

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ

V PRAZE



FAKULTA STAVEBNÍ

KATEDRA MECHANIKY

**MODELOVÁNÍ POSTUPNÉ VÝSTAVBY MOSTNÍ
KONSTRUKCE A JEJÍHO DOTVAROVÁNÍ**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Jaroslav Brož

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Jaroslav Kruis, Ph.D.

Obsah

1	Zadání	1
2	Shrnutí použité teorie	2
2.1	Beton	2
2.1.1	Složky betonu	3
2.2	Trámové mosty	5
2.3	Betonáž na přesuvné skruži	6
2.4	Dotvarování betonu	6
2.4.1	Úvod	6
2.4.2	Činitelé ovlivňující dotvarování	7
2.4.3	Teoretický základ dotvarování	8
3	Metoda konečných prvků a programový balík SIFEL	15
3.1	Metoda konečných prvků	15
3.2	Konečné prvky	16

3.2.1	Prutový konečný prvek	16
3.2.2	Šestistěnné prostorové prvky	18
3.3	Programový balík SIFEL	21
3.3.1	Úvod	21
3.3.2	MEFEL	22
3.3.3	Implementace dotvarování v MEFELu	23
3.3.4	Implementace B3 modelu v MEFELu	23
3.3.5	Implementace simulace postupné výstavby konstrukce v MEFELu	24
4	Popis konstrukce a technologie výstavby	27
4.1	Úvod	27
4.2	Popis mostní konstrukce	28
4.3	Konstrukce skruže	34
4.4	Popis technologie výstavby	42
5	Popis modelování	43
5.1	Úvod	43
5.2	Materiálové parametry použité pro výpočet	44
5.3	Modely mostu a skruže konečnými prvky	45
5.3.1	Mostní konstrukce	45

5.3.2	Skruž	50
5.3.3	Celkový model mostní konstrukce a skruže	54
5.4	Zatížení konstrukce	57
5.4.1	Vlastní tíha	57
5.4.2	Předpětí	57
5.5	Programy pro generování šablon a sítí konečných prvků	58
5.6	Popis jednotlivých výpočetních modelů	59
5.6.1	Výpočet dotvarování celého mostu bez postupné výstavby a bez skruže	59
5.6.2	Výpočet dotvarování pro most s modifikovanou postupnou výstavbou	60
5.6.3	Výpočet dotvarování pro most s postupnou výstavbou	61
6	Výsledky modelování	63
6.1	Výsledky výpočtu dotvarování celého mostu bez simulace výstavby a bez skruže	63
6.2	Výsledky výpočtu dotvarování mostu s modifikovanou postupnou výstavbou	68
6.3	Výsledky výpočtu dotvarování mostu s postupnou výstavbou	74
6.4	Srovnání dosažených výsledků	80

7	Závěr a budoucí práce	86
7.1	Závěr	86
7.2	Budoucí práce	87
A	Použité programy a jejich stručný popis	89
A.1	Generátor sítě konečných prvků T3D	89
A.2	GiD	90
A.3	MEFEL a MECHPREP	90
A.4	Programy pro generování topologie mostovky a skruže a šablon pro MEFEL	91
A.4.1	CONVERTT3D2SIFEL	91
A.4.2	COPYCELL	92
A.4.3	IDENTMPREDPETI	92
A.4.4	IDENTSKRUZ	92
A.4.5	VERZE1	93
A.4.6	VERZE2	94
A.4.7	IDENTMZATIZENI	94
A.5	Programy pro generování topologie pouze mostovky a šablon pro MEFEL	95
A.5.1	IDENTMOPREDPRIC A IDENTMOPREDPOD	95
A.5.2	MOCREEP	96

A.5.3	MOCREEPPREDVLT	96
A.6	Skripty preloz.sh a vytvor.sh	97
A.7	Program pro porovnaní	97

Seznam obrázků

2.2.1 Příčné řezy trámových mostů.	5
2.4.1 Superpozice dotvarování.	11
3.2.1 Lineární prostorový šestistěnný prvek.	22
4.2.1 Půdorys mostu.	29
4.2.2 Příčný řez mostu.	30
4.2.3 Podélný řez mostu.	31
4.2.4 Příčný řez mostu - poloha kanálků pro předpínací kabely.	32
4.2.5 Dolní pohled na mostní konstrukci.	32
4.2.6 Pohled na styk dvou částí mostu	33
4.3.1 Přesuvná skruž - boční pohled.	36
4.3.2 Přesuvná skruž - vrchní pohled.	37
4.3.3 Přesuvná skruž - spodní pohled.	38
4.3.4 Přesuvná skruž - pohled na konstrukci.	39
4.3.5 Přesuvná skruž - pohled na hlavní nosník.	39

4.3.6 Přesuvná skruž - pohled na výsuvný nos.	40
4.3.7 Přesuvná skruž - pohled na redukci a závěsné tyče.	40
4.3.8 Přesuvná skruž - pohled na umístění lisu na mostní konstrukci. . . .	41
4.3.9 Přesuvná skruž - pohled na uložení skruže u pilířů.	41
5.3.1 Příčný řez mostu pro MKP model	47
5.3.2 Diskretizovaný příčný řez mostní konstrukce.	48
5.3.3 Diskretizovaný podélný řez části mostní konstrukce.	48
5.3.4 Horní pohled na část diskretizované mostní konstrukce.	48
5.3.5 Izometrický pohled na část diskretizované mostní konstrukce.	49
5.3.6 Boční pohled na hlavní nosník skruže použitého pro tvorbu MKP modelu.	51
5.3.7 Horní pohled na hlavní nosník skruže použitého pro tvorbu MKP modelu.	51
5.3.8 Dolní pohled na hlavní nosník skruže použitého pro tvorbu MKP modelu.	52
5.3.9 Diskretizovaný příčný řez skruže.	52
5.3.10 Diskretizovaný podélný řez části skruže.	52
5.3.11 Horní pohled na část diskretizované skruže.	53
5.3.12 Izometrický pohled na část diskretizované skruže.	53
5.3.13 Diskretizovaný příčný řez celkového modelu.	54

5.3.14	Diskretizovaný podélný řez části celkového modelu.	55
5.3.15	Horní pohled na část diskretizované celkového modelu.	55
5.3.16	Izometrický pohled na část diskretizované celkového modelu. . . .	56
5.4.1	Rozklad předpínací síly do složek.	57
5.6.1	Způsob podepření skruže označený jako skruž 1.	61
5.6.2	Způsob podepření skruže označený jako skruž 2.	62
6.1.1	Zobrazení uzlů z tab. 6.1.1 na konstrukci.	64
6.1.2	Graf dotvarování - uzel 1228.	64
6.1.3	Graf dotvarování - uzel 2281.	65
6.1.4	Graf dotvarování - uzel 2806.	65
6.1.5	Graf dotvarování - uzel 3604.	66
6.1.6	Isolinie svislého průhybu v čase 5 dní po zatížení (500x zvětšeno). .	66
6.1.7	Isolinie svislého průhybu v čase 134 dní po zatížení (500x zvětšeno). .	67
6.1.8	Isolinie svislého průhybu v čase ukončení výpočtu - 4 roky a 135 dní po zatížení (500x zvětšeno).	67
6.2.1	Zobrazení uzlů z tab. 6.2.1 na konstrukci.	69
6.2.2	Graf dotvarování - uzel 8128.	70
6.2.3	Graf dotvarování - uzel 9706.	70
6.2.4	Graf dotvarování - uzel 10504.	71
6.2.5	Isolinie svislého průhybu v čase 1 den po zatížení 1. pole (500x zvětšeno).	71

6.2.6 Isolinie svislého průhybu v čase 12 dní po zatížení 1. pole (500x zvětšeno).	72
6.2.7 Isolinie svislého průhybu v čase 17 dní po zatížení 1. pole a 2 dny po zatížení 2. pole (500x zvětšeno).	72
6.2.8 Isolinie svislého průhybu v čase 24 dní po zatížení 1. pole a 9 dnů po zatížení 2. pole (500x zvětšeno).	73
6.3.1 Zobrazení uzlů z tab. 6.3.1 na konstrukci.	75
6.3.2 Graf dotvarování - uzel 8128.	76
6.3.3 Graf dotvarování - uzel 9706.	76
6.3.4 Graf dotvarování - uzel 10504.	77
6.3.5 Isolinie svislého průhybu v čase 1 den po zatížení 1. pole (500x zvětšeno).	77
6.3.6 Isolinie svislého průhybu v čase 12 dní po zatížení 1. pole (500x zvětšeno).	78
6.3.7 Isolinie svislého průhybu v čase 17 dní po zatížení 1. pole a 2 dny po zatížení 2. pole (500x zvětšeno).	78
6.3.8 Isolinie svislého průhybu v čase 24 dní po zatížení 1. pole a 9 dnů po zatížení 2. pole (500x zvětšeno).	79
6.4.1 Srovnání grafů svislého průhybu od dotvarování - verze 1, verze 2, verze 3 - uzel 8128.	81
6.4.2 Rozdíl hodnot svislého průhybu od dotvarování mezi verzemi 1 a 2 - uzel 8128.	82

6.4.3 Srovnání grafů dotvarování - verze 1, verze 2, verze 3 - uzel 9706. . .	83
6.4.4 Rozdíl hodnot svislého průhybu od dotvarování mezi verzemi 1 a 2 - uzel 9706.	83
6.4.5 Srovnání grafů svislého průhybu od dotvarování - verze 1, verze 2, verze 3 - uzel 10504.	84
6.4.6 Rozdíl hodnot svislého průhybu od dotvarování mezi verzemi 1 a 2 - uzel 10504.	85

Seznam tabulek

3.3.1	Iterační proces výpočtu dotvarování.	26
4.3.1	Průřezové charakteristiky částí přesuvné skruže.	35
4.4.1	Časový postup při budování jednoho taktu.	42
6.1.1	Tabulka uzlů a jejich souřadnic.	64
6.2.1	Tabulka uzlů a jejich souřadnic.	69
6.3.1	Tabulka uzlů a jejich souřadnic.	75
6.4.1	Srovnání výsledků svislého průhybu pro uzel 8128.	82
6.4.2	Srovnání výsledků svislého průhybu pro uzel 9706.	84
6.4.3	Srovnání výsledků svislého průhybu pro uzel 10504.	85
A.4.1	Posloupnost programů pro výpočet mostovky a skruže.	91
A.4.2	Přiřazení vlastností prvkům skruže v programu <code>identskruz</code>	93
A.5.1	Posloupnost programů pro výpočet mostovky bez skruže.	96

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pouze za odborného vedení vedoucího diplomové práce a konzultantů.

Dále prohlašuji, že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpal jsou uvedeny v seznamu literatury.

Datum

Podpis

Jaroslav Brož

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval Doc. Ing. Jaroslavu Kruisovi, Ph.D. za vedení diplomové práce a také za jeho podporu, trpělivost, rady, inspiraci a diskuze nejen při vypracování této diplomové práce.

Ing. Martinu Kulhavému, Ph.D. z firmy. METROSTAV a.s. děkuji za nabídku se tímto tématem zabývat a za poskytnutí podkladů. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Tomáši Koudelkovi za jeho pomoc a rady o preprocesoru MECHPREP. Doc. Ing. Dr. Danielu Ryplovi za rady při tvorbě modelu pro generátor konečných prvků T3D. Ing. Tomáši Krejčímu, Ph.D. za rady při řešení dotvarování. Děkuji Ing. Ladislavu Svobodovi za debaty o programování a Linuxu.

Rovněž patří můj dík rodině za podporu při studiu a tvorbu potřebného zázemí. Děkuji také přítelkyni za její velkou trpělivost se mnou při práci na tomto tématu a její podporu.

Abstrakt

Obsahem této diplomové práce je modelování postupné výstavby mostní konstrukce na přesuvné skruži a jejího dotvarování. Jsou zde srovnány dvě technologie výstavby pomocí přesuvné skruže, které se liší ve způsobu podepření skruže. Prvním způsobem je podepření skruže z pilíře na další pilíř a druhým z konzoly mostu na další pilíř. V této práci jsou použity tři různé numerické modely konstrukce. První model je výpočet mostu bez skruže, při kterém se předpokládá, že celý most je vybetonován a předeprnut ve stejný okamžik. Druhý model popisuje postupnou výstavbu se skruží podepřenou z pilíře na pilíř. Třetí model popisuje postupnou výstavbu se skruží podepřenou z konzoly mostu na pilíř. Pro výpočet je použit otevřený program MEFEL vyvíjený na katedře mechaniky FSv ČVUT. Pro model dotvarování je použit Bažantův model B3. V závěru práce jsou uvedeny dosažené výsledky a jejich srovnání. Dále je zde uvedeno doporučení pro technologii výstavby a další možná rozšíření modelů.

Abstract

This master thesis deals with modelling of gradual construction of road bridge and its creep. The bridge is constructed with the help of the shifting falsework. Two technologies of gradual construction are studied. The shifting falsework is supported either by bridge piers (columns) or by cast cantilever from the previous phase and by the following piers. There are three numerical models of the bridge in this thesis. The first model assumes the whole bridge without gradual construction. The bridge is cast at one time instant and the prestress is applied all at once. Second numerical model describes gradual construction, where the shifting falsework is supported by piers. Third numerical model describes gradual construction, where the shifting falsework is supported by previously cast cantilever and the following pier. Computations were conducted by open source code MEFEL developed at the Department of Mechanics at Civil Engineering Faculty of CTU. Creep is described by the Bažant model B3. At the end of the thesis, the attained results are summarized and compared. Two technologies of gradual construction are evaluated and refinements of the model are mentioned.

Kapitola 1

Zadání

V současnosti je budována a rozšiřována dálniční síť České republiky. Důsledkem tohoto budování je výstavba nových dálničních mostů, na které jsou kladeny velké nároky, jak z hlediska času výstavby, tak i jejich kvality a životnosti.

Jedním z dodavatelů budujících mostní konstrukce pro dálniční síť je firma METROSTAV a.s.. Tato firma používá, jako jednu z technologií výstavby mostních konstrukcí, technologii výstavby pomocí přesuvné skruže. Z důvodů zajištění kvality a životnosti mostní konstrukce vybudované pomocí technologie přesuvné skruže, byl vznesen požadavek na přesnější způsob výpočtu takovéto konstrukce. V zadání této práce byl požadavek na sestavení numerického modelu přesuvné skruže a mostní konstrukce pro analýzu metodou konečných prvků. Dále byl požadavek na výpočet deformací skruže a konstrukce v jednotlivých etapách výstavby včetně vlivu dotvarování, vlivu předpětí a vlastní tíhy včetně uvážení tuhosti skruže. Též byl vznesen požadavek na variantní řešení podepření přesuvné skruže.

Samotné podklady, nutné pro tvorbu modelů a jejich zatížení, byly získány od firmy METROSTAV a.s. prostřednictvím Ing. Martina Kulhavého, Ph.D.

Kapitola 2

Shrnutí použité teorie

2.1 Beton

Beton je umělý slepenec, složený ze směsi plniva, pojiva, vody, přísad a příměsí, který získá své vlastnosti hydratací cementu. Beton je v současné době nejrozšířenějším stavebním materiálem, jež se uplatňuje ve všech stavebních oborech.

Významnou vlastností betonu je jeho pevnost v tlaku. ČSN EN 206 - 1 uvádí orientační hodnotu maximální pevnosti betonu v tlaku rovnou 115 MPa. Pevnost betonu v tahu je však oproti pevnosti v tlaku malá, její velikost je přibližně 1/10 pevnosti v tlaku.

Beton lze dělit podle mnoha různých kritérií. Jedním z kritérií může být rozdělení podle objemové hmotnosti γ_b na beton:

- Lehký $\gamma_b < 2000 \text{ kg/m}^3$
- Obyčejný $\gamma_b = 2000 - 2600 \text{ kg/m}^3$

- Těžký $\gamma_b > 2600 \text{ kg/m}^3$.

Dalším kritériem může být dělení podle způsobu vyztužení na:

- Prostý beton
- Slabě vyztužený beton
- Vyztužený beton
 - Železobeton
 - Předpjatý beton

Beton je též možno dělit podle jeho pevnosti v tlaku použitím tzv. pevnostní třídy betonu. Toto označení je zavedeno v EČSN 206. Například označení C16/20 znamená, že beton má krychelnou pevnost v tlaku 20 MPa a válcovou pevnost v tlaku 16 MPa. Tyto hodnoty jsou získány zkouškami popsány v příslušné normě.

2.1.1 Složky betonu

Cement

Jako pojiva se pro beton používá cement. Cement je možno dělit podle třídy cementu. Třída cementu je stanovena jeho pevností v tlaku v jednotkách MPa. Základní třídy cementu jsou tyto: CEM 22,5 CEM 32,5 a CEM 52,5. Volba třídy pevnosti cementu ovlivňuje požadavek na konečnou pevnost betonu.

Aby nastalo dokonalé vzájemné spojení zrn kameniva, je třeba minimálního množství cementu. Například pro železobeton je tato dávka stanovena jako 240 kg na 1 m³.

Kamenivo

Jako plniva se pro beton používá kamenivo. Zaujímá největší podíl objemu betonu. Jeho podíl dosahuje 2/3 objemu betonu. V současnosti je obvyklé skládat směs kameniva pro výrobu minimálně ze tří různých frakcí (drobného kameniva, jemného štěrku a hrubého štěrku).

Voda

Voda v betonu má několik funkcí. Funkcí vody je podílet se na hydrataci minerálů obsažených v cementu. Další funkcí vody je zajistit zpracovatelnost betonové směsi. Tyto dvě funkce plní voda, jež je označována jako voda záměsová.

Základním údajem, který charakterizuje obsah vody v betonu je hodnota vodního součinitele w , kterým se rozumí poměr hmotnosti vody a cementu v objemové jednotce betonu

$$w = \frac{m_v}{m_c}. \quad (2.1.1)$$

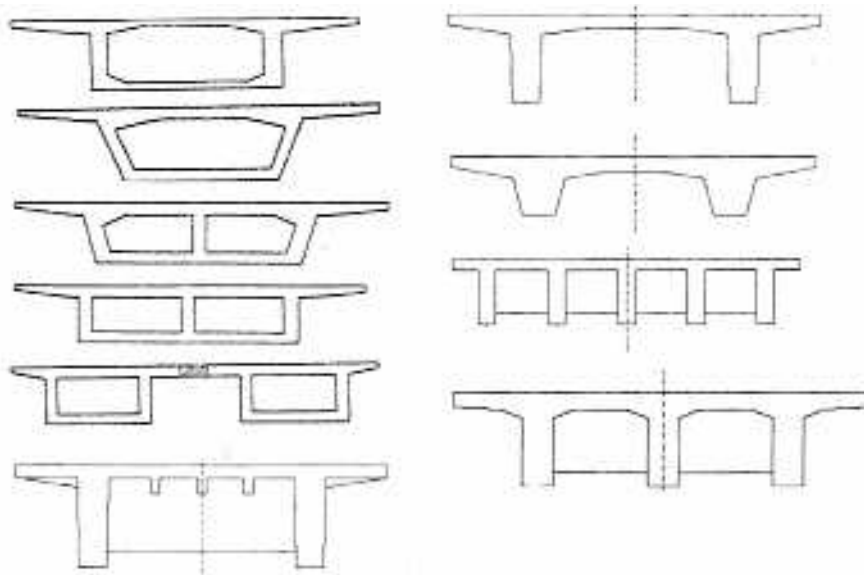
Pro vlastní hydrataci cementu je zapotřebí takové množství záměsové vody, které bude chemicky vázáno s petrografickými složkami cementu. Toto množství bývá asi 19 až 20 % z hmotnosti cementu.

Podrobnější informace o betonu lze nalézt ve skriptech [Kohoutková et al.(2005)], skriptech [Novák et al.(1999)] a skriptech [Procházka et al.(2002)].

2.2 Trámové mosty

Nosnou konstrukci trámových mostů tvoří plné trámy - žebra, nebo komorové rámy (viz obr.2.2.1¹). Používaná rozpětí železobetonových trámů jsou od 10 m do 25 m jako prosté nosníky, lze je však použít i na rozpětí do 60 m jako spojitě nebo vetknuté nosníky. Nejvíce se používají dvoutrámové předpjaté monolitické konstrukce.

Trámové mosty vyžadují větší konstrukční výšku než deskové, která závisí nejen na statickém uspořádání, ale také na technologii výstavby. Výška hlavních nosníků bývá kolem 1/10 jejich rozpětí. Mostovka se navrhuje desková nebo žebrová.



Obrázek 2.2.1: Příčné řezy trámových mostů.

Podrobnější popis trámových mostů, a betonových mostů obecně, lze nalézt ve skriptech [Hrdoušek et al.(2005)] a knize [Janda et al.(1988)].

¹převzato z [Hrdoušek et al.(2005)]

2.3 Betonáž na přesuvné skruži

Přesuvné skruže tvoří hlavní ocelový nosník, který pojíždí podepřen buď pouze na definitivních podporách mostu, nebo je opatřen i provizorními mezipodpěrami.

Přesuvné skruže se dělí na:

- Skruže s hlavním nosníkem pod konstrukcí mostu.
- Skruže s hlavním nosníkem nad konstrukcí mostu.

Výhodou skruže s hlavním nosníkem umístěným pod konstrukcí mostu je zcela volná pracovní plocha pro výstavbu konstrukce. Nevýhodou je potřeba dodatečného manipulačního prostředku.

Výhodou skruže s hlavním nosníkem umístěným nad konstrukcí mostu je, že nosník skruže lze využít i jako jeřáb pro manipulaci s materiálem. Nevýhodou je omezení pracovního prostoru.

Podrobnější popis betonáže na přesuvné skruži lze nalézt ve skriptech [Hrdoušek et al.(2005)] a knize [Janda et al.(1988)].

2.4 Dotvarování betonu

2.4.1 Úvod

Pozorování a měření na skutečných konstrukcích ukazuje, že deformace některých materiálů od zatížení narůstají v čase. Toto tvrzení platí i v případě konstantního zatížení. Deformační procesy ve skutečnosti probíhají s určitým zpožděním. Příčinami jsou viskózní přetvárné procesy.

Výše zmíněný jev je označován jako dotvarování. Pokud je struktura betonu vystavena dlouhodobému účinku zatížení, reaguje zvětšením deformace. Nárůst deformace betonu vlivem dlouhodobého působení zatížení je označován jako dotvarování betonu.

Dotvarování má svůj původ v mikrostruktuře cementového tmelu, který spojuje kamenivo a zrna písku. Jeho základní hmotou je cementový gel, jež je velmi homogenní hmotou s koloidním charakterem. Obsahuje vodu, která je v něm vázána jednak chemicky, jednak je v jeho pórech jako voda koloidní a konečně v kapilárách a makropórech jako voda volná. Účinkem dlouhotrvajícího napětí betonu se voda, která není chemicky vázána, vytlačuje z mikropórů gelu do kapilár a z nich se odpařuje. Ztráta vody vede k tomu, že se napětí přenáší postupně více z viskózního prostředí na pružnou kostru betonu a po odtížení se pak část přetvoření vrátí.

Podle toho tedy velikost dotvarování závisí na napětí betonu, na jeho struktuře vzhledem k vlastnostem jednotlivých složek, na konzistenci směsi a na stupni hydratace. Je také ovlivněno prostředím a jeho teplotou.

2.4.2 Činitele ovlivňující dotvarování

Mezi činitele, jež ovlivňují dotvarování betonu patří

- stáří betonu - Experimentální výsledky ukazují, že čím později se beton zatíží, tím nižší bude konečná hodnota dotvarování, ale současně bude mít také dotvarování jiný průběh.
- vlhkost prostředí - V sušším prostředí je dotvarování velké, ve vodě malé nebo žádné.

- rozměry prvku - Prvky s menšími rozměry dotvarují více než prvky velké.
- složení betonu
 - cement - Vzájemný vztah dotvarování a druhu cementu je složitý, neboť závisí na fyzikálních a chemických vlastnostech cementu a také na stupni hydratace.
 - kamenivo - Více dotvarují betony jemnozrné, tj. betony s malým obsahem hrubé frakce kameniva.
 - vodní součinitel - Betony, při jejichž výrobě bylo použito vyšších hodnot vodního součinitele, vykazují též větší dotvarování.
- vliv teploty - Podle knihy [Šmerda a Křístek(1978)] není účinek teploty na dotvarování příliš velký, je-li teplota v rozmezí -10°C až $+40^{\circ}\text{C}$, a konstrukce je v extrémních teplotách pouze krátkodobě.

Podrobnější popis činitelů jež ovlivňují dotvarování lze nalézt v knize [Šmerda a Křístek(1978)] a ve skriptech [Jirásek a Zeman(2006)].

2.4.3 Teoretický základ dotvarování

Linearita dotvarování

V lineární teorii pružnosti platí, že napětí je přímo úměrné přetvoření. Podobná lineární závislost platí také mezi napětím a dotvarováním. V každém okamžiku t lze tedy vyjádřit lineární vztah mezi dotvarováním ε_d a napětím σ následujícím způsobem

$$\varepsilon_d(t) = A(t, E) \sigma, \quad (2.4.1)$$

kde $A(t, E)$ závisí na čase a na modulu pružnosti betonu.

Linearita však platí jen do určité hranice poměru napětí σ k pevnosti betonu f_b . Ve skriptech [Jirásek a Zeman(2006)] je tato hranice pro tlačený prvek uvedena jako 50% pevnosti betonu v tlaku. V knize [Šmerda a Křístek(1978)] je tato hranice uvedena rozmezím 40 - 50 % pevnosti betonu. Dále je zde uvedeno, že v praxi je tato hodnota přijatelná, neboť v provozním stavu bývá napětí při hlavním zatížení asi 35 % pevnosti betonu. Je-li tato hranice přestoupena, nelze již linearitu uvažovat.

Boltzmanův princip superpozice

Superpozice účinků je důsledkem předpokladu o linearitě mezi napětím a dotvarováním. Bude platit, pokud byla napětí různých velikostí vnesena do betonu ve stejném čase t_0 . Pak se bude výsledné dotvarování ε_d v čase t rovnat součtu dílčích dotvarování ε_{di} od zatížení σ_i , tak že

$$\varepsilon_d = \sum \varepsilon_{di}. \quad (2.4.2)$$

Pro řešení dotvarování je však potřeba rozšířit platnost superpozice také na případy, při nichž začala napětí působit na beton v různých časech.

Ve skriptech [Jirásek a Zeman(2006)] je toto rozšíření principu superpozice zavedeno následujícím způsobem. Nechť pro daný materiál

1. Deformace mění se v čase podle funkce $\varepsilon_1(t)$ vede k vývoji napětí popsanému funkcí $\sigma_1(t)$,
2. Deformace mění se v čase podle funkce $\varepsilon_2(t)$ vede k vývoji napětí popsanému funkcí $\sigma_2(t)$.

Potom platí, že deformace mění se v čase podle funkce $c_1\varepsilon_1(t) + c_2\varepsilon_2(t)$, kde c_1 a c_2 jsou libovolné reálné konstanty, vede k vývoji napětí popsanému funkcí $c_1\sigma_1(t) + c_2\sigma_2(t)$.

Jestliže se odejme určitá část napětí, pak se toto napětí považuje za záporné a dotvarování ε_{di} se odečítá. Z principu superpozice je patrné, že jednotlivá napětí působí vždy během celého časového úseku, tj. od počátku, kdy bylo napětí do betonu vneseno, až po sledovaný okamžik.

Pro dobrou představu o superpozici vše nyní bude demonstrováno na obr. 2.4.1². Platí-li princip superpozice, pak bude mít celkové dotvarování $\varepsilon(t_1, t_2, t_3, t_4)$, tj. dotvarování v čase t_4 , jež vznikne součtem napětí σ_1 působícího od okamžiku t_1 , napětí σ_2 působícího od okamžiku t_2 a odečtením napětí σ_3 působícího od okamžiku t_3 , velikost

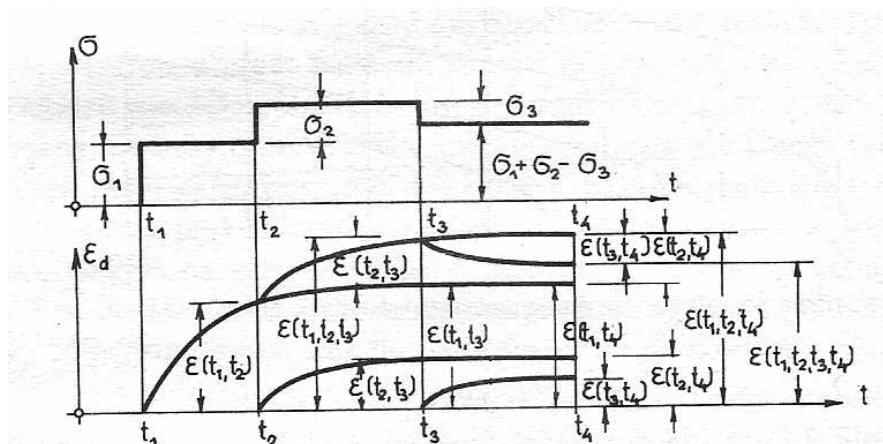
$$\varepsilon(t_1, t_2, t_3, t_4) = \varepsilon(t_1, t_4) + \varepsilon(t_2, t_4) - \varepsilon(t_3, t_4) = \varepsilon(t_1, t_2, t_3) - \varepsilon(t_3, t_4) \quad (2.4.3)$$

Funkce dotvarování

Na základě principu superpozice lze dokázat, že pokud je funkce $\varepsilon(t)$ popisující vývoj deformace v čase vydělena hodnotou σ , je získána funkce, která nezávisí na zvolené úrovni napětí a je tudíž charakteristikou materiálu. Tato funkce se nazývá funkcí dotvarování $J(t, t')$. Lze tedy napsat následující vztah

$$\varepsilon(t) = \sigma J(t, t'). \quad (2.4.4)$$

²Převzat z [Šmerda a Křístek(1978)]



Obrázek 2.4.1: Superpozice dotvarování.

Hodnotu funkce dotvarování lze slovně vyjádřit jako deformaci v čase t vyvolanou jednotkovým skokem napětí v čase t' .

Pokud se vlastnosti materiálu v čase nemění, pak funkce dotvarování závisí pouze na čase $t - t'$, jež uplynul od počátku působení napětí do okamžiku, kdy je deformace vyhodnocována. Pro takovýto materiál lze psát

$$J(t, t') = J_0(t - t'). \quad (2.4.5)$$

Naproti tomu beton je příkladem materiálu, jehož vnitřní struktura se v čase mění vlivem chemických procesů, zejména hydratace. V důsledku těchto chemických změn se mění i mechanické vlastnosti betonu a deformace při dotvarování nezávisí jen na době působení betonu, ale také na stáří betonu.

Samotná funkce dotvarování popisuje vývoj deformace způsobené konstantním napětím o velikosti σ aplikovaném v čase t' . Deformace v čase t lze vypočítat dle vztahu (2.4.4). Dojde-li v čase t_1 ke zvýšení napětí z nuly na σ_1 , pak zůstane konstantní a v čase t_2 dojde ke zvýšení napětí na σ_2 a poté zůstává napětí konstantní,

Lze funkci popisující historii zatížení rozložit dle následující rovnice

$$\sigma(t) = \Delta\sigma_1 H(t - t_1) + \Delta\sigma_2 H(t - t_2), \quad (2.4.6)$$

kde H je Heavisidova funkce, která je definována následujícím způsobem

$$H(t) = \begin{cases} 0 & \text{pro } t < 0 \\ 1 & \text{pro } t \geq 0 \end{cases} \quad (2.4.7)$$

Při využití principu superpozice lze zapsat historii deformace následujícím způsobem

$$\varepsilon(t) = \Delta\sigma_1 J(t, t_1) + \Delta\sigma_2 J(t, t_2). \quad (2.4.8)$$

Je-li tato úvaha rozšířena na libovolný počet sčítanců přejde vyjádření (2.4.8) na vyjádření

$$\varepsilon(t) = \sum_{k=1}^n \Delta\sigma_k J(t, t_k). \quad (2.4.9)$$

Pro spojitě diferencovatelnou funkci $\sigma(t)$ přejde vyjádření (2.4.9) limitním přechodem na následující vztah

$$\varepsilon(t) = \int_{t_0}^t J(t, t') \dot{\sigma}(t') dt', \quad (2.4.10)$$

kde t_0 označuje čas, do kdy bylo napětí nulové. Často se stává, že se napětí změní skokově na začátku zatěžování a poté se vyvíjí spojitě. Tomu odpovídá následující vyjádření

$$\varepsilon(t) = J(t, t_0) \sigma_0 + \int_{t_0}^t J(t, t') \dot{\sigma}(t') dt'. \quad (2.4.11)$$

Model B3

Funkce dotvarování pro beton má několik různých formulací. Jednou z těchto formulací je model B3, který bude popsán v této kapitole. Pro popis dotvarování lze použít i následující teorie

- Metoda zpožděné pružnosti
- Metoda stárnutí
- Model GZ
- ACI model
- CEB-FIB model

Autorem modelu B3 je prof. Zdeňek P. Bažant z Northwestern University. Podle zkáceného verze modelu B3 lze funkci dotvarování pro beton přibližně popsat vztahem

$$J(t, t') = \frac{1}{E_0} + q_s \ln \left[1 + \psi \left(t'^{-m} + \alpha \right) \left(t - t' \right)^n \right], \quad (2.4.12)$$

do kterého se časy t a t' dosazují ve dnech a uvažuje se $t \geq t'$. Parametry E_0 , q_s , ψ , m , α a n je vhodné určit tak, aby se teoretická křivka co nejvíce blížila experimentálně zjištěné křivce pro daný typ betonu. Jejich typické hodnoty jsou $\psi = 0.3$, $m = 0.5$, $\alpha = 0.001$ a $n = 0.1$. Za hrubý odhad parametru E_0 , jež zde představuje asymptotický modul pružnosti, lze vzít $E_0 = \frac{E_{28}}{0.6}$, kde E_{28} je konvenční modul pružnosti daného betonu ve stáří 28 dní, a parametr q_s lze odhadnout jako $q_s = \frac{11.4}{E_{28}}$. V anglicky psané literatuře se vzorci (2.4.12) říká "long-double-power law".

Asymptotický modul pružnosti je definován objektivně, pomocí asymptoty grafu funkce poddajnosti v semilogaritmickém měřítku. Jeho hodnota je blízká tzv. dynamickému modulu pružnosti, který se určuje z měření šíření vln v materiálu. V praxi se ale spíše než asymptotický modul pružnosti používá tzv. konvenční modul pružnosti, který se zjišťuje jako počáteční sklon pracovního diagramu určeného testem, při němž se napětí a deformace postupně zvětšují určitou zvolenou rychlostí.

Pro velmi dlouhé doby zatížení se graf funkce poddajnosti v semilogaritmickém měřítku blíží přímce.

Vzhledem k probíhajícím chemickým procesům se mikrostruktura betonu v čase mění, a proto poddajnost závisí nejen na době $t-t'$, po kterou napětí působilo, ale také na počátečním stáří betonu vyjádřeném proměnnou t' .

Podrobnější informace o modelu B3 lze nalézt v knize [Jirásek and Bažant(2001)] a v článku [Bažant and Baweja(1995)].

Kapitola 3

Metoda konečných prvků a programový balík SIFEL

3.1 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků je numerická metoda pro řešení úloh popsaných diferenciálními rovnicemi. Odvození základních rovnic, matic a vektorů může být provedeno v různých směrech. Jednou možností je Galerkinova metoda a druhou je Ritzova metoda. Ritzova metoda je založena na minimalizaci funkcionálu energie. Galerkinova metoda je založena na minimalizaci rezidua.

3.2 Konečné prvky

3.2.1 Prutový konečný prvek

V této kapitole je popsán ohýbaný prutový konečný prvek označovaný v programu MEFEL jako 3dbeam. Tento prvek má v každém uzlu šest stupňů volnosti, jsou to posuny ve směru osy x , osy y , osy z a rotace kolem osy x , osy y a osy z .

Pro aproximaci geometrie je použito lineárních bázových funkcí. Pro aproximaci posunů a rotací jsou použity lineární a kubické bázové funkce. Pro tyto aproximace je vhodné zavést přirozenou souřadnici ξ . Ta zobrazí prvek o délce l na interval $\langle 0; 1 \rangle$. Vyjádření tohoto zobrazení je následující

$$\xi = \frac{x}{l}, \quad (3.2.1)$$

kde l je délka prvku.

Pro aproximaci geometrie jsou použity následující lineární bázové funkce

$$G_1^{(1)} = (1 - \xi) \quad (3.2.2)$$

$$G_2^{(1)} = \xi \quad (3.2.3)$$

Posuny a rotace $\mathbf{u} = (u, v, w, \varphi_x, \varphi_y, \varphi_z)^T$ jsou na ohýbaném prutovém prvku aproximovány z uzlových hodnot $\mathbf{r} = (u_1, v_1, w_1, \varphi_{1x}, \varphi_{1y}, \varphi_{1z}, u_2, v_2, w_2, \varphi_{2x}, \varphi_{2y}, \varphi_{2z})^T$

pomocí báзовých funkcí sestavených do matice \mathbf{N} ve tvaru

$$\mathbf{N}(\xi) = \begin{pmatrix} h_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & h_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_3 & 0 & 0 & 0 & h_4 & 0 & h_5 & 0 & 0 & 0 & h_6 \\ 0 & 0 & h_7 & 0 & h_8 & 0 & 0 & 0 & h_9 & 0 & h_{10} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & h_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & h_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h_{13} & 0 & h_{14} & 0 & 0 & 0 & h_{15} & 0 & h_{16} & 0 \\ 0 & h_{17} & 0 & 0 & 0 & h_{18} & 0 & h_{19} & 0 & 0 & 0 & h_{20} \end{pmatrix} \quad (3.2.4)$$

Bázové funkce h_1 až h_{20} mají tvar

$$h_1 = G_1^{(1)},$$

$$h_2 = G_2^{(1)},$$

$$h_3 = \frac{1}{1 + 2\kappa_z} (1 + 2\kappa_z - 2\kappa_z\xi - 3\xi^2 + 2\xi^3), \quad (3.2.5)$$

$$h_4 = -\frac{1}{1 + 2\kappa_z} (-(1 + \kappa_z)\xi + (2 + \kappa_z)\xi^2 - \xi^3) l, \quad (3.2.6)$$

$$h_5 = \frac{1}{1 + 2\kappa_z} (2\kappa_z\xi + 3\xi^2 - 2\xi^3), \quad (3.2.7)$$

$$h_6 = -\frac{1}{1 + 2\kappa_z} (\kappa_z\xi + (1 - \kappa_z)\xi^2 - \xi^3) l, \quad (3.2.8)$$

$$h_7 = \frac{1}{1 + 2\kappa_y} (1 + 2\kappa_y - 2\kappa_y\xi - 3\xi^2 + 2\xi^3), \quad (3.2.9)$$

$$h_8 = \frac{1}{1 + 2\kappa_y} (-(1 + \kappa_y)\xi + (2 + \kappa_y)\xi^2 - \xi^3) l, \quad (3.2.10)$$

$$h_9 = \frac{1}{1 + 2\kappa_y} (2\kappa_y\xi + 3\xi^2 - 2\xi^3), \quad (3.2.11)$$

$$h_{10} = \frac{1}{1 + 2\kappa_y} (\kappa_y\xi + (1 - \kappa_y)\xi^2 - \xi^3) l, \quad (3.2.12)$$

$$h_{11} = G_1^{(1)},$$

$$h_{12} = G_2^{(1)},$$

$$h_{13} = \frac{1}{1 + 2\kappa_y} (6\xi - 6\xi^2) \frac{1}{l}, \quad (3.2.13)$$

$$h_{14} = \frac{1}{1 + 2\kappa_y} (1 + 2\kappa_y - 2(2 + \kappa_y)\xi + 3\xi^2) , \quad (3.2.14)$$

$$h_{15} = -h_{13} ,$$

$$h_{16} = \frac{1}{1 + 2\kappa_y} (-2(1 - \kappa_y)\xi + 3\xi^2) , \quad (3.2.15)$$

$$h_{17} = -\frac{1}{1 + 2\kappa_y} (6\xi - 6\xi^2) \frac{1}{l} , \quad (3.2.16)$$

$$h_{18} = \frac{1}{1 + 2\kappa_z} (1 + 2\kappa_z - 2(2 + \kappa_z)\xi + 3\xi^2) , \quad (3.2.17)$$

$$h_{19} = -h_{17} ,$$

$$h_{20} = \frac{1}{1 + 2\kappa_y} (-2(1 - \kappa_z)\xi + 3\xi^2) , \quad (3.2.18)$$

kde

$$\kappa_y = \frac{6EI_y}{kGA l^2} , \quad (3.2.19)$$

$$\kappa_z = \frac{6EI_z}{kGA l^2} . \quad (3.2.20)$$

3.2.2 Šestistěnné prostorové prvky

Nejčastěji se používá lineární a kvadratický prvek. Dále bude popsán lineární izoparametrický prvek. Izoparametrický prvek používá stejné bázevé funkce pro aproximaci geometrie i pro aproximaci neznámých. Tento prvek používá lineární bázevé funkce. Interpolační funkce jsou zavedeny pomocí přirozených souřadnic (ξ, η, ζ) . Tyto souřadnice zobrazují skutečné prvky na krychli o hraně 2 $(\langle -1; 1 \rangle \times \langle -1; 1 \rangle \times \langle -1; 1 \rangle)$, viz obr.3.2.1. Bázevé funkce pro osmiuzlový lineární prvek jsou pak defi-

novány následujícími vztahy

$$N_1^{(1)} = \frac{1}{8}(1 + \xi)(1 + \eta)(1 + \zeta), \quad (3.2.21)$$

$$N_2^{(1)} = \frac{1}{8}(1 - \xi)(1 + \eta)(1 + \zeta), \quad (3.2.22)$$

$$N_3^{(1)} = \frac{1}{8}(1 - \xi)(1 - \eta)(1 + \zeta), \quad (3.2.23)$$

$$N_4^{(1)} = \frac{1}{8}(1 + \xi)(1 - \eta)(1 + \zeta), \quad (3.2.24)$$

$$N_5^{(1)} = \frac{1}{8}(1 + \xi)(1 + \eta)(1 - \zeta), \quad (3.2.25)$$

$$N_6^{(1)} = \frac{1}{8}(1 - \xi)(1 + \eta)(1 - \zeta), \quad (3.2.26)$$

$$N_7^{(1)} = \frac{1}{8}(1 - \xi)(1 - \eta)(1 - \zeta), \quad (3.2.27)$$

$$N_8^{(1)} = \frac{1}{8}(1 + \xi)(1 - \eta)(1 - \zeta). \quad (3.2.28)$$

Uzly jsou umístěny ve vrcholech šestistěnu. Každý uzel má tři stupně volnosti. Jsou to posuny ve směru souřadných os x , y a z .

Při výpočtu matice tuhosti je třeba znát derivace bázových funkcí podle souřadnic x , y , z , Jacobiho matici transformace mezi souřadnicovými soustavami (x, y, z) a (ξ, η, ζ)

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial x}{\partial \zeta} & \frac{\partial y}{\partial \zeta} & \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{bmatrix} \quad (3.2.29)$$

a determinant této matice, který se uplatní při transformaci elementárního objemu

$$dxdydz = \det \mathbf{J} d\xi d\eta d\zeta. \quad (3.2.30)$$

Parciální derivace bázových funkcí podle ξ mají tvar

$$\frac{\partial N_1^{(1)}}{\partial \xi} = \frac{1}{8}(1 + \eta)(1 + \zeta), \quad (3.2.31)$$

$$\frac{\partial N_2^{(1)}}{\partial \xi} = -\frac{1}{8}(1 + \eta)(1 + \zeta), \quad (3.2.32)$$

$$\frac{\partial N_3^{(1)}}{\partial \xi} = -\frac{1}{8}(1 - \eta)(1 + \zeta), \quad (3.2.33)$$

$$\frac{\partial N_4^{(1)}}{\partial \xi} = \frac{1}{8}(1 - \eta)(1 + \zeta), \quad (3.2.34)$$

$$\frac{\partial N_5^{(1)}}{\partial \xi} = \frac{1}{8}(1 + \eta)(1 - \zeta), \quad (3.2.35)$$

$$\frac{\partial N_6^{(1)}}{\partial \xi} = -\frac{1}{8}(1 + \eta)(1 - \zeta), \quad (3.2.36)$$

$$\frac{\partial N_7^{(1)}}{\partial \xi} = -\frac{1}{8}(1 - \eta)(1 - \zeta), \quad (3.2.37)$$

$$\frac{\partial N_8^{(1)}}{\partial \xi} = \frac{1}{8}(1 - \eta)(1 - \zeta). \quad (3.2.38)$$

Parciální derivace bázových funkcí podle η mají tvar

$$\frac{\partial N_1^{(1)}}{\partial \eta} = \frac{1}{8}(1 + \xi)(1 + \zeta), \quad (3.2.39)$$

$$\frac{\partial N_2^{(1)}}{\partial \eta} = \frac{1}{8}(1 - \xi)(1 + \zeta), \quad (3.2.40)$$

$$\frac{\partial N_3^{(1)}}{\partial \eta} = -\frac{1}{8}(1 - \xi)(1 + \zeta), \quad (3.2.41)$$

$$\frac{\partial N_4^{(1)}}{\partial \eta} = -\frac{1}{8}(1 + \xi)(1 + \zeta), \quad (3.2.42)$$

$$\frac{\partial N_5^{(1)}}{\partial \eta} = \frac{1}{8}(1 + \xi)(1 - \zeta), \quad (3.2.43)$$

$$\frac{\partial N_6^{(1)}}{\partial \eta} = \frac{1}{8}(1 - \xi)(1 - \zeta), \quad (3.2.44)$$

$$\frac{\partial N_7^{(1)}}{\partial \eta} = -\frac{1}{8}(1 - \xi)(1 - \zeta), \quad (3.2.45)$$

$$\frac{\partial N_8^{(1)}}{\partial \eta} = -\frac{1}{8}(1 + \xi)(1 - \zeta). \quad (3.2.46)$$

Parciální derivace bázových funkcí podle ζ mají tvar

$$\frac{\partial N_1^{(1)}}{\partial \zeta} = \frac{1}{8}(1 + \xi)(1 + \eta), \quad (3.2.47)$$

$$\frac{\partial N_2^{(1)}}{\partial \zeta} = \frac{1}{8}(1 - \xi)(1 + \eta), \quad (3.2.48)$$

$$\frac{\partial N_3^{(1)}}{\partial \zeta} = \frac{1}{8}(1 - \xi)(1 - \eta), \quad (3.2.49)$$

$$\frac{\partial N_4^{(1)}}{\partial \zeta} = \frac{1}{8}(1 + \xi)(1 - \eta), \quad (3.2.50)$$

$$\frac{\partial N_5^{(1)}}{\partial \zeta} = -\frac{1}{8}(1 + \xi)(1 + \eta), \quad (3.2.51)$$

$$\frac{\partial N_6^{(1)}}{\partial \zeta} = -\frac{1}{8}(1 - \xi)(1 + \eta), \quad (3.2.52)$$

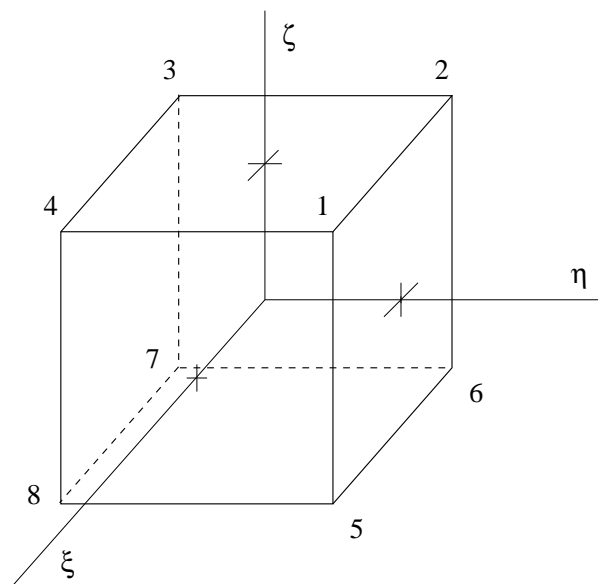
$$\frac{\partial N_7^{(1)}}{\partial \zeta} = -\frac{1}{8}(1 - \xi)(1 - \eta), \quad (3.2.53)$$

$$\frac{\partial N_8^{(1)}}{\partial \zeta} = -\frac{1}{8}(1 + \xi)(1 - \eta). \quad (3.2.54)$$

3.3 Programový balík SIFEL

3.3.1 Úvod

SIFEL (Simple Finite Element) je otevřený programový balík vyvíjený na katedře mechaniky FSv ČVUT. Používá se při řešení mechanických, transportních a sdružených transportně-mechanických úloh. Je psán v jazyce C a volně dostupný



Obrázek 3.2.1: Lineární prostorový šestistěnný prvek.

na adrese <http://cml.fsv.cvut.cz/~sifel>. Dále bude popsána pouze část programu označovaná jako MEFEL sloužící k řešení úloh mechaniky.

3.3.2 MEFEL

Otevřený program MEFEL vyvíjený na katedře mechaniky FSv ČVUT slouží k výpočtům úloh mechaniky pevné fáze metodu konečných prvků. Program lze použít pro řešení lineární statiky, dynamiky (vlastního i vynuceného kmitání), materiálově nelineární statiky, dotvarování, úloh s měnícím se počtem prvků a neznámých.

Program je schopen řešit úlohy deterministicky, stochasticky nebo pomocí fuzzy přístupů.

V programu je k dispozici asi 40 konečných prvků od tyčí až po prostorové prvky a asi 80 materiálových modelů. Materiálové modely mohou být lokální nebo

nelokální. Jde o materiálové modely elasticity, plasticity, poškození, dotvarování.

3.3.3 Implementace dotvarování v MEFELu

Dotvarování betonu se řídí Boltzmanovým principem superpozice, kde je vyjádřena deformace v závislosti na napětí integrální rovnicí

$$\varepsilon(t) = J(t, t_0) \sigma(t_0) + \int_{t_0}^t J(t, \tau) \dot{\sigma}(\tau) dt + \varepsilon_0(t). \quad (3.3.1)$$

Člen ε_0 zde zastupuje jiné deformace než od napětí (např. od smršťování, teplotní deformace atp.). Obvyklá integrální formulace není pro numerické řešení pomocí počítače příliš vhodná, neboť vyžaduje uchovávat informace o stavu napětí a deformace ze všech předchozích časových kroků. Z tohoto pohledu je vhodnější převést integrální konstitutivní vztah na diferenciální rovnici. To je možné, pokud je funkce dotvarování J vyjádřená ve formě degenerovaných Dirichletových - Pronyho řad.

$$J(t, \tau) = \sum_{\mu=1}^M \frac{1}{D_{\mu}(\tau)} \{1 - \exp[y_{\mu}(\tau) - y_{\mu}(t)]\}, \quad (3.3.2)$$

kde $y_{\mu}(\tau) = \left(\frac{t}{\tau_{\mu}}\right)^{q_{\mu}}$ a $q_{\mu} = \frac{2}{3}$. Koeficienty τ_{μ} se nazývají retardační časy. Funkce $D_{\mu}(\tau)$ mohou být pro dané vyjádření funkce $J(t, \tau)$ získány na základě naměřených dat, např. metodou nejmenších čtverců.

3.3.4 Implementace B3 modelu v MEFELu

Jako velmi efektivní přístup pro řešení dotvarování pomocí modelu B3 se jeví přístup, který uplatňuje spojitý Kelvinův reologický model s nekonečně mnoha členy řetězce odpovídajícími nekonečně blízkým časům [Bažant and Y.Xi(1995)]. Základní funkce

dotvarování modelu B3 je logaritmicko-mocninná funkce času

$$J(t, t') = q_1 + C(\xi), \quad (3.3.3)$$

kde

$$C(\xi) = q_2 + \ln \left[1 + \left(\frac{\xi}{\lambda_0} \right) \right], \quad (3.3.4)$$

s parametry q_2 , $\lambda_0 = 1$ a n , předepsané ve formě Dirichletových řad

Po úpravách přejde vyjádření (3.3.4) na tvar

$$C(\xi) = \sum_{\mu}^M L(\tau_{\mu}) \left[1 - \exp \left(\frac{-\xi}{\tau_{\mu}} \right) \right] \ln 10 \Delta(\log \tau_{\mu}), \quad (3.3.5)$$

kde $L(\tau_{\mu})$ je rovno časovému intervalu dvou sousedních členů Kelvinova řetězce v logaritmickém měřítku [Bažant and Y.Xi(1995)]. Podrobnější odvození funkce $C(\xi)$ je uvedeno v dílčí výzkumné zprávě [Krejčí a Koudelka(2006)].

Významným přínosem spojitého retardačního modelu pro počítačové simulace je podstatné zrychlení výpočtu.

3.3.5 Implementace simulace postupné výstavby konstrukce v MEFELu

Modelování postupné výstavby konstrukcí je v programu MEFEL zajištěno pomocí tzv. časových funkcí. Každý stupeň volnosti a každý konečný prvek má přiřazenu časovou funkci, která rozhoduje o zapnutí či vypnutí příslušné entity v požadovaném čase. Je-li hodnota časové funkce rovna nule, je entita vypnutá. Je-li hodnota časové funkce kladná, je entita zapnutá. V každém časovém kroku se zjišťuje, zda-li nedošlo k vypnutí nebo zapnutí nějakého stupně volnosti nebo prvku. Pokud došlo k nějaké

změně, musejí se získané výsledky uložit, přegenerovat kódová čísla (čísla neznámých), přéalokovat matice a vektory a namapovat uložené výsledky na nový stav problému. Pro účely grafického zobrazení výsledků je možné vložit pomocný krok sloužící k odstranění nespojitosti v řešení.

nastavení retardačních časů	τ_μ , kde $\mu \in \{1, 2, \dots, 7\}$
počáteční hodnoty	$\gamma_\mu(0) = 0, \sigma(0) = 0, \varepsilon(0) = 0, \mathbf{u}(0) = 0$
Iterace	
přírůstek zatížení	$\Delta \mathbf{R}^f$
přírůstek deformace	$\Delta \bar{\varepsilon} = \sum_{\mu=1}^M \gamma_\mu(t_{i-1}) (1 - \exp(-\Delta y_\mu))$
výpočet sil	$\Delta \mathbf{R}^c(\Delta \bar{\varepsilon})$
koeficienty Dirichletových řetězců	$D_\mu(t_{(i+1/2)})$ z funkce dotvarování $J(t, t_{(i+1/2)})$
sestavení matice tuhosti	\mathbf{K} $\Delta \sigma_i = \overline{E\mathbf{D}} (\Delta \varepsilon_i - \overline{\Delta \varepsilon}_i - \Delta \varepsilon_{(0i)})$ $\frac{1}{\overline{E}} = \sum_{\mu=1}^M \frac{1-\lambda_\mu}{C_\mu(t_{(i+1/2)})}$
přírůstek	$\mathbf{K}\Delta \mathbf{u}_i = \Delta \mathbf{R}^f + \Delta \mathbf{R}^c$
přírůstek deformace	$\Delta \varepsilon_i = \mathbf{B}\Delta \mathbf{u}_i$
přírůstek napětí	$\Delta \sigma_i = \overline{E\mathbf{D}} (\Delta \varepsilon_i - \overline{\Delta \varepsilon}_i - \Delta \varepsilon_{(0i)})$
vnitřní hodnoty	$\gamma_\mu(t_i) = \gamma_\mu(t_{i-1}) \exp(-\Delta y_\mu) + \frac{\overline{C}}{D_\mu(t_{(i+1/2)})} \frac{1-\exp(-\Delta y_\mu)}{\Delta y_\mu} \Delta \sigma_i$

Tabulka 3.3.1: Iterační proces výpočtu dotvarování.

Kapitola 4

Popis konstrukce a technologie výstavby

4.1 Úvod

Most se bude nacházet na budované dálnici D47 Brno - Ostrava v úseku u měst Lipník nad Bečvou a Běloutín. Dálnice D47 je v tomto místě budována jako šesti-proudá.

Most je rozdělen na pravou a levou část. Tyto části jsou zcela samostatné, jde tedy o dva samostatné mosty. Na obou mostech se nacházejí tři jízdní pruhy o šířce 3,75 m a odstavný pruh o šířce 2,5 m. Most má 10 polí, první a desáté pole má rozpětí 25 m a druhé až deváté pole má rozpětí 32 m (viz obr. 4.2.3). Celková délka mostu je tedy 306 m.

4.2 Popis mostní konstrukce

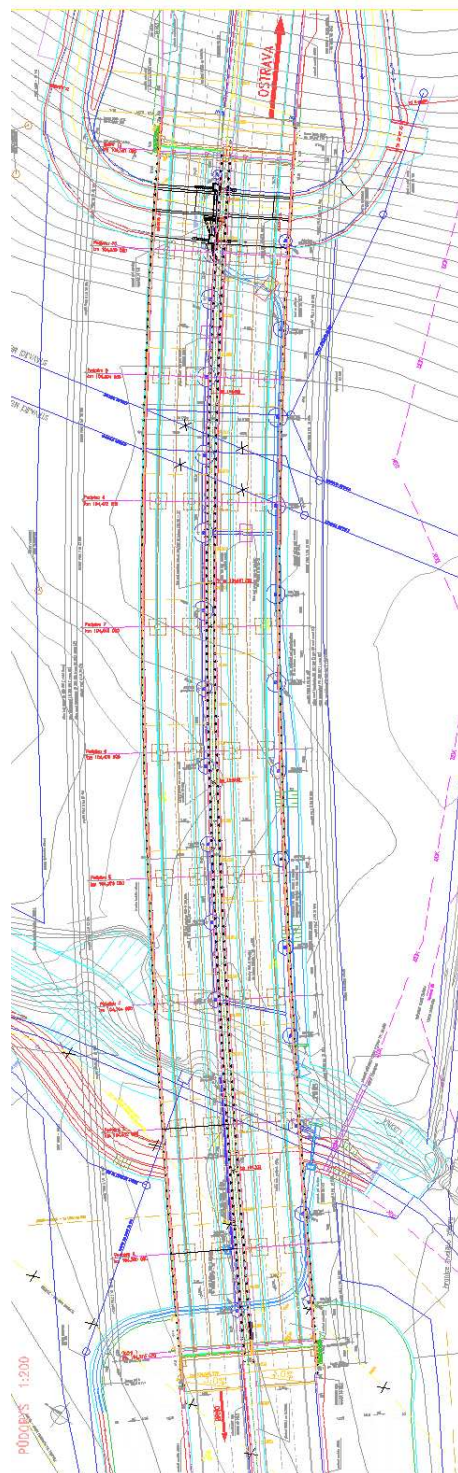
Mostní konstrukce je z betonu třídy C30/37 a je dodatečně předpínaná. Podélné předpětí tvoří 15 ks lan Dywidag 15,7 mm St1570/1770 v jednom kanálku a příčné předpětí 4 ks lan Dywidag 15,7 mm St1570/1770 v jednom kanálku (viz. obr. 4.2.4). V podélném směru je konstrukce definována jako spojitý nosník. V příčném řezu je most definovaný jako dvoutrámový most s deskou (viz kap. 2.2) o šířce 17,1 m. Tvar trámu je lichoběžníkový s výškou 2,1 m a spodní šířkou 1,2 m. Poměr výšky a šířky trámu je 1,75. Tloušťka desky je na okraji a uprostřed mostu 0,35 metru, směrem k trámu se zvyšuje až na 0,45 metru. Příčný řez mostu je vyobrazen na obr. 4.2.2, podélný řez je na obr. 4.2.3. Na obr. 4.2.5¹ je dolní pohled na mostní konstrukci, jež se nachází u města Chomutov, a je typově shodná s mostní konstrukcí SO220. Na obr. 4.2.6² je zachycen styk dvou částí mostní konstrukce rozdílného stáří. V těchto místech je navržena skruž pro betonování dalšího pole.

Konečněprvkový model mostní konstrukce a jeho popis je uveden v kapitole 5.3.1.

¹zdroj: Ing. Martin Kulhavý, Ph.D. firma METROSTAV a.s.

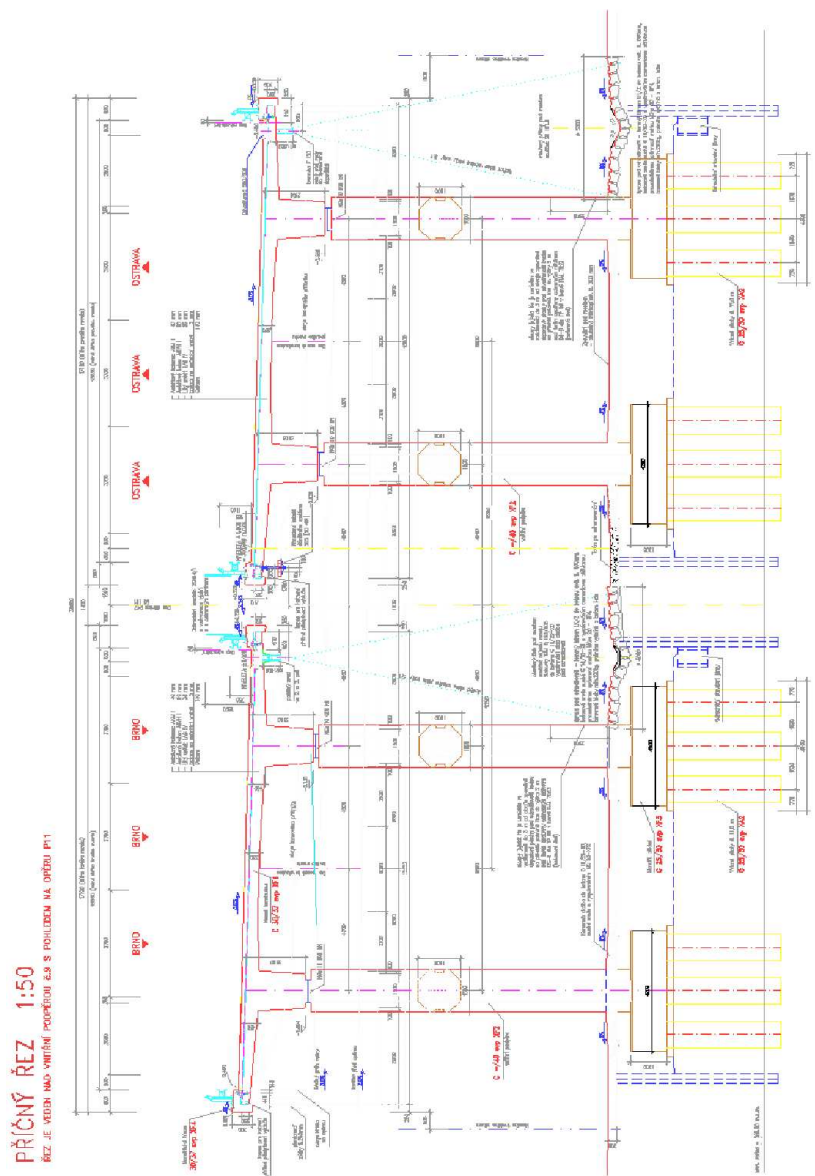
²zdroj: Ing. Martin Kulhavý, Ph.D. firma METROSTAV a.s.

KAPITOLA 4. POPIS KONSTRUKCE A TECHNOLOGIE VÝSTAVBY 29



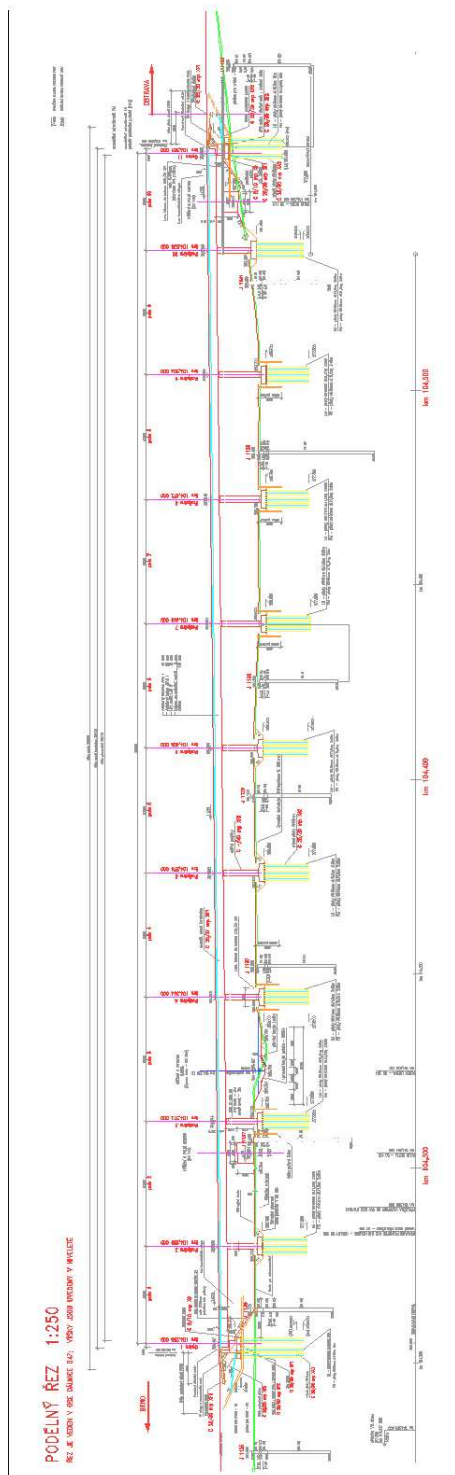
Obrázek 4.2.1: Půdorys mostu.

KAPITOLA 4. POPIS KONSTRUKCE A TECHNOLOGIE VÝSTAVBY 30



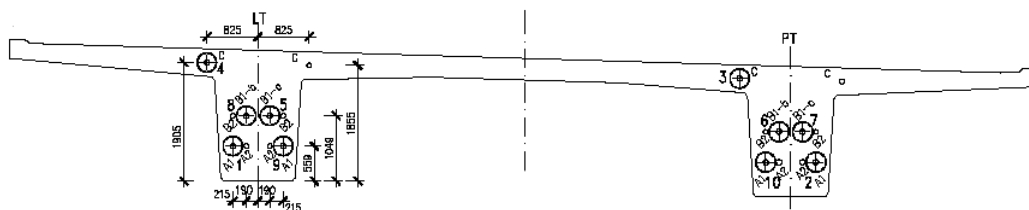
Obrázek 4.2.2: Příčný řez mostu.

KAPITOLA 4. POPIS KONSTRUKCE A TECHNOLOGIE VÝSTAVBY 31



Obrázek 4.2.3: Podélný řez mostu.

KAPITOLA 4. POPIS KONSTRUKCE A TECHNOLOGIE VÝSTAVBY 32

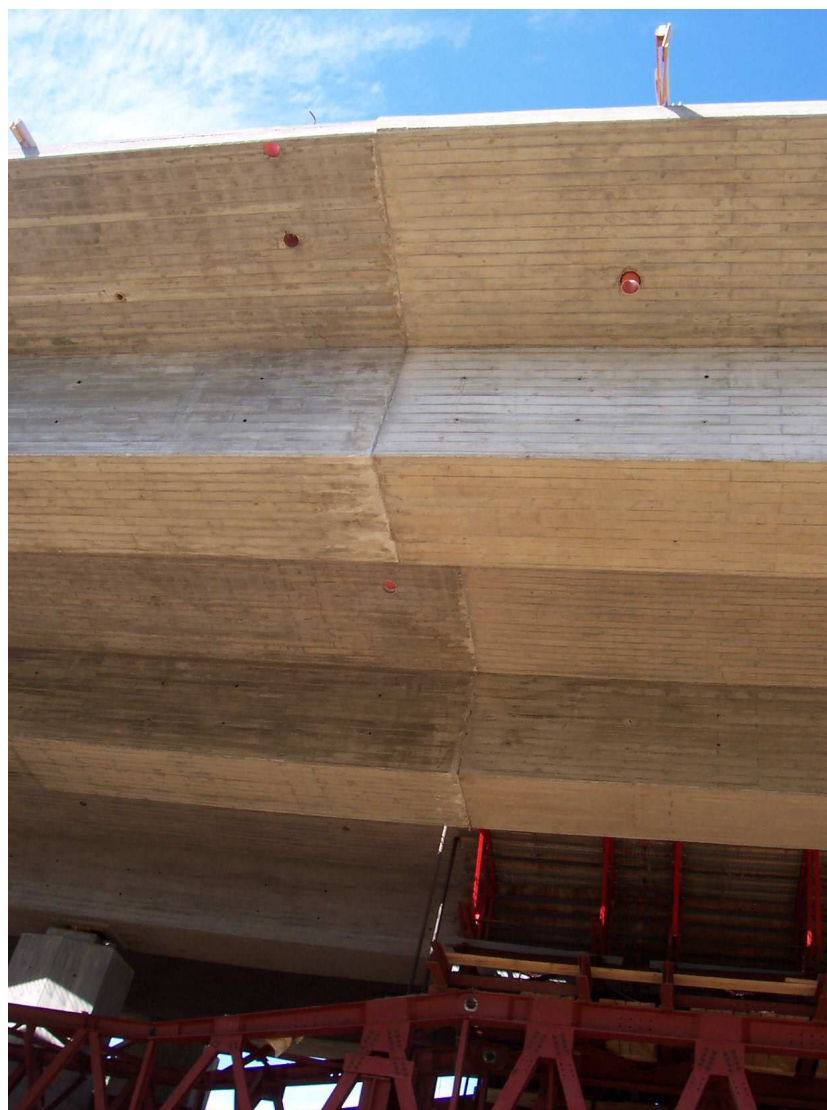


Obrázek 4.2.4: Příčný řez mostu - poloha kanálků pro předpínací kabely.



Obrázek 4.2.5: Dolní pohled na mostní konstrukci.

KAPITOLA 4. POPIS KONSTRUKCE A TECHNOLOGIE VÝSTAVBY 33



Obrázek 4.2.6: Pohled na styk dvou částí mostní konstrukce různého stáří.

4.3 Konstrukce skruže

Přesuvná skruž (viz obr. 4.3.4) se skládá v příčném směru ze tří podélných ocelových příhradových nosníků. Tyto nosníky jsou spojeny příčnickami ve tvaru rámu. Jednotlivé příhradové nosníky jsou ještě rozděleny na části pro snadnější manipulaci při transportu. Skládají se z hlavního nosníku (viz obr. 4.3.5), redukce a nosu pro vysouvání (viz obr. 4.3.6). Průřezové charakteristiky částí hlavního nosníku skruže jsou uvedeny v tab. 4.3.1. Boční pohled na konstrukci hlavního nosníku je na obr. 4.3.1, horní a dolní pohled jsou na obr. 4.3.2 a 4.3.3.

Skruž je zavěšena na konzole mostu o délce 8 metrů, jež byla vybetonována v předchozím taktu (viz kapitola 4.4 a obr. 4.3.7, obr. 4.3.8) pomocí předpínacího lisu a předpínacích tyčí. Dále je podepřena u následujícího pilíře zařízením, jež současně slouží pro vedení přesouvané skruže (viz obr. 4.3.5).

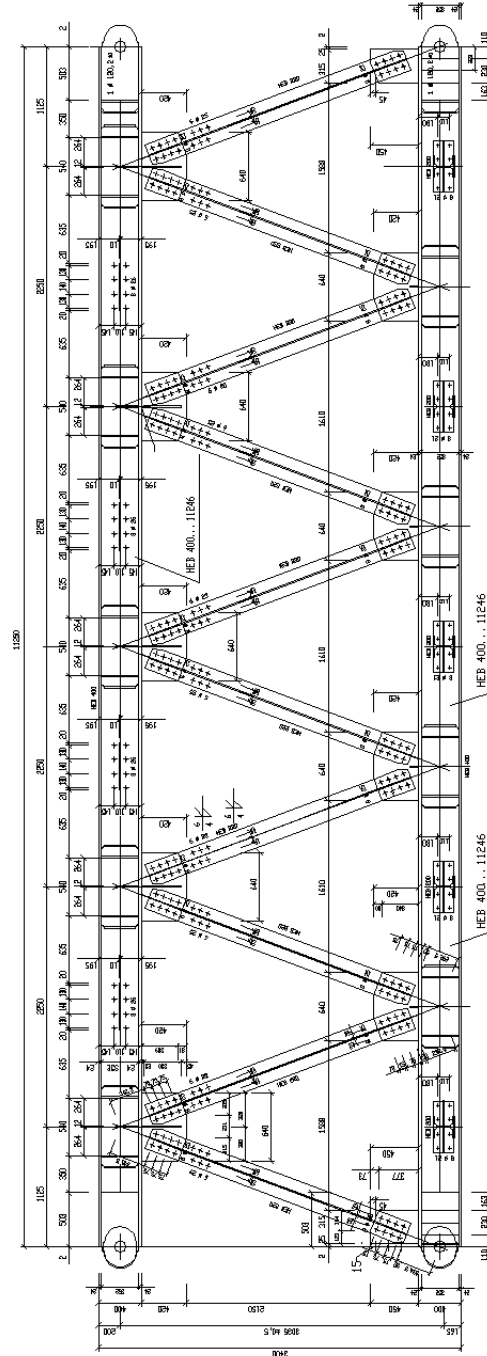
Konečněprvkový model skruže a jeho popis je uveden v kapitole 5.3.2.

KAPITOLA 4. POPIS KONSTRUKCE A TECHNOLOGIE VÝSTAVBY 35

Prvek	Průřez	Plocha [mm ²] 10 ³	I_x [mm ⁴] 10 ⁶	I_y [mm ⁴] 10 ⁶	I_z [mm ⁴] 10 ⁶
Diagonála	HEB 220	9.104	109.34	80.91	28.43
Příčník	IPE 450	9.882	354.16	337.4	16.7
Vzpěra	Trubka 102x10	2.89	6.18806	3.09403	3.09403
Dolní pas	HEB 400	19.78	685	576.8	108.2
Horní pas	HEB 400	19.78	685	576.8	108.2
Kolejnička	HEB 200	7.808	76.99	56.96	20.03
Dolní příčník	HEB 200	7.808	76.99	56.96	20.03
Výplň dolního pasu	U 140	2.04	6.677	0.627	6.05
Výplň dolního pasu	U 140	2.04	6.677	0.627	6.05
Výplň horního pasu	L 120x12	2.705	7.36	3.68	3.68
Výplň horního pasu	L 120x12	2.705	7.36	3.68	3.68

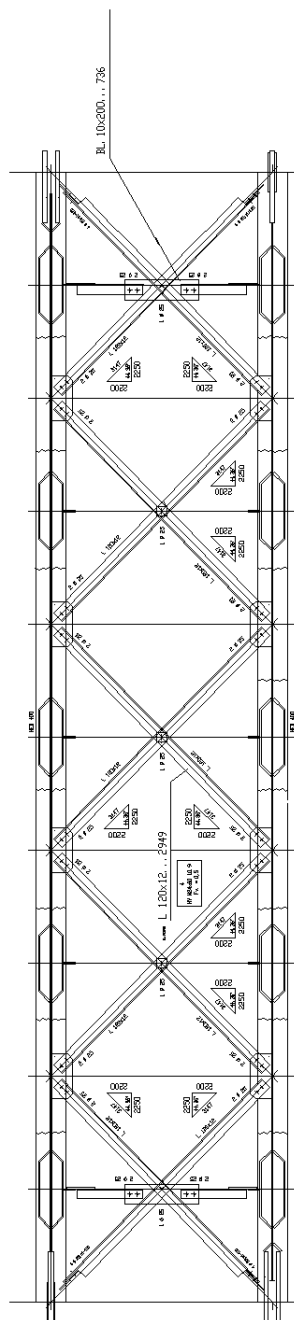
Tabulka 4.3.1: Průřezové charakteristiky částí přesuvné skruže.

KAPITOLA 4. POPIS KONSTRUKCE A TECHNOLOGIE VÝSTAVBY 36



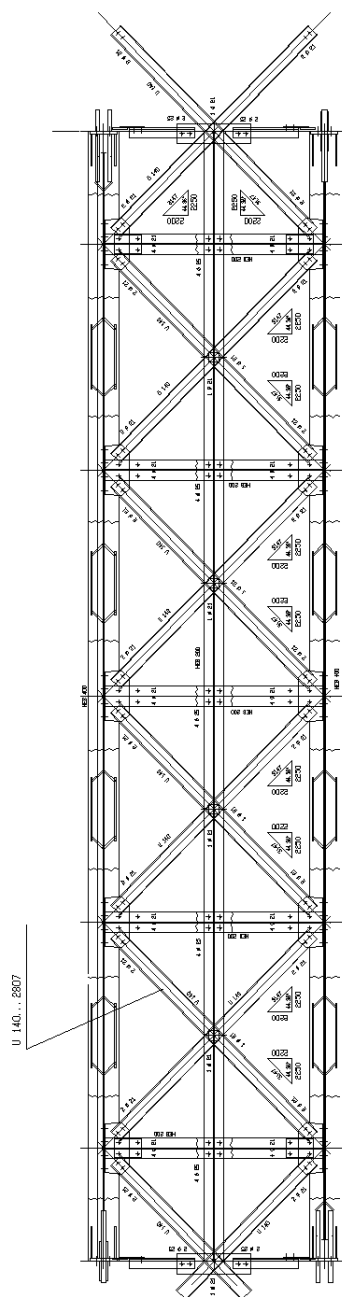
Obrázek 4.3.1: Přesuvná skruž - boční pohled.

KAPITOLA 4. POPIS KONSTRUKCE A TECHNOLOGIE VÝSTAVBY 37



Obrázek 4.3.2: Přesuvná skruž - vrchní pohled.

KAPITOLA 4. POPIS KONSTRUKCE A TECHNOLOGIE VÝSTAVBY 38



Obrázek 4.3.3: Přesuvná skruž - spodní pohled.

KAPITOLA 4. POPIS KONSTRUKCE A TECHNOLOGIE VÝSTAVBY 39



Obrázek 4.3.4: Přesuvná skruž - pohled na konstrukci.



Obrázek 4.3.5: Přesuvná skruž - pohled na hlavní nosník.

KAPITOLA 4. POPIS KONSTRUKCE A TECHNOLOGIE VÝSTAVBY 40



Obrázek 4.3.6: Přesuvná skruž - pohled na výsuvný nos.



Obrázek 4.3.7: Přesuvná skruž - pohled na redukci a závěsné tyče.

KAPITOLA 4. POPIS KONSTRUKCE A TECHNOLOGIE VÝSTAVBY 41



Obrázek 4.3.8: Přesuvná skruž - pohled na umístění lisu na mostní konstrukci.



Obrázek 4.3.9: Přesuvná skruž - pohled na uložení skruže u pilířů.

4.4 Popis technologie výstavby

Most bude betonován na přesuvné skruži (viz. kap. 2.3 a kap. 4.3), postupně od pole číslo 1 k poli číslo 10 a zpět v druhém směru. Betonáž je prováděna směrem od pilíře, resp. konzoly k předchozímu taktu v následujících etapách - trámy po 0,5 m, po vybetonování trámů je betonována deska. Jeden takt je vybetonován za jeden den. Jeden takt mostu je stavěn 15 dní. Časový harmonogram jednoho taktu je uveden v tab. 4.4.1. Činnosti jsou prováděny přesně tak, jak jsou za sebou řazeny v tabulce.

Pořadí	Činnost	Délka trvání [den]
1	Přesun skruže	2
2	Urovnání bednění	2
3	Armování včetně kanálků	5
4	Betonáž	1
5	Technologická pauza	3
6	Předpínání včetně injektáže	2

Tabulka 4.4.1: Časový postup při budování jednoho taktu.

Kapitola 5

Popis modelování

5.1 Úvod

Vzhledem k zadání diplomové práce a požadavkům firmy METROSTAV byl zvolen následující postup při sestavení modelu konstrukce a jejího chování. Základním problémem je postup výstavby mostní konstrukce na přesuvné skruži. V prvním taktu je vybetonováno první pole a část pole druhého. Jedná se vlastně o převislý konec prvního pole zasahujícího přibližně do čtvrtiny druhého pole. V druhém taktu se dobetonuje druhé pole a přibližně čtvrtina třetího pole. Další postup je podobný. V současné době je každé pole vybetonováno do bednění uloženého na ocelové skruži. Skruž je na jedné straně připevněna na převislé konce, na druhé straně je připevněna na pilíře mostní konstrukce.

Problém spočívá v připevnění skruže na převislé konce z předchozích taktů. V době těsně po vybetonování nového pole působí skruž na převislý konec přibližně silou 78.64 kN na m šířky mostu. Ta má značný vliv na dotvarování části konstrukce vybetonované a předepnuté v předchozích taktech. Vzhledem k příčnému

řezu mostovky i skruže byl zvolen prostorový model, aby bylo možné vystihnout chování konstrukce i v příčném směru. Mostovka byla modelována třírozměrnými šestistěnnými prvky a skruž byla modelována třírozměrnými prutovými ohýbanými prvky.

Postupná výstavba značně ovlivňuje chování celé konstrukce, protože jednotlivé části jsou různého stáří a jsou zatíženy různou dobu. Změnu statického schématu v průběhu času je tedy nutné vzít v úvahu. V použitém programu ME-FEL se vymodeluje výsledný stav, tedy celá mostovka i celá skruž (od jednoho konce mostu na druhý). Každému konečnému prvku a uzlu sítě se přiřadí tzv. časová funkce. Časové funkce zajišťují zapínání a vypínání prvků, nebo uzlů.

Kromě stávající technologie výstavby byla uvažována a modelována i mírně upravená technologie výstavby. Úprava spočívá v tom, že skruž není připevňována na převislé konce, ale až na pilíře mostu. V této verzi je sice skruž delší než v používané technologii, ale síly ze skruže jsou přenášeny přímo do pilíře a ne na převislé konce polí mostu. I v tomto případě je třeba vzít v úvahu změnu statického schématu. V programu se docílí opět pomocí tzv. časových funkcí.

Pro lepší představu byla konstrukce též modelována bez postupné výstavby. V tomto případě byl čas vybetonování mostovky, podélného předpětí a příčného předpětí určen časem vybetonování a předeprnutí prvního pole mostu. V modelu bez výstavby nebyla brána skruž vůbec v úvahu.

5.2 Materiálové parametry použité pro výpočet

Pro betonovou mostovku byly použity následující materiálové charakteristiky

- Modul pružnosti betonu $E = 30$ GPa,

- Stáří betonu při zatížení 3 dny.

Pro ocelovou skruž byla použita následující materiálová charakteristika

- Modul pružnosti $E = 210$ GPa.

5.3 Modely mostu a skruže konečnými prvky

Pro generování konečných prvků pro mostní konstrukci a skruž byl použit program T3D (viz dodatek A.1). Pro vykreslení výsledků diskretizace mostní konstrukce a skruže byl použit program GiD (viz dodatek A), jež byl též použit pro postprocessing výpočtu.

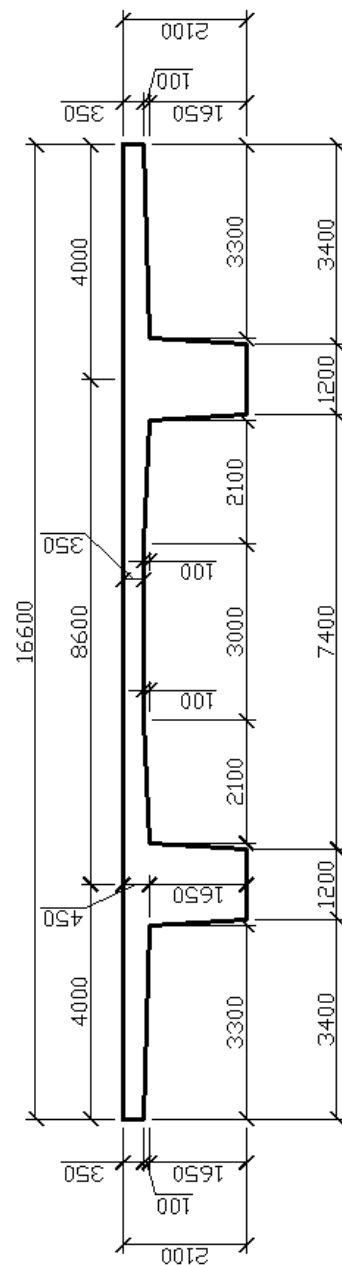
5.3.1 Mostní konstrukce

Pro účely modelování a simulace postupné výstavby byl příčný řez mostní konstrukce (viz obr. 4.2.2) upraven na tvar, jež je na obr. 5.3.1. Dále byly též mírně změněny rozměry jednotlivých polí mostní konstrukce. První a poslední pole o délce 25 metrů bylo změněno na délku 24,75 metru a druhé až deváté pole o délce 32 metrů na délku 31,5 metru. K tomuto kroku bylo přistoupeno pro snadnější spojení modelů mostní konstrukce a skruže. Vrcholy diagonál skruže jsou totiž po 2,25 m (viz obr. 5.3.6) a nová rozpětí jsou tímto číslem dělitelná. Tímto krokem bylo zajištěno styčnickové zatížení konstrukce skruže.

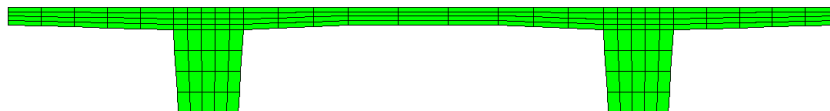
Pro výpočet byly použity lineární prostorové šestistěnné prvky (viz kap. 3.2.2). Diskretizace příčného řezu na konečné prvky je následovná (viz obr. 5.3.2). Deska mostu je po výšce dělena na 4 elementy a po šířce na 29 prvků. Trám je po šířce

dělen na 5 prvků a po výšce na 4 prvky. Velikost jednoho konečného prvku ve směru osy x je 2,25 m (viz výše zmíněný důvod). Na obr. 5.3.2 až 5.3.5 je zobrazena diskretizace na prostorové šestistěnné prvky. Vstupní soubor pro program T3D je umístěn na příloženém CDROMu. Popis spuštění programu je umístěn v dodatku A.

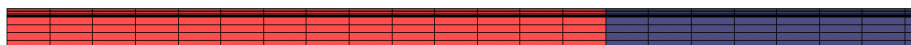
Diskretizovaný model mostní konstrukce má 26 730 uzlů a 20 904 šestistěnných prostorových prvků.



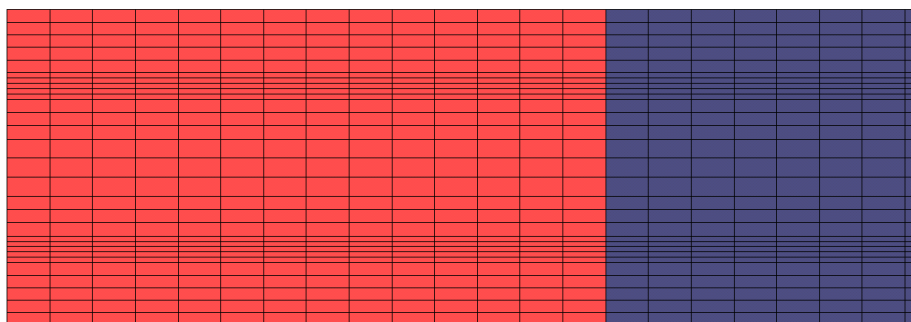
Obrázek 5.3.1: Příčný řez mostní konstrukce použitý pro tvorbu MKP modelu.



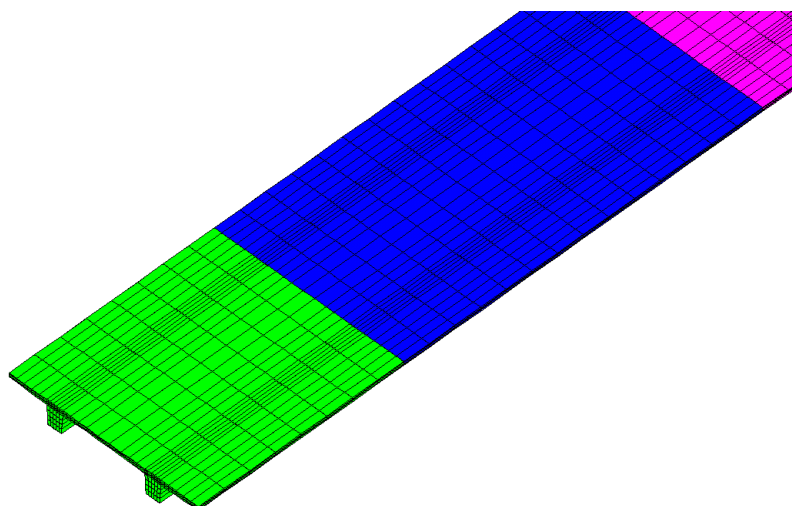
Obrázek 5.3.2: Diskretizovaný příčný řez mostní konstrukce.



Obrázek 5.3.3: Diskretizovaný podélný řez části mostní konstrukce.



Obrázek 5.3.4: Horní pohled na část diskretizované mostní konstrukce.



Obrázek 5.3.5: Izometrický pohled na část diskretizované mostní konstrukce.

5.3.2 Skruž

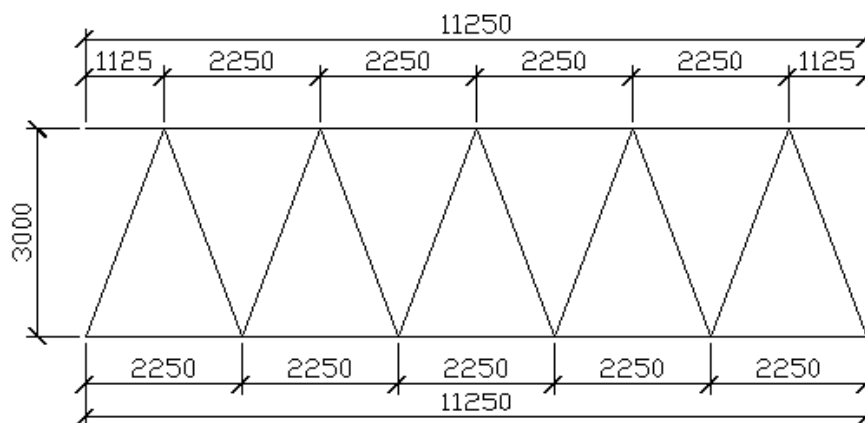
Přesuvná skruž byla modelována pod celou mostní konstrukcí. Z přesuvné skruže byl modelován pouze hlavní nosník. Ten je důležitý pro přenos zatížení od bednění s vybetonovaným polem mostu do podpor. Nos pro vysouvání a redukce nebyly modelovány. Nos slouží pouze pro vysouvání skruže na další takt a neplní žádnou nosnou funkci. Lze prohlásit, že nese pouze sám sebe. Do modelu by mohl být zahrnut působením osamělých sil a momentů v konci hlavního nosníku.

Model hlavního nosníku skruže byl modelován prutovými konečnými prvky označovanými v programu MEFEL jako beam3d (popis viz kap. 3.2.1). Konstrukce skruže byla pro účely modelování zjednodušena viz obr. 5.3.6, obr. 5.3.7 a obr. 5.3.8. Půřezové charakteristiky prutů byly uvedeny v tab. 4.3.1.

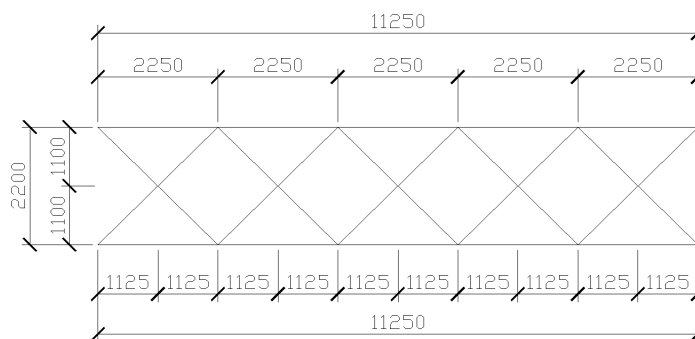
Rámové příčníky byly modelovány jako jeden příčník ve vrcholu diagonál hlavního nosníku. Jako vzpěry bednění byly použity v jednom příčném řezu čtyři svislé pruty (viz obr. 5.3.9).

Diskretizace skruže byla provedena tak, že jeden konečný prvek odpovídá jednomu prutu skruže. Pouze na příčníku v oblasti trámu byla diskretizace na konečné prvky volena ve shodě s diskretizací trámu (viz obr. 5.3.13). Na obr. 5.3.9 až 5.3.12 je zobrazena diskretizace na konečné prutové prvky. Vstupní soubor pro program T3D je umístěn na příloženém CDROMu. Popis spuštění programu je umístěn v dodatku A.

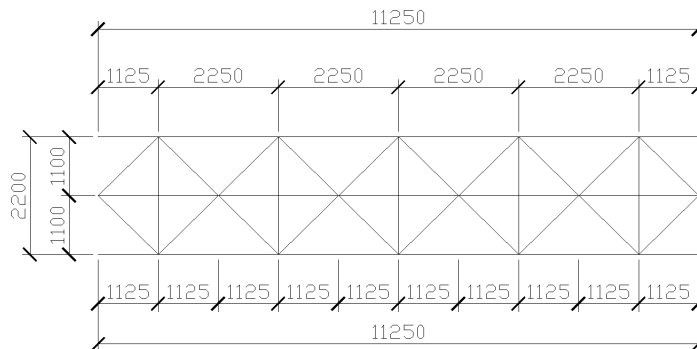
Diskretizovaný model skruže má 6 900 uzlů a 14 040 prutových konečných prvků.



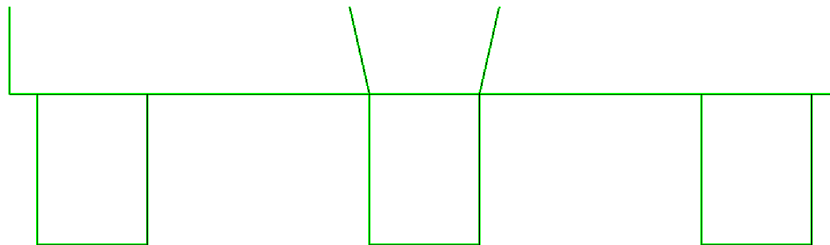
Obrázek 5.3.6: Boční pohled na hlavní nosník skruže použitého pro tvorbu MKP modelu.



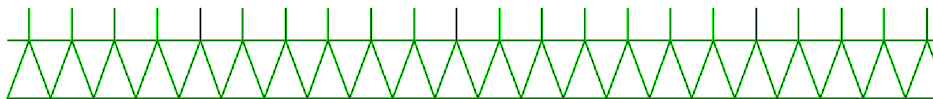
Obrázek 5.3.7: Horní pohled na hlavní nosník skruže použitého pro tvorbu MKP modelu.



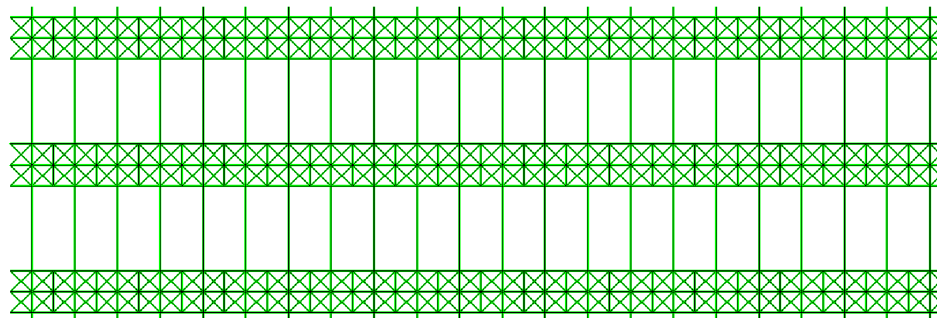
Obrázek 5.3.8: Dolní pohled na hlavní nosník skruže použitého pro tvorbu MKP modelu.



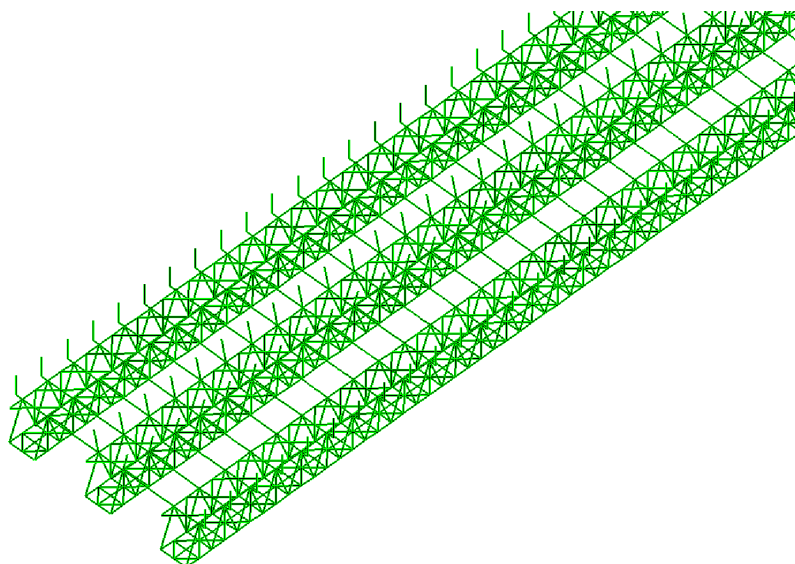
Obrázek 5.3.9: Diskretizovaný příčný řez skruže.



Obrázek 5.3.10: Diskretizovaný podélný řez části skruže.



Obrázek 5.3.11: Horní pohled na část diskretizované skruže.

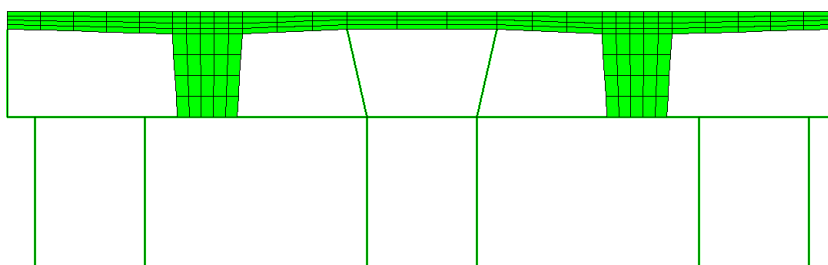


Obrázek 5.3.12: Izometrický pohled na část diskretizované skruže.

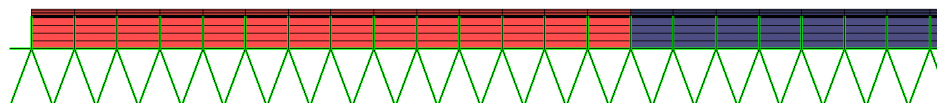
5.3.3 Celkový model mostní konstrukce a skruže

Celkový model skruže byl získán spojením konečněprvkového modelu mostní konstrukce a konečněprvkového modelu skruže. Tento model byl získán pomocí programu verze2, respektive verze1. Tyto programy jsou umístěny na přiloženém CD-ROMu. Jejich popis je v dodatku A.

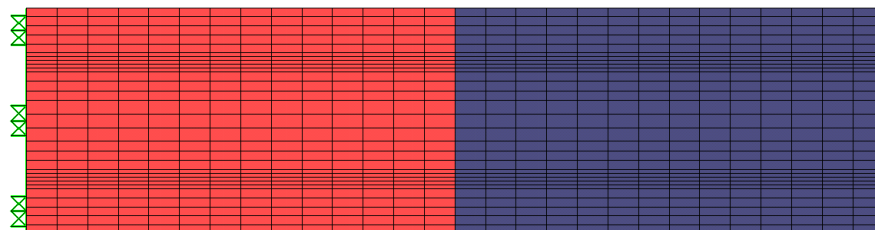
Celový model skruže a mostní konstrukce má 33 630 uzlů a 34 944 konečněprvkových elementů, z čehož 14 040 elementů je prutových prvků a 20 904 je šestistěnných prostorových prvků. Jako první jsou v celkové síti očíslovány uzly prutových prvků (1 - 6 900) a jako druzí jsou očíslovány uzly šestistěnných prostorových prvků (6 901 - 33 630). Jako první jsou v celkové síti očíslovány prutové prvky (1 - 14 040) a jako druzí jsou očíslovány šestistěnné prostorové prvky (14 041 - 34 944).



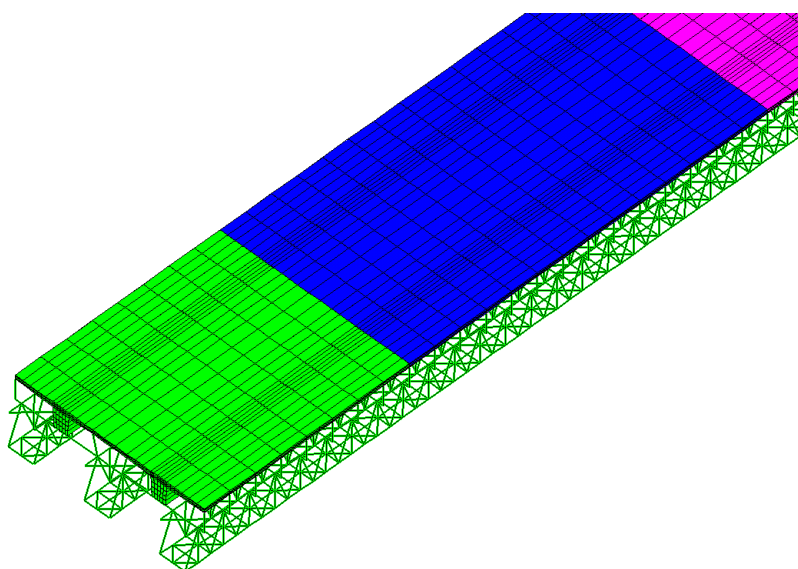
Obrázek 5.3.13: Diskretizovaný příčný řez celkového modelu.



Obrázek 5.3.14: Diskretizovaný podélný řez části celkového modelu.



Obrázek 5.3.15: Horní pohled na část diskretizované celkového modelu.



Obrázek 5.3.16: Izometrický pohled na část diskretizované celkového modelu.

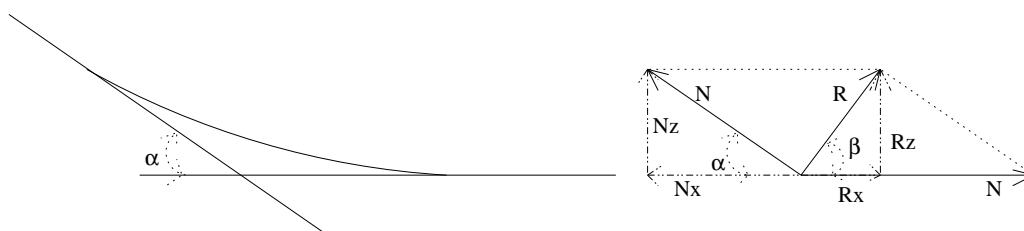
5.4 Zatížení konstrukce

5.4.1 Vlastní tíha

Betonová mostovka byla zatížena vlastní tíhou. Vlastní tíha betonové mostovky byla uvažována hodnotou $\gamma = 25\text{kNm}^{-3}$. Toto zatížení bylo modelováno jako objemové zatížení na šestistěnných prvcích.

5.4.2 Předpětí

Předpětí bylo modelováno na betonové mostovce jako uzlové zatížení, protože jsou předpínací kabely podle výkresů téměř všude přímé. Změny směru kabelů jsou provedeny pomocí krátkých oblouků, které lze nahradit lomenou čarou (tečnovým polygonem). Předpětí se tak projeví jen osamělými silami v místech lomů a na začátcích a koncích kabelů. Seznam uzlů zatížených předpětím byl sestaven za pomoci výkresů předpínacích kabelů. Bylo uvažováno jak podélné, tak příčné předpětí.



Obrázek 5.4.1: Rozklad předpínací síly do složek.

Předpínací síla byla do složek x, z rozložena dle následujících vzorců

$$N_x = N \cos \alpha \quad (5.4.1)$$

$$N_z = N \sin \alpha \quad (5.4.2)$$

$$R_x = N - N_x = N - N \cos \alpha \quad (5.4.3)$$

$$R_z = N_z = N \sin \alpha \quad (5.4.4)$$

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_z^2} \quad (5.4.5)$$

$$\beta = \arctan \left(\frac{R_z}{R_x} \right) \quad (5.4.6)$$

Hodnota síly pro jeden kanálek pro podélné předpětí měla hodnotu $P_p = 2,394 \cdot 10^6$ N, což odpovídá předpínacímu napětí $\sigma_p = 1330$ MPa a 15 lanům Dywidag 15,7 mm St1570/1770. Hodnota síly pro jeden kanálek příčného předpětí měla hodnotu $P_{pr} = 0,894 \cdot 10^6$ N, což odpovídá předpínacímu napětí $\sigma_p = 1415$ MPa a 4 lanům Dywidag 15,7 mm St1570/1770.

Pro generování uzlů pro předpětí a rozklad předpínací síly do složek x, y, z byly vytvořeny programy `indentmpredpeti`, `identmopredpod`, `identmopredpric`. Jejich popis je umístěn v dodatku A.

5.5 Programy pro generování šablon a sítí konečných prvků

Před výpočtem bylo nutné připravit šablony pro preprocesor MECHPREP (viz kap. A.3) a též soubory s odpovídající topologií sítí konečných prvků.

Programem T3D (viz dodatek A.1) byla vygenerována samostatná síť konečných prvků pro přesuvnou skruž a pro mostovku. Pro modely v kapitole 5.6.2 a kapitole 5.6.3 bylo nutné vytvořit celkovou síť. Tato síť je popsána v kapitole 5.3.3.

Problémem bylo zajištění spojitosti mezi sítí skruže a sítí mostovky. Sít' skruže je modelována prutovými ohýbanými prvky (viz kap. 5.3.2), jež mají šest stupňů volnosti v každém uzlu, kdežto mostovka je modelována prostorovými šestistěnými prvky (viz kap. 5.3.1) se třemi stupni volnosti v uzlu. To bylo odstraněno zavedením časových funkcí. Těmito funkcemi byly spřaženy odpovídající si stupně volnosti. Byly to posuny ve směrech os x, y, z . Uzly, jež měly být takto spřaženy, byly nalezeny na základě stejných hodnot souřadnic x, y, z na skruži a na mostovce. Každému takovému uzlu byly přiřazeny tři časové funkce, pro každý stupeň volnosti jedna. Ostatním uzlům byly přiřazeny časové funkce podle jejich umístění na konstrukci. Každému poli mostu byla přiřazena jedna časová funkce v závislosti na době jeho výstavby.

5.6 Popis jednotlivých výpočetních modelů

5.6.1 Výpočet dotvarování celého mostu bez postupné výstavby a bez skruže

Jako první model byl proveden výpočet dotvarování samotného mostu vybetonovaného naráz. Jako zatížení byla uvažována kombinace podélného předpětí, příčného předpětí (viz kap. 5.4.2) a vlastní tíhy (viz kap. 5.4.1). Veškeré zatížení bylo na konstrukci naneseno ve stejný čas. Tento čas se rovnal třem dnům po betonáži. V podstatě tak odpovídal technologii výstavby zmíněné v tab. 4.4.1 kap. 4.4. Stáří betonu mostu při zatížení je pro všechna pole mostu stejné. Rovná se hodnotě tří dnů.

Pro vytvoření vstupních souborů pro program MEFEL byly použity tyto programy: T3D, convertt3d2sifel, identmopredpod, identmopred-

`pric`, `mocreep`, `MECHPREP` a `mocreeppredvlt`. Popis těchto programů je uveden v dodatku v kapitole A.1, kapitole A.4.1, kapitole A.5.2 a kapitole A.5.3.

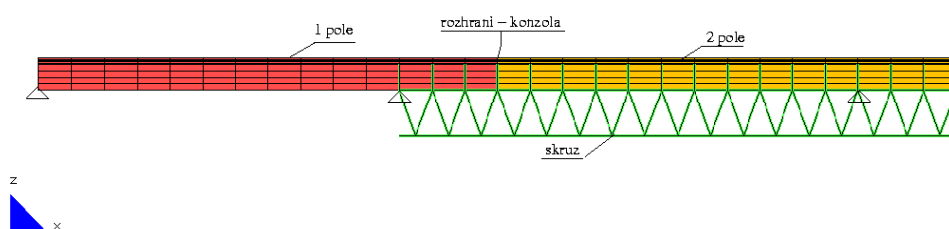
5.6.2 Výpočet dotvarování pro most s modifikovanou postupnou výstavbou

Jako druhý model byl proveden výpočet dotvarování mostní konstrukce budované pomocí přesuvné skruže podepřenou variantou 1. V této variantě je skruž podepřena z pilíře na pilíř (viz obr. 5.6.1). Tento model byl vytvořen pro porovnání s modelem uvedeným v kapitole 5.6.3, jež se v současnosti při výstavbě používá.

Jako zatížení byla uvažována kombinace podélného předpětí, příčného předpětí (viz kap. 5.4.2) a vlastní tíhy (viz kap. 5.4.1). Zatížení na konstrukci bylo naneseno následujícím způsobem. Tři dny po vybetonování aktuálního taktu bylo aktivováno zatížení vlastní tíhou (popis zatížení viz kap. 5.4.1), čtvrtý den po vybetonování bylo aktivováno podélné předpětí (popis zatížení viz kap. 5.4.2) a pátý den po vybetonování bylo aktivováno příčné předpětí (popis zatížení viz kap. 5.4.2). Toto načasování vnášení zatížení je shodné s popisem technologie uvedeným v tab. 4.4.1 v kap. 4.4

Technologie postupné výstavby je uvedena v kapitole 4.4. Výstavba jednoho taktu trvá 15 dní. V tomto výpočtu je výstavba následujícím způsobem načasována. V prvních deseti dnech výstavby nového taktu je zahrnuto přesunutí a urovnání skruže, armování, tyto činnosti trvají celkem devět dní. Desátý den je nový takt vybetonován a je zatížen po třídní technologické pauze. Stáří betonu při zatížení každého pole je tedy tři dny. Podrobnější načasování zatížení je výše uvedeno. Skruž se ve výpočtu zapíná vždy na začátku nového taktu, betonová mostovka se zapíná po uplynutí třinácti dnů od zapnutí skruže.

Pro vytvoření vstupních souborů pro program MEFEL byly použity tyto programy: T3D, convertt3d2sifel, identmopredpeti, indentskruz, verze1, MECHPREP, identmzatizeni. Popis těchto programů je uveden v dodatku v kapitole A.1, kapitole A.4.1, kapitole A.4.4, kapitola A.4.3, kapitole A.4.5 a kapitole A.4.7.



Obrázek 5.6.1: Způsob podepření skruže označený jako skruž 1.

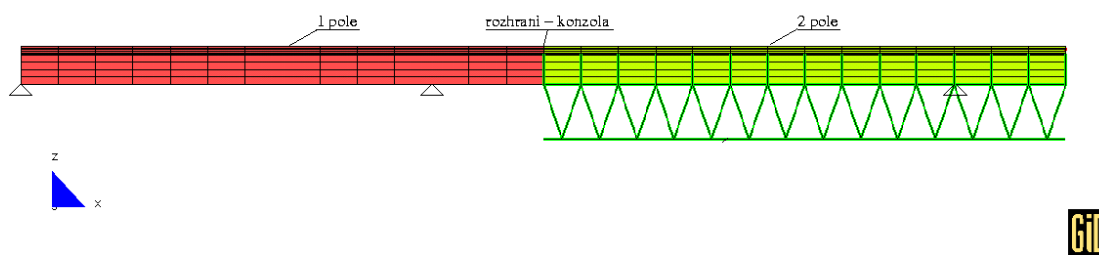
5.6.3 Výpočet dotvarování pro most s postupnou výstavbou

Jako poslední model byl proveden výpočet dotvarování mostní konstrukce budované pomocí přesuvné skruže podepřené variantou 2. V této variantě je skruž zavěšena na konzolu, jež je vybetonována v předchozím taktu, a na dalším pilíři (viz obr. 5.6.2). Toto podepření skruže se shoduje s reálným podepřením skruže.

Technologie postupné výstavby je shodná s technologií v uvedené v kap. 5.6.2 a nanášení zatížení je též shodné.

Pro vytvoření vstupních souborů pro program MEFEL byly použity tyto programy: T3D, convertt3d2sifel, identmopredpeti, indentskruz, verze2, MECHPREP, identmzatizeni. Popis těchto programů je uveden v

dodatku v kapitole A.1, kapitole A.4.1, kapitole A.4.4, kapitole A.4.3, kapitole A.4.6 a kapitole A.4.7.



Obrázek 5.6.2: Způsob podepření skruže označený jako skruž 2.

Kapitola 6

Výsledky modelování

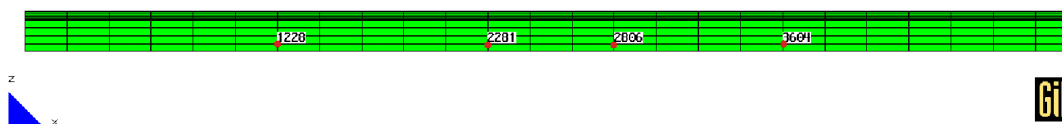
6.1 Výsledky výpočtu dotvarování celého mostu bez simulace výstavby a bez skruže

Tato kapitola popisuje výsledky výpočtu dotvarování celého mostu bez postupné výstavby a bez skruže. V tab. 6.1.1 a na obr. 6.1.1 jsou uvedeny uzly, pro něž byly z dosažených výsledků vytvořeny grafy. V následujících kapitolách byly vybrány stejné uzly. V kap. 6.4 budou tyto výsledky porovnány. Očíslování uzlů je rozdílné z důvodů uvedených v kap. 5.3.3. Dále jsou na několika obrázcích zobrazeny isolinie svislých průhybů na deformované konstrukci. V tomto případě je deformovaný tvar 500krát zvětšen.

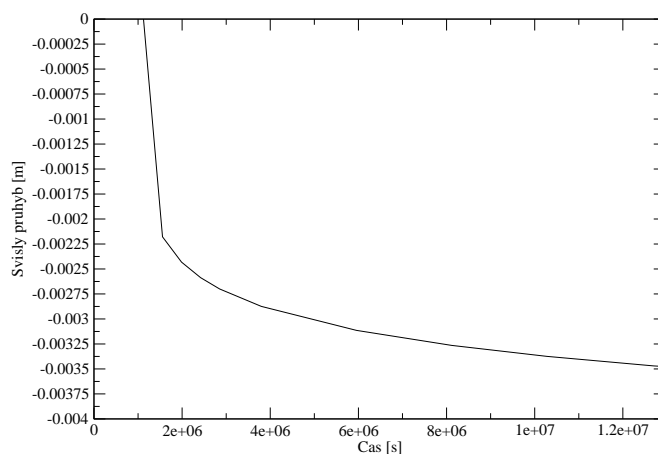
Průběh svislých průhybu je na grafech zachycen do času ukončení výstavby. Jde o 150 dní. Na grafech je zobrazen typický průběh dotvarování. Na grafu na obr. 6.1.3 je zobrazen průběh dotvarování uzlu nad podporou. Dochází zde pouze ke stlačení, jež je nejvýše rovno $2,5 \cdot 10^{-5}$ m. Z tohoto důvodu již v následujících kapitolách nebude vybírán.

číslo uzlu	souřadnice x [m]	souřadnice y [m]	souřadnice z [m]	popis umístění
1228	13,50	3,375	-1,6875	uprostřed 1 pole
2281	24,75	3,375	-1,6875	nad 2 podporou konstrukce
2806	31,50	3,375	-1,6875	na 1 konzole
3604	40,50	3,375	-1,6875	uprostřed 2 pole

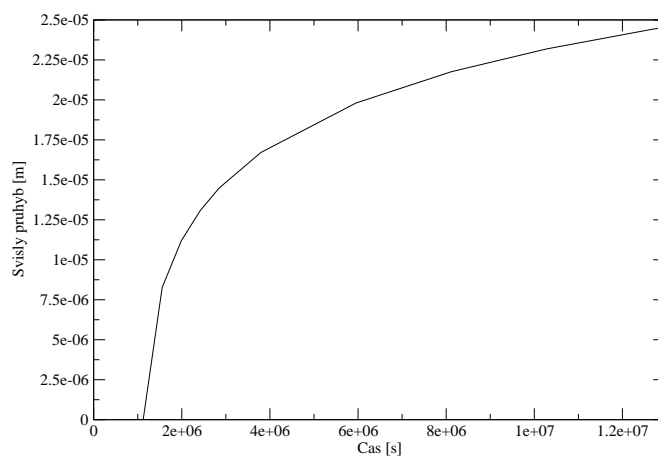
Tabulka 6.1.1: Tabulka uzlů a jejich souřadnic.



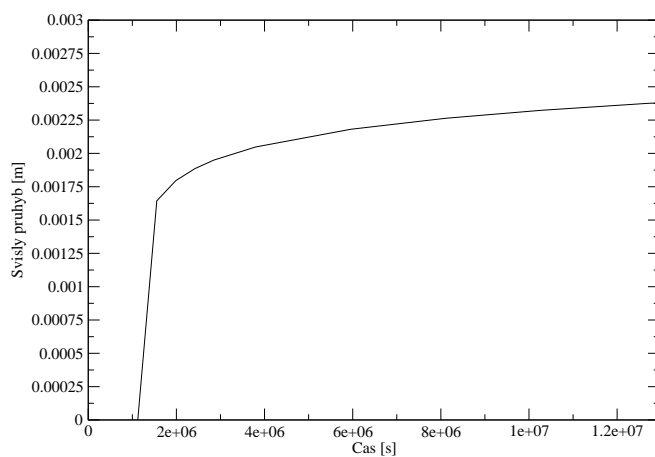
Obrázek 6.1.1: Zobrazení uzlů z tab. 6.1.1 na konstrukci.



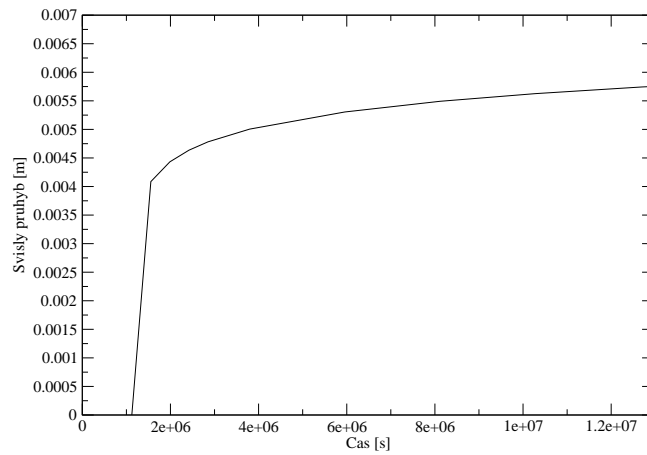
Obrázek 6.1.2: Graf dotvarování - uzel 1228.



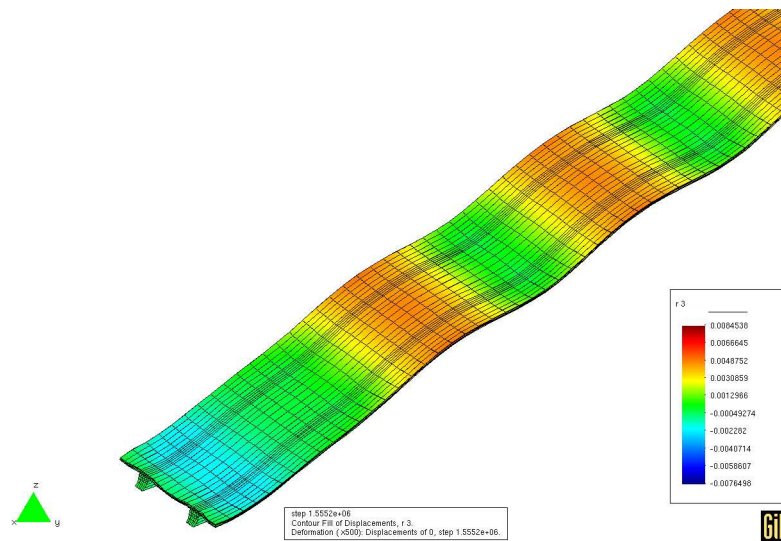
Obrázek 6.1.3: Graf dotvarování - uzel 2281.



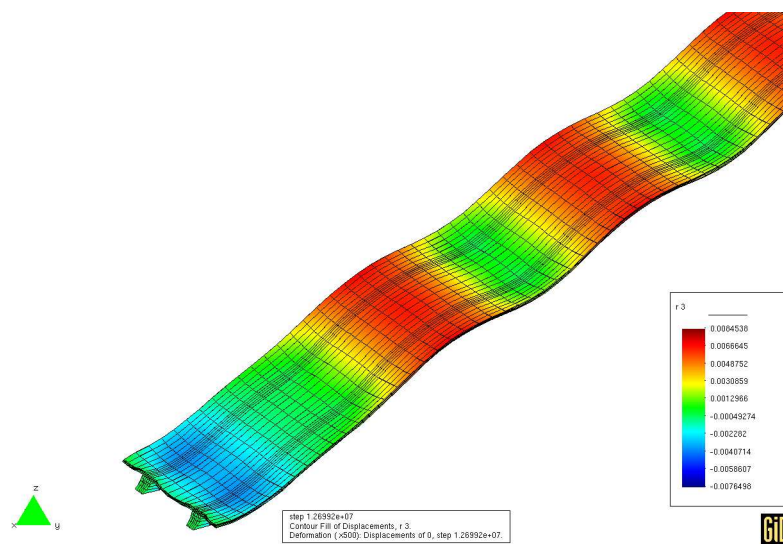
Obrázek 6.1.4: Graf dotvarování - uzel 2806.



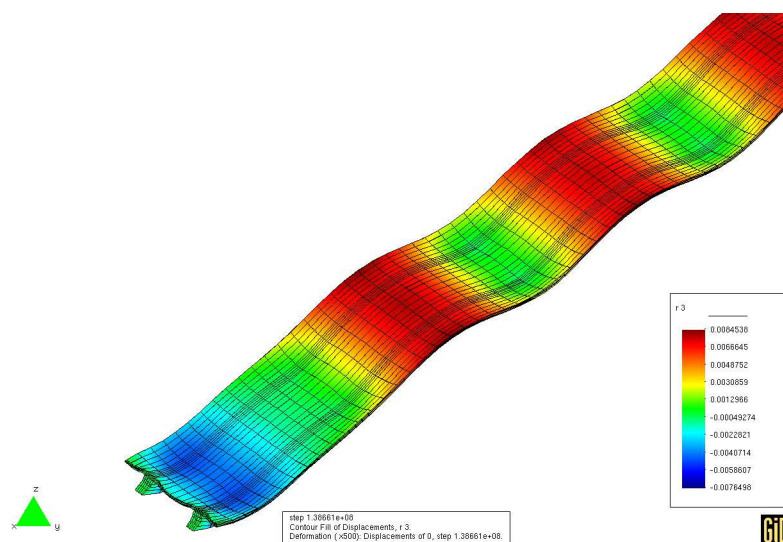
Obrázek 6.1.5: Graf dotvarování - uzel 3604.



Obrázek 6.1.6: Isolinie svislého průhybu v čase 5 dní po zatížení (500x zvětšeno).



Obrázek 6.1.7: Isolinie svislého průhybu v čase 134 dní po zatížení (500x zvětšeno).



Obrázek 6.1.8: Isolinie svislého průhybu v čase ukončení výpočtu - 4 roky a 135 dní po zatížení (500x zvětšeno).

6.2 Výsledky výpočtu dotvarování mostu s modifikovanou postupnou výstavbou

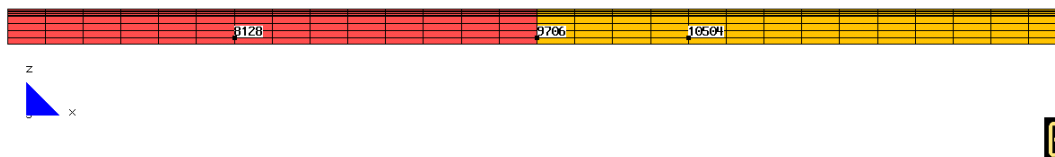
Tato kapitola popisuje výsledky výpočtu dotvarování mostu s modifikovanou postupnou výstavbou. V tab. 6.2.1 a obr. 6.2.1 jsou uvedeny uzly, pro něž byly z dosažených výsledků vytvořeny grafy. Na obr. 6.2.5 až 6.2.8 jsou zobrazeny isolinie svislých průhybů na deformované konstrukci. V tomto případě je deformovaný tvar 500krát zvětšen.

Na grafu z obr. 6.2.2 je vidět průběh svislého průhybu konstrukce pro uzel číslo 8128, jež je umístěn v prvním poli konstrukce a v prvním taktu výstavby. V čase 3 dny po vybetonování prvního taktu je aktivována vlastní tíha prvního pole. Dojde k průhybu 0.00475 m dolů, v čase 4 dny po vybetonování prvního taktu je aktivováno podélné předpětí prvního pole, zde dochází k dalšímu zvětšení svislého průhybu. V čase 5 dnů po vybetonování prvního taktu je aktivováno příčné předpětí prvního pole a je odstraněna skruž pod prvním polem. Dochází k mírnému snížení hodnoty svislého průhybu. Poté konstrukce dotvaruje až k hodnotě svislého průhybu 0.006 m. V čase 18 dní po vybetonování prvního taktu je aktivováno zatížení vlastní tíhou druhého pole, den po té je aktivováno podélné předpětí druhého pole. Průběh hodnoty svislého průhybu reaguje na tyto dvě zatížení snížením hodnoty svislého průhybu k hodnotě průhybu 0.00475 m. V čase 20 dní po vybetonování prvního taktu je druhé pole příčně předepnuto a je odstraněna skruž v druhém poli. Průběh hodnoty svislého průhybu reaguje na toto zatížení poklesem dolů k hodnotě 0.00525 m. Od tohoto času konstrukce dotvaruje k hodnotě průhybu 0.0055 m. V čase 33 dní po vybetonování prvního taktu je aktivováno zatížení třetího pole. Průběh hodnot svislého průhybu v uzlu číslo 8128 na to reaguje již jen malým skokem. Zatížení čtvrtého a dalších polí se na tomto průběhu prakticky neprojeví.

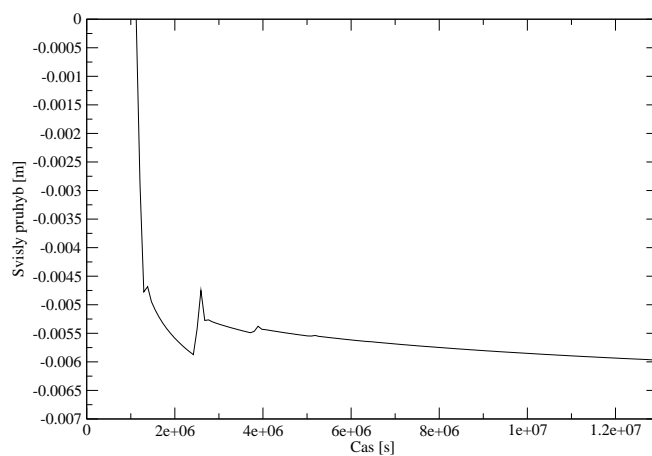
V čase 140 dní po zatížení prvního taktu je mostní konstrukce dokončena, hodnota svislého průhybu se zvýšila na 0.006 m směrem dolů.

číslo uzlu	souřadnice x [m]	souřadnice y [m]	souřadnice z [m]	popis umístění
8128	13,50	3,375	-1,6875	uprostřed 1 pole
9706	31,50	3,375	-1,6875	na 1 konzole
10504	40,50	3,375	-1,6875	uprostřed 2 pole

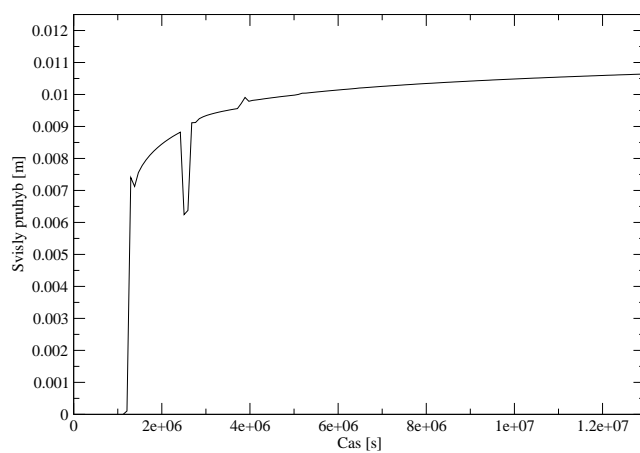
Tabulka 6.2.1: Tabulka uzlů a jejich souřadnic.



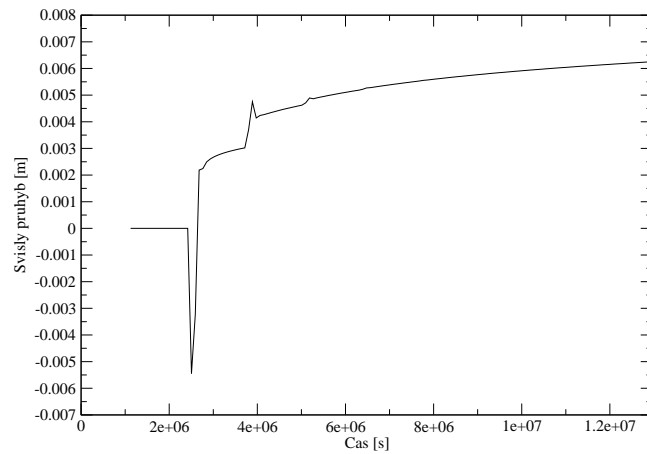
Obrázek 6.2.1: Zobrazení uzlů z tab. 6.2.1 na konstrukci.



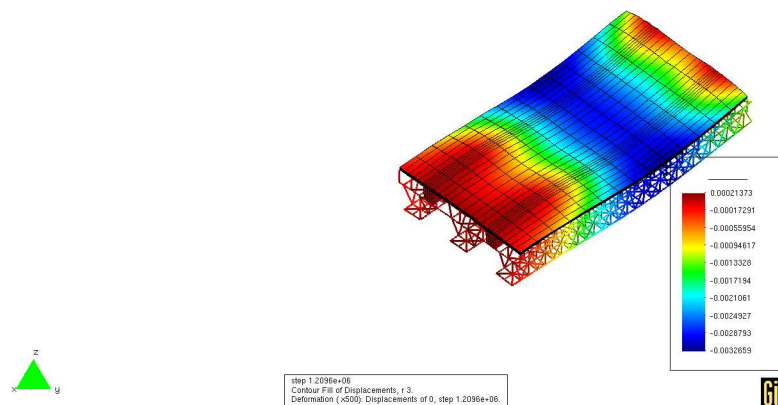
Obrázek 6.2.2: Graf dotvarování - uzel 8128.



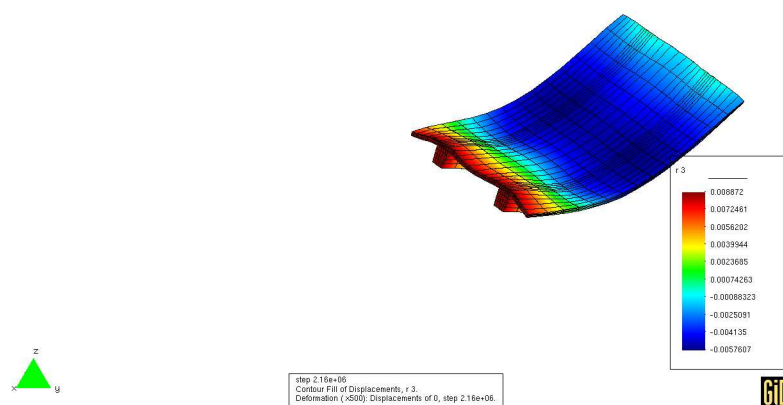
Obrázek 6.2.3: Graf dotvarování - uzel 9706.



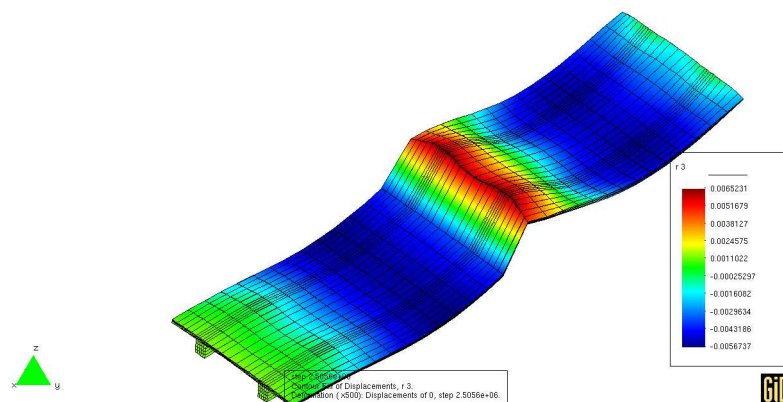
Obrázek 6.2.4: Graf dotvarování - uzel 10504.



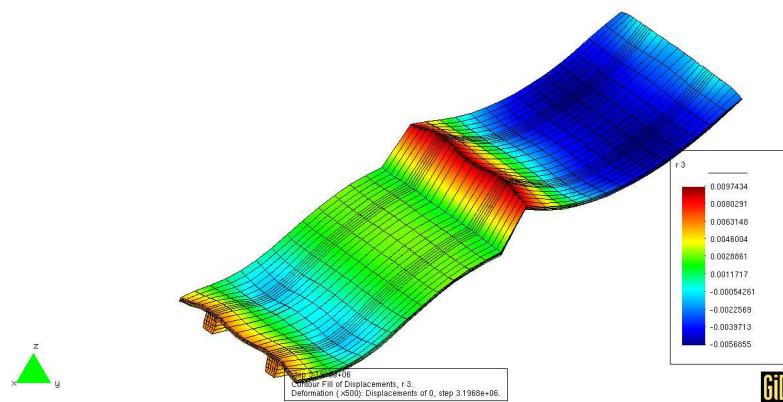
Obrázek 6.2.5: Isolinie svislého průhybu v čase 1 den po zatížení 1. pole (500x zvětšeno).



Obrázek 6.2.6: Isolinie svislého průhybu v čase 12 dní po zatížení 1. pole (500x zvětšeno).



Obrázek 6.2.7: Isolinie svislého průhybu v čase 17 dní po zatížení 1. pole a 2 dny po zatížení 2. pole (500x zvětšeno).



Obrázek 6.2.8: Isolinie svislého průhybu v čase 24 dní po zatížení 1. pole a 9 dnů po zatížení 2. pole (500x zvětšeno).

6.3 Výsledky výpočtu dotvarování mostu s postupnou výstavbou

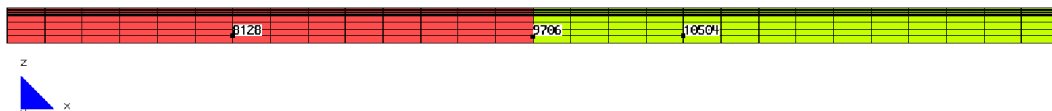
Tato kapitola popisuje výsledky výpočtu dotvarování mostu s postupnou výstavbou. V tab. 6.3.1 a obr. 6.3.1 jsou uvedeny uzly pro něž byly z dosažených výsledků vytvořeny grafy. Na obr. 6.3.5 až 6.3.8 jsou zobrazeny isolinie svislých průhybů na deformované konstrukci. V tomto případě je deformovaný tvar 500x zvětšen.

Na grafu z obr. 6.3.3 je vidět průběh svislého průhybu konstrukce pro uzel číslo 9706, jež je umístěn na první konzole a v prvním taktu výstavby. V čase 3 dny po vybetonování prvního taktu je aktivováno zatížení vlastní tíhou. Dojde k nárůstu průhybu vzhůru k hodnotě 0.000025 m, v čase 4 dny po vybetonování prvního taktu je aktivováno podélné předpětí prvního pole, zde dochází k dalšímu nárůstu hodnoty svislého průhybu až k hodnotě 0.0075 m. V čase 5 dnů po vybetonování prvního taktu je aktivováno příčné předpětí a je odstraněna skruž pod prvním polem. Dochází k mírnému poklesu hodnoty svislého průhybu. Poté konstrukce dotvaruje až k hodnotě svislého průhybu 0.008 m vzhůru. V čase 18 dní po vybetonování prvního taktu je zatíženo vlastní tíhou druhé pole. Průběh hodnoty svislého průhybu na to reaguje poklesem k hodnotě 0.00525 m. Den poté je aktivováno podélné předpětí druhého pole, dojde k malému nárůstu průhybů vzhůru. V čase 20 dní po vybetonování prvního taktu je druhé pole příčně předepnuto a je odstraněna skruž v druhém poli. Průběh hodnoty svislého průhybu v uzlu číslo 9706 reaguje na toto zatížení nárůstem průhybu vzhůru k hodnotě 0.00825 m. Od tohoto času konstrukce dotvaruje k hodnotě průhybu 0.009 m vzhůru. V čase 33 dní po vybetonování prvního taktu je aktivováno zatížení třetího pole. Průběh hodnot svislého průhybu v uzlu číslo 9706 na to reaguje již jen malým skokem v průběhu průhybu. Zatížení čtvrtého a dalších polí se na tomto průběhu již neprojeví. V čase

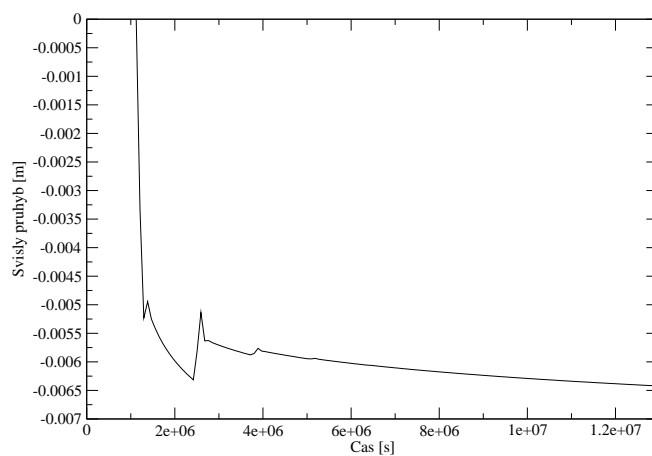
140 dní po zatížení prvního taktu je mostní konstrukce dokončena, hodnota svislého průhybu zvýšila vzhůru k hodnotě průhybu 0.01 m.

číslo uzlu	souřadnice x [m]	souřadnice y [m]	souřadnice z [m]	popis umístění
8128	13,50	3,375	-1,6875	uprostřed 1 pole
9706	31,50	3,375	-1,6875	na 1 konzole
10504	40,50	3,375	-1,6875	uprostřed 2 pole

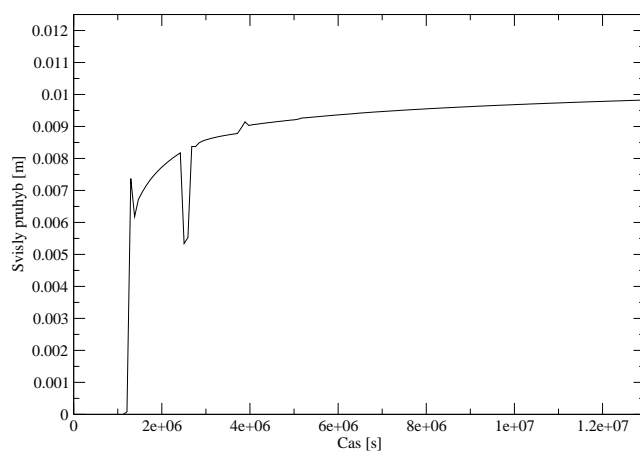
Tabulka 6.3.1: Tabulka uzlů a jejich souřadnic.



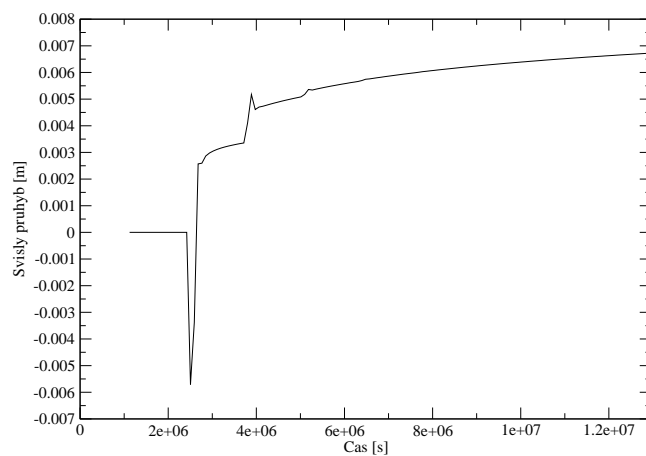
Obrázek 6.3.1: Zobrazení uzlů z tab. 6.3.1 na konstrukci.



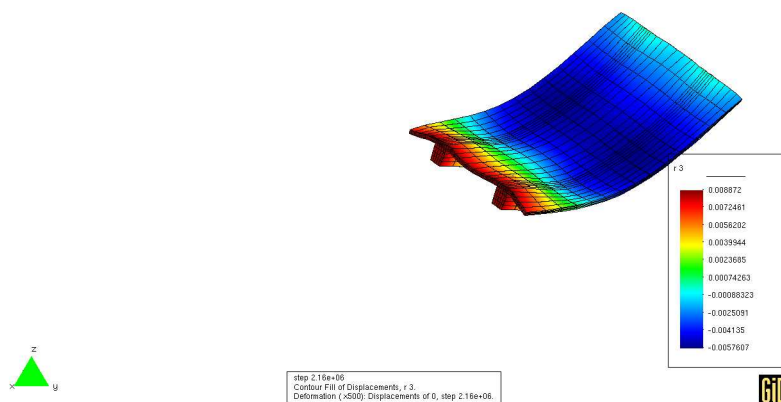
Obrázek 6.3.2: Graf dotvarování - uzel 8128.



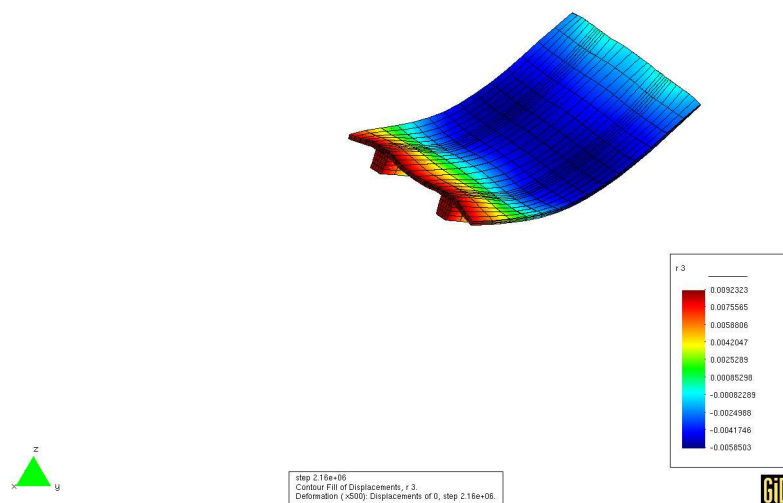
Obrázek 6.3.3: Graf dotvarování - uzel 9706.



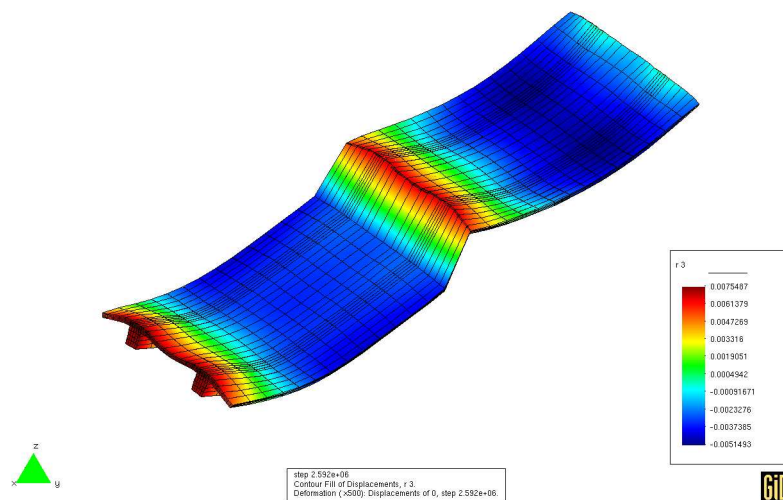
Obrázek 6.3.4: Graf dotvarování - uzel 10504.



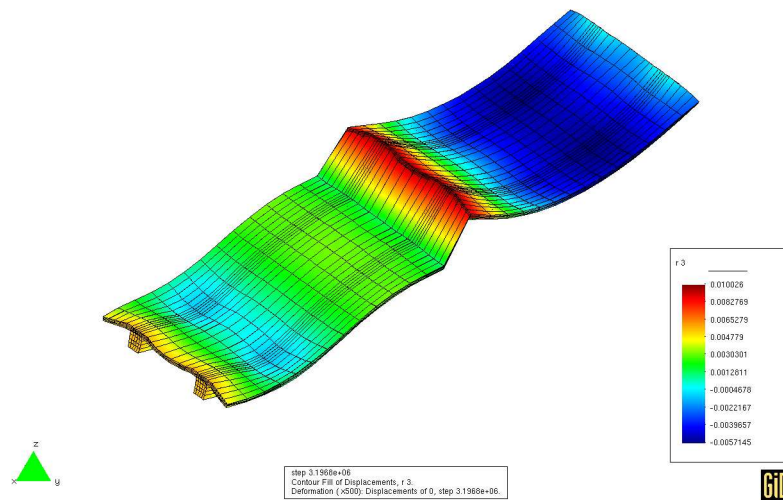
Obrázek 6.3.5: Isolinie svislého průhybu v čase 1 den po zatížení 1. pole (500x zvětšeno).



Obrázek 6.3.6: Isolinie svislého průhybu v čase 12 dní po zatížení 1. pole (500x zvětšeno).



Obrázek 6.3.7: Isolinie svislého průhybu v čase 17 dní po zatížení 1. pole a 2 dny po zatížení 2. pole (500x zvětšeno).



Obrázek 6.3.8: Isolinie svislého průhybu v čase 24 dní po zatížení 1. pole a 9 dnů po zatížení 2. pole (500x zvětšeno).

6.4 Srovnání dosažených výsledků

V této kapitole budou srovnány výsledky dosažené v kapitolách 6.1, 6.2 a 6.3. Pro jednoduchost byly označeny tři zmiňované analýzy tímto stručným označením

- verze 1 - odpovídá podepření skruže z pilíře na pilíř
- verze 2 - odpovídá podepření skruže z konzoly mostu na další pilíř
- verze 3 - odpovídá mostovce bez skruže a bez postupné výstavby

V předchozích kapitolách byly uvedeny grafy dotvarování vybraných uzlů mostní konstrukce pro různé způsoby podepření skruže. Zde jsou odpovídající si grafy sloučeny tak, aby bylo možné porovnat varianty výpočtu. Obr. 6.4.1, 6.4.3 a 6.4.5 obsahují průběhy dotvarování uzlů číslo 8128, 9706 a 10504. Z grafů je jasné vidět, že výstavba konstrukce značně ovlivňuje výsledné průhyby a výpočet dotvarování celého mostu bez přihlídnutí k fázím výstavby dává velmi odlišné výsledky. Pro rozhodování o technologii výstavby je nutný podrobný výpočet s uvážením jednotlivých fází betonáže. Ve vybraných časech byly hodnoty svislých průhybů uzlů číslo 8128, 9706 a 10504 sestaveny do tab. 6.4.1, 6.4.2 a 6.4.3.

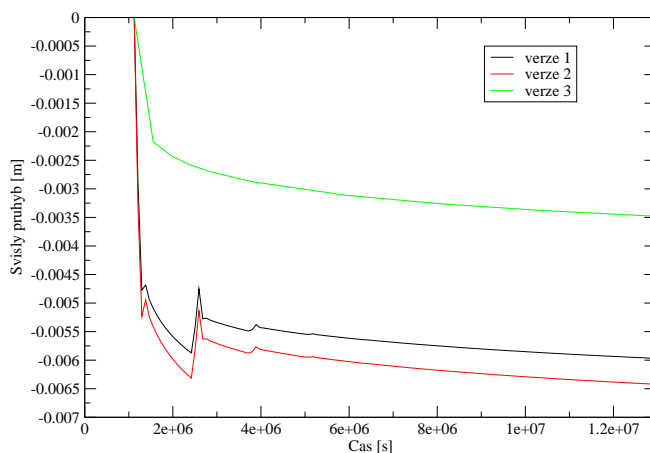
Vzhledem k zadání práce je pozornost dále zaměřena jen na verzi 1 a 2. Výpočet mostu bez výstavby nebude dále uvažován. Pro zvolené uzly jsou zkonstruovány grafy 6.4.2, 6.4.4 a 6.4.6, které zobrazují rozdíl svislých průhybů pro odlišné způsoby podepření skruže.

Při porovnání všech tří modelů pomocí grafů na obr. 6.4.1, 6.4.3 a 6.4.5 je vidět, že model mostovky bez simulace výstavby a bez skruže popsany v kap. 5.6.1 lze použít pouze pro odhad řádu hodnot průhybů. Pro přesnější zachycení chování je nutné použít modely uvedené v kap. 5.6.2 a 5.6.3.

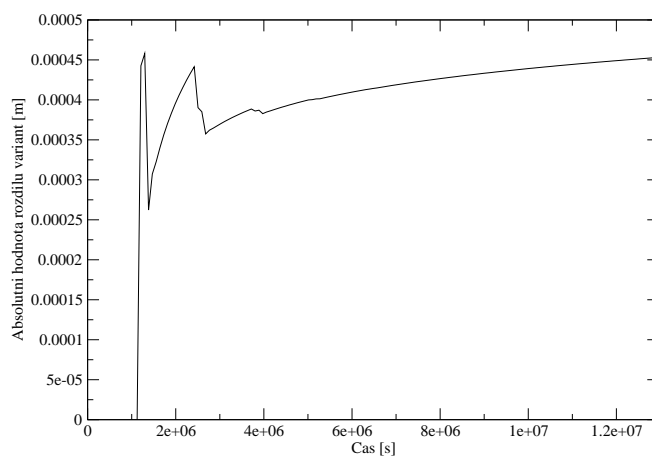
Nejvíce je tento rozdíl patrný na obr. 6.4.5. Tento graf zobrazuje průběh svislého průhybu uzlu číslo 10504. Tento uzel se nachází v polovině druhého pole (viz obr. 6.2.1 a tab. 6.2.1). V době, kdy ještě není v postupné výstavbě druhé pole zapnuto, je již tento uzel ve verzi bez výstavby zapnuta a probíhá dotvarování. Navíc není tento model ani schopen poskytnout informace, o chování rozestavěné konstrukce během betonáže. Jak se podle výsledků ukazuje, je toto období pro konstrukci důležitá a stejně důležitá je i forma podepření skruže.

Při srovnání modelů z kap. 5.6.2 a kap. 5.6.3 na grafech z obr. 6.4.1, 6.4.3 a 6.4.5 a z tab. 6.4.1, 6.4.2 a 6.4.3 je z hlediska velikosti svislých průhybu konstrukce výhodnější varianta podepření skruže z pilíře na pilíř, jež je popsána v kap. 5.6.2.

Rozdíl hodnot průhybů v jednotlivých uzlech jsou na grafech na obr. 6.4.2, 6.4.4 a 6.4.6. Největší rozkmit hodnot je vždy v období budování několika nejbližších taktů.



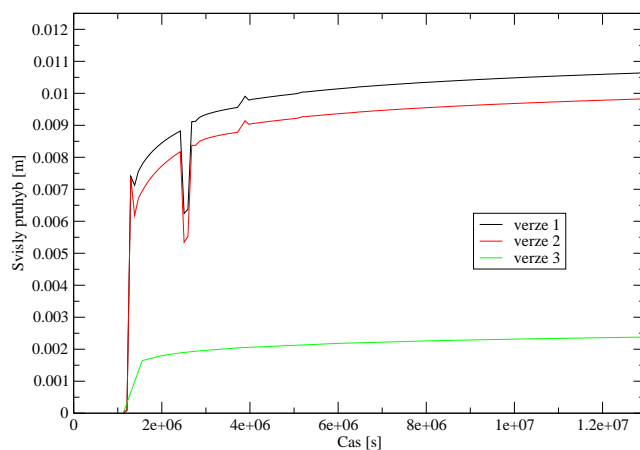
Obrázek 6.4.1: Srovnání grafů svislého průhybu od dotvarování - verze 1, verze 2, verze 3 - uzel 8128.



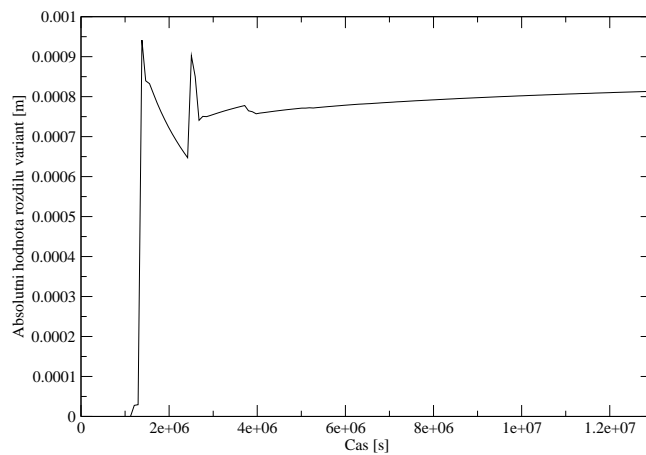
Obrázek 6.4.2: Rozdíl hodnot svislého průhybu od dotvarování mezi verzemi 1 a 2 - uzel 8128.

Čas [s]	Čas [dny]	Verze 1 [m]	Verze 2 [m]	Absolutní rozdíl verzí 1 a 2 [m]	Verze 3 [m]
1.1232e+06	13	0.000e+00	0.000e+00	0.000e+00	0.000e+00
1.5552e+06	18	-5.092e-03	-5.415e-03	3.224e-04	-2.178e-03
1.9872e+06	23	-5.575e-03	-5.970e-03	3.949e-04	-2.431e-03
2.4192e+06	28	-5.873e-03	-6.314e-03	4.414e-04	-2.586e-03
2.8512e+06	33	-5.299e-03	-5.663e-03	3.646e-04	-2.699e-03

Tabulka 6.4.1: Srovnání výsledků svislého průhybu pro uzel 8128.



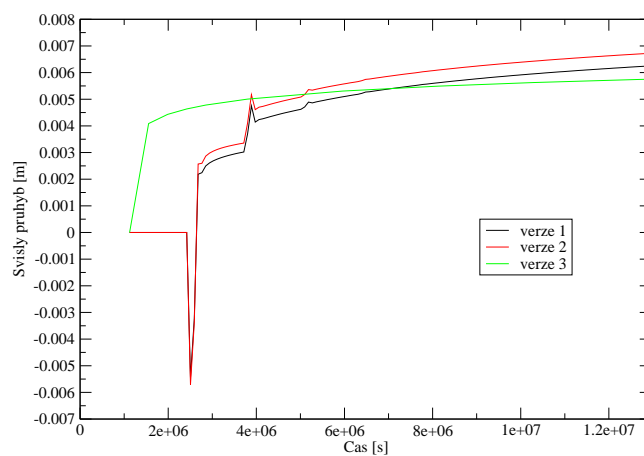
Obrázek 6.4.3: Srovnání grafů dotvarování - verze 1, verze 2, verze 3 - uzel 9706.



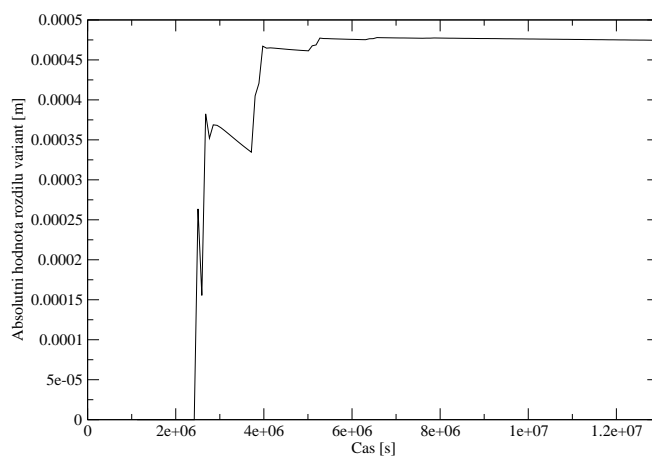
Obrázek 6.4.4: Rozdíl hodnot svislého průhybu od dotvarování mezi verzemi 1 a 2 - uzel 9706.

Čas [s]	Čas [dny]	Verze 1 [m]	Verze 2 [m]	Absolutní rozdíl verzí 1 a 2 [m]	Verze 3 [m]
1.1232e+06	13	0.000e+00	0.000e+00	0.000e+00	0.000e+00
1.5552e+06	18	7.779e-03	6.947e-03	8.324e-04	1.644e-03
1.9872e+06	23	8.436e-03	7.712e-03	7.236e-04	1.795e-03
2.4192e+06	28	8.822e-03	8.174e-03	6.472e-04	1.885e-03
2.8512e+06	33	9.244e-03	8.494e-03	7.500e-04	1.950e-03

Tabulka 6.4.2: Srovnání výsledků svislého průhybu pro uzel 9706.



Obrázek 6.4.5: Srovnání grafů svislého průhybu od dotvarování - verze 1, verze 2, verze 3 - uzel 10504.



Obrázek 6.4.6: Rozdíl hodnot svislého průhybu od dotvarování mezi verzemi 1 a 2 - uzel 10504.

Čas [s]	Čas [dny]	Verze 1 [m]	Verze 2 [m]	Absolutní rozdíl verzí 1 a 2 [m]	Verze 3 [m]
1.1232e+06	13	0.000e+00	0.000e+00	0.000e+00	0.000e+00
1.5552e+06	18	0.000e+00	0.000e+00	0.000e+00	4.086e-03
1.9872e+06	23	0.000e+00	0.000e+00	0.000e+00	4.431e-03
2.4192e+06	28	0.000e+00	0.000e+00	0.000e+00	4.636e-03
2.8512e+06	33	2.496e-03	2.865e-03	3.687e-04	4.781e-03

Tabulka 6.4.3: Srovnání výsledků svislého průhybu pro uzel 10504.

Kapitola 7

Závěr a budoucí práce

7.1 Závěr

Touto diplomovou prací bylo prokázáno, že používané podepření skruže pomocí zavěšení na konzolu má na mostní konstrukci neblahý vliv a vede ke zvýšení průhybů mostní konstrukce. Jako lepší se jeví varianta podepření skruže z pilíře na pilíř, jež je popsána v kap. 5.6.2. Při této variantě dochází na všech třech sledovaných uzlech k menším průhybům než ve variantě podepření z konzoly na pilíř popsaný v kap. 5.6.3.

Ani jeden z modelů nebyl porovnáván se skutečnými průhyby na reálné konstrukci, protože most ještě nebyl postaven. Toto porovnání by mohlo být zajímavé právě pro variantu modelu z kap. 5.6.3. Tato varianta podepření je totiž shodná s reálným podepřením a na základě tohoto srovnání by mohl být model verifikován.

V praxi je jasné, že nelze vzhledem k časovému omezení při projektování a návrhu konstrukce, provádět náročné modelování každé navrhované konstrukce.

Je však dobré vědět, co má na chování konstrukce vliv a dodržovat určité konstrukční doporučení a zásady. Podobný výpočet, jako byl proveden v této diplomové práci, by měl být proveden pro každý typ mostní konstrukce a její technologii výstavby a z tohoto výpočtu vyvozena obecná doporučení. V praxi by stačilo zohlednit doporučení plynoucí z těchto výpočtů a mohl by tak být urychlen proces navrhování konstrukce.

7.2 Budoucí práce

Modely uvedené v předcházejících kapitolách by bylo v budoucnu možné vylepšit, aby se ještě více shodovaly s reálným stavem. Mohl by k tomu přispět následující model.

Při modelování postupné výstavby byly nové části ihned spojeny se stávajícími. To není nejvhodnější, protože na reálné konstrukci k tomuto efektu dochází až během času, kdy v betonu proběhne hydratace a získá určitou pevnost. V modelu by to mohlo být zahrnuto následujícím způsobem. Nové pole mostu bude ke stávajícím polím připojeno až po uplynutí určitého, předem zvoleného času. To je možné zajistit zdvojením uzlů na rozhraní a přiřazením odpovídajících časových funkcí. Popsaným způsobem by bylo možné docílit výše zmíněného efektu a přiblížit se reálnému stavu.

V modelu dotvarování je možnost zahrnutí vlivu teploty. Dále je možno model rozšířit o model poškození. Je možno zahrnout i další modely jež poskytuje programový balík SIFEL např. řešení sdruženě-transportní úlohy. Je však nutné zvážit zda rozšíření o další modely pomůže k lepším výsledkům simulace a zda tyto výsledky jsou opravdu důležité pro vystižení chování konstrukce.

Až se most začne stavět a budou hotova geodetická měření deformací mostní konstrukce, mohou být modely uvedené v kap. 5.6 porovnány s výsledky těchto měření. V době dokončení této práce ještě nebyly výsledky těchto měření známy. Byl však naprogramován program `porovnaní`, jež tyto výsledky porovná. Jeho pozdějším doplněním můžou být provedeny statistické výpočty např. korelace dat. Popis tohoto programu je uveden v dodatku A.7.

Dodatek A

Použité programy a jejich stručný popis

A.1 Generátor sítě konečných prvků T3D

Tvůrcem tohoto programu je Doc. Dr. Ing. Daniel Rypl. Informace o tomto programu jsou na adrese <http://mech.fsv.cvut.cz/~dr/t3d.html>. Na této stránce lze nalézt ukázky výstupů z programu a manuál k tomuto programu. Příkaz pro spuštění je následující:

```
./T3d -i soubor.t3d -o soubor.top -r 1 -p 8 -d 1.0 -X,
```

kde:

- soubor.t3d je vstupní soubor obsahující informace o modelu pro T3D - viz manuál na [www stránkách](http://www.stankach.com)
- soubor.top je výstupní soubor s topologií sítě
- -r 1 je volba pro Sloanův algoritmus přečíslování uzlů

- -d 1.0 je volba hustoty sítě
- -X je volba pro grafický výstup do Elixiru
- -p 8 přidavné výstupní specifikace 8 - výstup hraničních entit modelu

Vstupní soubory pro vygenerování topologie mostovky a skruže jsou uloženy na příloženém CDROMu v adresáři MODEL3D.

A.2 GiD

Informace o programu GiD lze nalézt na adrese <http://gid.cimne.upc.es/>. Tento program slouží jak pro přípravu dat pro výpočet (generování sítě konečných prvků, zadávání počátečních a okrajových podmínek) tak i pro vizualizaci vypočtených výsledků. Program byl využit pro vizualizaci, zpracování a interpretaci vypočtených dat.

A.3 MEFEL a MECHPREP

Program MEFEL byl popsán v kapitole 3.3. Příkaz pro jeho spuštění je následující: `mefel soubor.in`, kde `soubor.in` vstupní je soubor, ve kterém jsou data nutná pro výpočet.

Tyto data vygeneruje generátor MECHPREP. Spouští se příkazem `mechprep soubor.pr soubor.in`, kde `soubor.pr` je soubor se šablonou. Tuto šablonu musí vyrobit uživatel na základě stanovených pravidel. Soubor musí obsahovat databázi materiálů, průřezů, jméno souboru s topologií atd. Základní informace lze najít na adrese <http://cml.fsv.cvut.cz/~sifel>.

A.4 Programy pro generování topologie mostovky a skruže a šablon pro MEFEL

Tyto programy jsou umístěny na příloženém CDROMu v adresáři PROGRAMY/MO-ST. Programy jsou napsány v jazyce C. Programy byly vytvořeny pro účel této diplomové práce a vytvořil je autor této diplomové práce.

pořadí	program	stručný popis
1	copycell	kopíruje základní buňky skruže
2	T3D	generuje síť konečných prvků
3	idenskruz	přiřadí vlastnosti prutům skruže podle jejich průřezu
4	convertt3d2sifel	konvertuje síť z formátu T3D do formátu MEFEL
5	verze1 nebo verze2	vyrobí topologii a šablony celé konstrukce
6	MECHPREP	vyrobí vstupní soubor pro MEFEL
8	identmpredpeti	vyrobí seznam uzlů zatížených předpětím
7	indentmzat	doplní zatížení a průřezy do vstupního souboru
8	MEFEL	vypočte výsledky numerického modelu
9	GiD	zpracování výsledků

Tabulka A.4.1: Posloupnost programů pro výpočet mostovky a skruže.

A.4.1 CONVERTT3D2SIFEL

Program konvertuje výstupní soubory s topologií sítě z T3D do formátu vstupního souboru pro MEFEL. Přečíslovává uzly a plochy na elementu do číslování shodného s číslování používaným v MEFELu. Příkaz pro spuštění je `convertt3d2sifel`

soubor .top soubor .out, kde soubor .top je soubor s topologií sítě z programu T3D a soubor .out je soubor jež bude vytvořen programem convert-t3d2sifel a bude obsahovat číslování shodné jako v programu MEFEL.

A.4.2 COPYCELL

Program copycell vytvoří ze souboru bunka_skruze .t3d požadovaný počet buněk. Program vytvoří soubor s modelem skruže pro generátor sítí T3D. Příkaz pro spuštění je copycell bunka_skruze .t3d skruz .t3d 135, kde bunka_skruze .t3d je vstupní soubor s buňkou, jež se bude kopírovat, skruz .t3d je výstupní soubor a 135 je počet zkopírovaných buněk.

A.4.3 IDENTMPREDPETI

Program identmpredpeti vyrobí z topologie mostovky seznam zatížených uzlů s hodnotou jednotkové síly ve směrech os x, y, z složce pro podelné a příčné předpětí. Příkaz pro spuštění je idenmpredpeti most .top podelne .pred pri-cne .pred, kde most .top je soubor s topologií sítě mostovky, podelne .pred a pricne .pred jsou soubory se seznamem zatížených uzlů. Každý uzel je pře-číslován tak, aby souhlasil s číslováním celkové topologie sítě, a má přiřazeno číslo, podle kterého je možná jeho identifikace k příslušné etapě předpínání. Tento seznam též obsahuje rozloženou jednotkovou sílu.

A.4.4 IDENTSKRUZ

Tento program indenskrucz vytvoří soubor skruz .txt kde jsou uloženy informace o typu prutu skruže. Tato identifikace je založena na informacích z výstupu

programu T3D. Přiřazení je následující Příkaz pro spuštění je `identskruz`

vlastnost	prvek
1	diagonály
2	příčník
3	vzpěry bednění
4	dolní pásnice
5	horní pásnice
6	kolejnička
7	dolní příčník
8	výplň dolního pasu
9	výplň dolního pasu
10	výplň horního pasu
11	výplň horního pasu

Tabulka A.4.2: Přiřazení vlastností prvkům skruže v programu `identskruz`.

`skruz.top skruz.idet`, kde `skruz.top` je výstupní soubor z programu T3D s topologií sítě skruže, soubor `skruz.ident` obsahuje číslo elementu a jeho vlastnost.

A.4.5 VERZEL

Jako vstup používá program `verzel` soubory `skruz.top` s topologií skruže z T3D a soubor `mostovka.top` z programu `convertt3d2sifel`. Vyrobí soubor `soubor.top` s celkovou topologií skruže a mostovky, přičemž uzly a prvky mostovky přečísluje. Vyrobí též soubor `soubor.pr` se šablonou pro preprocessor MECHPREP. Je-li zvolena volba 1, vygeneruje šablonu pro elasticky výpočet.

Je-li zvolena volba 2, vygeneruje šablonu pro dotvarování. Podpory skruže v této verzy tvoří pilíře pole, jež je aktuálně budováno. Příkaz pro spuštění je `verze1 skruz.top mostovka.top jmeno 1`. Jednotlivé parametry byly výše objasněny, parametr `jmeno` je jméno pro výstupní soubory se šablonou a celkovou sítí.

A.4.6 VERZE2

Jako vstup používá program `verze2` soubory `skruz.top` s topologií skruže z T3D a soubor `mostovka.top` z programu `convertt3d2sifel`. Vyrobit soubor `soubor.top` s celkovou topologií skruže a mostovky, přičemž uzly a prvky mostovky přečísleje. Vyrobit též soubor `soubor.pr` se šablonou pro preprocesor MECH-PREP. Je-li zvolena volba 1, vygeneruje šablonu pro elastický výpočet. Je-li zvolena volba 2, vygeneruje šablonu pro dotvarování. Podpory skruže v této verzy tvoří sprážen s uzly mostovky na konci konzoly a následující pilíř. Příkaz pro spuštění je `verze2 skruz.top mostovka.top jmeno 1`. Jednotlivé parametry jsou výše uvedeny. Parametr `jmeno` je jméno pro výstupní soubory se šablonou a celkovou sítí.

A.4.7 IDENTMZATIZENI

Program `identmzatizeni` vygeneruje nový vstup pro MEFEL. Přidá do souboru `.in` průřezové charakteristiky skruže na základ souboru `skruz.txt`, jež vytvořil program `identskruz`. Je-li zvolena volba 1, tak program přetiskne zatížení elementů vlastní tíhou. Je-li zvolena volba 2, nahradí zatížení elementů za zatížení uzlů. To je načteno ze souborů `podelne.txt` a `pricne.txt`, jež vytvoří program `indentmpredpeti` a přenásobeno velikostí odpovídající síly. Je-li zvolena

volba 3, doplní program uzly zatížené silou a přetiskne elementy zatížené vlastní tíhou Vše ostatní je přetištěno. Příkaz pro spuštění je `identmzatzeni #verze skruz . ident`, kde `#verze` je číslo verze, která má být spuštěna, viz výše, a soubor `skruz . ident` je soubor, jež obsahuje identifikované prvky skruže (viz kap. A.4.4). Po tomto spuštění se objeví nápověda pro zadání parametrů pro zvolenou verzi.

A.5 Programy pro generování topologie pouze mostovky a šablon pro MEFEL

Tyto programy jsou umístěny na přiloženém CDROMu v adresáři `PROGRAMY/MOSTOVKA`. Programy jsou napsány v jazyce C. Programy byly vytvořeny pro účel této diplomové práce a vytvořil je autor této diplomové práce.

A.5.1 IDENTMOPREDPRIC A IDENTMOPREDPOD

Tyto programy vytvářejí stejné seznamy jako program A.4.3, ale uzly nijak nepřechíslovávají, neboť v tomto případě to není potřeba. Příkaz pro spuštění je následující: `identmopred... mostovka.top soubor.pred`. Za vynechané tečky se doplní buď `pod` a soubor `.pred` se zamění za `podelne.pred` pro podélné předpětí a nebo `pric` a soubor `.pred` se zamění za `pricne.pred` pro příčné předpětí.

pořadí	program	stručný popis
1	T3D	generuje síť konečných prvků
2	convertt3d2sifel	konvertuje síť z formátu T3D do formátu MEFEL
3	mocreep	vyrobí topologii a šablonu pro mostovku
4	MECHPREP	vyrobí vstupní soubor pro MEFEL
5	identmpredpod	vyrobí seznam uzlů zatížených podélným předpětím
6	identmpredpric	vyrobí seznam uzlů zatížených příčným předpětím
7	mocreppredvlt	doplní zatížení a průřezy do vstupního souboru
8	MEFEL	vypočte výsledky numerického modelu
9	GiD	zpracování výsledků

Tabulka A.5.1: Posloupnost programů pro výpočet mostovky bez skruže.

A.5.2 MOCREEP

Tento program vygeneruje šablonu a topologii sítě pouze pro mostovku. Není zde simulována postupná výstavba, celý most je počítán naráz. Příkaz pro spuštění je: `moscreep mostovka.top creep`, kde soubor `mostovka.top` je soubor s topologií sítě mostovky a `creep` jsou jména pro výstupní soubory se šablonou a odpovídající sítí.

A.5.3 MOCREEPPREDVLT

Program `mocreppredvlt` vygeneruje nový vstup pro MEFEL. Přidá do vstupního souboru zatížení uzlů. To je načteno ze souborů `podelne.txt` a `pricne.txt`, jež vytvoří program `indentmopredpos` a `identmopredvlt` a je přenásobeno velikostí odpovídající síly. Vše ostatní je přetištěno. Příkaz pro spuštění je `mo-`

creeppred podelne.txt 2,394e+06 pricne.txt 0,894e+06 soubor.in newsoubor.in. Parametry spuštění byly výše popsány. Čísla udávají velikost podélné a příčné předpínací síly v jednom kanálku. Parametr newsoubor.in je jméno pro nový vstupní soubor pro MEFEL.

A.6 Skripty preloz.sh a vytvor.sh

V adresářích PROGRAMY/MOST a PROGRAMY/MOSTOSTOVKA jsou umístěny zdrojové soubory. Pro jejich překlad je vytvořen skript preloz.sh, který soubory cpp přeloží s pomocí překladače GNU g++.

Skript vytvor.sh vytváří v každém adresáři, kde je umístěn, vstupní soubory pro program MEFEL. Využívá při tom výše zmíněné programy.

A.7 Program pro porovnání

Program porovnaní nejdříve vybere uzly, na nichž budou výsledky porovnávány s geodetickým měřením. Pak vybere výsledky v časových krocích, jež těmto uzlům odpovídají.

Literatura

- [Bažant and Baweja(1995)] Zdeněk P. Bažant and Sandeep Baweja. Creep and shrinkage prediction model for analysis and desing of concrete structures: Model b3. *Materials and Structures*, 28:357–367, 1995. <http://www.civil.northwestern.edu/people/bazant/PDFs/Papers/334.pdf>.
- [Bažant and Y.Xi(1995)] Zdeněk P. Bažant and Y.Xi. Continuous retardation spectrum for solidification theory of concrete creep. *J.Engrg.Mech*, 121, 1995. ASCE.
- [Bittnar and Šejnoha(1992)] Zdeněk Bittnar and Jiří Šejnoha. *NUMERICKÉ METODY MECHANIKY 1*. Vydavatelství ČVUT, Thákurova 1 16041 Praha 6, první vydání, 1992.
- [Brdička et al.(2000)] Miroslav Brdička et al. *MECHANIKA KONTINUA*. Academia, nakladatelství Akademie věd České republiky, Legerova 61 12000 Praha 2, druhé vydání, 2000.
- [Hrdoušek et al.(2005)] Vladislav Hrdoušek et al. *BETONOVÉ MOSTY 2*. Vydavatelství ČVUT, Thákurova 1 16041 Praha 6, první vydání, 2005.
- [Janda et al.(1988)] Lubor Janda et al. *Betonové mosty*. SNTL, Praha, první vydání, 1988.

- [Jirásek and Bažant(2001)] Milan Jirásek and Zdeněk P. Bažant. *Inelastic analysis of structures*. John Wiley & Sons Ltd., The Atrium Southern Gate, Chichester West Sussex PO 19 8SQ, England, first edition, 2001.
- [Jirásek a Zeman(2006)] Milan Jirásek a Jan Zeman. *PŘETVÁŘENÍ A PORUŠOVÁNÍ MATERIÁLŮ Dotvarování, plasticita, lom a poškození*. Vydavatelství ČVUT, Thákurova 1 16041 Praha 6, první vydání, 2006.
- [Kohoutková et al.(2005)] Alena Kohoutková et al. *BETONOVÉ KONSTRUKCE I*. Vydavatelství ČVUT, Thákurova 1 16041 Praha 6, první vydání, 2005.
- [Krejčí a Koudelka(2006)] Tomáš Krejčí a Tomáš Koudelka. *Modelování postupné betonáže pro tlusté základové desky - Modelování vlivu klimatických podmínek a vývinu hydratačního tepla*. CIDEAS - Centrum integrovaného navrhování progresivních stavebních konstrukcí, 2006.
- [Kruis et al.(2006a)] Jaroslav Kruis et al. *Manual of GEFEL*. Katedra mechaniky Fakulta stavební ČVUT, http://cml.fsv.cvut.cz/~sifel/SIFEL/WEB_TEMPLATES/MANUAL/GEFEL/gefel.pdf, 2006a.
- [Kruis et al.(2006b)] Jaroslav Kruis et al. *Manual of MEFEL*. Katedra mechaniky Fakulta stavební ČVUT, http://cml.fsv.cvut.cz/~sifel/SIFEL/WEB_TEMPLATES/MANUAL/MEFEL/mefel.pdf, 2006b.
- [Kvasnica et al.(2004)] Jozef Kvasnica et al. *MECHANIKA*. Academia, nakladatelství Akademie věd České republiky, Legerova 61 12000 Praha 2, druhé vydání, 2004.

- [Novák et al.(1999)] Jaroslav Novák et al. *NAUKA O MATERIÁLECH 10 Stavební materiály I*. Vydavatelství ČVUT, Thákurova 1 16041 Praha 6, dotisk prvního vydání, 1999.
- [Procházka et al.(2002)] Jaroslav Procházka et al. *BETONOVÉ KONSTRUKCE PŘÍKLADY PODLE EUROCODE 2*. Česká betonářská společnost, Praha, sedmé vydání, 2002.
- [Šmerda a Křístek(1978)] Zdeněk Šmerda a Vladimír Křístek. *Dotvarování a smršťování betonových prvků a konstrukcí*. SNTL - Nakladatelství technické literatury, Praha, první vydání, 1978.