



ČVUT V PRAZE, FAKULTA STAVEBNÍ
KATEDRA OCELOVÝCH A DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍ

OCELOVÉ MOSTY 1

Téma přednášky:
MODELOVÁNÍ MOSTNÍCH
KONSTRUKCÍ

prof. Ing. Pavel Ryjáček, Ph.D.

1



Modelování mostních konstrukcí

Základní právní předpisy pro rozsah a provedení projektové dokumentace a výpočtu:

- 1. Vyhláška č. 499/2006 Sb. o dokumentaci staveb**
- 2. Vyhláška č. 146/2008 Sb. o rozsahu a obsahu projektové dokumentace dopravních staveb**

Dále na tyto předpisy navazují resortní upřesňující požadavky:

ŘSD – TKP – Technickokvalitativní podmínky
 - TKP – D - Technickokvalitativní podmínky pro dokumentaci staveb

V těchto dokumentech je stanoven rozsah projektu pro různé stupně PD.

Dále jsou definovány požadavky na statický výpočet, jeho strukturu a rozsah.

Statický výpočet musí prokázat, že konstrukce splnila požadavky směrnice 89/106/EEC pro stavební výrobky:

- Mechanická odolnost a stabilita konstrukce
- Požární odolnost

2



Modelování mostních konstrukcí

Základní požadavky na statický výpočet:

1. Přehlednost a kontrolovatelnost
2. Údaje a předpoklady
3. Přehledné výsledky
4. Musí zahrnovat všechny rozhodující stavy
5. Musí obsahovat podmínky působení konstrukce
6. Musí postupovat od podporovaných prvků k podporujícím
7. Průkaz požární bezpečnosti
8. Údaje o použitém software, literatuře, normách

3



Modelování mostních konstrukcí

Stavební konstrukci musíme pro posouzení **idealizovat**.

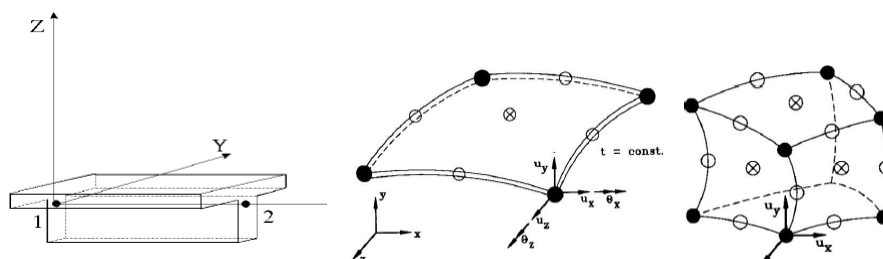
Idealizace konstrukce je nejdůležitější rozhodnutí, které ve statickém výpočtu provedeme a zcela zásadně ovlivňuje získané výsledky !!!!

Reálnou konstrukci pak idealizujeme pomocí různých prvků, dle typu výpočtu:


- Prutové
- Plošné
- Objemové

Přesné nadělení pak závisí na stupni výpočtu a požadované přesnosti.

Většinou je potřeba vytvořit modelů více, pro různé efekty různé modely.



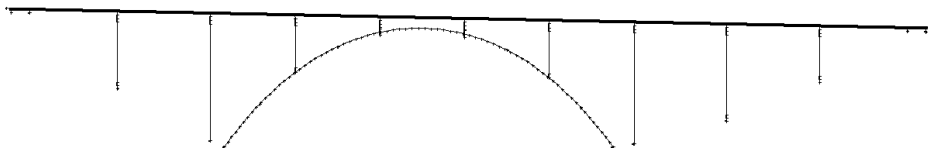
4




Modelování mostních konstrukcí

Rovinný prutový model

- Nejjednodušší
- Konstrukce je nahrazena pouze jednou rovinou, nelze zohlednit prostorové účinky
- Nelze zohlednit příčné zatížení
- Jednoduchost modelu naopak umožňuje provádět některé velmi náročné nelineární výpočty, dotvarování, postupy výstavby atd.



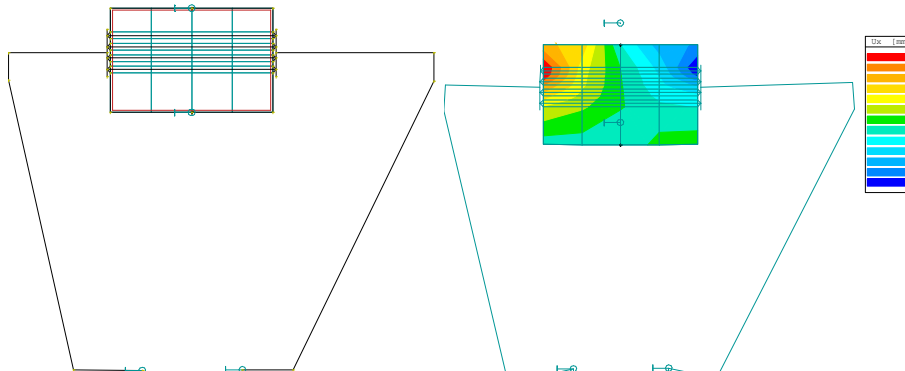
5



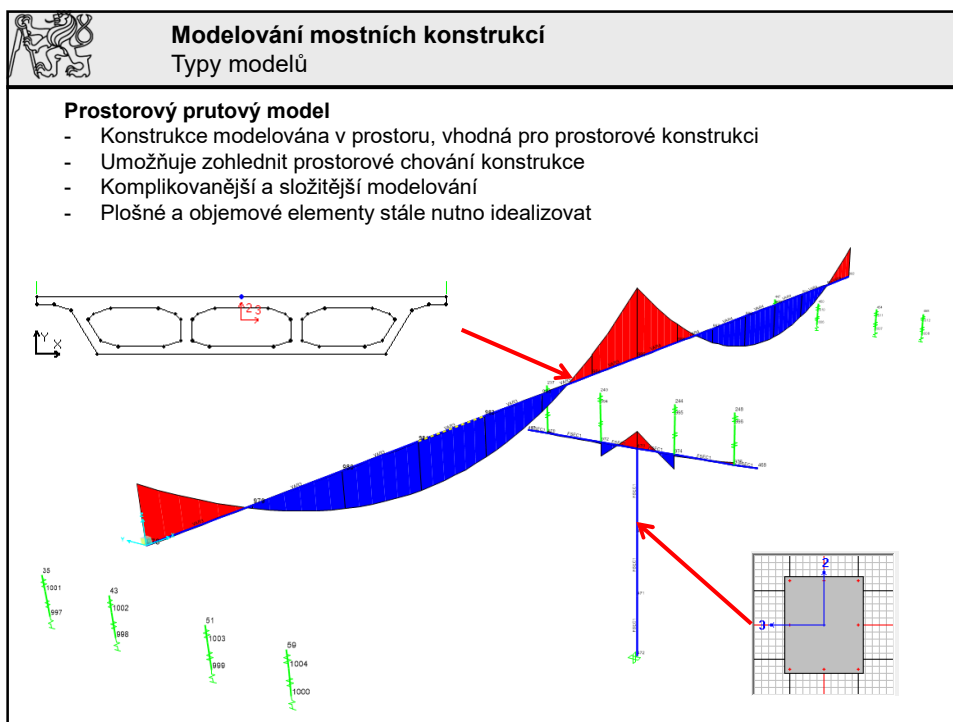
Modelování mostních konstrukcí

Rovinný plošný model

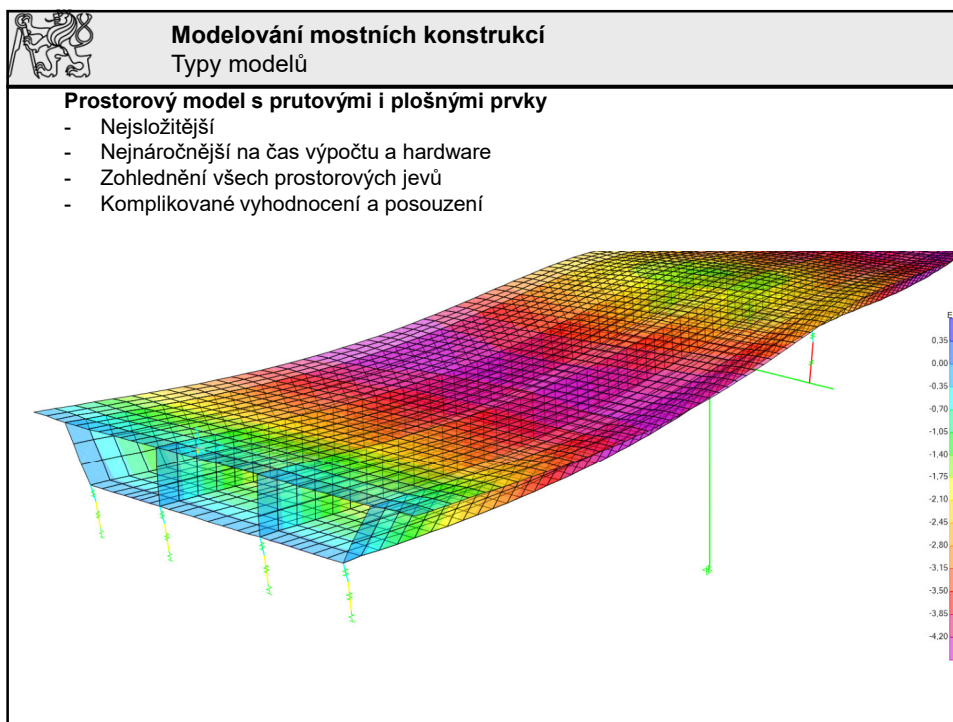
- Jednoduchý
- Konstrukce je nahrazena pouze jednou rovinou, nelze zohlednit prostorové účinky
- Nelze zohlednit příčné zatížení
- Jednoduchost modelu naopak umožňuje provádět některé velmi náročné nelineární výpočty, dotvarování, postupy výstavby atd.
- Plošné prvky umožňují modelovat lokální problémy a detaily




6



7



8

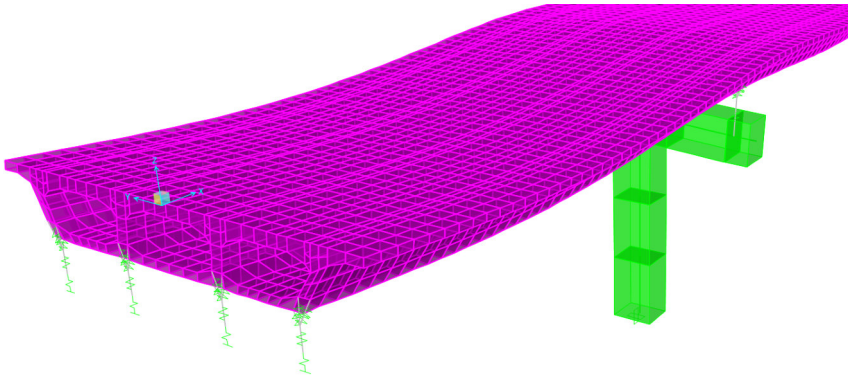


Modelování mostních konstrukcí


Typy modelů

Prostorový model s prostorovými prvky „bricky“

- Nejkomplikovanější, drahé a obtížně dostupné software
- Umožňuje modelovat speciální detaily konstrukcí
- Využití spíše u betonových konstrukcí
- Ocel je často tvořena plechy a lze ji tak zjednodušovat na rovinné prvky



9



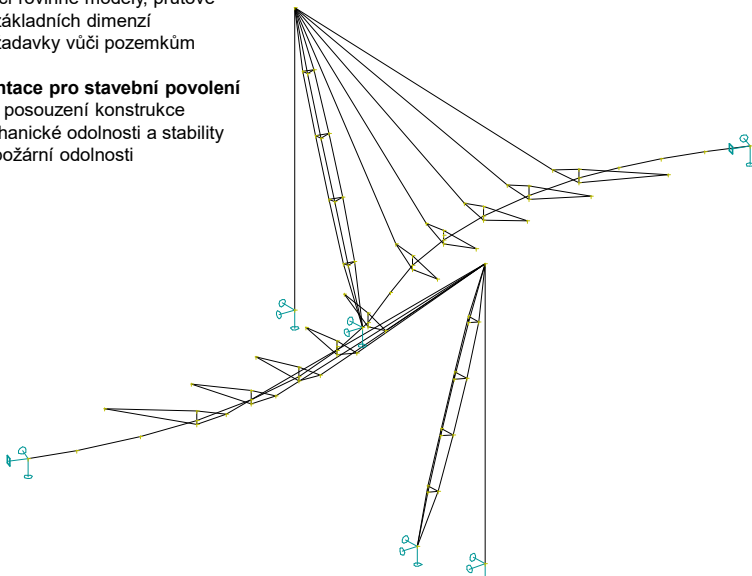
Modelování mostních konstrukcí

DÚR – Dokumentace pro územní rozhodnutí

- Zde se většinou jedná o prokázání realizovatelnosti konstrukce
- Často postačí rovinné modely, prutové
- Posouzení základních dimenzí
- Důležité požadavky vůči pozemkům

DSP – Dokumentace pro stavební povolení

- Podrobnější posouzení konstrukce
- Průkaz mechanické odolnosti a stability
- Posouzení požární odolnosti

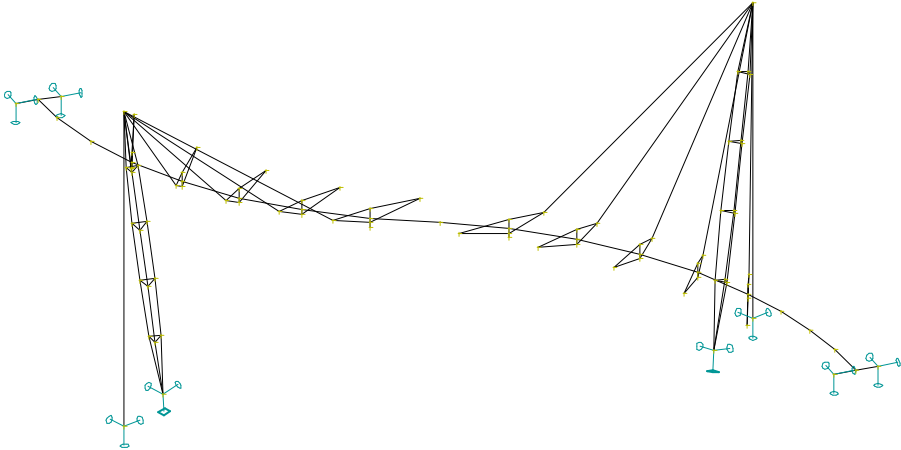


10

Modelování mostních konstrukcí

DZS - Dokumentace pro zadání stavby

- Nutno provést podrobný výpočet tak, aby bylo konstrukci možno ocenit zhotovitelem
- Dořešení detailů s ohledem na pracnost výstavby – vliv na cenu
- Stanovení hmotnosti konstrukce, řešení detailů

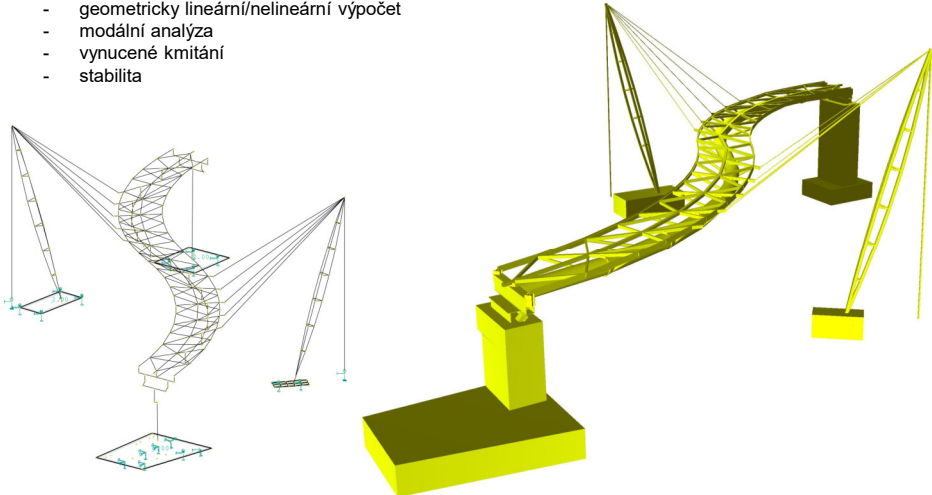


11

Modelování mostních konstrukcí

RDS – Realizační dokumentace

- Poslední stupeň
- Nutno posoudit podrobně celou konstrukci
- Kombinace více modelů pro různé vlivy
- Posouzení detailů – samostatné modely
- geometricky lineární/nelineární výpočet
- modální analýza
- vynucené kmitání
- stabilita



12

Modelování mostních konstrukcí

Trend v modelování konstrukcí a mostů.

U staticky neurčitých konstrukcí ovlivňuje tuhost podloží a podepření namáhání konstrukce .

Podloží lze zohlednit různými způsoby:

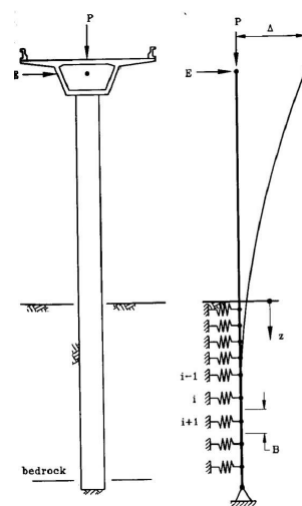
- V místě podpor pružnou konstantou
- Přímé modelování založení
- Soilin systém

Výhody:

- Zohlednění vlivu založení, sedání podpor
- Díky poddajnosti podpor lze nalézt úspory a redukovat namáhání konstrukce
- Nejvěrnější vystižení skutečného chování konstrukce
- Potřebné pro stanovení namáhání skupin pilot

Nevýhody

- Obtížné stanovitelné parametry založení
- Základové půdy mají značný rozptyl parametrů
- Udávané parametry jsou „bezpečné“ – tedy s menším E_{def} , menší únosností
- Tato bezpečnost ale může být díky podhodnocení tuhosti založení nebezpečná
- Proto lépe více modelů s různými parametry, nalézt okrajové podmínky

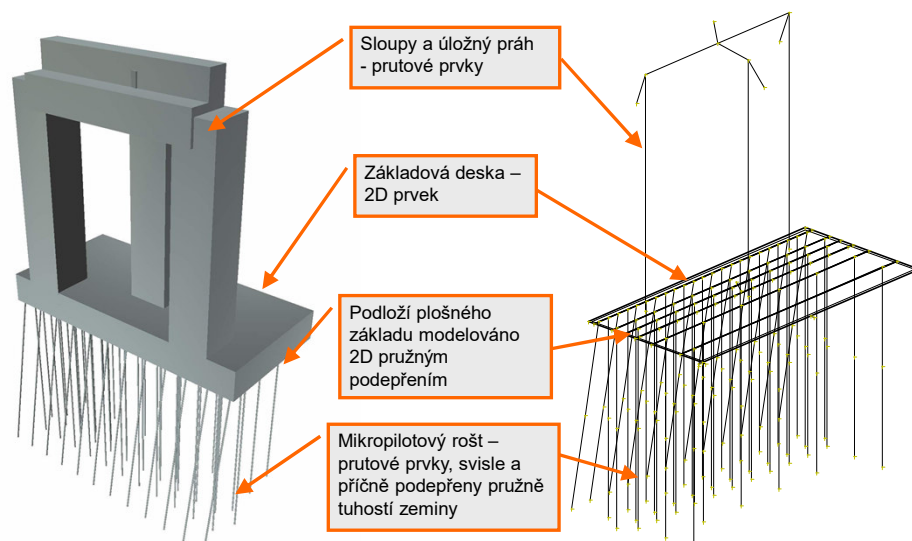


13

Modelování mostních konstrukcí

Podloží lze zohlednit různými způsoby:

- Přímé modelování založení – dočasný pilíř mostu Košická



Labels in the diagram:

- Sloupy a úložný práh - prutové prvky
- Základová deska – 2D prvek
- Podloží plošného základu modelováno 2D pružným podepřením
- Mikropilotový rošt – prutové prvky, svisle a příčně podepřeny pružně tuhostí zeminy

14



Modelování mostních konstrukcí

Modelování styčníků, spojů a detailů

- Zásadní pro stanovení vnitřních sil
- Nutno vždy daný styk rozmyslet, zda je kloubem, vetknutím či pružným kloubem
- Pokud nevíme – provést více modelů, s klouby i s vetknutím
- Zohledňovat tuhé vazby a excentricity

Příklad – železniční most Bečov

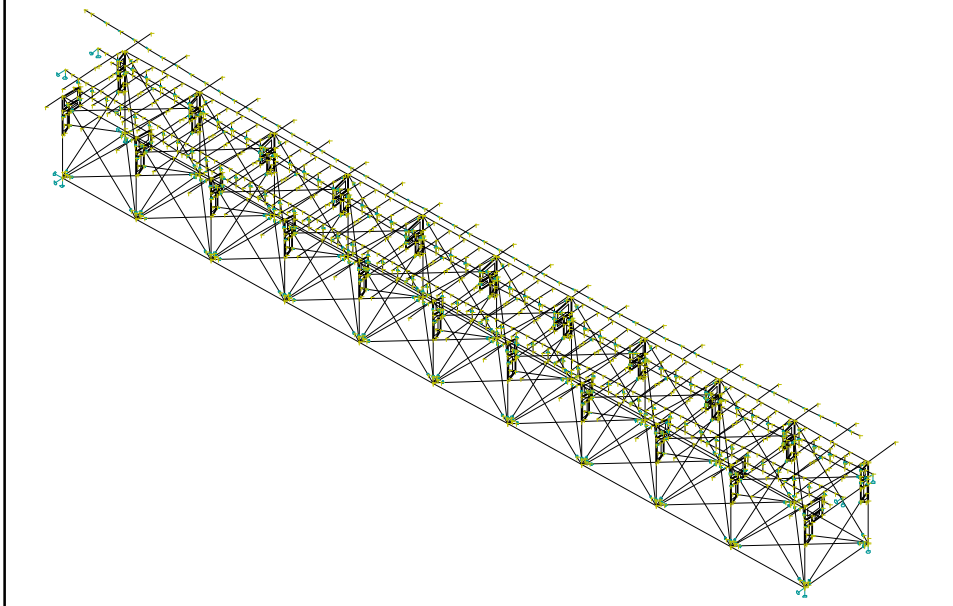


15




Modelování mostních konstrukcí

Příklad – železniční most Bečov


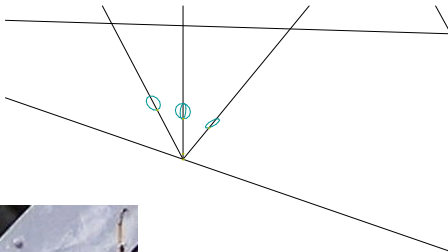


16



Modelování mostních konstrukcí

Příklad – železniční most Bečov

17



Modelování mostních konstrukcí
 Pohyblivé zatížení

Modelování pohyblivého zatížení

- Nezbytné pro posouzení mostů
- Nutno uvažovat odlehčující účinky
- Zatěžovací vlaky
- Pohyblivé zatížení
- Nutno porozumět, jak pohyblivé zatížení v daném programu funguje.

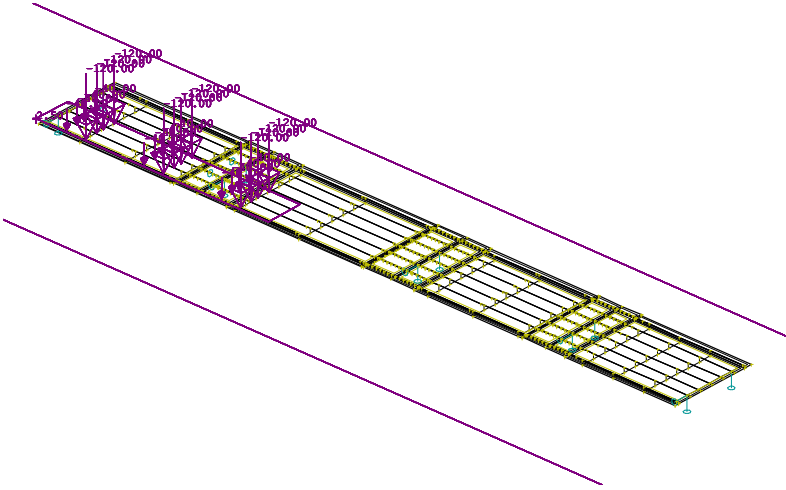


18

Modelování mostních konstrukcí Pohyblivé zatížení

Zatěžovací vlaky

- Jednoduchá a přehledná práce
- Nevýhodou zadávání platnosti zatížení na makra
- Z názoru nebo z příčinkových ploch

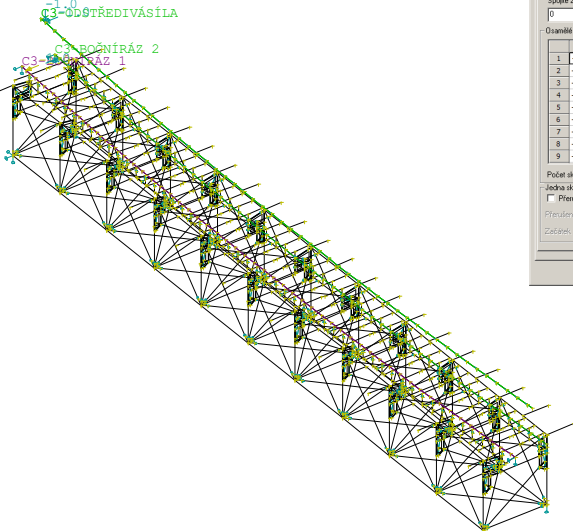


19

Modelování mostních konstrukcí Pohyblivé zatížení

Pohyblivé zatížení

- Definice dráhy pro pojezd soustavy
- Definice zatěžovací soustavy
- Vyhodnocení vždy pouze pro dané místo



Zatěžovací soustava

Jednoduchá zatěžovací soustava | Prodlížená zatěžovací soustava

Jméno: **Mak. CI. axy. účinné** | Národní norma: **CSN**

Procento pořadí osamělých zatížení: **0**

Společné zatížení | Osamělé zatížení

Společné zatížení: **0** kN/m | Společné zatížení: **0**

Osamělé zatížení

Id	Směr [m]	Odrazení [m]
1	-200	-52.5
2	-200	-50.7
3	-200	-46.2
4	-200	-44.4
5	-200	-41.4
6	-200	-39.6
7	-200	-35.1
8	-200	-33.3
9	-200	-30.3

Počet skupin: **1** | Místo: **1**


Je třeba skupiny zatížení: ☐ | Přesunutí společného zatížení v bodě skupiny osamělých zatížení: ☐

Přeměna zatížení: **0** kN/m | Konec přeměny: **0** m

Zatěžovací přeměna: **0** m | Konec přeměny: **0** m

OK | Storno | Pomoc | Návod

20



Modelování mostních konstrukcí

Pohyblivé zatížení

Pohyblivé zatížení

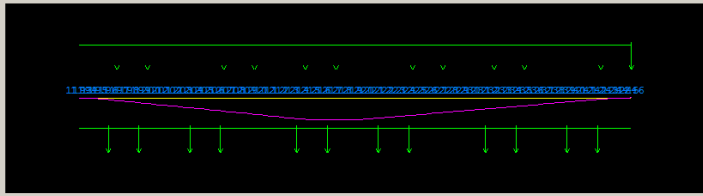
- Definice dráhy pro pojezd soustavy
- Definice zatěžovací soustavy
- Vyhodnocení pro dané místo

Číselný a grafický výstup - 1/16

Odpovídající Vz	-0.000	0.000	-0.000	[kN]
Odpovídající My	0.000	0.000	0.000	[kNm]
Odpovídající Mz	0.000	0.000	0.000	[kNm]


Poloha kladného maxima : Vlak C3 -svislý účinek

Popis	Od P	Od Q	P + Q	Jednotky
N kladné	1725.549	0.000	1725.549	[kN]
Odpovídající Vz	2.521	0.000	2.521	[kN]
Odpovídající My	24.672	0.000	24.672	[kNm]
Odpovídající Mz	0.753	0.000	0.753	[kNm]



< Před
Další >
Zavřít

21



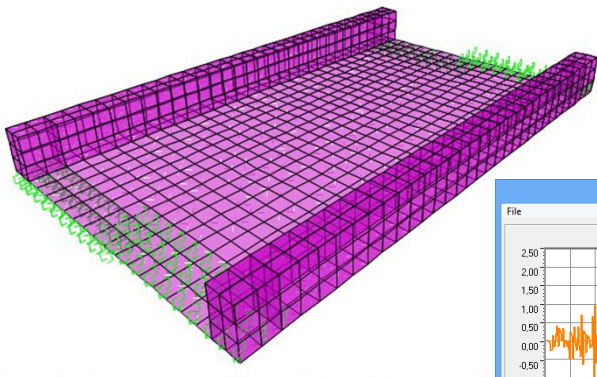
Modelování mostních konstrukcí

Pohyblivé zatížení

Pohyblivé zatížení – přímá integrace v čase

- Umožňuje stanovit chování při pojezdu zatížení
- Výsledkem statická i dynamická odezva
- Umožňuje pouze malé množství programů (Midas, CSI bridge, SAP2000....)

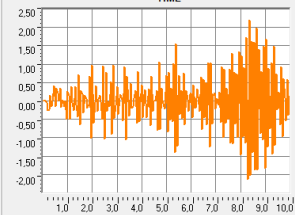
CSiBridge Filename: RoNe.bdb Deformed Shape Case: vlak15 Time 0.



Display Plot Function Traces (200kN axle)

File

TIME



Legend

Joint 17
Acceleration UZ

Min is -2.132e+00
at 8.300e+00

Max is 2.132e+00
at 8.350e+00

Joint 17

OK

22

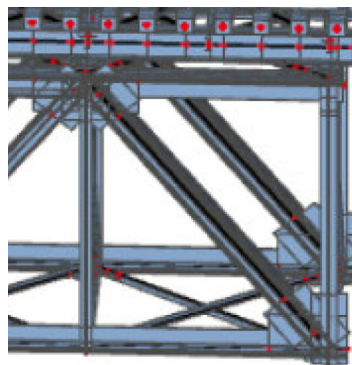
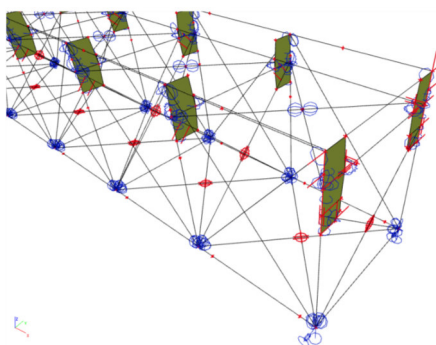


Modelování mostních konstrukcí

Prvkové mostovky – železniční mosty

Tvorba výpočetního modelu

- **Globální analýza - model:**
- nutno uvážit lokální vyztužení prutových prvků a jejich vzájemné propojení, například styčnickovými plechy.
- Důležité vystihnout vliv styčnickových plechů, významně ztužujících konstrukce
- Například u spoje svislice – příčník – horní pas, kde je účelné použít tuhý prut, nebo vložit 2D prvek



23

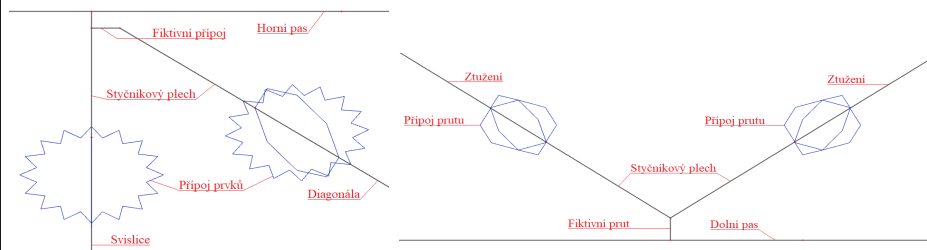


Modelování mostních konstrukcí

Prvkové mostovky – železniční mosty

Tvorba výpočetního modelu

- **Globální analýza - model:**
- nutno uvážit lokální vyztužení prutových prvků a jejich vzájemné propojení, například styčnickovými plechy.
- Důležité vystihnout vliv styčnickových plechů, významně ztužujících konstrukce
- Například u spoje svislice – příčník – horní pas, kde je účelné použít tuhý prut, nebo vložit 2D prvek



24

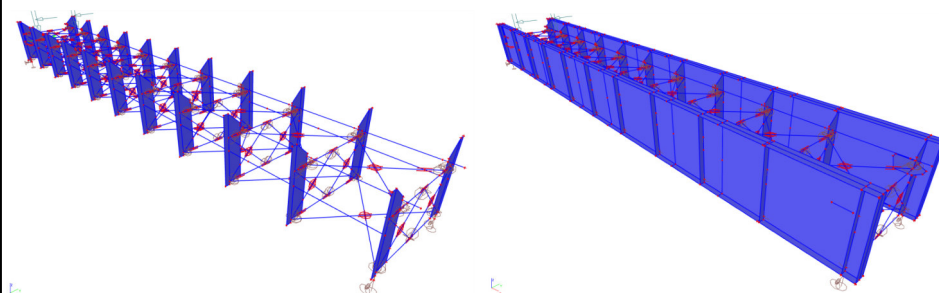


Modelování mostních konstrukcí

Prvkové mostovky – železniční mosty

Tvorba výpočetního modelu

- **Globální analýza - model:**
- Pro různé účinky je účelné použít kombinaci prutových a deskostěnových modelů
- Model prutový – posudek hlavních nosníků
- Model deskostěnový – posudky ztužení, příčníků



25

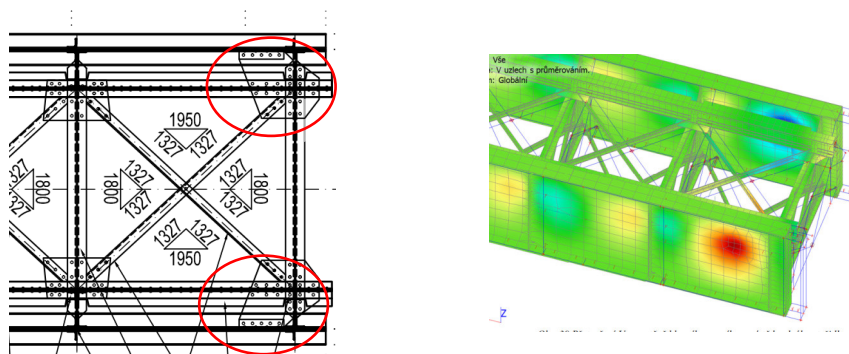


Modelování mostních konstrukcí

Prvkové mostovky – železniční mosty

Tvorba výpočetního modelu

- **Globální analýza - model:**
- Pro různé účinky je účelné použít kombinaci prutových a deskostěnových modelů
- Např. TU 2191, km 28,161 - Domašov - provedeno brzdné ztužidlo, ale s funkčností omezenou



26



Modelování mostních konstrukcí

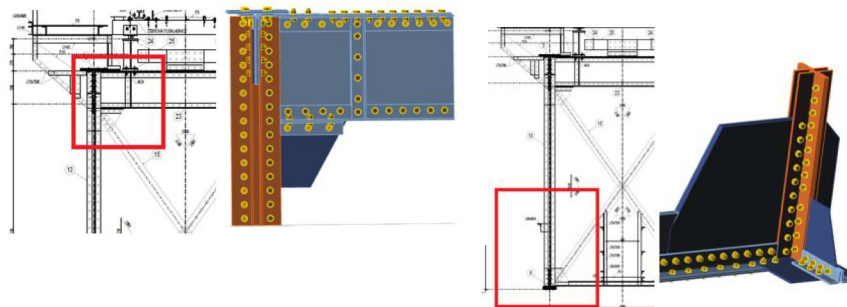
Prvkové mostovky – železniční mosty

Tvorba výpočetního modelu

- **Globální analýza - model:**
- Stanovení tuhosti styčníků a zabudování do modelu - zásadní je zejména připojení horní/dolní pas – příčník, a podélník-příčník, doporučujeme modelovat v IDEA Connection
- Pro odhad lze orientačně využít prediktivní regresní vztah:
- Pro profily do výšky menší než 550 mm:

$$S_j = 2 \times 10^{-7} \cdot I + 2.7436 \text{ [MNm/rad]},$$
- Pro profily výšky od 550 mm do 900 mm:

$$S_j = 4 \times 10^{-8} \cdot I + 31.012 \text{ [MNm/rad]},$$



27



Modelování mostních konstrukcí

Prvkové mostovky – železniční mosty

Tvorba výpočetního modelu

- V globálním modelu a pro posouzení prvků je nutné zohlednit **excentricity** prutů v přípojkách, které vyvolávají přidavné momenty na prutech.
- Typickými příklady jsou diagonály ztužení, připojené nesymetricky na styčnickový plech, záměrné excentricity prutů příhrady hlavního nosníku a další. U štíhlých prutů je vliv podružných momentů velmi významný.
- **Excentricity ale minimalizovat** – modelovat pruty blízko těžiškové roviny, excentricity použít jen k vyrovnání např. změny tloušťek

28

Modelování mostních konstrukcí
Prvkové mostovky – železniční mosty

Tvorba výpočetního modelu

- Mostovka – příklad modelu


29

Modelování mostních konstrukcí
Prvkové mostovky – železniční mosty

Tvorba výpočetního modelu

- Pokud se **členěný prut** (například dvojice U profilů) modeluje jedním prutem, je nutno zohlednit vliv snížené ohybové a smykové tuhosti ve směru spojek.
- Příklad – Kadaň - zadán modifikátor vlastností s úpravou ohybové tuhosti v rovině na 50%.

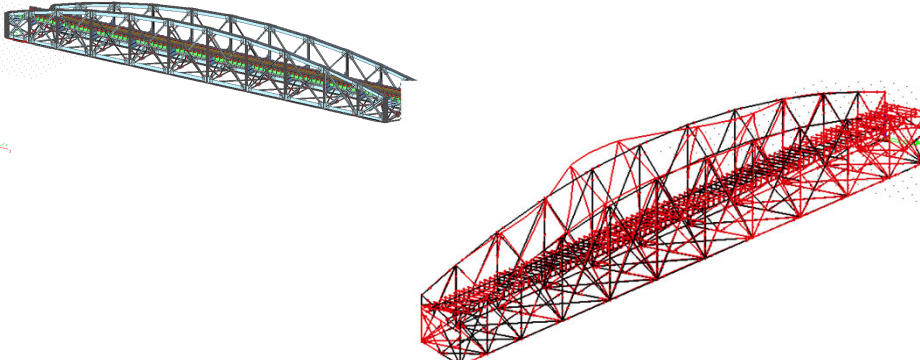
30




Modelování mostních konstrukcí
 Prvkové mostovky – železniční mosty

Tvorba výpočetního modelu

- Příklad – Kadaň - zadán modifikátor vlastností s úpravou ohybové tuhosti v rovině na 50%.
- Dopad změny tuhosti do vzpěrné délky horního pasu
- Nezohledněna reálná tuhost - $L_{cr} = 7,617 \text{ m}$
- Zohledněna reálná tuhost - $L_{cr} = 9,329 \text{ m}$



31



Modelování mostních konstrukcí
 Prvkové mostovky – železniční mosty

Tvorba výpočetního modelu

- Koroze v globálním modelu
- Koroze se zohlední v modelu, **jen pokud má vliv na globální tuhost prvku a konstrukce**
- Lokální oslabení se nemodeluje, výjimkou je takové oslabení, které mění statické schéma
- Příkladem je překorodování pásnic a tvorba kloubu na stojině
- Aplikace lokálního oslabení na celý prvek – **hrubá chyba !!!**

32

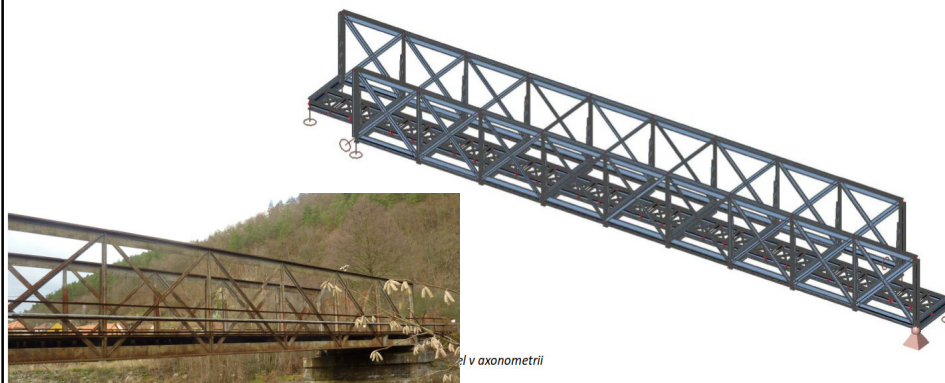


Modelování mostních konstrukcí

Prvkové mostovky – železniční mosty

Tvorba výpočetního modelu

- Při modelování ložisek je nezbytné zohlednit jejich **konstrukční vůle** či reálnou tuhost v ložisku, současně i s tuhostí spodní stavby. Zohlednění lze provést pomocí nelineární funkce v uložení, nebo pružným uložením.



33

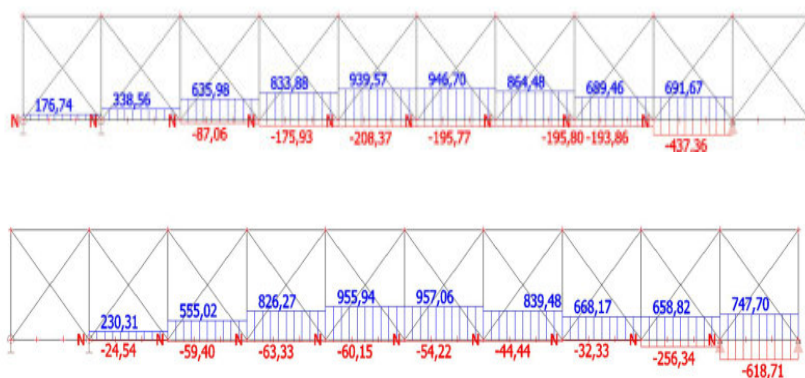


Modelování mostních konstrukcí


Prvkové mostovky – železniční mosty

Tvorba výpočetního modelu

- Důsledek chybného modelu – síla v dolním pase u opěry je blízká síle uprostřed rozpětí !!!



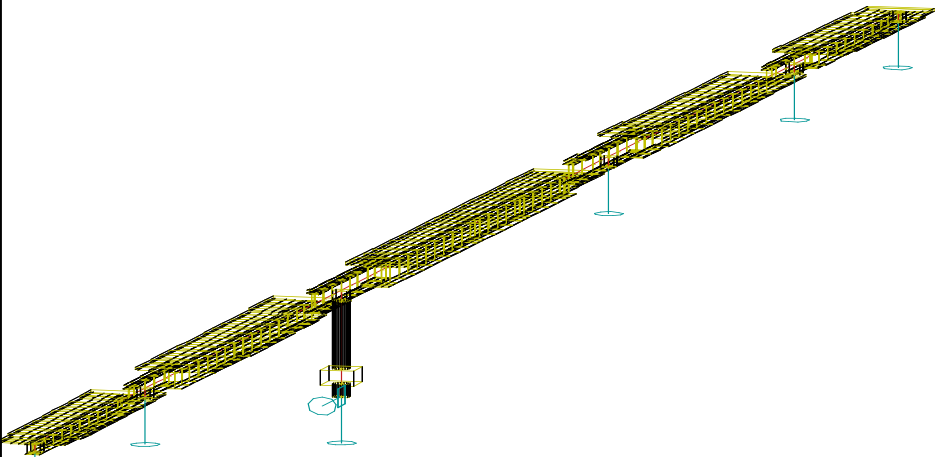
34




Modelování mostních konstrukcí
 Spřažené konstrukce

1. Prostý či spojitý nosník + příčný roznos

- Nejjednodušší způsob
- Popsáno v OCM1, skripta.
- V praxi spíše řídké,
- výjimkou jsou spojitě spřažené mosty kde se na tomto modelu vyšetřuje vliv času, tedy dotvarování konstrukce (TDA – Time dependent analysis)



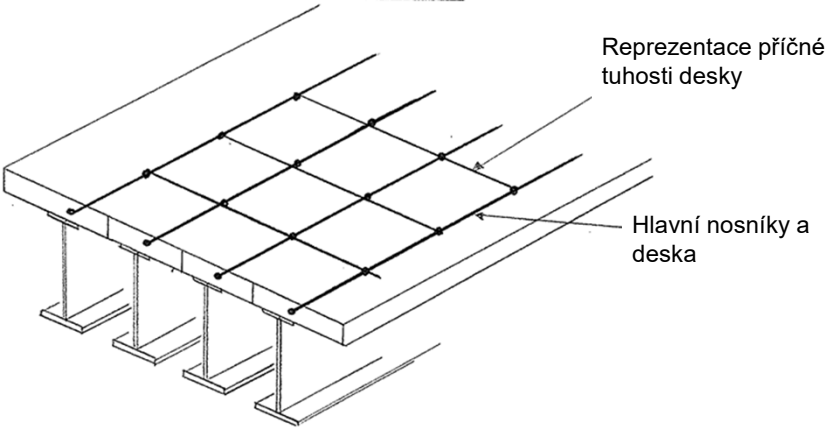
35



Modelování mostních konstrukcí
 Spřažené konstrukce

2. Roštový model

- Podrobnější, zohledňuje prostorové působení konstrukce
- Lze zahrnout vliv šikmosti, nerovnoměrnosti
- Zahrnuje příčné rozdělení
- Lze zohlednit potrhání betonu nad podporou
- Spíše starší programy – DEFOR, ROSPRE
- Nezahrnuje vliv smykového působení desky



36

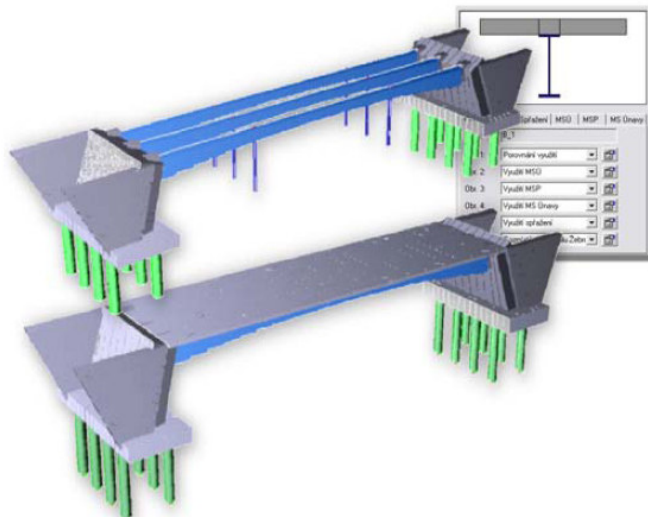


Modelování mostních konstrukcí

Spřažené konstrukce

2. Roštový model

- V současnosti používán pro některé komplexní software na posudky spřažených mostů - RIB-PONTI, MIDAS



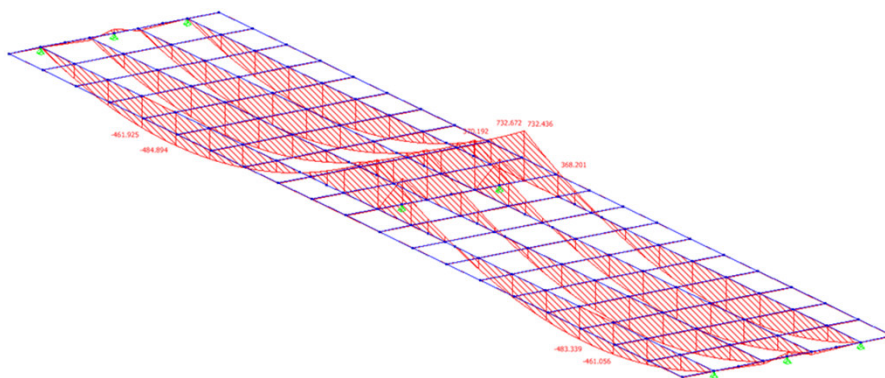
37



Modelování mostních konstrukcí

Spřažené konstrukce

2. Roštový model



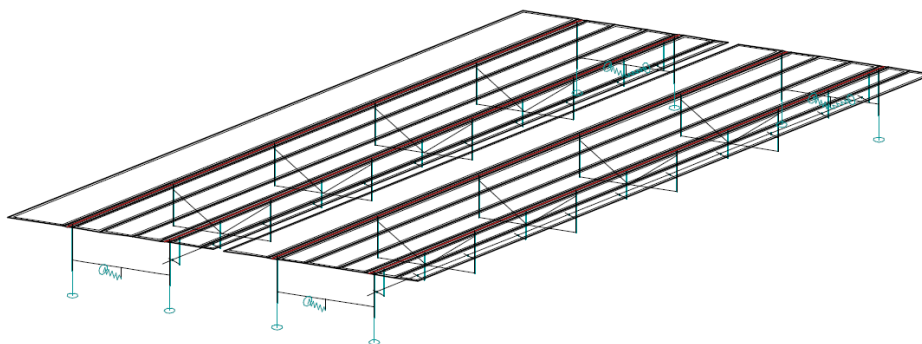
38



Modelování mostních konstrukcí Spřažené konstrukce

3. Deska s žebry

- Podrobný, zohledňuje prostorové působení konstrukce
- Lze zahrnout vliv šikmosti, nerovnoměrnosti
- Zahrnuje příčné roznášení, lze dobře zatěžovat, pojíždět nahodilým zatížením
- Problémem jak zohlednit potrhání beton nad podporou



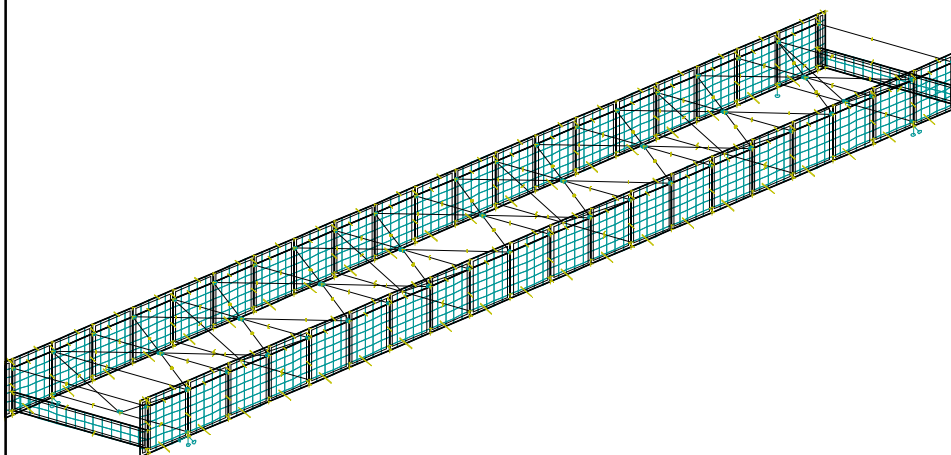
39




Modelování mostních konstrukcí Spřažené konstrukce

4. Prostorový deskostěnový model

- Velmi podrobný, zohledňuje prostorové působení konstrukce
- Prakticky nelze získat dimenzační veličiny
- Vhodný pro ověření specifických vlivů, jako půdorysné zakřivení, kroucení
- Lze zahrnout vliv šikmosti, nerovnoměrností, příčné síly, montáže a betonáže...



40



Modelování mostních konstrukcí

Spřažené konstrukce

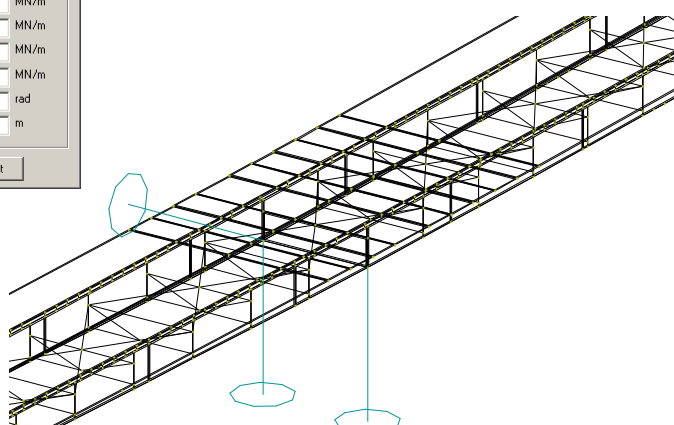
Modelování tažených oblastí betonu

- Důležité pro správné stanovení deformací a vnitřních sil
- U prutových modelů – změna průřezu
- U deskových „nasekáním desky“ na části
- Nebo využitím „ortotropie“


Parametry ortotropie

Ortotropie

D11	<input type="text" value="0"/>	MNm	d11	<input type="text" value="0"/>	MN/m
D22	<input type="text" value="0"/>	MNm	d22	<input type="text" value="0"/>	MN/m
D33	<input type="text" value="0"/>	MNm	d33	<input type="text" value="0"/>	MN/m
D44	<input type="text" value="0"/>	MN/m	d12	<input type="text" value="0"/>	MN/m
D55	<input type="text" value="0"/>	MN/m	Beta	<input type="text" value="0"/>	rad
D12	<input type="text" value="0"/>	MNm	Zat. t.	<input type="text" value="0"/>	m



41



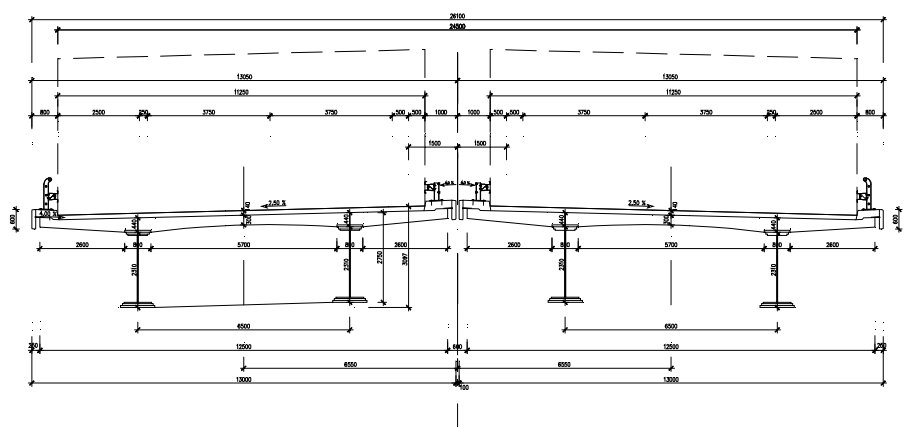
Modelování mostních konstrukcí

Spřažené konstrukce

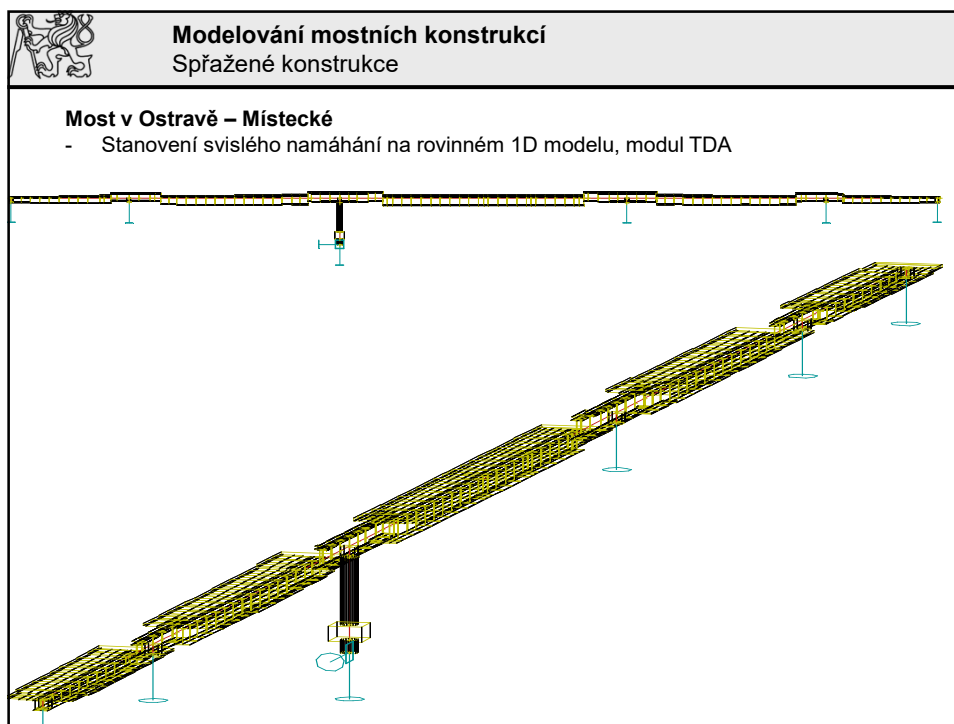
Most v Ostravě - Místecké

- Spojitý dvoutrámový most
- Pro posouzení několika různých modelů
- Stanovení svislého namáhání na rovinném 1D modelu, modul TDA
- Příčné účinky na prostorovém deskostěnovém modelu
- Model pro výsun a montážní ztužení – prutový 1D a prostorový deskostěnový

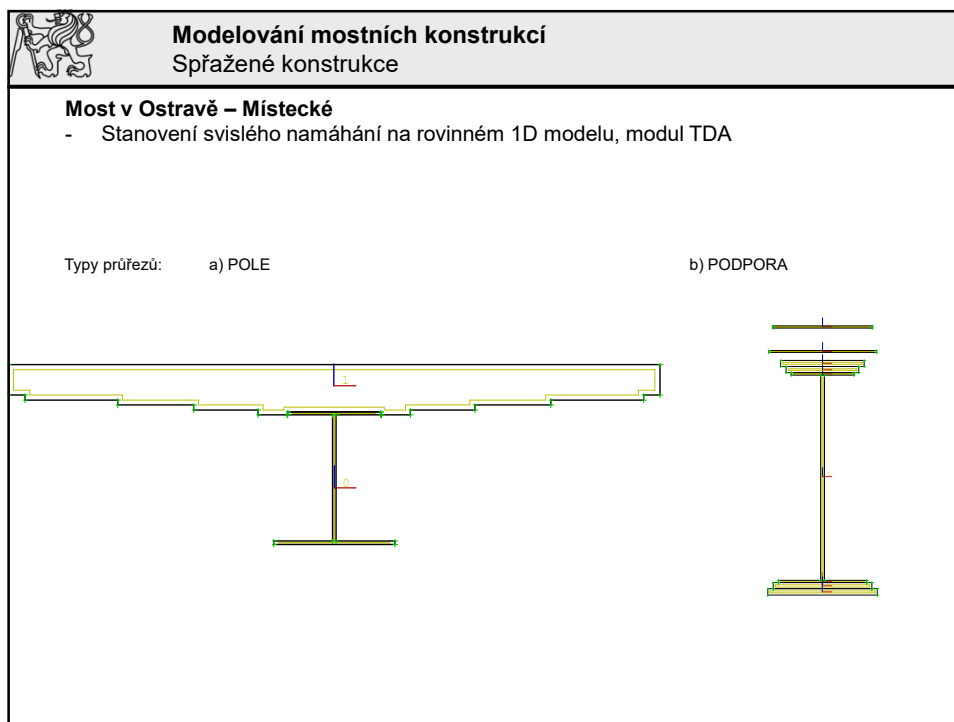
I/56 Místecká (206)



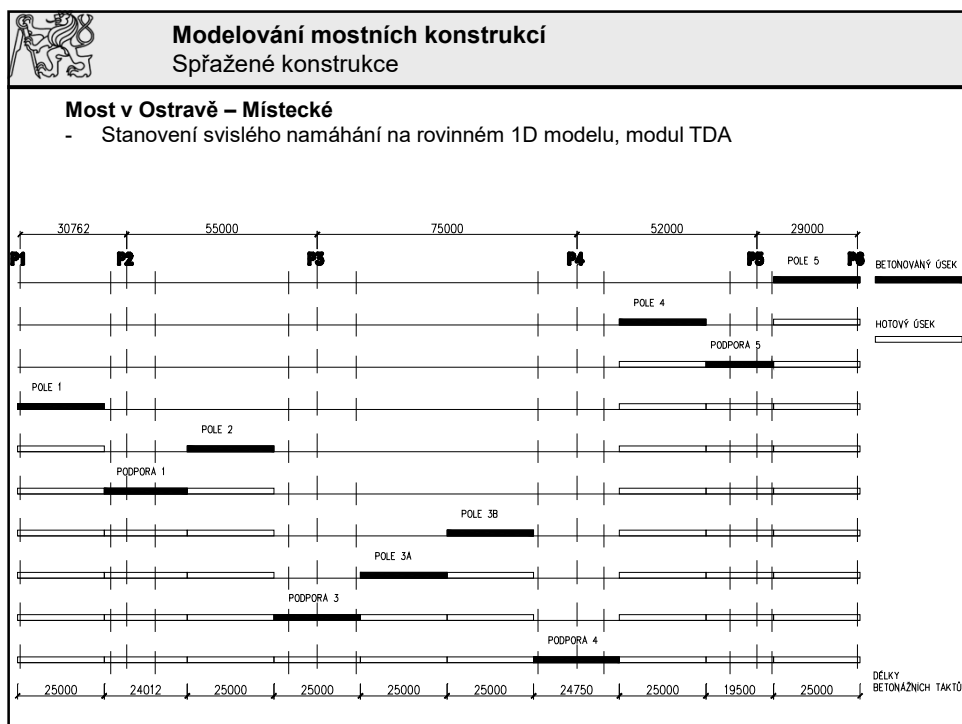
42



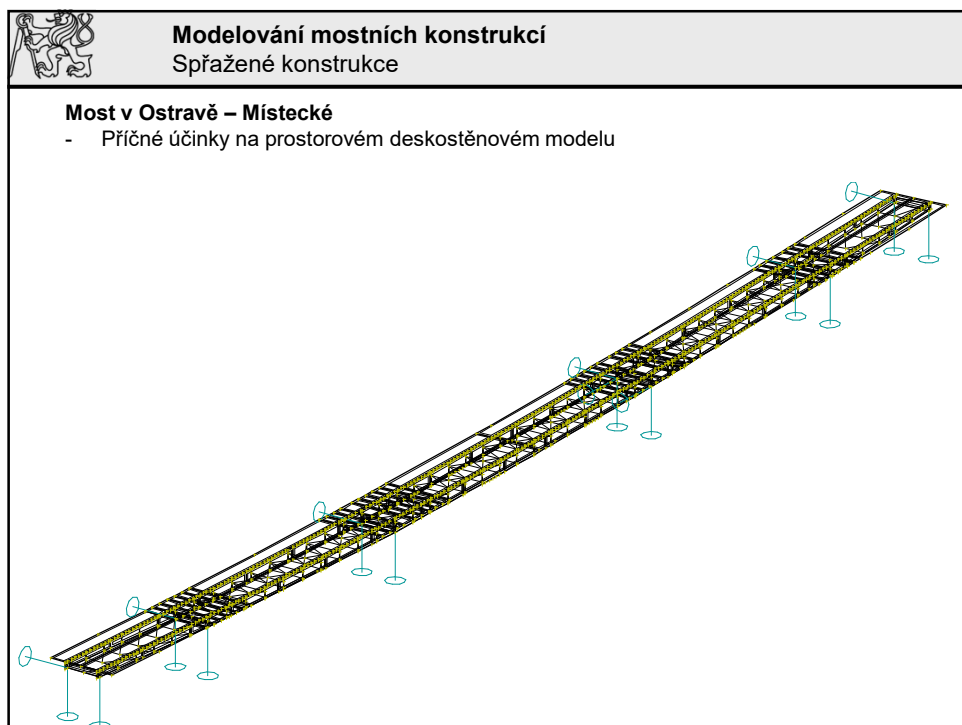
43



44



45



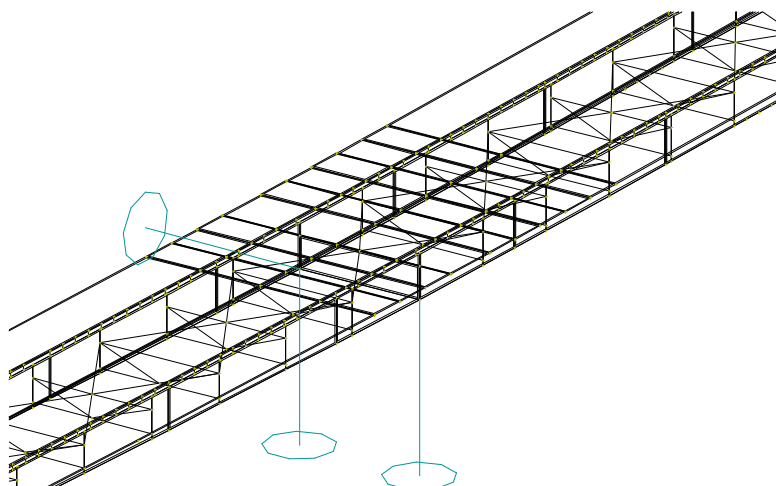
46



Modelování mostních konstrukcí Spřažené konstrukce

Most v Ostravě – Místecké

- Příčné účinky na prostorovém deskostěnovém modelu



47



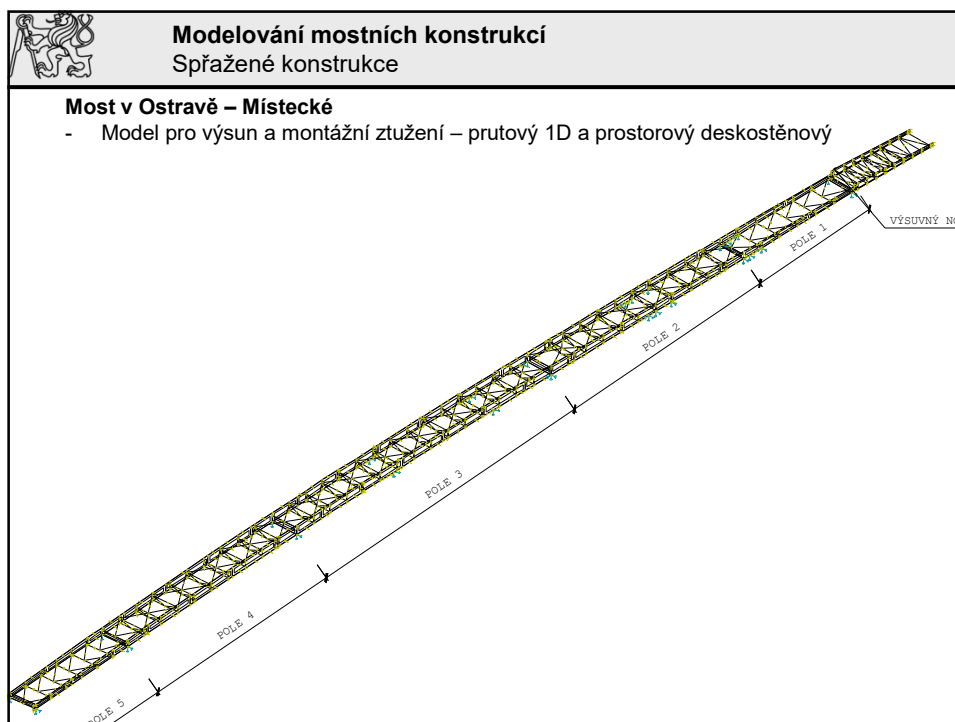
Modelování mostních konstrukcí Spřažené konstrukce

Most v Ostravě – Místecké

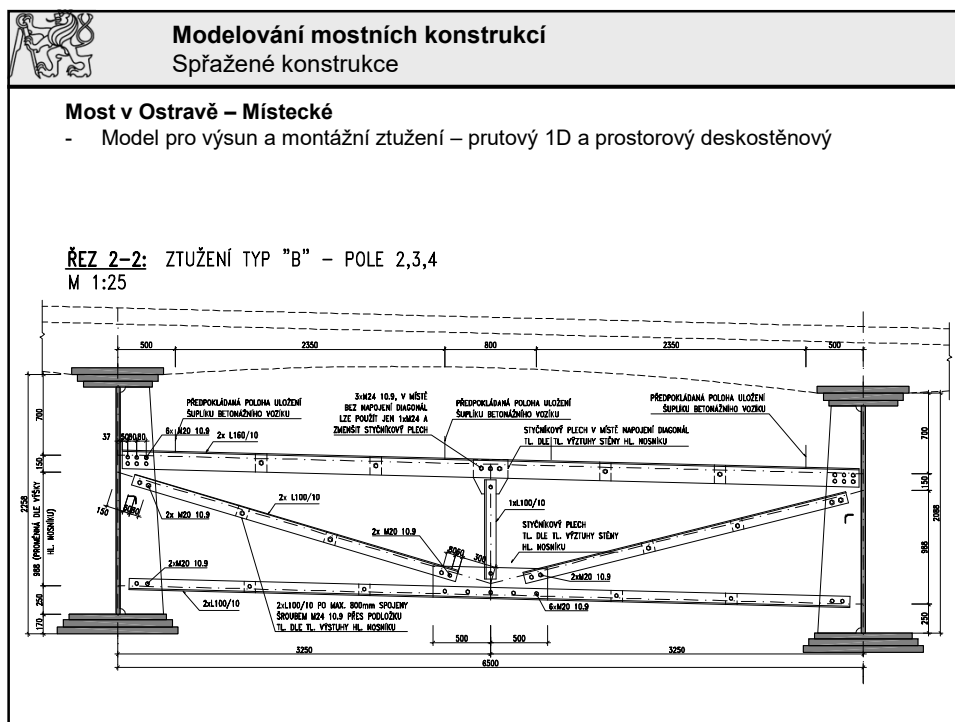
- Model pro výsun a montážní ztužení – prutový 1D a prostorový deskostěnový




48



49



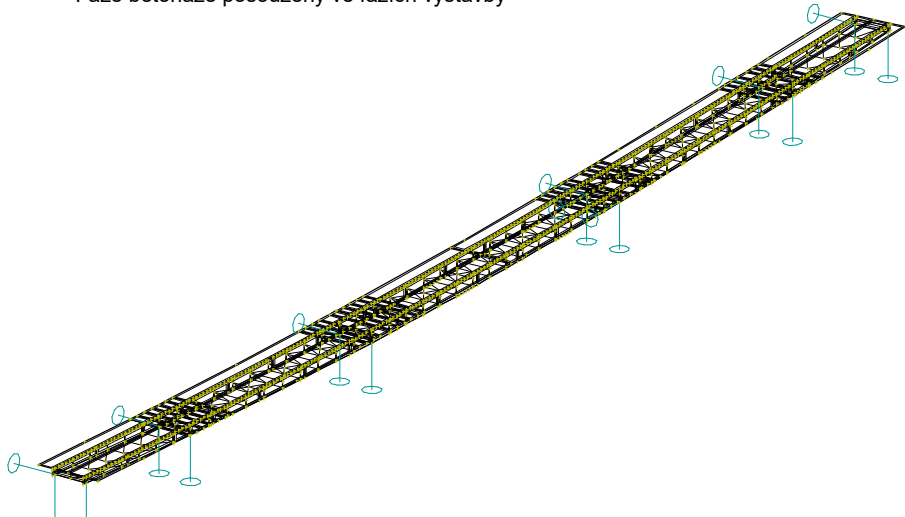
50




Modelování mostních konstrukcí
 Spřažené konstrukce

Most v Ostravě - Místecké

- Model pro montážní ztužení – prostorový deskostěnový, s ohledem na kroucení při betonáži
- Fáze betonáže posouzeny ve fázích výstavby



51



Modelování mostních konstrukcí

- Umožní vystihnout reálné chování konstrukce
- Nezbytné pro štíhlé konstrukce, visuté, zavěšené, s předpětím
- Neplatí systém superpozice
- Každý stav – samostatný výpočet
- Časově náročné

Nelinearity podpor

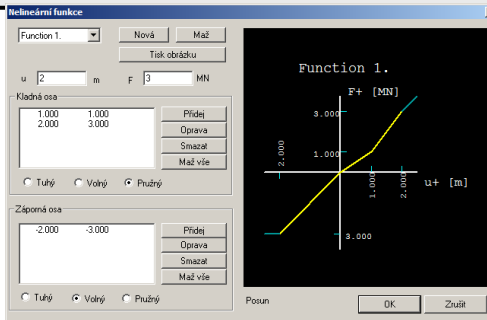
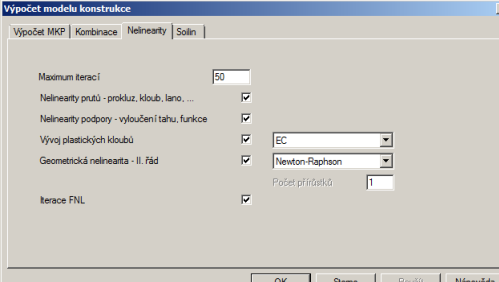
- Vyloučení tahu
- Vyloučení tlaku
- Nelineární chování dle funkce

Nelinearity prutů

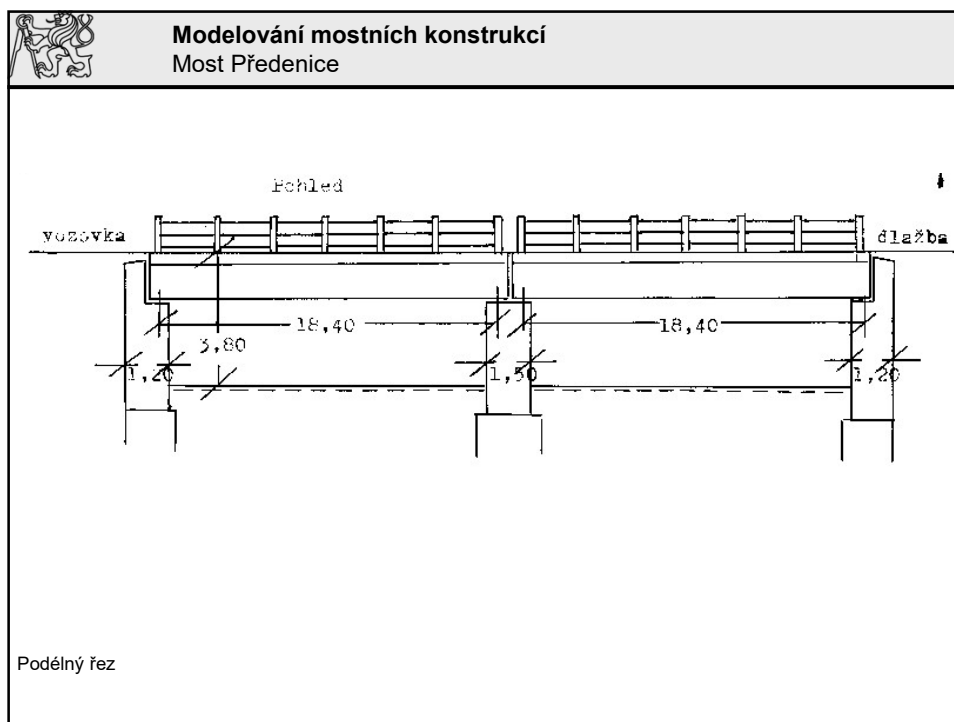
- Vyloučení tahu
- Vyloučení tlaku
- Lanové prvky

Nelinearity výpočtu

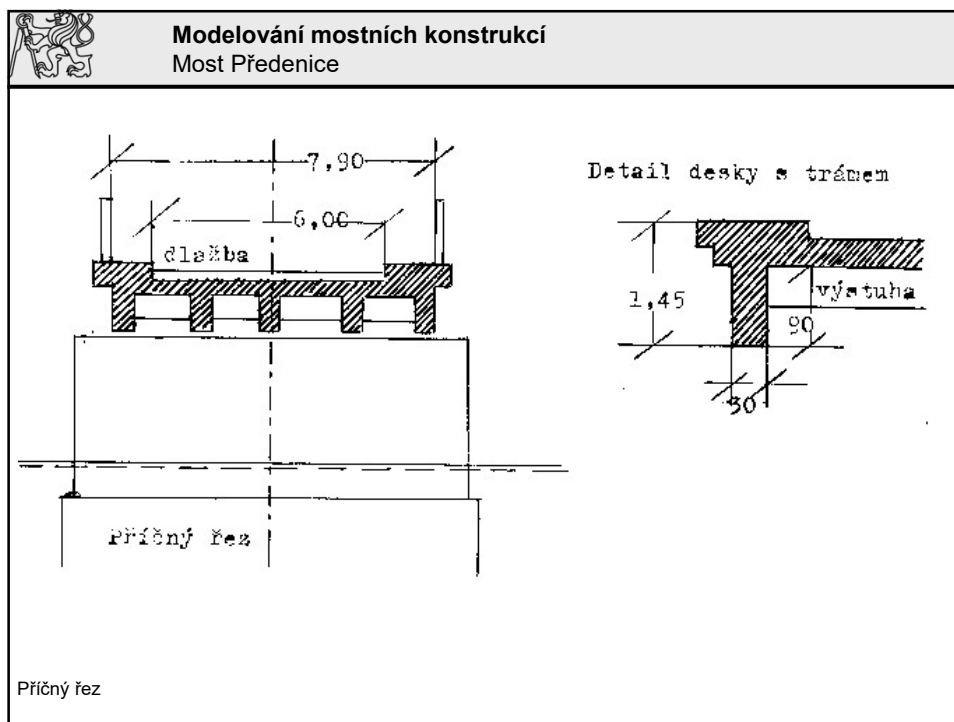
- Geometricky nelineární výpočet – 2. řád – rovnováha na deformované konstrukci
- Zohlednění počátečních deformací (vliv na stabilitu)
- Zohlednění počátečních napětí (předpjaté konstrukce, táhla, lana)
- Vznik trhlin a jejich vliv na tuhost

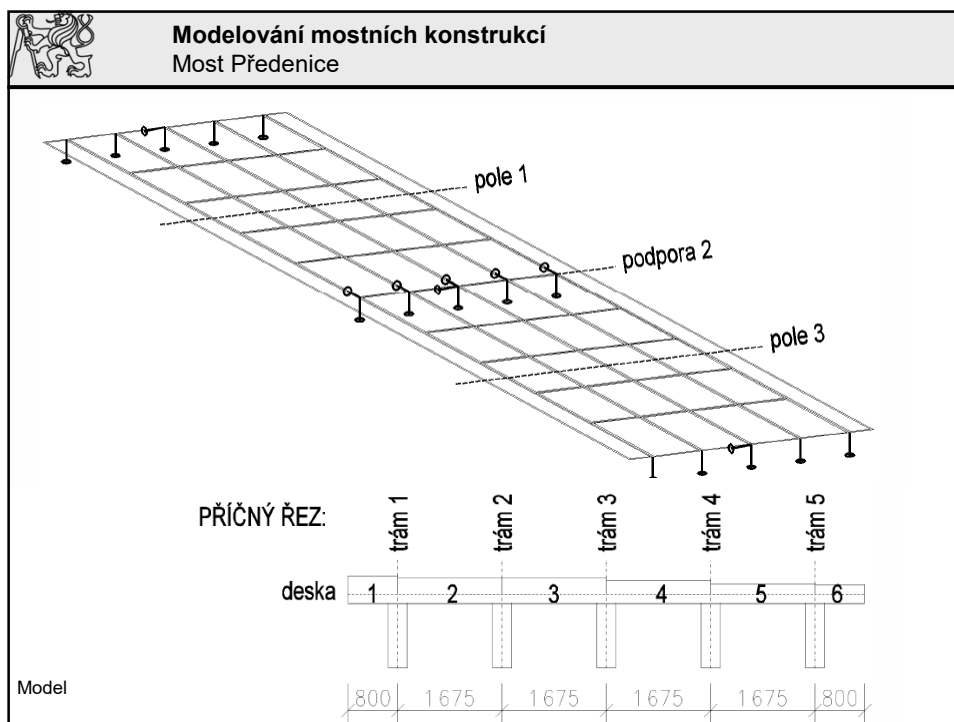
52



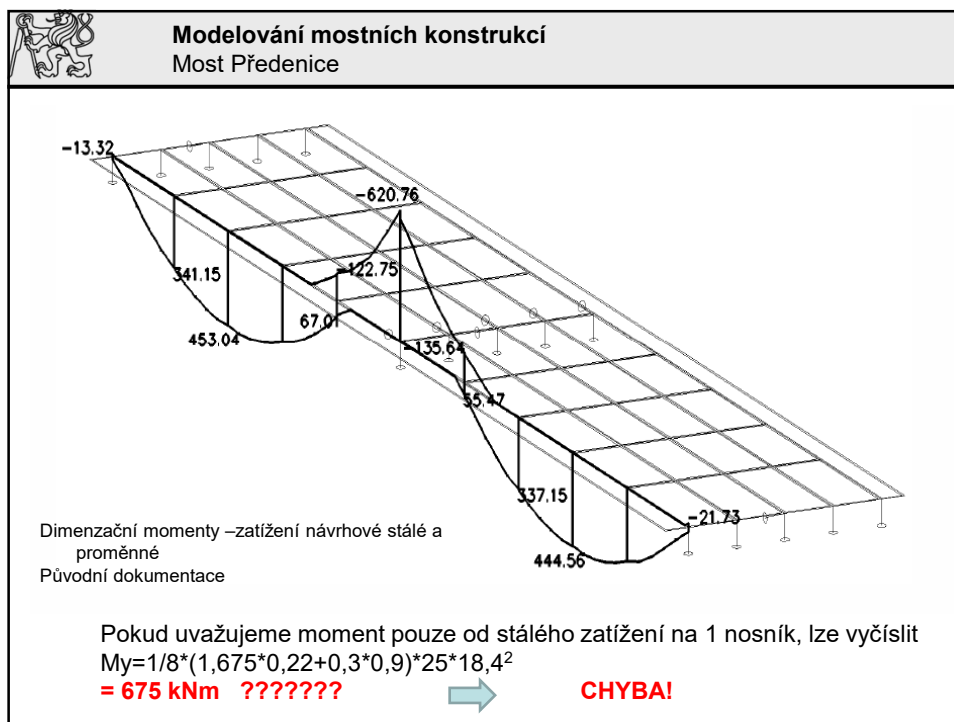
53



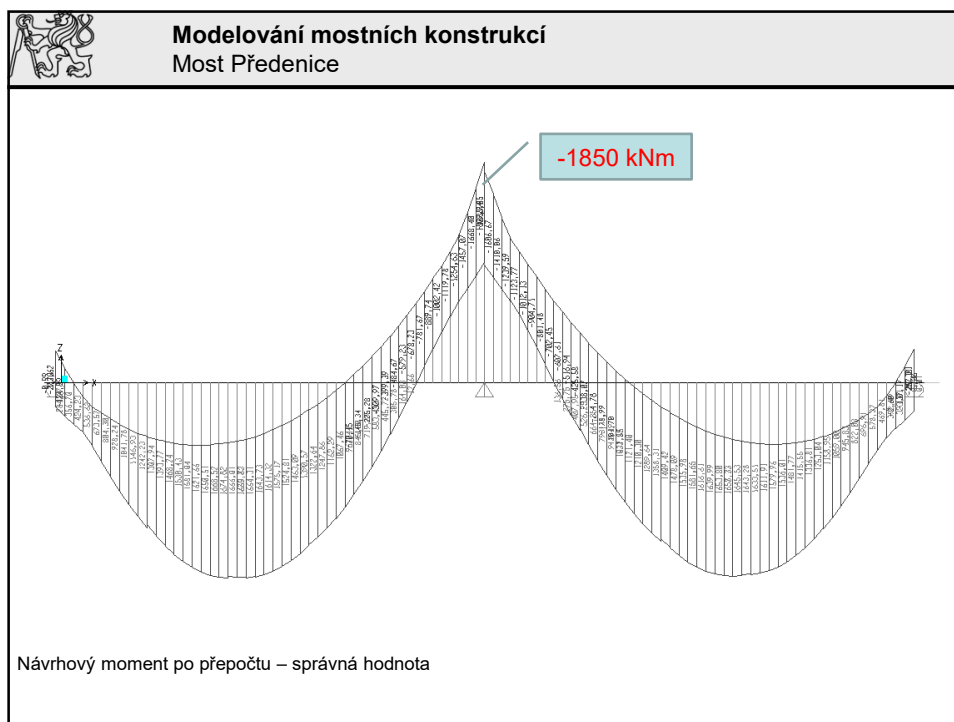
54



55



56



57

Modelování mostních konstrukcí
Most Předenice

Výsledek – zatížitelnost po rekonstrukci:
Místo deklarovaných
Vn=32t
Vr=80t
je ve skutečnosti
Vn=8 t !!!!
Vr=18 t

Důsledky

- zesílení mostu volnými kabely,
- Kompletní přepracování původní dokumentace

58



Modelování mostních konstrukcí

Most Předenice

Poučení

1. Způsob modelování **zásadně** rozhoduje o výsledcích výpočtu
2. Vždy nutno přemýšlet o skutečném chování konstrukce,
3. Statik zodpovídá za výsledky software
4. Podrobnost modelu dle projektového stupně
5. Automatické a složité funkce používat opatrně, pokud nevím jak něco funguje – platí pravidlo **důvěřuj ale prověřuj**
6. Provádět **kontroly na jednoduchých modelech, kontrola reakcí**, kontrola sil a deformací po stavech
7. Automatické kombinace a obálky zatížení – opatrně, často chyby software