



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

**SROVNÁNÍ GEOMETRIE KLENEB HISTORICKÝCH
STAVEB S VÝPOČTOVÝM MODELEM**

COMPARISON OF GEOMETRY OF VAULTS OF HISTORICAL BUILDINGS WITH
COMPUTATIONAL MODEL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Dobrovolný

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. PETR FRANTÍK, Ph.D.

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou
Studijní obor	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav stavební mechaniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Tomáš Dobrovolný
Název	Srovnání geometrie kleneb historických staveb s výpočtovým modelem
Vedoucí práce	doc. Ing. Petr Frantík, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2016
Datum odevzdání	26. 5. 2017

V Brně dne 30. 11. 2016

prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc.

Vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA

Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Literatura dle pokynů vedoucího práce.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Nastudování potřebných znalostí dle pokynů vedoucího práce. Zorientování se v problematice. Vytvoření numerických modelů, jejich ověření a aplikace.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

doc. Ing. Petr Frantík, Ph.D.

Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá zkoumáním tvaru skutečné klenby a jejím modelováním. Modelování vychází z výpočtu tlakové čáry pomocí řetízkového modelu. Je zde zkoumáno, zdali stavitelé mohli v minulosti odvozovat tvar klenby pomocí řetězu, na který zavěšovali závaží. Pro srovnání skutečné klenby s modelem byla vybrána vchodová klenba kostela svatého Jakuba v Brně.

KLÍČOVÁ SLOVA

Klenba, model řetězu

ABSTRACT

Thesis deals with the study of the shape of the actual vault and its modeling. Modeling is based on the computation of the pressure line using a chain model. It is investigated whether the builders could in the past derive the shape of the vault by means of a chain on which they suspended the weights. To compare the actual arch with the model, the entrance vault of St. Jacob's Church in Brno was selected.

KEYWORDS

Vault, chain model

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Tomáš Dobrovolný *Srovnání geometrie kleneb historických staveb s výpočtovým modelem*. Brno, 2017. 43 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Frantík, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 22. 5. 2017

Tomáš Dobrovolný
autor práce

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 22. 5. 2017

Tomáš Dobrovolný
autor práce

Obsah

1	Úvod	3
2	Historie klenutí.....	3
2.1	Počátek kleneb.....	3
2.2	Vývoj kleneb z hlediska konstrukce a statického působení	4
2.2.1	Románské období.....	4
2.2.2	Gotické období.....	6
2.2.3	Renesanční období	8
2.2.4	Barokní období.....	10
2.2.5	Další vývoj až po současnost.....	10
3	Historie kostela svatého Jakuba v Brně.....	11
3.1	Románská a vrcholně gotická stavba	11
3.2	Pozdně gotická stavba	11
3.3	Baroko.....	12
3.4	Regotizace.....	12
3.5	Novodobá historie.....	12
4	Metody řešení kleneb	13
4.1	Metoda grafická	13
4.2	Empirické metody.....	14
4.2.1	Podmínky rovnováhy.....	15
4.3	Moderní metody.....	17
5	Korekce rozměrů na fotografii	18
5.1	Zjištění skutečného rozměru v případě, že máme změřený rozměr v jiné vzdálenosti, než je místo klenby:.....	18
5.2	Zjištění skutečného rozměru při focení pod úhlem:	20
5.3	Konkrétní fotografie kleneb	21
5.4	Zjišťování rozměrů.....	21
5.5	Určení poměrů jednotlivých kleneb.....	22
5.5.1	Okenní klenba	22
5.5.2	Poměr k pro okenní klenbu:.....	22
5.5.3	Výpočet skutečných rozměrů klenby:	23

5.5.4	Vchodová klenba vnitřní	23
5.5.5	Poměr k pro vchodovou klenbu:	24
5.5.6	Výpočet skutečných rozměrů klenby:	24
5.6	Vybraná klenba	24
5.6.1	Upravená velikost rozměru o poměr vzdáleností:	25
5.6.2	Poměr k_1 pro vchodovou klenbu vnější:	25
5.6.3	Výpočet skutečných rozměrů klenby:	25
6	Program FyDiK	26
6.1	Diskrétní model FyDiK2D	26
6.2	Konkrétní model	27
7	Modelování v programu FyDiK	28
7.1	Model řetězu s 18 translačními pružinami	28
7.1.1	Zobrazení odchylek u symetrického a nesymetrického rozložení hodnot sil	31
7.2	Model s 36 translačními pružinami	32
7.3	Model se 72 translačními pružinami	34
7.4	Porovnání modelů v jednom grafu	37
8	Závěr	38
9	Literatura	39
10	Seznam ilustrací	40
11	Seznam tabulek	42
12	Seznam příloh	43

1 Úvod

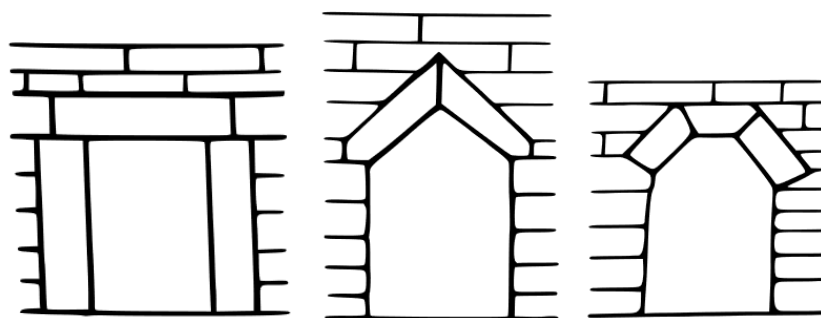
Tato práce se zabývá zkoumáním tvaru skutečné klenby a jejím modelováním. Modelování vychází z výpočtu tlakové čáry pomocí řetízkového modelu. Je zde zkoumáno, zdali stavitelé mohli v minulosti odvozovat tvar klenby pomocí řetězu, na který zavěšovali závaží. Pro srovnání skutečné klenby s modelem byla vybrána vchodová klenba kostela svatého Jakuba v Brně.

2 Historie klenutí

2.1 Počátek kleneb

Klenba je konstrukce z kusového stavebního materiálu (nejčastěji kámen a tam kde nebyla dostupnost kamene se použila cihla) skládaného do oblouku tak, aby vznikl v konstrukci pouze tlak. Z toho vznikl název pro tlakovou čáru, který byl od této skutečnosti odvozen. Tlaková čára určuje místo, kde v konstrukci působí jenom tlak. Každá klenba musí mít tlakovou čáru uvnitř tělesa této klenby. Z toho vyplývá, že klenba je nosná prostorová konstrukce, která se díky své vlastní tíze udrží visutá [1].

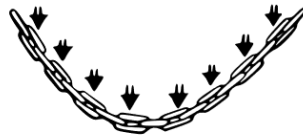
Klenba je známa už z dob starověku, kdy staří Asyřané používali jednoduchou valenou klenbu. V Evropě byli první, kdo dělal klenby Etruskové, a to pro Římany. Klenba se používala pro odlehčení nějaké části konstrukce nebo pro překlenutí volného prostoru [4].



Obr. 2.1 Vývoj překladů nad otvory [1]

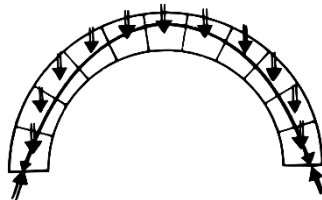
V případě, že je potřeba překlenout malé rozpětí nad otvorem, jde použít jednoho stavebního prvku (kamene), který má dostatečnou pevnost v tahu a dostatečnou tloušťku, aby vydržel zatížení a neprolomil se pod ním. Pokud délka tohoto stavebního prvku není dostatečná je potřeba použít dva, které se o sebe opřou a vytvoří střechovité překlenutí. Při větším rozpětí se postupně musí zvětšovat počet

stavebních prvků, aby bylo možné otvor překlenout. Tyto prvky musí vytvářet takový tvar, který ve svém těle obsahuje řetězovku [2].



obr. 2.2 Řetěz zatížen silami [1]

Proto se k odvozování tvaru klenby nejspíše používala řetězovka, která musela být obsažena v této klenbě, protože přesný tvar bylo těžké z konstrukčního hlediska dodržet, používali se tvary oblouků, které se řetězovce blíží. V historii stavitelství jsou klenby velmi zajímavým jevem, který nás okouzljuje až dodnes [2].

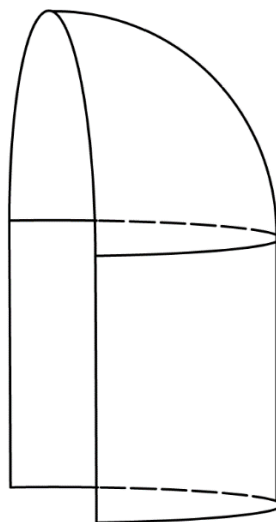


obr. 2.3 Klenba obsahující řetězovku [1]

2.2 Vývoj kleneb z hlediska konstrukce a statického působení

2.2.1 Románské období

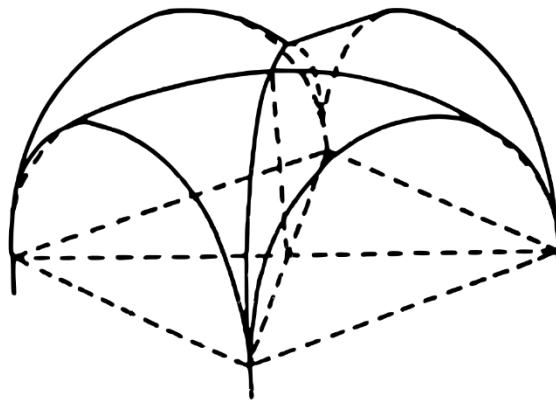
Románské a předrománské období: v tomhle období se v České Republice nejčastěji staví valená klenba a křížová klenba, které byly známy už v římské době. Rotundy, kostely a apsidy byly zaklenuty pomocí kupolí a konch (koncha je většinou čtvrt kulová klenba zastřešující výklenek, který má půdorys půlkruhu [11]).



Obr. 2.4 Schéma konchy

Pro tyto stavby se nejčastěji používal kámen a při stavbě vznikaly velmi masivní klenby. Pokud nebylo možné sehnat dostatek kamene v okolí, musela být použita cihla. Velmi často používanou křivkou pro návrh a výstavbu klenby byl půl kružnicový oblouk. Kvůli potřebě přenášet osamělé zatížení byly tyto klenby velmi silné v tloušťce. Empirické výpočty těchto oblouků, které byly převzaty z římských zkušeností. A tyto oblouky jsou velmi dobré ze statického hlediska [1].

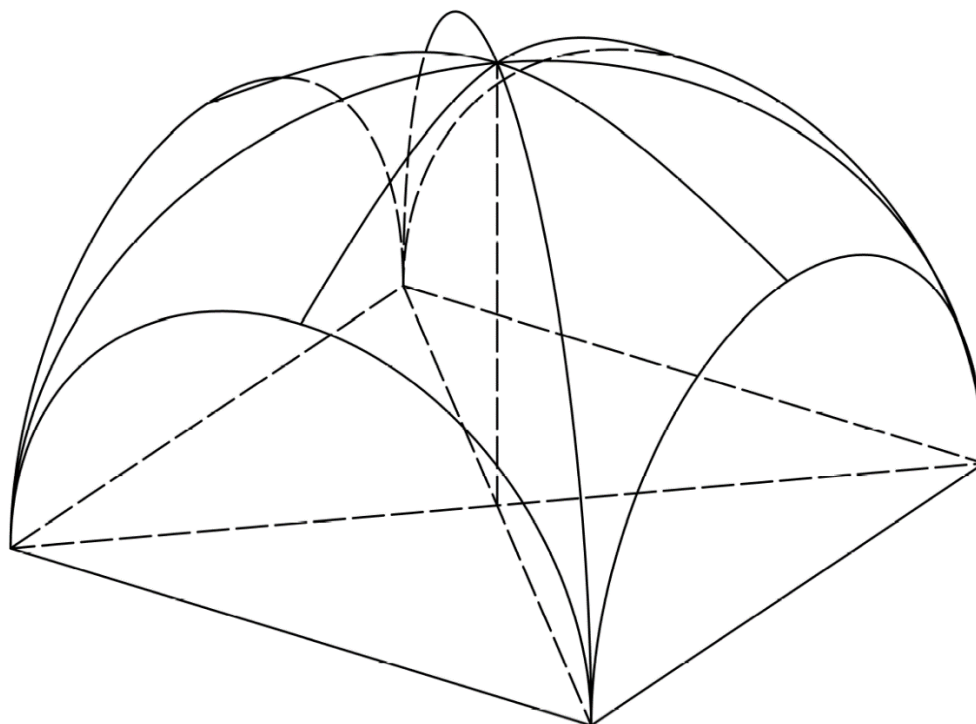
Klenby se často dělaly tak, že se postavilo bednění, většinou ze dřeva. Toto bednění bývá okolo stěn a nechává se tam natrvalo, jako ozdoba vnitřních prostor. Proto musí být opracováno a nalakováno. Na toto bednění se rozprostřela malta, do které se vyskládalo kusové stavivo, většinou lomový kámen. Spáry se poté vyplnily maltou. Toto bednění pomáhalo s tepelnou izolací. Tato klenba podobá lité klenbě [1].



Obr. 2.5 Křížová klenba s eliptickými diagonálními oblouky [1]

Křížové klenby se v období románském objevovaly nejčastěji v klášterních bazilikách, kde bylo použito těchto kleneb několik za sebou [5].

Tyto klenby v sobě mají skrytý problém, kvůli kterému nejsou moc výhodné ze statického ani architektonického hlediska. Tento problém je takový, že diagonální oblouky jsou eliptické a vzniknou průnikem dvou půlválců. Jde to řešit zvýšením těchto oblouků do plných kružnicových, tím však vznikne ve styku čelních oblouků vrchol. A to i když jsou čelní i diagonální oblouky stejného poloměru [1].



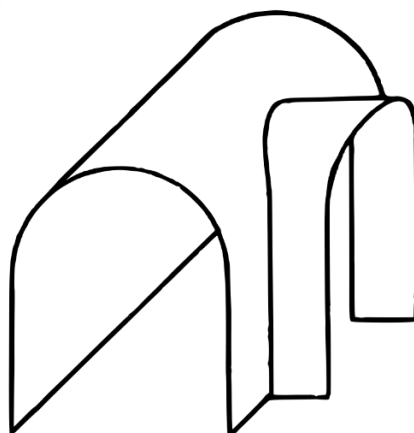
Obr. 2.6 Křížová klenba s kruhovými diagonálními oblouky

2.2.2 Gotické období

V gotice jsou tyto tvary křížové klenby dále rozvíjeny a oblouky klenby jsou vertikalizovány. Podpory jsou redukovány do sloupů a systému, který přebírá vodorovnou sílu vznikající v klenbě. Z technického hlediska je velmi zajímavé žebro, které se nachází v místě prolnutí dvou stěn klenby a zesiluje v tomto místě klenbu. Žebro je zároveň také součástí architektonického návrhu, protože svým tvarem zvýrazňuje místa prolínání ploch kleneb. Tyto klenby s žebry byly navrhovány podle zkušeností stavitelů. Postup výstavby těchto kleneb byl takový, že na sloupy se nejdříve sestavila žebra klenby, tak aby následně na nich sestrojilo bednění pro ostatní části kleneb. Žebra sloužila jako podpora pro bednění a následně i pro takzvaná prsa klenby, která byla vyžděna na tomto bednění. V pozdní gotice se již žebro nepoužívá jako konstrukční část ale jako ozdobný prvek, proto se nedá využívat jako podpora pro bednění ploch klenby [1].

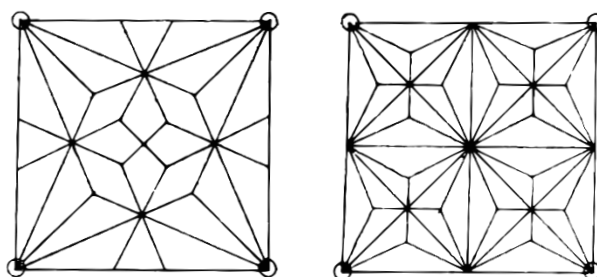
V gotice všechny části konstrukce, které obsahují klenbu, opěrný systém a sloupy, jsou dohromady plynule propojeny, tak že vznikne jeden celek. Takovýto způsob propojení se nazývá kvaziskeletová konstrukce [1].

Klenby se v průběhu gotiky měnily docela výrazně. Jejich vývoj začal klenbou, která vycházela z kružnic a jejich částí. Tyto kružnice se postupně nahrazovaly elipsami a také později i křivkami podobnými elipse jako jsou parabola, hyperbola. Ke konci gotiky se žebro stává jenom ozdobnou částí klenby, a proto se stávají ze statické náročnosti ještě složitější [1]. Klenby obkročné, které byly poprvé použity u cisterciáckých klášterů. Tyto klenby vznikají tak, že na základní křížové schéma se v místě patek nahradí lunetami [5].



Obr. 2.7 Luneta vznikající postupem dvou valených kleneb [1]

Luneta je klenba, většinou valená, prostupující jinou klenbu valenou nebo křížovou, ale v jiné výšce, většinou níž než klenbou, kterou prochází [1]. Díky vložení lunety vznikne obkročení v místě podpory a z toho vznikl i název těchto kleneb [5].

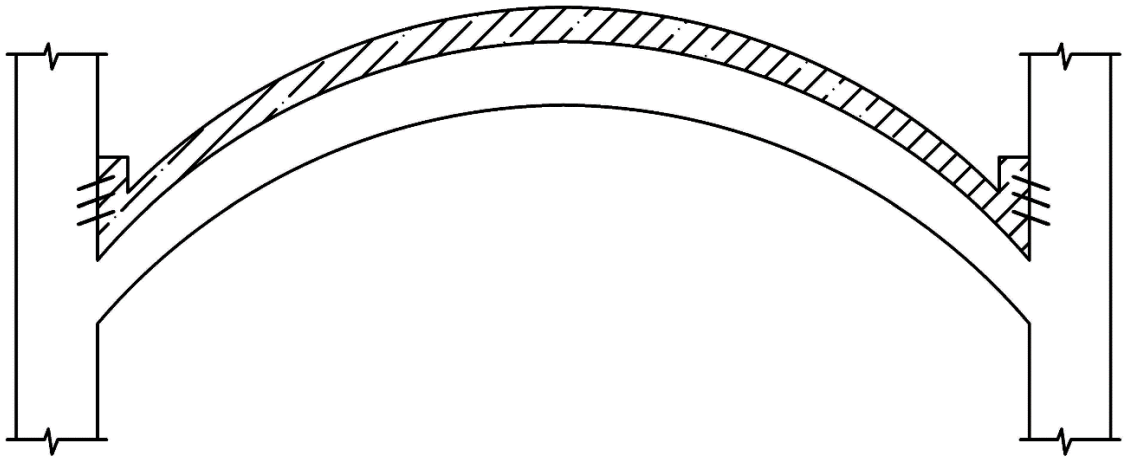


Obr. 2.8 Schéma klenby sítové vlevo a hvězdicové vpravo [1]

Klenby sítové jsou tvořeny sítí žeber. Každé klenební pole je zde samostatně vyklenuto. Tato klenba je například v kostelu svatého Mikuláše ve Znojmě. Hvězdicové klenby jsou takové, u kterých se uprostřed vytvoří hvězdice. Kroužené klenby jsou vytvářeny různými oblouky křivkami oblouku podobnými. [5].

Stejně jako v románském slohu tak i v gotice je základním materiálem pro stavbu kleneb kámen, který v místech, kde se nedá sehnat je nahrazen cihlami [1].

V této době byli stavitelé schopni navrhnut a postavit i dosti složité stavby. Nejenom monumentální klenby klášterů a kostelů, ale také překlenutí řek pomocí velmi velké klenby mostů. Ve 14. století se tyto konstrukce mostních kleneb začaly řešit jako rubová skořepina (rubová skořepina je zmonolitňující vrstva, v minulosti většinou složena z malty s oblázky a v dnešní době z železobetonu, která se nachází na povrchu klenby a zajišťuje zpevnění klenby a roznos zatížení z mostovky). Toto řešení se použilo na mostu v Roudnici, který už byl ale nahrazen novou konstrukcí na počátku minulého století [1].



Obr. 2.9 Rubová skořepina (železobeton)

2.2.3 Renesanční období

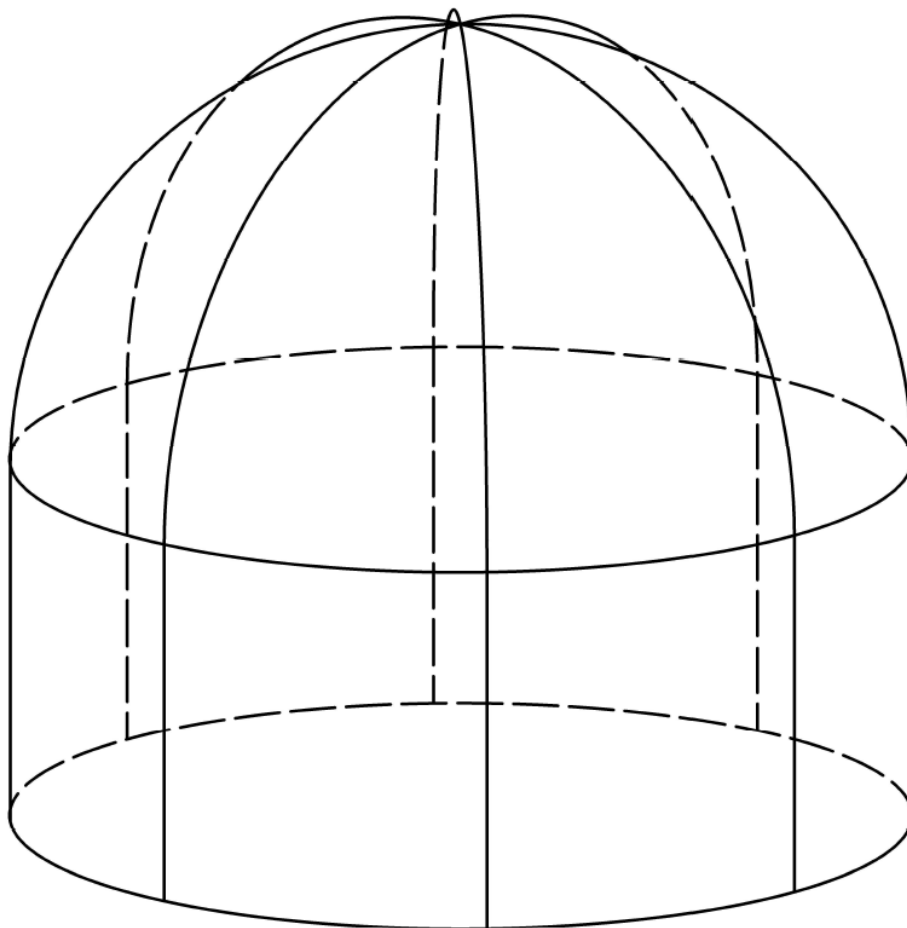
V renesanci se opět přechází ke klenbám, které se konstruovaly před obdobím gotiky. Začíná se opět používat princip translační klenby (tento princip znamená návrat k spojitým a neredukovaným plochám kleneb bez žeber). Nejoblíbenější jsou valené klenby, které jsou doplněny lunetami. Lunety jsou tam vkládány pro rozdělení těchto valených kleneb. Kromě toho, že se používala ke konstrukci kleneb část kružnice, tak se také používala matematicky nedefinovaná obecná křivka, jejíž tvar je podobný elipse a je nazývaný oválem. Tuto konstrukci vytvořil a zaznamenal Sebastian Serlie v 16. století. Vzepětí takového oblouku je přibližně 0,7, což je poměr mezi rozpětím a výškou od paty klenby k jejímu vrcholu. U tohoto oblouku je předpokládáno kloubové uložení a klenbové zesílení v patkách [1].

Renesance oproti gotice používá místo velkých opěrných systémů v místě patky táhla, která jsou tu hlavně kvůli zmenšení opor jako pomocná konstrukce ke stabilitě. Tato táhla jsou zakomponována do interiéru tak, že se podílejí na zajímavém a pěkném vzhledu těchto staveb. U takových kleneb dochází často k posunu podpor vinnou protažení táhla. Toto protažení není způsobeno pevností

oceli, ale je způsobeno kotvením tohoto táhla, které umožňovalo poruchu a posun táhla v místě kotvení. To má za následek porušení oblouku a vznik dalšího kloubu. Tento oblouk je pak trojkloubový s táhlem [1].

V případě renesance se využívá oblouku s dvěma klouby, který lze pro své statické možnosti převýšení použít pro nízké i vysoké klenby a také pro svou dobrou únosnost [1].

K hlavním klenbám valeným s lunetami se také objevovaly kupole a melounové klenby (melounová klenba je podobná kupoli ale nemá tvar koule, její tvar má podobu paraboloidu a většinou nemá tambur, což je podstavec klenby [10]). Pro lepší vzhled a pro strop v podobě klenby, a to bez nutnosti konstrukce klenby, se využívaly takzvané falešné klenby, které se zachytily za jiné konstrukce. Kvůli tomu se musely konstruovat ze dřeva. V 17. století se začíná používat klenba česká placka, která se používá skoro sto let. Tato klenba je založena na čelních, nejčastěji půl kružnicových obloucích, mezi kterými se vzdouvá kulová plocha [1].



Obr. 2.10 Kupole

Pro renesanci většinou platí, že se používaly jako materiál cihly. V jiných zemích zkoušeli v renesanci také dřevo, ale v Česku se nevyužívalo [1].

2.2.4 Barokní období

V barokním období klenby pokračují ve vývoji a ten vychází z renezanace. Velmi často se objevuje stlačený oblouk, který vychází z oválu. Tento ovál je však trochu jiný než v předchozím období. Jeden takový ovál konstruoval v 17. století také Francesco Borromini. Statické podmínky pro konstrukci takového oválu jsou stejné jako u renesančních valených kleneb [1].

Proto aby vynikla tvarová elegantnost staveb, která je jedním hlavních jevů objevujících se v baroku, se kromě kupolí na čtvercovém základě konstruovaly i kupole na kruhovém nebo kruhu se blížícím základě. Tyto stavby byly ale hodně technicky náročné, protože oproti kupoli na čtvercovém půdoryse, kde stačilo uprostřed poloměru kupole upevnit tyč pomocí, které se dal dodržet tvar o stejném poloměru všude, proto se u kupole na kruhovém půdoryse musely postavit takzvané ramenáty, pomocí kterých bylo možné dodržet požadovaný tvar kupole [1].

Kvůli zeštíhlení kleneb se začali používat znovu žebra, která ale nejsou jako v gotickém období stavěna zvláště pro podporu další výstavby klenby, ale jsou součástí celé konstrukce klenby. Pro stavbu kleneb se dále používají cihly [1].

2.2.5 Další vývoj až po současnost

Další vývoj už není tak výrazný. Přejímá se většinou všechno, co bylo v baroku ale v mnohem menší míře. Klenby se v klasicismu používají už mnohem míň. Je to způsobeno tím, že se vyvíjí konstrukční materiály a postupy na zastropení a překlenutí větších vzdáleností. Klenby se v klasicismu používají hlavně na dodatečné zastropení, kvůli požární bezpečnosti, kde nahrazují dřevěné konstrukce. Klenby se začali navrhovat podle sepsaných postupů, podle kterých se později vytvořily stavební řády a normy [1].

Poslední období, kdy se ještě využívaly klenby ve stavitelství jako nosné konstrukce je 19. století. V tomto období vznikaly města, a proto byla potřeba využívat klenby, které byly většinou velmi nízké. Tyto klenby jsou používány většinou na sklepní prostory. Materiálem je už od baroka pořád cihelné zdivo [1].

Požár, který na počátku 16. století vznikl v tomto kostele, velmi poničil tuto stavbu, a to tím, že jeho přičiněním se zhroutila střecha. Tento pád střechy zapříčinil fatální poškození oltářů a zvonů kostela, které pocházely ještě z vrcholné gotiky. Kostel byl znovu zastřešen a už v renesančním slohu stavitel Johann Starpedel vybudoval klenby nad trojlodím s pomocí kameníka Pietro Gabriho [3].

Stavba věže, která od konce 15. století vyvíjela, až po více než sto letech dosáhla současné výšky. Na úpravách se podílel Antonio Gabri, který podle renesančních způsobů nechal přistavět část věže, do které byly instalovány věžní hodiny. Návrh této části vymyslel Šimon Taucha. A Gabri vycházel při konstrukci této části z tohoto návrhu [3].

3.3 Baroko

V období baroka nedošlo k žádné přestavbě z hlediska konstrukce. Jediné, co bylo měněno bylo vybavení v interiéru a také byla nutná kompletní rekonstrukce krovu střechy. Kvůli rušení hřbitova, který se nacházel okolo kostela, byla potřeba zvětšit kryptu [3].

3.4 Regotizace

Puristé v tomto období 19. století nesouhlasí s tím, jaké změny se provedly v období baroka a renesance na gotickém interiéru a konstrukcích. Myslí si, že tyto úpravy narušují krásu původních gotických prvců interiéru. Proto založili společenství stavitelů, a tito stavitelé zapojili do těchto úprav architekta Heinricha Festela, který vytvořil projekt pro úpravu. Tento projekt realizoval stavitel z Brna Josef Arnold. Při tomto projektu se nahradila sakristie novou a větší. Byly odstraněny různé přístavby a některé kaple [3].

3.5 Novodobá historie

Pro svůj špatný technický stav musela být na začátku 20. století opravena bāň. Musela být vyměněna velká část dřevěných konstrukčních částí a nahrazena kovovými. Povrch bāně byl znovu pokryt plechovým povrchem. Kostel patří k velmi cenným kulturním bohatstvím české architektury, a proto byl také zařazen v roce 1955 do seznamu Národních kulturních památek [3].

Poslední oprava kostela započala v roce 2015. Při této opravě se podařilo opravit velké množství konstrukčních poruch a také různé poruchy interiérového vybavení. Do oprav byly zahrnuty i okna a dveře. Náklady na tyto opravy byly zaplacený z Norských fondů. Po těchto opravách se znovu dá podívat do věže a na kůr. Také vznikla výstava, ve které se návštěvníci mohou seznámit s historií kostela a dalšími s kostelem souvisejícími věcmi [3].

4 Metody řešení kleneb

Metod řešení kleneb není mnoho. V minulosti se nejčastěji používala grafická metoda. Další metody navrhování jsou pomocí empirických vztahů. Tyto empirické vztahy se často využívají v normách. Výpočty se dají provádět na vetknutém oblouku nebo na dvojklobovém a trojklobovém oblouku. Při využití parabolického tvaru střednice je tlaková čára zatížení klenby u trojklobového modelu totožná se střednicí a u dvojkloubového a trojklobového se hodně blíží. Zato u plochých kružnicových oblouků konstruovaly rozšíření v místě patek. Tato rozšíření zajistila, že tlaková čára byla v oblasti konstrukce oblouku [1].

4.1 Metoda grafická

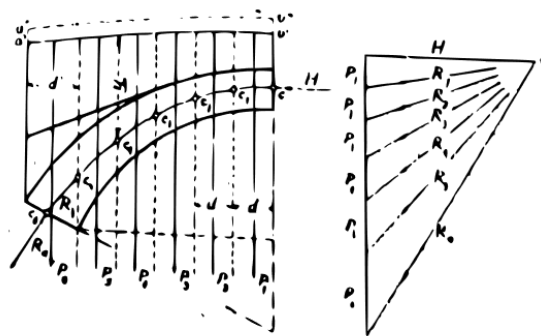
Tato metoda se v minulosti používala velmi často. Byla jednou ze základních metod pro řešení kleneb z kusového staviva, která se používala v pozemním stavitelství [1].

Pro možnost použití této metody musely být zavedeny předpoklady, které zjednodušovaly podmínky v konstrukci, pro lepší možnost výpočtu [1].

Klenby z kusového staviva, které se stavěly v minulosti ať už z cihel nebo kamene, se nemohou dostat do takého stavu, aby vyhovovaly Hookovu zákonu. Výpočet hodnot pro tento vztah, který je potřeba do Hookova zákona, a to vztah mezi napětím a přetvořením je v každém kusu staviva jiný. Toto má za následek velmi obtížné odvození celkového vztahu. A právě proto se zaváděl předpoklad, že tato konstrukce je z pružného materiálu (takovýto předpoklad se mnohem lépe dá uplatnit u moderních kleneb, které se konstruují z betonu) [1].

Dalším předpokladem bylo nahrazení základního statického schématu vetknutého oblouku pro výpočet kleneb z kusového staviva, které se používaly u obytných budov, a to schématem trojklobového oblouku. Toto nahrazení se používalo u kleneb s malým poměrným vzepětím, v případě rovnoměrného zatížení a také se předpokládaly neposuvné podpory a stálou teplotou. V případě tohoto nahrazení je výsledná hodnota vypočtených vnitřních sil hodně podobná jako u použití vetknutých podpor klenby. Základním předpokladem tohoto trojklobového oblouku bylo, že při nízkých vzepětích klenby se vetknutý oblouk v místech maximálního namáhání, což je v podporách a ve vrcholu klenby, kde vznikají trhliny a do těchto míst vkládáme klouby, čímž vznikne statické schéma trojklobového oblouku [1].

Klenba se dá řešit pomocí tlakové čáry. Když má klenba souměrný tvar, tak se dá touto metodou řešit jenom jedna polovina klenby. Klenba se musí rozdělit na proužky, které považujeme za myšlené spáry. Skutečné spáry jsou ale kolmé k střednicové čáře, což pro zjednodušení zanedbáváme. Tyto proužky jsou stejné, jenom u podpor klenby je šířka rozdílná. Roznásobením plochy proužku se zatížením a tíhy materiálů nad klenbou vznikne síla z každého proužku. Pomocí momentové podmínky se z těchto sil a geometrie klenby vypočítá horizontální síla. Počítá se s šířkou klenby jeden metr. Z těchto sil se v každém místě síly za předpokladu stejné horizontální síly vypočítá výslednice sil pro každý středový bod proužku. Tyto síly se vynášejí v měřítku a tím vznikají tlaková centra. Spojením těchto center získáme tlakovou čáru [4].



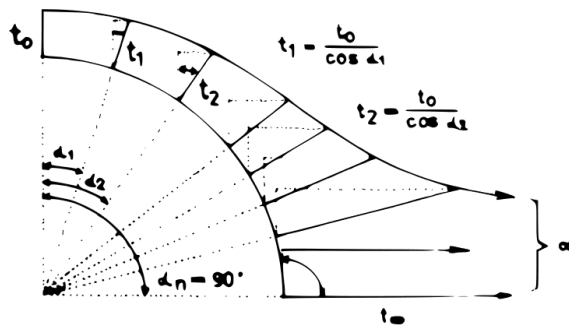
Obr. 4.1 Rozdělení klenby do proužků [4]

4.2 Empirické metody

Potřeba vytvoření empirických vztahů pro tloušťky klenby ve vrcholu a v patě klenby, vycházela z nutnosti rozšíření půlkruhové klenby. U této klenby platí, že od úhlu 60° a víc by bylo potřeba příliš velké zatížení pro udržení tlakové čáry v konstrukci klenby. Proto se konstruovaly nadezdívky a rozšíření kleneb. Nejdůležitějšími předpoklady, na kterých závisí tloušťka konstrukce klenby je pevnost materiálů a způsob namáhání. Klenby z cihel se zesilovaly pomocí stupňů a kamenné se rozšiřovaly plynule. Pro rozšiřování klenby se využívalo vztahu mezi tloušťkou klenby ve vrcholu t_0 a úhlu α . Tento úhel α je mezi vrcholem klenby a místem, kde je potřeba zjistit tloušťku [1].

Výraz závislosti tloušťky klenby na úhlu:

$$t = \frac{t_0}{\cos \alpha}$$



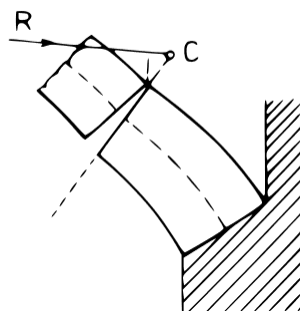
Obr. 4.2 Rozdělení klenby pod různými úhly [1]

Pro tento výraz tloušťky t bylo odvozeno mnoho empirických hodnot. A ke zjištění tloušťky ve vrcholu klenby t_0 bylo v minulosti odvozeno mnoho empirických výrazů, které se používaly určitou dobu, než byly nahrazeny dalšími. Ve viktoriánském období to byly například výrazy odvozené Rankinem, Trantwinem, Deputem, Sejourenem. V dalším období se používaly třeba výrazy odvozené Rondeletem nebo Peronetem. Peronetovy výrazy byly používány hlavně pro velké klenby, na které působilo pohyblivé zatížení, a také byly většinou polokruhové. Pro případy, kdy klenby byly zatíženy pouze statickým zatížením se hodnoty z těchto výrazů redukovaly většinou na třetinu až čtvrtinu. Pro tyto klenby, které se nacházely většinou v obytných budovách, se muselo splnit několik konstrukčních zásad. Jedna z nich byla závislá na poměru výšky klenby a rozpětí klenby. Pro tyto účely byly zhotoveny tabulky, v kterých se podle tohoto poměru a následně i rozpětí daly vyčíst hodnoty tlouštěk ve vrcholu a v patách klenby [1].

4.2.1 Podmínky rovnováhy

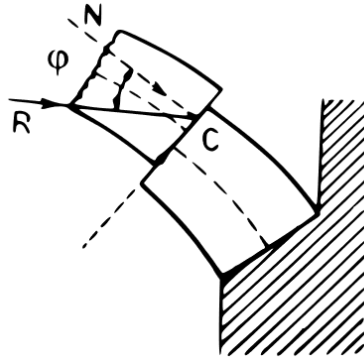
Tyto podmínky jsou důležité pro stabilitu konstrukce a musí být splněny v každé jednotlivé spáře. V celé konstrukci se musí dodržet tři podmínky rovnováhy. V minulosti se používalo označení výminky rovnováhy [1].

- a) Podmínka rovnováhy k pootočení: V kterémkoliv místě klenby se nesmí tlaková čára vychýlit z těla klenby [1].



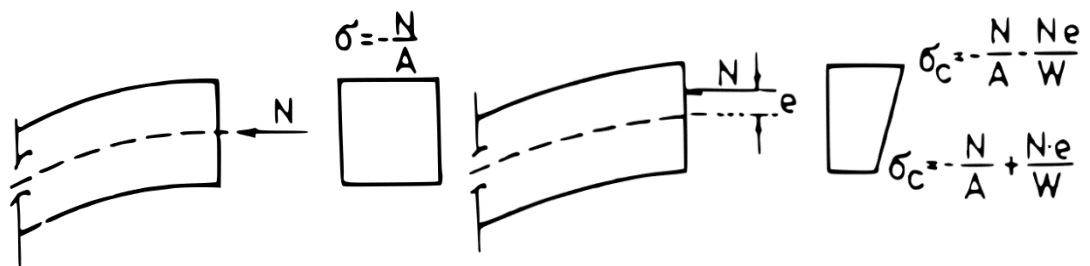
Obr. 4.3 Znázornění první podmínky rovnováhy [1]

- b) Podmínka rovnováhy vzhledem k posunutí: Úhel sevřený paprskem výslednice a kolmicí k vyšetřované spáře nesmí být větší než úhel tření, který je přibližně pro vlhké zdivo $\varphi=22^\circ$ a pro vyschlé zdivo $\varphi=37^\circ$ [1].



Obr. 4.4 Znárodnění druhé podmínky rovnováhy [1]

- c) Podmínka nepřekročení pevnosti materiálu v tlaku v žádném místě klenby [1].

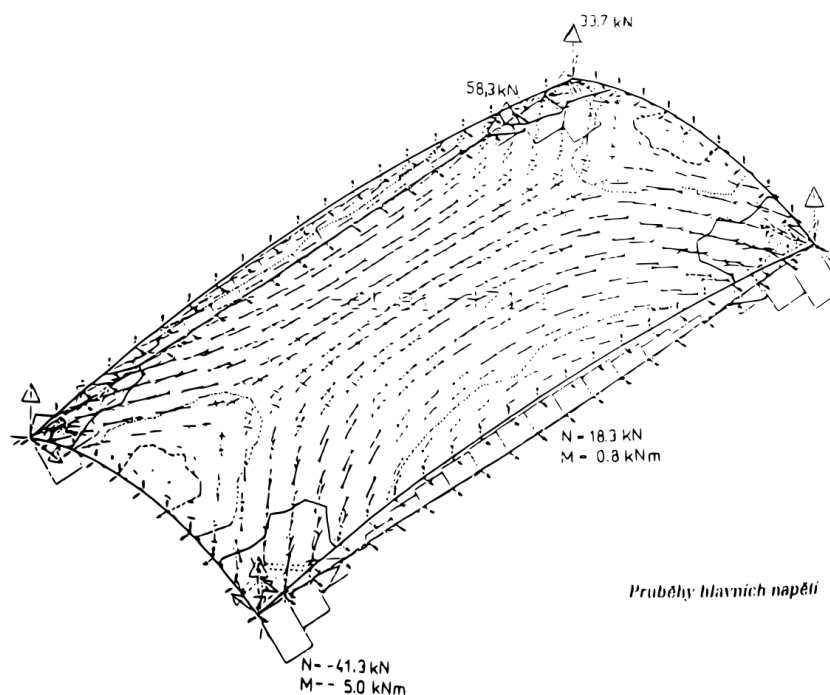


Obr. 4.5 Tlak v průřezích podle odchylky od střednice [1]

Pro pevnosti materiálů se většinou v Čechách a na Moravě užívalo doporučení „Spolku architektů a inženýrů“ ve Vídni, které se používali až do počátků 20. století a které byly nahrazeny normou ČSN 731331: Navrhování zděných konstrukcí, která byla vydána roku 1953. Od roku 1980 se všechny stavební konstrukce začaly posuzovat na mezní stavy, a to podle nové normy ČSN 731101 [1].

4.3 Moderní metody

Kromě silové metody, která se používala velmi dlouho, protože nebyla tak vyspělá výpočetní technika, aby bylo možno využívat deformační metodu. S tímto rozvojem se v dnešní době používá mnohem více deformační metoda. Další možnosti řešení kleneb jsou konečno prvkové programy (např. SCIA Engineering, Ansys), u kterých se dá klenba vymodelovat pomocí speciálních konečných prvků velmi přesně. Dále se může vložit do modelu, kromě základních statických zatížení i vliv zatížení teplotou, různé dynamické namáhání (simulace zemětřesení atd.). Toto má velkou výhodu pro návrh kleneb nebo pro modely starších kleneb a ke zkoumání jejich poruch. Častější využití těchto programů je ale pro modely moderních mostních oblouků [6].



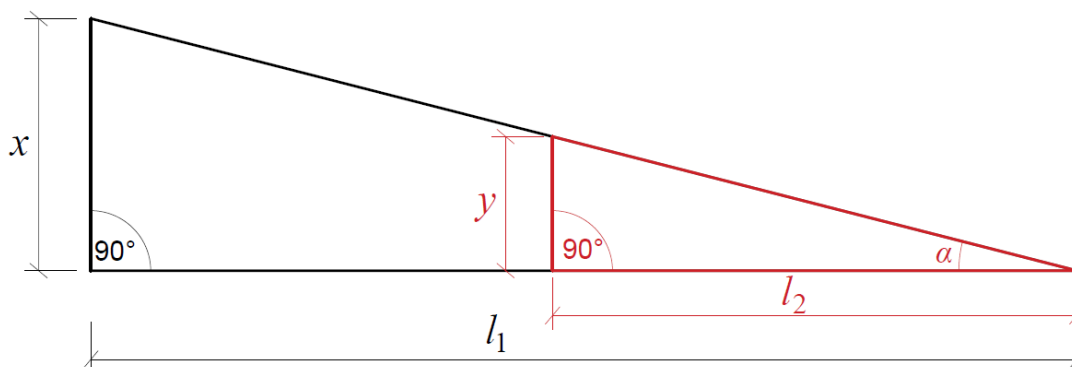
Obr 4.6 Model pruské klenby průběhy hlavních napětí [1]

5 Korekce rozměrů na fotografii

Kvůli potřebě získat rozměry klenby pro vytvoření modelu klenby v programu FyDiK, a protože se rozměry nepovedlo získat jinak, bylo potřeba věnovat se korekcím fotografií.

5.1 Zjištění skutečného rozměru v případě, že máme změřený rozměr v jiné vzdálenosti, než je místo klenby:

Nejprve vyjádříme skutečný rozměr x z poměrů skutečných rozměrů x , y a skutečných vzdáleností l_1 , l_2 . Poté vyjádříme teoretickou vzdálenost a také z poměrů rozměrů a vzdáleností. Dále vezmeme poměr k skutečného a teoretického rozměru v místě, kde potřebujeme určit skutečné rozměry. Za k dosadíme vyjádřené rozměry x , a . Úpravami vznikne poměr, který potřebujeme na určení skutečných rozměrů. Když máme poměr k_1 , tak můžeme roznásobením teoretického rozměru fotografie a s tímto poměrem získat jakýkoli skutečný rozměr.



Obr. 5.1 Zobrazení rozměrů pro výpočet poměru

Vyjádření x :

$$\frac{x}{l_1} = \frac{y}{l_2} \rightarrow x = \frac{y l_1}{l_2}$$

Vyjádření a :

$$\frac{a}{l_1} = \frac{b}{l_2} \rightarrow a = \frac{b l_1}{l_2}$$

Po dosazení do výrazu pro poměr skutečné a teoretické velikosti:

$$k = \frac{x}{a} = \frac{y l_1}{l_2} \frac{l_2}{b l_1} = \frac{y}{b}$$

Výraz pro výpočet skutečné rozměru x s vlivem poměru vzdáleností:

$$x = k a = \frac{y}{b} a = \frac{y b l_1}{b l_2} = y \frac{l_1}{l_2}$$

Poměr pro místo bez změřeného skutečného rozměru:

$$k_1 = \frac{x}{b} = \frac{y l_1}{b l_2}$$

x – skutečná velikost rozměru v místě, kde potřebujeme určit skutečné rozměry

y – skutečná velikost rozměru v místě měření

l_1 – vzdálenost k místu klenby od místa focení

l_2 – vzdálenost k místu měření od místa focení

a – teoretická velikost rozměru v místě, kde potřebujeme určit skutečné rozměry

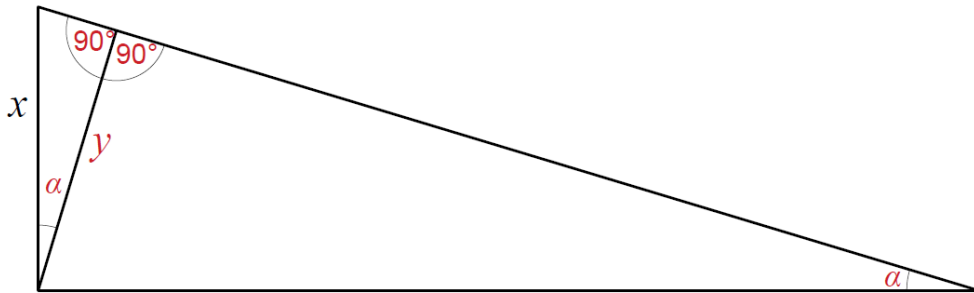
b – teoretická velikost rozměru v místě měření

k – poměr skutečného a teoretického rozměru

k_1 – poměr pro místo bez změřeného skutečného rozměru

5.2 Zjištění skutečného rozměru při focení pod úhlem:

Nejprve vyjádříme teoretickou vzdálenost x pomocí goniometrické funkce cosinus a úhlu alfa a pomocí teoretické vzdálenosti y získané z fotografie. Dále určíme poměr k to je poměr skutečné změřené vzdálenosti a vyjádřené vzdálenosti x . Do vzorce dosadíme vyjádřené x . Když máme k , tak můžeme dosadit do vzorce pro skutečnou vzdálenost l , který získáme úpravou vzorce pro k .



Obr. 5.2 Zobrazení rozměrů pro výpočet poměru

výraz pro teoretický rozměr x :

$$x = \frac{y}{\cos\alpha}$$

výraz pro poměr k :

$$k = \frac{l}{x} = \frac{l \cos\alpha}{y}$$

výraz pro skutečný rozměr l :

$$l = \frac{y k}{\cos\alpha}$$

x – teoretický rozměr upravený podle úhlu focení

y – teoretický rozměr na fotografii

l – skutečný rozměr

k – poměr skutečného a teoretického rozměru

α – úhel, pod kterým se fotografie fotila

5.3 Konkrétní fotografie kleneb

Pro naše vyfocené klenby bude vzorec redukován, protože byly vyfoceny přibližně kolmo na rovinu klenbu a skutečný rozměr byl změřen v místě kleneb. Proto se může použít pouze poměr k skutečného a teoretického rozměru. Po zjištění poměru už se dá získat jakýkoli skutečný rozměr, tak že násobíme teoretický rozměr a poměrem k .

výraz pro poměr k :

$$k = \frac{x}{a}$$

výraz pro skutečný rozměr l :

$$x = a k$$

x – skutečný rozměr

a – teoretický rozměr

k – poměr skutečného a teoretického rozměru

5.4 Zjišťování rozměrů

Kvůli zjištění rozměrů kleneb kostela svatého Jakuba v Brně, bylo potřeba zjistit, jestli nemají v kanceláři kostela svatého Jakuba nějaké plány kleneb. Proto při telefonické domluvě s kanceláří, která proběhla dne 1. 2. 2017, se dostalo sdělení, že žádné plány nemají. Proto po domluvě s doc. Ing. Petrem Frantíkem, Ph.D., se rozhodlo, že se klenby musí vyfotit, aby z těchto fotografií mohly být odvozeny rozměry a tvar klenby. Vyfotografovat se podařilo tyto klenby dne 9. 2. 2017. Ale skutečné rozměry v místech kleneb musely být zjištěny až dne 15. 2. 2017.

5.5 Určení poměrů jednotlivých kleneb

5.5.1 Okenní klenba



Obr. 5.3 Okenní klenba

Změřený svislý rozměr okna je $x=87$ cm. Vzdálenost od místa focení k okenní klenbě je 27,7 m (určeno z Google maps). Teoretické rozměry byly změřeny v AutoCADu.

5.5.2 Poměr k pro okenní klenbu:

$$k = \frac{x}{a} = \frac{870}{85,0656} = 10,2274$$

5.5.3 Výpočet skutečných rozměrů klenby:

$$s = 10,2274 \times 318,7855 = 3260 \text{ mm}$$

$$a = 10,2274 \times 190,9055 = 1952 \text{ mm}$$

$$v = 10,2274 \times 948,9409 = 9705 \text{ mm}$$

5.5.4 Vchodová klenba vnitřní



Obr. 5.4 Vchodová klenba vnitřní

Změřený svislý rozměr brány je $x=297$ cm. Vzdálenost od místa focení k vchodové klenbě je 18,5 m (určeno z Google maps). Teoretické rozměry byly změřeny v AutoCADu.

5.5.5 Poměr k pro vchodovou klenbu:

$$k = \frac{x}{a} = \frac{2970}{898,6395} = 3,304996$$

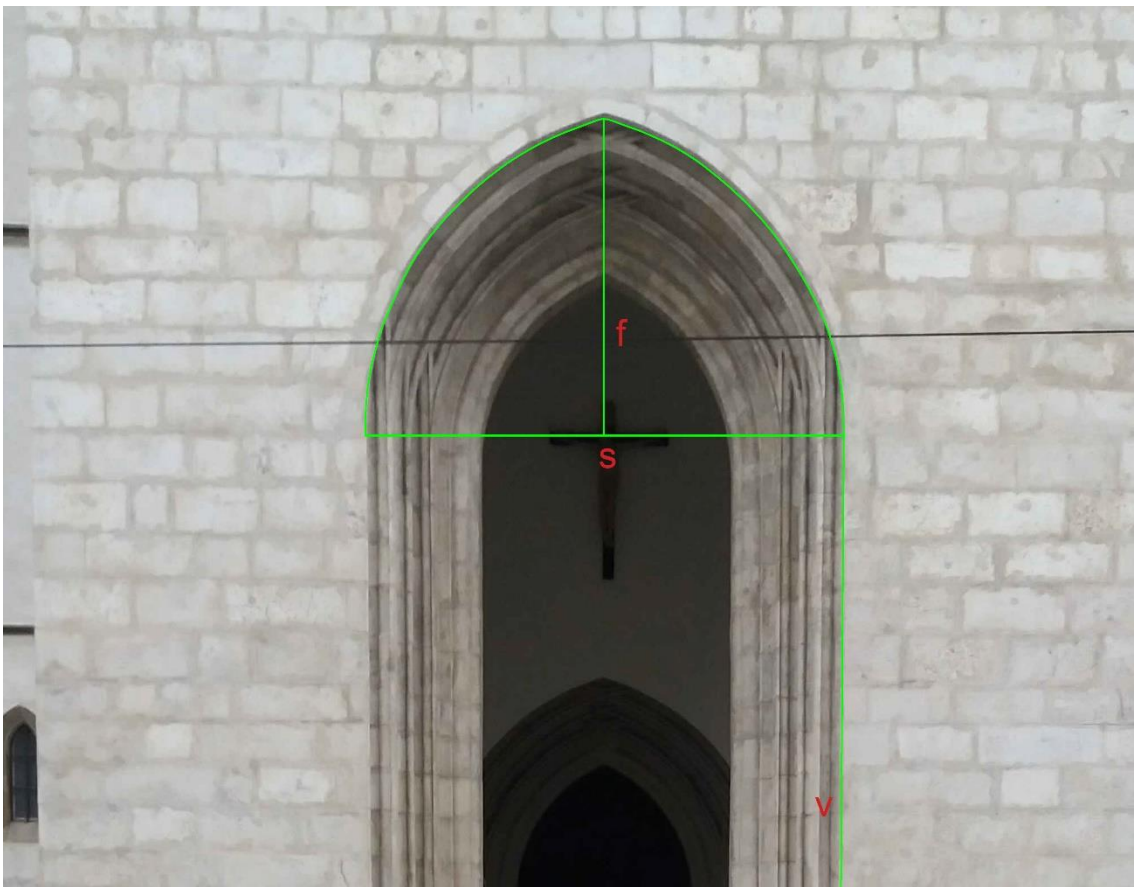
5.5.6 Výpočet skutečných rozměrů klenby:

$$s = 3,304996 \times 787,5685 = 2603\text{mm}$$

$$a = 3,304996 \times 637,6043 = 2107\text{mm}$$

$$v = 3,304996 \times 2226,1855 = 7358\text{mm}$$

5.6 Vybraná klenba



Obr. 5.5 Vchodová klenba vnější

Pro model byl nakonec vybrán vnější okraj vchodové klenby, který můžeme vidět na obr. 5.5. Tento okraj je ale v jiné vzdálenosti než vnitřní okraj klenby, proto musíme vzít jiný výraz na výpočet poměru velikosti rozměrů a to k_1 . Protože známe skutečný rozměr v druhém místě, než jsou výrazy odvozeny, tak musíme y vyjádřit z výrazu pro x . A ve výrazu pro k_1 zaměníme x za y , b za a .

5.6.1 Upravená velikost rozměru o poměr vzdáleností:

$$x = y \frac{l_1}{l_2} \rightarrow y = \frac{x l_2}{l_1} = \frac{2970 \times 17,5}{18,5} = 2809,4595$$

5.6.2 Poměr k_1 pro vchodovou klenbu vnější:

$$k_1 = \frac{y}{a} = \frac{2809,4595}{898,6395} = 3,12635$$

5.6.3 Výpočet skutečných rozměrů klenby:

$$s = 3,12635 \times 991,4944 = 3100\text{mm}$$

$$a = 3,12635 \times 1497,8508 = 4683\text{mm}$$

$$v = 3,12635 \times 2402,0376 = 7510\text{mm}$$

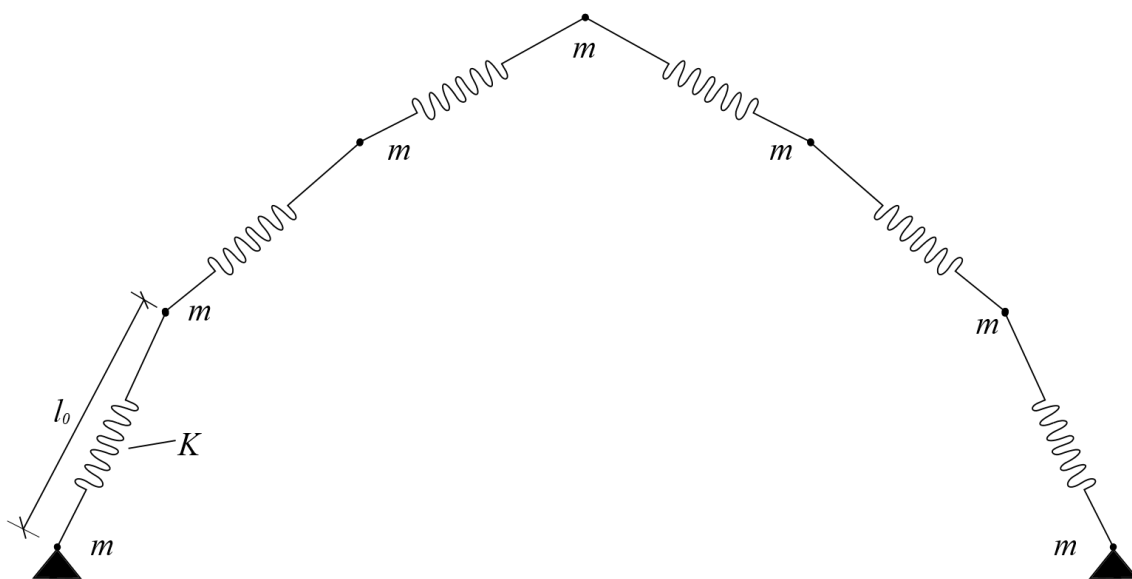
6 Program FyDiK

Program FyDiK je veřejně dostupný ve variantě 2D a 3D. V této bakalářské práci byla využita 2D varianta tohoto programu. Tento program byl vyvinut doc. Ing. Petrem Frantíkem, Ph.D. Tento program je založen na platformě Java Oracle.

Využití programu je nejčastěji pro zjištění velkých deformací, kmitání prutu, simulace sedání konstrukcí, lomu materiálu [7].

6.1 Diskrétní model FyDiK2D

Model je vytvořen z hmotných bodů, které jsou spojeny translačními pružinami. Hmotný bod je jediné místo, kde je v modelu soustředěna hmotnost. Další prvky modelu jsou vlastně zatížení, které působí na tyto hmotné body. Hmotnost je určena objemem V translační pružiny a hustotou materiálu ρ , který v modelu zaujímá. Tento hmotný bod také nahrazuje v modelu kloub, kterým jsou spojeny translační pružiny. Tyto pružiny jsou vlastně tyče s pružinkou uvnitř, na které vzniká prodloužení u . V této tyči vzniká interakční síla F , která je závislá na prodloužení u a na tuhosti pružiny K . Prodloužení u vznikne odečtením původní délky l_0 od aktuální délky l . Tuhost pružiny přímo závisí na modulu pružnosti materiálu E , na ploše pružiny A a nepřímo na počáteční délce l_0 [7].



Obr. 6.1 Model klenby

Výraz pro interakční sílu:

$$F = u K$$

Výraz pro tuhost translační pružiny:

$$K = \frac{E A}{l_0}$$

Výraz pro prodloužení u :

$$u = l - l_0$$

Výraz pro hmotnost:

$$m = V \rho = l_0 A \rho$$

6.2 Konkrétní model

Konkrétní modely, které byly vytvořeny jsou zatíženy gravitačním zrychlením $g=10 \text{ ms}^{-2}$ a hledány vnějšími silami v každém hmotném bodě, kromě hmotných bodů, které jsou ukotveny jako podpory. Objemová hmotnost materiálu, jenž byl zvolen jako pískovec, byla odhadnuta na $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$ [8]. Dále modul pružnosti byl odhadnut na $E = 10 \text{ GPa}$ [9]. Plocha průřezu byla odhadnuta na $A= 0,01 \text{ m}^2$. Délka l_0 pro model s 18 translačními pružinami byla vložena 0,465 m, pro model s 36 translačními pružinami byla délka l_0 vložena 0,2325 m a pro model se 72 dílky, což je čtyřnásobné množství translačních pružin než první model, byla délka l_0 vložena 0,11625m. Celková délka řetězu složeného z translačních pružin L_k je 8,37m.

$$l_0 = \frac{L_k}{n_i}$$

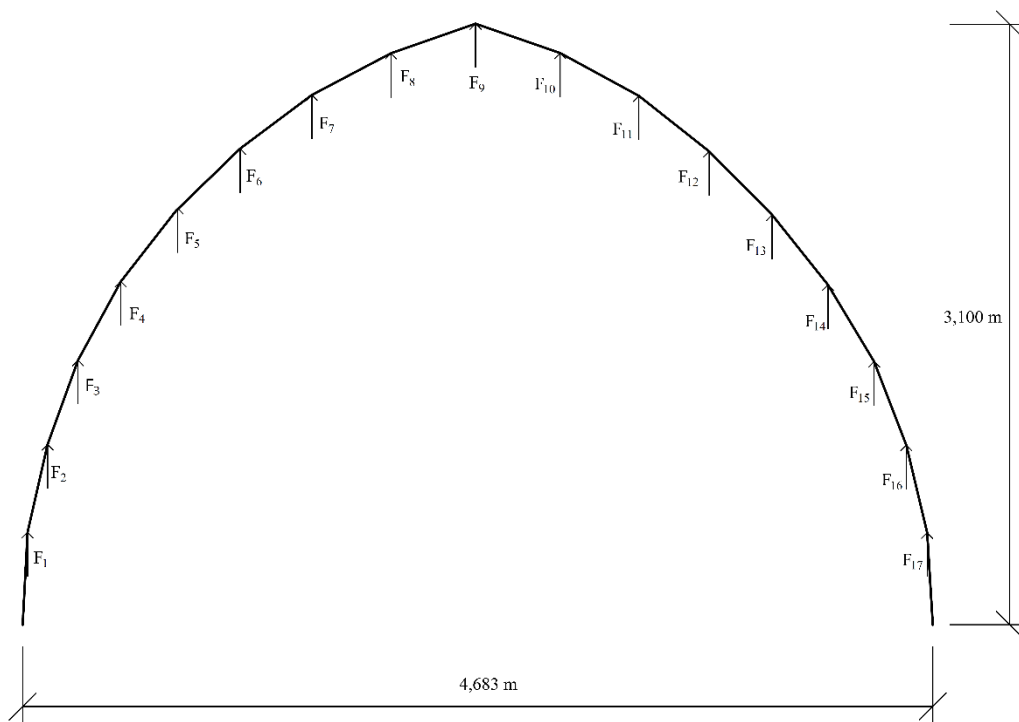
n_i – počet translačních pružin v modelu

7 Modelování v programu FyDiK

Nejdříve byly převedeny pomocí poměru teoretické rozměry na skutečné v programu AutoCAD. Dále zde byla rozdělena klenba na dvacet dílů a souřadnice bodů vzniklých v místě dělení byly vyneseny jako polygon do programu FyDiK. Poté následovalo vytvoření modelu řetězu, který byl zatížen gravitačním zrychlením v opačném směru, než působí obvykle, aby se vytvořila řetězovka směrem vzhůru. Pro vystižení hledaného tvaru klenby se rozmísťovaly pravidelně síly po modelu řetězu a měnily se hodnoty těchto sil.

7.1 Model řetězu s 18 translačními pružinami

Na obrázku 7.1 vidíme model klenby tvořené řetězem se silami. Velikosti sil vycházejí od největší dole (na krajích klenby) a pokračují postupným snižováním až do středu klenby. Síla uprostřed klenby F_9 má však výrazně větší velikost než síly okolo ní viz. tab. 7.1.



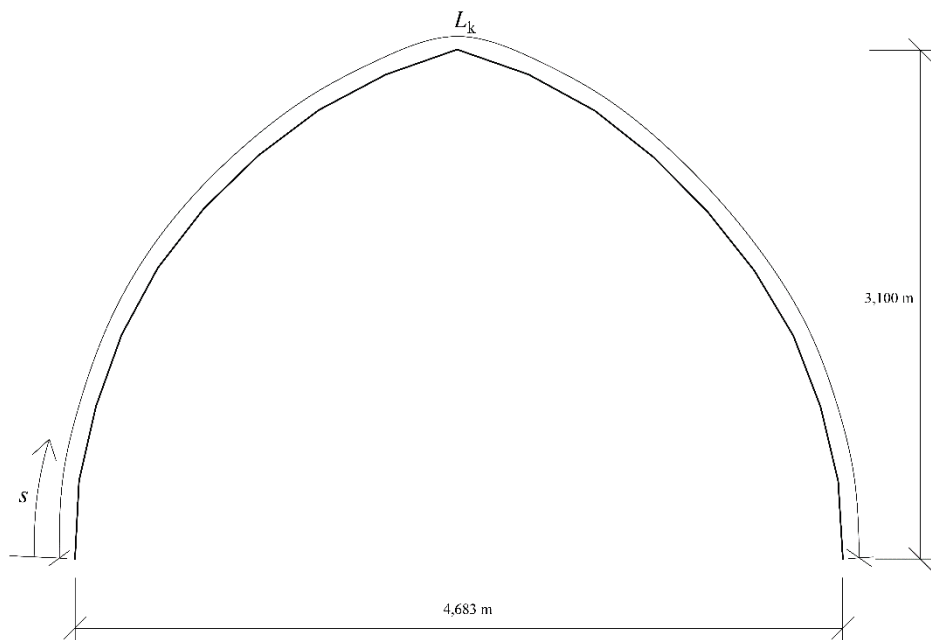
Obr. 7.1 Model klenby s 18 dílky

Výraz pro spojitě zatížení q :

$$q = \frac{F}{l_0}$$

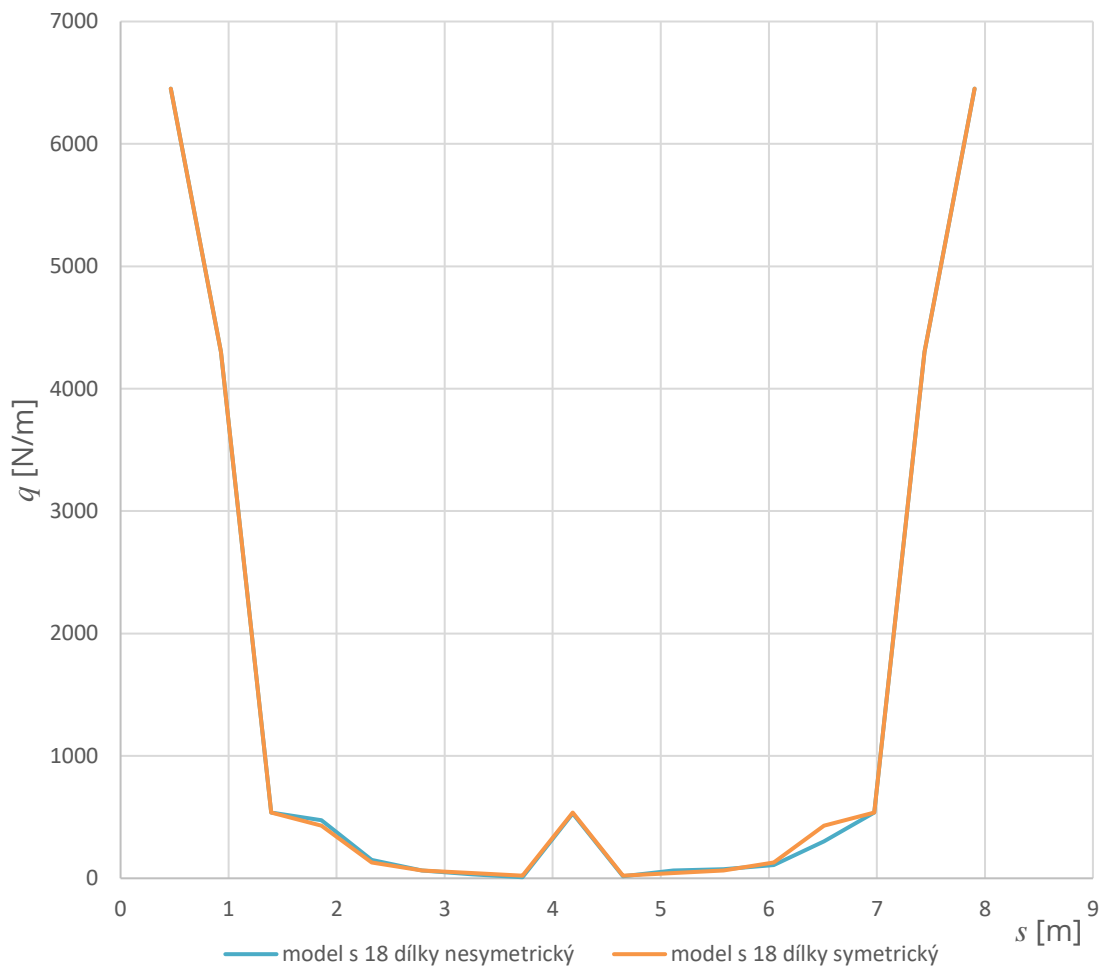
index	Symetrické řešení		Nesymetrické řešení		Rozdíl Spojitého zatížení q
	Velikost síly F [N]	Spojitě zatížení q [N/m]	Velikost síly F [N]	Spojitě zatížení q [N/m]	
1	3000	6452	3000	6452	0
2	2000	4301	2000	4301	0
3	250	538	250	538	0
4	200	430	220	473	43
5	60	129	70	151	22
6	30	65	30	65	0
7	20	43	15	32	-11
8	10	22	4	9	-13
9	250	538	246	529	-9
10	10	22	8	17	-5
11	20	43	30	65	22
12	30	65	35	75	10
13	60	129	50	108	-21
14	200	430	140	301	-129
15	250	538	250	538	0
16	2000	4301	2000	4301	0
17	3000	6452	3000	6452	0

Tab. 7.1 Tabulka sil a spojitých zatížení pro model s 18 dílky pro symetrické a nesymetrické rozložení sil

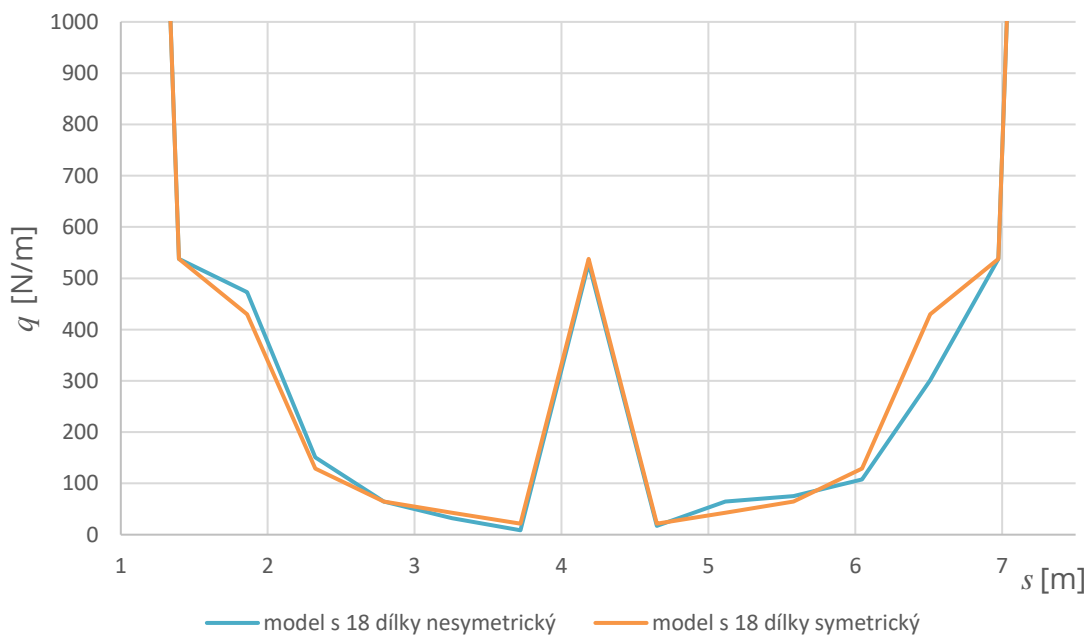


Obr. 7.2 Zobrazení průběhu s a celkové délky klenby L_k

s – je vzdálenost sčítána z délek translačních pružin l_0 po celkové délce klenby L_k



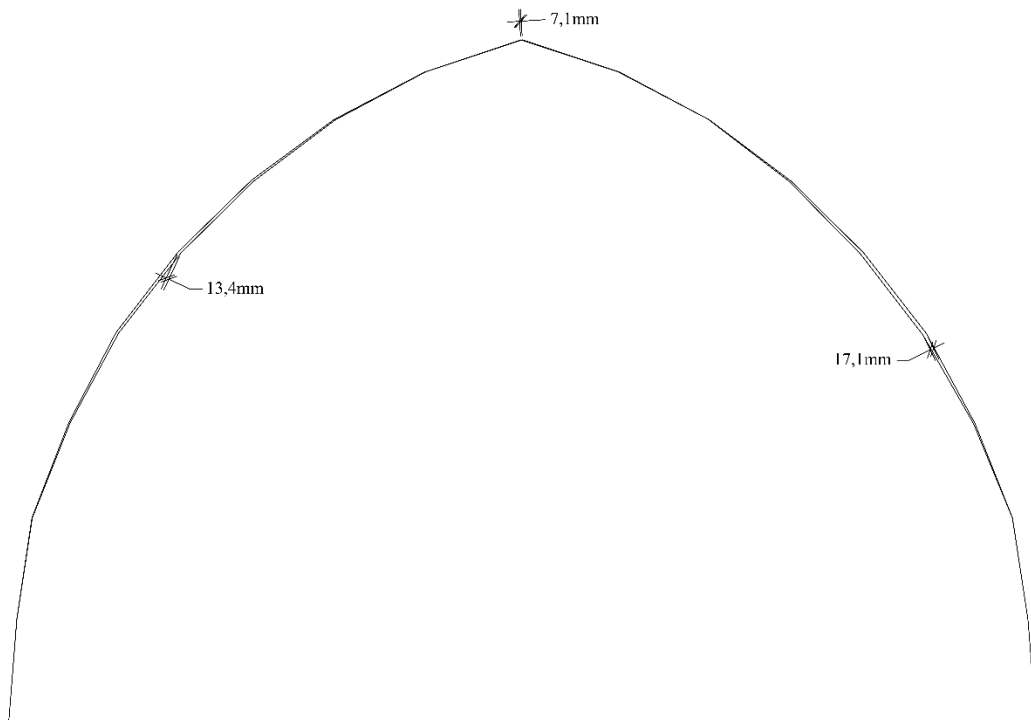
Obr. 7.3 Průběh spojitého zatížení q pro model s 18 dílky se symetrickým a nesymetrickým rozložením velikosti sil



Obr. 7.4 Průběh spojitého zatížení q pro model s 18 dílky se symetrickým a nesymetrickým rozložením velikosti sil (detail pro lepší viditelnost)

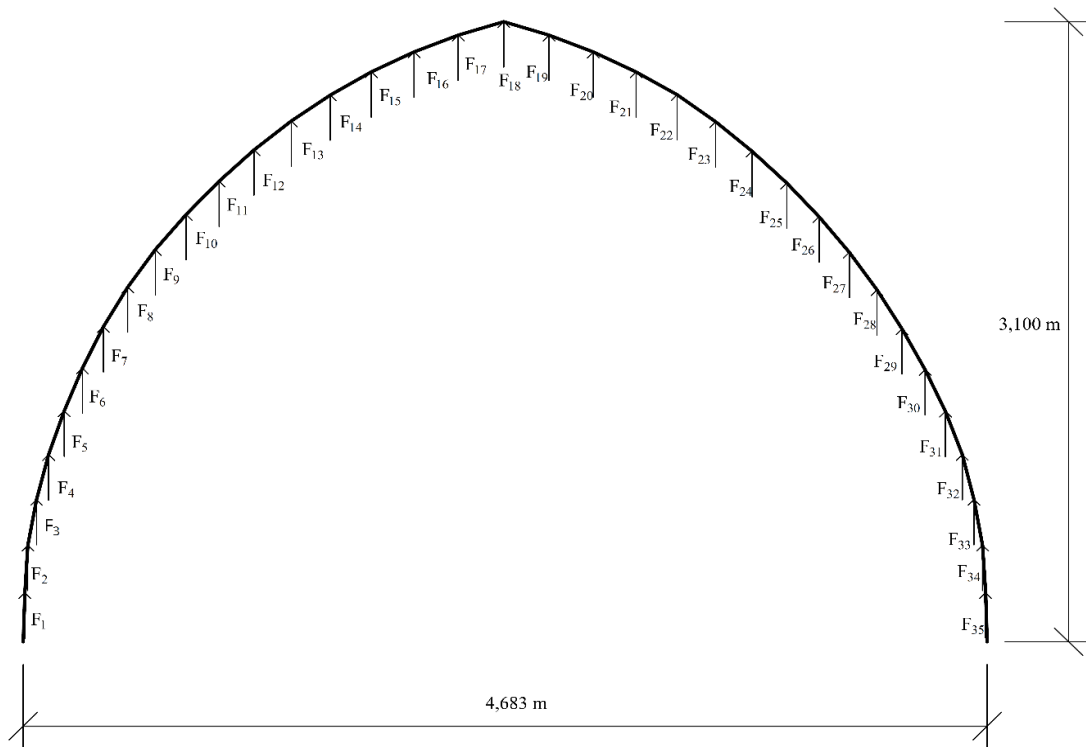
7.1.1 Zobrazení odchylek u symetrického a nesymetrického rozložení hodnot sil

Na obrázku 7.5 můžeme vidět největší odchylku na levé i pravé straně klenby a také odchylku vrcholů. Tyto odchylky mají hodnoty zleva 13,4 mm, 7,1 mm a 17,1 mm.

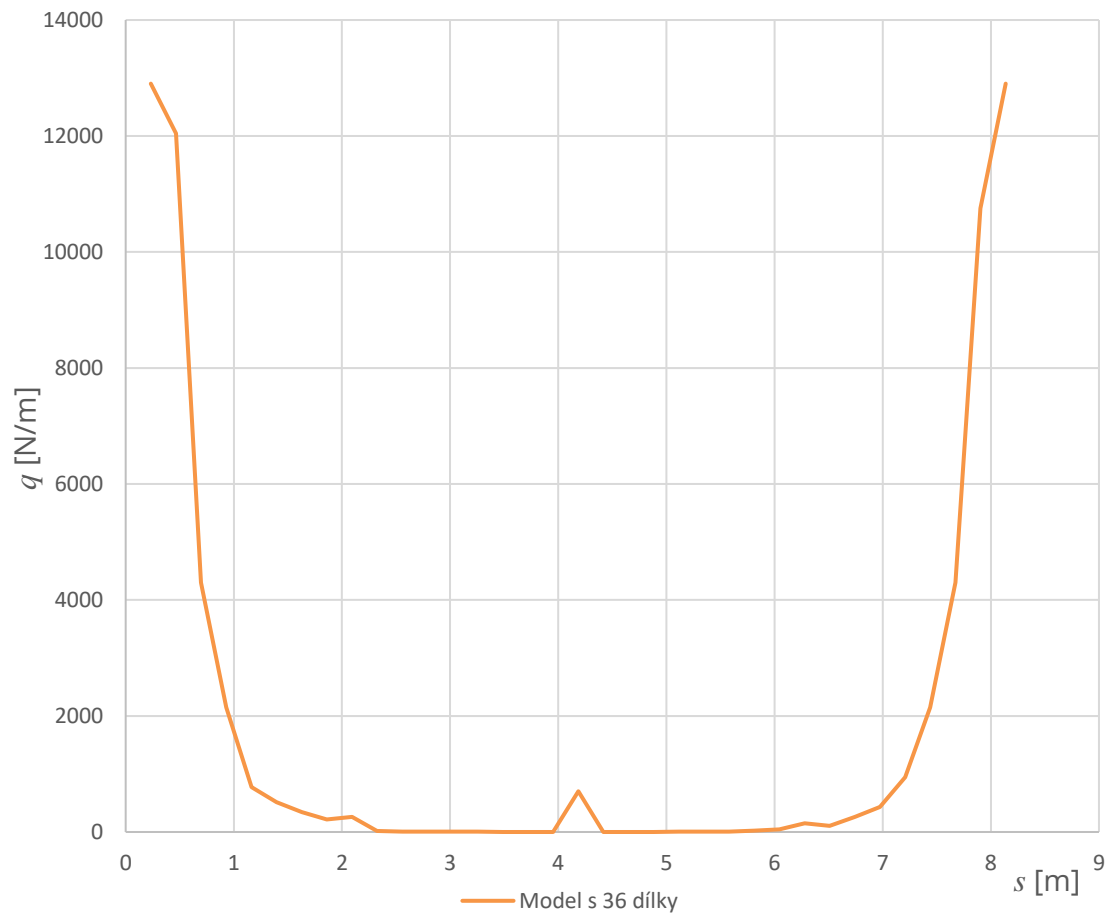


Obr. 7.5 Znárodnění největších odchylek dvou modelů s 18 dílky pro symetrické a nesymetrické rozložení velikosti sil

7.2 Model s 36 translačními pružinami



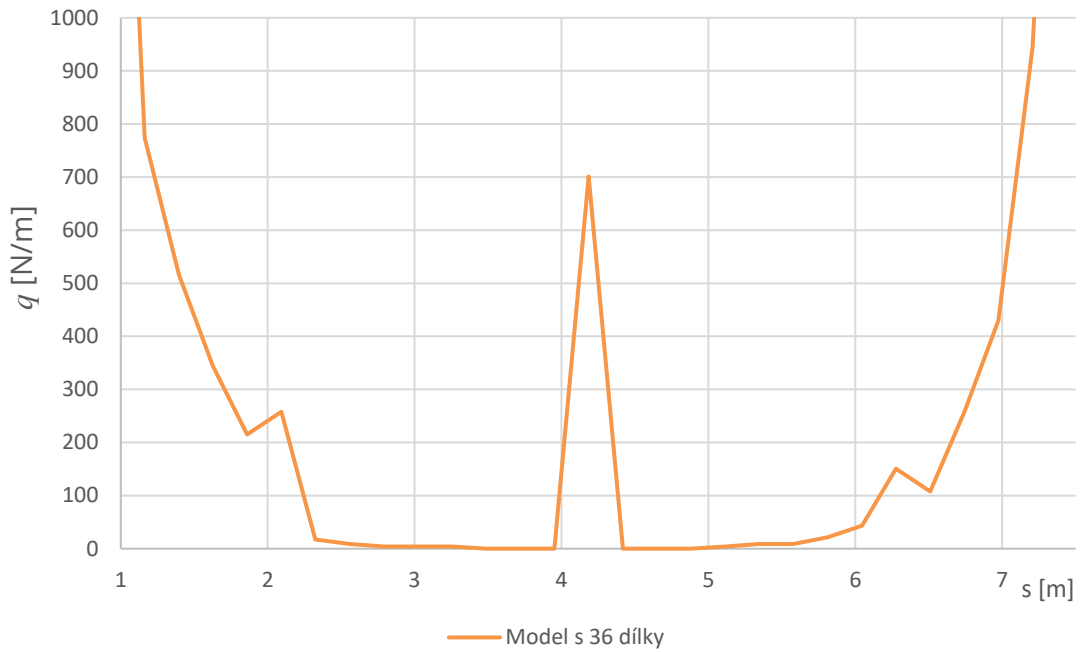
Obr. 7.6 Model s 36 dílký (dvojnásobné zjemnění modelu)



Obr. 7.7 Průběh spojitého zatížení q pro model s 36 dílký

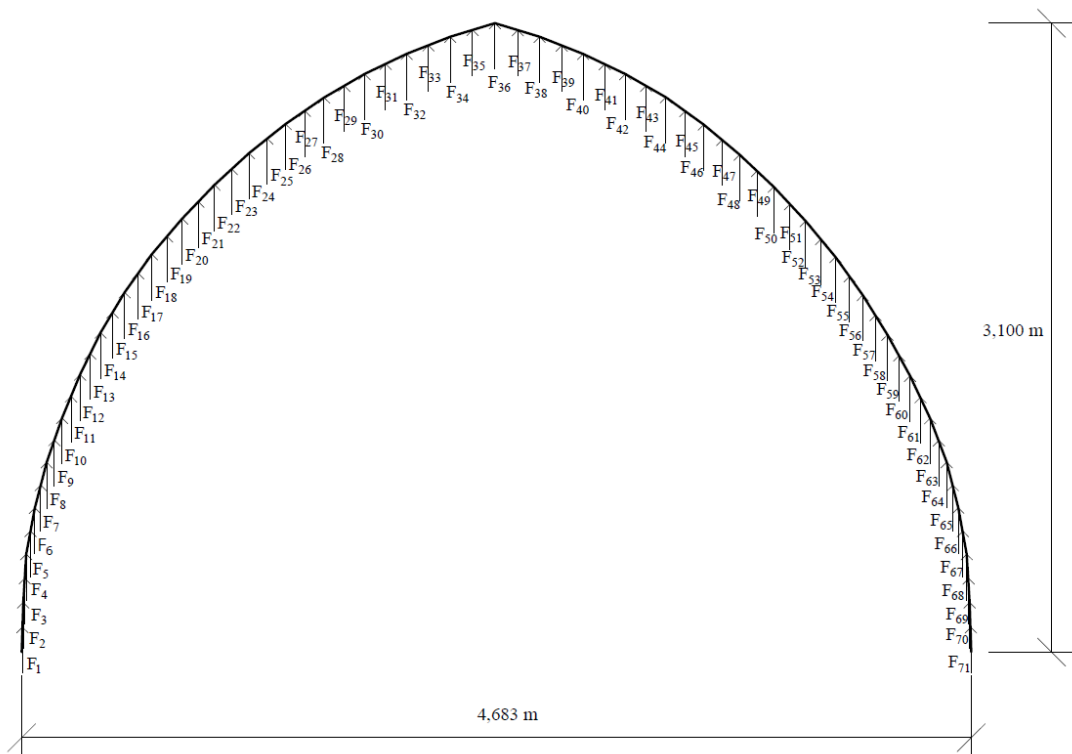
index	Velikost síly F [N]	Spojité zatížení q [N/m]
1	3000	12903
2	2800	12043
3	1000	4301
4	500	2151
5	180	774
6	120	516
7	80	344
8	50	215
9	60	258
10	4	17
11	2	9
12	1	4
13	1	4
14	1	4
15	0,01	0,04
16	0,01	0,04
17	0,01	0,04
18	163	701
19	0,01	0,04
20	0,01	0,04
21	0,01	0,04
22	1	4
23	2	9
24	2	9
25	5	22
26	10	43
27	35	151
28	25	108
29	60	258
30	100	430
31	220	946
32	500	2151
33	1000	4301
34	2500	10753
35	3000	12903

Tab. 7.2 Tabulka hodnot sil pro model s 36 dílky



Obr. 7.8 Průběh spojitého zatížení q pro model s 36 dílky (detail pro lepší viditelnost průběhu)

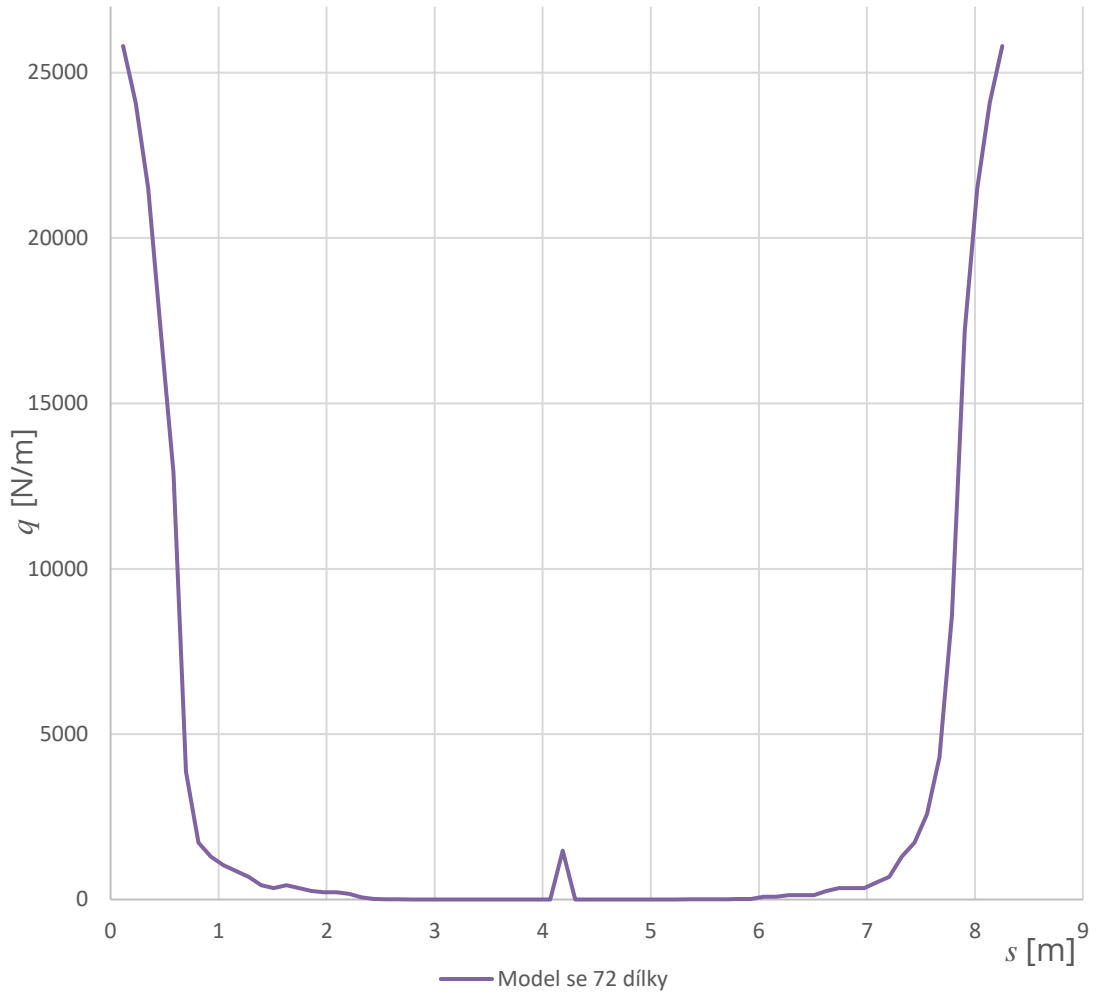
7.3 Model se 72 translačními pružinami



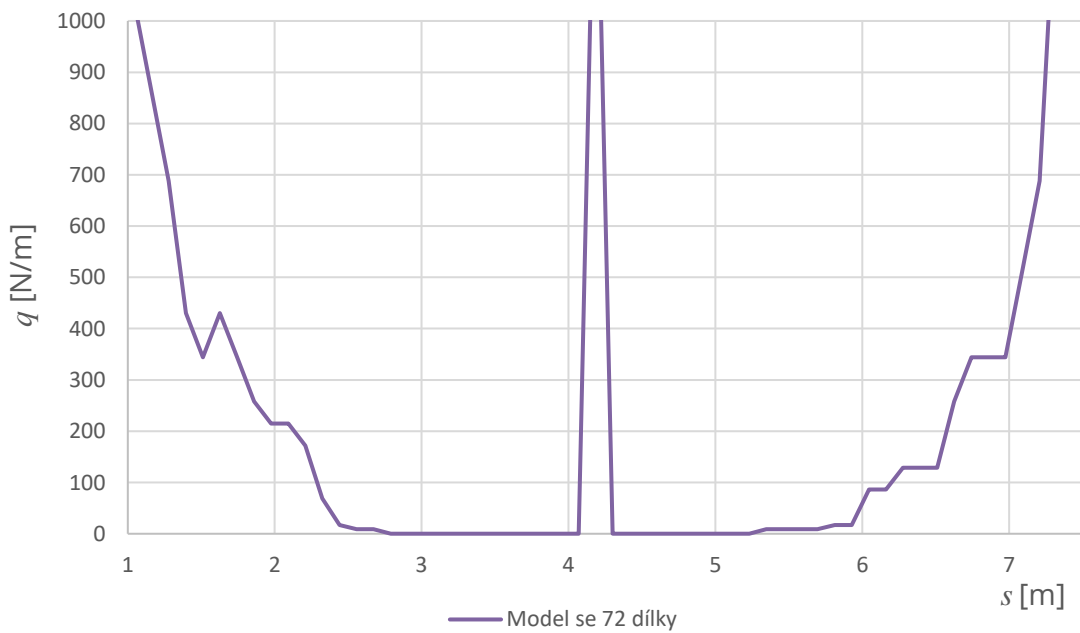
Obr. 7.9 Model se 72 dílky

index	Velikost síly F [N]	Spojité zatížení q [N/m]	index	Velikost síly F [N]	Spojité zatížení q [N/m]
1	3000	25806	37	0,01	0,09
2	2800	24086	38	0,01	0,09
3	2500	21505	39	0,01	0,09
4	2000	17204	40	0,01	0,09
5	1500	12903	41	0,01	0,09
6	450	3871	42	0,01	0,09
7	200	1720	43	0,01	0,09
8	150	1290	44	0,01	0,09
9	120	1032	45	0,01	0,09
10	100	860	46	1	9
11	80	688	47	1	9
12	50	430	48	1	9
13	40	344	49	1	9
14	50	430	50	2	17
15	40	344	51	2	17
16	30	258	52	10	86
17	25	215	53	10	86
18	25	215	54	15	129
19	20	172	55	15	129
20	8	69	56	15	129
21	2	17	57	30	258
22	1	9	58	40	344
23	1	9	59	40	344
24	0,01	0,09	60	40	344
25	0,01	0,09	61	60	516
26	0,01	0,09	62	80	688
27	0,01	0,09	63	150	1290
28	0,01	0,09	64	200	1720
29	0,01	0,09	65	300	2581
30	0,01	0,09	66	500	4301
31	0,01	0,09	67	1000	8602
32	0,01	0,09	68	2000	17204
33	0,01	0,09	69	2500	21505
34	0,01	0,09	70	2800	24086
35	0,01	0,09	71	3000	25806
36	172	1480			

Tab. 7.3 Tabulka hodnot sil pro model se 72 dílky

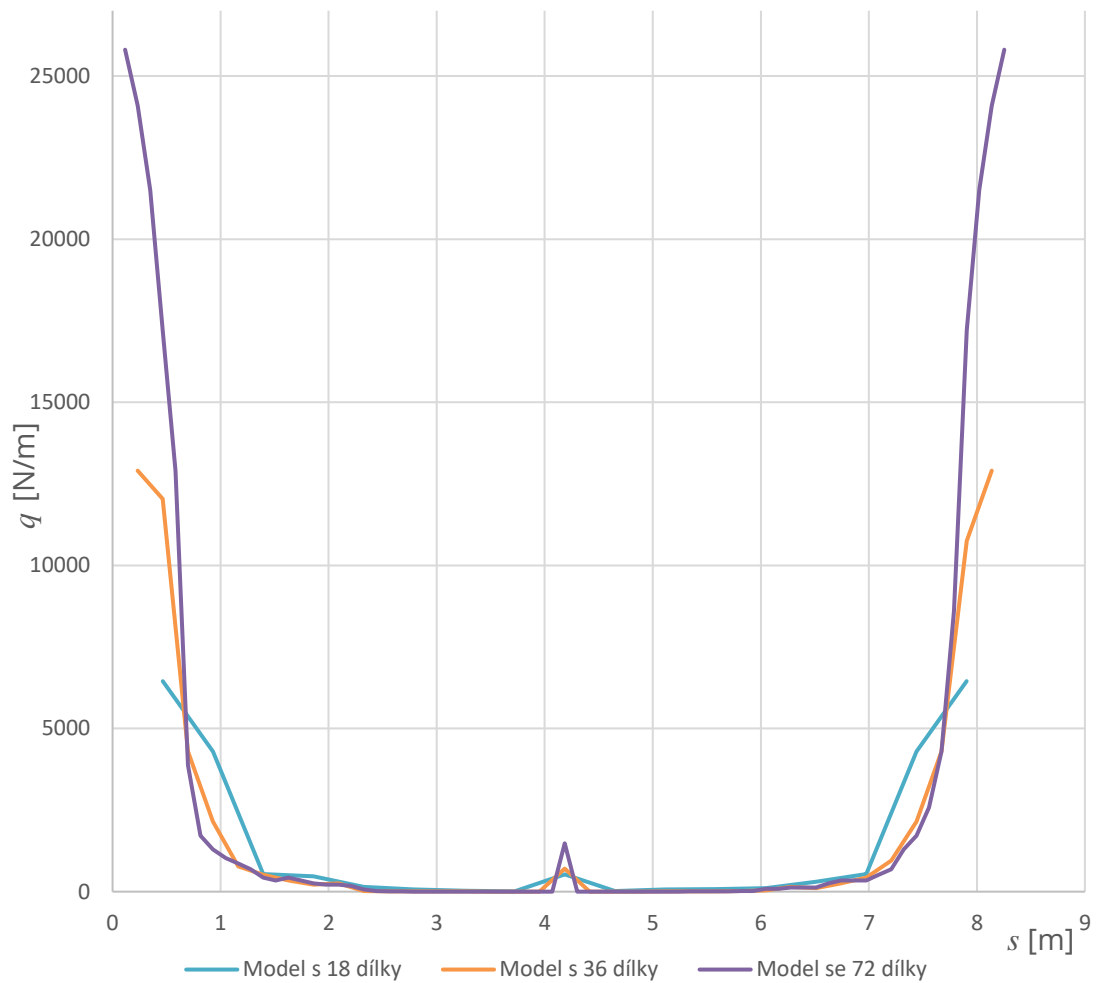


Obr. 7.10 Průběh spojitého zatížení q pro model se 72 dílky

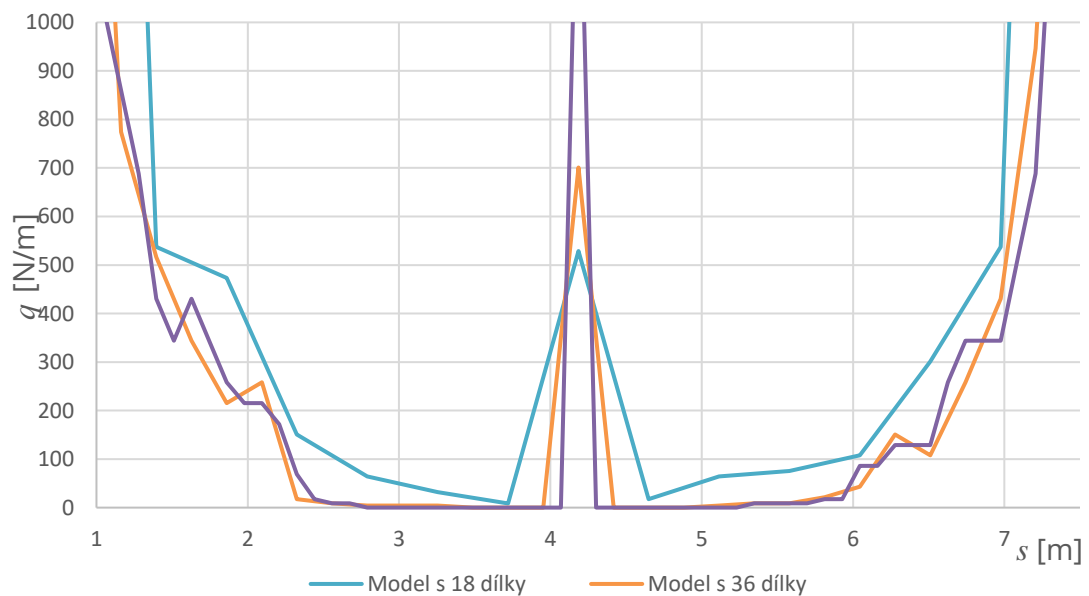


Obr. 7.11 Průběh spojitého zatížení q pro model se 72 dílky (detail pro lepší viditelnost průběhu)

7.4 Porovnání modelů v jednom grafu



Obr. 7.12 Průběh spojitého zatížení q všech tří modelů



Obr. 7.13 Průběh spojitého zatížení q všech tří modelů (detail pro lepší viditelnost průběhu)

Z grafu na obr. 7.12 a 7.13 je patrné postupné zpřesňování průběhu spojitého zatížení q mimo tři pravděpodobně singulární body, kterými jsou konce a střed klenby. Z výsledků je také jasně patrná nesymetrie klenby, činící zhruba 7 mm ve vrcholu a největší odchylka je 17 mm, vzniklá nejspíše již při stavbě kostela sv. Jakuba.

Poznamenejme, že výsledné hodnoty zatěžujících sil a spojitého zatížení nemusí korespondovat se skutečným zatížením klenby, jelikož jediným kritériem vystižení byl její tvar. Vzhledem k zahrnutí vlastní tíhy klenebního oblouku však zřejmě představují minimální hodnoty zatížení.

8 Závěr

Bakalářská práce se věnovala vystižení tvaru vybrané skutečné klenby pomocí numerického modelu tvořeného řetízkem. Numerický model byl sestaven v aplikaci FyDiK.

Pro srovnání byla vybrána vchodová klenba kostela svatého Jakuba v Brně. Ke srovnání se nejprve zjišťoval tvar pomocí fotografického měření, pro které bylo potřeba určit poměry k výpočtu skutečných rozměrů. Poté se za pomoci zjištěných poměrů upravily rozměry klenby. Výsledný tvar klenby byl vykreslen v aplikaci AutoCAD.

V práci jsou srovnány tři modely klenby vytvořené pomocí řetězu s různým počtem článků potažmo břemen. Břemena byla hledána pomocí metody pokus omyl tak, aby se tvar řetízkového modelu shodoval v jeho vrcholech s naměřeným tvarem klenby. Modely byly zatíženy také gravitačním zrychlením. První model měl 17 zavěšených břemen. Druhý model měl 35 zavěšených břemen a poslední 71. S pomocí změny hodnot těchto břemen bylo dosaženo co nejpřesnějšího vystižení tvaru skutečné klenby. Průběhy hodnot těchto břemen jsou graficky porovnány mezi sebou. U zvolené klenby vychází průběh sil tak, že uprostřed je potřeba umístit břemeno s větším zatížením. Od krajů klenby začínají o řád vyšší síly, než uprostřed klenby a postupně se snižují až v blízkosti středu klenby na skoro zanedbatelné hodnoty. S větším počtem břemen v modelu se rozložení sil posunulo víc ke krajům klenby. V blízkosti středu klenby byly hodnoty blízké nule. Velikost břemene uprostřed se také zmenšila s nárůstem počtu článků řetězu.

Díky modelu bylo zjištěno, že klenba kostela sv. Jakuba vykazuje mírnou nesymetrii tvaru činící v maximu asi 17 mm.

9 Literatura

- [1] LIPANSKÁ, Eduarda. *Historické klenby*. Praha: El Conzult, 1998. ISBN 8090207618.
- [2] OTTO, Jan. *Ottův slovník naučný: illustrovaná encyklopedie obecných vědomostí*. Praha, 1899. ISBN 80-7185-200-7.
- [3] WIKIPEDIE. *Kostel svatého Jakuba Staršího*. [online]. [cit. 2017-03-17]. [cs.wikipedia.org/wiki/Kostel_svatého_Jakuba_Staršího_\(Brno\)](http://cs.wikipedia.org/wiki/Kostel_svatého_Jakuba_Staršího_(Brno))
- [4] TEYSSLER, KOTYŠKA, Václav, ed. *Technický slovník naučný: ilustrovaná encyklopedie věd technických*. [1. vyd.]. Praha: Nakladatelé Borský a Šulc, 1931.
- [5] MENCL, Václav. *České středověké klenby*. Praha: Orbis, 1974.
- [6] JENEŠ, Rostislav a Božena PODROUŽKOVÁ. *Zděné konstrukce: Vodorovné konstrukce, klenby*. Brno, 2006. Studijní opora. Vysoké učení technické Fakulta stavební.
- [7] FRANTÍK, Petr. *DISKRÉTNÍ MODEL FYDIK2D* [online]. Ostrava, 2009 [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://www.kitnarf.cz/publications/2009/2009.05.mm.cl1/2009.05.mm.cl1.pdf>
- [8] Mikulčák a kolektiv. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. Praha: SPN Praha, 1988
- [9] HODULÁKOVÁ, Michaela. *MODUL PRUŽNOSTI PŘÍRODNÍHO KAMENE*. Brno, 2015. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Vedoucí práce DALIBOR KOCÁB.
- [10] JAROŠ, Jakub. *Italská renesanční architektura* [online]. [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://vygosh.cz/de-renit.html>
- [11] WIKIPEDIE. *Koncha*. [online]. [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Koncha>
- [12] 4UMaps, *Brno vector city map*. [online]. [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://www.4umaps.eu/brno-brunn>

10 Seznam ilustrací

Obr. 2.1 Vývoj překladů nad otvory	3
Obr. 2.2 Řetěz zatížen silami	4
Obr. 2.3 Klenba obsahující řetězovku	4
Obr. 2.4 Schéma konchy	4
Obr. 2.5 Křížová klenba s eliptickými diagonálními oblouky	5
Obr. 2.6 Křížová klenba s kruhovými diagonálními oblouky	6
Obr. 2.7 Luneta vznikající prostupem dvou valených kleneb	7
Obr. 2.8 Schéma klenby síťové vlevo a hvězdicové vpravo	7
Obr. 2.9 Rubová skořepina (železobeton)	8
Obr. 2.10 Kupole	9
Obr. 3.1 Mapa Brna	11
Obr. 4.1 Rozdělení klenby do proužků	14
Obr. 4.2 Rozdělení klenby pod různými úhly	15
Obr. 4.3 Znázornění první podmínky rovnováhy	15
Obr. 4.4 Znázornění druhé podmínky rovnováhy	16
Obr. 4.5 Tlak v průřezech podle odchylky od střednice	16
Obr. 4.6 Model pruské klenby průběhy hlavních napětí	17
Obr. 5.1 Zobrazení rozměrů pro výpočet poměru	18
Obr. 5.2 Zobrazení rozměrů pro výpočet poměru	20
Obr. 5.3 Okenní klenba	22
Obr. 5.4 Vchodová klenba vnitřní	23
Obr. 5.5 Vchodová klenba vnější	24
Obr. 6.1 Model klenby	26
Obr. 7.1 Model klenby s 18 dílky	28

Obr. 7.2 Zobrazení průběhu s a celkové délky klenby L_k	29
Obr. 7.3 Průběh spojitého zatížení q pro model s 18 dílky se symetrickým a nesymetrickým rozložením velikosti sil	30
Obr. 7.4 Průběh spojitého zatížení q pro model s 18 dílky se symetrickým a nesymetrickým rozložením velikosti sil (snížený pro lepší viditelnost)	30
Obr. 7.5 Největší odchylky dvou modelů s 18dílkami pro symetrické a nesymetrické rozložení velikosti	31
Obr. 7.6 Model s 36 dílky (dvojnásobné zjemnění modelu)	32
Obr. 7.7 Průběh spojitého zatížení q pro model s 36 dílky	32
Obr. 7.8 Průběh spojitého zatížení q pro model s 36 dílky (snížený pro lepší viditelnost průběhu)	34
Obr. 7.9 Model se 72 dílky	34
Obr. 7.10 Průběh spojitého zatížení q pro model se 72 dílky	36
Obr. 7.11 Průběh spojitého zatížení q pro model se 72 dílky (snížený pro lepší viditelnost průběhu)	36
Obr. 7.12 Průběh spojitého zatížení q všech tří modelů	37
Obr. 7.13 Průběh spojitého zatížení q všech tří modelů (snížený pro lepší viditelnost průběhu)	37

11 Seznam tabulek

Tab. 7.1 Tabulka sil a spojitých zatížení pro model s 18 dílky pro symetrické a nesymetrické rozložení sil	29
Tab. 7.2 Tabulka hodnot sil pro model s 36 dílky	33
Tab. 7.3 Tabulka hodnot sil pro model se 72 dílky	35

12 Seznam příloh

Digitální příloha	Model s 18 dílky symetrický
	Model s 18 dílky nesymetrický
	Model s 36 dílky
	Model se 72 dílky