní projekt Jana Macha. Kupole o 12m rozponu spotřebovává pouhých 8 kg dřeva/m².

Konstrukčně jde o čtyřvrstvou skořepinu, odvozenou od Mannheimské konstrukce Freie Otta s pevným prošroubováním v křížení lamel. Tak jako v předchozích příkladech bylo užito klasické přímé řezivo. (21)

2.2.2. KONSTRUKCE DIAGONÁLNÍ DVOJVRSVÉ SÍTĚ Z LAMINOVANÝCH DŘEVĚNÝCH LAMEL

2.2.2.1. Vyhlídková věž Korkesaari

Ville Hara, HUT Wood Studio_Helsinky, 2002



Obr.09) Vyhlídková věž Korkesaari – model, exteriér, interiér a schéma

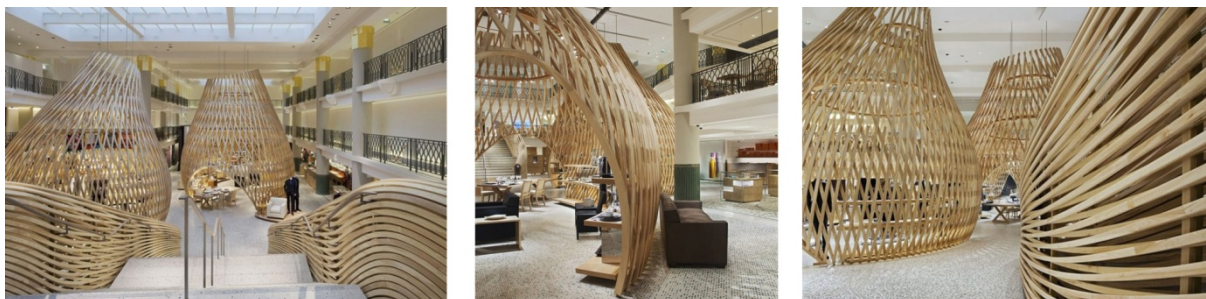
Dřevěná rozhledna v zoo Helsinky vznikla jako projekt studentů architektury na Helsinki University of Technology. 10m vysoká dvoupodlažní struktura nepravidelného nerotačního tvaru je sestavena ze 72 dřevěných lamel z lepeného dřeva 12 m délky o průřezu 60x60 mm. Jde o skořepinu dvouvrstvé sítě diagonálně uspořádaných lamel, pevně propojených v celkem 600 bodech křížení. Lamely byly ve výrobě zakřiveny podle sedmi vzorů, finální tvarování probíhalo přímo na stavbě během montáže.

Dvě vložená podlaží jsou vynášena nosníky po obvodě, připojenými na dřevěnou síťovinu. Tato současně zajišťují tuhost konstrukce v horizontálním směru. Skořepina je kotvena přes ocelové prvky k železobetonovému základu.

Geometrie byla vytvořena jako 3D CAD model, importovaný a dále staticky posouzený v programu Lusas. Pro ověření byly sestaveny fyzické modely v různých měřítcích. (22)

2.2.2.2. Hermes Boutique

Denis Montel_RDAI_Paříž, 2010



Obr.10) Hermes Boutique – interiér

Boutique značky Hermés, navržený v prostorách bazénu z roku 1935, vyhlášeném kulturní památkou, je komponován jako sestava impozantních a

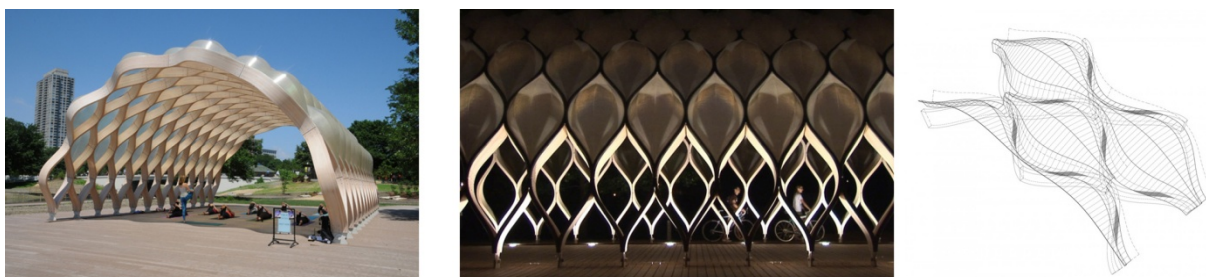
současně křehkých objemů několika pavilonů ze síťoviny dřevěných lamel. Souhra dvou měřítek v rámci prostoru bazénové haly vytváří dojem vytvoření domu v domě.

Organické objemy pavilonů, více než devítimetrové výšky jsou samonosné konstrukce z jasanového dřeva. Diagonální dřevěné laťování o profilu 6 x 4 cm vytváří dvojkřivé plochy. Geometrie každého pavilonu je definována unikátním algoritmem. (23)

2.2.3. KONSTRUKCE SPOLUPŮSOBÍCÍCH ELEMENTŮ Z LAMINOVANÝCH DŘEVĚNÝCH LAMEL

2.2.3.1. South Pond pavilon

Studio GANG Architects_Chicago, 2010



Obr.11) South Pond pavilon – exteriér a detail

Otevřený dřevěný pavilon je součástí zážitkového/naučného parku v blízkosti jezera South pond. Pavilon je příkladem klenby půlválcového průřezu. Je zde použito lepeného laminovaného dřeva. Jedná se o konstrukci sestavenou z dílčích identicky zakřivených prvků, spojených šroubovanými spoji. Tedy o spolupůsobící konstrukci, která získává prostorovou tuhost a stabilitu spolupůsobením dílčích komponent. V případě poškození dílčího prvku soustava neztrácí prostorovou tuhost, vykazuje pouze lehkou tvarovou deformaci. Vzhledem k tomu, že jednotlivé elementy byly tvarovány ve výrobě (lepené laminované dřevo), samotná montáž tak probíhala bez dodatečného tvarování prvků. Svrchní plášť kryjí translucenční laminátové čočky. (24)

2.2.3.2. Dřevěná vlna

Amanda Levette Architects, Arup, Londýn, 2011



Obr.12) Dřevěná vlna – exteriér a detail

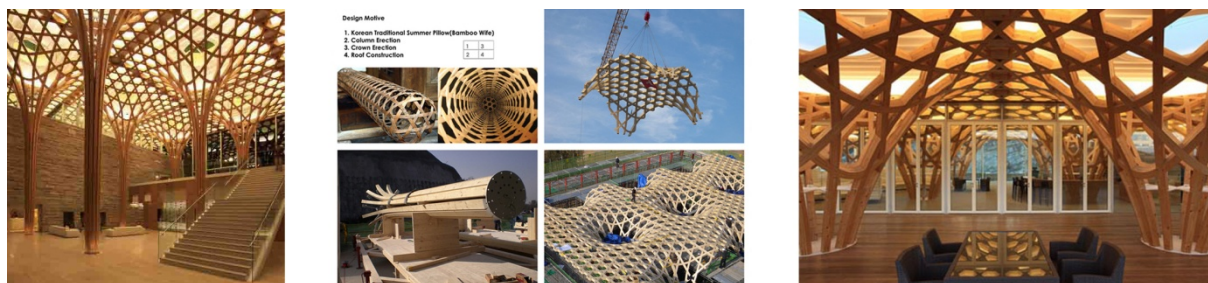
Příklad inovativní aplikace dřeva v praxi bylo možno shlédnout v rámci London Design Festivalu před vstupem do Victoria&Albert Museum na Cromwell Road. Architektonické studio AL_A (s podporou Arup) navrhlo dřevěnou vlnu ve tvaru segmentu spirály, provedenou s obdivuhodným technickým důvtipem. Opakující se skladebná struktura dřevěné vlny reflektuje motiv, příbuzný historickému tvarosloví vrstevnatého portálu galerie. Svým způsobem tak zcela soudobou formou reaguje na kontext, do kterého je zasazena.

Filigránská trojrozměrná asymetrická struktura o výšce tří podlaží (Ø 12 m) přejímá drobné měřítko jemné nábytkářské výroby. Dřevo amerického červeného dubu v tenké laminovaných vrstvách je zvoleno s ohledem na výhodný poměr pevnosti/váhy a jeho místní dostupnosti. Zakřivené dřevěné prvky jsou spojeny ocelovými šroubovanými spoji, každý jedinečného tvaru podle pozice v konstrukci. Struktura je jako dočasný objekt kotvena na přitížených ocelových deskách. (25)

2.2.4. KONSTRUKCE Z LAMINOVANÝCH DŘEVĚNÝCH LAMEL

2.2.4.1. Golfový klub Haesley Nine Bridges

Shigeru Ban Architects_Soul, 2010



Obr.13) Golfový klub Haesley Nine Bridges – interiér a postup konstrukce

Konstrukce, kterou Shigeru Ban navrhl pro golfový klub v Soulu je v kategorii dřevěných skořepin inovativním počinem. Ve volnějším tvarování týmž autorem uplatněna také na Centre Pompidou v Metz. Hexagonální provázání dřevěných lamel je inspirováno tradičním vzorem výpletu korejského “letního polštáře” z proužků bambusu.

Tvarované lepené lamely střešní skořepiny plynule přechází v sloupové podpory o průřezu složeném ze 12-ti prutů. Střešní konstrukce byla vyrobena ve Švýcarsku a ve 32 částech dopravena na místo určení, kde byla zkompleťována. Spoje připravené jsou provedeny jako rybinové, bez nutnosti fixace kovovými prvky.

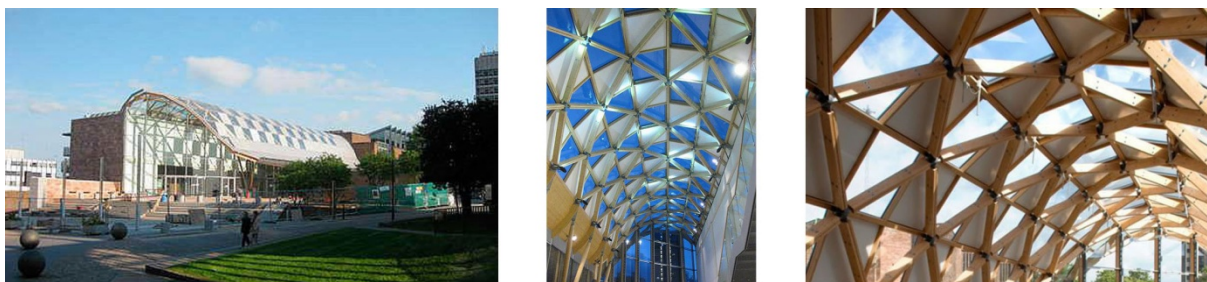
Dřevěná síťovina nese lehkou plochou dřevěnou střešní s kruhovými světlíky v osách sloupů. Trychtýře hlavic dřevěných sloupů jsou součástí systému řízené ventilace a přirozeného osvětlení a lokálně prostupují do exteriéru. Rozpon konstrukce je 9m, výška klenby 8m. (26)

2.2.4.2. Herbert Art Gallery

Pringle Richards Sharratt, Alan Baxter&Associates, London_Coventry, 2007

Transparentní foyer galerie v Coventry vznikl jako součást konverze a extenze stávajícího objektu v historickém kontextu středověké katedrály. Doplnil nové výstavní prostory, čítárnu, archiv, café a bookshop.

500 m² prosklené arkády zastřešuje síťovina z lepených lamelových profilů, nesoucí rámové zasklení a hliníkové fasádní panely. Skořepinu vynášejí dvojice šikmých dřevěných sloupů, opřených do zakřivených nosníků.



Obr.14) Herbert Art Gallery – exteriér, interiér

Pro konstrukční prvky bylo použito křížově laminovaných dřevěných panelů “Leno” a klasických “glulam” profilů produkce Finnforest. Přímé pruty jsou po čtyř spojeny v ocelovém styčniku. Styčnik vynáší střešní plášť, jehož konstrukce je současně zavětrováním skořepiny.

Důraz je kladen na trvale udržitelné principy – energeticky úsporná opatření, přirozená ventilace, dřevo z certifikovaných zdrojů s řízenou obnovou (FSC). (27)

2.2.4.3. Expo-dach Hannover

Herzog + Partner, Mnichov_Hannover, 2000



Obr.15) Expo-dach Hannover – exteriér, interiér a postup konstrukce

Příklad zastřešení nad pavilony Hannoverského výstaviště představuje soustavu deseti segmentů v kombinaci sdužených čtveřic dvojkřivých ploch z lepeného lamelového dřeva na horním plášti, přímých prvků z masivního dřeva na vertikální nosné konstrukci (pilíře sestávající z provázaných čtveřic dřevěných kulatin) a plošných dřevěných kompozitů užitých pro zavětrování. Významnou roli zde hrají masivní ocelové spoje mezi horním pláštěm a vertikální nosnou konstrukcí. Jedná se tedy o konstrukci z nehomogenním průběhem sil, rozdělenou na nesoucí a nesené části s dodatečným prostorovým ztužením.

Každý díl 40 x 40 m síťoviny lepených dřevěných lamel je vyneseno do 20 m výšky sloupem čtvercového půdorysu. Tyto sloupy sestávají ze 4 nakloněných kmenů (masivní dřevo 200 let starých stříbrných jedlí) propojených lepeným dřevem a ocelovými prvky. Kmeny jsou otočeny proti směru růstu stromu - vzhledem k vyššímu namáhání v horní části sloupu je zde nutný větší průřez (95 - 110 mm). Tyto sloupy jsou prostřednictvím ocelové konstrukce zakotveny do betonového základu. Ocelová konstrukce na vrcholu sloupů vynáší 19 m vyvěšené konzoly a vlastní konstrukci deštníku (35 tun), tvořenou dvojkřivou skořepinou. Konzola sestává ze dvou vrstev. Spodní - ve tvaru skořepiny, a horní - přímé. Tyto se spojují v jednu na vnějším okraji deštníku. Samotnou síťovinu tvoří 2 vrstvy žebroví, zaklopeného na horním lici translucenční syntetickou membránou s distancí větrané vzduchové mezery. Konstrukce byla sestavena na místě spojením továrně prefabrikovaných částí. (28)

2.2.4.4. Dálniční most Krusrak

OAK (Onix Achterbosch Kunstwerken), E. Luning, Sneek, 2008



Obr.16) Dálniční most Krusrak –exteriér

Silniční most Krusrak v holandské provincii Friesland spojuje dvě části města Sneek, oddělené dálnicí. Představuje nový prvek místní kulturní identity – nese tvarové rysy tradičního fríského hospodářského stavení, sklenuté dřevěné nosníky současně připomínají trup lodi, přístavnímu městu charakteristický motiv.

Most o rozponu 32m, ve výšce 15m nad úrovní dálnice má únosnost 60 tun. Konstrukčně se jedná o dva masivní dřevěné příhradové vazníky trojúhelníkového tvaru, spojené v jejich vrcholu. Příčné zakřivení vazníků do tvaru gotického oblouku zajišťuje prostorovou tuhost a současně zachovává průjezdný profil pro dopravu. Společně s ortogonální sítí příčlů představuje originální vizuální vjem.

Na základě testování dřevin na několika nezávislých výzkumných pracovištích bylo pro realizaci mostu zvoleno dřevo typu Accoya. Jedná se o lokálně vyprodukované měkké jehličnaté dřevo homogenní struktury, ošetřené acetylací – netoxický proces zvyšující jeho pevnost a odolnost vůči vnějším vlivům. Má výhodný poměr únosnost/váha, rozměrovou stabilitu, jednotný vzhled, trvanlivost a ekologickou nezávadnost. Dřevo Accoya je vhodné pro laminování silných profilů (zde 1080 x 1400 mm), odolné vůči účinkům UV-záření. Dřevo pochází z certifikovaných zdrojů s řízenou obnovou. (29)

2.2.5. EXPERIMENTÁLNÍ VÝZKUMNÉ KONSTRUKCE

2.2.5.1. Stuttgartský pavilon

ICD/ITKE TEAM, University of Stuttgart_Stuttgart, 2010

Konstrukce pavilonu vznikla v rámci interdisciplinární spolupráce počítačových specialistů a konstruktérů na stuttgartské univerzitě. Vychází z primárních experimentálních ověření vlastností zvoleného materiálu - břízové překližky a jejich implementací do digitálního skriptu, který umožnil jejich optimální zhodnocení.



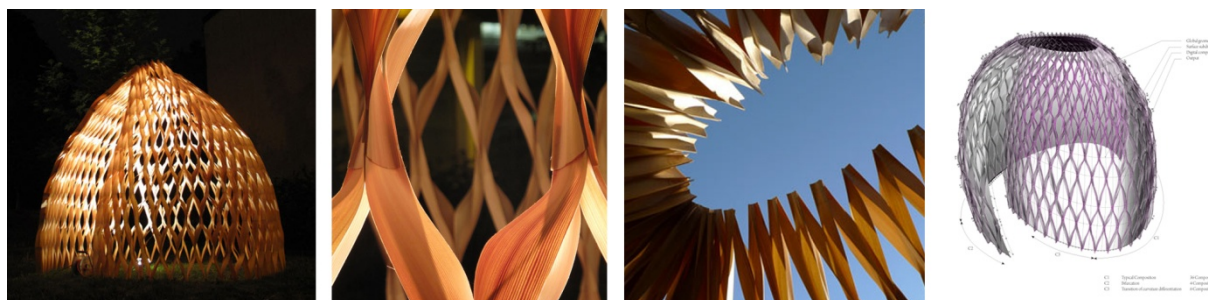
Obr.17) Stuttgartský pavilon – exteriér, postup konstrukce a schéma

Experimentální pavilon ve Stuttgartu je tvarem segment anuloidu. Zvolená geometrie využívá elasticity primárně plošných pásků 80-ti vzorů zakřivených do výsledného tvaru. Pavilon z 6,5 mm překližky měří v průměru 10 m. Základním geometrickým principem jeho konstrukce je dvojice zakřivených oblouků, které do sebe zapadají v bodech stanovených optimálně pro využití napětí vneseného do konstrukce zakřivením oblouků.

Užití materiálu ve zcela novém kontextu a tvaru si vyžádalo experimentální stanovení jeho mechanických vlastností. Pásky překližky byly testovány na namáhání na ohyb, počítačovou simulací byl ověřen průběh napětí v navržené geometrii. S ohledem na dočasný charakter konstrukce pavilonu byly navrženy jednoduché detaily, odvozené od tvaru a z vlastností tenké břízové překližky. (4)

2.2.5.2. *Hui&Wong pavilon*

Wing Yi Hui, Lap Ming Wong_Oslo, 2010



Obr.18) Hui&Wong pavilon – exteriér, detail a schéma

Experimentální pavilon ve tvaru rozevřeného dómu je příkladem konstrukce generované podrobným zkoumáním dřeva jako materiálu a jeho přirozených vlastností. Laminované tenké pásky dřevěné dýhy (0,6mm na bázi balzy) jsou zakřiveny a spojeny způsobem, vytvářejícím mřížovou strukturu. Zvlhčení tenkých dřevěných elementů způsobuje jejich zakřivení napříč vláknům, které zvyšuje jejich strukturální kapacitu. Klíčové vlastnosti dřeva, které vedou k tomuto jevu, spočívají v hygrokopii dřeva a jeho anizotropním chování (nestejné vlastnosti v různých směrech). Při navlhčení tenkého pásku dřevěné dýhy narůstá tlak mezi buňkami v mikrostruktuře dřeva, přijímajícími vlhkost. Toto zvýšené napětí v buněčné struktuře lze zachovat fixací tvaru zakřivené dýhy před vysušením a jejím opětovným zatížením. Komplexní strukturální uspořádání a chování dřeva, lze stěží přesně postihnout digitální simulací. Metodologie výzkumu proto spočívá v oscilaci mezi digitálním posouzením a fyzickým experimentem. (30)

2.2.5.3. *“Packed” pavilon z papírové lepenky*

Michele Leidi, Dominik Zausinger, Min-Chieh Chen, Tom Pawlofsky_ETHZ
_Shanghai, 2010

Projekt pavilonu prezentuje proces od digitálního návrhu modelu k CNC (computer numeric control) fabrikaci stavebních komponent. Konstrukce vrchlíku kulové plochy vzniká propojením sestavy kružnic (v prostoru komolých kuželů) různých velikostí podle předlohy z parametrického modelu (3D circpelacking). 409 kuželových elementů je CNC stroji vyřezáno, očíslováno a slepeno z 28 vrstev vlnité papírové lepenky. Každý element má v určené pozici předpřipravené otvory k fixaci plastovými sponami. V Curychu vyrobené součásti jsou převezeny do Shanghai a na místě zkompletovány. (31) Geometrie konstrukce kupole z kružnic je inovativní, statické působení nepravidelně distribuovaných kružnic je však diskutabilní.



Obr.19) “Packed” pavilon – exteriér a detail

2.2.5.4. *Reciprocal Frame*

ETHZ, Architecture&Technology seminar_Udo Thönissen_Zurich, 2010



Obr.20) Schéma; Reciprocal Frame Structures-ETHZ – exteriér

Reciproký rám je druh samonosné konstrukce, sestávající ze tří a více nosníků, vzájemně o sebe opřených tak, že překlenují rozpon bez střední podpory. Reciproký rám je známý také jako “mandalová střecha” a byl používán od 12. století v čínské a japonské architektuře. (32)

2.2.5.5. *Timber Fabric*

Markus Hudert, Yves Weinand_IBOIS/EPFL_Lausanne, 2009



Obr.21) Timber Fabric – exteriér a schéma

Příkladem jeden z výzkumných projektů platformy IBOIS na EPFL zabývajících se aplikací vzorů vazby textilních vláken v měřítku stavební konstrukce. Významová paralela mezi mikroskopickou strukturou vláken dřeva a textilní tkaniny je zde potenciálem pro vytvoření zcela bezprecedentních konstrukčních forem.

Konstrukce zakřivených forem vykazuje díky interakci propojených elementů výsledný nárůst prostorové stability a pevnosti. Empirický přístup, testování prototypů zakřivených forem je provázen snahou vyvinout digitální nástroje,

schopné tyto konstrukce přesně dimenzovat, optimalizovat a predikovat jejich chování pod vlivem zatížení. (2)

2.2.6. KONSTRUKCE VOLNÝCH FOREM – SHRUTÍ

Jak je zřejmé z uvedených příkladů, s využitím moderních technologií se významně rozšiřují možnosti uplatnění dřeva v soudobé architektuře. Experimentální a výzkumné projekty umožňují rozvoj těchto inovativních konstrukcí. Environmentální aspekt podporuje aplikaci dřeva v soudobé architektuře.

2.3 GEOMETRIE

Tato kapitola zachycuje vývoj zapojení geometrického axiomu kruhu – kulové plochy v architektuře v průběhu dějin a jeho význam pro architektonickou teorii a kompozici, popisuje vybrané geometrické definice možného konstrukčního členění kulové plochy. Je podkladem pro následnou fázi návrhu konstrukčních schémat. Z těchto schémat bude zvolena varianta pro podrobnější zpracování na úrovni konstrukčního systému a prototypu.

Pro prověření vzorců uspořádání konstrukce na klenebné ploše byla pro svoji komplexitu zvolena kulová plocha, základní tvar pro odvození kupole. Kulová plocha má konstantní poloměr zakřivení a současně již není přímkovou plochou, čímž je vhodným mezistupněm mezi rozvinutelnou přímkovou plochou (válec, kužel) směrem ke dvojkřivé ploše volných forem. Současně je z hlediska ekonomie vhodným tvarem pro velkorozponové zastřešení, jelikož při své ploše zastřešuje maximální možný objem. Je známo množství geometrických řešení kulové plochy, respektive kopule v uspořádání liniových prutových prvků či samonosných skořepin. Předmětem výzkumu je v rámci této práce prověření možnosti alternativních geometrických řešení – aplikací zakřivených konstrukčních prvků.

2.3.1. KRUH V ARCHITEKTUŘE

Kruh, jako základní geometrický element má v architektuře zásadní význam hned v několika rovinách. Je podstatným prvkem v kompozici architektonického díla, nosným prvkem v konstrukčním smyslu, hraje roli v měřítku detailu, tvarosloví i estetice. Podnikneme-li teoretický exkurz dějinami architektury, setkáme se s kruhem, válcovou či kulovou plochou, tedy průmětem kruhu do prostoru, v různých významových rovinách. Uplatnění kruhu v architektuře není, jak by se snad mohlo zdát, výhradně záležitostí teorie či estetiky, ale v mnoha případech je výsledkem přirozené volby z čistě utilitárních pohnutek.

Tento případ prezentuje už snaha našich předků při stavbě prvotních obydlí. Z větví a kmenů přibližně stejné délky, vzájemně opřených a na jednom konci svázaných vznikají improvizované kruhové chýše. Postupně je doplněna střední podpora, podezdívka naplní funkci stěny, dřevěná konstrukce se stává střechou. Překvapivě podobné tvarosloví v různých konstrukčních obměnách (v technicky rozdílném provedení) vidíme napříč kulturami a staletími u románské rotundy či indiánského teepee. Kruhový půdorys překlenutý střechou kuželového tvaru je zde výsledkem konstrukční nutnosti, omezené dostupností stavebního materiálu (délka dřevěných prvků k překlenutí centrálního prostoru).

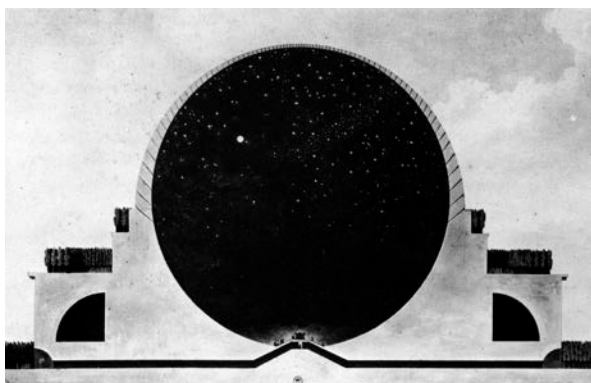
O poznání později se půlkruh objevuje ve formě klenebního oblouku v antickém Římě. Půlkruh jako zaklenutí rozponu z množství identických stavebních prvků (kamenů či cihel) je významným technickým posunem od přečnčkové klenby, užívané do té doby v antickém Řecku či starověkém Egyptě.

Půlkruhový tvar blížící se staticky efektivnímu zakřivení řetězovky (tvar výhodnější pro přenos svislých sil do podpor a do základů) umožnil překlenout otvory s větší světlostí při zachování potřebné únosnosti.

V měřítku stavebního detailu se kruh projevuje mj. jako průřez sloupu. Staticky výhodný kruhový průřez je souměrný a identicky tuhý v obou osách, rovnoměrně přenášejí zatížení, respektive tlak z vnějšku. Spolu s postupujícím stavem poznání a novodobou technologií sledujeme snahu o efektivní zapojení hmoty průřezu. Masivní kruhový průřez (kámen, později beton) nahrazuje vylehčená tenkostěnná trubka (ocel). Sloup – pilota – vrt – studna – kruhové schodiště: zde se uplatní kruh především díky svým statickým přednostem.

Kulová plocha, jejímž řezem je kruh ve všech třech prostorových rovinách, je v architektonické teorii vnímána jako dokonalá geometrie, ztělesnění universa a absolutna. Kružnice jako půdorys rotační kupole a geometrické souvislosti vztažené ke (či odvozené z) kruhu v půdorysu či v řezu se pak jako centrální prvek objevuje především v církevních a monumentálních stavbách napříč styly a obdobími. Římský Pantheon s půlkulovou klenbou završenou kruhovým světlíkem, kruhové chrámy bohyně Vesty, tholos bohyně Athény v Delfách, Epidauru. V renesanci je kruh samotným konceptem centrální kompozice vztažené k těžišti kupole (Donato Bramante - Tempietto, Andrea Palladio, Filippo Brunelleschi – kupole florentského dómu). Leonardo da Vinci sestavuje renesanční kánon jako kruh a čtverec opsaný lidské postavě, sloužící jako universální předloha pro odvození měřítka a proporcí. V období osvícenství vznikají fantastické vize Etienne-Louis Boulléeho – projekt Newtonova kenotafu (1784), monstrózního glóbu nadlidského měřítka jako pocta Isaaku Newtonovi. Architektura se oproštuje vazby na anatomická proporční pravidla obecně platná v období renesance, uznávány jsou čisté geometrické axiomy.

Kulová plocha je současně tělesem o maximálním objemu při minimálním povrchu. Splňuje proto předpoklady pro ekonomicky efektivní stavby. Snaha poskytnout levné, rychle sestavitelné zastřešení o minimálním povrchu vedla R.B.Fullera k práci na geodetických kupolích složených z množství trojúhelníkových ploch. Vzniká tak geodetická kupole Montreal Biosphere o rozponu překračujícím 70m, realizovaná jako Americký pavilon pro Expo 1967.

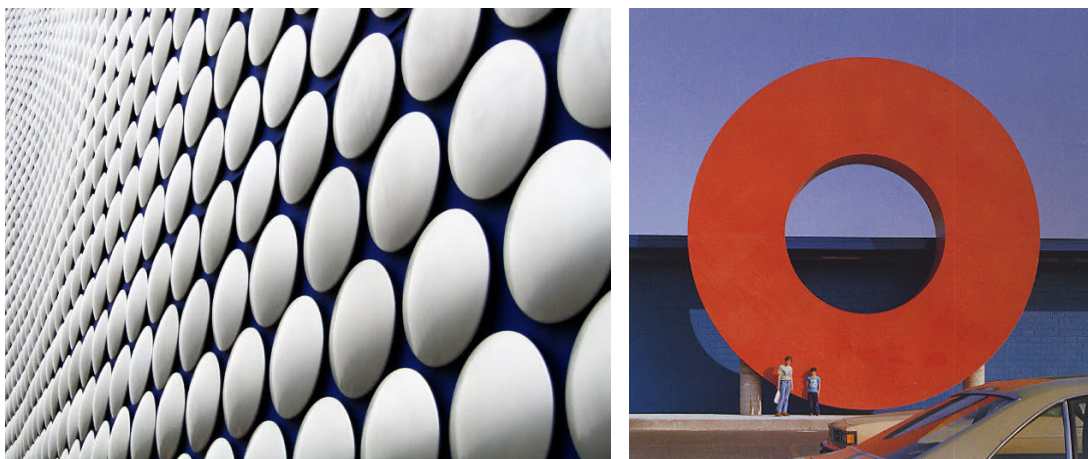


Obr.22) Newtonův kenotaf, Etienne-Louis Boulée, 1784. (33)
Americký pavilon, Montreal Expo 67. 1967, obr. MCA Chicago. (34)

Kruh jako estetický prvek: Byť moderní architektura deklarovala oproštění od veškerých estetických prvků a stavby byly prohlašovány za čisté funkční „stroje na bydlení“, právě inspirace a obdiv k technice, estetice strojů, vozů a letadel propůjčila domům této doby některé estetické prvky, svědčící nepochybně o jejich aviatickém, nautickém či obecně technicistním původu. Jedním z detailů přejatých z námořního prostředí je bezesporu kruhové okno, které se v této době ve větší míře

objevuje jako čistě estetický prvek. Ve svém původním uplatnění ryze účelně zvolený tvar kruhu, který dokonale kopíruje otvor v zakřiveném plášti lodi a současně odolá tlaku větru a náporům mořských vln. Ať už zde prvotní inspirace byla jakákoli, dnes zdobí kruhové disky fasádu obchodního domu Selfridges v Birminghamu (Future Systems, 2003).

Kruh také vnímáme jako signální prvek, grafické značení v architektuře, identifikační prvek, logo, značku. Kruh je jako centrální geometrie prvek poutající pozornost. Ne bezdůvodně je kruh jedním z tvarů dopravních značek, zavedeným tvarem obchodních značek, nadčasovým vzorem v módě a designu. V architektuře má své místo v detailu, jako kompoziční prvek, v oblasti grafického značení, nebo jako prostředek zdůraznění identity místa.



Obr.23) Future Systems, OD Selfridges, Birmingham, dokončeno 2003. (35)
Izenour S., Case J. & Venturi: Oxford Valley Mall, Bristol: BASCO Showroom, písmeno "O" z loga společnosti, 1979. (6)

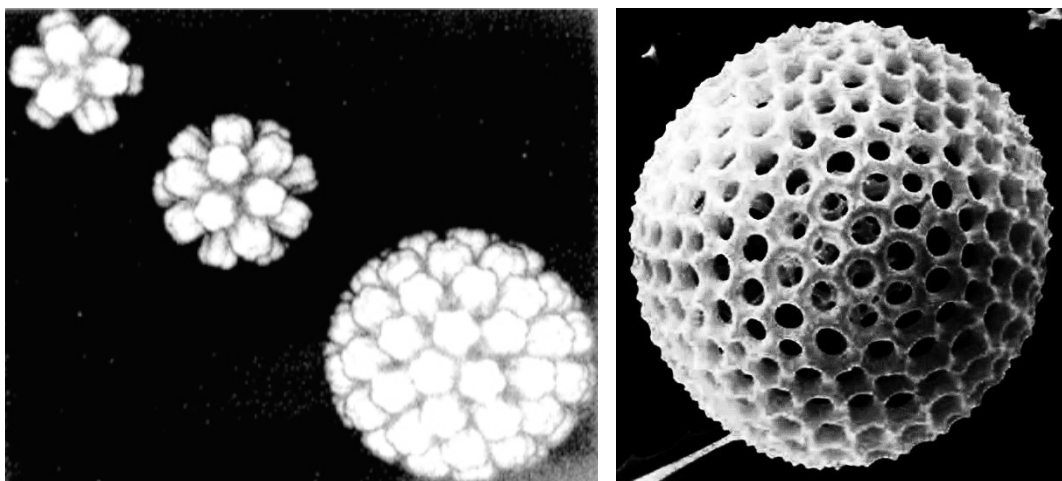
Následující kapitola popisuje geometrii geodetické kupole, od níž je dále odvozena aplikace kružnice na kulové ploše.

2.3.2. GEODETICKÉ KUPOLE

Popisem geodetických konstrukcí se zabýval v 50. letech 20. století R. Buckminster Fuller (1895 – 1983) s cílem navrhnout extrémně lehkou, staticky a konstrukčně efektivní konstrukci velkorozponové kupole. Jeho úsilí následovala řada patentů, které ve Spojených státech amerických R. B. Fuller registroval v průběhu 60. a 70. let 20.stol.¹

Předobrazy Fullerových geodetických struktur lze vysledovat v přírodě, což potvrzuje jejich účelnost a konstrukční efektivitu. Šestiúhelníková síť na kulové ploše je zřetelně patrná na tvaru kapsidového proteinu polyomavirů či uspořádání křemičitých schránek mikroskopických mořských mřížovců (radiolaria). Objev molekuly C₆₀, uspořádané z 12-ti pravidelných pětiúhelníků a 20-ti šestiúhelníků na sférické ploše podle vzoru Fullerova "buckyballu" odstartoval intenzivní chemický výzkum a dal vzniknout novému odvětví - chemii Fullerenů (80.léta 20. století).

¹ Z patentů vztahujících se k tématu této práce uvedme například Patent 3203144 – Laminar Geodesic Dome (1965), kde je patentována aplikace deskových panelů na geometrii 4V sférického ikosaedru; nebo 3810336 – Geodesic Pentagon and Hexagon Structure (Fuller&Sadao Inc., 1974), popisující konstrukci kupole, respektive haly odvozené od geometrie 3V sférického ikosaedru.

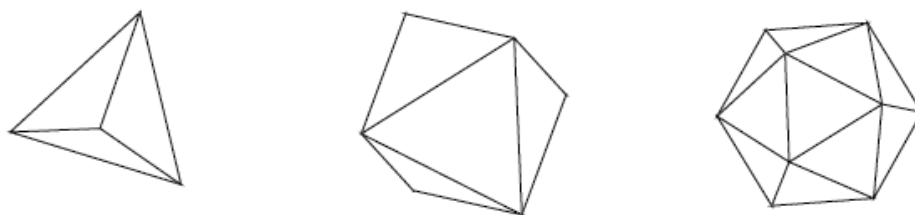


Obr.24) Kapsidové proteiny polyomaviru (obr. Prof. D.L.D. Caspar) (11) a sférická radiolaria (obr. Dr. S. A. Kling) (36)

Geodetická kupole je sestavená z přímých prutů v trojúhelníkovém uspořádání tak, že vrcholy trojúhelníka leží na sférické ploše. Jedná se tedy o mnohostěn, který lze výhodně sestavit z množství krátkých (ve srovnání s rozponem) přímých prutových prvků. Trojúhelníkové uspořádání prutů zajišťuje prostorovou tuhost celé konstrukce (je žádoucí, aby se v konstrukci nevyskytovaly polygony s více než třemi vrcholy, protože ve styčnicích pak dochází k ohybu a tedy ztrátě tuhosti). Staticky a konstrukčně ideálního uspořádání kupole výhradně pravidelně rozložených rovnostranných trojúhelníků lze dosáhnout jen ve třech případech Platónových těles, proto se v případě geodetických kupolí setkáváme s proměnlivou délkou prutů v konstrukci. Z hlediska montáže je žádoucí dosáhnout minimální variantnosti délek prutů. Současně je staticky výhodné, aby trojúhelníky byly blízké rovnostrannému trojúhelníku, tak aby se síly v prutech roznášely rovnoměrně. Je zřejmé, že spolu s růstem měřítka je vhodné drobnější členění plochy na větší počet menších trojúhelníků tak, aby jednotlivé pruty nebyly příliš dlouhé a namáhané na ohyb. (9)

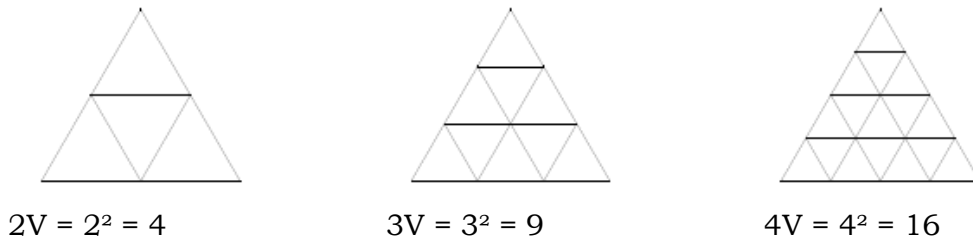
Jak již bylo zmíněno výše, přesné geometrické mnohostěny, složené výhradně z rovnostranných trojúhelníků vzájemně svírajících stejný úhel jsou pouze tři z pěti Platónových těles:

- tetraedr (pravidelný čtyřstěn, tedy jehlan, jehož základnu i všechny tři boční stěny tvoří rovnostranné trojúhelníky)
- oktaedr (pravidelný osmistěn)
- ikosaedr (pravidelný dvacetistěn)



Obr.25) Platónova tělesa: tetraedr, oktaedr, ikosaedr (9)

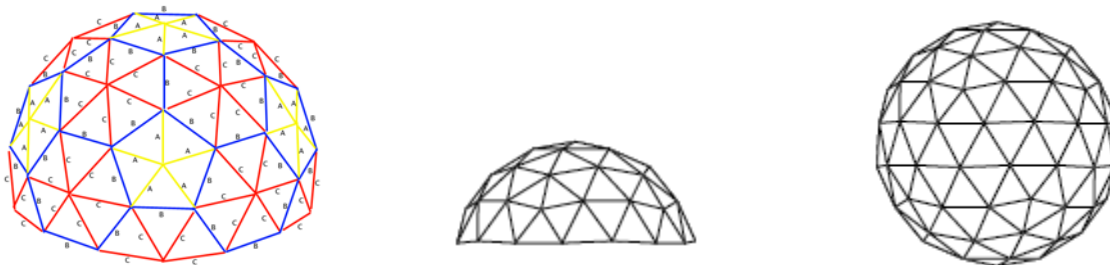
Od těchto mnohostěnů (nejvýhodněji z dvacetistěnu) jsou pak dalším rozdělením jejich stěn dílčími trojúhelníky a jejich promítnutím na kulovou plochu odvozeny konstrukce geodetických kupolí. Podle řádu členění (díličního rozdělení hran mnohostěnu) pak rozlišujeme tzv. 2V, 3V, 4V, 5V ... nV geodetické kupole.



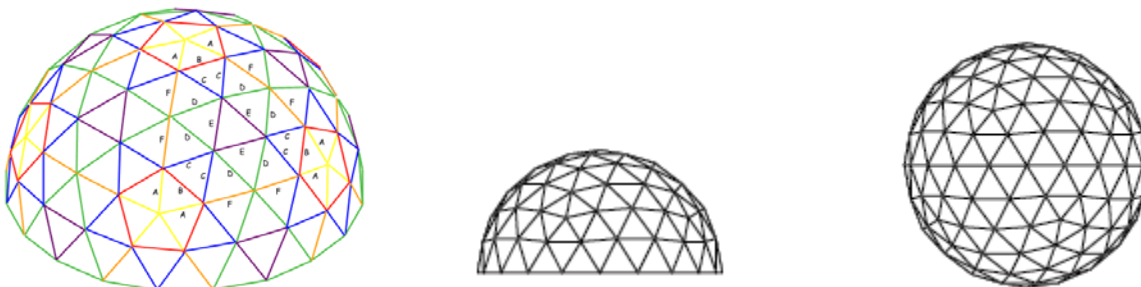
Obr.26) Schéma určení řádu díličního členění stěny n-stěnu (9)



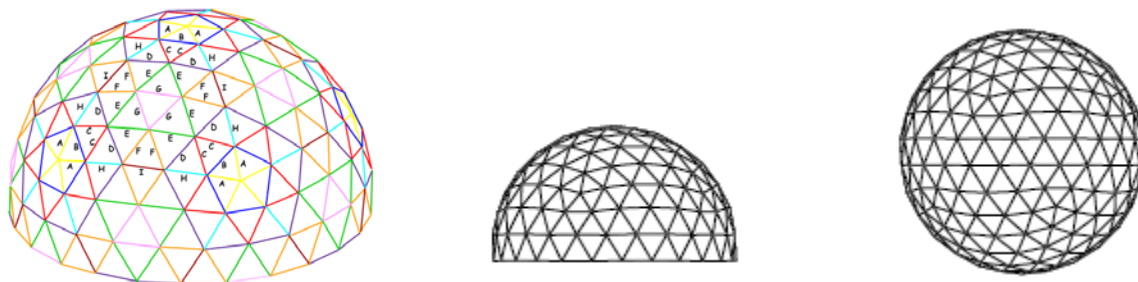
Obr.27) 2V ikosaedr/kupole a sféra (2 délky prutů) (37)



Obr.28) 3V ikosaedr/kupole a sféra (3 délky prutů) (37)



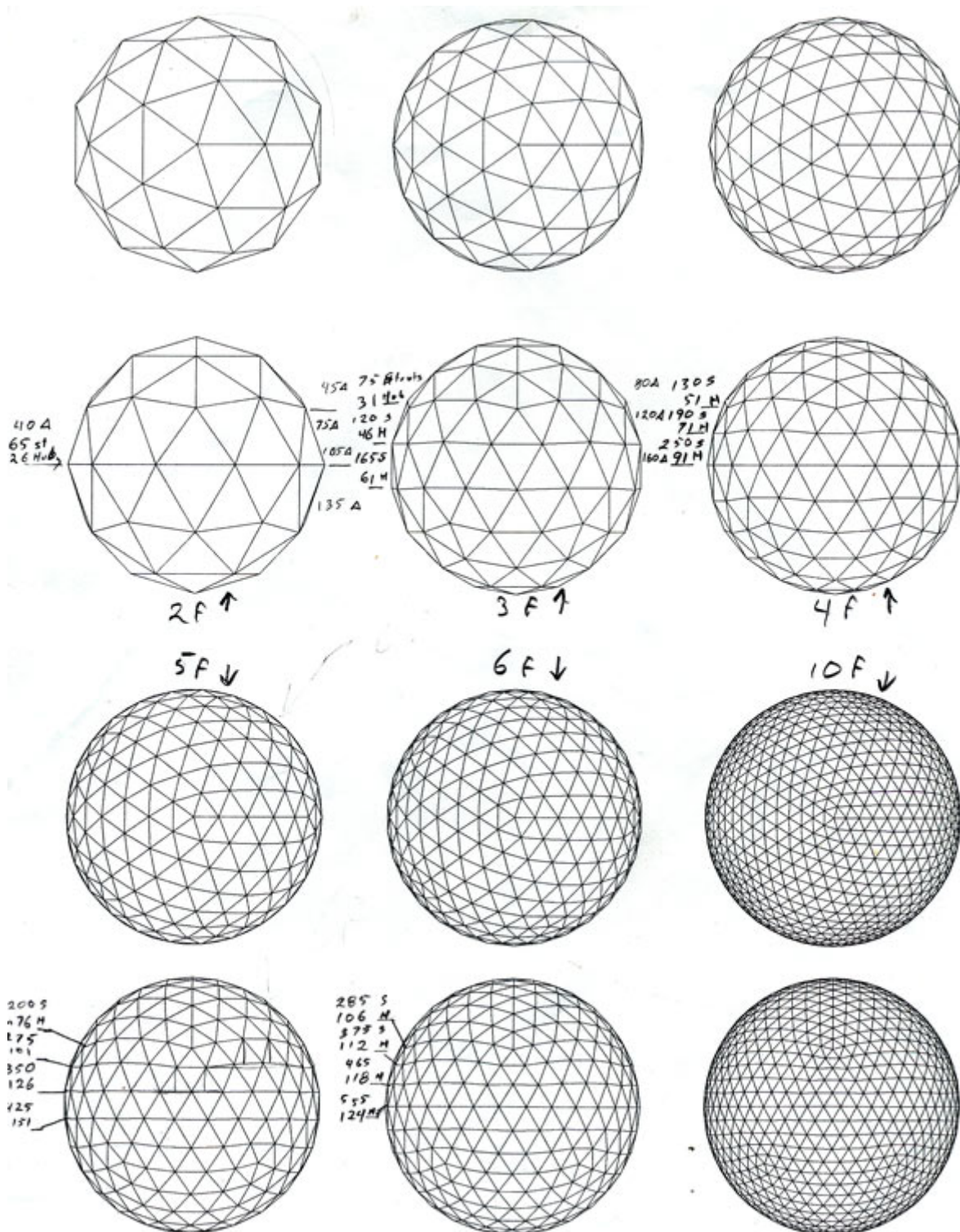
Obr.29) 4V ikosaedr/kupole a sféra (6 délek prutů) (37)



Obr.30) 5V ikosaedr/kupole a sféra (9 délek prutů) (37)



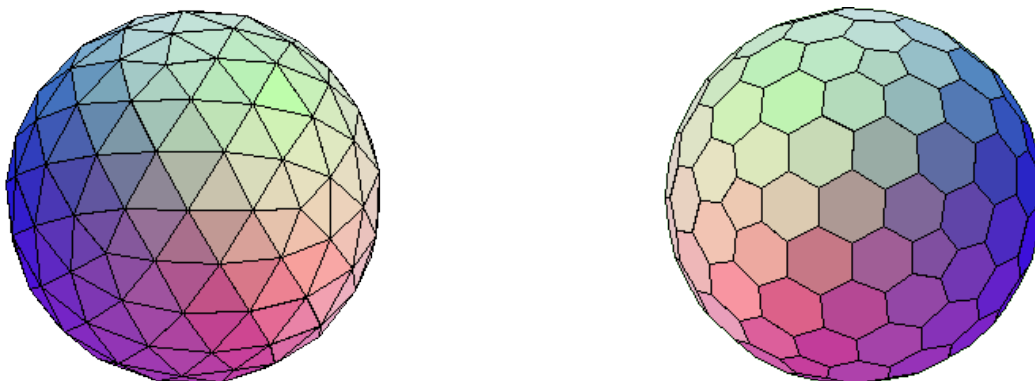
Obr.31) 6V ikosaedr/kupole a sféra (9 délek prutů) (37)



Obr.32) Přehled frekvence členění ikosaedru: 2, 3, 4, 5, 6, 10 V (znázorněn je půdorysný i bokorysný průmět) (38)

Je zřejmé, že v žádném z těchto těles (2V, 3V, 4V ... nV geodetické kupoli) není zachována jednotná délka prutů (stran trojúhelníků). Počet délek prutů (hran n-stěny) vyskytujících se v konstrukci roste spolu s řádem dělení stěn nativního ikosaedru. Dále platí, že pro každou geodetickou sféru lze odvodit tzv. „duální mnohostěn“ tzn. n-stěn, složený z ploch šestiúhelníků v kombinaci s pětiúhelníky. Ten vznikne umístěním vrcholů do „středů“ stěn původního mnohostěnu a jejich

spojením hranami tak, že vrcholy ležící v sousedních stěnách původního mnohostěnu jsou v jeho duálu spojeny hranou (39).



Obr.33) Geodetická sféra a její duál (40)

Dílčí plochy duálu geodetické sféry se ve svém uspořádání blíží příznivému konstrukčnímu schématu hexagonální mřížky. Opět zde však platí, tak jako nelze (mimo případ tří zmíněných Platónových těles) sférickou plochu sestavit výhradně z rovnostranných trojúhelníků, nelze také na této ploše dosáhnout konstrukčně optimálního pravidelného rozmístění rovnostranných šestiúhelníků.

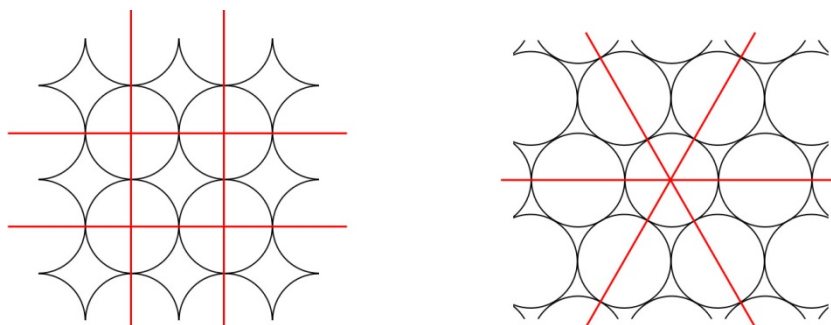
Uspořádání ploch mnohostěnu duálu geodetické sféry (respektive pozitivu geodetické sféry samotné) lze s výhodou využít pro odvození geometrie kupole, sestavené z ohýbaných prutových prvků. Vybraným vzorcům rozmístění/uspořádání n -úhelníků na mnohostěnu jehož vrcholy leží na sférické ploše lze vepsat kružnice. Kružnice lze rozmístit tak, že spojnice jejich středů vytvářejí geodetický n -stěn a současně obvody kružnic leží na sférické ploše opsané tomuto geodetickému n -stěnu. Z principu geodetických konstrukcí sestavených z prutů nestejné délky je zřejmé, že taktéž průměry kružnic vepsaných mnohostěnum budou v těchto případech různé, neidentické. Jednotlivým konkrétním variantám tohoto řešení bude podrobněji věnována kapitola 2.3.3.

2.3.3. “CIRCLEPACKING” - TĚSNÉ USPOŘÁDÁNÍ IDENTICKÝCH KRUŽNIC NA KULOVÉ PLOŠE

Problematika rozmístění kružnic na sférické ploše je v matematice známa pod pojmem “circlepacking”. Jedná se v jistém smyslu o optimalizační úlohu distribuce kružnic na zadaném půdorysu (v rovinné ploše) či tělese (v prostoru). Vstupními parametry může být také průměr kružnic, počet kružnic či styčných bodů, inovativních výsledků lze dosáhnout při aplikaci atraktorů apod. Toto téma není čistě fiktivním matematickým konstruktem – řada živých organismů a přírodních útvarů (pylová zrna, virové částice, uspořádání molekuly C60) využívá s výhodou specifického prostorového uspořádání kružnic na kulové ploše. Odvozená prostorová schémata našla uplatnění v mnoha technických a přírodních oborech (biologie, chemie, fyzika, matematika). Tato problematika je v literatuře rozsáhle pojednána (11), (10) a není tedy předmětem zkoumání této práce. Pro účel tohoto výzkumu uvádím relevantní data v omezeném rozsahu.

Jako výchozí bod pro hledání matematického předpisu efektivního uspořádání kruhových prvků na sférické ploše uveďme srovnání dvou základních možností pravidelného uspořádání kružnic v ploše. Je zřejmé, že mechanické vlastnosti navržené konstrukce budou záviset především na způsobu uspořádání kruhových elementů. (8)

- Kvadrilaterální uspořádání
každá kružnice je napojena na sousední kružnice ve 4 bodech
snadná montáž
menší prostorová stabilita
- Hexagonální uspořádání
každá kružnice je napojena na sousední kružnice v 6-ti bodech
náročnější montáž
výborná prostorová tuhost

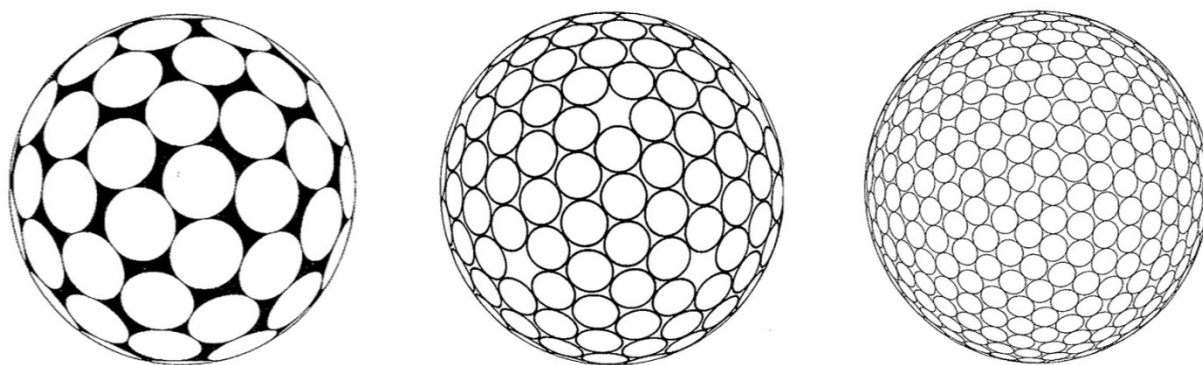


Obr.34) Kvadrilaterální a hexagonální uspořádání kružnic

S ohledem na staticky výrazně efektivnější, prostorově těsnější hexagonální uspořádání kružnic, kdy středy tří sousedních kružnic vytvářejí v ideálním případě rovnoramenný trojúhelník, bylo toto schéma zvoleno pro odvození geometrie na sférické ploše.

Popisem matematického řešení nejtěsnějšího možného uspořádání identických kružnic na kulové ploše, se na základě předobrazů v přírodě věnuje T. Tarnai (11).

Geometrická schémata (Obr.35) ukazují nejtěsnější možné rozmístění 72 – 180 – 492 identických kružnic na kulové ploše. Je zde zřejmé, že v těchto případech není dosaženo žádaného pravidelného rozvržení kružnic, tedy ani optimálního statického namáhání. Další možností směrem k hledání efektivního vzorce uspořádání kružnic na kulové ploše zdá se být zavedení několika rozdílných poloměrů kružnic v triangulárním či kvadrilaterálním uspořádání.



Obr.35) Nejtěsnější možné uspořádání 72-180-492 identických kružnic na kulové ploše (podle G. Kollera) (11)

2.3.4. ČLENĚNÍ SFÉRICKÉ PLOCHY PRŮMĚTEM POLOPRAVIDELNÝCH MNOHOSTĚŮ

Mimo výše zmíněné geodetické sféry, vznikající průmětem pravidelného mnohostěnu na kulovou plochu, poukazuje Zachystal na možnost odvozovat nové vzory členění sféry průmětem poloprávdelného mnohostěnu (všechny stěny tělesa nejsou tvořeny stejnými n -úhelníky) na kulovou plochu, (Obr.36) varianty A, B. Dále pak je inspirativní postřeh hierarchizace konstrukčních prvků v takto členěných kupolích a identifikace vznikajících zakřivených prvků, (Obr.37) varianta C: “Kolem vrcholů těchto mnohostěňů se na kouli opisují rovnoběžky dělené poledníky ... tím vznikají konstrukční prvky vyššího řádu, jakoby jakési talíře, které se navzájem dotýkají svými styčnými body nebo styčnými pruty ... u tohoto druhu se s menší mírou rozdílnosti prutů vytváří daleko bohatší a variabilnější design kupole než u oněch dvou druhů předchozích.” (41) Ve výsledku vznikají inovativní varianty výhodného uspořádání příhradoviny kupole s možností zapojení zakřivených kruhových, případně eliptických prvků.

M. Zachystal hovoří o třech kategoriích geometrického dělení n -stěňů, respektive sférických ploch:

- kontinuální

lze neomezeně dělit na stále menší části

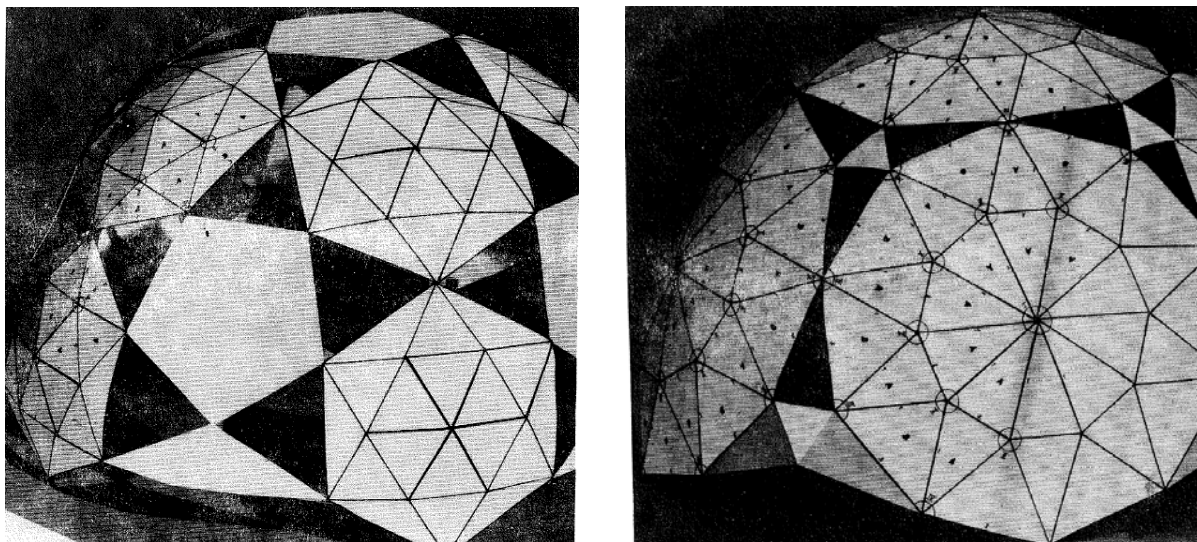
- pravidelné

lze dělit na pravidelné části

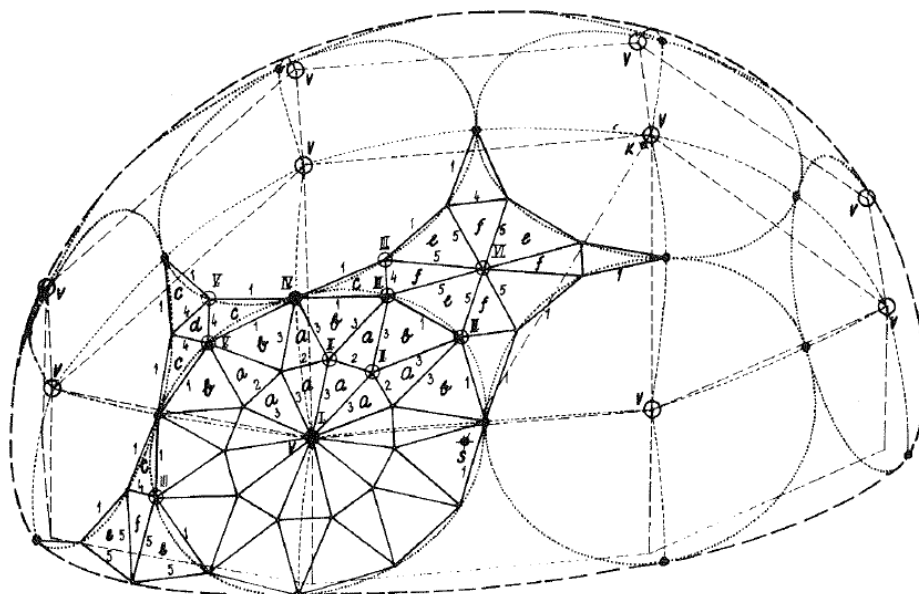
- homogenní

lze dělit na identické části

Tyto tři podmínky jsou naplněny jen při geometrickém dělení hexaedru (tedy krychle). Stále je však smysluplné a konstrukčně opodstatněné zabývat se geometrickým dělením sférické plochy, jako předlohy konstrukce kupole.



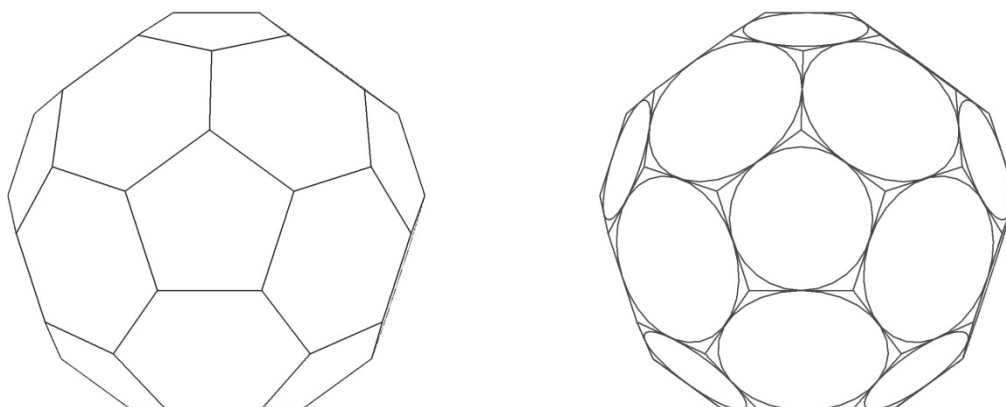
Obr.36) Varianty A, B členění kulové plochy podle M. Zachystala (41)



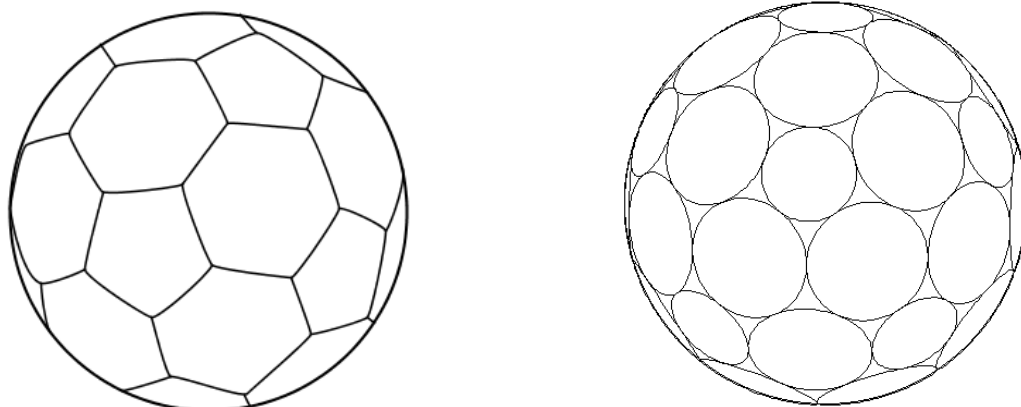
Obr.37) Varianta C členění kulové plochy podle M. Zachystala (41)

Podle geometrických schémat prof. M. Zachystala (Obr.36) Obr.37) autorka zpracovala studijní prostorové modely (kapitola 3).

Další z možností jak odvozovat členění sférické plochy kruhovými prvky je zavedení několika rozdílných poloměrů kružnic. S výhodou lze využít základních těles polopravidelných mnohostěnů, jejichž stěnám vepíšeme kružnice. Pro příklad zde uvedme 3V geodetickou sféru, odvozenou průmětem ikosaedru na sférickou plochu. Jedná se o těleso mimořádně odolné struktury, popsané R. B. Fullerem, které nachází uplatnění hned v několika odvětvích - jde o tvar molekuly C₆₀, tzv. "Buckminsterfullerenu", mj. také certifikovaný stříh fotbalového míče. Tzv. fullereny, tvarem blízké kouli jsou pro svoji výjimečně pevnou strukturu v současné době intenzivně zkoumány. Vepsáním kružnic pětiúhlým a šestiúhlým stěnám 3V geodetické sféry získáváme sadu kružnic o dvou poloměrech velmi těsně a v pravidelném uspořádání vyplňující sférickou plochu (Obr.39) Tímto vzorem uspořádání se s ohledem na pevnost výsledné konstrukce významně přibližujeme staticky optimální hexagonální mřížce (Obr.34)



Obr.38) 3V ikosaedr (C₆₀ fulleren) a tentýž objekt s vepsanými kružnicemi



Obr.39) 3V geodetická sféra (3V ikosaedr promítnutý ze středu na kulovou plochu) a tentýž objekt s vepsanými kružnicemi (42)

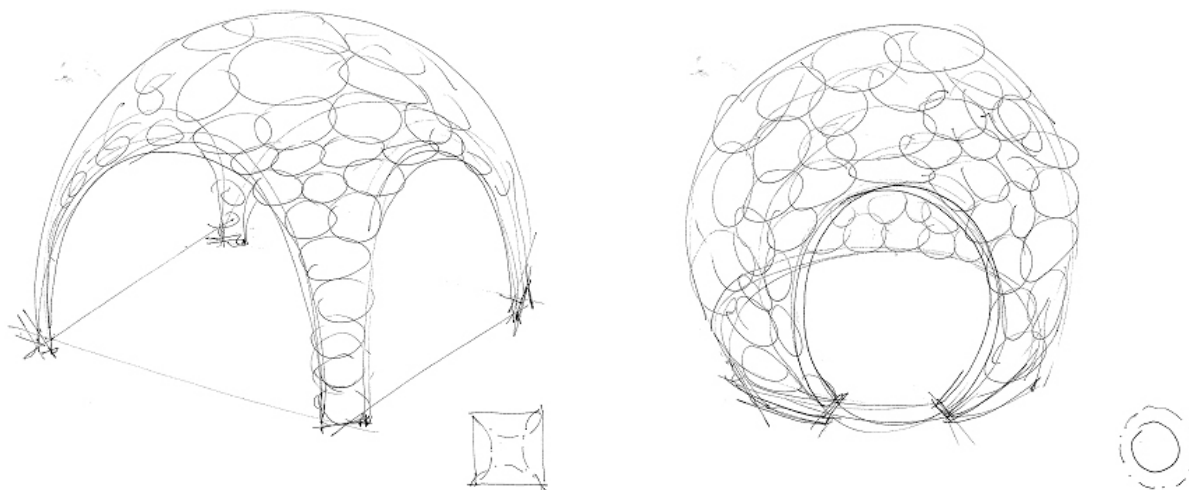
2.3.5. ČLENĚNÍ KULOVÉ PLOCHY – SHRNUTÍ

V zásadě můžeme na základě poznatků teoretické rešerše předchozí kapitoly identifikovat následující způsoby členění kulové plochy (srov. Zachystal (41)):

- členění kulové plochy na rovnoběžky a poledníky (případně doplněné diagonálami zavětrování)
- geodetické členění kulové plochy
promítnutí n -stěnu ze středu koule na její povrch, přičemž vrcholy n -stěnu jsou spojeny křivkami ležícími na kulové ploše o minimální délce (vznikající sférické pravidelné mnohostěny jsou průmětem pěti základních Platónových těles: čtyřstěn, krychle, osmistěn, dvanáctistěn, dvacetistěn). Další dělení sférického mnohostěnu lze s výhodou aplikovat na ikosaedr (20-ti stěn). Vznikající trojúhelníky postrádají rovnostrannost. Zde hovoříme o geodetických kupolích.
- členění kulové plochy polopravidelnými mnohostěny
promítnutím polopravidelných mnohostěnu ze středu koule na její povrch vznikají polopravidelné sférické mnohostěny. Např. průmětem komolého ikosaedru, jehož stěny tvoří pravidelné šestiúhelníky a pětiúhelníky vzniká zjednodušená 3V geodetická sféra (srov. Obr.28) Obr.39)
- odvozené členění kulové plochy zakřivenými kruhovými prvky “circlepacking”
z výše zmíněných způsobů členění sférické plochy průmětem přímek či mnohostěnu lze odvodit vzorce uspořádání kružnic na kulové ploše, vepsaných stěnám promítnutých mnohostěnu. Takto konstruované kupole budou prezentovány na prostorových modelech v následující kapitole.

3. EXPERIMENTÁLNÍ MODELY KLENEBNÝCH KONSTRUKCÍ

Paralelně se studiem matematické teorie průběžně probíhalo jako součást této práce empirické ověření nastudovaných poznatků na pracovních modelech. Jako podklad pro modely vznikaly skici, nastiňující možné praktické aplikace testovaných schémat.

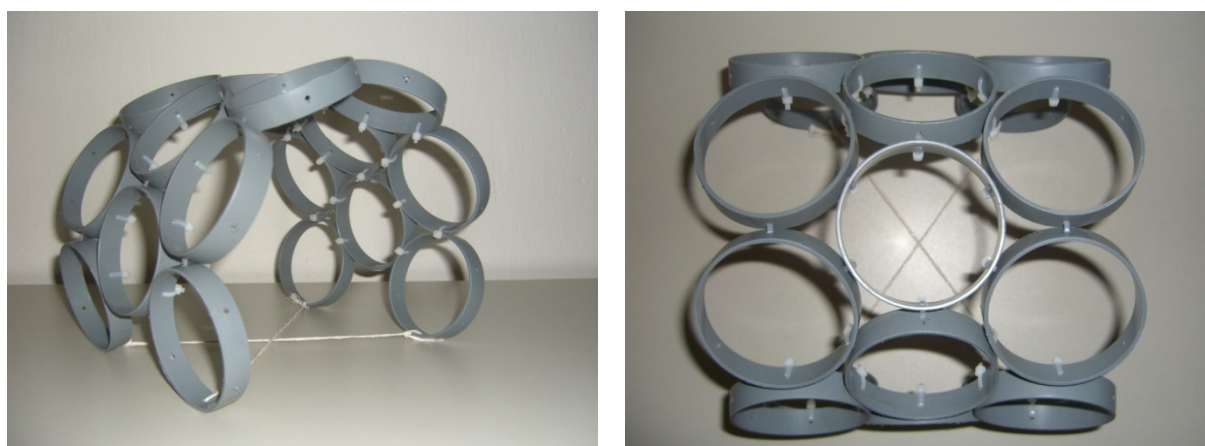


Obr.40) Skica experimentální konstrukce

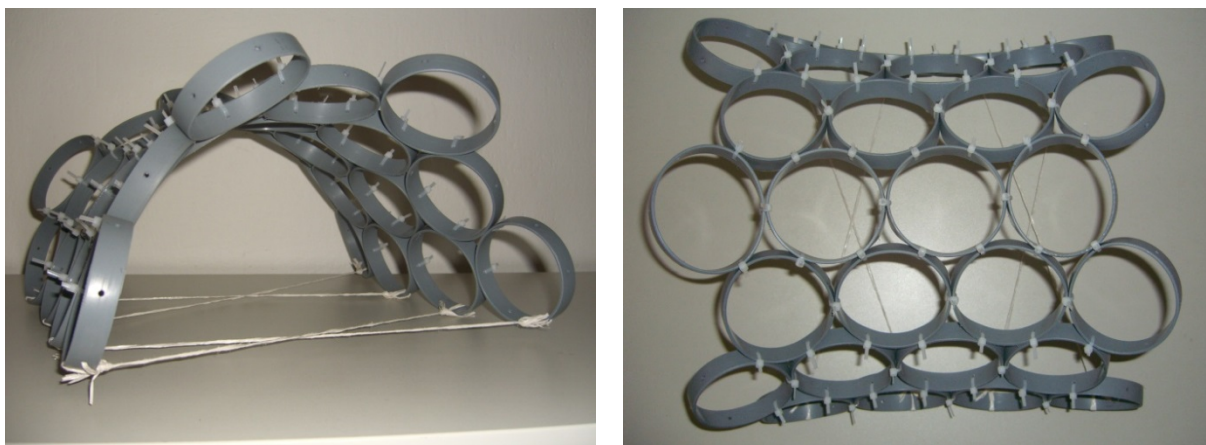
3.1 MODELY KLENEB NAD OBDÉLNÝM PŮDORYSEM

Jako první vznikaly modely s cílem překlenout plochu obdélného půdorysu stereotomní konstrukcí složenou z kružnic identického poloměru. Byla prověřena dvě schémata (vzorce) uspořádání kružnic – kvadrilaterální a hexagonální (Obr.34) a dva různé způsoby spojů, výrazně ovlivňujících výslednou geometrii a pevnost konstrukce.

Tyto modely byly sestaveny jako plochá síť kružnic, posléze formovaná stažením v patě klenby. Kružnice o výšce 15mm byly nařezány z plastové HT trubky DN70, provrtány ve střední ose a jako spojovací element byla použita plastová stahovací páska na kabely. Ve fázi tvarování klenby se výrazně projevilo rozdílné chování sítě kružnic, podle toho, kterým směrem vzhledem k poloze spojů byla ohýbána. Pokud jsou spoje na vnitřním líci klenby, umožní oddálení okrajů kružnic na vnějším líci a výsledný tvar se blíží válcové klenbě (Obr.41) Pokud jsou spoje na vnějším líci klenby, pevně fixují okraje kružnic při sobě, způsobí deformaci tvaru kružnic a současně tvaru klenby. Klenba má tvar rotačního hyperboloidu (Obr.42) Takto vytvořená konstrukce má značné vnesené napětí, zvyšující její výslednou únosnost a tuhost, ke které přispívá také zmíněné prostorové zakřivení. Ve výsledku jde o kombinaci vektorového přenosu sil a únosnosti tvarem konstrukce.



Obr.41) Model klenby nad obdélným půdorysem – spoje na vnitřním líci klenby

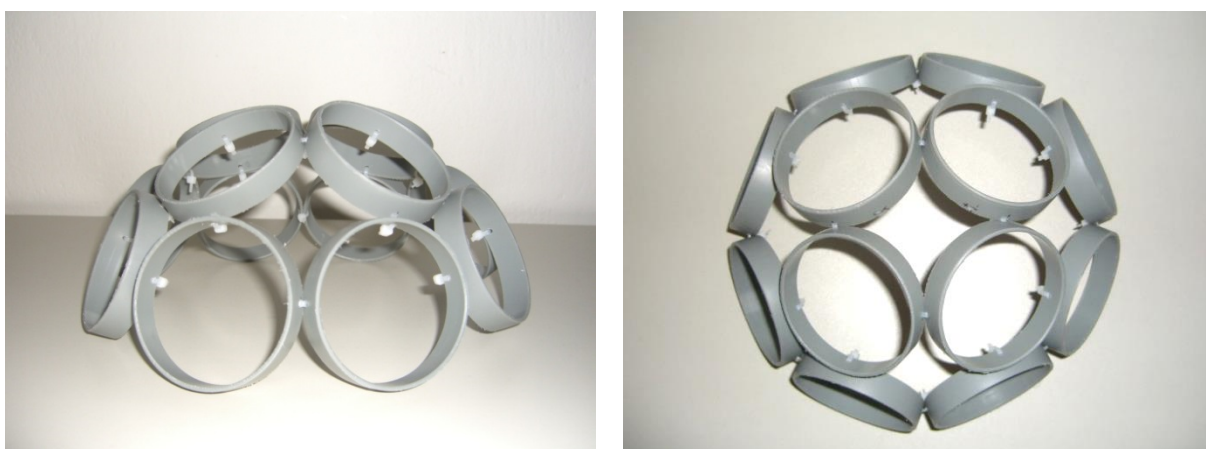


Obr.42) Model klenby nad obdélným půdorysem – spoje na vnějším líci klenby

3.2 MODELY KLENEB NAD KRUHOVÝM PŮDORYSEM

V návaznosti na modely válcových kleneb vznikla série modelů sférických kleneb složených z kružnic, ve snaze najít řešení uzavřeného tvaru zastřešení nad daným půdorysem. Jedná se o modely tvaru vrchlíku kulové plochy, tedy výchozího tvaru pro konstrukci kupole. Jednotlivé vzory uspořádání kružnic jsou odvozeny od výše popsaných geodetických konstrukcí a od schémat vznikajících průmětem poloprávdelných mnohostěnů na sférickou plochu podle M. Zachystala (41). V některých případech bylo zavedeno více poloměrů kružnic v konstrukci. S ohledem na volnost tvarování výsledné plochy byly spoje kružnic posunuty ze střední osy blíže k vnitřnímu líci klenby. Ve výsledku vznikla reprezentativní skupina klenebných modelů sestavených z kruhových prvků, u nichž je možné srovnat a vyhodnotit výslednou stabilitu, pevnost, náročnost výroby a možnosti potenciální aplikace schématu na stavební konstrukci.

Průmětem poloprávdelného mnohostěnu na sférickou plochu vzniká následující vzor uspořádání kružnic na kulové ploše. Model je sestaven podle geometrických schémat M. Zachystala (Obr.37) Jde o originální způsob sestavení sféry z 24 kružnic, které jsou opsány 11ti-úhelníkem. Z toho plynou vyšší nároky na postup sestavování konstrukce, vzhledem k nepravidelně rozmístěným spojům. Tato zvláštnost je také jistou nevýhodou pro distribuci sil v konstrukci. Jednotlivé kružnice jsou při nárůstu zatížení nestejně deformovány.



Obr.43) Model “varianty C” členění kulové plochy podle M. Zachystala (41)

Jednodušší ze sestavených sférických modelů je odvozen podle vzoru 2V geodetické kupole viz. (Obr.27) Jde o polokouli sestavenou z šesti kružnic opsaných pětiúhelníkům, které tvoří 2V ikosaedr (Obr.44) Pro relativně malý počet dílčích kružnic v konstrukci (a s tím související omezený rozpon) uvažujeme v měřítku stavební konstrukce spíše násobení sestavy pro zastřešení halových staveb s bodovými podporami, případně pro konstrukci fasády, nebo jako jednotlivé světlíky v plášti stavby. Propojením několika modelů tohoto schématu kloubovými spoji vzniká struktura s pozoruhodnými mechanickými vlastnostmi, nabízejícími vytvářet superstruktury ne nepodobné přírodním předobrazům z mikroskopické oblasti virů (Obr.24)



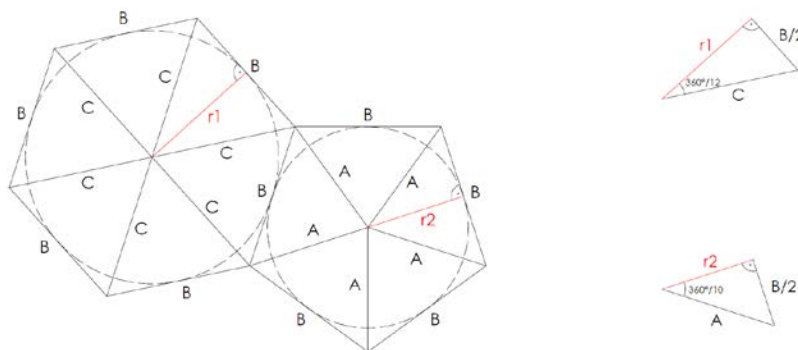
Obr.44) Model sférické klenby odvozený od 2V geodetické kupole

O řád vyšší geodetickou konstrukcí je následující model, odvozený od 3V ikosaedru, tzv. “buckminsterfullerenu” (Obr.28) U 3V ikosaedru se setkáváme se třemi různými délkami prutů v kombinaci pětiúhelníků a šestiúhelníků se stejnou délkou hran. Zde se nabízí zavést dva různé poloměry kružnic, vepsaných těmto pravidelným stěnám (Obr.39) Pro pracovní model byly zvoleny nejbližší dostupné poloměry kružnic odpovídající jejich vypočtenému poměru (25 mm, 20 mm). Vzájemný poměr poloměrů kružnic $\frac{r1}{r2} = 0,79$.

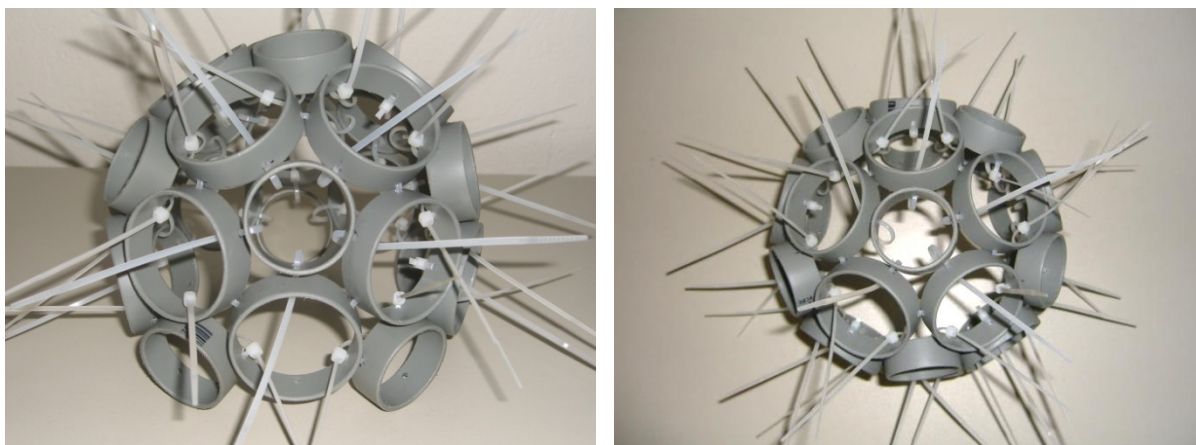
$$r1 = 0,5B \div \text{tg } 30^\circ$$

$$r2 = 0,5B \div \text{tg } 36^\circ$$

$$\frac{r1}{r2} = \frac{\text{tg } 30^\circ}{\text{tg } 36^\circ} = 0,79$$

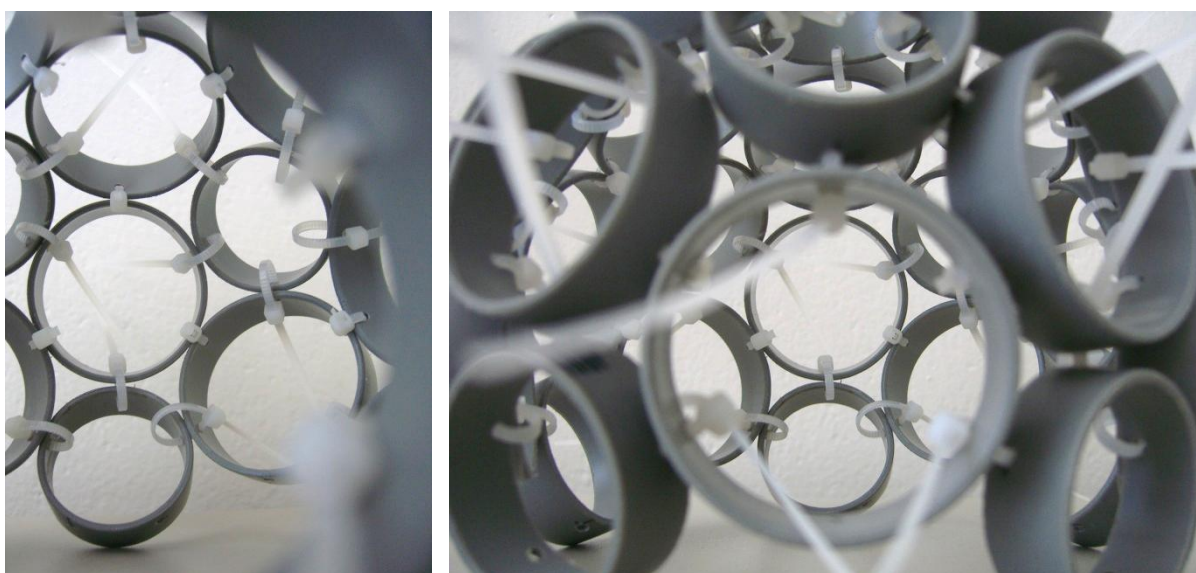


Obr.45) Schéma výpočtu vztahu $\frac{r1}{r2}$ 3V ikosaedru



Obr.46) Model sférické klenby odvozený od 3V geodetické kupole

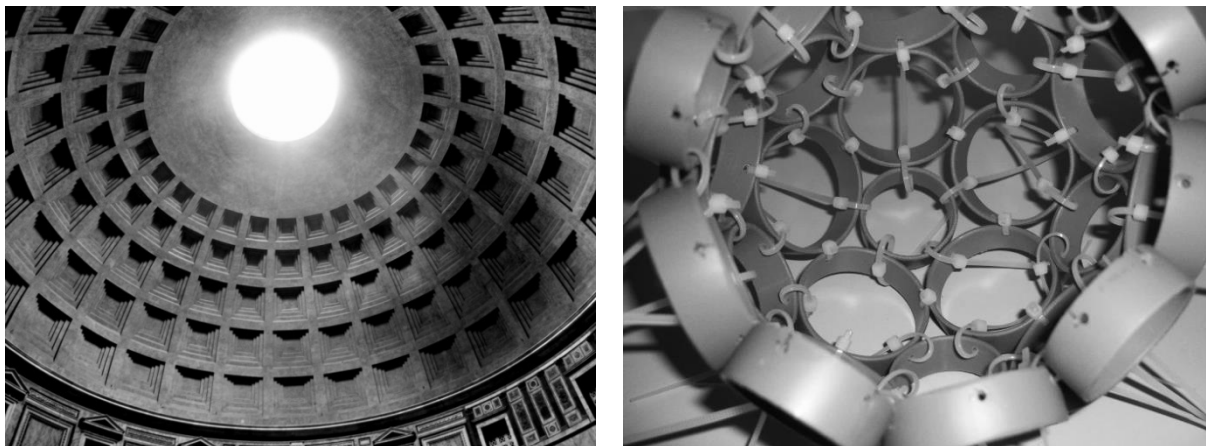
Vzhledem k tomu, že 3V ikosaedr nelze symetricky rozdělit na dvě polokoule, v modelu je sestavena větší část kulové plochy, sestavená z 26-ti kružnic. Tento počet kružnic už v měřítku stavební konstrukce při poloměru větší kružnice cca 0,5 m odpovídá rozponu klenby 3 m.



Obr.47) Model 3V geodetické kupole, pohled do prostoru pod konstrukcí

Konstrukce je snadno a opakovaně sestavitelná a ze všech provedených modelů vykazuje největší pevnost a tuhost. Nabízí se využití pro střešní konstrukce nebo, mobilní open-air pavilon.

Významný je především architektonický potenciál konstrukce, přinášející klenbu zcela nového tvarosloví. Kvalita prostoru pod homogenní strukturou z pravidelně opakujících se kruhových prvků lze srovnat s vyzněním prostoru pod kupolí římského Pantheonu, kde je opakujícím se motivem čtverec, zmenšující se směrem k vrcholu, otevřenému kruhovému světlíkem. Stereotomní uspořádání konstrukce plynule přecházející z části nesené v část nesoucí překonává tradiční schéma oddělení podpory a břemene, což umožňuje spojitě vnímání prostoru.



Obr.48) Kvalita prostoru pod kupolí římského Pantheonu ve srovnání s prostorem pod modelem 3V geodetické kupole

4. IMPLEMENTACE ZVOLENÉHO SCHÉMATU

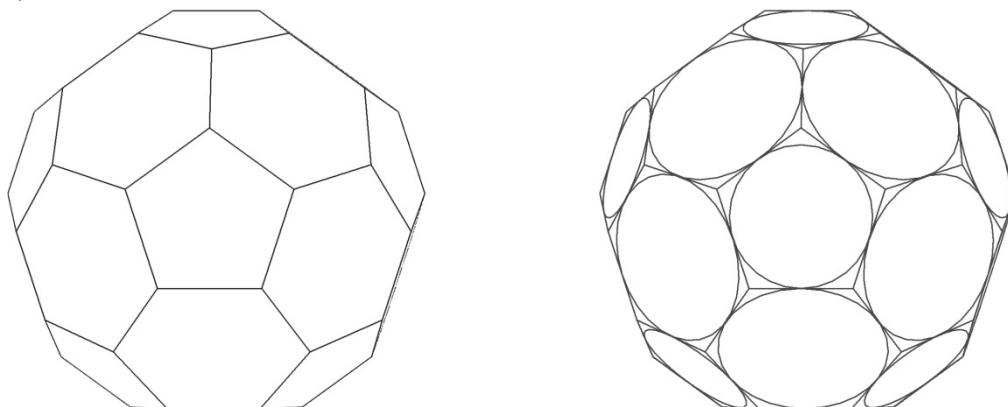
4.1 NÁVRH KLENEBNÉ KONSTRUKCE

Ze série pracovních modelů sférických kleneb byl pro svoji komplexitu, variabilitu a prostorovou tuhost zvolen model klenby odvozený od 3V geodetické kupole pro podrobné zpracování návrhu finálního modelu konstrukce z ohýbaného dřeva ve větším měřítku.

Postup návrhu konstrukce proběhne v několika krocích. V úvodu je sestaven digitální model konstrukce, odvozený z geometrie geodetické sféry (kapitola 2.3). Je proveden a otestován variantní návrh detail styčnicku dřevěných kružnic. Následuje samotná výroba prototypu a experiment.

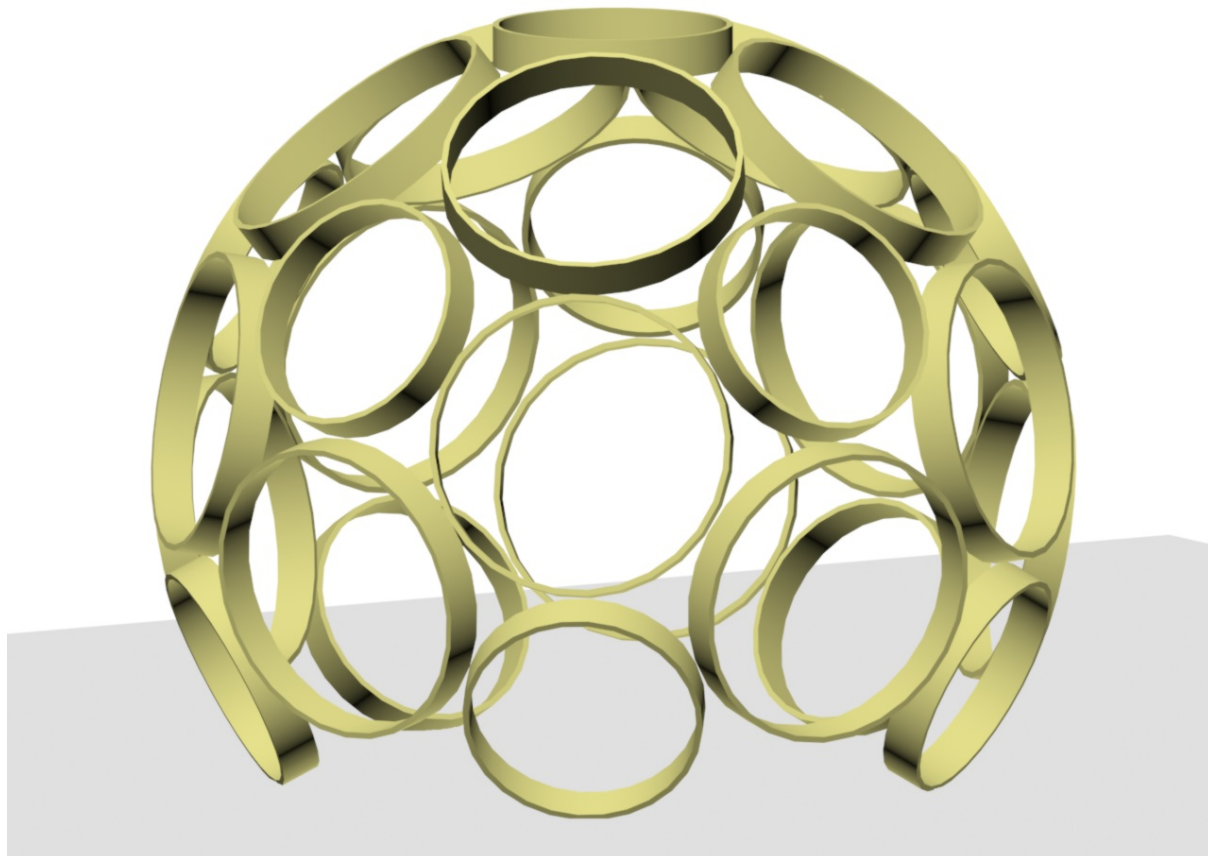
4.1.1. DIGITÁLNÍ 3D-MODEL KONSTRUKCE

Na základě studia geometrie geodetických konstrukcí (kapitola 2.3.4) byl sestaven digitální prostorový model konstrukce, prověřené experimentálním fyzickým modelem (kapitola 3.2). Model sférické kupole sestavené z kružnic dvou poloměrů v daném poměru $\frac{r_1}{r_2} = 0,79$ (limitovaných rozměry danými výrobní řadou) byl odvozen vepsáním těchto kružnic 5-ti a 6-ti-úhelníkům tělesa 3V ikosaedru (Obr.49)



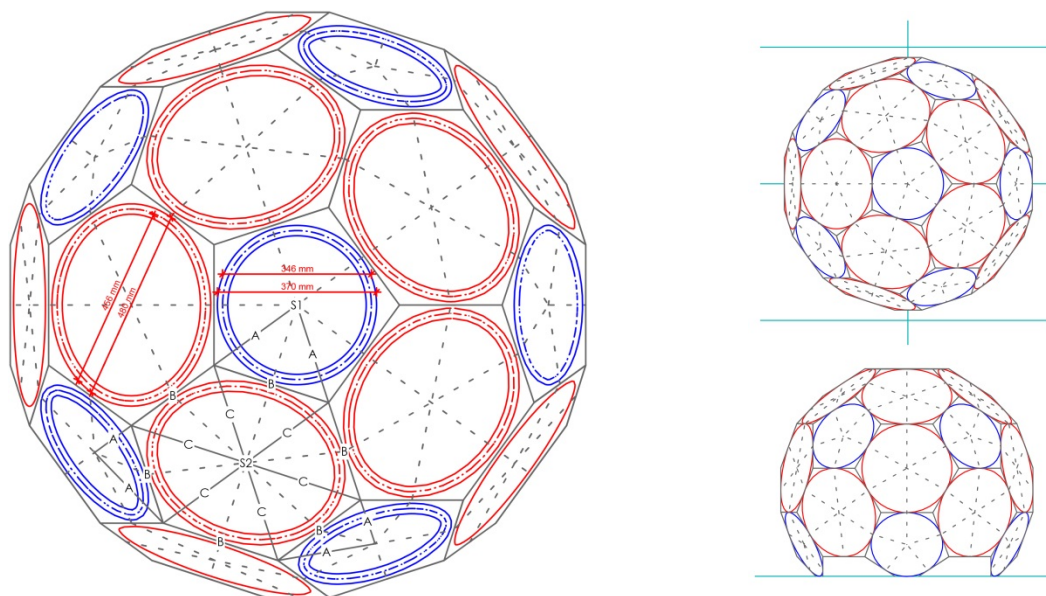
Obr.49) 3V ikosaedr (C60 fulleren) a tentýž objekt s vepsanými kružnicemi

S cílem sestavit stabilní model na vodorovné podstavě, byla geodetická sféra zmenšena na kulový vrchlík, zakončený rovinou určenou 5-ti kružnicemi menšího poloměru, sestavený z 26-ti kružnic, podle vzoru fyzického modelu. Následně byl geometrii přiřazen odpovídající profil kruhové obruče.



Obr.50) 3D model geometrie geodetické sféry sestavené z kružnic v pravidelném uspořádání odvozeném z 3V ikosaedru

Pro realizaci navrženého modelu bylo nutné zohlednit dostupnost stavebních komponent, v tomto případě dřevěných ohýbaných kružnic odpovídajících průměrů. V rámci spolupráce s TON a.s., bylo možné zvolit průměry kružnic z následující výrobní řady: Ø310, 330, 350, 370, 400, 480 mm. S ohledem na nejbližší poměr, blížící se ideálnímu číslu 0,79 byla vybrána kombinace kružnic o průměrech Ø370 a Ø480 mm. Je zřejmé, že drobnou odchylku od matematicky daného poměru bude nutné korigovat tolerancí a adaptabilitou spoje, který vyrovná případnou vnesenou nepřesnost geometrie konstrukce a současně umožní vzájemný dilatační posun kružnic související s objemovými změnami dřevěných komponent.



Obr.51) Geometrie geodetické sféry sestavené z kružnic v pravidelném uspořádání odvozeném z 3V ikosaedru (půdorys, pohled)

4.1.2. DETAILS KONSTRUKCE

Podle obecných předpokladů má na stabilitu a tuhost konstrukce zásadní vliv četnost a provedení spojů jednotlivých dřevěných ohýbaných prvků, spolu s formou kotvení konstrukce do základů. Zavětrování konstrukce taženými prvky má sekundární, avšak neopomenutelnou roli. Samozřejmou volbou v případě velkorozponových dřevěných konstrukcí jsou běžně dostupné certifikované ocelové spoje. V případě modelu je však nutné počítat s posunem měřítka realizované konstrukce. Proto jsem s ohledem na velikost navržené kupole (Øcca1,5m) hledala alternativní materiál spoje, odpovídající rozměrům a pevnosti dostupných ohýbaných dřevěných kružnic. Pro ozkoušení sestavitelnosti konstrukce se jako montážní spoj ukázal být vhodný spoj ze sklolaminátu (dostupný v deskách, používaný v elektrovýrobě), jako pevný materiál, přesně opracovatelný frézou, umožňující dodatečné drobné tvarové úpravy. Ocelový spoj pak byl navržen jako alternativa pro odzkoušenou finální konstrukci, případně konstrukci většího měřítka.

V návrhu spoje je nutné se vypořádat s dostupnými profily ohybů zvolených poloměrů kružnic, výrobními nepřesnostmi, nutností dilatace a sestavitelností modelu. Kružnice zvolených poloměrů jsou ohýbány z rozdílných profilů: kružnice Ø370 mm v profilu 24 x 32 mm, Ø480 mm v profilu 24 x 38 mm. Na dodaných vzorcích byly naměřeny výrobní nepřesnosti $\pm 1,5$ mm v rozměrech průřezu. S dalšími rozměrovými posuny je nutné počítat s ohledem na objemové změny dřevěných prvků v souvislosti s proměnlivou relativní vlhkostí okolního prostředí. Navržený detail spoje proto musí přenést drobné vzájemné posuny kružnic. V neposlední řadě je nutno zohlednit také sestavitelnost a opakovanou demontovatelnost spoje.

V konstrukci se v závislosti na poloze vyskytují dva typy spojů, lišící se úhlem, pod kterým fixují sousedící dřevěné kružnice. Profil spojující dvě kružnice o Ø480 mm svírá kružnice s ohledem na celkovou geometrii pod jiným úhlem, než profil spojující kružnici Ø480 mm s kružnicí Ø370 mm. Jedná se o nezanedbatelnou odchylku $41,85^\circ$ (v případě spoje dvou kružnic většího průměru) proti $36,02^\circ$ (v případě spoje dvou kružnic rozdílného průměru).

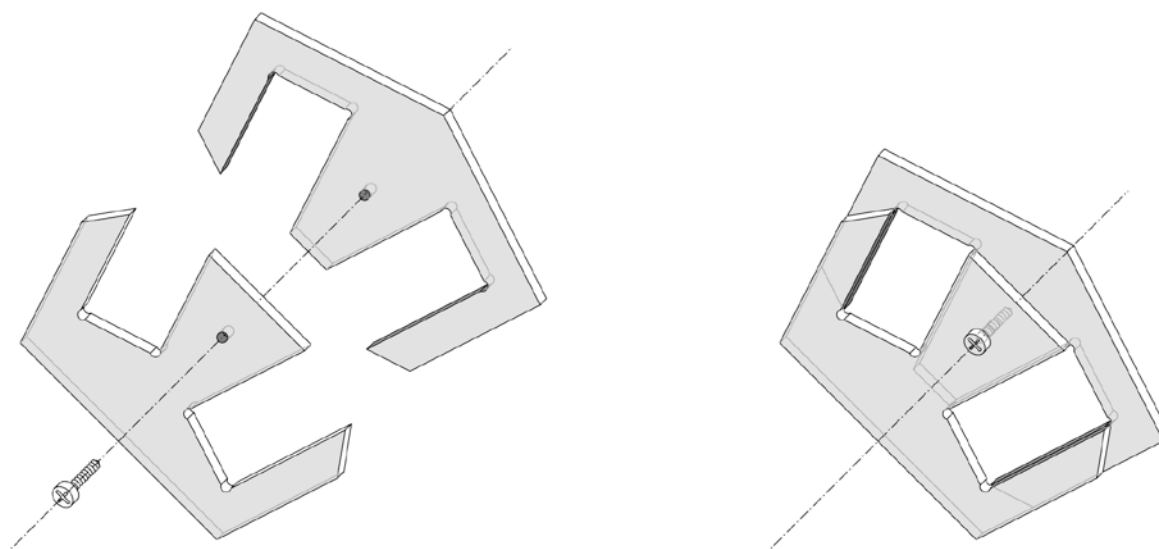
Východiskem pro návrh spoje byla snaha spojit dřevěné kružnice bez jejich narušení vrtáním. Drobné dřevěné profily, s napětím vneseným ohybem by po navrtání byly náchylné ke vzniku trhlin a praskání – tuto možnost bylo žádoucí eliminovat. Mimo nenarušenou pevnost dřevěných profilů má takový spoj výhodu také v opakovatelné sestavitelnosti a snadné demontáži.

4.1.2.1. Montážní spojovací prvek ze sklolaminátu

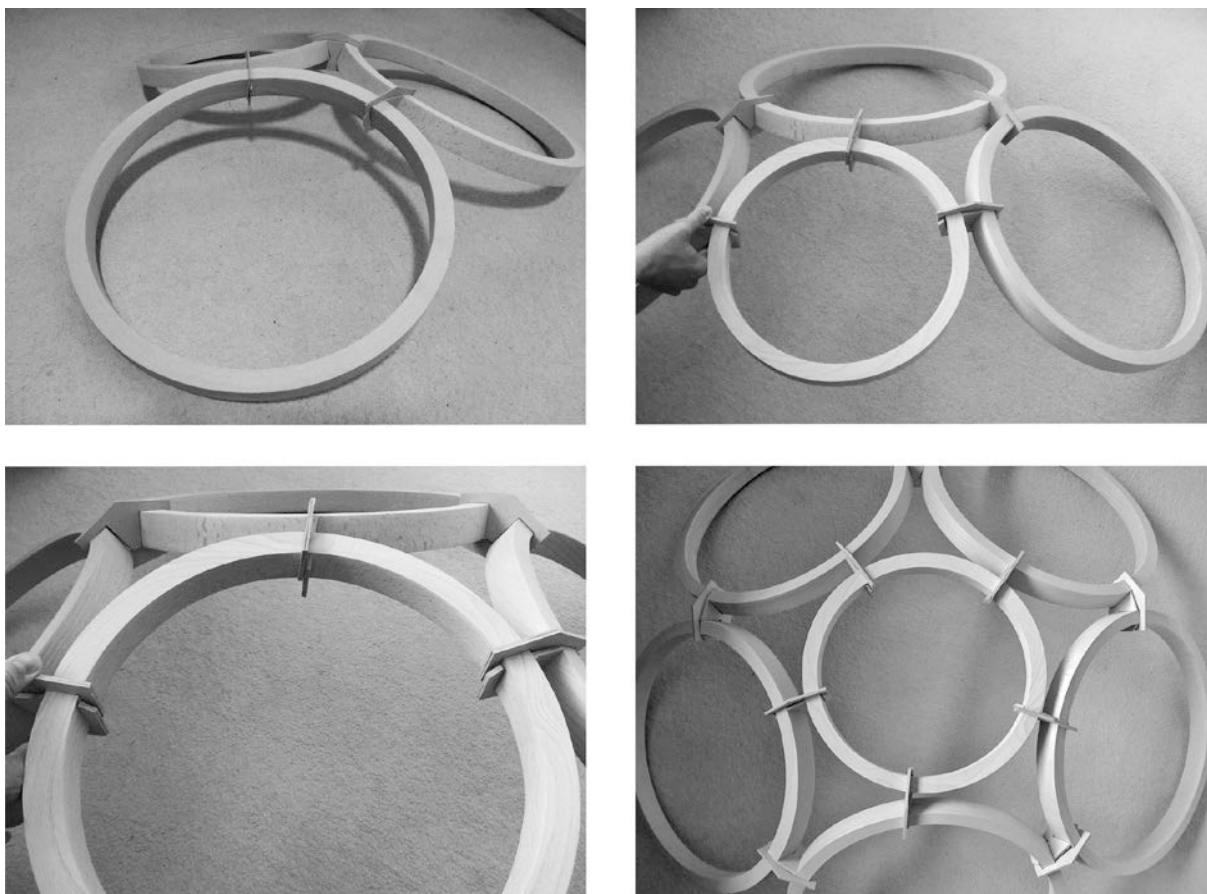
Sklolaminátový spoj byl vyvinut jako dvojice protikusých příložek, fixujících dřevěné profily v určeném bodě v daném úhlu a vzájemné poloze. Příložky jsou po osazení v rovině kolmé k ose kružnic sešroubovány ve svém středu (bez zásahu do dřeva kružnic). S ohledem na řezání spojů frézou, jsou ve vnitřních rozích navrženy náběhy, které zajistí doříznutí průsečíku navazujících hran. Současně je navržený poloměr staticky výhodný pro roznesení napětí v nejvíce namáhaných oblastech spoje na větší plochu povrchu řezu.

S vědomím možných komplikací při sestavování většího počtu kružnic byl spoj testován v pracovním provedení z vícevrstvé papírové lepenky a dřevěné překližky. Spoje z třívrstvé topolové překližky tl. 1,5 mm (řezané laserem) se ukázaly jako příliš křehké na to, aby unesly váhu samotných spojovaných kružnic (Ø370 o váze 705 g, Ø480 o váze 1065 g). Nejčastěji došlo k rozlomení ve vnitřních rozích spojovacího prvku. Spoje vyřezané z dvouvrstvé papírové lepenky tl. 4 mm bez deformací unesly vlastní váhu části modelu, sestavené z 6-ti kružnic.

Jistým omezením při sestavování modelu se ukázal být fakt, že celek geometrie kupole lze sestavit jedinečně postupně, připojováním kružnic po jedné k sestavenému celku. Kvůli nemožnosti osadit spoje ve fixované pozici několika spojených kružnic, nelze sestavit samostatně několik částí z více kružnic a tyto poté spojovat dohromady. Mj. také v případě kolize náhodného spoje na sestaveném modelu je pro jeho výměnu nutné nejdříve demontovat všechny níže položené kružnice. Nápravným opatřením může být sestavení speciálního náhradního spoje, rozděleného do čtyř částí. Tyto by bylo možné dodatečně osadit v libovolné pozici již sestaveného modelu.



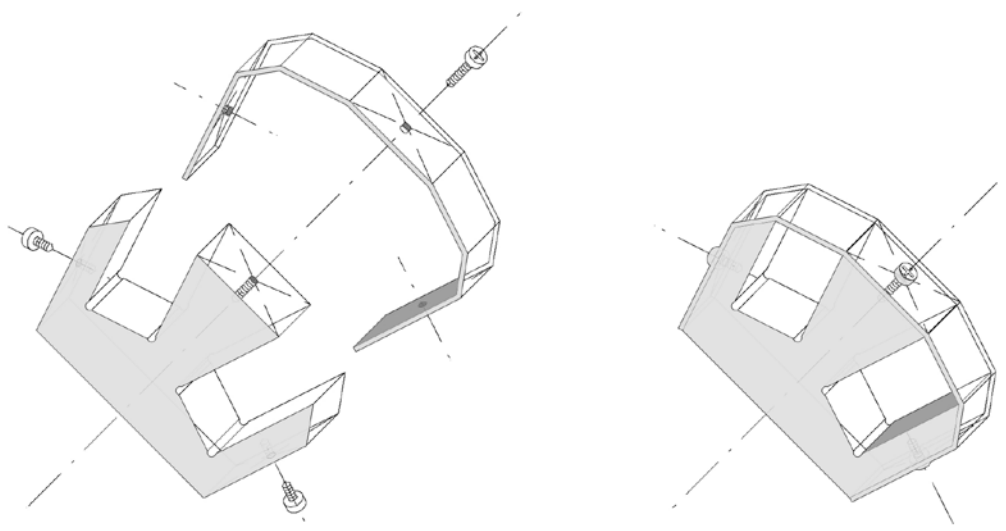
Obr.52) Axonometrie návrhu spoje ze sklolaminátu



Obr.53) Dokumentace pracovního modelu se spoji z papírové lepenky

4.1.2.2. Spojovací prvek z oceli

Mimo spojovací prvek ze sklolaminátu byl navržen také spoj v provedení z oceli. Záměrem bylo převést křehčí sklolaminátový spoj aplikovaný na modelu prototypu do měřítka stavební konstrukce.

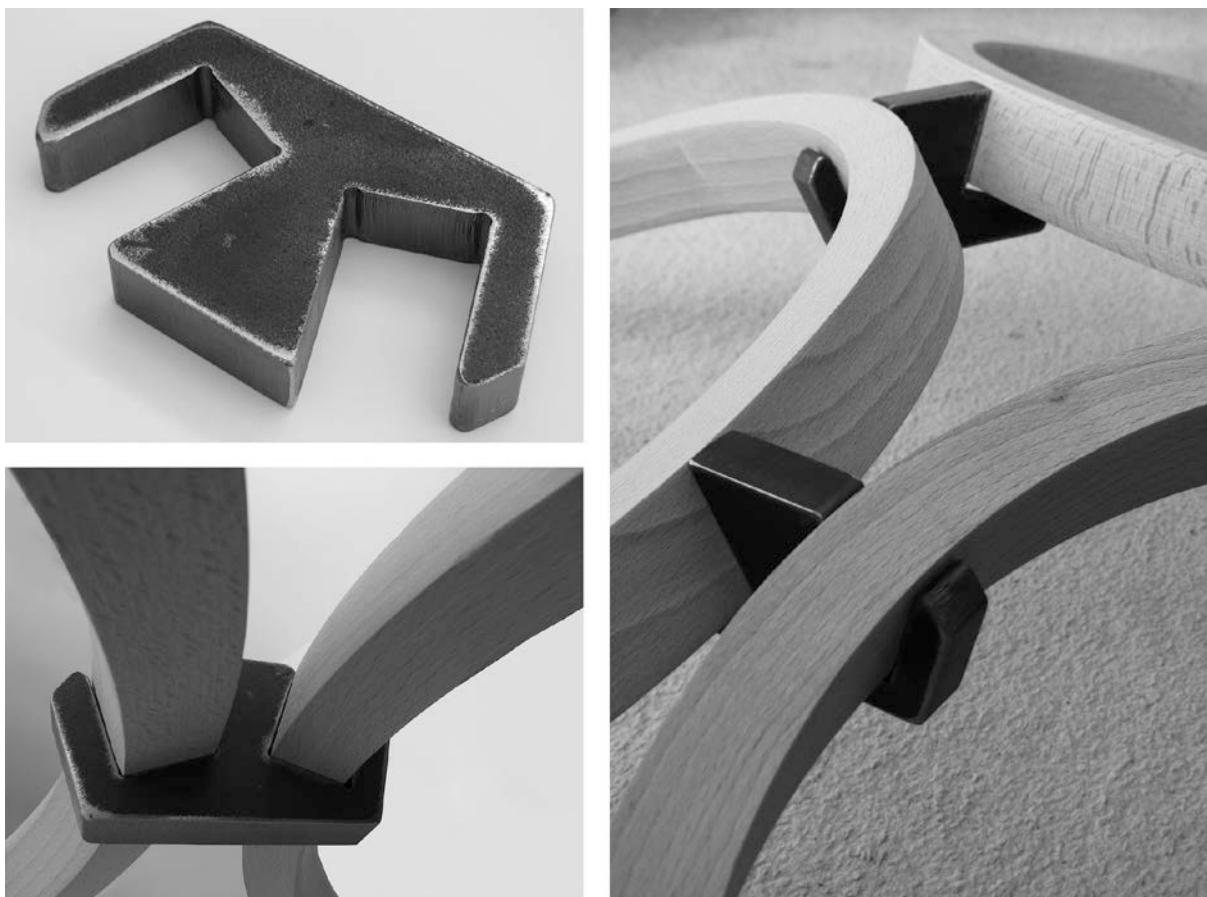


Obr.54) Axonometrie návrhu spoje z oceli

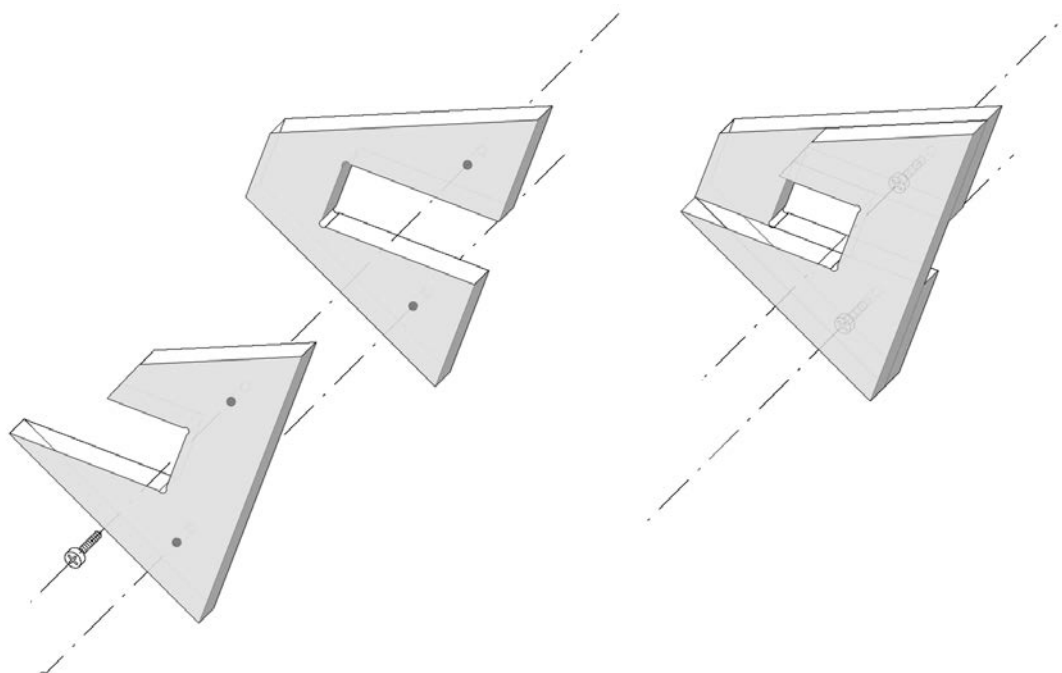
Návrh ocelového spoje plně respektuje požadavky, které byly zohledněny v návrhu spoje ze sklolaminátu. Spojovací prvky nenarušují dřevěný profil vrtáním. S ohledem na pevnost oceli a robustnější rozměry spojovacího prvku nabízejí výrazně vyšší únosnost. Předpokladem je navrhnout spojovací prvek efektivně tak, aby jeho pevnost odpovídala pevnosti spojovaných dřevěných kružnic.

Spoj je navržen jako jediný celistvý (laserem řezaný) prvek fixující dřevěné profily v určeném bodě v daném úhlu a vzájemné poloze. Na tento otevřený profil je po zasunutí dřevěných kružnic osazen třmínek z ocelové pásoviny v šířce odpovídající tloušťce profilu (v prototypu 15 mm). Třmínek je kotven k ocelovému profilu ve třech bodech. V logice spoje dvou sousedících kružnic je navržena patka složená ze dvou vzájemně spojených ocelových profilů, která vyrovnává odchylku nejnižše položené kružnice od podstavy (úhel 38,98°).

Ve srovnání s detailem sklolaminátového spoje (sestavajícího ze dvou protikusých částí) lze ocelový spoj osadit v kterémkoliv místě již sestavené konstrukce. Kupoli je tedy možné sestavit i demontovat po částech, a tyto dodatečně spojit. Libovolný, potenciálně vadný či porušený spoj na sestavené konstrukci lze dodatečně vyměnit bez nutnosti demontovat všechny níže položené kružnice.



Obr.55) Foto ocelového výpalku a osazení ocelového spoje

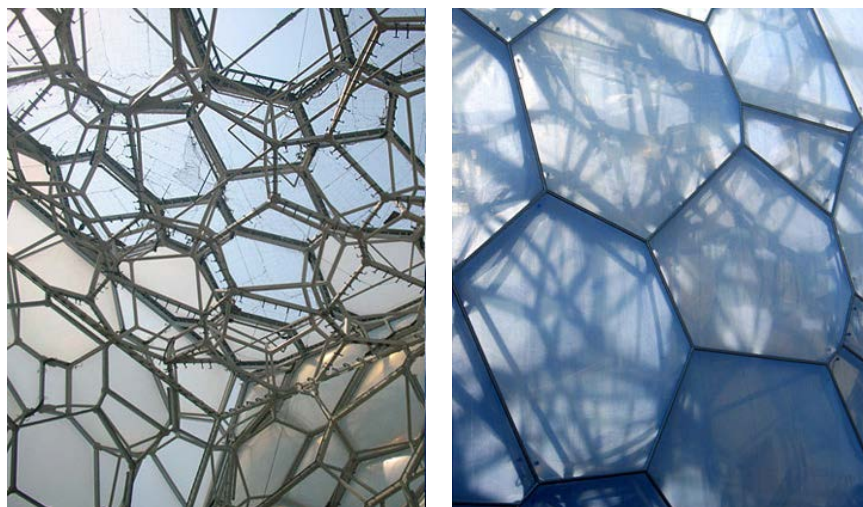


Obr.56) Axonometrie návrhu kotevní patky z oceli

4.1.2.3. Možnosti konstrukčního řešení obvodového pláště

Obvodový plášť konstrukce uvažujme v provedení z ETFE fólie (ethen-tetrafluorethen či ethylen-tetrafluorethylen), případně jako čočky z tepelně tvářeného polykarbonátu.

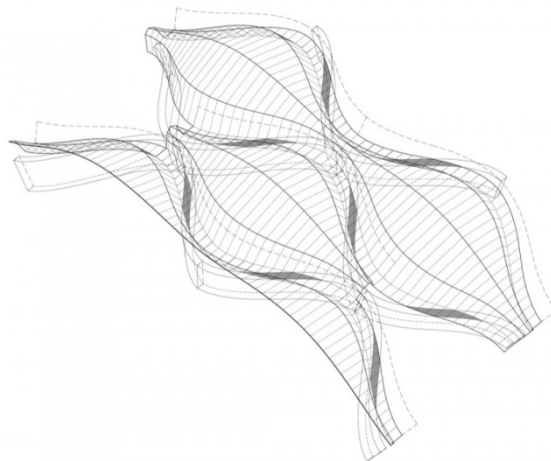
ETFE je polymerická fólie s výhodou užívaná pro zastřešení rozlehlých prostor. Díky výborné tvárnosti splní účel i při opláštění sestaveném z velkého množství dílčích nepravidelných ploch. Jde o materiál velmi lehký (ve srovnání se sklem), nepřetěžující významně nosnou konstrukci. ETFE fólie je aplikovaná převážně jako pneumatická konstrukce – navržený objekt musí být tedy uzavřený, plněný stlačeným vzduchem (osvědčené řešení např. sportovních hal). Příkladem uveďme plášť Allianz Areny v Mnichově (Herzog&de Meuron, 2005), nebo Olympijský plavecký stadion v Pekingu (“watercube”, PTW studio, 2007)



Obr.57) ETFE plášť Olympijského plaveckého stadionu v Pekingu (43)

Tepelně formovaný polykarbonát, případně tvarovaný sklolaminát jsou materiály samonosné (oproti ETFE fólii drží tvar bez pneumatického přetlaku), mohou tedy být použity pro open-air konstrukce lokálně otevřeného pláště, případně tam kde to provozní náplň vyžaduje. Tento materiál je ovšem poněkud těžší a náročnější na přesnost výroby (dílečná výroba do forem). Příkladem obvyklého použití jsou bodové polykarbonátové světlíky.

Jako příklad uvádím detail střešního pláště venkovního pavilonu South Pond v Chicagu (Studio GANG Architects, 2010).



Obr.58) Translucentní sklolaminátové čočky na střeše pavilonu South pond v Chicagu (24)

5. VÝROBA PROTOTYPU A EXPERIMENT

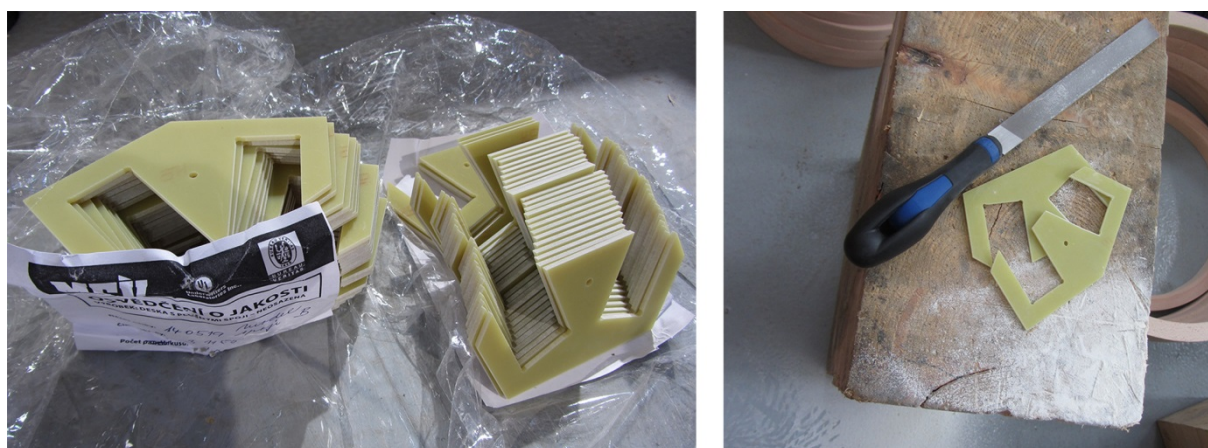
5.1 POSTUP VÝROBY PROTOTYPU

Po prověření sestavitelnosti modelu z dřevěných kružnic ($\varnothing 480$ mm a $\varnothing 370$ mm) na pracovním modelu (obr.52) bylo s ohledem na prověření variant spojovacího prvku zvoleno finální řešení spoje. Pro stavbu prototypu byl zvolen spojovací prvek ze sklolaminátu. Zohledněna byla možnost snazší dodatečné úpravy sklolaminátových prvků in situ, výhodná vzhledem k odchylkám a proměnlivé tloušťce dřevěného profilu po obvodu kružnice. Současně bylo záměrem zachovat dřevěné prvky po první zatěžovací zkoušce pro další testování modelu, což by při aplikaci ocelových spojů bylo problematické.

Byla zpracována data pro CNC frézu a vyrobeny spojovací elementy v šesti tvarech (MEV Praha s.r.o.). Každé dva protikusé prvky jsou opatřeny otvorem pro sešroubování po osazení na dřevěné profily. Vnitřní pravouhlé rohy byly frézovány s kruhovým náběhem pro rovnoměrné roznášení napětí v tomto exponovaném bodě. Spoje byly frézovány z laminátové desky FR4 o tloušťce 2,4 mm. Jedná se o materiál vyztužený několika vrstvami skelné tkaniny, spojené epoxidovou pryskyřicí. Mechanické vlastnosti tohoto materiálu, od nichž se odvíjí únosnost realizovaného prototypu jsou popsány v následující tabulce.

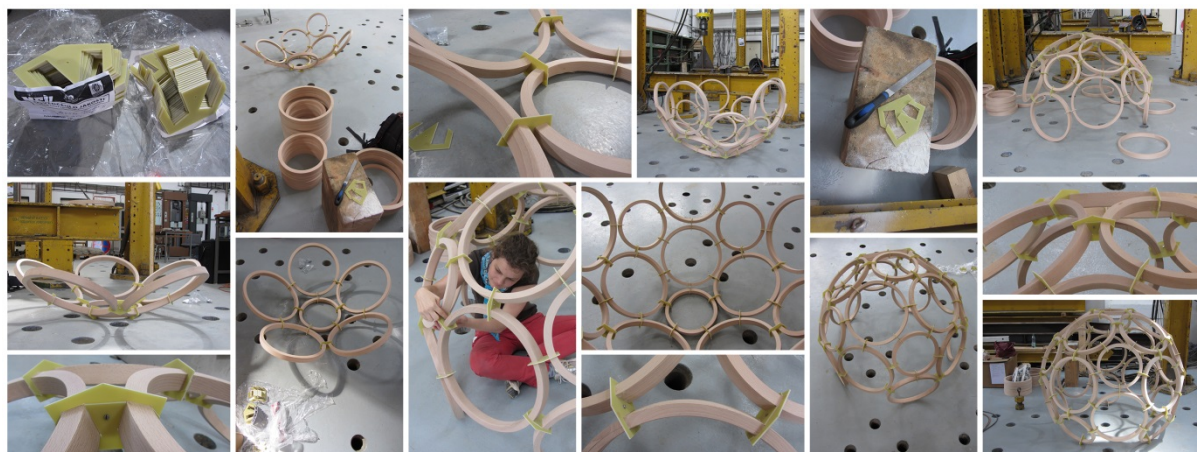
Mechanické vlastnosti		
Pevnost v ohybu při porušení kolmo na vrstvy (při 20°C)	MPa	340
Modul pružnosti v ohybu	MPa	24x10 ³
Pevnost v tahu	MPa	300
Pevnost v tlaku kolmo na vrstvy	MPa	350
Rázová houževnatost (Charpy) rovnoběžně s vrstvami	KJ/m ²	33
Pevnost ve smyku rovnoběžně s vrstvami	MPa	30
Pevnost v tlaku rovnoběžně s vrstvami dle PN-83/C-89031	MPa	180

Obr.59) Mechanické vlastnosti desky “SKLOTEXTIT” FR4 (Sklotextit Hgw 2372.1 – tvrzená skelná tkanina) (44)



Obr.60) Foto sklolaminátového spoje a dodatečné úpravy profilu

Výrobě spojů následuje samotné sestavení modelu. Záměr postupovat od vrcholové kružnice (Ø370 mm) směrem k otevřenému okraji kulové plochy se ukázal jako správný. V průběhu sestavování model rovnoměrně uzavíral kulovou plochu a jednotlivé kružnice bylo možné postupně přesně osadit. Na závěr byl model otočen o 180° podle vodorovné osy do zamýšlené polohy kupole.

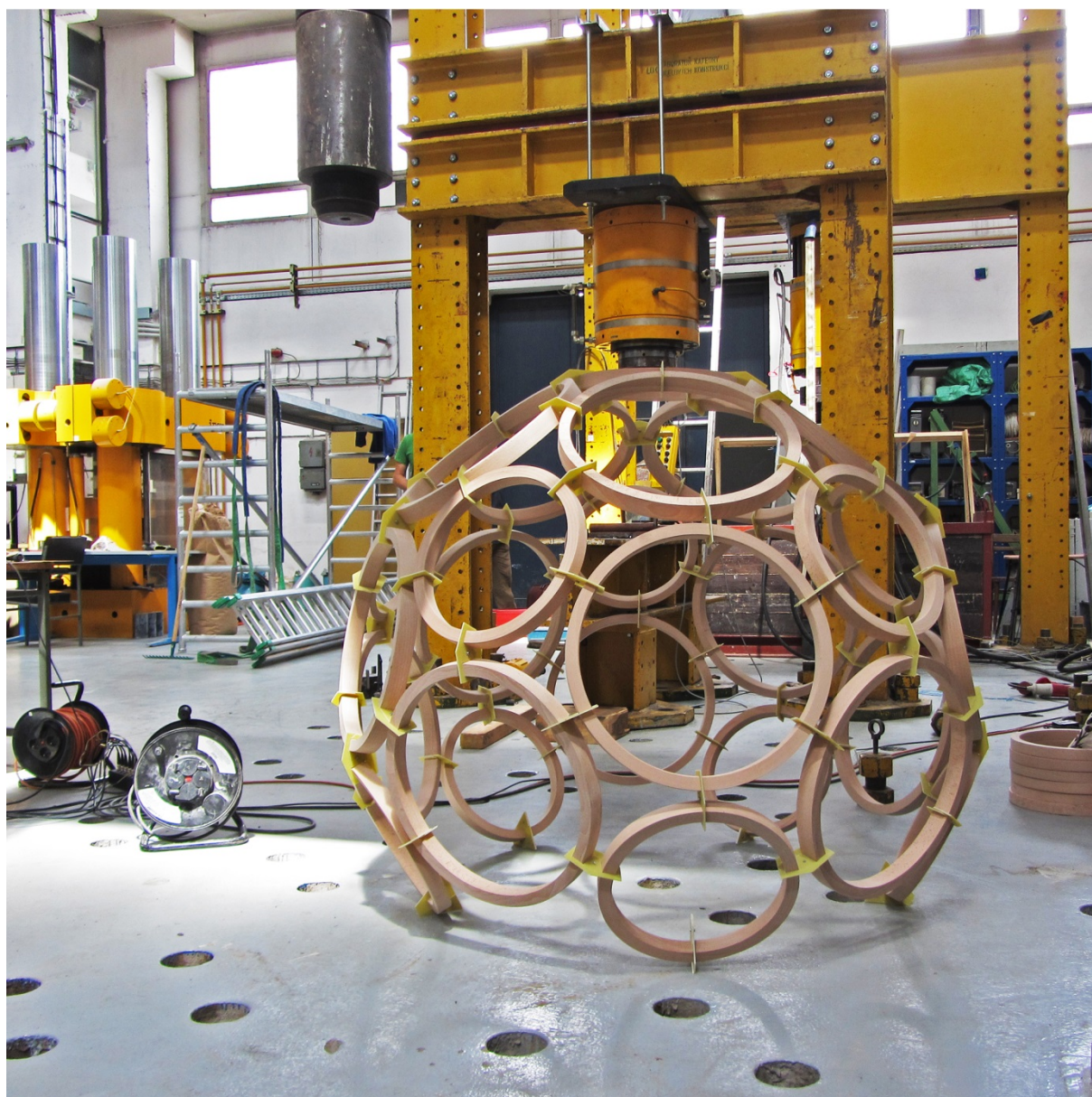


Obr.61) Fotodokumentace postupu sestavení modelu

5.2 VÝROBA PROTOTYPU

Výroba prototypu probíhala ve třech etapách. Na začátku bylo napojeno 5 kružnic Ø480 mm na vrcholovou kružnici Ø370 mm, a tyto postupně vzájemně propojeny. Byly použity dva typy spojovacích prvků, podle polohy spoje (2 kružnice o stejném průměru jsou napojeny pod jiným úhlem než 2 kružnice o různém průměru, viz. kapitola 4.1.2). Kupole byla sestavována v obrácené, konvexní poloze, postupným osazováním navazujících kružnic v sousedních řadách tak, aby vznikl pravidelný kulový vrchlík.

Sklolaminátové spoje byly upravovány na míru, vzhledem k proměnlivé tloušťce dřevěného profilu po obvodu kružnice. Na vybraných kružnicích byly v průběhu sestavování modelu naměřeny odchylky ± 3 mm v rozměrech průřezu (měřená výrobní nepřesnost při dodání $\pm 1,5$ mm). Podle předpokladu jde o objemové změny související se změnou relativní vlhkosti prostředí a následným rozpínáním vláken struktury dřevní hmoty.



Obr.62) Kompletní prototyp v laboratoři ocelových konstrukcí, FSv ČVUT

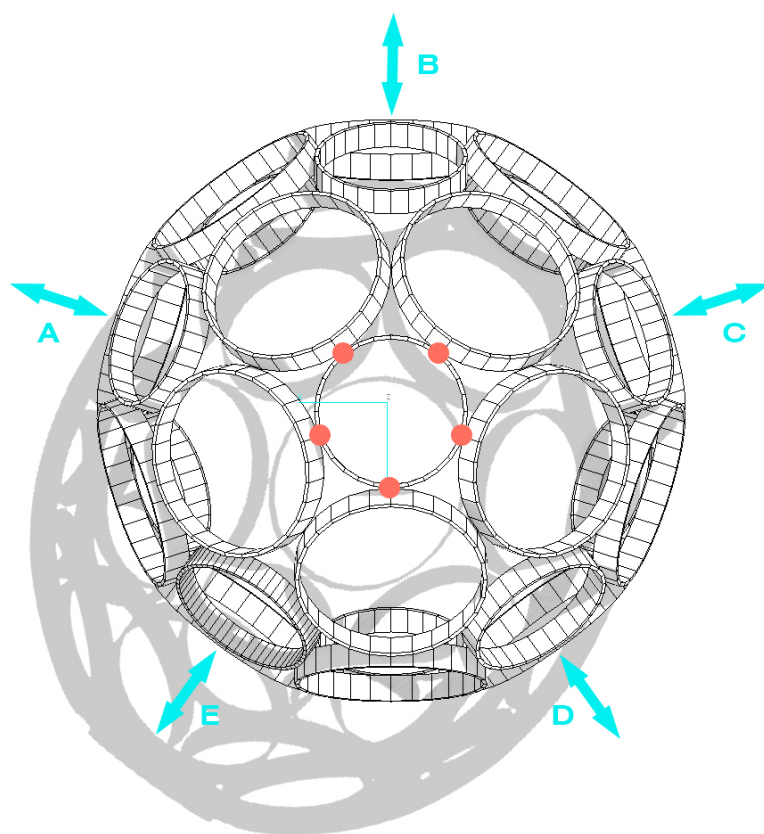
I přes zaznamenané nepřesnosti dřevěných prvků probíhalo sestavení modelu podle očekávání bez komplikací. Ve fázi, kdy model sestával z 16-ti kružnic a vytvářel půlkulovou plochu, probíhalo osazení dalších kružnic obtížněji – kulová plocha se začala uzavírat, kružnice byly pevněji fixovány ve stanovené poloze, konstrukce získávala vyšší prostorovou tuhost.

Závěrem je konstrukce opatřena 5-ti patkami, vyrovnávajícími odchylku nejnižše položených kružnic od vodorovného podkladu. Finální model sestává z 26-ti kružnic, 65 styčniců a 5-ti vyrovnávacích patek.

5.3 ZVOLENÍ ZPŮSOBU TESTOVÁNÍ

Záměrem zatěžovací zkoušky je otestovat chování modelu pod zatížením, prověřit detail navrženého spoje, popsat kritické oblasti maximálního napětí v konstrukci a změřit maximální únosnost prototypu před selháním spojovacích prvků. V neposlední řadě je cílem zmapovat následné chování modelu po kolizi prvních spojů a potvrdit hypotézu, že nedojde k destrukci celé konstrukce, ale model zachová kulový tvar a určitou prostorovou tuhost. Předmětem této zkoušky není zjištění maximální únosnosti dřevěných prvků v konstrukci, jelikož tato vícenásobně převyšuje únosnost spoje. Otestování maximální únosnosti dřevěných prvků může být provedeno následně po aplikaci ocelových spojovacích prvků.

S ohledem na tato kritéria byla ve spolupráci s Experimentálním centrem FSv ČVUT (Doc. Jiří Litoš et. al.) navržena zatěžovací zkouška, zaznamenávající deformaci modelu v závislosti na působícím zatížení.

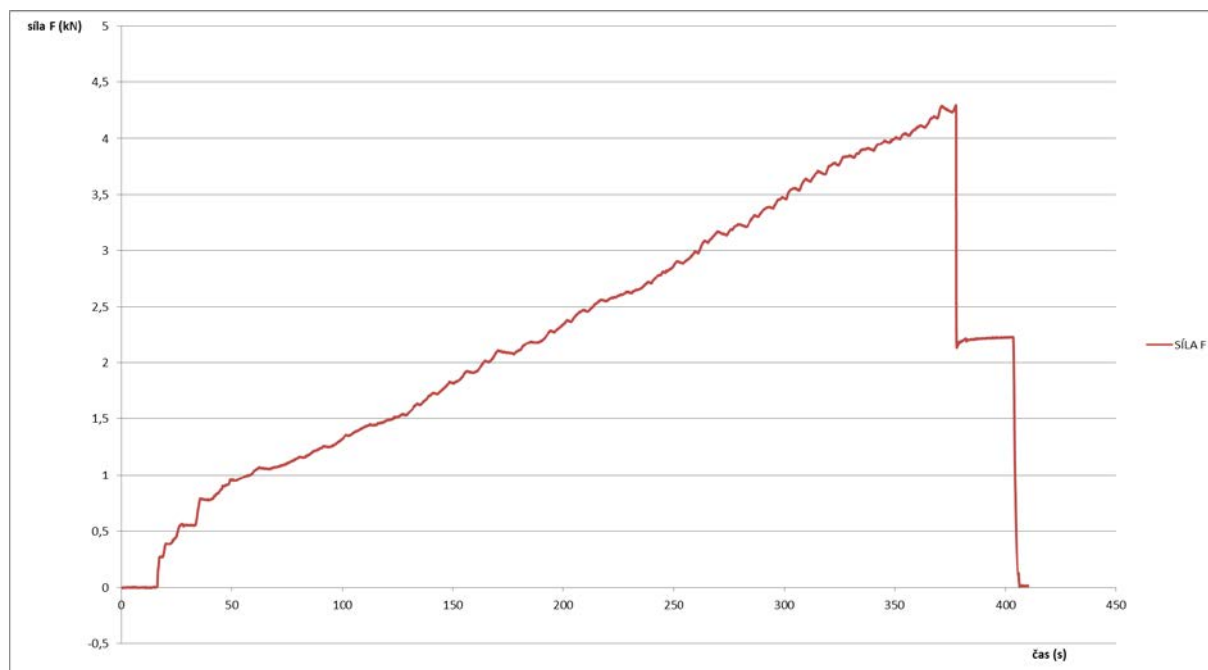


Obr.63) Schéma polohy extenzometrů A, B, C, D, E a působení bodového zatížení na vrcholovou kružnici (pohled shora)

5.4 ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA

Model byl zatěžován silou, působící svisle v ose kulové plochy rovnoměrně na vrcholovou kružnici. Zatěžovací píst byl tlakován ruční pumpou a působící zatížení měřeno siloměrem umístěným pod pístem. Po obvodu kupole bylo instalováno 5 drátových extenzometrů zaznamenávajících vodorovný posun kružnic v závislosti na působícím zatížení.

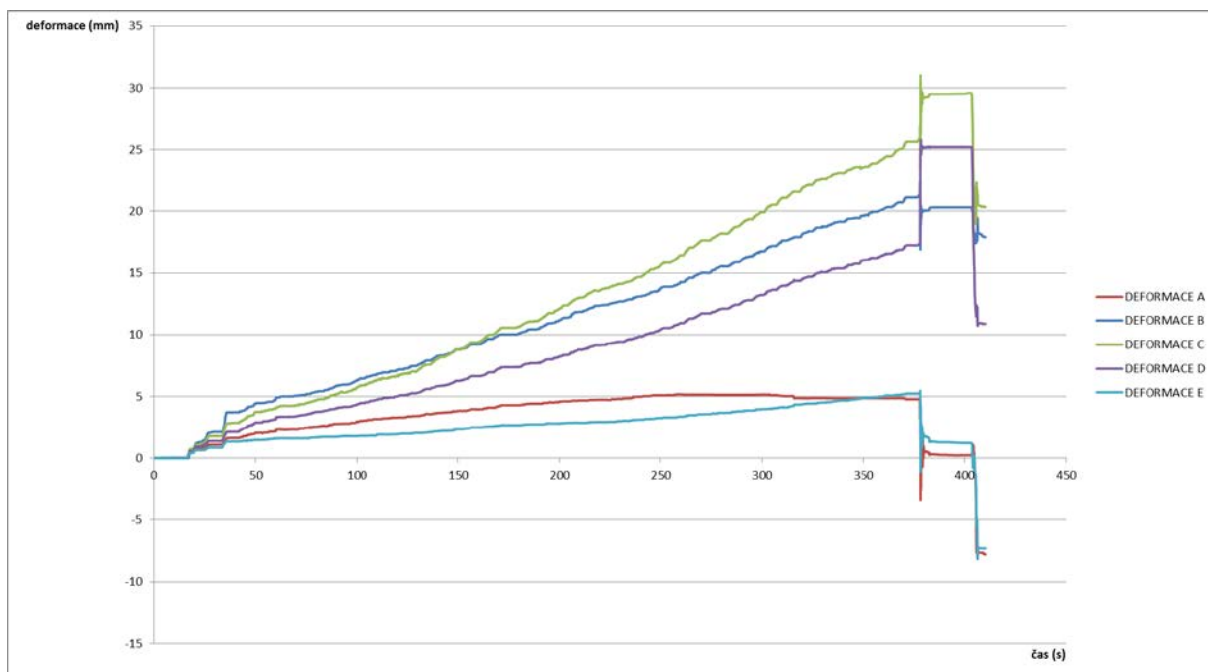
Průběh zkoušky popisují následující grafy. První graf zaznamenává rovnoměrný nárůst zatížení v čase. Prudký pokles v závěru zkoušky dokumentuje moment kolize několika spojů při zatížení 4,29 kN. Krátký časový úsek ještě na konstrukci působí zatížení cca 2,2 kN.



Obr.64) Graf popisující závislost působící síly v čase.

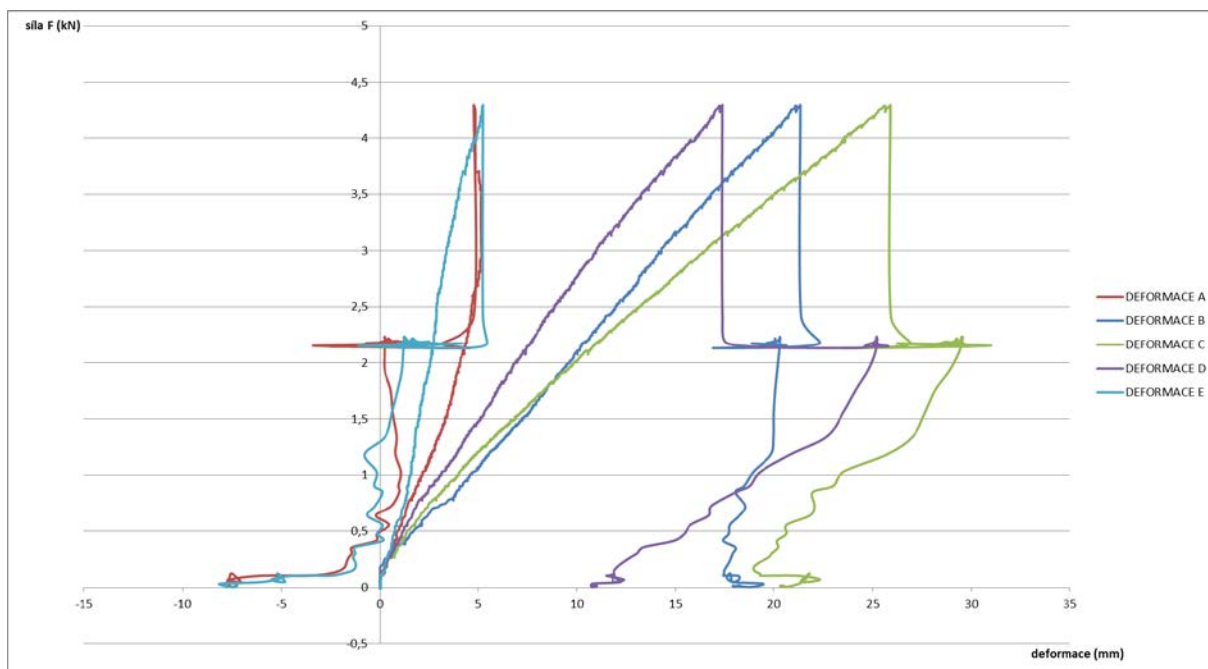
Následující graf zachycuje vývoj vodorovné deformace v čase. Vodorovná deformace byla měřena pěti drátovými extenzometry umístěnými v oblasti maximálního horizontálního ("ekvatoriálního") obvodu kupole. Naměřené odchylky se pohybují v rozsahu +30 mm až -10 mm (+ ve směru ven z konstrukce, - ve směru dovnitř kulové plochy).

Rovnoměrný nárůst deformace koreluje přímo úměrně s růstem zatížení. Je zřejmé, že s rostoucím zatížením nedochází k významnému nárůstu, ani poklesu tuhosti konstrukce. Tato si zachovává přibližně stejnou elasticitu a tuhost. Současně je zjevné, že vodorovná deformace je nesterjná ve všech směrech, tedy že se konstrukce deformuje nesymetricky (drobné montážní nepřesnosti, případně nesterjnorodost dřeva). V oblasti nejvýraznější vodorovné deformace 25,91 mm (v grafu zeleně, deformace C) pak dochází při zatížení 4,29 kN ke kolizi několika spojů.

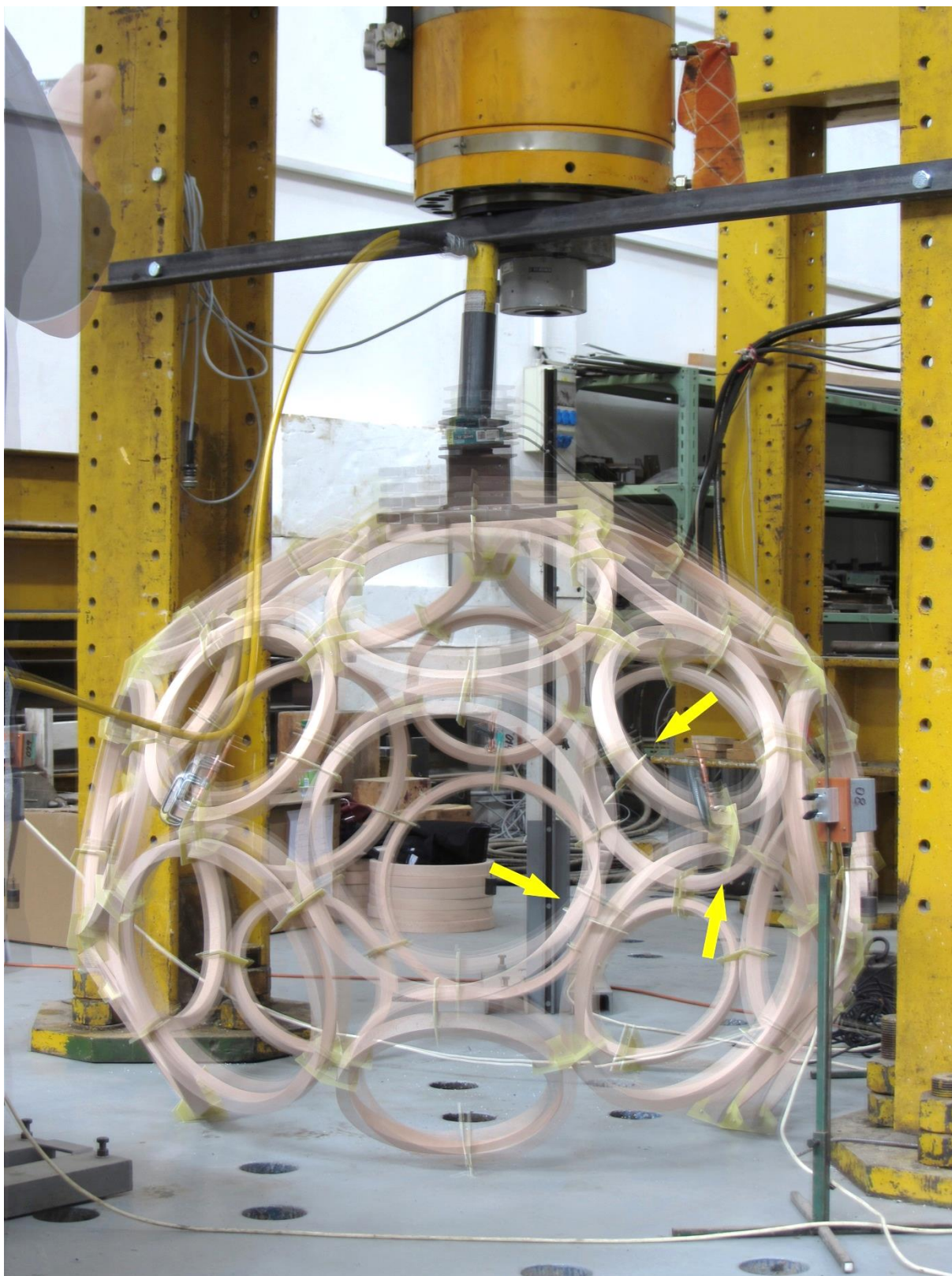


Obr.65) Graf popisující deformaci – vodorovný posun v pěti měřených bodech.

Po uvolnění zátěže jeví konstrukce tendenci navrátit se do původního stavu. Tato tendence je patrná na následujícím grafu. Nesymetrická deformace a 3 nefunkční spoje však umožní jen částečný zpětný pohyb. V případě ohýbaných dřevěných kružnic jde však jednoznačně o deformaci elastickou (pružnou). Po ukončení zkoušky byly vadné spoje odstraněny a nahrazeny náhradními. Opravená konstrukce plně zaujala svůj původní kulový tvar.



Obr.66) Graf popisující vývoj deformace v závislosti na působící síle.



Obr.67) Časoběrný fotozáznam dokumentující deformaci modelu v průběhu zatěžovací zkoušky. Šipky označují místo kolize spojů.

5.5 SHRNUÍ VÝSLEDKU ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKY

Zatěžovací zkouška proběhla 31. 7. 2014 v Experimentálním centru FSv ČVUT pod vedením R. Litoše. Poskytla přesná data a ověřila předpoklady, které byly od testované konstrukce očekávány. Otestováním modelu pod zatížením se projevila elasticita konstrukce (průběžný nárůst deformací korelující s růstem zatížení), a pružnost při návratu konstrukce do původního stavu po uvolnění zátěže. Byla potvrzena hypotéza, že konstrukce po kolizi prvních spojů zachová přibližně kulový tvar a prostorovou tuhost.

Zkouška potvrdila "ekvatoriální" oblast jako lokalitu s kritickým napětím v konstrukci (oblast selhání prvních spojovacích prvků). Zátěžová zkouška ověřila limitní únosnost sklolaminátového spoje, poukázala na jeho nejslabší části a umožnila tak případně využít tyto poznatky pro návrh pevnějšího spoje z oceli.

Maximální zatížení prototypu před selháním prvních spojovacích prvků bylo změřeno 4,29 kN. V tomto případě se nejedná o maximální únosnost konstrukce z dřevěných ohýbaných elementů (tato je řádově vyšší), ale o limitní zatížení aplikované varianty sklolaminátového spoje. Pro zjištění maximální únosnosti konstrukce, kterou umožní ohýbané dřevěné elementy je nutné navrhnout ocelový spojovací prvek, který překoná pevností únosnost dřeva.

Naměřené deformace v řádu několika centimetrů a prokázání tuhosti konstrukce jako celku (model se deformuje jako celek, nebortí se v místě působícího zatížení) lze považovat za velmi uspokojivý výsledek. Konstrukce kolabuje v poddimenzovaném styčnicku – zde je evidentní prostor pro další vývoj. Vzhledem k tomu, že se konstrukce lokálně neboulí a nebortí v místě působícího zatížení, není účelné konstrukci dodatečně zavětřovávat v rovině kružnic. Vložená lanka či tuhé příčle by způsobily nežádoucí nerovnoměrné (lokální) deformace dřevěných kružnic. Celková tuhost konstrukce také umožňuje zjednodušeně testovat model bodovým zatížením (spojité zatížení odpovídající normovým požadavkům by přineslo obdobný výsledek).

V rámci dalšího postupu se nabízí otestovat únosnost zmenšeného vrchlíku kupole s ocelovými spoji. Předpokládám, že se zde projeví vyšší únosnost konstrukce, vzhledem k plynulejšímu průběhu napětí v konstrukci (eliminace kritického "ekvatoriálního" přechodu). Při návrhu a konstrukci zmíněného spoje z oceli lze také využít poznatků z výroby pracovního návrhu ocelového spoje (kapitola 4.1.2.2 Spojovací prvek z oceli). Otestování konstrukce s ocelovými spoji také umožní otestovat deformace a změřit maximální únosnost dřevěných ohýbaných prvků v konstrukci.

Nutno podotknout, že z výsledků experimentu na pracovním modelu (rozpon cca 1,5 m) nelze explicitně odvozovat chování a únosnost odvozené reálné stavební konstrukce (rozpon cca 25-30 m). Z logiky pozměněné geometrie (odvozené od geodetické sféry vyšší frekvence) bude mechanika chování konstrukce jako celku výrazně náchylnější na lokální asymetrické zatížení (a následné boulení). Spojovací prvky ponosou výraznější namáhání na stříh a smyk. V neposlední řadě hraje roli vlastní mikroskopická struktura dřeva, která se nemění s posunem ke konstrukcím většího měřítka, tudíž při vyšších silách v reálné konstrukci se může projevit ve výrazně větší míře než na pracovním modelu menšího měřítka.

Přesto má nejen pedagogický, ale také vědecký význam na tomto modelu navrhnout a otestovat ocelový spojovací prvek. Na drobné konstrukci modelu, která má poměrně vysokou tuhost (pod zatížením se deformuje jako kompaktní celek) hraje spoj, co se únosnosti týče kritičtější roli - v poměru k dřevěným elementům zde přenáší větší míru zatížení než v konstrukci většího měřítka (namáhání spoje v reálné konstrukci většího rozponu bude ovšem, jak jsem zmínila výše, poněkud variabilnější). Návrh ocelového spoje pro model bude směrodatným východiskem

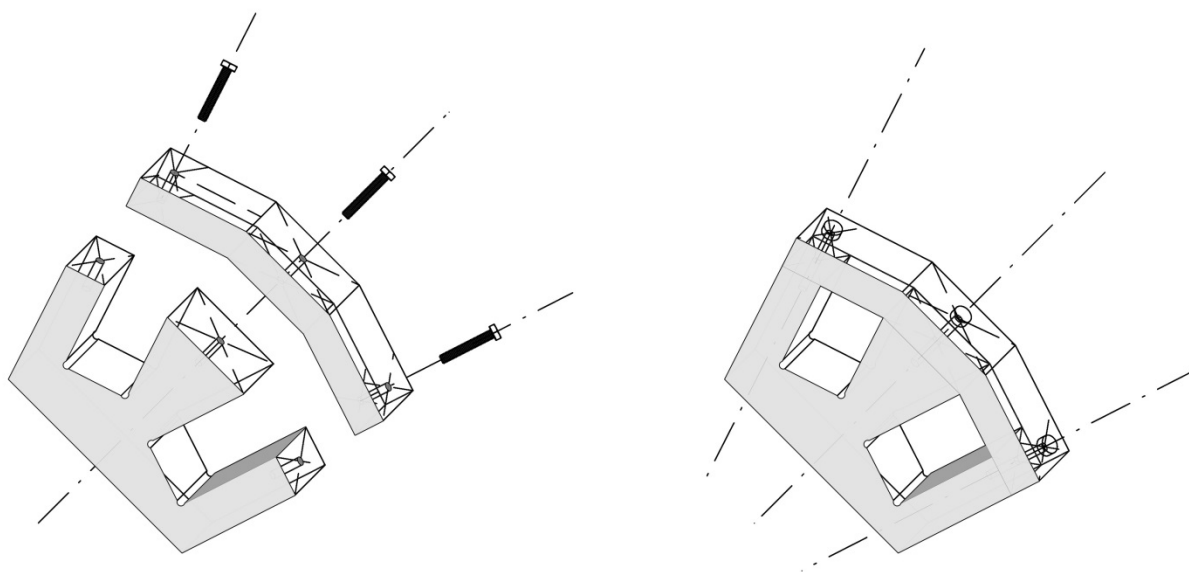
pro odvození spoje v reálné stavební konstrukci. Ocelový spoj je nutné navrhnout tak, aby jeho pevnost odpovídala únosnosti dřevěných prvků a vznikla tak staticky a ekonomicky vyvážená konstrukce.

Postup práce na projektu, co se týče metodologie může pokračovat empirickou experimentální cestou na návrhu a otestování ocelového spoje, nebo exaktní cestou statického výpočtu a simulace. Výpočetně lze efektivně dimenzovat, optimalizovat a posoudit návrh styčnicku. Statickou simulací je možné posoudit geometrii otestovaného modelu a srovnat vypočtené údaje s experimentálně naměřenými. Třetím, pokročilým úkolem může být následná simulace a výpočetní posouzení konstrukce reálného měřítka stavební konstrukce (rozponu cca 25-30 m). Na základě tohoto kroku by bylo možné vyhodnotit vliv posunu měřítka (změna mechaniky větší konstrukce).

5.6 VÝVOJ OCELOVÉHO SPOJE

V kapitole 4.1.2.2 je představen prvotní návrh spoje z oceli. S využitím poznatků provedené zkoušky se prokázalo jako výhodné provést spoj bez vrtání a šroubování do dřevěného profilu. Z navrženého tvaru spoje, ocelového výpalku s ocel. páskem, který se mj. ukázal být velmi vhodný pro montáž modelu, vychází následující návrh. Byla prověřena také varianta s vložením dřevěného/plastového klínku mezi dřevěné obruče, doplněného ocel. páskem. Od té bylo upuštěno pro technické a konstrukční obtíže a nepřesnou fixaci dřevěných kružnic v místě spoje.

Spoj a spolu s ním chování dřevěné konstrukce modelu je možné otestovat vložením ocelových spojů do rovníkové části kompletního modelu (oblast kritického zatížení). Alternativou může být sestavení vrchlíkové části modelu složené ze 6ti kružnic propojené ocelovými spoji. Tento způsob se zdá být vhodnějším pro homogenní kvalitu spojů v konstrukci a následně jednoznačnější vyhodnocení únosnosti dřevěných kružnic. Na základě výsledků testu by bylo možné prověřit chování dřevěných kružnic a změřit jejich limitní únosnost (a tedy i únosnost konstrukce jako celku). Upravený návrh ocelového spoje má pozměněný tvar, příložka je kotvena třemi šrouby M10.



Obr.68) Axonometrie upraveného návrhu spoje z oceli

6. STATICKÁ ANALÝZA

Pro reálné posouzení úvah o navržené konstrukci, jsme přikročili ke statické analýze sestaveného modelu dřevěné konstrukce. V této části disertační práce byl přizván jako konzultant Ing. Roman Gratza, PhD. (absolvent Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně), kapitola 6.2 Statická simulace a posouzení modelu klenebné konstrukce je pak jeho samostatným autorským vstupem do této disertační práce.

Cílem je provést statickou simulaci navržené konstrukce, vyhodnotit průběh silového působení a vyvozených deformací, zjistit reálnou únosnost dřevěných ohýbaných kružnic (experiment) a odvodit způsob a míru namáhání ve spoji. Výsledek analýzy bude možné porovnat se zatěžovací zkouškou provedenou na modelu (kapitola 5.4) a současně bude možné nastínit možnosti využití tohoto konstrukčního systému ve stavební praxi.

Jako podklad pro statické posouzení konstrukce je nutné provést experimentální vyhodnocení mechanických vlastností dřevěných ohýbaných kružnic, případně vzorků ohýbaného bukového dřeva. Zkoušky mechanických vlastností popisuje následující kapitola 6.1.

6.1 ZKOUŠKA MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ DŘEVĚNÝCH KRUŽNIC

V průběhu dubna-května 2015 jsme provedli sérii mechanických zkoušek dřevěných kružnic na Experimentálním centru FSv ČVUT. Tato měření poskytla vstupní data pro následující statický výpočet. Vzhledem k specifickým vlastnostem ohýbaných dřevěných kružnic nelze použít tabulkové hodnoty pro standardní bukové dřevo. Dřevěné kružnice byly otestovány v tahu, tlaku a ohybu. Dále byly testovány vyřezané vzorky bukového dřeva v tlaku.

Tato měření slouží především jako podklad pro simulaci zátěžového stavu modelu ve statickém software. Je tedy nutné zajistit pokud možno kompletní sadu dat, přestože samotná konstrukce je namáhána téměř výhradně kombinací tlaku a ohybu.

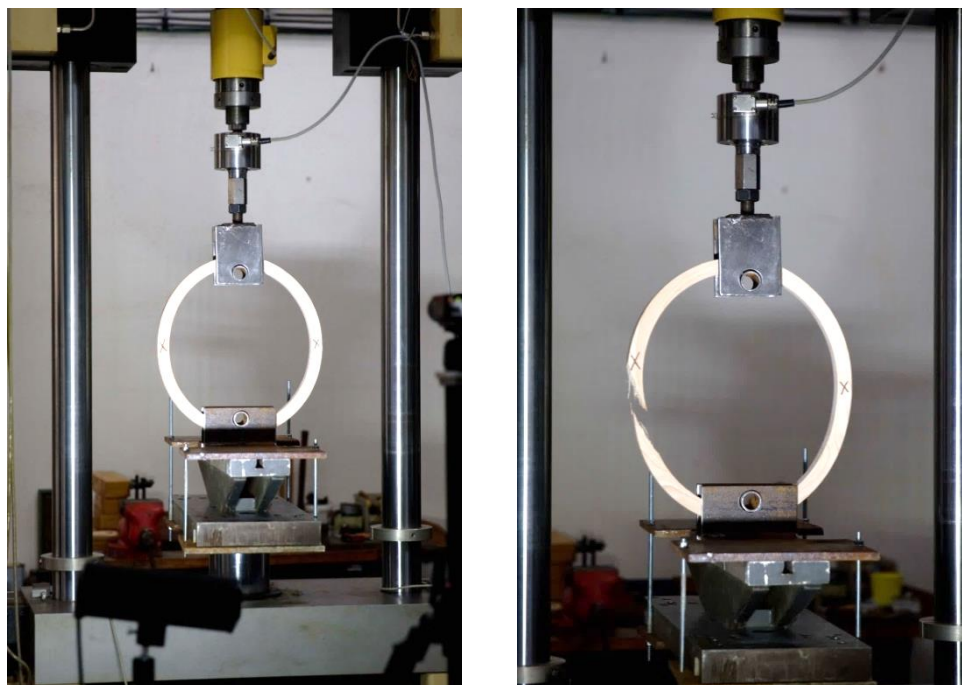
6.1.1. VÝSLEDKY ZKOUŠKY DŘEVĚNÝCH KRUŽNIC V TAHU A TLAKU

Zkouška kružnic v tahu a tlaku proběhla 3.4. 2015 na Experimentálním centru FSv ČVUT. Testována byla obruč Ø370 mm, průřez 25/32 mm, vždy do porušení dřeva, případně až do přetržení obruče. Jednotlivé vzorky byly zatěžovány válcem s manuálním posunem, kontakt s dřevěným prvkem ve dvou protilehlých bodech přes ocelový váleček Ø32mm. Byly testovány 3 vzorky na tah a 3 vzorky na tlak. Zaznamenávána byla dráha válce ~ svislá deformace a kamerou měřen vzájemný posun dvou protilehlých bodů umístěných v ose profilu ~ vodorovná deformace. Průběh zkoušky popisují následující fotografie a grafy.

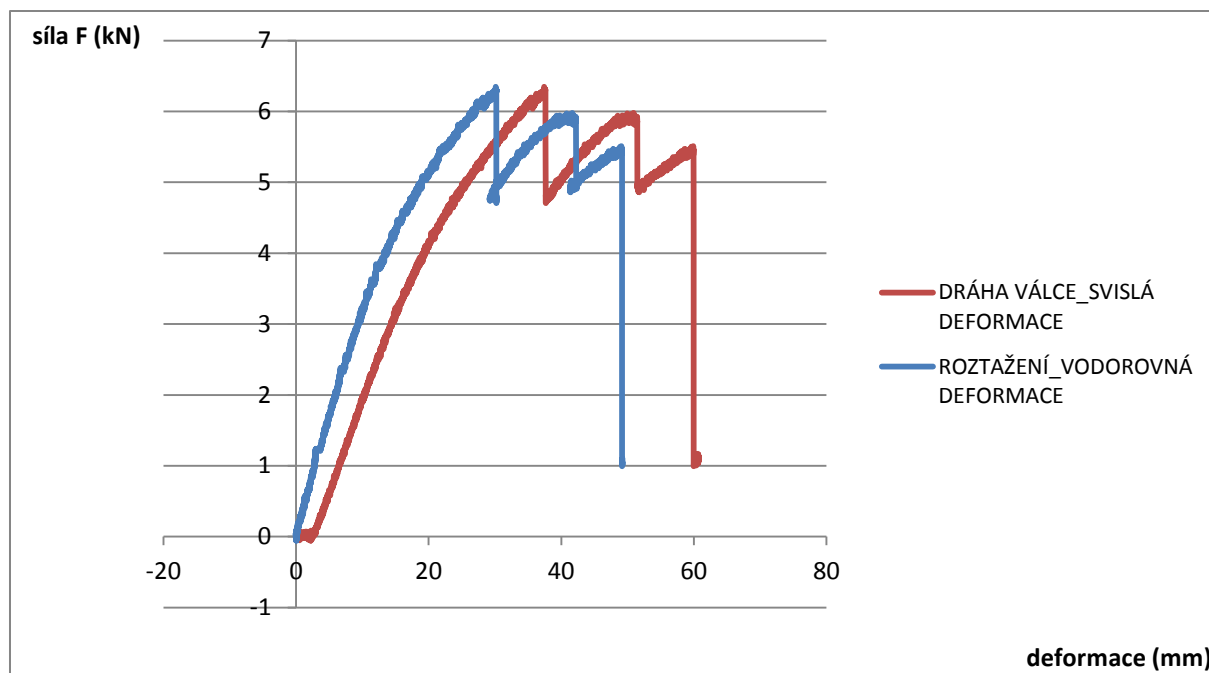
6.1.1.1. Vzorek č.2 - TAH

Vzorek č.2 byl zatěžován tahem až do přetržení obruče. K porušení došlo v místě lepeného spoje. Okraj porušení v místě napojení lepeného spoje, zbylá část je přetržena ve dřevě mimo spoj.

Výchozí vzdálenost kamerou měřených bodů: 34,2 cm



Obr.69) Počáteční stav a výsledné porušení vzorku - zatížení tahem, vzorek č.2



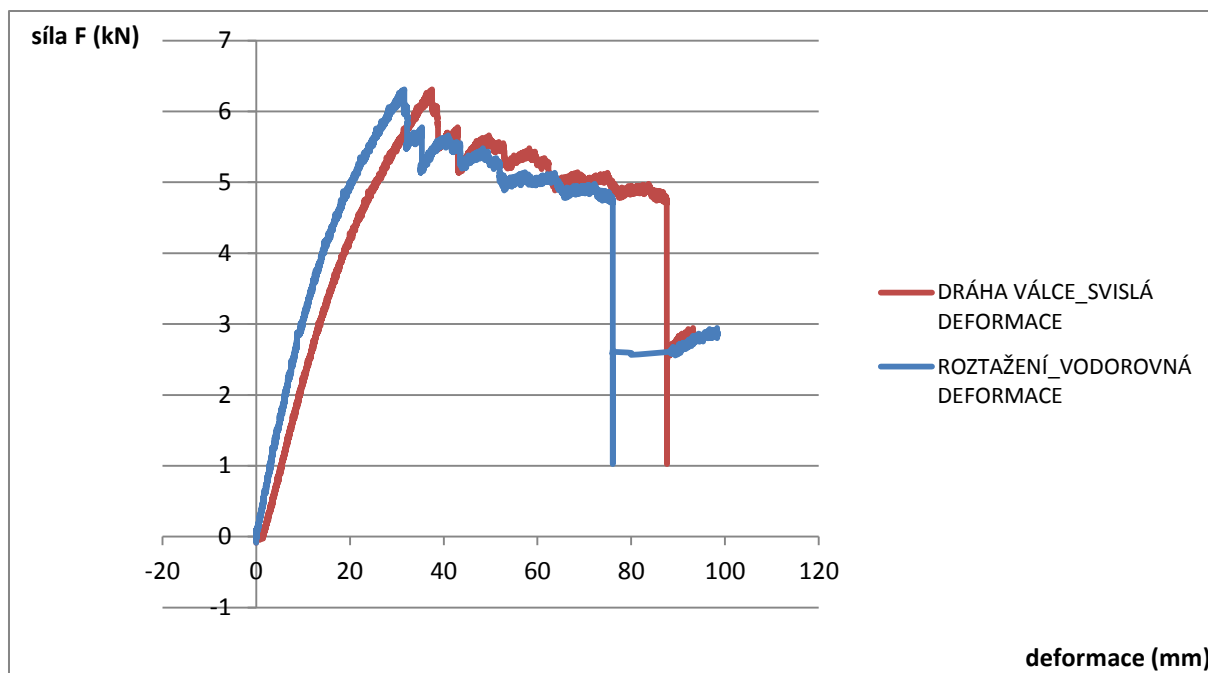
Obr.70) Vztah deformace a působící síly – vzorek č.2

6.1.1.2. Vzorek č.3 - TAH

Vzorek č.3 byl zatěžován tahem až do přetržení obruče. K porušení došlo v oblasti lepeného spoje. Praskliny ve dřevě se objevily také na vnějším obvodu obruče v místě působení ocelových válečků. Výchozí vzdálenost kamerou měřených bodů: 34,2 cm



Obr.71) Porušení vzorku č.3 - zatížení tahem



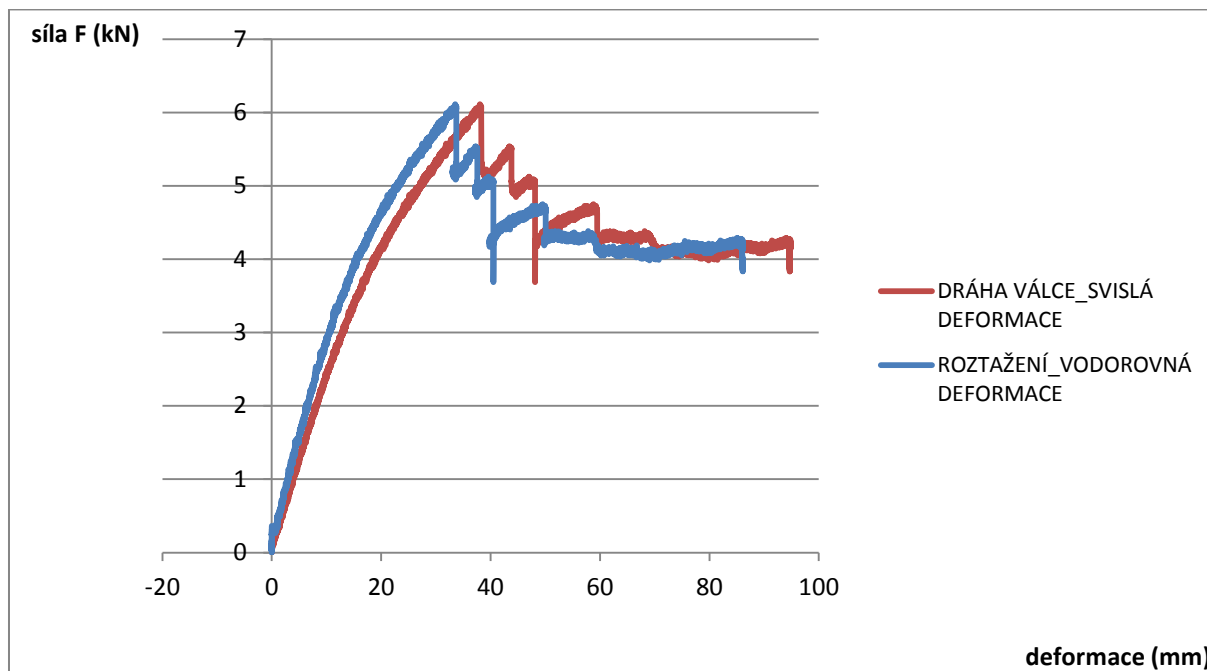
Obr.72) Vztah deformace a působící síly – vzorek č.3

6.1.1.3. Vzorek č.4 - TAH

Vzorek č.4 byl zatěžován tahem. K přetržení obruče v zatěžovaném rozsahu nedošlo. V místě působení ocelových válečků se na vnějším obvodu obruče objevily praskliny ve dřevě. V místě lepeného spoje bez znatelného porušení. Výchozí vzdálenost kamerou měřených bodů: 34,3 cm



Obr.73) Maximální deformace a porušení vzorku č.4 - zatížení tahem



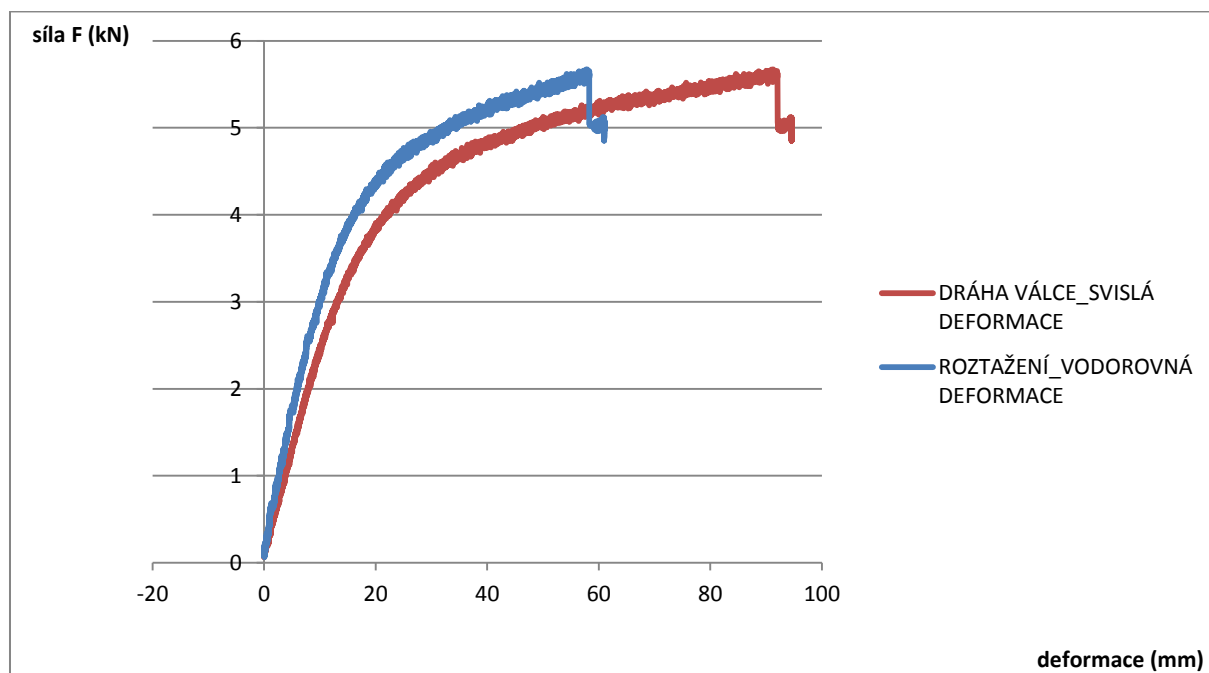
Obr.74) Vztah deformace a působící síly – vzorek č.4

6.1.1.4. Vzorek č.5 - TLAK

Vzorek č.5 byl zatěžován tlakem. K přetržení obruče v zatěžovaném rozsahu nedošlo. V místě maximální horizontální deformace (mimo spoj) se objevily praskliny na vnějším obvodu obruče, kde se začaly oddělovat vrstvy vláken. V místě působení ocelových válečků na vnitřním obvodu obruče došlo k otlacení dřevěného profilu. Výchozí vzdálenost kamerou měřených bodů: 34,3 cm



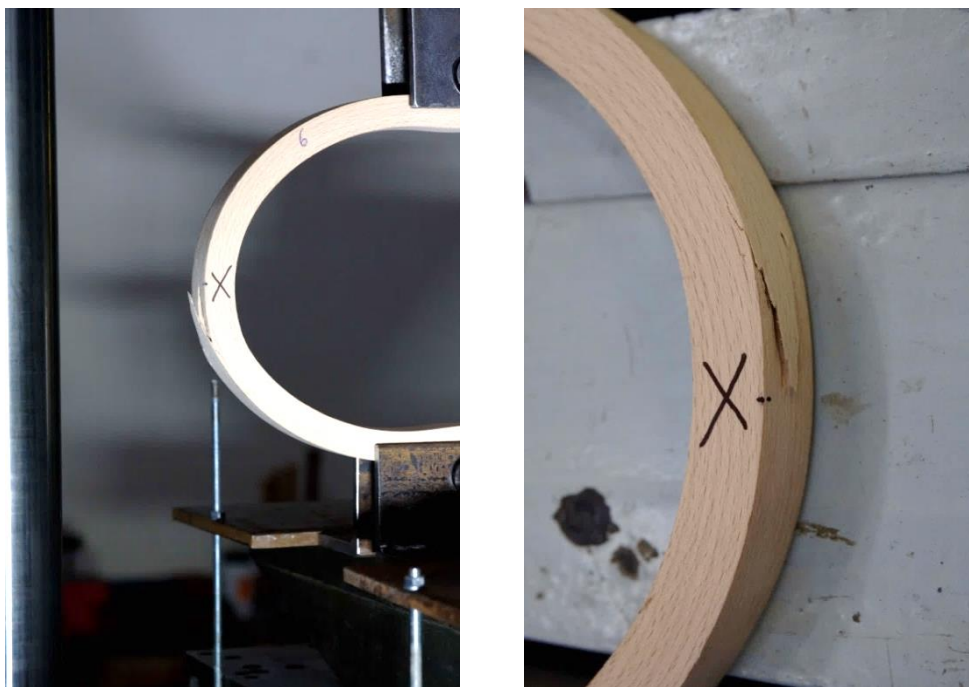
Obr.75) Počáteční stav a výsledné porušení vzorku - zatížení tlakem, vzorek č.5



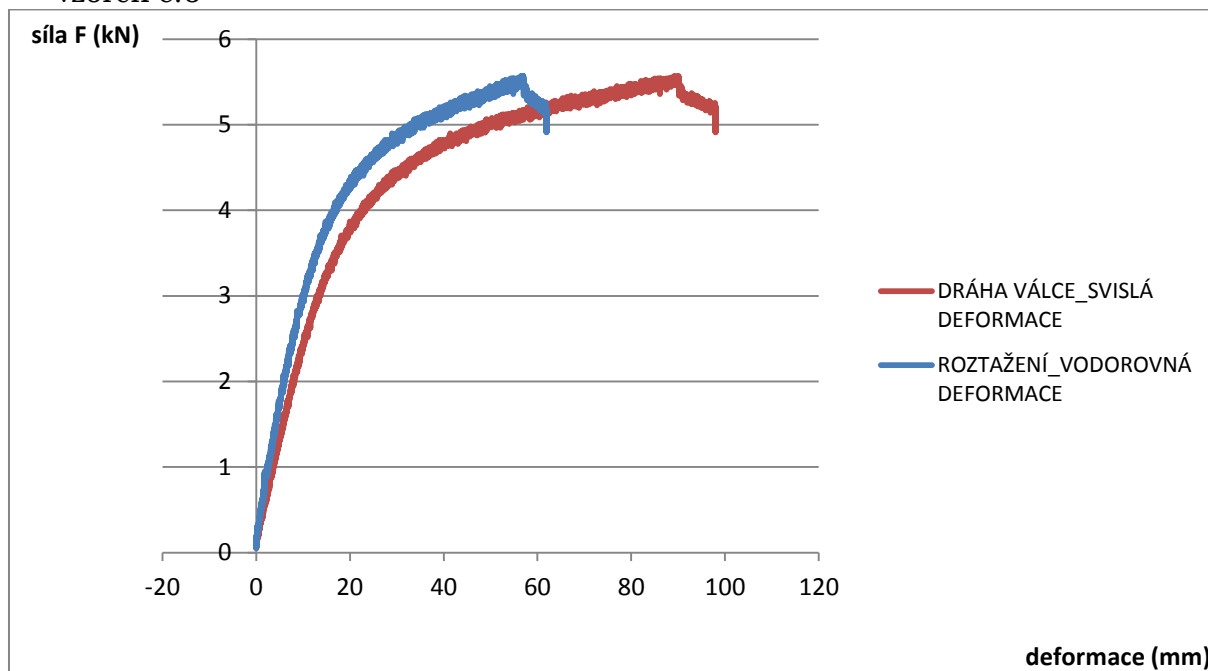
Obr.76) Vztah deformace a působící síly – vzorek č.5

6.1.1.5. Vzorek č.6 - TLAK

Vzorek č.6 byl zatěžován tlakem. K přetržení obruče v zatěžovaném rozsahu nedošlo. V místě maximální horizontální deformace (mimo spoj) se objevily praskliny na vnějším obvodu obruče, kde se začaly oddělovat vrstvy vláken. V místě působení ocelových válečků na vnitřním obvodu obruče došlo k otlacení dřevěného profilu. Výchozí vzdálenost kamerou měřených bodů: 34,3 cm



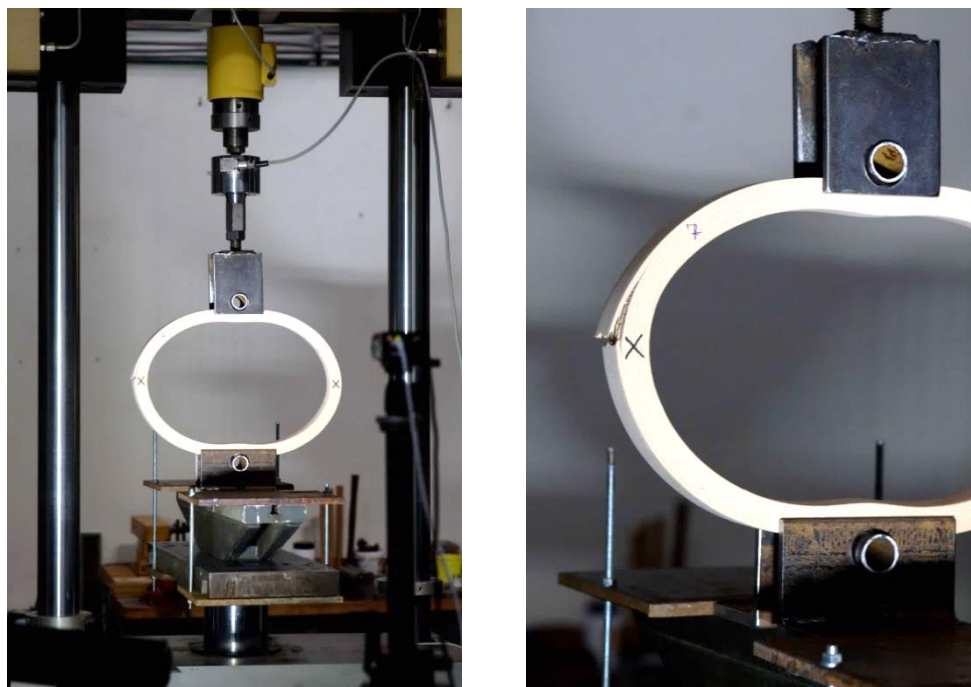
Obr.77) Maximální deformace a výsledné porušení vzorku - zatížení tlakem, vzorek č.6



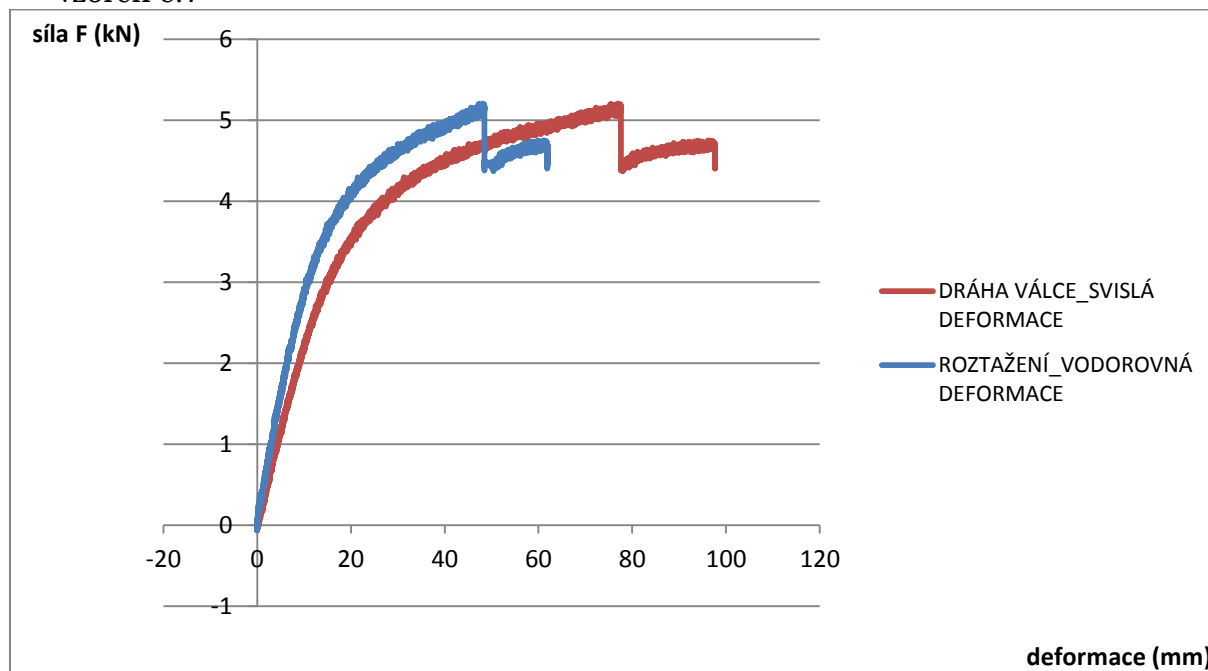
Obr.78) Vztah deformace a působící síly – vzorek č.6

6.1.1.6. Vzorek č.7 - TLAK

Vzorek č.7 byl zatěžován tlakem. K přetržení obruče v zatěžovaném rozsahu nedošlo. V místě maximální horizontální deformace (mimo spoj) se objevily praskliny na vnějším obvodu obruče, kde se začaly oddělovat vrstvy vláken. V místě působení ocelových válečků na vnitřním obvodu obruče došlo k otlacení dřevěného profilu. Výchozí vzdálenost kamerou měřených bodů: 34,3 cm



Obr.79) Maximální deformace a výsledné porušení vzorku - zatížení tlakem, vzorek č.7



Obr.80) Vztah deformace a působící síly – vzorek č.7

6.2 NUMERICKÁ STUDIE ZKOUŠKY DŘEVĚNÝCH KRUŽNIC V TAHU A TLAKU - Autor Ing. Roman Gratza, Ph.D.

Výpočet vypracoval: **Ing. Roman Gratza, Ph.D.**
Datum vypracování: **15. 6. 2015**

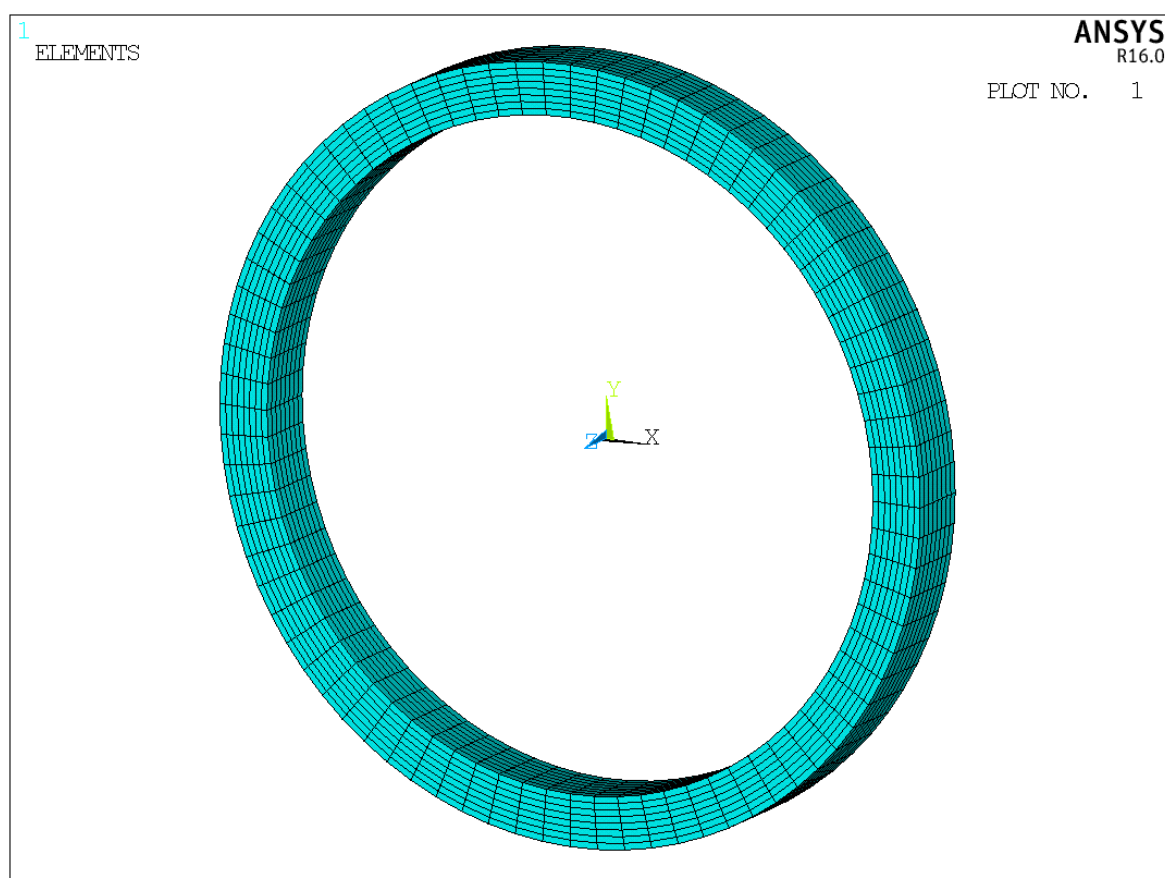
Předmět řešení

Dřevěná obruč

- Cílem této studie je určit modul pružnosti ohýbaného dřeva, který je následně použit v modelu kupole z obručí.

Popis obruče

- Rozměry obruče [2]: střední průměr obruče 345 mm (obdélníkový průřez 32x25 mm)



Obr.81) Model obruče

Materiálové charakteristiky

- Dřevo (buk) – obruče
 - modul pružnosti: $E = 3500 \text{ MPa}$
 - Poissonův součinitel: $\nu = 0,3$
 - hustota: $\rho = 720 \text{ kg/m}^3$

Okrajové podmínky

- Ve spodní části obruče je zabráněno posunům vybraných uzlů ve všech směrech (x, y, z)

- V horní části obruče je zabráněno posunům vybraných uzlů ve směru os (x, z)

Zatížení

- **Varianta A**
 - Tahová síla ($F = 3,0$ kN)
- **Varianta B**
 - Tlaková síla ($F = 3,0$ kN)

Výpočtový model

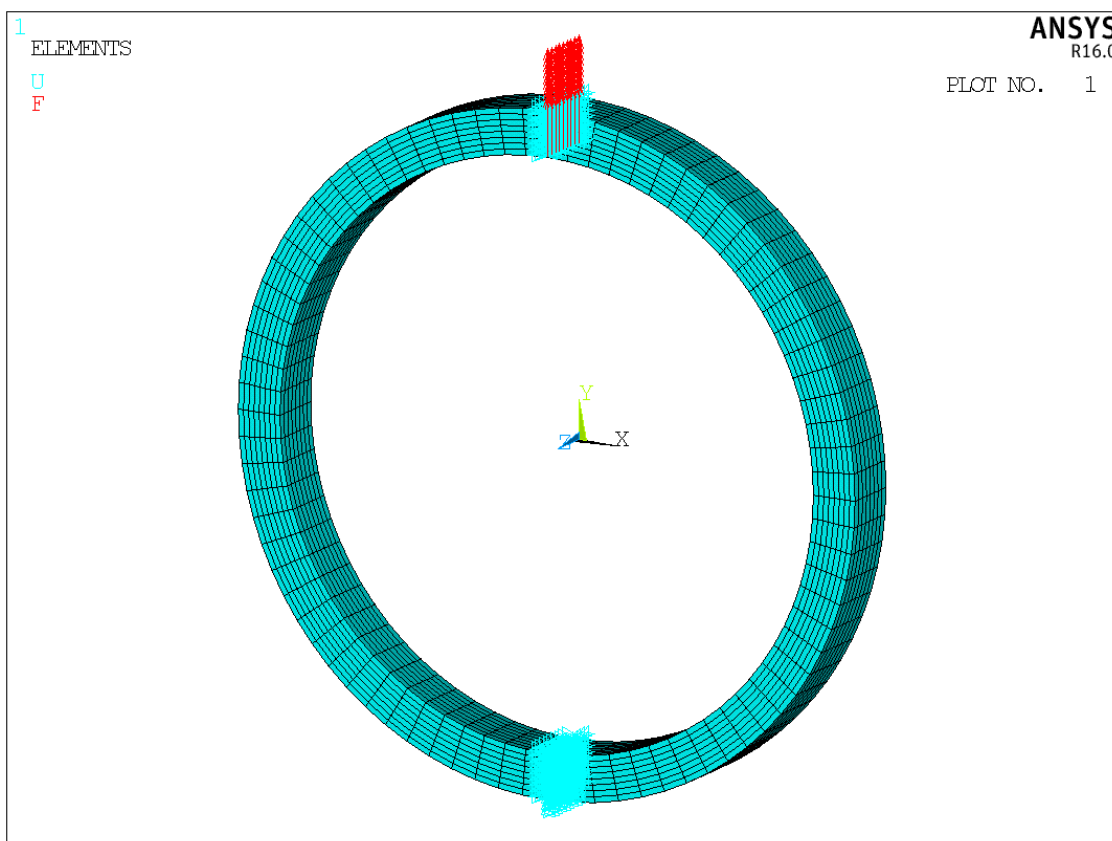
- Metoda výpočtu: výpočet pomocí programového systému ANSYS založeného na metodě konečných prvků (MKP)
- Typ konečných prvků: SOLID185
- Typy výpočtu: pomocí programu byly provedeny geometricky lineární a nelineární výpočty

Podklady

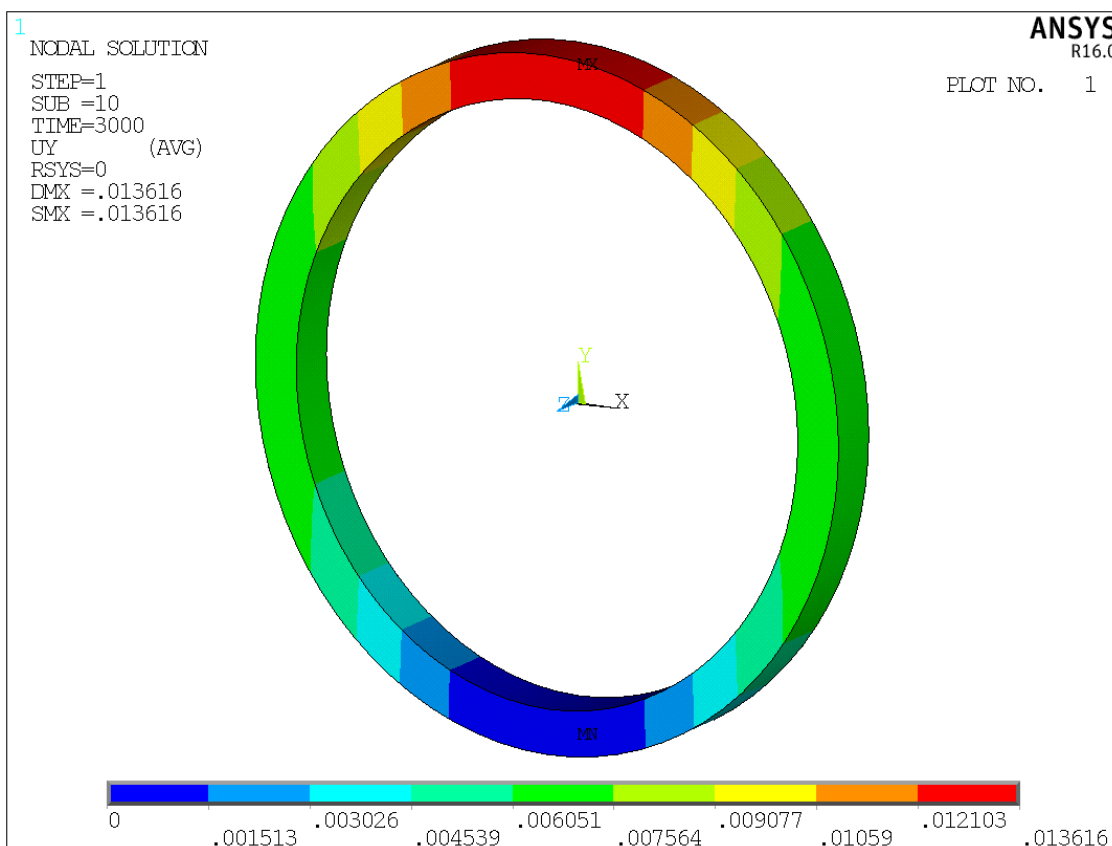
[1] Vomelová, Š. Experimenty s obručemi. 2015.

[2] Vomelová, Š. Schéma obruče. 2015.

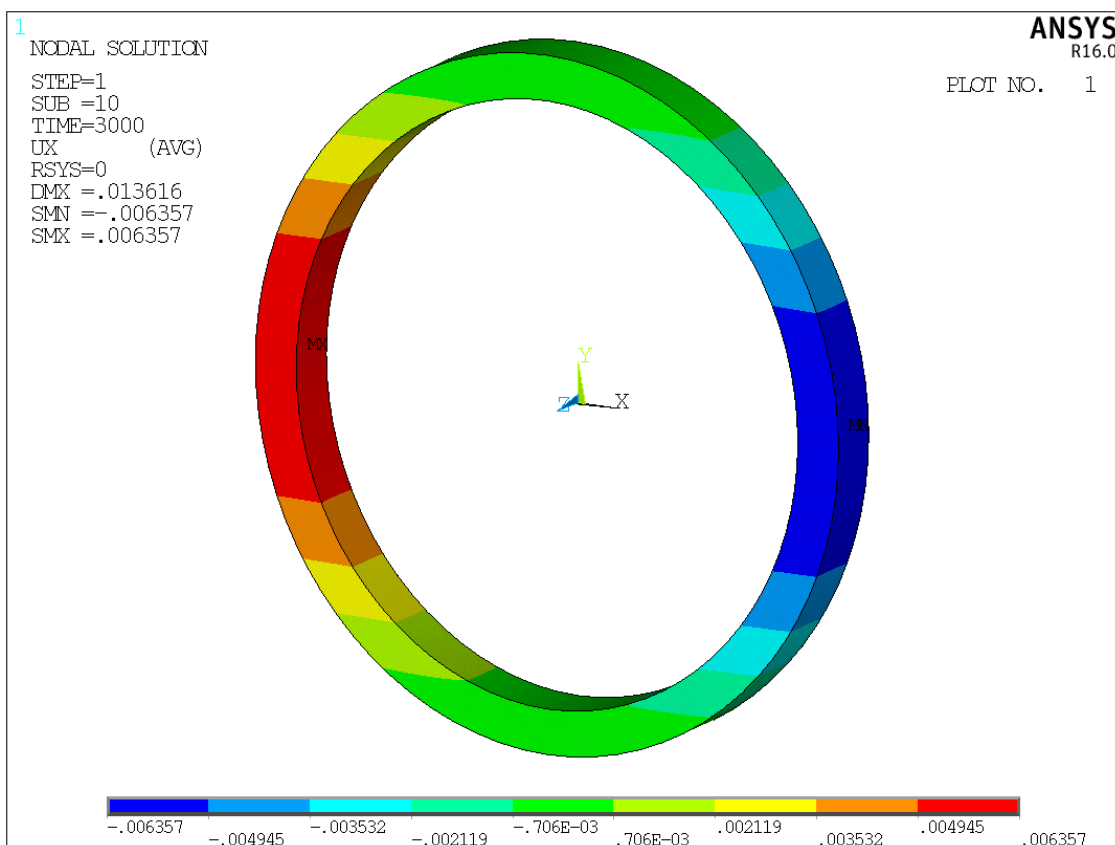
[3] Vomelová, Š. Inovativní dřevěné konstrukce. Studie disertační práce ke státní doktorské zkoušce. 2014.



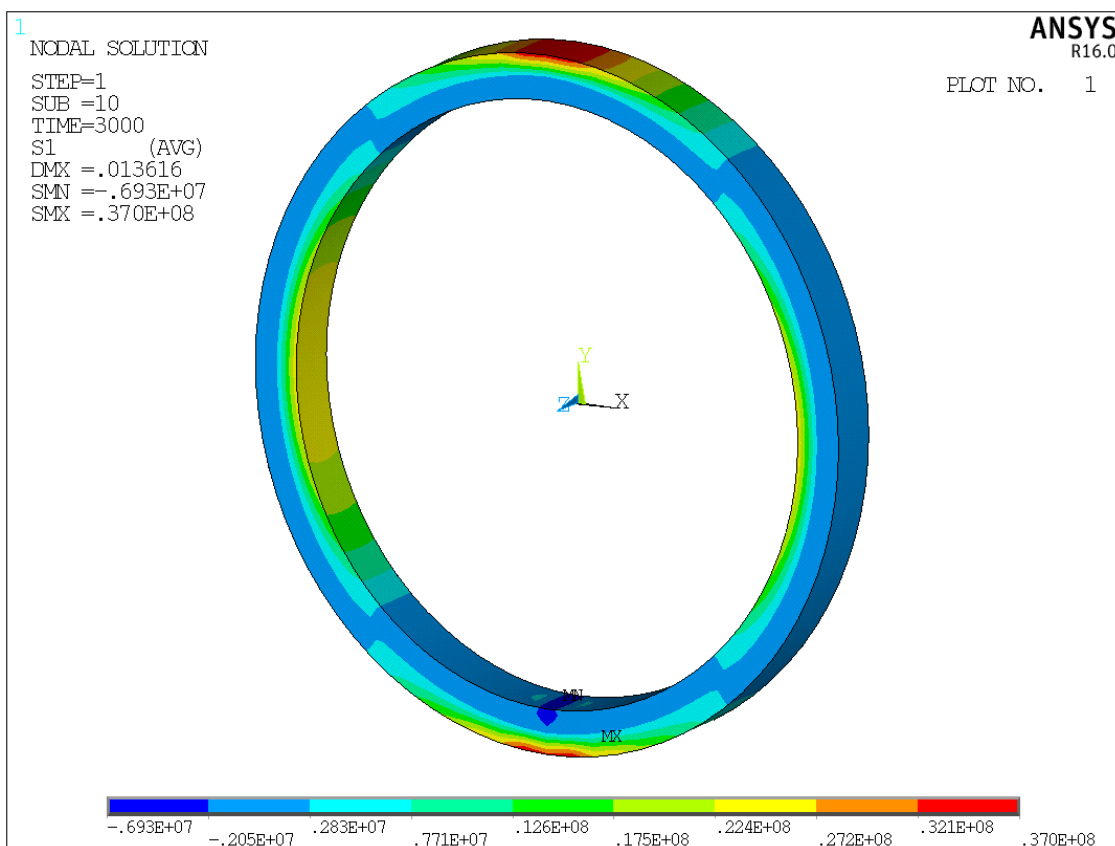
Obr.82) Okrajové podmínky, zatížení (varianta A)



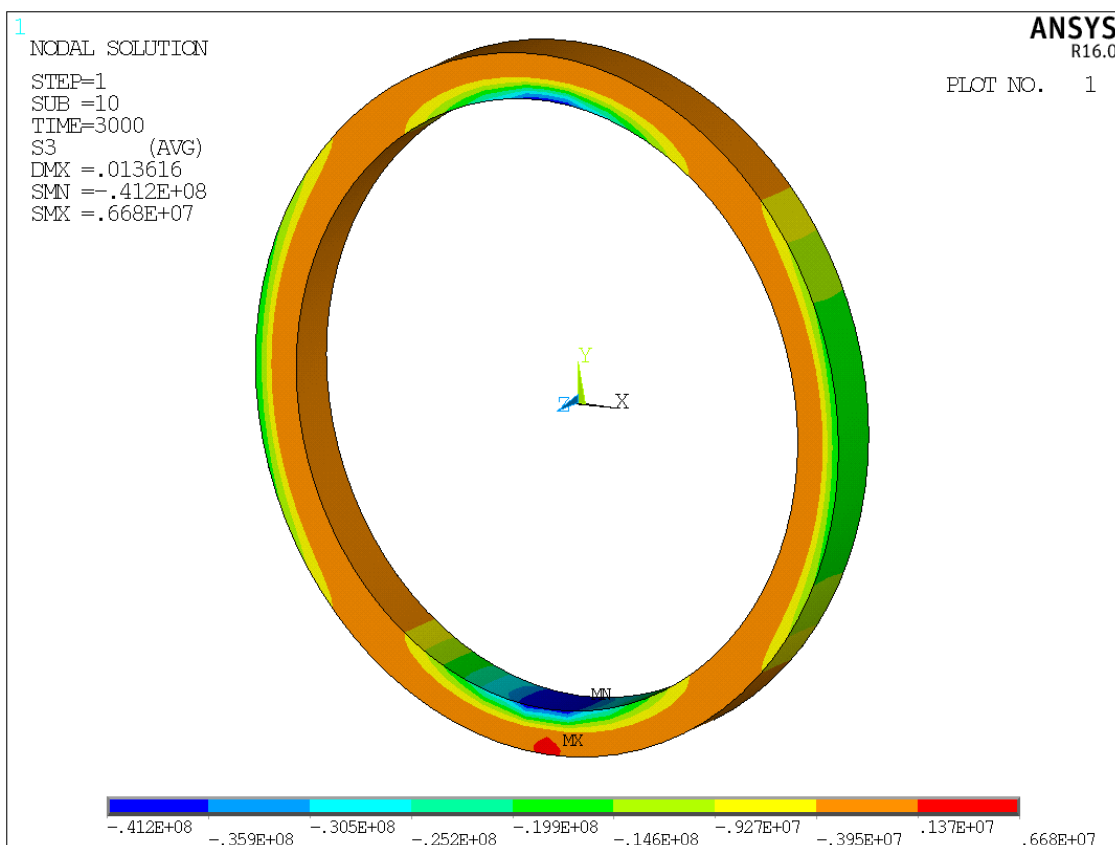
Obr.83) Geometricky nelineární výpočet, posunutí ve směru osy y (varianta A)



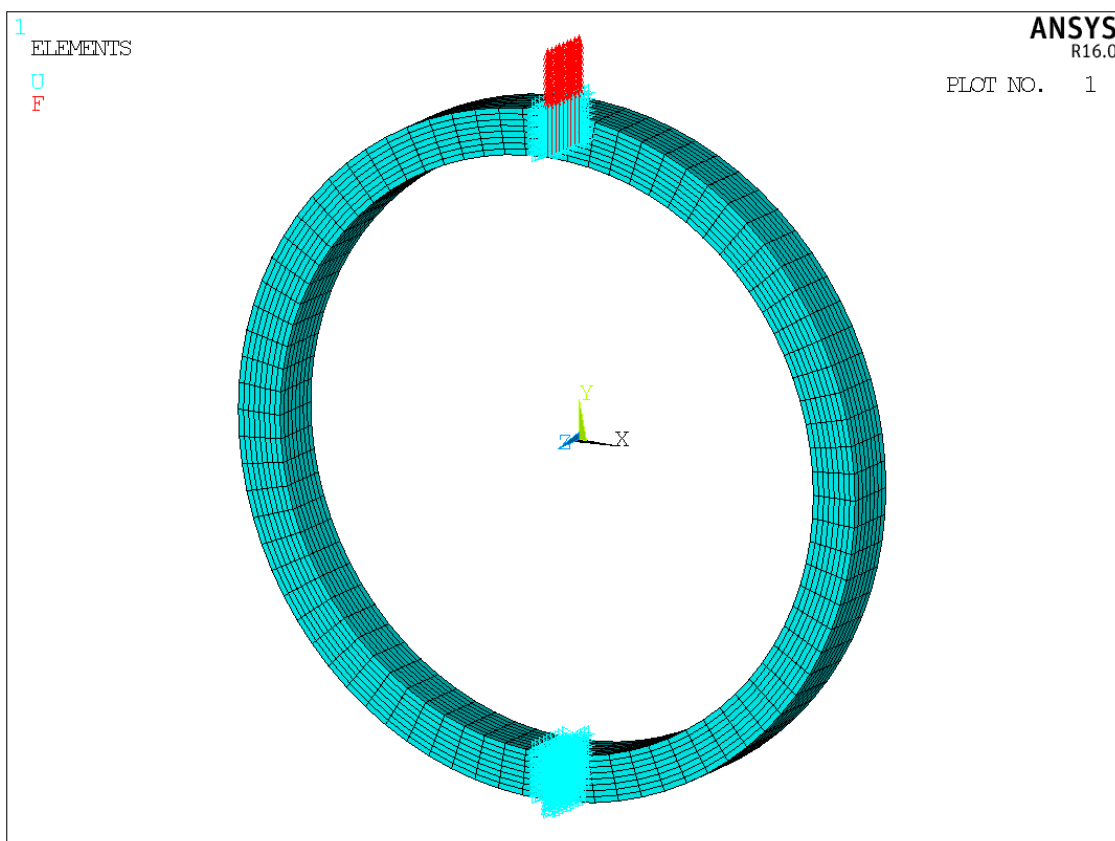
Obr.84) Geometricky nelineární výpočet, posunutí ve směru osy x (varianta A)



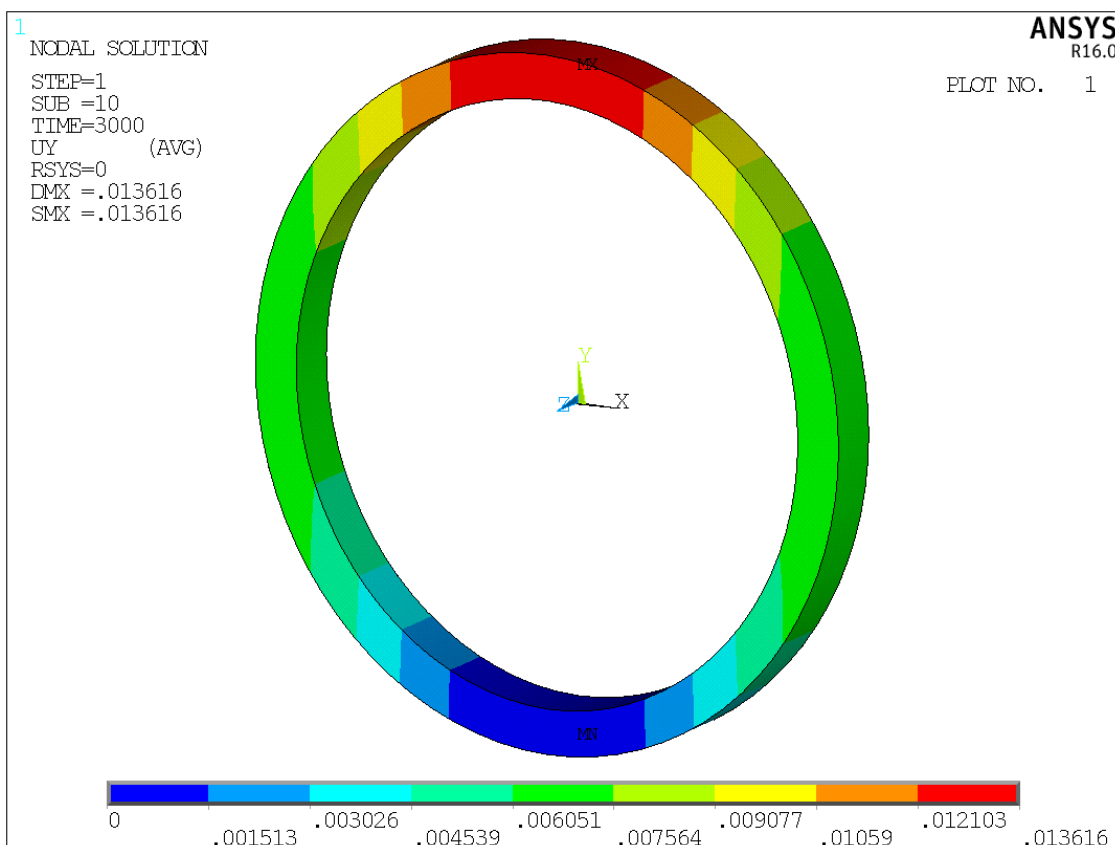
Obr.85) Geometricky nelineární výpočet, hodnoty hlavních napětí σ_1 (var. A)



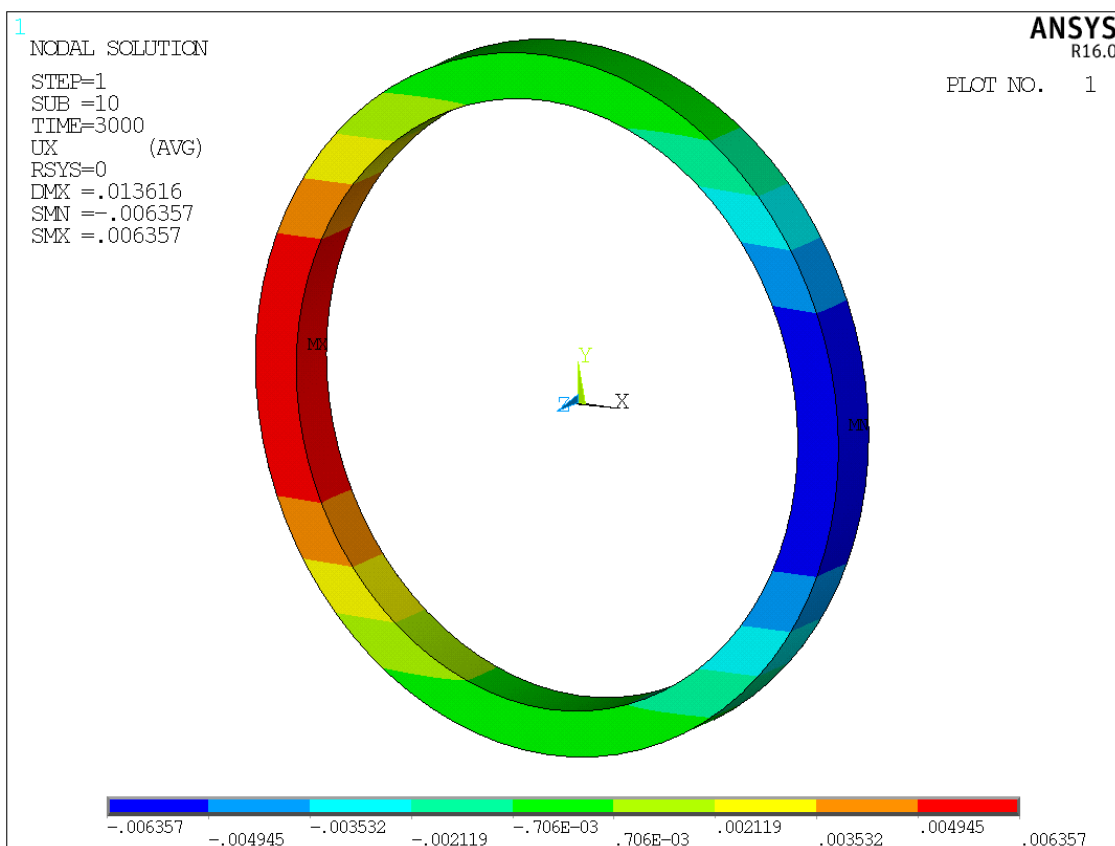
Obr.86) Geometricky nelineární výpočet, hodnoty hlavních napětí σ_3 (var. A)



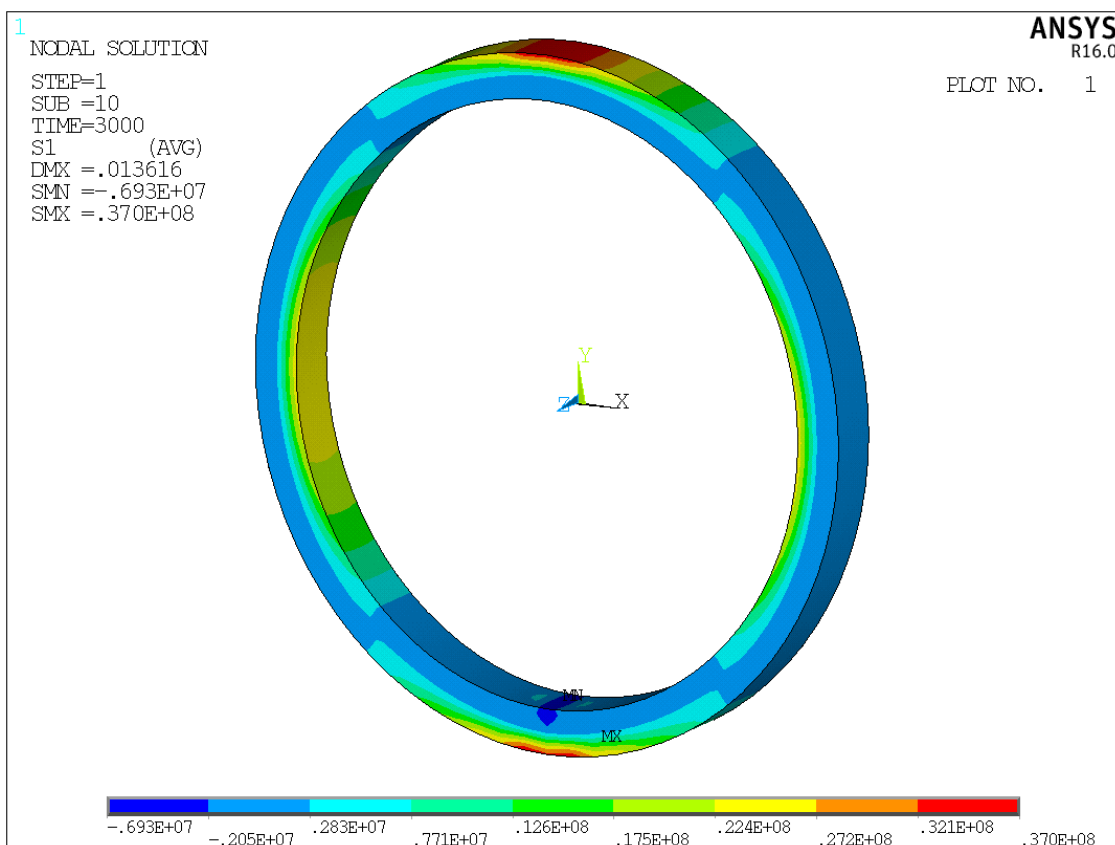
Obr.87) Okrajové podmínky, zatížení (varianta B)



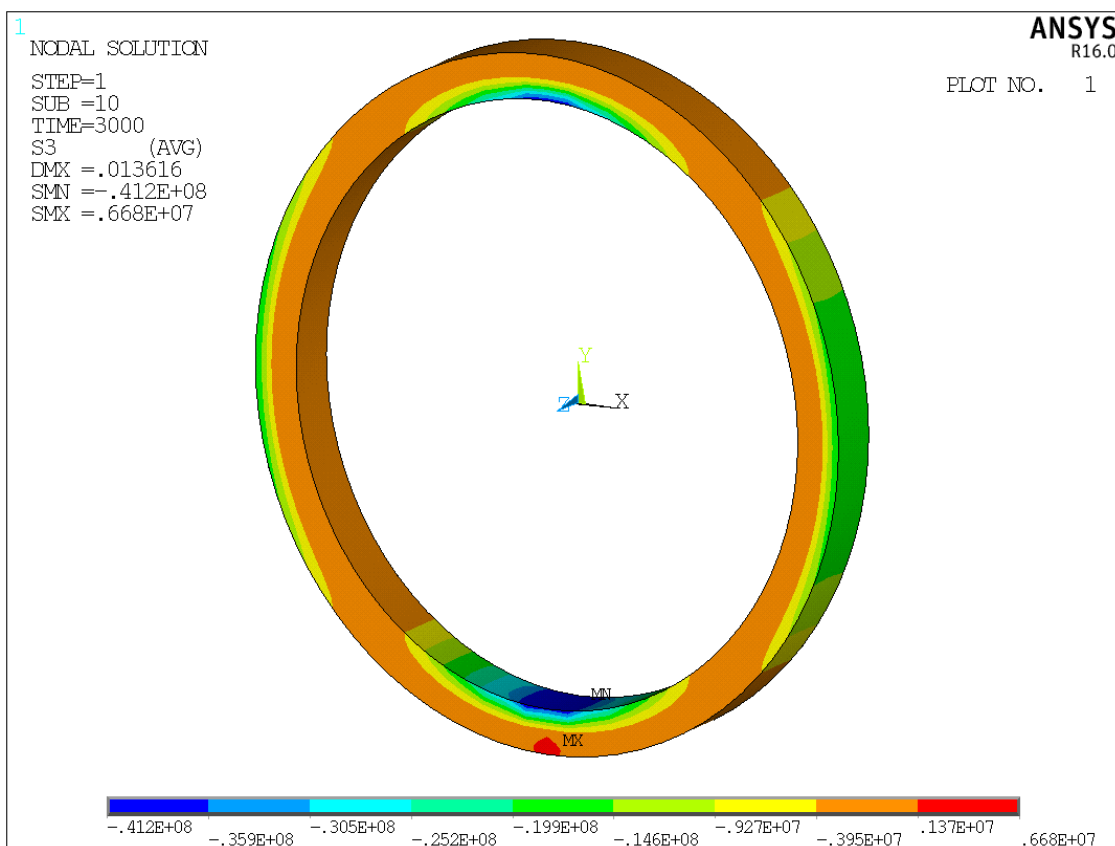
Obr.88) Geometricky nelineární výpočet, posunutí ve směru osy y (varianta B)



Obr.89) Geometricky nelineární výpočet, posunutí ve směru osy x (varianta B)



Obr.90) Geometricky nelineární výpočet, hodnoty hlavních napětí σ_1 (var. B)



Obr.91) Geometricky nelineární výpočet, hodnoty hlavních napětí σ_3 (var. B)

Závěr

- **Varianta A**

Z výsledků zkoušek [1] lze odvodit, že zhruba do velikosti tahové síly 3,0 kN se chová obruč přibližně lineárně pružně. Pro tuto velikost síly lze určit z experimentů vzorků (2_tah, 3_tah, 4_tah) průměrnou hodnotu svislého roztážení cca 13,651 mm a průměrnou hodnotu vodorovného zkrácení cca 9,908 mm.

- **Varianta B**

Z výsledků zkoušek [1] lze odvodit, že zhruba do velikosti tlakové síly 3,0 kN se chová obruč přibližně lineárně pružně. Pro tuto velikost síly lze určit z experimentů vzorků (5_tlak, 6_tlak, 7_tlak) průměrnou hodnotu svislého zkrácení cca 13,756 mm a průměrnou hodnotu vodorovného roztážení cca 10,158 mm.

U numerických analýz byl uvažován lineárně pružný materiálový model. U tohoto materiálového modelu byl postupně měněn modul pružnosti tak, až bylo dosaženo u obou variant přibližně srovnatelných numerických výsledků s experimentálními údaji. Materiálová data hydrotermicky upravovaného bukového dřeva (modul pružnosti $E = 3500$ MPa a Poissonův součinitel $\nu = 0,3$) jsou dále využita u modelu kupole se dřevěnými obručemi.

6.3 NUMERICKÁ STUDIE PRUTOVÉHO PROSTOROVÉHO MODELU SFÉRICKÉ KONSTRUKCE Z OHÝBANÉHO DŘEVA - Autor Ing. Roman Gratza, Ph.D.

Výpočet vypracoval:

Ing. Roman Gratza, Ph.D.

Datum vypracování:

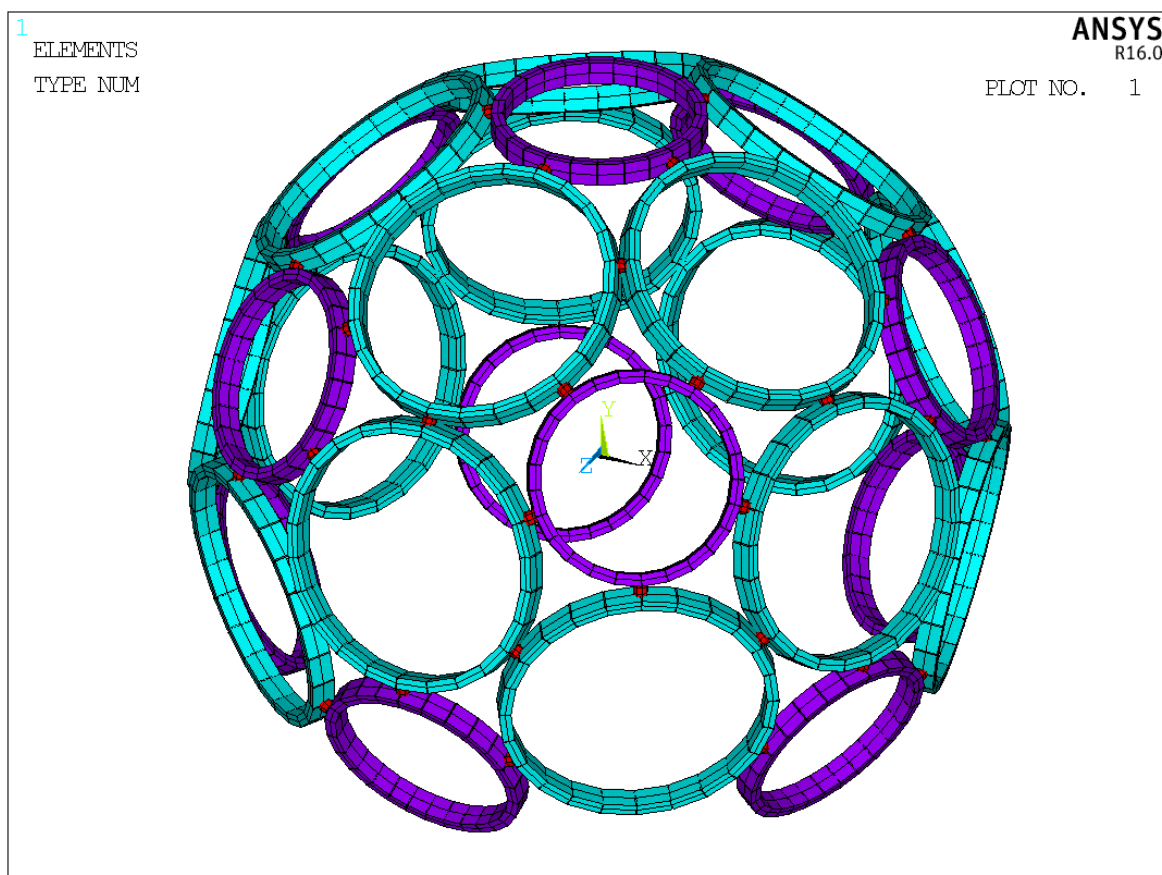
15. 6. 2015

Předmět řešení

Kupole ze dřevěných obručí

Popis konstrukce

- Tvar: kupole (odvozena z ikosaedru) [7] – je složena z 15-ti větších obručí, 11-ti menších obručí, 65 styčnicků a 5-ti patek
- Rozměry větší obruče: střední průměr obruče 455 mm (obdélníkový průřez 32x25 mm)
- Rozměry menší obruče: střední průměr obruče 345 mm (obdélníkový průřez 32x25 mm)
- Styčnický: ocelové výpalky (v modelu – kruhová plná tyč průměru 25 mm)
- Patky: ocelové výpalky (v modelu – okrajové podmínky)
- Ostatní rozměry: viz schéma kupole [7]



Obr.92) Model konstrukce

Materiálové charakteristiky

- Dřevo (buk) [4] – obruče
 - modul pružnosti: $E = 3500 \text{ MPa}$
 - Poissonův součinitel: $\nu = 0,3$
 - hustota: $\rho = 720 \text{ kg/m}^3$
- Ocel (S235) – styčníky, patky
 - modul pružnosti: $E = 210000 \text{ MPa}$
 - Poissonův součinitel: $\nu = 0,3$
 - hustota: $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$

Okrajové podmínky

- V místě patek je zabráněno posunům ve všech směrech (x, y, z)

Zatížení

- Vlastní tíha (buk $\rho_{\text{buk}} = 720 \text{ kg/m}^3$, ocel $\rho_{\text{ocel}} = 7850 \text{ kg/m}^3$)
- Pět osamělých sil ($F = 1,0 \text{ kN}$, $F_{\text{sum}} = 5,0 \text{ kN}$) působících svisle na vrcholovou obruč

Výpočtový model

- Metoda výpočtu: výpočet pomocí programového systému ANSYS založeného na metodě konečných prvků (MKP)
- Typ konečných prvků: BEAM188

- Typy výpočtu: pomocí programu byly provedeny geometricky lineární a nelineární výpočty a výpočet lineární stability

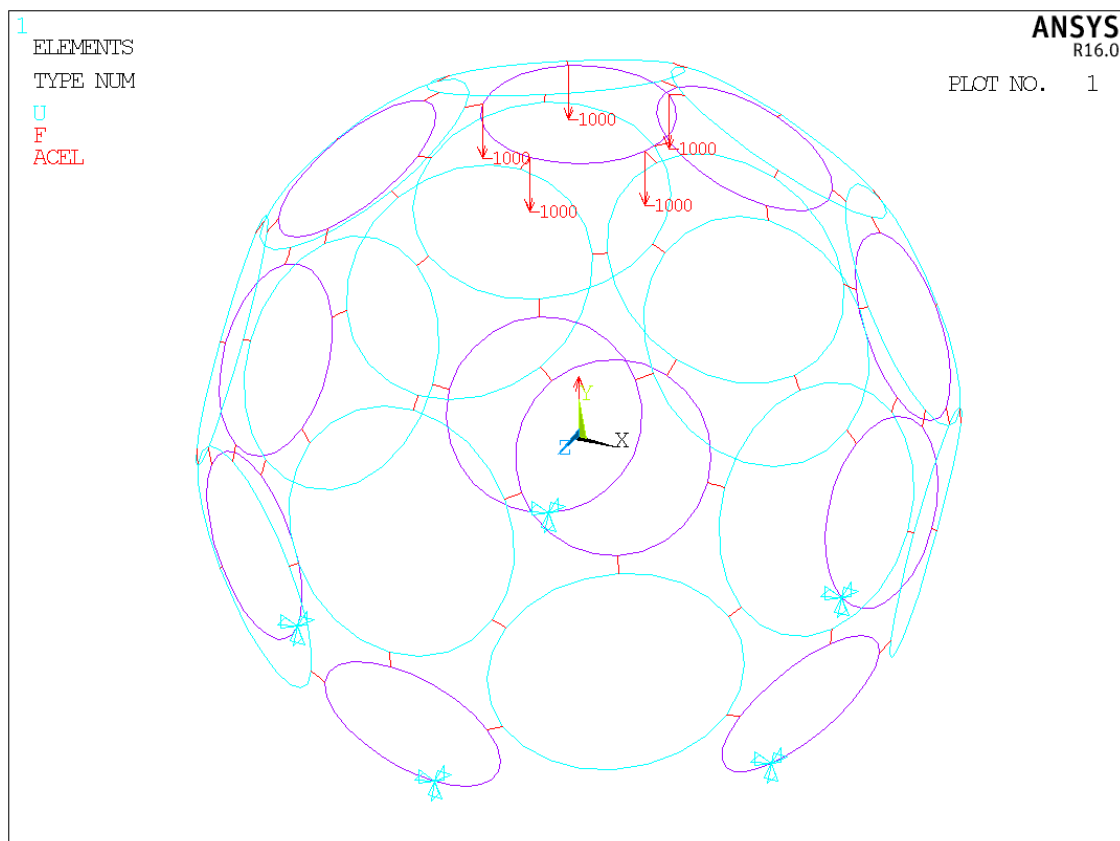
Podklady

[4] <http://www.ohybacidrevo.cz/vlastnosti/ohybaci-drevo-bendywood>

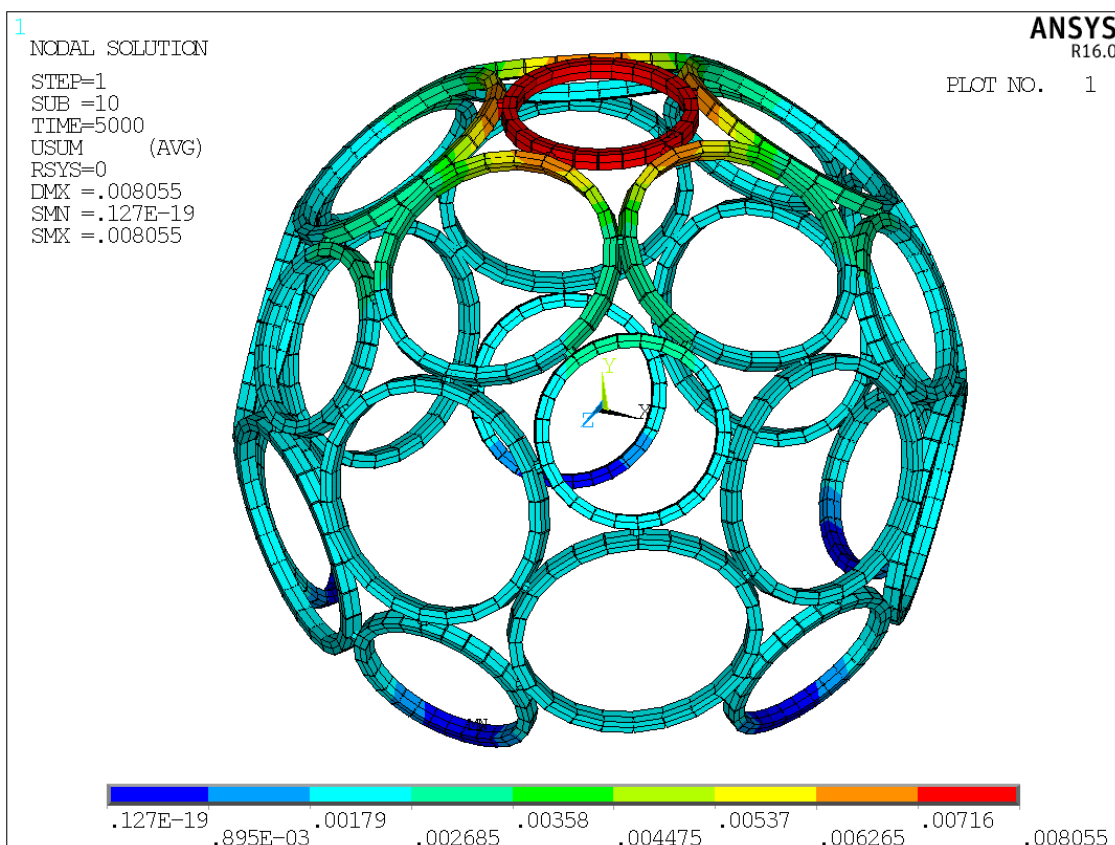
[5] Vomelová, Š. Inovativní dřevěné konstrukce. Studie disertační práce ke státní doktorské zkoušce. 2014.

[6] Vomelová, Š. Experiment s kupolí – video.

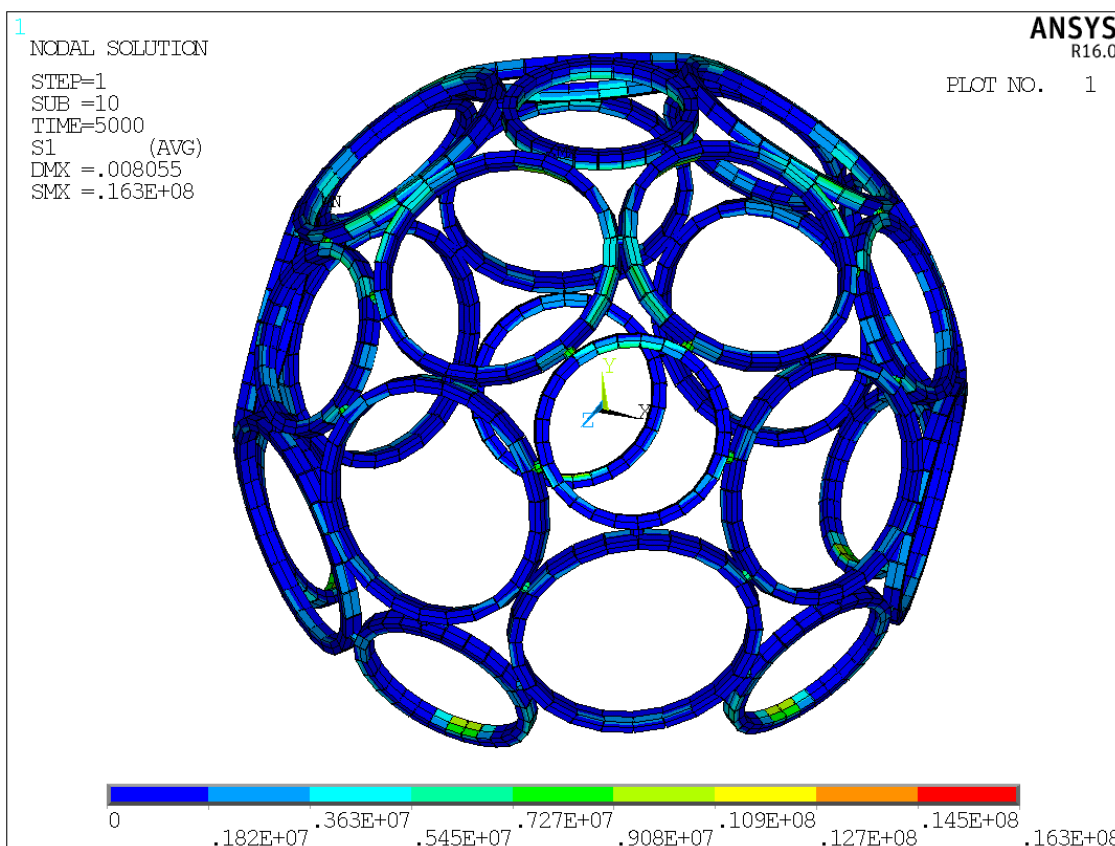
[7] Vomelová, Š. Schéma: 3V ikosaedr_geometrie modelu. 2015.



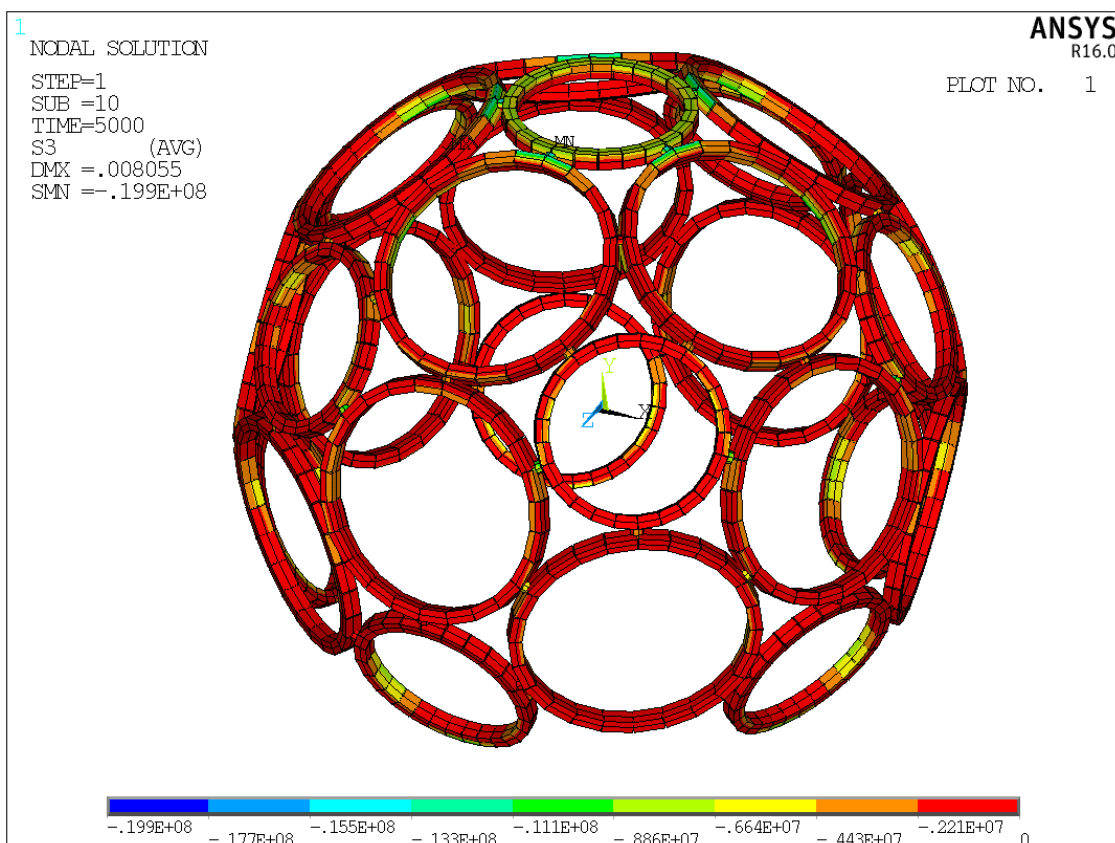
Obr.93) Okrajové podmínky, zatížení



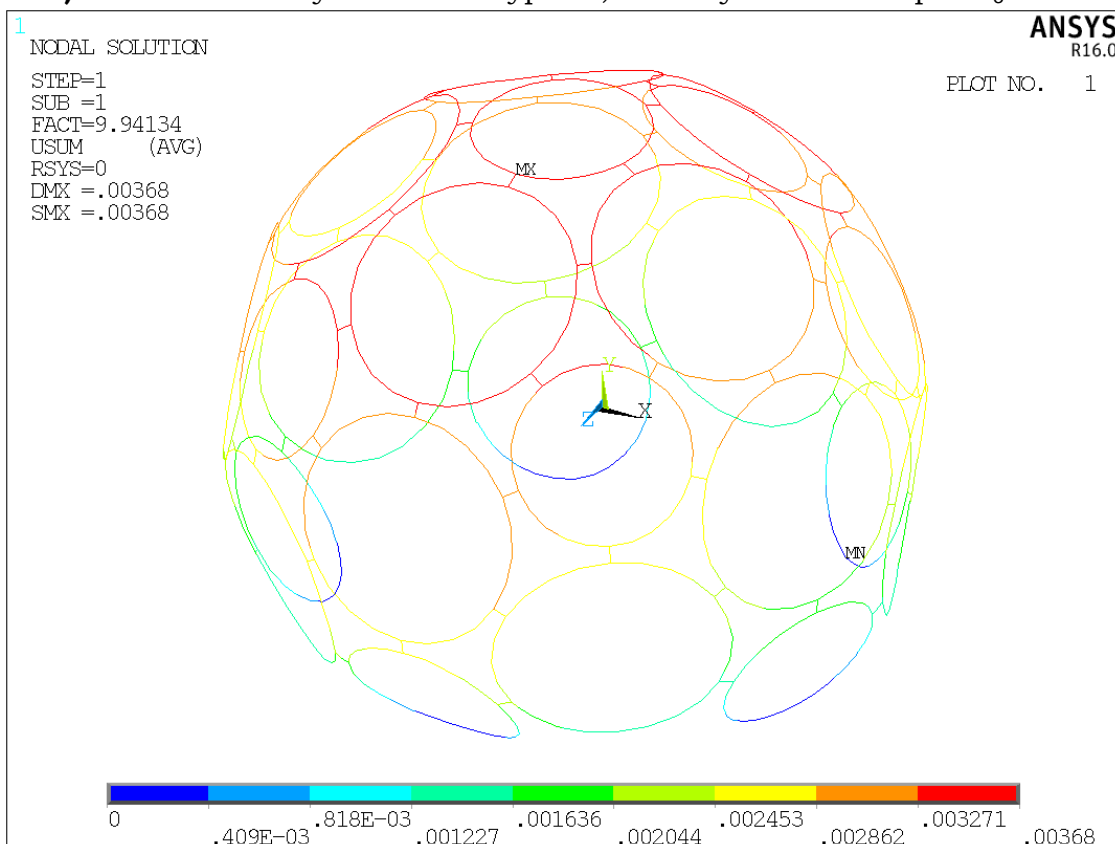
Obr.94) Geometricky nelineární výpočet, celková posunutí



Obr.95) Geometricky nelineární výpočet, hodnoty hlavních napětí σ_1



Obr.96) Geometricky nelineární výpočet, hodnoty hlavních napětí σ_3



Obr.97) Obr. 6: Lineární stabilita, první vlastní tvar, kritický násobek zatížení $\lambda_1 = 9,94134$

Upozornění (doporučení)

- Při výrobě obruče je dřevo hydrotermicky upravováno. Bylo by vhodné získat podrobnější data o mechanických vlastnostech dřeva. Je potřebné si uvědomit, že:
 - Modul pružnosti v ohybu je dle [4] u hydrotermicky upravovaného bukového dřeva přibližně čtyři krát menší než u normálního bukového dřeva. Hodnota modulu pružnosti ovlivňuje vypočtené hodnoty celkových posunutí a odolnost proti ztrátě stability konstrukce.
 - Pevnost v ohybu je dle [4] u hydrotermicky upravovaného bukového dřeva přibližně tři krát menší než u normálního bukového dřeva.
- Dále bylo by vhodné více specifikovat způsob použití a rozměry konstrukce, z čehož by šlo určit zatížení na konstrukci a následně i únosnost konstrukce.
- Z videa experimentu kupole [6] lze usuzovat, že:
 - Únosnost sklolaminátových spojů byla nedostatečná, přičemž došlo také k pootočení těchto spojů. Spoje by bylo vhodné nahradit ocelovými spoji. Ocelové spoje navrhnout tak, aby o únosnosti rozhodovalo dřevo.
 - Došlo k posunu sklolaminátových patek. Patky by bylo vhodné kotvit k podkladu.

6.4 SHRNUÍ NUMERICKÉ STUDIE

Bylo by potřebné ověřit technologické možnosti výroby ohýbaného hydrotermicky upravovaného dřeva, a to z hlediska změn rozměrů obruče, uvažování různých typů dřevin apod.

(Např.: Jakou lze vytvořit obruč určitého poloměru při změně rozměrů průřezu a jaké budou mechanické vlastnosti této obruče?)

Dřevo se považuje za anizotropní nehomogenní materiál. Ve výpočtech bylo ohýbané dřevo zjednodušeně uvažováno (kvůli nedostatku informací o materiálu) z materiálu, který je izotropní, homogenní a lineárně pružný. Bylo by tedy vhodné více prozkoumat vlastnosti ohýbaného dřeva.

Při hydrotermickém ohýbání dochází k podstatnému snížení mechanických vlastností dřeva. Dojde zejména ke snížení pevnosti a modulu pružnosti dřeva. Mechanické vlastnosti hydrotermicky ohýbaného se navíc můžou pravděpodobně podstatně měnit v čase. Asi se pořádně neví, jak vlastnosti ohýbaného dřeva následně ovlivní doba působení zatížení či působení jiných vlivů (např. změna vlhkosti v čase).

Otázkou je, jestli už pak není lepší zvolit jiný materiál pro tento typ konstrukce (např. obruče vyrobené z termoplastových trubek větších průměrů, laminátové obruče či obruče z ocelových trubek).

Pokud by se však uvažovalo ohýbané dřevo pro konstrukci, např. z estetického hlediska či z důvodu, že je to přírodní materiál, tak konstrukce z ohýbaného dřeva by měla být alespoň zjednodušeně navržena či posouzena s ohledem na předpokládanou životnost na základě tří kritérií, a to na posouzení deformací (posunutí), napětí a ztráty stability.

Kritéria posouzení (důkaz, zda konstrukce VYHOVUJE/NEVYHOVUJE):

- **Deformace:** $u_{\text{sum}} \leq u_{\text{dov}} = D_{\text{kupole}}/200$ a zároveň $\Delta u_{\text{obruče}} \leq u_{\text{dov}} = d_{\text{obruče}}/200$
(Vypočtené celkové posunutí u_{sum} by mělo být menší nebo rovno násobku specifického rozměru konstrukce např. 1/200 průměru kupole D_{kupole} . Podobně změna v posunech u průměru obruče by měla být menší nebo rovna např. 1/200 průměru obruče $d_{\text{obruče}}$.)
- **Napětí:** $\sigma \leq \sigma_{\text{dov}}$
(Dovolené napětí σ_{dov} by se dalo volit přibližně jako 1/5 meze pevnosti v ohybu při méně nebezpečných případech nebo jako 1/10 meze pevnosti v ohybu při více nebezpečných případech. Tím by se také zaručilo, že pokud by vypočtené napětí bylo pod hodnotou dovoleného napětí, tak by se chování ohýbaného dřeva dalo uvažovat jako lineárně pružné. Hodnota meze pevnosti v ohybu by se přitom mohla určovat z experimentu s obručí.)
- **Ztráta stability:** $\lambda_1 \geq S$
(Nejmenší kritický násobek zatížení λ_1 (získaný z výpočtu lineární stability) by měl být větší nebo roven součiniteli bezpečnosti S , přičemž v méně nebezpečných případech by se dalo uvažovat $S = 2$ a ve více nebezpečných případech $S = 4$.)

Pozn.: Uvedená kritéria jsou zvolena (odhadnuta) pro metodu dovolených namáhání.

7. SHRNUÍ, DOPORUČENÍ A ZÁVĚR

7.1 ZHODNOCENÍ NAPLNĚNÍ CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE, POSOUZENÍ VĚDECKÉHO PŘÍNOSU PRÁCE

Tato kapitola je závěrečným zhodnocením výzkumu, nových poznatků a naplnění cílů této práce. K cíli formulovanému v úvodu práce (kapitola 1.5) *nastítnit nové možnosti uplatnění dřeva v soudobé architektuře, představit rozsah forem, které tento materiál nabízí při využití inovativních technologií* a naplněnému rozsahu zpracování je podstatný také přínos práce jako vzoru generického postupu, který byl uplatněn a může sloužit jako podnětná badatelská inspirace pro obdobně experimentálně motivovaný vědecký postup, obecněji také pro výzkum uplatňující kreativní tvorbu návrhu jako jednu ze složek vědecké práce.

Výsledkem výzkumu jsou tedy nejen předložené poznatky, konstrukční schémata a navržený konstrukční systém, ale stejnou měrou i zkušenost s metodikou tvorby návrhu splňujícího parametry vědecké práce. Uplatněný postup jistě nelze generalizovat a je otevřeným předmětem k diskuzi. (1)

Ke znakům tvorby návrhu v parametrech vědecké metodiky uvedme především úsilí o komplexní přístup k hledání řešení, uvažování a posuny v různých rovinách abstrakce, přesuny v měřítku a simultánní zapojení podstatou rozmanitých postupů do procesu návrhu (analýza, intuitivní navrhování, experiment, prověření validity v různých měřítcích etc.). Tyto principy, uplatněné v procesu zpracování práce jsou obecně použitelné v kterékoliv oblasti výzkumu, který uplatňuje kreativní navrhování jako jednu ze složek vědecké práce. Univerzální použitelnost těchto principů jistě není nárokem na jejich výhradní platnost, jako spíše jednou z možností inspirace. Vzhledem k originální povaze kreativní práce lze za stejnětak validní považovat množství odlišných postupů různých autorů.

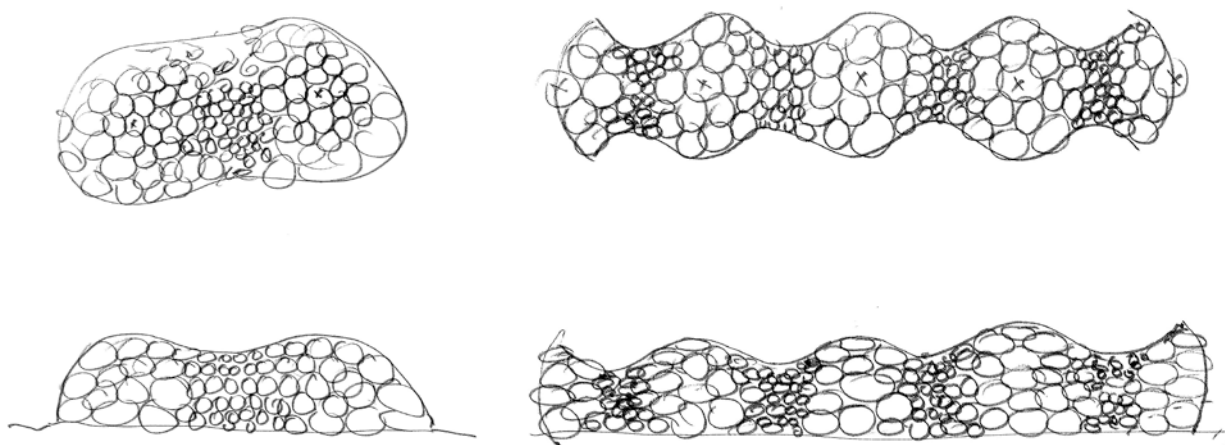
Jako další přínos lze uvést možnost navázat na konkrétní výsledky této práce například tvorbou průmyslového vzoru navrženého konstrukčního systému, nebo obecněji jako podklad pro práci autorů obdobně směřujících k vývoji inovativních konstrukčních systémů z ohýbaného dřeva.

7.2 MOŽNOSTI VYUŽITÍ V PRAXI, POTENCIÁL OHÝBANÉHO DŘEVA PRO NOVÉ KONSTRUKČNÍ SYSTÉMY

Ze zpracované numerické studie Ing. Romana Gratzy, Ph.D. lze usuzovat, že navrženou konstrukci v měřítku prototypu lze s výhodou uplatnit pro drobné realizace typu open-air pavilon, mobilní objekt či jako lehkou interiérovou konstrukci. Výsledky statických výpočtů mohou být podkladem pro následné posouzení vhodnosti konstrukce pro daný účel (deformace, napětí a ztráta stability).

Dalšími kroky směrem ke konstrukcím větších rozponů, které by případně mohly následovat jsou návrh konkrétní geometrie, volba technologie výroby kružnic (možnost záměny dřeva za vhodnější materiál) a řešení spoje. Obdobně postupovala autorka při návrhu prototypu v komornějším měřítku.

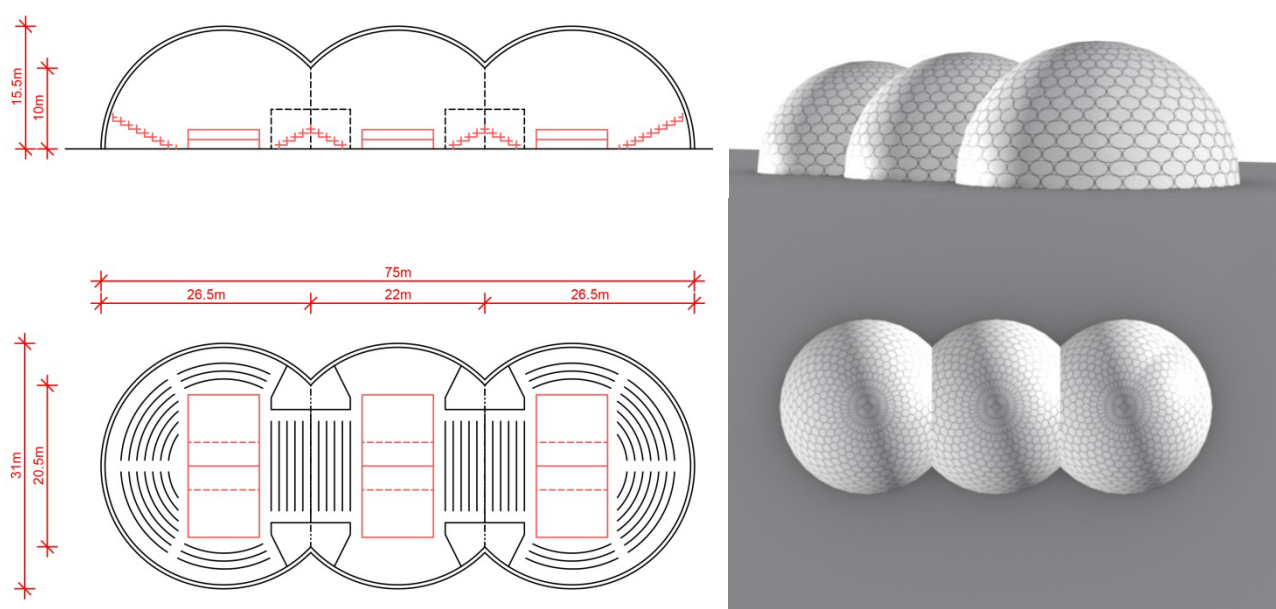
V následující kapitole je představen potenciál navrženého systému pro uplatnění v architektuře na variantních prostorových schématech. Je zřejmé, že jednou z předností navrženého řešení je značná prostorová variabilita, související s možností pojednat plášť i střešní konstrukci v jednom a tomtéž plynuje navazujícím konstrukčním systémem. Výhodou se také zdá být uspořádání konstrukce z množství identických spolupůsobících elementů. Vzniká tak homogenní systém přenosu sil vykazující výbornou prostorovou tuhost.



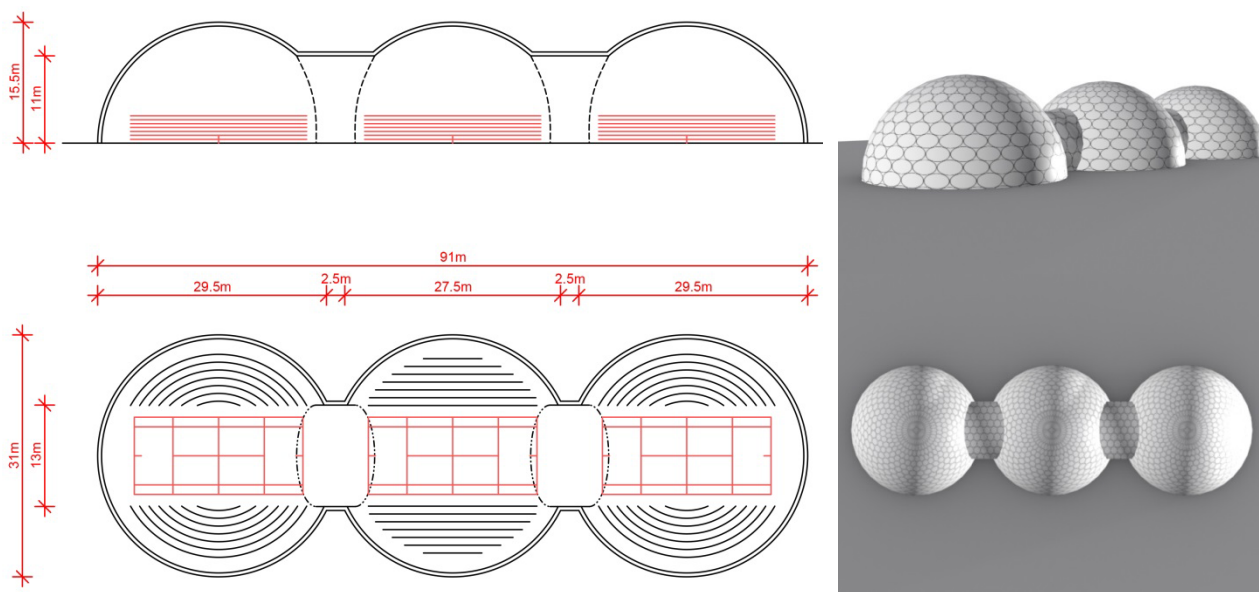
Obr.98) Skici k prostorovým úvahám o využití navržené konstrukce

Uvážíme-li posun měřítka od zkušebnímu modelu k reálné stavební konstrukci, naskýtá se široká škála možností využití navrženého schématu v pozoruhodných rozpnech. Výhodou navrženého systému je letmá montáž konstrukce z rozměrově přiměřených, snadno manipulovatelných a přepravitelných částí. Možnost rozložení a znovusestavení konstrukce, použití materiálu z obnovitelného zdroje.

Pro velkorozponovou konstrukci uvažujme dřevěné kružnice \varnothing 2,5m. Při překlenutí kruhového půdorysu získáme kupoli o rozponu 31m a výšce 15,5m. Kupole je možné sestavit do řad a vytvořit tak podporami nečleněný prostor libovolné délky. V tomto uspořádání se nabízí využití konstrukce jako sportovní haly. V následujících schématech jsou zakreslena hřiště pro volejbal a tenis, spolu s prostorovým zobrazením haly.

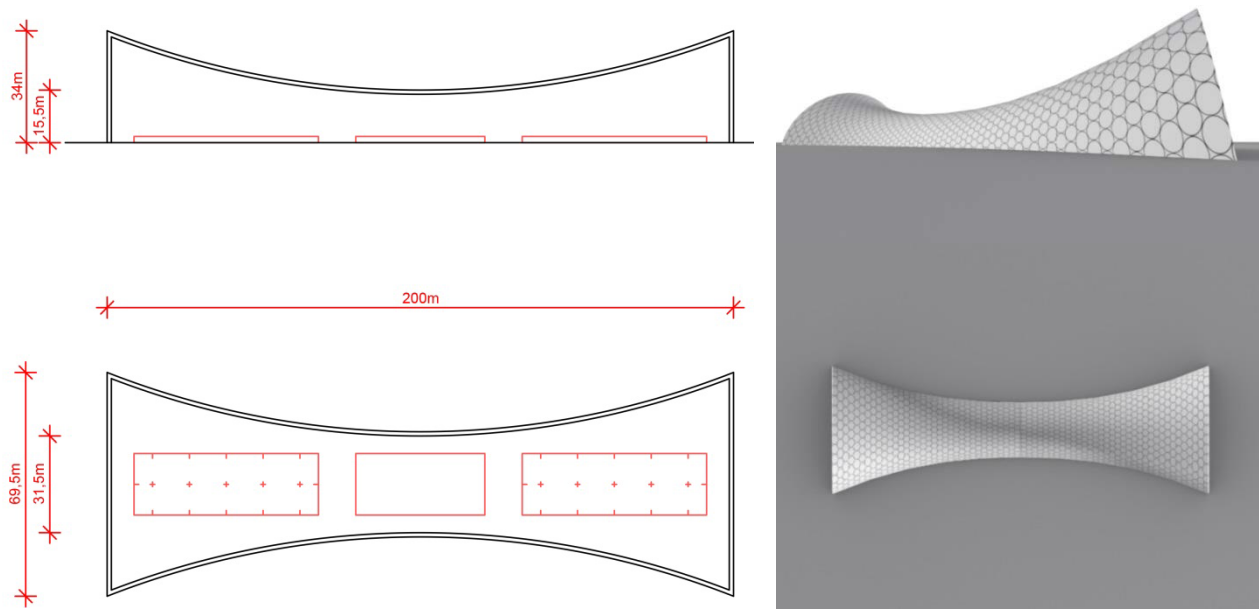


Obr.99) Prostorové schéma - sportovní hala (volejbal); řez, půdorys, perspektiva, pohled na střechu



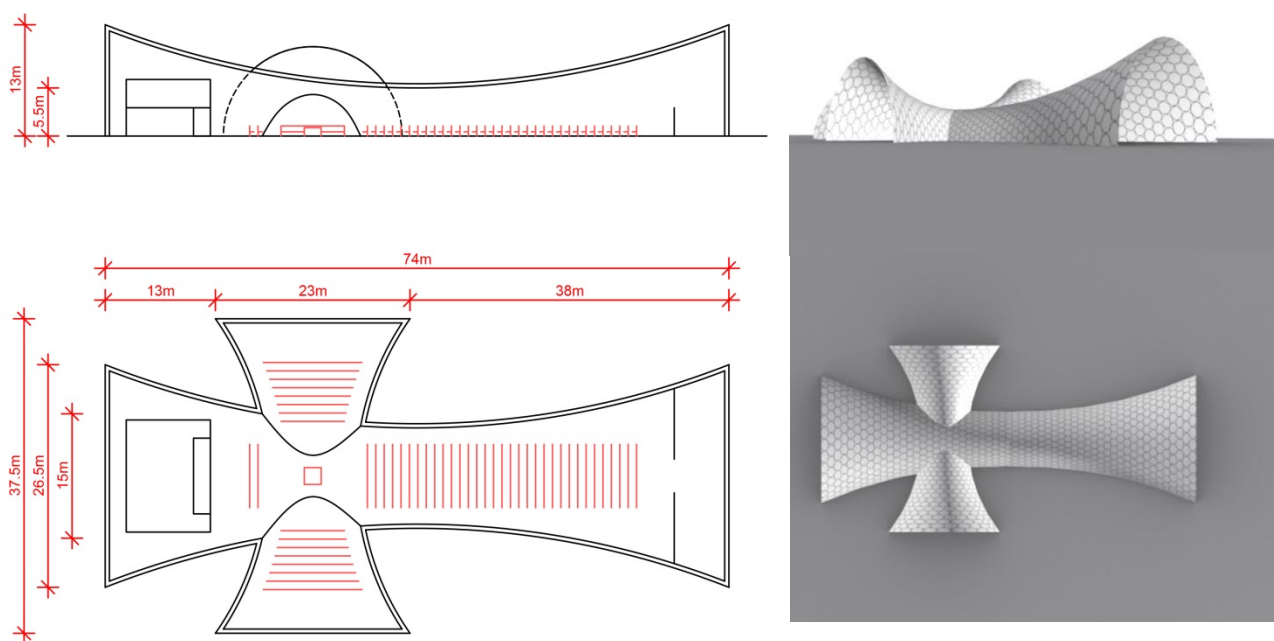
Obr.100) Prostorové schéma – sportovní hala (tenis); řez, půdorys, perspektiva, pohled na střechu

Pro sporty typologicky vyžadující podélné prostory se nabízí možnost zaklenout prostor valenou klenbou. Příkladem klenba s hyperbolickým zakřivením s využitím pro jezdecký sport (v půdoryse zobrazeny dva drezurní obdélníky 60x20m s opracovištěm) či plavecký bazén. Možnosti využití obdobných halových prostorů se pochopitelně neomezují pouze na sport – nabízí se výstavnictví, průmyslová výroba, dopravní konstrukce (tubus železniční zastávky) etc.



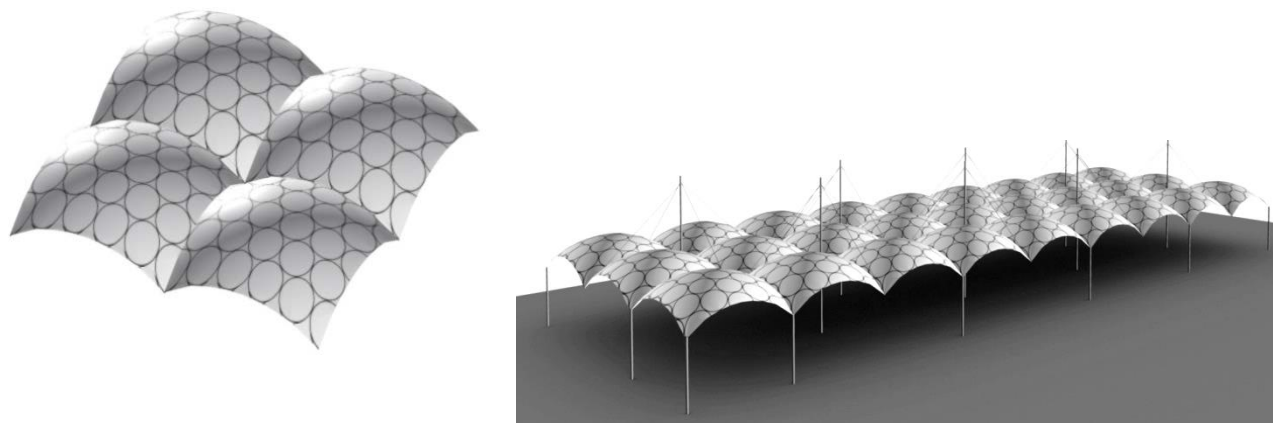
Obr.101) Prostorové schéma – sportovní hala (jízďárna); řez, půdorys, perspektiva, pohled na střechu

Křížový průnik dvou valených kleneb vytváří dispozici vstřícnou pro církevní stavby. Příkladem schéma chrámu na půdorysu 26x 74m s příčnou lodí délky 37m.

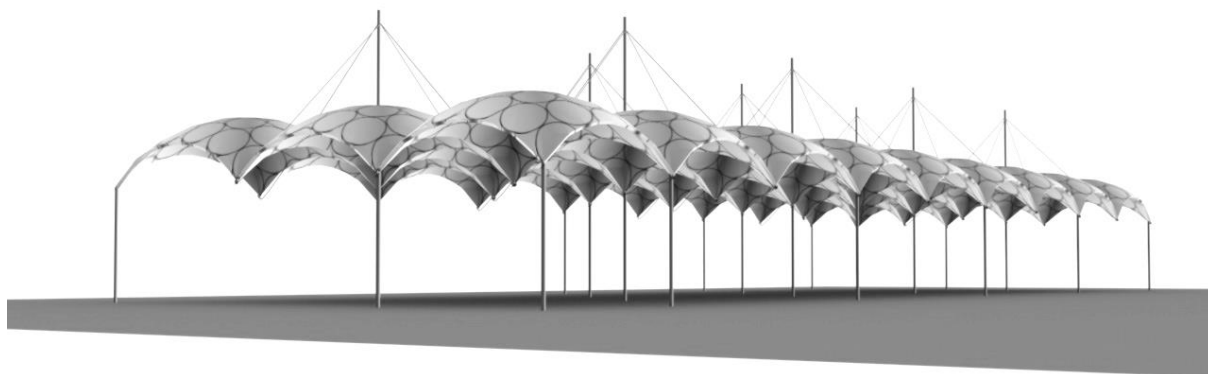


Obr.102) Prostorové schéma – chrám; řez, půdorys, perspektiva, pohled na střechu

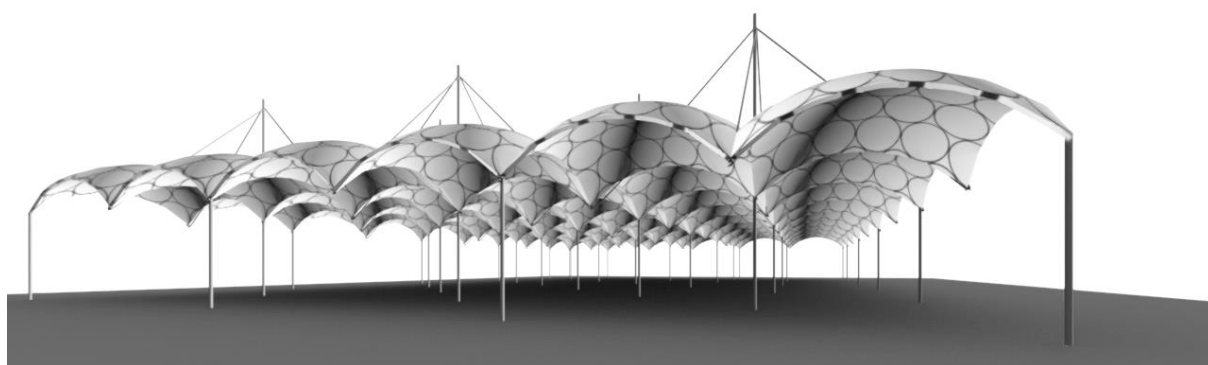
Vedle půdorysu centrální či podélné dispozice umožňuje navržený konstrukční systém také využití pro halové stavby. Je možné tvarovat konstrukci jako skořepinu volného nepravidelného tvaru lokálně dosedající na terén v místě podpor, nebo uplatnit opakování identických klenebných segmentů s bodovými podporami v libovolném plošném rozsahu. Variabilita uspořádání a jednoduchost montáže střechy z dílensky předpřipravených segmentů jsou hlavními pozitivy uvedeného řešení. Z hlediska funkční náplně jde o dispozičně vhodné schéma pro trvalé stavby či dočasné objekty typu výstavní pavilon, tržnice, dopravní terminál, letní zastřešení náměstí či nádvoří etc. V následujících příkladech konstrukce nesená kombinací sloupků a lan vyvěšujících volné okraje.



Obr.103) Prostorové schéma – halová konstrukce; schéma napojení klenebných segmentů o rozměru 5 x 5 m, pohled na střechu



Obr.104) Prostorové schéma – perspektiva konstrukce 3 x 9 polí (15 x 45m) z horizontu pohledu člověka



Obr.105) Prostorové schéma – perspektiva konstrukce 6 x 9 polí (30 x 45m) z horizontu pohledu člověka

Je zřejmé, že možnosti využití navrženého konstrukčního systému z ohýbaných dřevěných kružnic (ve větším měřítku zřejmě z lepeného lamelového dřeva) jsou široké a naplňují požadavky staveb rozmanitých měřítek a typologií. Potenciál ohýbaného dřeva pro nové konstrukční systémy je nesporný, ať už v uvedené podobě, nebo množství obdobných volnoforemných aplikací (viz kapitola 2.2). Cílem této práce je využití dřeva v tomto smyslu prezentovat a podpořit. Je zřejmé, že výrobní technologie a vývoj dřevěných konstrukcí volných forem vyžaduje nemalou počáteční investici. Je ovšem také patrný podstatný přínos pro uplatnění nových forem v architektuře a ekonomická úspora vzhledem k obnovitelnosti tohoto materiálu z přírodního zdroje.

7.3 SHRUTÍ, PŘEHLED NOVÝCH POZNATKŮ A VÝSLEDKŮ DISERTAČNÍ PRÁCE

Disertační práce pojednává v úplnosti rozsah stanovený v kapitole 1.5. Úvodem zpracovaná analytická část, pojednávající vybrané technologie zpracování dřeva a rešerše klasifikující příklady uplatnění dřeva v soudobé architektuře slouží jako přehled aktuálních znalostí a možností na poli inovativních dřevěných struktur a současně jako odrazový můstek pro vlastní návrh klenebného konstrukčního systému z ohýbaného dřeva.

Poznatky o technologii ohýbání dřeva našly uplatnění v průběhu vyhodnocení a numerické simulace zkoušek mechanických vlastností testovaných dřevěných kružnic. Poskytly klíč k vysvětlení posunu hodnot naměřených materiálových

charakteristik vzhledem k tabulkovým hodnotám neupraveného bukového řeziva. Jde o poznatek, že při ohýbání dřeva výrobní technologií společnosti TON a.s. (ohýbání napařeného dřevěného prvku pomocí patrice a matrice) dochází k určité míře hydrotermické plastifikace a následné komprimace, která pozmění fyzikálně-mechanické vlastnosti ohýbaného prvku. S touto zvýšenou plasticitou je nutno počítat v numerických simulacích chování modelu konstrukce pod zátěží. Přesné hodnoty modulu pružnosti byly zaměřeny na základě zkoušek dřevěných obručí v tahu a tlaku, a deformaci dílčích výřezů z kružnic zatěžovaných tlakem rovnoběžně se směrem vláken.

Studium geometrie členění kulové plochy, variant uspořádání kružnic na kulové ploše a uplatnění kulové plochy (respektive kruhového prvku) v architektuře poskytlo teoretickou základnu pro vývoj originální klenebné konstrukce z ohýbaných dřevěných prvků.

Samotnému návrhu konstrukce předcházelo množství koncepčních skic a experimentálních modelů variantního uspořádání kružnic na válcové, hyperbolické a kulové ploše, směřujících k výběru finálně zvolené konstrukce na reprezentativní geometrii 3V ikosaedru. Na základě dostupného výrobního sortimentu TON a.s. jsem navrhla finální provedení kupole včetně montážních spojů. Přípravy k sestavení prototypu vyžadovaly zohlednění technologie výroby (ohýbané kružnice, sklolaminátové spoje), vlastností materiálu a postupu montáže. Detail spoje byl dále navržen v provedení z oceli. Prototyp konstrukce (v provedení s montážními spoji) jsem sestavila v měřítku 1:1 v laboratoři ocelových konstrukcí FSv ČVUT. Samotná konstrukce byla s pozitivním výsledkem otestována bodovým zatížením ve vrcholu klenby. Realizace a otestování prototypu posloužilo k prověření kvalit návrhu.

Zásadním přínosem a jednoznačným posunem ve významu práce je série experimentů provedených na Experimentálním centru FSv ČVUT pod vedením Doc. Ing. Jiřího Litoše, Ph.D. spolu se vstupem Ing. Romana Gratzy, Ph.D., který vypracoval numerické simulace (vyhodnocení) provedených experimentů a simulaci průběhu silového působení na modelu konstrukce. Díky možnosti zapojit tyto odborníky do zpracování disertace, získala práce přesah z oblasti architektury ke statice a profesi inženýra, blíže k reálné stavební praxi. Výsledek práce tak mimo jiné může být přínosem pro širší odborné publikum. V oblasti statiky a stavební mechaniky je možné na práci dále navázat. Nabízí se upřesnění návrhu ocelového spoje, optimalizační úloha distribuce kruhových prvků po volnoforemné ploše, úkoly přesahující rozsah této disertační práce, pro něž byl v průběhu práce sestaven návrh na interdisciplinární týmový grantový projekt GAČR.

Závěr práce prezentuje potenciál navržené konstrukce z ohýbaného dřeva spektrem možností využití v praxi od sportovních stadionů, přes dopravní terminály, sakrální stavby až po halové konstrukce. Další možností navázat na tuto práci je posunout rozsah forem dál směrem ke konstrukcím volných forem, jak bylo uvedeno výše.

8. Bibliografie

1. **Veltkamp, Martijn.** *Free form structural design: Schemes, Systems & Prototypes of Structures for Irregular Shaped Buildings.* Amsterdam : IOS Press, 2007. str. 187 p. ISBN 978-158-6037-819.
2. *Innovative Timber Constructions.* **Weinand, Yves.** London : Hemming Group Ltd, 2011. IABSE-IASS London Symposium Report: Taller, Longer, Lighter: Meeting growing demands with limited resources. str. 73. ISBN 978-0-7079-7122-3.
3. **Weinand, Yves.** *Timber Project: Nouvelles formes d'architectures en bois.* Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, 2010. ISBN 978-2-88074-839-5.
4. ICD/ITKE Research Pavilion 2010: Institute for Computational Design (ICD). *Universitata Stuttgart: ICD.* [Online] 2010. <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=4458>, <http://simonschleicher.wordpress.com/>.
5. Konrad Wachsmann. *dpr-barcelona: beyond books | between art, science and architecture.* [Online] 2010. <http://dprbcn.wordpress.com/2010/01/29/konrad-wachsmann/>.
6. **Gössel, Peter a Leuthäuserová, Gabriele.** *Architektura 20. století. první.* Praha : Taschen GmbH / Slovart, s.r.o., 2003. ISBN 3-8228-2568-9.
7. **Søberg, Martin.** Metropol Parasol: J. Mayer H. architects. *arcspace.com.* [Online] 2013. <http://www.arcspace.com/features/j-mayer-h-architects/metropol-parasol/>.
8. **Bruckermann, Oliver.** *From control to design: parametric - algorithmic architecture.* Barcelona : Actar-D, 2007. str. 239 s. ISBN 978-84-96540-79-8.
9. **Davis, Tom.** Geodesic Domes. [Online] 2011. <http://mathcircle.berkeley.edu/BMC6/ps0405/geodesic.pdf>.
10. **Stephenson, Kenneth.** Circle Packing: A Mathematical Tale. [Online] 2003. <http://www.ams.org/notices/200311/fea-stephenson.pdf>.
11. *Geodesic Domes: Natural and Man-Made.* **Tarnai, Tibor.** issue 3, 2011, International Journal of Space Structures, Sv. vol. 26, stránky 215-227. DOI 0266-3511.
12. Hunset Mill: ACME. *archdaily.* [Online] 2010. <http://www.archdaily.com/90094/hunsett-mill-acme/>.
13. *Acetylated Wood: The Science Behind the Material.* **Hill, Callum.** -, 2006, accoya, str. 15.
14. **Prugger, Georg.** BENDYWOOD®: The first and unique solid wood bendable by hand. *BENDYWOOD®.* [Online] 2014. <http://www.bendywood.info/index.php?lang=english>.
15. **TON a.s.** Výroba TON a.s. - Židle vyrobené lidmi. *TON.* [Online] 2015. <http://www.ton.eu/cz/vyroba/>.
16. **Engel, Heino.** *Tragsysteme Structure Systems.* 1st Ed. Ostfildern-Ruit : Verlag Gerd Hatje, 1997. str. 352 s. ISBN 37-757-0706-9.
17. Multihalle Mannheim: Frei Otto. *Tectonica Blog.* [Online] 2010. <http://tectonicablog.com/?p=9631>, <http://www.ashleystevens2008.blogspot.cz/>.
18. *The Savill Garden Gridshell Design and Construction.* **Harris, Richard a Roynon, Jonathan.** -, 2008, Engineered Wood Products Association, stránky 1-7.
19. Chiddingstone Castle, Orangery Gridshell: Carpenter Oak & Woodland. *Carpenter Oak & Woodland.* [Online] 2010. <http://www.carpenteroakandwoodland.com/timber-engineering/gallery/gridshell-chiddingstone-castle>.
20. Downland Gridshell. *Cullinan Studio: Projects.* [Online] -. <http://www.edwardcullinanarchitects.com/projects/gridshell.html>.
21. **e-MRAK.** 2008\Apres Ski. *Hut' architektury Martin Rajniš s.r.o.* [Online] -. <http://www.hutarchitektury.cz/index.php?lang=cs&page=realizations&part=0&project=80>.
22. **Salokangas, Lauri.** Wooden Tower: Helsinki Zoo. *structural engineering analysis.* [Online] 2013. http://www.lusas.com/case/civil/wooden_tower.html.
23. Hermes Rive Gauche: Bollinger+Grohmann Ingenieure. *Bollinger+Grohmann Ingenieure.* [Online] -. <http://www.bollinger-grohmann.com/de.projekte/herms-rive-gauche.html?f=2010>.
24. Studio Gang Architects: Nature Boardwalk at Lincoln Park Zoo. *Studio Gang Architects.* [Online] -. <http://www.studiogang.net/work/2005/lincolnparkzoo>.
25. Timber wave: Amanda Levete and AHEC at London Design Festival 2011. *The Plan: Architecture & Technologie in Detail.* [Online] -. http://www.theplan.it/J/index.php?option=com_content&view=article&id=1852%3Aahec-al-london-design-festival-2011&catid=5%3Amostre&Itemid=23&lang=en.
26. **Shigeru Ban Architects.** SBA_NINE BRIDGES. *Shigeru Ban Architects.* [Online] -. http://www.shigerubanarchitects.com/works/2010_haesley-nine-bridges/index.html.
27. **Rogers, Tom.** Timber in Construction: Herbert Gallery. *Timber Freak.* [Online] 2012. <http://www.timberfreak.co.uk/herbert-gallery/>.
28. **Burger, Norbert, Müller, Alan a Natterer, Johannes.** The "EXPO Roof" in Hanover: A new dimension for ripped shells in timber. *WSU Timber Engineering.* [Online] -. <http://timber.ce.wsu.edu/Resources/papers/3-6-1.pdf>.

29. Traffic Bridge, Sneek. *ONIX: Architects, urban planners and designers*. [Online] -. <http://www.onix.nl/projects/traffic-bridge/>.
30. Wood Pavillion by Wing Yi Hui and Lap Ming Wong: Dezeen. *Dezeen Magazine*. [Online] 2010. <http://www.dezeen.com/2010/07/07/wood-pavillion-by-wing-yi-hui-and-lap-ming-wong/>.
31. **ETHZ**. *packed: a cardboard pavilion - Shanghai 2010*. [Online] 2011. <http://packed-pavilion.blogspot.cz/>.
32. Reciprocal Frame: Wikipedia. *Wikipedia, the free encyclopedia*. [Online] 2013. http://en.wikipedia.org/wiki/Reciprocal_frame.
33. **Köppler, Jörn**. Baukultur, Stadtkultur, Lebenskultur. *International Journal of Architectural Theory: Wolkenkuckucksheim*. [Online] 2004. <http://www.tu-cottbus.de/theoriederarchitektur/Wolke/deu/Themen/032/Koeppler/koeppler.htm>.
34. Expo 67 in Montreal, burning sphere. *Livejournal*. [Online] 2012. <http://krab-ko.livejournal.com/236387.html>.
35. **Modeen, Thomas**. Favourite Buildings Visited: Birmingham Selfridges. *Smartarchitecture*. [Online] 2010. <http://smarchitecture.blogspot.cz/2010/05/favourite-buildings-birmingham.html>.
36. *Buckling patterns of shells and spherical honeycomb structures*. **Tarnai, T.** 4-6, 1989, *Computers & Mathematics with Applications*, Sv. vol. 17, stránky 639-652. DOI 10.1016/0898-1221(89)90253-8.
37. **Landry, Tara**. Desert Domes: Making the World a "Fuller" Place. *Desert Domes*. [Online] 2002. <http://www.desertdomes.com/faq.html>.
38. **Littlewood, Jeff**. Jeff Littlewood Geodesic Domes. *ualberta*. [Online] -. <http://www.ualberta.ca/~jerrya/wchs/Design%2030/dome.htm>.
39. **Wenninger, Markus J.** *Dual models*. Cambridge [Cambridgeshire] : Cambridge University Press, 1983. stránky xii, 156 s. ISBN 05-212-4524-9.
40. Geodesic Dome. *wikipedia*. [Online] 2005. https://en.wikipedia.org/wiki/File:G%C3%A9ode_V_3_1.gif.
41. *Prostorové příhradové konstrukce a geometrie*. **Zachystal, Miloš**. Praha : Polygrafia, 1985. Geometrie v technice a v umění. stránky 201-210. ISBN 57-563-85.
42. **Stephenson, Kenneth**. soccer circlepacked. *Ken Stephenson: Professor of Mathematics*. [Online] 2007. <http://www.math.utk.edu/~kens/soccer.gif>.
43. **Design Magazin**. *V Pekingu otevřen plavecký stadion Vodní kostka*. [Online] 2008. <http://www.designmagazin.cz/architektura/555-v-pekingu-otevren-plavecky-stadion-vodni-kostka.html>.
44. **Labara**. izolační desky: 155-sklotextit-r-fr4. *Labara*. [Online] 2014. <http://www.labara.cz/vrstvene-izolanty/izolacni-desky/155-sklotextit-r-fr4>.

9. Publikace autorky

1. *Curved-Element Timber Structures*; sborník příspěvků workshopu W3-2011, str. 22-25;
Vydavatelství ČVUT, Praha 2011; ISBN 978-80-01-04948-8
2. *Dřevěné konstrukce ze zakřivených elementů*; sborník anotací 14. odborné konference doktorského studia – Juniorstav 2012;
Vydavatelství FaSt VUT, Brno 26. 1. 2012; ISBN 978-80-214-4393-8
3. *Innovative Timber Structures (Geometry, Structure, Material)*; sborník příspěvků workshopu W4-2012,
Vydavatelství ČVUT, Praha 2012; ISBN 978-80-01-05174-0
4. *Inovativní dřevěné konstrukce (Geometrie-Konstrukce-Materiál)*; sborník anotací 15. odborné konference doktorského studia – Juniorstav 2013;
Vydavatelství FaSt VUT, Brno 2013; ISBN 978-80-214-4669-4
5. *Experimentální modely klenebných konstrukcí*; sborník příspěvků konference Progres techniky v architektúre 2013, str. 31-35;
Vydavatel Slovenská technická univerzita, Bratislava 2013; ISBN 978-80-227-4105-7

Návrh Standardního grantového projektu GAČR 2012/2013, *Innovative Free-Form Timber Structures*. Navrhovatel prof. Ing. Miloslav Pavlík, CSc., spoluřešitel Ing. arch. Šárka Vomelová, et.kol.