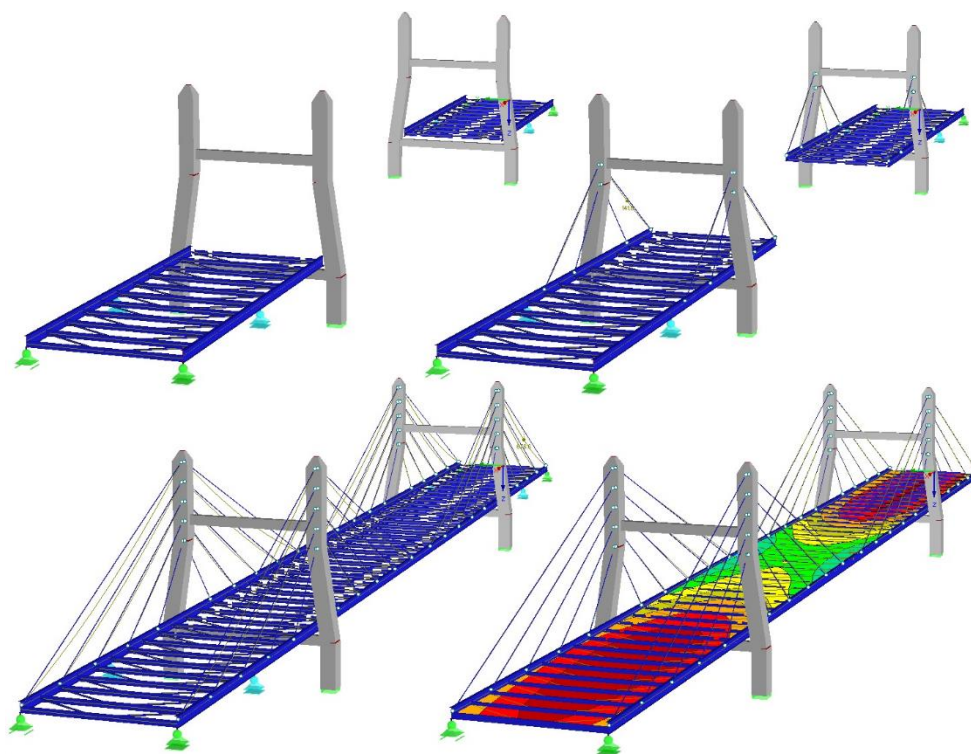




ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební, katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

Thákurova 7, 166 29 Praha 6



## Vliv postupu výstavby na namáhání konstrukce

Pomůcka pro numerické modelování ocelových a ocelobetonových konstrukcí se zohledněním fází výstavby

## Předmluva

Text slouží jako opora při studiu předmětů či při zpracování závěrečných prací na Katedře ocelových a dřevěných konstrukcí FSV ČVUT. Cílem pomůcky je prohloubit znalosti studentů v oblasti numerického modelování stavebních konstrukcí a poskytnout základní informace o vlivu postupu výstavby na namáhání stavebních konstrukcí a o možných způsobech numerického modelování tohoto problému ve statickém softwaru Dlubal RFEM s využitím modulu pro posouzení fází výstavby RF – Stages. Poznatky lze aplikovat při posouzení konstrukcí pozemních staveb, a také mostů a inženýrských konstrukcí.

Obsah je členěn do tří kapitol. První kapitola stručně vysvětluje teoretické pozadí vlivu postupu výstavby či rekonstrukce na namáhání konstrukce; ve druhé části je popsán ucelený návod a doporučení pro numerické modelování postupu výstavby stavebních konstrukcí a ve třetí kapitole jsou uvedeny řešené příklady. Součástí pomůcky je také samostatná příloha – numerický model zavěšeného mostu realizovaného metodou letmé montáže. Pomůcka byla zpracována za podpory investičních prostředků vnitřní soutěže 2019 v rámci projektu 1051934A011 RPMT. I přes snahu autorů se v textu mohou vyskytovat chyby a nepřesnosti. Případné chyby prosím oznamte e-mailem na adresu [vojtech.stancik@fsv.cvut.cz](mailto:vojtech.stancik@fsv.cvut.cz).

V Praze 8.1.2020

Vojtěch Stančík



# Obsah

<b>1.</b>	<b>VLIV POSTUPU VÝSTAVBY NA NAMÁHÁNÍ KONSTRUKCE.....</b>	<b>3</b>
1.1.	OCELOBETONOVÉ KONSTRUKCE PŘI MONTÁŽI NEPODEPŘENÉ .....	3
1.2.	ZMĚNA CHOVÁNÍ KONSTRUKCE VLIVEM REOLOGIE MATERIÁLU .....	5
1.3.	ZESÍLENÍ OCELOVÉ KONSTRUKCE POD ZATÍŽENÍM .....	10
1.4.	ZMĚNA STATICKÉHO PŮSOBNÍ PŘI MONTÁŽI A REKONSTRUKCI .....	12
1.5.	PŘEDPĚTÍ KONSTRUKCE VNESENÍM DEFORMACÍ .....	15
<b>2.</b>	<b>MODELOVÁNÍ POSTUPU VÝSTAVBY V DLUBAL RFEM.....</b>	<b>17</b>
2.1.	ZÁKLADNÍ PROSTŘEDÍ MODULU RF – STAGES.....	17
2.2.	PRINCIP VÝPOČTU V MODULU RF-STAGES.....	19
2.3.	POSTUP MODELOVÁNÍ KONSTRUKCE S FÁZEMI VÝSTAVBY .....	20
2.4.	ZADÁNÍ VSTUPNÍCH DAT V MODULU RF-STAGES .....	21
2.4.1.	<i>Základní údaje .....</i>	<i>21</i>
2.4.2.	<i>Vkládání prvků do fází .....</i>	<i>22</i>
2.4.3.	<i>Vkládání podpor do fází .....</i>	<i>23</i>
2.4.4.	<i>Definice zatížení v jednotlivých fázích .....</i>	<i>25</i>
2.4.5.	<i>Prohlížení výsledků .....</i>	<i>28</i>
2.5.	INTERPRETACE VÝSLEDKŮ NA FÁZOVANÝCH PRŮŘEZECH.....	31
2.6.	NASTAVENÍ A DETAILS VÝPOČTU .....	33
<b>3.</b>	<b>ŘEŠENÉ PŘÍKLADY .....</b>	<b>35</b>
3.1.	POSOUZENÍ OCELOBETONOVÉHO MOSTU V MSP .....	35
3.1.1.	<i>Základní údaje a návrh konstrukce.....</i>	<i>35</i>
3.1.2.	<i>Zatížení na nejvíce namáhaný nosník.....</i>	<i>36</i>
3.1.3.	<i>Numerická analýza.....</i>	<i>37</i>
3.1.4.	<i>Posouzení napětí .....</i>	<i>39</i>
3.1.5.	<i>Posouzení průhybů .....</i>	<i>41</i>
3.2.	ZESÍLENÍ OCELOVÉ STROPNICE POD ZATÍŽENÍM .....	42
3.2.1.	<i>Základní údaje konstrukce.....</i>	<i>42</i>
3.2.2.	<i>Zatížení stropnice .....</i>	<i>43</i>
3.2.3.	<i>Numerická analýza.....</i>	<i>45</i>
3.2.4.	<i>Posouzení MSÚ.....</i>	<i>47</i>
3.2.5.	<i>Posouzení MSP .....</i>	<i>48</i>
<b>REFERENCE.....</b>		<b>50</b>
	NORMY A LITERATURA.....	50
	WEBOVÉ STRÁNKY .....	50
<b>PŘÍLOHY</b>		
	PŘÍLOHA A: Numerická analýza silničního zavěšeného mostu realizovaného metodou letmé montáže	

# 1. Vliv postupu výstavby na namáhání konstrukce

Postup výstavby, či rekonstrukce může významně ovlivňovat výsledné namáhání stavebních konstrukcí. Následující text si klade za cíl objasnit základní chování konstrukce v průběhu výstavby či rekonstrukce pod zatížením a následně také přiblížit způsob numerického modelování v modulu RF – Stages programu Dlubal RFEM. Postup realizace stavby či rekonstrukce může mít vliv na výsledné namáhání konstrukce v případě změny materiálových parametrů (reologické jevy v materiálech, nebo zesílení jiným materiálem), průřezových charakteristik (zesílení profilu prvku), nebo v případě změny statického působení v průběhu montáže či užívání konstrukce.

Pokud jedna ze zmíněných skutečností nastává, musí být výpočet rozdělen do tzv. fází výstavby. Výpočet s fázemi výstavby umožňuje přiřadit v každé definované fázi výstavby konstrukci jiné vlastnosti. Účinky zatížení jsou stanoveny v každé fázi zvlášť a výsledné napětí je získáno lineární superpozicí jednotlivých účinků zatížení ve všech fázích. V případě, kdy dochází ke změnám chování konstrukce v průběhu její realizace je třeba rozdělit výpočet účinků zatížení alespoň do dvou fází - do fáze montážní a fáze provozní, případně do dalších fází pokud to výpočet vyžaduje. Pokud je cílem navrhnout zesílení stávající konstrukce, která nemůže být v průběhu zesilování odlehčena (naprostá většina případů zesílení), bývá zpravidla nezbytné stanovit účinky zatížení působící na původní (nezesílenou) konstrukci a následně účinky zatížení působící na zesílenou konstrukci.

Za účelem správného posouzení ocelových a ocelobetonových konstrukcí je tedy třeba zohlednit vlivy postupu výstavby či rekonstrukce v případě:

- Posouzení ocelobetonových konstrukcí, při montáži nepodepřených
- Změny chování konstrukce vlivem reologických vlastností (např. smršťování a dotvarování betonu)
- Zesilování ocelových konstrukcí pod zatížením (pokud není možno eliminovat při zatížení účinky vlastní tíhy konstrukce)
- Změny statického chování konstrukce v průběhu montáže, či rekonstrukce
- Předpětí konstrukce vnesením deformací
- Kombinace dvou a více z výše uvedených faktorů

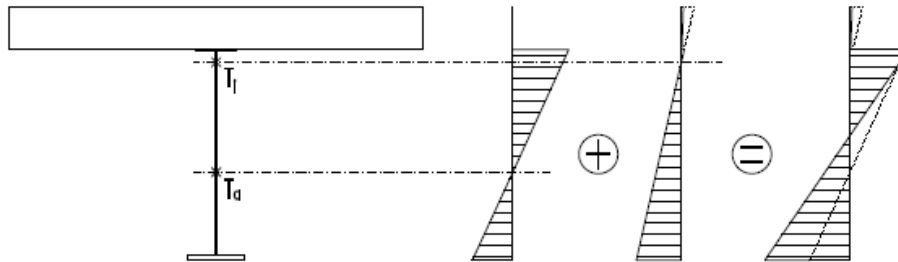
## 1.1. Ocelobetonové konstrukce při montáži nepodepřené

Na rozdíl od konstrukcí betonovaných na dočasných podporách je namáhání nepodepřené ocelobetonové konstrukce významně odlišné. V případě nepodepřené konstrukce totiž veškeré montážní zatížení přenáší samotný ocelový průřez, neboť mokřý beton bezprostředně po betonáži nepřenáší žádné zatížení. Ocelový nosník **v montážní fázi** v podstatě nahrazuje montážní skruž. Stálé montážní zatížení zpravidla sestává z vlastní tíhy ocelové konstrukce, vlastní tíhy mokrého betonu, případného bednění. Proměnné montážní zatížení sestává zejména z rovnoměrného staveništního zatížení a ze zvětšeného staveništního zatížení na pracovní ploše 3x3 metry. V případech, kdy je konstrukce vystavena vlivům povětrnosti (například mostní konstrukce atp.) je třeba do montážního proměnného zatížení třeba započítat také případné účinky oteplení, či zatížení větrem.

**V provozní fázi**, po vytvrdnutí betonu, v ocelové části spřaženého průřezu zůstane napětí od vlastní tíhy konstrukce, přičemž v betonové části průřezu je napětí nulové. Součástí napětí v oceli již není účinek staveništního zatížení, které je před uvedením konstrukce do provozu odstraněno. K účinkům stálého zatížení je nutné dále přičíst účinek ostatního stálého zatížení a proměnného zatížení, které již působí na spřažený průřez. Ostatní stálé zatížení pro konstrukce



pozemních staveb je zpravidla vyvozeno konstrukcí podlahy, střechy, podhledů či jiných dodatečných, nepřemístitelných konstrukcí, zatímco proměnné zatížení zahrnuje užité zatížení (určené na základě příslušné kategorie), přemístitelné příčky, provozní zatížení přístupných i nepřístupných střech či zatížení střech od vlivů povětrnosti – zatížení sněhem a větrem. Pro mostní konstrukce lze mezi ostatní stálé zatížení řadit konstrukci mostního svršku a mostní vybavení. Proměnné zatížení mostních konstrukcí je vyvozeno účinky pohyblivého zatížení od dopravy a také účinky rovnoměrného i nerovnoměrného oteplení a zatížení větrem. Zatížení sněhem se na mostních konstrukcích neuvažuje.

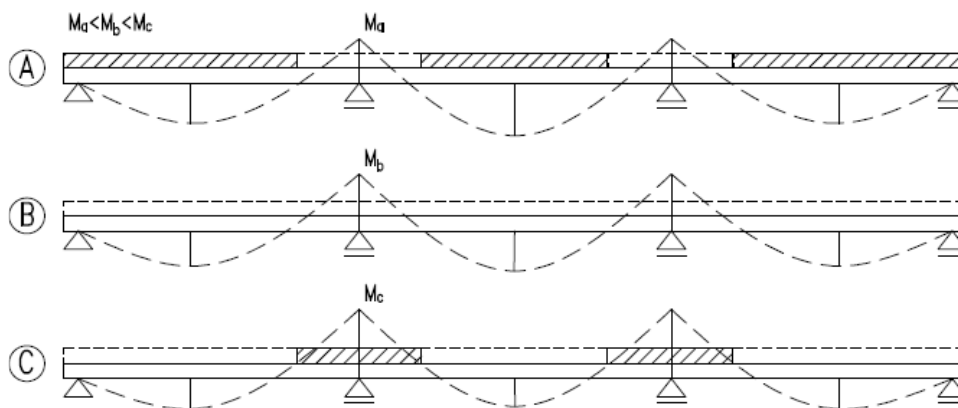


Obr. 1 Princip namáhání ocelobetonové konstrukce při montáži nepodepřené

Při posouzení ocelobetonové konstrukce v jednotlivých fázích výstavby, může být nutné současně započítat vliv reologie betonu na odezvu konstrukce. Toto je nutné zejména v případě posouzení mostních konstrukcí. Pro běžné pozemní stavby se obvykle používá zjednodušený postup. Průřezové charakteristiky ocelobetonového průřezu lze získat převedením na tzv. ideální ocelový průřez. Podrobnosti jsou uvedeny v následující kapitole.

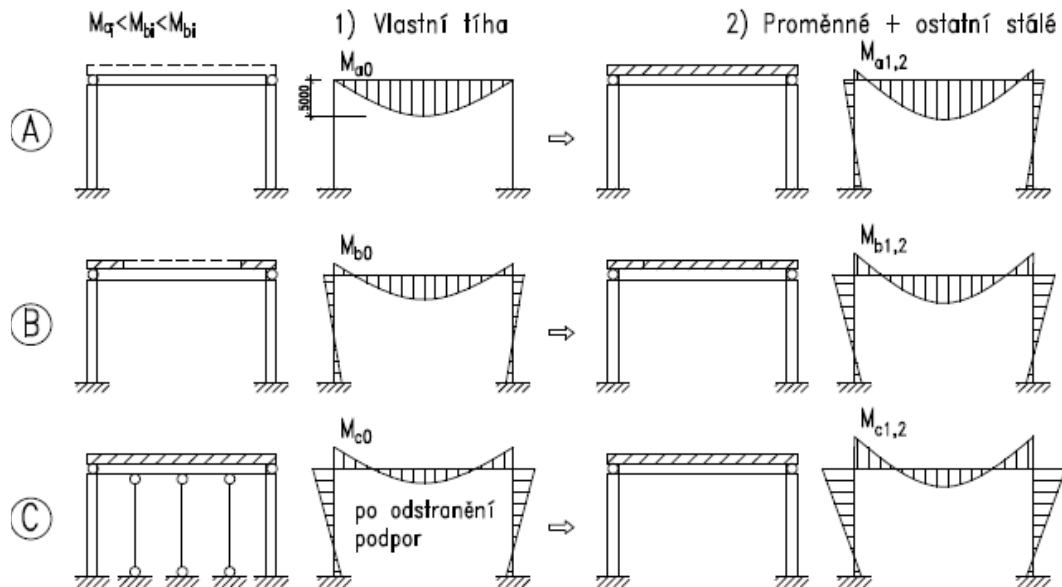
Ocelobetonové konstrukce mohou být obecně realizovány jako prosté, spojitě, případně jako rámové konstrukce. U prostého ocelobetonového nosníku, při montáži nepodepřené, je možné navrhnout **postup betonáže po částech** tak, aby byl beton v rámci betonové desky nejprve vybetonován do určité výšky, přičemž po vytvrnutí první části betonové desky se dobetonuje zbytek. Tento postup zajistí, že dobetonávka již působí na spřažený ocelobetonový průřez, čímž je docíleno optimálnějšího namáhání spřaženého průřezu.

Navržený postup betonáže však může mít na namáhání konstrukce daleko zásadnější vliv, a to zejména v případě realizace spojitých či rámových ocelobetonových konstrukcí. U **spojitých konstrukcí** může být výhodné v nejprve vybetonovat desku v oblastech kladných momentů a až po vytvrnutí dobetonovat nadpodporové oblasti. Část nadpodporového momentu, který může být s ohledem na neúčinnost betonu v tahu obtížné přenést, se tímto způsobem výhodně přenesou do pole (viz obr.2). Tento postup betonáže se používá například u spojitých ocelobetonových trémových mostů.



Obr. 2 Vliv postupné betonáže na namáhání rámových konstrukcí

V odůvodněných případech, kdy například ocelová část spřaženého průřezu není při montáži spojitá a spojitost je dosaženo až po betonáži, může být optimálním postupem nejprve provést betonáž v nadpodporové oblasti, přičemž následná betonáž v polích proběhne až po vytvrdnutí betonu nad podporami. Tímto způsobem je zajištěno, že část vlastní tíhy betonu již bude působit na spojitý nosník, čímž se část momentu z pole přesune nad podporu. Tento postup se může provést například u **spojitých ocelobetonových stropnic** (viz kap. 1.4), jejichž ocelové části působí v montážním stadiu jako prosté nosníky, nebo u **rámových konstrukcí**, kde je spojitost v rámovém rohu zajištěna vybetonováním oblasti rámového rohu (například u rámových integrovaných mostů atp.)



Obr. 3 Vliv postupné betonáže na namáhání rámových konstrukcí

## 1.2. Změna chování konstrukce vlivem reologie materiálu

Změnu chování konstrukce v průběhu její životnosti lze modelovat pomocí fází výstavby. Změnou chování se v tomto případě myslí účinek **reologických vlastností materiálu** na namáhání, či deformace konstrukce. Typicky se může jednat o dotvarování materiálu, které má za následek nárůst průhybů konstrukce při působícím konstantním napětí  $\bar{\sigma}$ . Nebo může dojít ke smršťování materiálu, které znamená změnu poměrných deformací v prvku  $\varepsilon$  (zkrácení) a z toho vyplývající vnesení tahového napětí do konstrukce  $\sigma$ . Dalším projevem reologie materiálu může být relaxace, při které dochází k úbytkům napětí v konstrukci  $\sigma$  za působení konstantní poměrné deformace prvku  $\bar{\varepsilon}$ . V běžné inženýrské praxi se účinky reologie do výpočtu vnáší pomocí zjednodušených normových postupů, stanovených na základě teorie viskoelastivity. Běžně používané stavební materiály, které jsou ovlivněny reologickými vlastnostmi lze rozdělit následovně:

### **Materiály s dotvarováním:**

- Beton
- Dřevo
- Materiály na bázi polymerů
- Kompozitní materiály (ocel-beton, ocel-dřevo, dřevo-beton)

**Materiály se smrštěním:**

- Betonové konstrukce
- Kompozitní materiály (ocel-beton, dřevo-beton)

**Materiály s relaxací:**

- Ocel pro předpínací výztuž
- Materiály na bázi polymerů

Je tedy zřejmé že ocelové konstrukce nejsou ovlivněny reologickými vlastnostmi a v další části textu tedy bude v souladu se zaměřením pomůcky podrobněji popsáno pouze **posouzení ocelobetonových spřažených** konstrukcí. Je běžnou součástí inženýrské praxe navrhovat ocelobetonové sloupy, či ocelobetonové nosníky odolávající ohybovému namáhání. Postup výstavby nemá na sloupy zásadní vliv a vliv dotvarování betonové části sloupu se zpravidla zavádí dle zjednodušeného předpokladu (viz kap. 1.2.). Rovněž při posouzení v MSÚ ocelobetonových nosníků není nutné zahrnout vlivy reologie, či způsobu výstavby, přičemž únosnost se stanoví na základě plné plastifikace ocelové a betonové části. Jinak je tomu při posouzení ocelobetonových nosníků v MSP, jehož součástí je posouzení omezení pružného napětí a omezení průhybu. Postup posouzení MSP takového nosníku lze shrnout do dílčích úkolů následovně:

- **Stanovení spolupůsobící šířky tlačeného betonu  $b_{eff}$ :** Spolupůsobící šířka tlačeného betonu se stanoví na základě účinků smykového ochabnutí, které lze zohlednit podle doporučení uvedených v článku 5.4.2.1 normy ČSN EN 1994-1-1 [1]. Je třeba poznamenat, že spolupůsobící šířka se může lišit v závislosti na tom, zda-li je posuzován prostý nosník, spojitý nosník, či konzola.
- **Stanovení pracovního součinitele  $n$ :** Pracovní součinitel  $n$  vyjadřuje poměr modulu pružnosti oceli  $E_a$  k sečnovému modulu pružnosti betonu v tlaku  $E_{cm}$ . Pracovní součinitel je následně upraven o účinky smršťování, či dotvarování betonu pomocí součinitele dotvarování  $\phi_t$  a násobitele součinitele dotvarování  $\psi$ .
- **Stanovení průřezových charakteristik ideálního průřezu:** Pro výpočet napětí v ocelobetonovém průřezu je třeba nejprve převést kompozitní průřez na homogenní průřez tvořený buď pouze z oceli, nebo pouze z betonu. V případě ocelobetonových konstrukcí se standardně převádí ocelobetonový průřez na ocelový tak, že se spolupůsobící šířka tlačeného betonu podělí  $b_{eff}$  podělí pracovním součinitelem  $n$ . Tím vznikne tzv. ideální ocelový průřez, pro který je možné stanovit průřezové charakteristiky. S ohledem na postup montáže a vliv reologie může být nutné stanovit charakteristiky zvlášť pro ocelový průřez, ideální průřez pro krátkodobé zatížení (zpravidla proměnné zatížení) a pro ideální průřez pro dlouhodobé zatížení (vlastní tíha a ostatní stálé zatížení)
- **Posouzení účinků zatížení:** Na základě působícího zatížení, z něho resultujících vnitřních sil, a na základě průřezových charakteristik ideálních průřezů je možné stanovit hodnoty napětí a průhybů pro jednotlivé fáze výstavby. Lineární superpozicí účinků zatížení v jednotlivých fázích výstavby se stanoví celkový účinek zatížení na ocelobetonový průřez, který je již možné porovnat s limitní hodnotou, stanovenou v příslušné normě.

Rozhodujícím parametrem pro zohlednění reologických vlastností je hodnota **pracovního součinitele**, ta se může měnit v závislosti na typu posuzovaného objektu. U pozemních staveb, které nejsou určeny pro skladování, nejsou předepnuty vnesením deformací a splňují podmínky (5.1) nebo 5.2.2(1) normy ČSN EN 1994-1-1 lze účinky dotvarování spřažených nosníků

započítat zjednodušeným způsobem. U pozemních staveb, které tyto podmínky nesplňují a u ocelobetonových mostů je třeba podrobně zohlednit vlivy dotvarování a smršťování.

**Princip posouzení ocelobetonové konstrukce běžných pozemních staveb**

Pracovní součinitel: 
$$n = \frac{E_a}{E_{c,eff}}$$

Kde  $E_a$  je Youngův modul pružnosti oceli  
 $E_{c,eff}$  hodnota účinného modulu pružnosti betonu v tlaku -  $E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{2}$   
 $E_{cm}$  sečnový modul pružnosti betonu v tlaku

Princip stanovení pružného napětí, pro ocelobetonové konstrukce pozemních staveb při montáži nepodepřených, u nichž lze postupovat zjednodušeným způsobem, je demonstrován na obrázku níže.

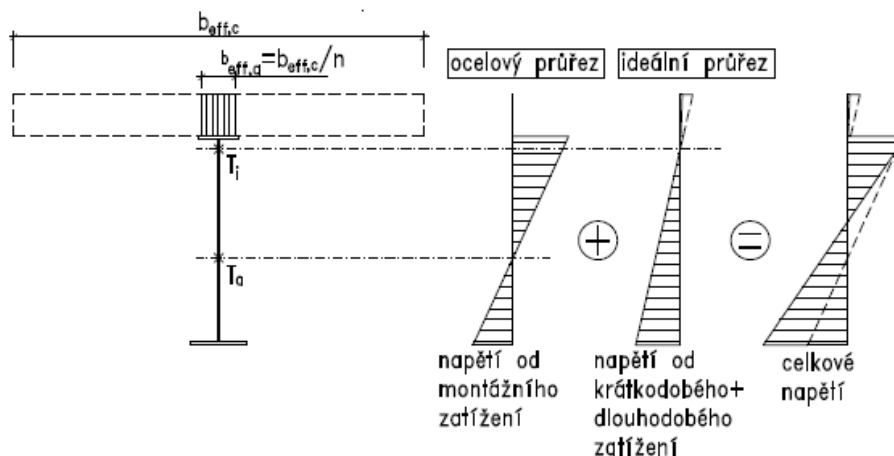
Stanovení pružného napětí – kce při montáži nepodepřená

Pružné napětí v oceli: 
$$\frac{M_{E,0,k}}{W_{y,a}} + \frac{M_{E,1,2,k}}{W_{y,i,a}} < f_{yk}$$

Pružné napětí v betonu: 
$$\frac{1}{n} \cdot \frac{M_{E,1,2,k}}{W_{y,i,c}} < 0,6f_{ck}$$

Pružné napětí ve výztuži: 
$$\frac{M_{E,1,2,k}}{W_{y,i,s}} < 0,8f_{sk}$$

Kde  $M_{E,0,k}$  je moment od montážního zatížení  
 $M_{E,1,2,k}$  moment od provozního zatížení  
 $W_{y,a}$  pružný průřezový modul pro krajní vlákna ocelového průřezu  
 $W_{y,i,a}$  pružný průřezový modul pro krajní vlákna ocelové části ideálního průřezu  
 $W_{y,i,c}$  pružný průřezový modul pro krajní vlákna betonové části ideálního průřezu  
 $W_{y,i,s}$  pružný průřezový modul pro výztuž v rámci ideálního průřezu. Stanoví se pro spojitě konstrukce v průřezu nad podporou.  
 $f_{yk}$  charakteristická hodnota meze kluzu oceli  
 $f_{ck}$  charakteristická hodnota válcové meze pevnosti betonu v tlaku po 28 dnech  
 $f_{sk}$  charakteristická hodnota meze kluzu oceli výztuže



Obr. 4 Stanovení pružného napětí ocelobetonové konstrukce zjednodušeným způsobem



Pozn.: Hodnota  $E_{c,eff} = E_{cm}/2$  se použije také při stanovení účinné ohybové tuhosti tlačенých prvků  $(EI)_{eff}$ .

### Princip posouzení se zohledněním dotvarování a smršťování (pro mostní konstrukce a pozemní stavby s vyšším účinkem dotvarování)

Pracovní součinitel:

$$n_L = n_0 (1 + \psi_L \phi_{(t,t_0)})$$

Kde  $n_0$  je základní pracovní součinitel,  $n_0 = E_a / E_{cm}$   
 $\phi_{(t,t_0)}$  součinitel dotvarování, stanovený dle ČSN EN 1992-1-1, článku 3.1.4, nebo 11.3.3. Součinitel závisí na stáří betonu v době posouzení ( $t$ ) a ,astáří betonu v době vnesení zatížení ( $t_0$ )  
 $\psi_L$  je násobitel součinitele dotvarování, závisející na typu zatížení. Pro stálé (dlouhodobé) zatížení se uvažuje hodnotou 1,1, pro účinky smršťování hodnotou 0,55, pro krátkodobé zatížení (doprava, užitné) hodnotou 0,0 a pro předpínání vnesením deformací hodnotou 1,5

Princip stanovení pružného napětí pro konstrukce, náchylné na vlivy dotvarování a smršťování je demonstrován na obrázcích níže. Příklad předpokládá chování konstrukce při betonáži nepodepřené. Při posouzení takového objekt je třeba provést posouzení na začátku životnosti, kdy ještě v betonové desce neproběhlo, žádné dotvarování a následně na konci životnosti, kdy lze předpokládat maximální dotvarování betonové části průřezu. Vlivem dotvarování se v průběhu životnosti přesune napětí z betonové desky do ocelového nosníku. Lze tedy předpokládat, že na začátku životnosti bude rozhodující napětí na horním líci betonové části průřezu, zatímco na konci životnosti bude rozhodující napětí na dolním líci ocelové části průřezu.

Stanovení pružného napětí – kce při montáži nepodepřená - začátek životnosti:

Pružné napětí v oceli:

$$\frac{M_{E,0,k}}{W_{y,a}} + \frac{M_{E,1,k}}{W_{y,i,a,k}} + \frac{M_{E,2,k}}{W_{y,i,a,k}} < f_{yk}$$

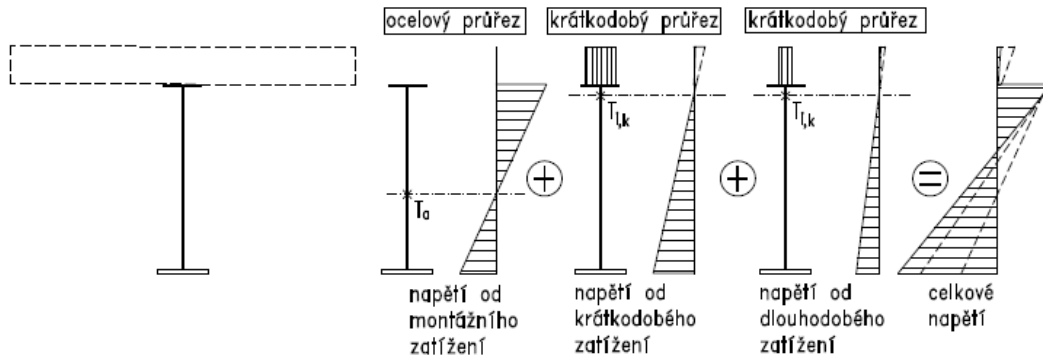
Pružné napětí v betonu:

$$\frac{1}{n} \cdot \left( \frac{M_{E,1,k}}{W_{y,i,c,k}} + \frac{M_{E,2,k}}{W_{y,i,c,k}} \right) < 0,6f_{ck}$$

Pružné napětí ve výztuži:

$$\frac{M_{E,1,k}}{W_{y,i,s,k}} + \frac{M_{E,2,k}}{W_{y,i,s,k}} < 0,8f_{sk}$$

Kde  $M_{E,1,k}$  je charakteristická hodnota momentu od ostatního stálého zatížení (dlouhodobé zatížení)  
 $M_{E,2,k}$  charakteristická hodnota momentu od proměnného zatížení (krátkodobé zatížení)  
 $W_{y,i,a,k}$  pružný průřezový modul pro krajní vlákna ocelové části krátkodobého ideálního průřezu  
 $W_{y,i,c,k}$  pružný průřezový modul pro krajní vlákna betonové části krátkodobého ideálního průřezu  
 $W_{y,i,s,k}$  pružný průřezový modul pro výztuž v rámci ideálního krátkodobého průřezu. Stanoví se pro spojitě konstrukce v průřezu nad podporou.



Obr. 5 Stanovení pružného napětí ocelobetonové konstrukce s vlivem dotvarování – začátek provozu

Stanovení pružného napětí – kece při montáži nepodepřená - konec životnosti:

Pružné napětí v oceli:

$$\frac{M_{E,0,k}}{W_{y,a}} + \frac{M_{E,1,k}}{W_{y,i,a,d}} + \frac{M_{E,2,k}}{W_{y,i,a,k}} < f_{yk}$$

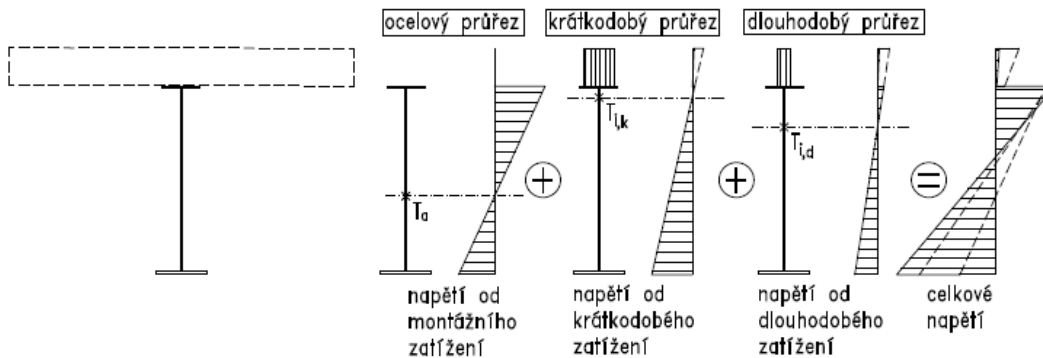
Pružné napětí v betonu:

$$\frac{1}{n} \cdot \left( \frac{M_{E,1,k}}{W_{y,i,c,d}} + \frac{M_{E,2,k}}{W_{y,i,c,k}} \right) < 0,6f_{ck}$$

Pružné napětí ve výztuži:

$$\frac{M_{E,1,k}}{W_{y,i,s,d}} + \frac{M_{E,2,k}}{W_{y,i,s,k}} < 0,8f_{sk}$$

- Kde
- $W_{y,i,a,d}$  pružný průřezový modul pro krajní vlákna ocelové části dlouhodobého ideálního průřezu
  - $W_{y,i,c,d}$  pružný průřezový modul pro krajní vlákna betonové části dlouhodobého ideálního průřezu
  - $W_{y,i,s,d}$  pružný průřezový modul pro výztuž v rámci ideálního dlouhodobého průřezu. Stanoví se v případě spojitých konstrukcí v průřezu nad podporou.



Obr. 6 Stanovení pružného napětí ocelobetonové konstrukce s vlivem dotvarování – konec životnosti

Hodnota účinného modulu pružnosti pro tlačené pruty, které nesplňují podmínku pro použití zjednodušeného postupu výpočtu dotvarování se stanoví následovně:

Účinný modul pružnosti:

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + (N_{G,Ed}/N_{Ed})\varphi_{(t,t_0)}}$$

Kde  $N_{G,Ed}$  stálá složka celkové normálové síly v posuzovaném prvku

$N_{Ed}$  celková návrhová normálová síla v posuzovaném prvku

### 1.3. Zesílení ocelové konstrukce pod zatížením

Při zesilování ocelových konstrukcí bývá velmi problematické konstrukci odtížit a eliminovat tak účinky stálého zatížení v době aplikace zesílení. Při posouzení je tedy zpravidla nutné uvažovat stálé zatížení, působící ještě na nezesílenou konstrukci, zatímco proměnné zatížení působí na zesílenou konstrukci. Pokud je možné účinek stálého zatížení eliminovat například předepnutím pomocí vnesené deformace, může se při posouzení konstrukce uvažovat, že celkové návrhové zatížení působí na zesílený průřez.

**Posudek v MSÚ** se provádí pružně, nebo plasticky na základě zatřídění průřezu dle normy ČSN EN 1993-1-1 [2]. Pokud se posudek provádí plasticky, dochází k plné plastifikaci původní konstrukce i zesilovacího prvku. V tomto případě je tedy možné uvažovat, že celé zatížení působí již na zesílený průřez. Při pružném posudku v MSÚ je naopak nutné zohlednit, jestli stálé zatížení působí na původní nezesílenou konstrukci, nebo je možné jej odlehčit a bude tak působit na zesílenou konstrukci.

**Při posouzení v MSP** je třeba provést posouzení omezení pružného napětí, pokud již nebyl proveden pružný posudek v MSÚ. Zároveň je třeba posoudit limitní průhyby. Při posouzení v MSP je v každém případě třeba zohlednit způsob rekonstrukce a účinky stálého zatížení uvažovat na nezesílené konstrukci (pokud tyto účinky nelze eliminovat) a teprve účinky proměnného zatížení uvažovat na zesílené konstrukci.

Podrobnosti o této problematice obecně shrnuje předpis ČKAIT [3] a ČSN 73 0038 [4]. Studenti se této problematice mohou podrobně věnovat v rámci předmětu rekonstrukce ocelových a dřevěných konstrukcí [5]. Kromě dříve zmíněného obecně platí, že způsob posouzení rekonstruované konstrukce pod působícím zatížením se liší s ohledem na způsob namáhání posuzované konstrukce.

#### Zesílení taženého prvku pod zatížením

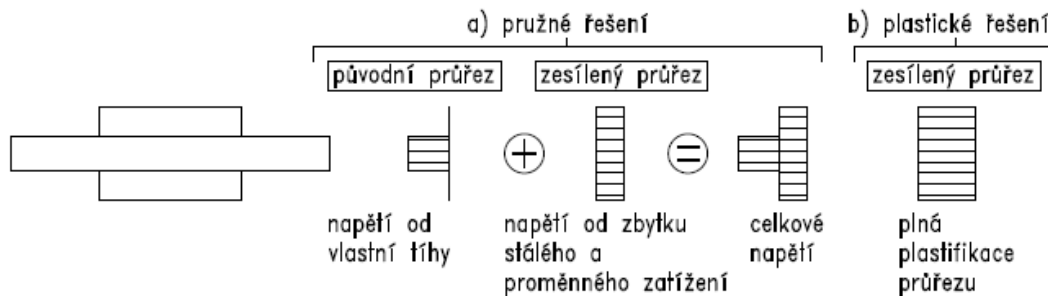
Podstatou zesílení na tahové namáhání je v zásadě rovnoměrné zvětšení průřezové plochy. Tohoto zesílení lze docílit přivařením přílozek z ploché oceli, nebo z válcovaných profilů (nejčastěji úhelníky, či U-profilů), popřípadě přivařením ocelové kulatiny. Posouzení se liší v závislosti na tom, do jaké míry lze konstrukci odlehčit, popřípadě na tom, jestli je možné použít plastický výpočet. Je třeba zmínit, že provedení úplného odlehčení je v praxi velmi problematické a není obvyklé.

Posouzení prvku v tahu - bez odlehčení/částečné odlehčení: 
$$\frac{N_g}{A_1} + \frac{N_p}{A_1 + A_2} \leq f_{yd}$$

Posouzení prvku v tahu - využití plasticity: 
$$\frac{N_g + N_p}{A_1 + A_2} \leq f_{yd}$$

- v případě zesílení pomocí prvků z oceli vyšší pevnosti: 
$$N_g + N_p \leq f_{y1,d}A_1 + f_{y2,d}A_2$$

Kde  $N_g$  je síla působící na původní, nezesílenou konstrukci  
 $N_p$  síla působící na zesílený průřez  
 $A_1$  plocha původního průřezu před zesílení  
 $A_2$  plocha prvků zesílení  
 $f_{yd}$  návrhová mez kluzu oceli  
 $f_{y1,d}$  návrhová mez kluzu oceli původního materiálu  
 $f_{y2,d}$  návrhová mez kluzu oceli prvků zesílení



Obr. 7 Stanovení napětí při zesilování prvků v tahu – bez odlehčení konstrukce

### Zesílení tlačného prvku pod zatížením

Posouzení zesíleného tlačného prutu pod zatížením se liší v závislosti na štíhlosti prutu. Pokud je štíhlost malá, tedy  $\lambda < 20$ , lze využít plastickou rezervu a posudek provést na prostý tlak. V opačném případě je třeba posoudit prvek na vzpěr. Tomu odpovídá také způsob zesílení. V případě prutů s malou štíhlostí se zesílení provádí obdobně jako u tažených prutů, ideální je tedy rovnoměrně zvýšit plochu průřezu. V případě, kdy rozhoduje vzpěr prutu, je zesílení navrženo tak, aby byl navýšen moment setrvačnosti, zejména ve směru vybočení rovnoběžně s měkkou osou průřezu.

Posouzení prvku v tlaku - bez odlehčení/částečné odlehčení:

Stav před zesílením: 
$$\frac{N_g}{\chi_1 A_1 \beta_A} \leq f_{yd}$$

Stav po zesílení: 
$$\frac{N_g}{\chi_1 A_1 \beta_A} + \frac{N_p}{\chi_F (A_1 + A_2) \beta_A} \leq f_{yd}$$

Posouzení prvku v tlaku - využití plasticity ( $\lambda < 20$ ): 
$$\frac{N_g + N_p}{(A_1 + A_2)} \leq f_{yd}$$

Kde  $\chi_1$  je součinitel vzpěrnosti původní konstrukce před zesílením  
 $\chi_F$  součinitel vzpěrnosti po zesílení  
 $\beta_A$  součinitel třídy průřezu. Uvažuje se zjednodušeně  $\beta_A = 1$

### Zesílení ohýbaného prvku pod zatížením

Posouzení ohýbaného prutu pod zatížením závisí na tom, zda-li je tlačná část ohýbaného průřezu zajištěna proti vybočení. V případě, kdy je tlačná část zajištěna proti vybočení (většina případů zesílení) je možné provést posouzení na prostý ohyb pomocí pružného, respektive plastického výpočtu v závislosti na třídě průřezu. Pokud tlačná část průřezu proti vybočení zajištěná není, je třeba prvek posoudit klopení prvku. V takovém případě se posudek provádí pouze pružně.

Posouzení prvku v ohybu - bez odlehčení/částečné odlehčení:

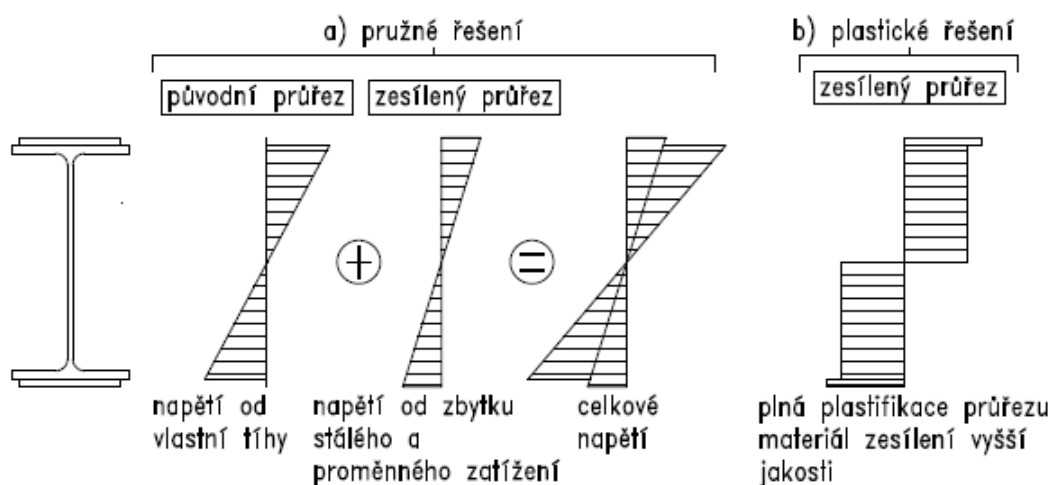
Prostý ohyb – pružné řešení: 
$$\frac{M_g}{W_1} + \frac{M_p}{I_{tot}} z_i \leq f_{i,yd}$$

Prostý ohyb – plastické řešení: 
$$M_g + M_p \leq W_{pl,1} f_{1,yd} + W_{pl,2} f_{2,yd}$$

Klopení – pružné řešení: 
$$\frac{M_g}{\chi_{LT,1} W_1 f_{1,yd}} + \frac{M_p}{\chi_{LT,tot} W_{tot} f_{1,yd}} \leq 1$$

Kde  $M_g$  je moment působící na konstrukci před zesílením  
 $M_p$  moment působící na zesílenou konstrukci  
 $z_i$  vzdálenost těžiště od posuzovaných vláken průřezu

$W_1$	pružný průřezový modul původní, nezesílené, konstrukce
$W_{tot}$	pružný průřezový modul zesílené konstrukce
$I_{tot}$	moment setrvačnosti zesílené konstrukce
$W_{pl,1}$	plastický průřezový modul původní nezesílené konstrukce
$W_{pl,2}$	plastický průřezový modul prvků zesílení
$\chi_{LT,1}$	součinitel klopení původní nezesílené konstrukce
$\chi_{LT,tot}$	součinitel klopení zesílené konstrukce
$f_{i,yd}$	mez kluzu oceli. V případě pružného výpočtu, kdy je zesílení provedeno z jiného materiálu, než je použit v původní konstrukci
$f_{1,yd}$	mez kluzu oceli původní nezesílené konstrukce
$f_{2,yd}$	mez kluzu oceli prvků zesílení konstrukce



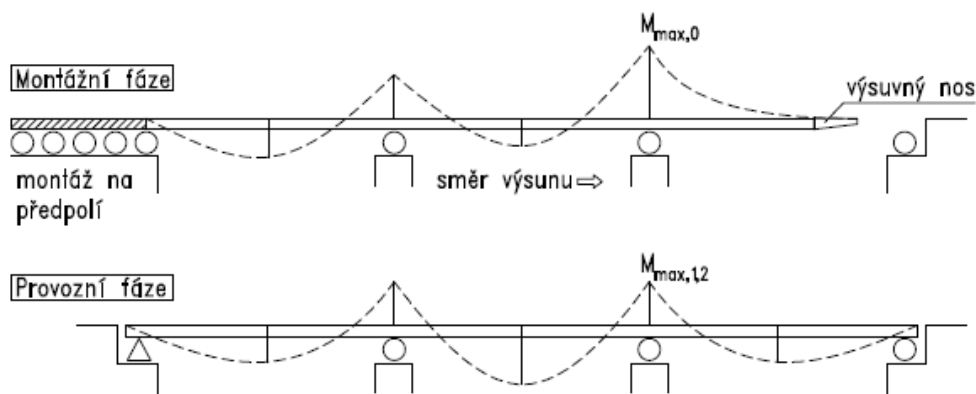
Obr. 8 Stanovení napětí při zesilování prvků v ohybu – bez odlehčení konstrukce

## 1.4. Změna statického působení při montáži a rekonstrukci

V některých případech dochází při realizaci stavby, či při rekonstrukci stavby ke změně statického chování konstrukce. V případě **realizací nových konstrukcí** někdy není, v závislosti na návrhu a technologii provedení konstrukce, v montážním stavu možné zajistit stejné působení, jako v provozním stavu. V takovém případě je nutné vliv změny statického chování při posouzení konstrukce posoudit. Velmi často je také třeba posoudit změnu statického chování při realizaci například speciálních konstrukcí, mostů, zavěšených, či prostorově působících objektů. Typické příklady změny statického chování při montáži konstrukce jsou uvedeny níže:

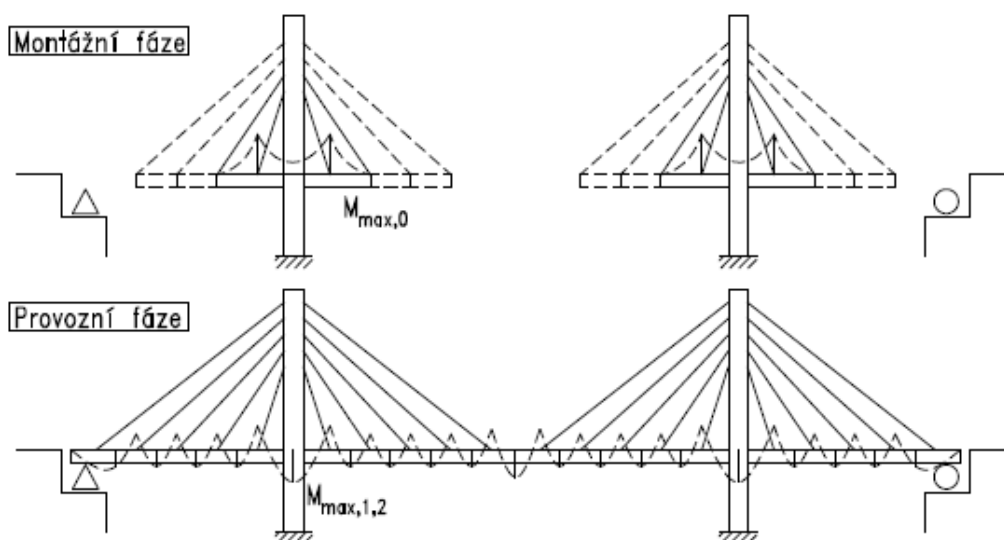
- **Dočasné podepření konstrukce při montáži:** Nejčastějším způsobem realizace konstrukcí je montáž s využitím dočasného podepření v průběhu montáže. V případě montážního podepření konstrukce tak v konstrukci nevzniká žádné namáhání a veškeré zatížení na konstrukci začne působit až po demontáži dočasných podpor. Tímto způsobem lze např. optimalizovat namáhání ocelobetonového nosníku tak, aby veškeré zatížení, včetně vlastní tíhy konstrukce, působilo na spřažený průřez. V takovém případě není nutné konstrukci posuzovat v montážní fázi. V některých případech, kdy je montážní postup komplikovaný (např. při letmé montáži), může vložení dočasné podpory značně zkomplikovat namáhání konstrukce v průběhu výstavby a zohlednění postupu výstavby je nezbytné. Jako dočasné podepření konstrukce lze použít lešení, skruže, diskrétní dočasné podpory, či dočasné vzpínadlové konstrukce.

- **Ocelobetonové konstrukce spojitě po vytvrnutí betonu:** Typicky se jedná například o spojitě, či rámové ocelobetonové konstrukce (viz kap. 1.1), jejichž spojitost je zajištěna až po vytvrnutí betonu. V takovém případě se často v montážním stádiu posuzovaný nosník chová jako prostý nosník, zatímco v provozním stádiu již zatížení působí na spojitý nosník, či rámovou konstrukci. Může se jednat o konstrukce pozemních staveb (spřažené spojitě stropnice) i mostní konstrukce (spojitě ocelobetonové mosty, integrované ocelobetonové mosty - viz obr. 3.).
- **Podélný výsun konstrukce:** Způsob realizace podélným výsuvem se nejčastěji používá při montáži mostních konstrukcí. V takovém případě se nejprve realizuje spodní stavba mostu (pilíře a opěry), následně se na jedné z opěr zřídí předpolí. Na předpolí se segment po segmentu montuje spojitá konstrukce mostu, která je na předním konci opatřena, zvedacím zařízením – tzv. nose. Konstrukce se zároveň segment po segmentu nasouvá na spodní stavbu, takže postupně překonává všechny mostní otvory. K přizvednutí deformované konstrukce při násuvu na podporu slouží právě zmíněný nos. V provozní fázi se konstrukce chová jako spojitý nosník. V montážní fázi těsně předtím, než konstrukce dosedne na podporu, se však konstrukce chová jako konzola. Proto je třeba posoudit všechny rozhodující stavy, které při výsuvu nastávají i se zohledněním případné proměnlivosti průřezu po délce konstrukce.



Obr. 9 Změna namáhání při podélném výsuvu

- **Letmá montáž konstrukcí:** Letmá montáž je způsobem realizace zavěšených konstrukcí mostů i pozemních staveb (např. hal větších rozpětí atp.) Při letmé montáži se nejprve realizují pylony, které jsou vetknuty do podloží. Na pylony se postupně segment po segmentu, zavěšují části konstrukce. Postup montáže se provádí současně na obou pylonech tak, že se segmenty zavěšují proti sobě až se konstrukce nakonec setkají uprostřed rozpětí, kde se konstrukce spojí. Letmá montáž může probíhat symetricky na obě strany směrem od pylonů, takže konstrukce v průběhu montáže funguje jako vahadlo. Případně lze provést letmou montáž nesymetricky tak, že jsou pylony z jedné strany připojeny, k již realizované části konstrukce (nebo jsou zakotveny přímo do základu) a na druhé straně jsou postupně na pylon zavěšovány segmenty. V průběhu letmé montáže konstrukce funguje jako konzola, přičemž po předepnutí funguje jako spojitý nosník. Namáhání je však také ovlivněno předpětím v závěsech, které do konstrukce vnášejí normálové síly a také případnými vloženými dočasnými podporami. Proto je třeba posoudit všechny rozhodující stavy, vzniknuvší v průběhu letmé montáže.



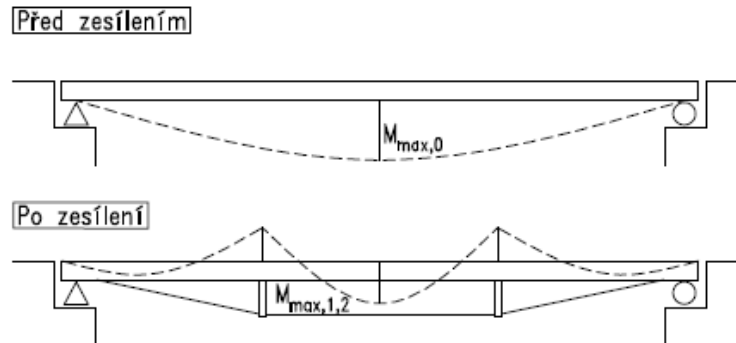
Obr. 10 Princip letmé montáže zavěšeného mostu

- **Vnesení montážního předpětí kabely v deviátorech:** Namáhání konstrukce lze optimalizovat pomocí vnesení předpětí externími kabely, jejichž geometrie je definována vedením skrze přípravky (krátké konzoly) připojené k definitivní konstrukci – tzv. deviátory. Tímto způsobem je možné vykrýt nepříznivé namáhání v průběhu montáže a po jejím dokončení lze předpětí uvolnit, kabely demontovat a deviátory z konstrukce odstranit.

V případě **rekonstrukcí stávajících objektů** je důvodem změny statického chování zpravidla snaha zlepšit namáhání konstrukce zvýšit tak její únosnost na požadovanou úroveň. Změny statického působení lze docílit řadou opatření. Některá běžná opatření pro optimalizaci statického působení v průběhu rekonstrukce jsou vyjmenována níže:

- **Vložení trvalé podpory:** Tam kde to prostorové podmínky dovolí, je nejjednodušším způsobem zvýšení únosnosti konstrukce její dodatečné podepření. Je však třeba zohlednit případné nepříjemné účinky, které dodatečné podepření může přinést. Příkladem může být například náchylnost ocelobetonového nosníku ke klopení, neboť v oblasti nad podporou záporný moment, což v důsledku znamená nutnost posoudit náchylnost dolní příčně nezajištěné pásnice ke klopení. Zároveň je třeba zohlednit historii zatížení pomocí fází výstavby. Pokud se při rekonstrukci zesilovaný prvek neodlehčí (např. vnesením předpětí deformací), je třeba uvažovat že veškerá vlastní tíha působí na původní statické schéma. Proměnné a případně ostatní stálé zatížení (pokud jej bylo možné před rekonstrukcí odstrojit) působí na spojitou konstrukci, vytvořenou vložением podpory.
- **Vylehčení vzpínadlovou konstrukcí:** Pokud do konstrukce z důvodu omezených prostorových podmínek nelze vložit dodatečné podpory, nabízí se jako další řešení vylehčení pomocí vzpínadlové konstrukce. Vylehčení vzpínadlem se realizuje připojením definovaného počtu vzpěr, připojených na jedné straně k zesilované konstrukci a na straně druhé připojených k táhlům. Táhla jsou po stranách zakotvena zpravidla do zesilované konstrukce, případně mohou být zakotvena do samostatného bloku. Předpětím táhel se aktivují vzpěry, které následně působí jako podpory pro zesilovaný prvek. Zesilovaný prvek se tak chová jako spojitý nosník. Účinek vylehčení závisí na zejména na míře předpětí. Nevýhodou vzpínadel je vnesení normálové síly do konstrukce vlivem předpětí táhel kotvených přímo do konstrukce. Případně u konstrukcí

kotvených do samostatných bloků je nevýhodou vznik značné vodorovné síly, kterou tento blok musí přenést.



Obr. 11 Vylehčení vzpínadlovou konstrukcí

- **Změna statického působení změnou tuhosti styčníků:** Principem zesílení je v tomto případě zvýšení stupně statické neurčitosti pomocí úpravy styčnicku. Příkladem může být například zesílení stropnic prostě uložených na průvlaky, které jsou při rekonstrukci upraveny připojením přílozek tak, aby se docílilo průběžnosti pásnic. Díky tomuto kroku konstrukce působí jako spojitý nosník. Podobně lze upravit kloubové přípoje nosníku na sloup tak, aby po zesílení působily jako tuhé spoje, čímž je dosaženo rámového chování celé konstrukce. Cílem zesílení styčnicků je tedy optimalizace namáhání v konstrukci. Při rekonstrukci je však opět třeba vzít v potaz zda-li je možné konstrukci před zesílením styčnicku odtížit. Pokud tomu tak není (naprostá většina případů) je třeba uvažovat působení vlastní tíhy na původní konstrukci a následné provozní zatížení působící na zesílenou konstrukci.
- **Vnesení dodatečného předpětí kabely v deviátorech:** Podobně jako v případě montáže lze namáhání konstrukce optimalizovat pomocí vnesení předpětí externími kabely, vedenými skrze tzv. deviátory – přípravky (krátké konzoly) připojené k definitivní konstrukci. Tímto způsobem je možné optimalizovat namáhání konstrukce dle požadavků konkrétního projektu.

## 1.5. Předpětí konstrukce vnesením deformací

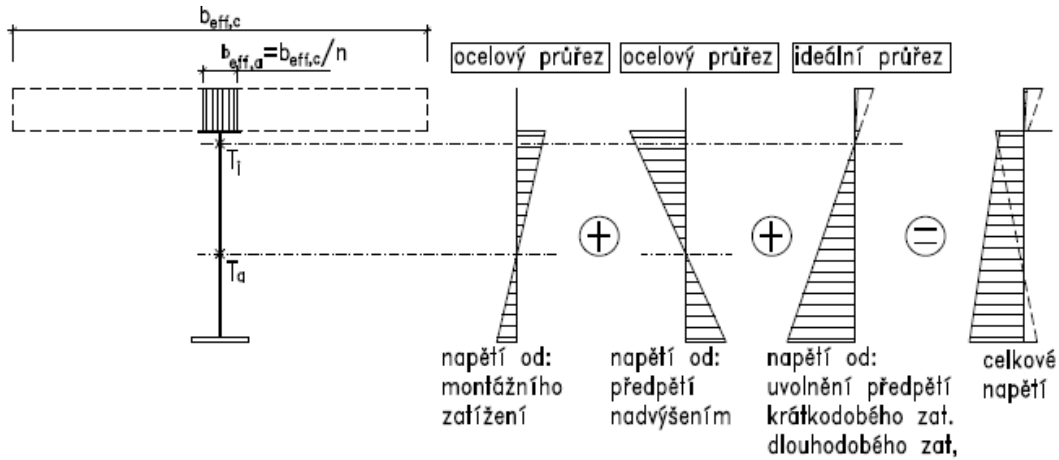
V průběhu montáže či rekonstrukce může být namáhání konstrukce optimalizováno předpětím konstrukce vnesením deformací, tj. nadzdvížením konstrukce. Cílem je odlehčit stálé zatížení před vytvrdnutím betonu, nebo provedením zesílení konstrukce. Předpětí vnesením deformací připadá v úvahu při montáži ocelobetonových konstrukcí, nebo při zesilování stávajících konstrukcí.

V případě ocelobetonových konstrukcí je po vytvrdnutí betonu možné předpětí uvolnit, čímž dochází k zatížení spřaženého průřezu. Oproti konstrukcím při montáži nepodepřených působí na spřažený průřez kromě proměnného zatížení také část stálého zatížení. Postup předpínání i princip namáhání stávající konstrukce předpětím zesilované konstrukce je v zásadě stejný jako v případě ocelobetonových konstrukcí.

Míra odlehčení vlastní tíhy obecně závisí na poměru účinku předpětí (nadzdvížení) k účinku vlastní tíhy. V důsledku vnesení předpětí deformací mohou nastat následující případy namáhání v konstrukci:

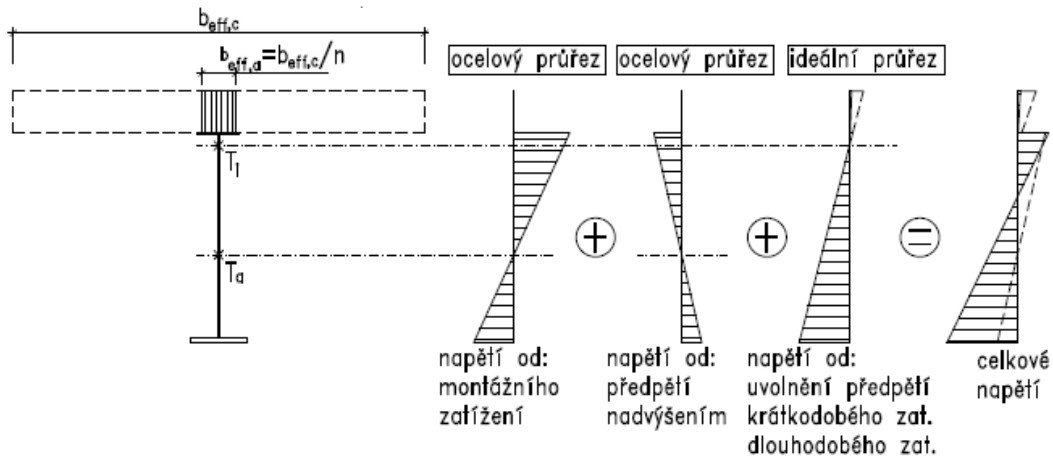


- **Předpětí je větší než stálé zatížení:** V případě kdy je účinek předpětí větší, než účinek vlastní tíhy působí na spřažený (zesílený) průřez kromě proměnného zatížení také stálé zatížení a zatížení potřebné k předpětí konstrukce nadzdvižením.



Obr. 12 Namáhání ocelobetonové konstrukce v případě, kdy je účinek předpětí větší než účinek vlastní tíhy

- **Předpětí se rovná stálému zatížení:** Pokud je předmětem posouzení ocelobetonová konstrukce, můžeme uvažovat, že se jedná o konstrukci při montáži podepřenou. Pokud je předmětem posouzení zesilovaná konstrukce, můžeme takovou konstrukci posuzovat jako plně odlehčenou. V obou případech tedy stálé i proměnné zatížení působí na spřažený (zesílený) průřez. Žádné další účinky předpětí se při posouzení neprojeví.
- **Předpětí je menší než stálé zatížení:** Pokud je účinek předpětí nadzdvižením menší než stálé zatížení, bude část stálého zatížení působit na původní (ocelový, případně nezesílený) průřez, zatímco zbylá část stálého zatížení (rovnající se účinku předpětí) bude společně s proměnným zatížením působit na spřažený (zesílený) průřez.



Obr. 13 Namáhání ocelobetonové konstrukce v případě, kdy je účinek předpětí menší než účinek vlastní tíhy

## 2. Modelování postupu výstavby v Dlubal RFEM

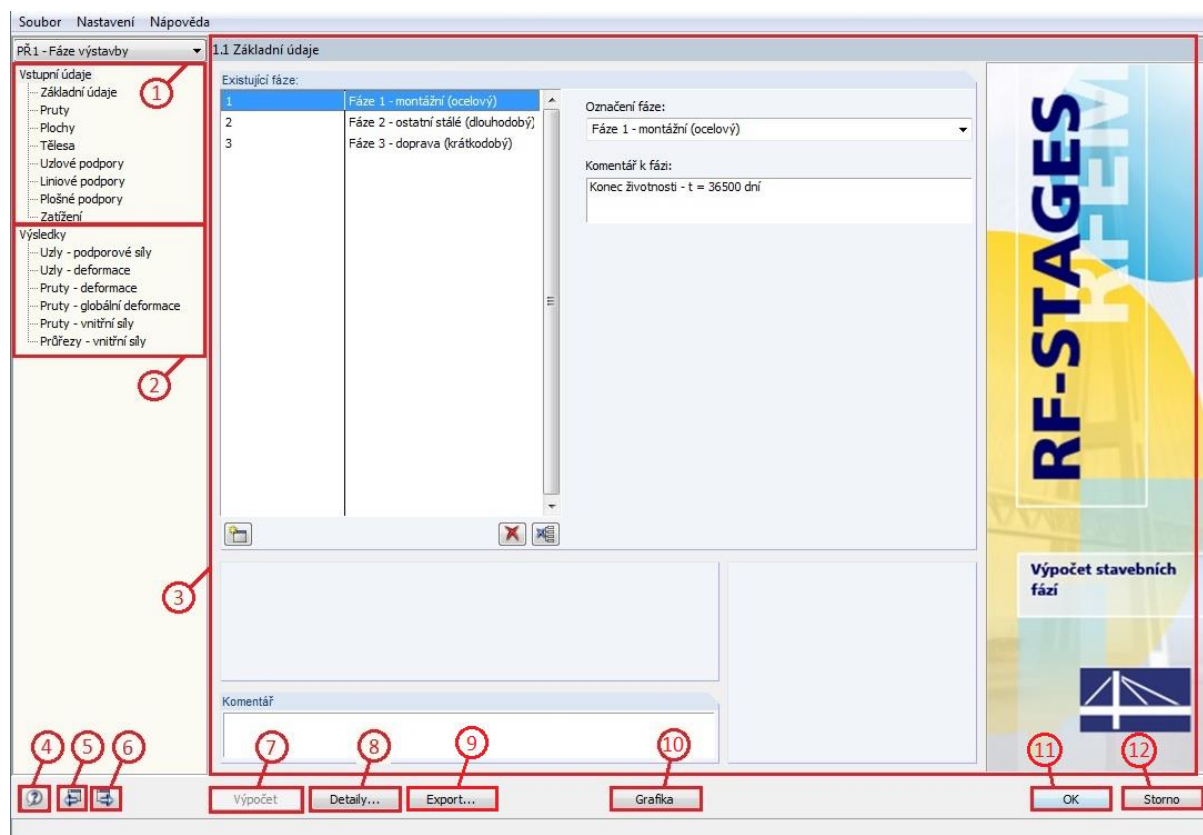
Výpočet se zohledněním postupu výstavby (dále také fází výstavby) se v rámci statického softwaru Dlubal RFEM provádí v přídatném modulu RF-Stages. Následující kapitola uvádí podrobný návod pro posouzení konstrukce v tomto modulu. Předpokládá se použití verze programu Dlubal RFEM 5.13, doporučení však budou s malými výjimkami kompatibilní i s vyššími verzemi programu.

### 2.1. Základní prostředí modulu RF – Stages




Modul RF-Stages je standardní součástí studentské verze programu Dlubal RFEM. V případě komerčních verzí je nutné jej ke standardní licenci dokoupit. Modul spustíme ve standardním prostředí programu Dlubal RFEM spuštěním odkazu:

*Navigátor projektu → záložka Data → přídatné moduly → RF-Stages*

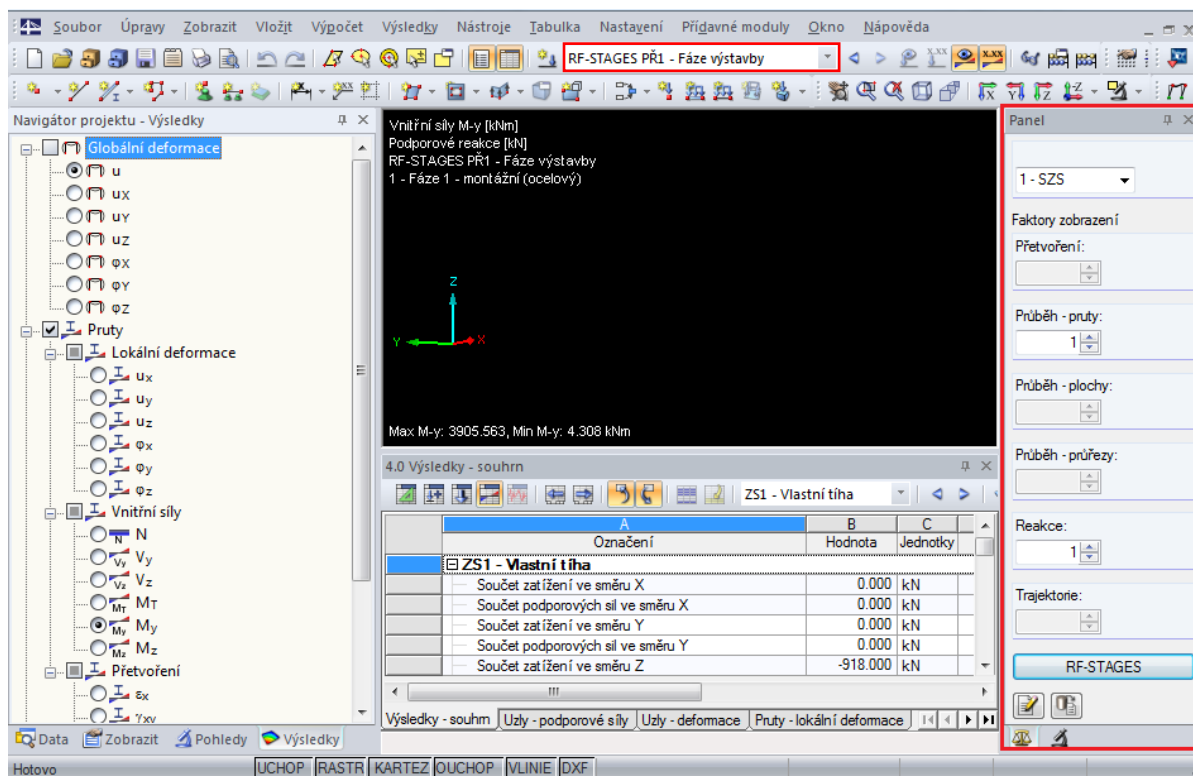
Po spuštění modulu se zobrazí základní prostředí modulu, sestávající z navigačního okna se záložkami *Vstupní údaje* a *Výsledky*, z interaktivního okna pro zadání dat pro jednotlivé vstupy. V dolní části dialogového okna najdeme pás karet *Nápověda (F1)*, *Předchozí tabulka (F3)*, *Následující tabulka (F2)*, *Výpočet*, *Detaily*, *Export*, *Grafika*, *Ok* a *Storno*.



Obr. 14 Základní prostředí modulu RF-Stages

Č.	Symbol	Název	Popis
1	-	<i>Vstupní údaje</i>	Umožňuje přepínat mezi záložkami pro vstupní údaje v levém navigačním okně.
2	-	<i>Výsledky</i>	Umožňuje přepínat mezi záložkami pro typy výsledků v levém navigačním okně. <b>Karta se zobrazí až po provedení výpočtu v modulu RF-Stages.</b>
3	-	-	Umožňuje zadání vstupních dat pro jednotlivé záložky vstupních údajů, popřípadě zobrazí hodnoty na základě zvolené záložky výsledků. Pro každou záložku dialogové okno mění vzhled. Podrobnosti viz kap. 2.4.
4		<i>Nápověda</i>	Zobrazí nápovědu pro přídavný modul RF Stages [6]
5		<i>Předchozí tabulka</i>	Přepne na předchozí záložku v rámci karet <i>Vstupní údaje</i> , nebo <i>Výsledky</i>
6		<i>Následující tabulka</i>	Přepne na následující záložku v rámci karet <i>Vstupní údaje</i> , nebo <i>Výsledky</i>
7	-	<i>Výpočet</i>	Zahájí výpočet v modulu RF-Stages
8	-	<i>Detaily</i>	Umožňuje podrobné nastavení parametrů výpočtu v modulu RF-Stages, přičemž toto nastavení je nadřazené globálním parametrům obecného prostředí Dlubal RFEM. Dále umožňuje specifikovat zobrazení výsledků, způsob vkládání prutů v jednotlivých fázích, či nastavení součinitele pro vygenerované účinky vlastní tíhy. Podrobnosti v kap. 2.6.
9	-	<i>Export</i>	Umožňuje export výsledků, spočtených v modulu RF.-Stages do obecného prostředí programu Dlubal. Po provedení exportu není nutné pro náhled výsledků spouštět modul RF-Stages a výsledky lze navíc dále zpracovat v dalších přídavných modulech. <b>Karta se zobrazí až po provedení výpočtu v modulu RF-Stages.</b>
10	-	<i>Grafika</i>	Přepne modul RF-Stages do módu prohlížení a skryje prostředí modulu RF-Stages. Ukončení módu prohlížení se provede stiskem tlačítka zpět ve žlutém rámečku.
11	-	<i>Ok</i>	Uloží data, která jsou v současnou dobu nastavena v rámci modulu RF-Stages a ukončí modul.
12	-	<i>Storno</i>	Ukončí modul RF-Stages bez uložení dat

Po provedení výpočtu v modulu RF-Stages a přepnutí módu prohlížení, případně prohlížení výsledků z modulu RF-Stages v obecném prostředí Dlubal RFEM se v pravé části plochy zobrazí panel nástrojů *Panel*, který v horní části umožní přepínat mezi jednotlivými fázemi, ve střední části *Panelu* se dají upravit měřítka pro vykreslení výsledků. Stisknutím tlačítka *RF-Stages* se spustí přídavný modul.



Obr. 15 Panel pro zobrazení výsledků modulu RF-Stages v obecném prostředí Dlubal RFEM

## 2.2. Princip výpočtu v modulu RF-Stages

Pomocí numerického výpočtu v modulu RF-Stages lze podrobně analyzovat vliv postupu výstavby, či rekonstrukce na namáhání konstrukce. S jistými malými omezeními lze zohlednit všechny typy změn konstrukce, které mohou nastat (viz kap. 1). Výpočet se provádí Newton-Rhapsonovou metodou teorie velkých deformací (III. Řád) ve následujících krocích:

- Výpočet deformací a vnitřních sil na nedeformované konstrukci v dílčí fázi výstavby metodou velkých deformací.
- Přidání nedeformované konstrukce a příslušného zatížení v nadcházející fázi k deformované konstrukci (zatížené vnitřními silami) fáze předchozí. Výpočet celé konstrukce, sloučené z obou fází, je opět proveden metodou velkých deformací.
- Opakování předchozího kroku až do vyčerpání všech definovaných fází výstavby.

Výpočet **metodou velkých deformací** (III. Řádem) dle Newtona-Rhapsona, zohledňuje při analýze vnitřních sil přírůstek podélných i příčných sil, vzniklých v důsledku geometricky nelineárního výpočtu. Výpočet III. Řádem lze v Dlubalu RFEM provést pro tělesa, prutové i plošné prvky. Při výpočtu se v každém iteračním kroku vytvoří matice tuhosti pro deformovanou konstrukci. Z tohoto důvodu je třeba dávat pozor na způsob definování zatížení. Zatížení definované dle lokálního souřadného systému bude vždy definováno na základě vztahu ke střednici zatíženého prvku. Z toho vyplývá, že při deformaci tohoto prvku se zatížení pootočí a posune. Naproti tomu zatížení, definované dle globálního souřadného systému, se při deformaci prvku pouze posouvá, ale nepootočí. Podrobnosti viz manuál k programu RFEM kap. 7 [7].

Vzhledem k tomu, že se výpočet se zohledněním fází výstavby počítá geometricky nelineárním výpočtem, je třeba zajistit, aby v žádné fázi nedošlo k nestabilitě konstrukce. V takovém

případě výpočet nebude konvergovat a přeruší se s chybovým hlášením. U **rozsáhlejších analýz** složitých konstrukcí s větším množstvím fází výstavby lze důrazně doporučit postupný výpočet konstrukce po fázích. Tedy každou fází výstavby před přidáním nadcházející fáze nechat spočítat. Pokud v dané fázi dochází k nestabilitě konstrukce je poměrně snadné problém odhalit a konstrukci optimalizovat. Při pokusu o zadání všech vstupních parametrů složitě konstrukce najednou se zpravidla při případné nestabilitě velmi obtížně odhalí chyba.

### 2.3. Postup modelování konstrukce s fázemi výstavby

Posouzení konstrukce se zohledněním změn ve fázích výstavby se provede na vytvořeném numerickém modelu, na kterém je ve fázích realizace aplikováno montážní zatížení a v posledních fázích provozní zatížení. Postup modelování konstrukce s fázemi výstavby je po krocích znázorněn níže:

- 1) **Modelování konstrukce:** Nejprve je třeba namodelovat celou konstrukci i s případným zesílením v obecném prostředí Dlubal RFEM. Konstrukci lze modelovat z těles, prutových a plošných prvků. Zároveň se doporučuje ve fázích výstavby používat **prověřené pruty** typu nosník (prut s ohybovou tuhostí) či tuhý prut. Některé typy prutů, které do výpočtu zavádí nelinearity (např. prut typu lano) mohou při výpočtu v modulu RF-Stages způsobit chyby. Pokud si model daný typ prutu přesto žádá, je třeba nejprve provést ověření funkčnosti tohoto typu prutu na konstrukci, kde lze lehkým výpočtem (případně ze zkušenosti) stanovit vnitřní síly a provést tak validaci výsledků z modulu RF-Stages.
- 2) **Zadání zatížení:** Na existující finální konstrukci je následně třeba aplikovat zatížení. Pro každou fází je třeba mít minimálně jeden řídicí zatěžovací stav pro stálé zatížení. Je nezbytné rozdělit zatěžovací stavy stálého zatížení tak, aby v každé fázi působilo zatížení odpovídající té části konstrukce, která se v příslušné fázi přidává. Účinek stálého zatížení totiž v konstrukci zůstává. **Pokud tedy byla v rámci jedné fáze do výpočtu zadána vlastní tíha příslušné části konstrukce, v dalších fázích už ji na konstrukci neaplikujeme.** V každé fázi lze také přidat zatěžovací stavy proměnného zatížení, které však nejsou povinné. Účinek proměnného zatížení, na rozdíl od stálého, v konstrukci nezůstává. Pro každou fází je tedy třeba připravit proměnné zatížení, působící na momentální podobu rozpracované konstrukce – konstrukci tvořenou všemi částmi od první až do posuzované fáze výstavby. Modul RF-Stages umožňuje zatížení ve fázích výstavby definovat též kombinací několika zatěžovacích stavů, upravenými dílčími součiniteli.
- 3) **Zadání vstupních dat v modulu RF-Stages:** Po otevření modulu RF-Stages je nejprve nutné definovat všechny fáze výstavby, rozdělit celou konstrukci do definovaných fází, definovat podepření v jednotlivých fázích a přiřadit stálé a krátkodobé zatěžovací stavy (nebo kombinace zatěžovacích stavů) do příslušných fází. Způsob zadání vstupních dat je podrobněji popsán v kap. 2.4.
- 4) **Nastavení parametrů výpočtu:** S ohledem na potřeby konkrétního projektu je možné upravit parametry výpočtu. Podrobnosti jsou uvedeny v kap. 2.5.
- 5) **Výpočet:** Po splnění všech výše zmíněných bodů je možné spustit výpočet. Nastavení parametrů se řídí jak dle globálního nastavení v obecném prostředí programu RFEM, tak dle nastavení přímo v modulu RF-Stages, přičemž nastavení uvedené v RF-Stages je nadřazené. Po provedení výpočtu se zpřístupní možnost prohlížení výsledků a možnost exportu výsledků do obecného prostředí programu RFEM.

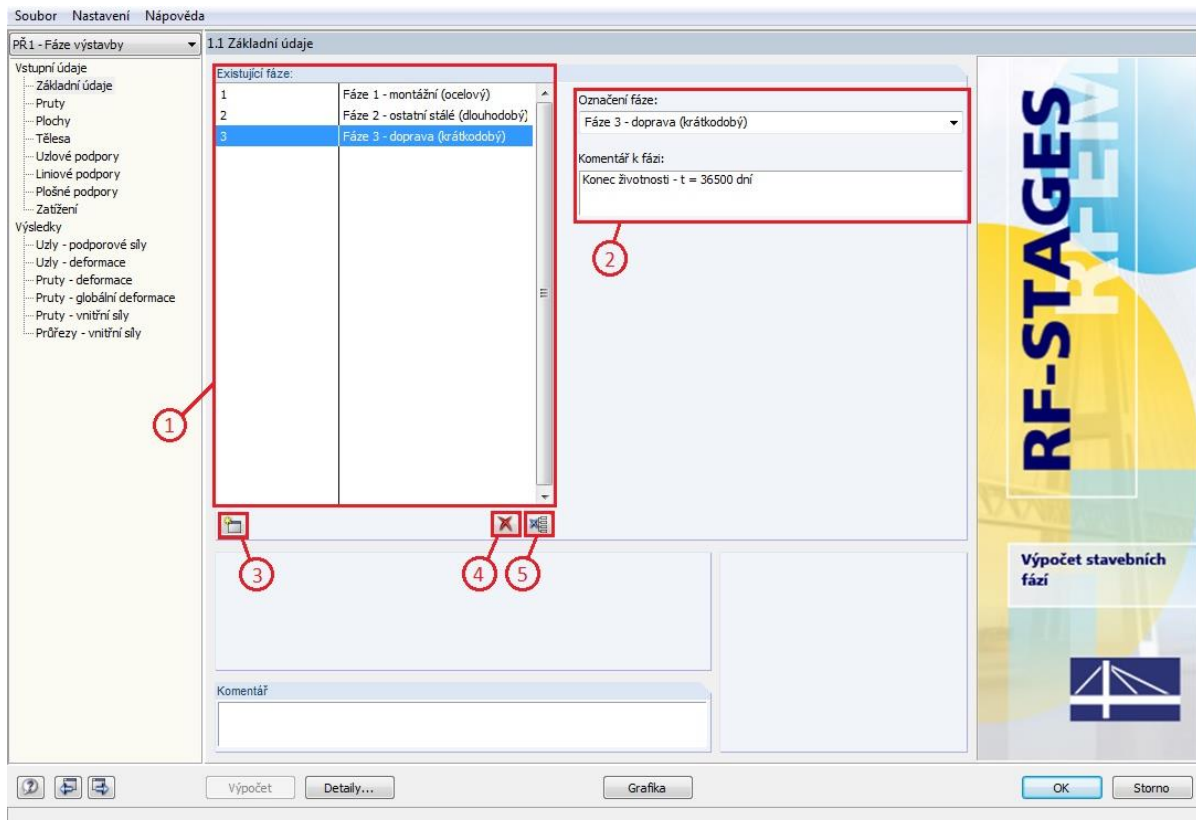
- 6) **Prohlížení výsledků:** Po provedení výpočtu lze v kartě výsledky modulu RF-Stages prohlížet výsledky na prutech, plochách a v uzlech konstrukce. Výsledky jsou v rámci modulu RF-Stages shrnuté v přehledných tabulkách, připravených pro export. Stisknutím tlačítka *Grafika*, nebo *Ok* je možné přepnout se do obecného prostředí programu RFEM a výsledky vykreslit běžným způsobem přímo na konstrukci. Stisknutím tlačítka *Export* lze výsledky z modulu RF-Stages exportovat do prostředí RFEM, takže je možné dané výsledky analyzovat v dalších přídatných modulech.
- 7) **Optimalizace modelu:** Pokud je třeba z důvodu nestability, nebo po provedení posouzení konstrukci upravit. Je třeba smazat údaje modulu RF-Stages od fáze, kdy dochází ke změně, a upravená vstupní data znovu zadat, protože modul RF-Stages automaticky neaktualizuje změny provedené v obecném prostředí RFEM. Toto se však může ve vyšších verzích modulu měnit.

## 2.4. Zadání vstupních dat v modulu RF-Stages




Zadání vstupních údajů se provede v jednotlivých záložkách karty *Vstupní údaje* v levém navigačním okně modulu RF-Stages (viz kap. 2.1). V jednotlivých záložkách je možné definovat *základní údaje* o fázích výstavby, rozdělit konstrukci do fází pomocí záložek *pruty*, *plochy*, *tělesa*, definovat podepření konstrukce v záložkách *uzlové podpory*, *liniové podpory*, *plošné podpory* a aplikovat zatížení v jednotlivých fázích výstavby v záložce *zatížení*.

### 2.4.1. Základní údaje

V záložce *základní údaje* lze přidávat a mazat jednotlivé fáze výstavby. Každou fázi je třeba pojmenovat, případně připojit komentář. Fáze definované v této záložce se následně objeví ve výběru v dalších záložkách. Bez definice fází v této záložce tedy není možné pokračovat v zadávání vstupních údajů v RF-Stages.

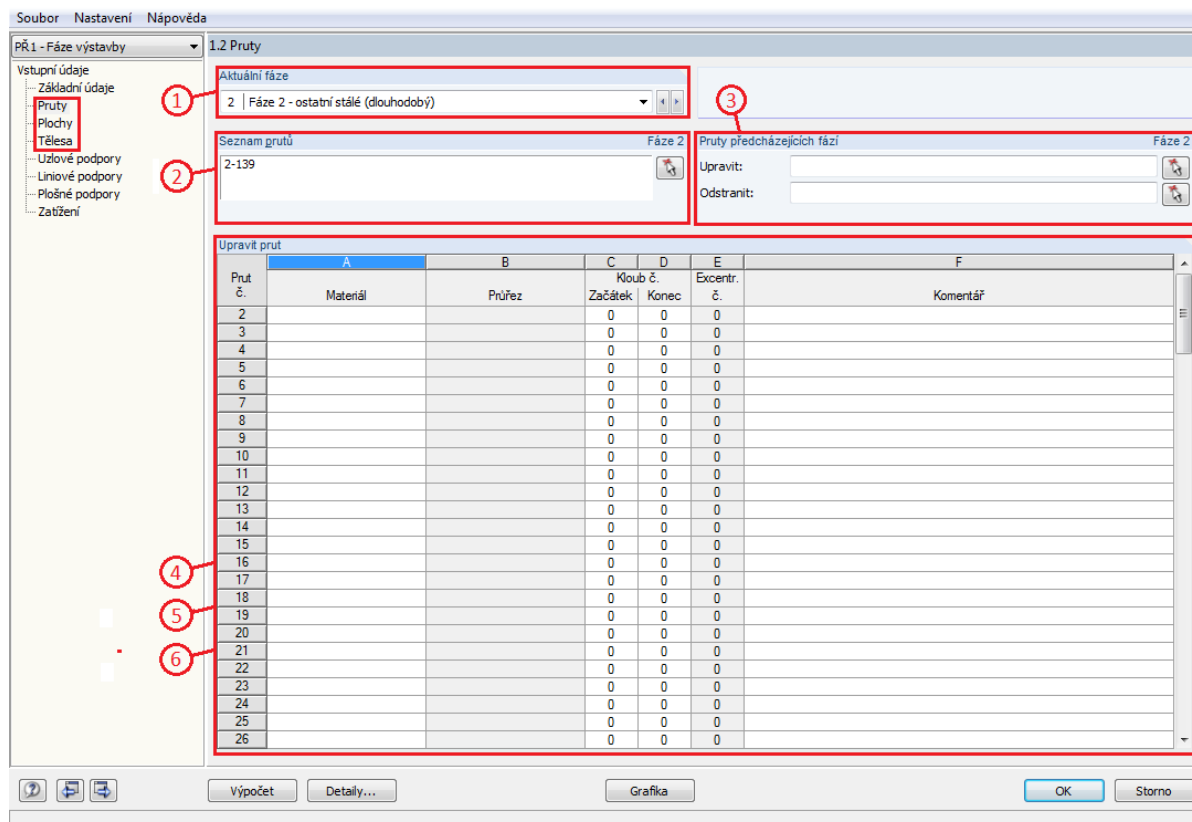


Obr. 16 Definování fází výstavby v záložce základní údaje



Č.	Symbol	Název	Popis
1	-	<i>Existující fáze</i>	V dialogovém okně jsou uvedeny všechny definované fáze výstavby. Zde definované fáze lze použít v dalších záložkách modulu RF-Stages.
2	-	<i>Označení fáze Komentář k fázi</i>	V dialogovém okně <i>označení fáze</i> definujete název vybrané fáze výstavby. Dále je možné v samostatném dialogovém okně přidat <i>komentář k fázi</i> .
3		<i>Vytvořit novou fázi</i>	Přidá novou, nepojmenovanou položku fáze výstavby do seznamu <i>existující fáze</i> .
4		<i>Smazat vybranou fázi</i>	Smaže vybranou (modře označenou) fázi a všechny po ní následující fáze.
5		<i>Smazat všechny fáze</i>	Smaže všechny definované fáze výstavby.

### 2.4.2. Vkládání prvků do fáze

Vkládání jednotlivých částí konstrukce se provádí v záložkách *pruty*, *plochy* a *tělesa*. Prostředí dialogových oken pro vkládání všech typů prvků je obdobné, liší se pouze možnosti způsobu úprav, které jsou pro pruty, plochy a tělesa rozdílné. Pro definování konstrukce v jednotlivých fázích je nejprve třeba v horním dialogovém okně vybrat příslušnou fázi. Následně je možné v dané fázi přidávat, mazat, či upravit vlastností prvků.



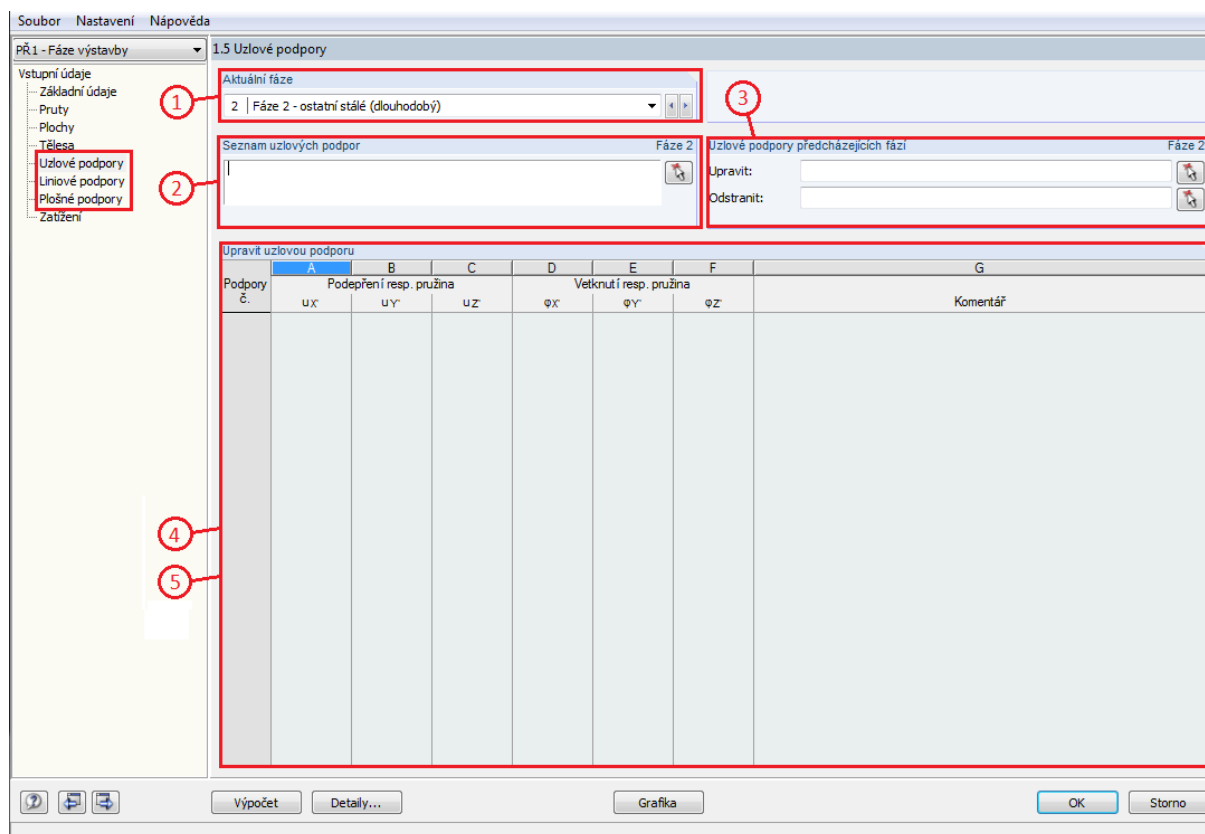
Obr. 17 Vkládání prvků do fáze

Č.	Symbol	Název	Popis
1	-	<i>Aktuální fáze</i>	V dialogovém okně <i>aktuální fáze</i> nastavíme fázi, do které chceme prvky vložit. Veškeré úpravy, provedené v ostatních dialogových oknech začnou platit v aktuální nastavené fázi a jsou platné i pro všechny následující fáze.
2		<i>Seznam prutů/ ploch/těles</i>	Umožňuje přidávat pruty, plochy nebo tělesa v závislosti na zvolené záložce do fáze. Přidávání je možné provést přímým výpisem čísel požadovaných prvků (lze zjistit v tabulkovém výpisu programu RFEM), nebo požadované prvky graficky vybrat po stisknutí tlačítka <i>vybrat pruty/plochy/tělesa a přidat je do fáze</i> .
3		<i>Pruty/plochy/ tělesa předcházejících fází</i>	Umožňuje definovat, které pruty/plochy/tělesa budou smazány, nebo budou upraveny. Požadované prvky lze vybrat přímým výpisem čísel příslušných prvků (lze zjistit v tabulkovém výpisu programu RFEM), nebo požadované prvky graficky vybrat po stisknutí příslušného tlačítka. Dialogové okno <i>pruty/plochy/tělesa předcházejících fází</i> se zobrazí až ve druhé a dalších fázích.
4	-	<i>Upravit prut</i>	Umožňuje upravit vlastnosti prutů vybraných v dialogovém okně <i>pruty předcházejících fází</i> → <i>upravit</i> . V rámci této operace je možné upravit materiál, či klouby na koncích prutu. Pokud je třeba upravit průřez prutu (např. při jeho zesílení), doporučuje se <b>připojit k původnímu průřezu prvky zesílení působící na excentricitě</b> tak, aby společně s původním prutem vytvořily požadovaný průřez. Je třeba zmínit, že tuto operaci <b>nelze provést prostým smazáním prutu a přidáním nového prutu s jiným průřezem v téže poloze</b> , neboť by se smazáním původního prutu došlo ke ztrátě napětí v tomto prutu a výpočet by byl kompromitován.
5	-	<i>Upravit údaje plochy</i>	Umožňuje upravit vlastnosti ploch vybraných v dialogovém okně <i>plochy předcházejících fází</i> → <i>upravit</i> . V rámci této operace je možné upravit materiál, či excentricitu ploch.
6	-	<i>Upravit tělesa</i>	Umožňuje upravit vlastnosti ploch vybraných v dialogovém okně <i>tělesa předcházejících fází</i> → <i>upravit</i> . V rámci této operace je možné upravit materiál těles.

### 2.4.3. Vkládání podpor do fází



Princip vkládání podpor do fází je obdobný jako v případě vkládání prvků do fází. V rámci příslušných záložek lze do jednotlivých fází přidat *uzlové*, *liniové* či *plošné* podpory. Dialogy pro vkládání všech typů podpor jsou obdobné, liší se pouze možnosti úprav, které jsou stejné pro *uzlové* a *liniové* podpory, ale mírně odlišné pro *plošné* podpory.





Obr. 18 Vkládání podpor do fází

Je třeba zdůraznit, že v **každé fázi musí být konstrukce dostatečně podepřena** tak, aby byly odebrány všechny stupně volnosti a nenastal výjimečný případ podepření. Toto je zejména důležité u konstrukcí, které se realizují po samostatných částech, které se spojí v jeden celek až v posledních fázích výstavby (např. při letmé montáži mostní konstrukce).

Č.	Symbol	Název	Popis
1	-	<i>Aktuální fáze</i>	V dialogovém okně <i>aktuální fáze</i> nastavíme fázi, do které chceme podpory vložit. Veškeré úpravy, provedené v ostatních dialogových oknech začnou platit v aktuální nastavené fázi a jsou platné i pro všechny následující fáze.
2		<i>Seznam uzlových/ liniových/ plošných podpor</i>	Umožňuje přidávat <i>uzlové, liniové</i> nebo <i>plošné</i> podpory v závislosti na zvolené záložce do fáze. Přidávání je možné provést přímým výpisem čísel požadovaných podpor (lze zjistit v tabulkovém výpisu programu RFEM), nebo tyto podpory graficky vybrat po stisknutí tlačítka <i>vybrat uzlové/liniové/plošné podpory a přidat je do fáze</i> .
3		<i>Uzlové/ liniové/ plošné podpory předcházejících fází</i>	Umožňuje definovat, které uzlové/liniové/plošné podpory budou smazány, nebo budou upraveny. Požadované prvky lze vybrat přímým výpisem čísel příslušných podpor (lze zjistit v tabulkovém výpisu programu RFEM), nebo tyto podpory graficky vybrat stisknutím tlačítka. Dialogové okno <i>uzlové/liniové/plošné podpory předcházejících fází</i> se zobrazí až ve druhé a dalších fázích.

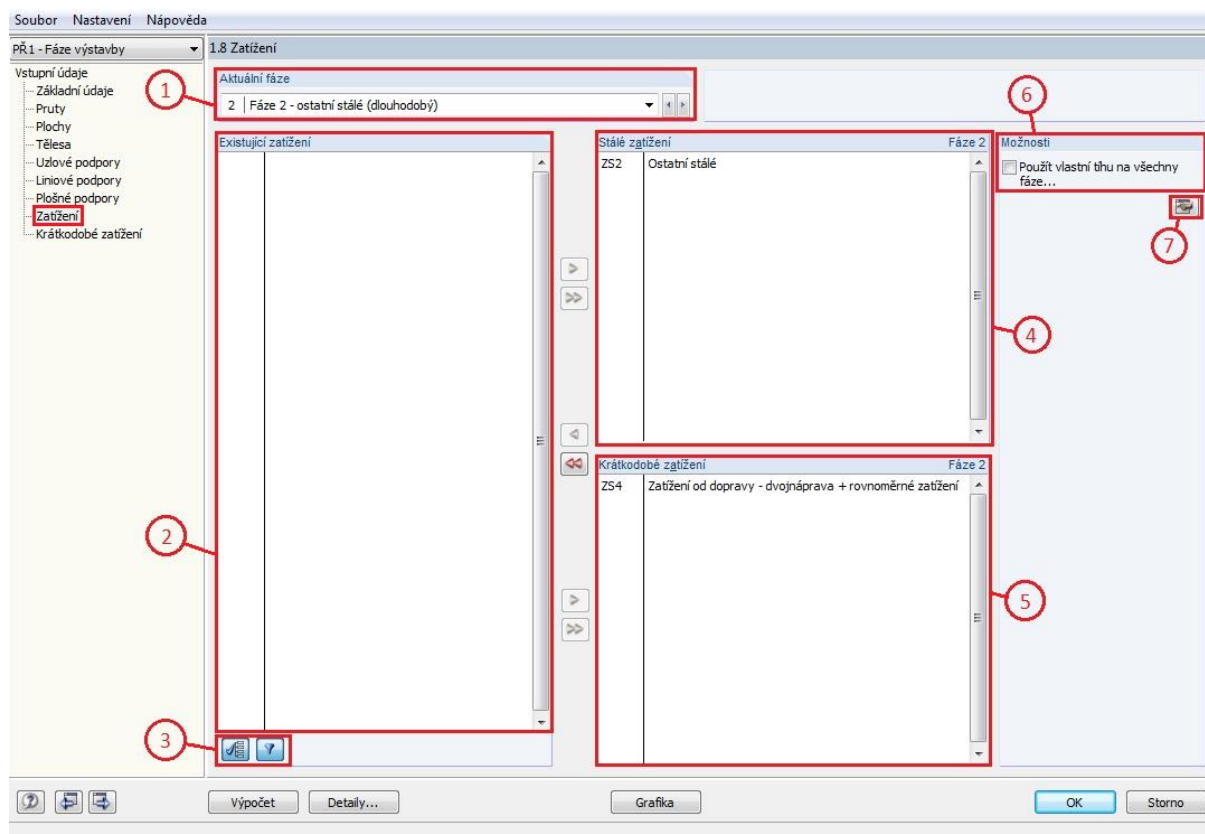
4	-	<i>Upravit uzlovou/liniovou podporu</i>	V závislosti na zvolené záložce umožňuje upravit vlastnosti uzlových nebo liniových podpor vybraných v dialogovém okně <i>uzlové/liniové podpory předcházejících fází</i> → <i>upravit</i> . U těchto podpor je možné uvolnit, či odebrat všechny stupně volnosti v prostoru, tedy posuny $u_x$ , $u_y$ , $u_z$ a rotace $\phi_x$ , $\phi_y$ , $\phi_z$ . Zároveň je možné měnit translační i rotační tuhosti.
5	-	<i>Upravit plošnou podporu</i>	Umožňuje upravit vlastnosti plošných podpor vybraných v dialogovém okně <i>plošné podpory předcházejících fází</i> → <i>upravit</i> . U plošných podpor lze uvolnit, odebrat, nebo upravit tuhost translačních stupňů volnosti $u_x$ , $u_y$ , $u_z$ . Případně lze uvolnit, odebrat či upravit tuhost smykové tuhosti plošné podpory $v_{xz}$ a $v_{yz}$ .

#### 2.4.4. Definice zatížení v jednotlivých fázích



Podobně jako v předchozích záložkách je nejprve třeba v horním dialogovém okně vybrat příslušnou fázi do které chceme zatížení vložit. Následně můžeme definovat vybrané *existující zatížení* ze seznamu buď jako *stálé zatížení*, nebo jako *krátkodobé zatížení*. Existující zatížení mohou být definována jako zatěžovací stavy i jako kombinace zatížení.



Doporučuje se do fází zadávat spíše **kombinace zatížení s již nastavenými dílčími součiniteli** a v modulu RF-Stages již dílčí součinitele neupravovat, aby nedošlo ke dvojkové chybě (dvojnásobnému přenásobení stejným součinitelem). Každý zatěžovací stav, nebo kombinace zatížení lze ve fázích výstavby použít pouze jednou, proto je třeba všechna zatížení rozdělit do příslušných fází výstavby. Tedy pokud budeme mít například 7 fází výstavby, kdy v každé fázi budeme chtít současně prověřit vliv montážního zatížení, je třeba vytvořit 7 zatěžovacích stavů (nebo kombinací) pro stálé zatížení a sedm zatěžovacích stavů (nebo kombinací) pro krátkodobé zatížení.

Jak již byl zmíněno dříve, každá fáze **musí obsahovat řídicí stálé zatížení - tedy alespoň jeden definovaný zatěžovací stav (nebo kombinaci) stálého zatížení**. Fáze ale nemusí obsahovat žádné krátkodobé zatížení. Účinky stálého zatížení působí vždy od fáze, ve které byly zadány po dobu všech dalších fází výstavby. Vlastní tíhu konstrukce tedy zadáváme pouze na části konstrukce, kterou v aktuální fázi do výpočtu přidáváme. Účinky krátkodobého zatížení naproti tomu působí pouze v aktuální fázi a nenačítají se do dalších fází. Krátkodobé zatížení tedy definujeme na libovolnou část konstrukce v aktuální fázi, nejen na část konstrukce, která se v dané fázi zrovna přidává.

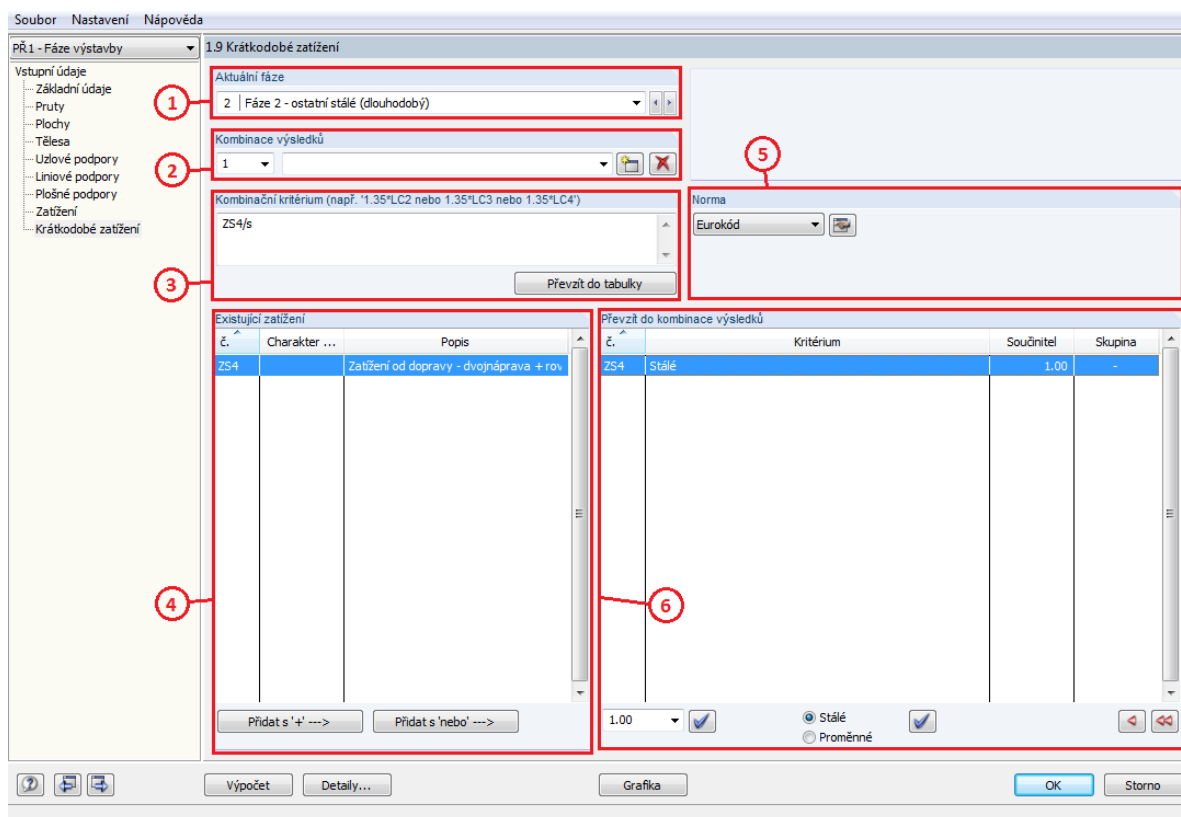


Obr. 19 Definice zatížení v jednotlivých fázích

Č.	Symbol	Název	Popis
1	-	<i>Aktuální fáze</i>	V dialogovém okně <i>aktuální fáze</i> nastavíme fázi, do které chceme atížení vložit.
2	-	<i>Existující zatížení</i>	V seznamu jsou uvedeny všechny definované zatěžovací stavy (nebo kombinace zatížení), které jsou k dispozici. Přiřazení zatěžovacího stavu (nebo kombinace) do fáze se provede označením příslušného zatížení a stisknutím tlačítka  před oknem <i>stálé zatížení</i> , respektive před oknem <i>krátkodobé zatížení</i> . Přidání všech zbývajících zatížení do vybraného okna lze provést stisknutím tlačítka  . <b>V každé fázi musí být definováno alespoň jedno stálé zatížení.</b>
3	-	<i>Zobrazit/skrýt zatěžovací stavy použité v jiných fázích</i>	Skryje, či zobrazí zatěžovací stavy použité v jiných fázích. Tyto stavy již nelze v další fázi znovu použít.
4	-	<i>Stálé zatížení</i>	Do tohoto seznamu se přidávají zatěžovací stavy, či kombinace stálého zatížení. Účinek tohoto zatížení bude po výpočtu působit v aktuální a všech následujících fázích. <b>V každé fázi musí být definováno alespoň jedno řídicí stálé zatížení.</b>
5	-	<i>Krátkodobé zatížení</i>	Do tohoto seznamu se přidávají zatěžovací stavy, či kombinace krátkodobého zatížení. Účinek tohoto zatížení bude po výpočtu

			působit pouze v aktuální fázi. Fáze nemusí obsahovat žádné krátkodobé zatížení.
6	-	<i>Možnosti</i>	Zaškrtnutím políčka je možné aktivovat automatické generování zatížení od vlastní tíhy, působící na části konstrukce, které jsou postupně přidávány v jednotlivých fázích. Případné součinitele stálého zatížení je třeba zohlednit stisknutím tlačítka  a definicí <i>faktoru vlastní tíhy</i> v daném směru.
7		<i>Upravit detaily</i>	Případné součinitele stálého zatížení je třeba zohlednit v kartě <i>upravit detaily</i> definicí <i>faktoru vlastní tíhy</i> v daném směru.

Pokud je ve fázi definováno alespoň jedno krátkodobé zatížení, objeví se v levém navigačním okně nová záložka *vstupní údaje* → *krátkodobé zatížení*.



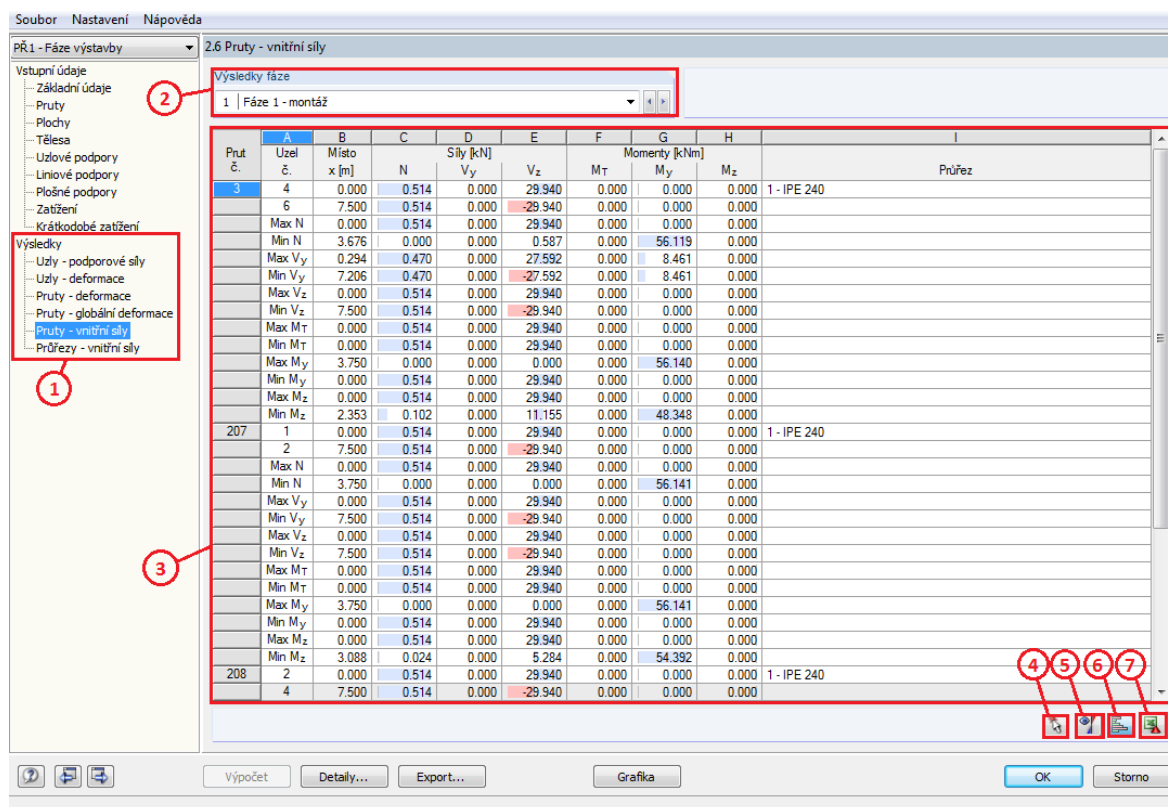
Obr. 20 Definice subkombinací krátkodobého zatížení

V rámci této záložky můžeme definovat tzv. subkombinace výsledků, tedy kombinace vytvořené pouze pro danou fázi výstavby. Opět je tedy nutné nejprve definovat, pro kterou fázi subkombinaci vytváříme a samozřejmě také definovat název subkombinace. V příslušné fázi se zobrazí dostupná krátkodobá zatížení, která byla předtím definována v záložce *zatížení*. Z těchto zatížení můžeme následně sestavit kombinace výsledků. Pro každou fázi může být vytvořeno více subkombinací.

Č.	Symbol	Název	Popis
1	-	<i>Aktuální fáze</i>	V dialogovém okně <i>aktuální fáze</i> nastavíme fázi, ve které chceme definovat subkombinace krátkodobého zatížení. Ze seznamu lze vybrat pouze fáze, ve kterých je nastaven alespoň jeden zatěžovací stav (kombinace) s krátkodobým zatížením.
2	-	<i>Kombinace výsledků</i>	Dialog <i>kombinace výsledků</i> umožňuje přidávat, mazat a pojmenovávat subkombinace definované v rámci aktuální fáze. V okně lze také přepínat mezi jednotlivými subkombinacemi.
3	-	<i>Kombinační kritérium</i>	Dialog <i>kombinační kritérium</i> zobrazí kombinační rovnici vybrané subkombinace včetně případných dílčích součinitelů a charakteru zatížení (stálé, proměnné). Do samotného okna rovnici nelze přímo zapsat, je v totiž generována akcemi provedenými v dialogích <i>existující zatížení</i> a <i>převzít do kombinace výsledků</i> .
4	-	<i>Existující zatížení</i>	Ze seznamu <i>existující zatížení</i> lze vybrat krátkodobá zatížení, která chceme přidat do subkombinace dané fáze. V seznamu jsou uvedena pouze ta krátkodobá zatížení, která byla přidána do aktuální fáze v dialogu <i>vstupní údaje</i> → <i>zatížení</i> → <i>krátkodobé zatížení</i> . Pokud přidáme krátkodobá zatížení stisknutím tlačítka <i>přidat s '+'</i> → bude výsledná kombinace výsledků zobrazovat lineární superpozici těchto zatížení. Pokud přidáme krátkodobá zatížení stisknutím tlačítka <i>přidat s 'nebo'</i> → vytvoří se tzv. skupina zatížení a v okně <i>převzít do kombinace výsledků</i> se takto přidaná zatížení označí číslem skupiny. Výsledná kombinace výsledků skupiny zatížení zobrazí maximální hodnoty všech zatížení z dané skupiny, tedy obálku účinků zatížení.
5	-	<i>Norma</i>	V tomto dialogu lze zobrazit soubory dílčích součinitelů platných pro jednotlivé evropské normy.
6	-	<i>Převzít do kombinace výsledků</i>	Seznam zobrazuje krátkodobá zatížení, přidaná do aktuální subkombinace. Pomocí dialogu <input type="text" value="1.00"/> <input checked="" type="checkbox"/> lze upravovat dílčí součinitel vybraného zatížení v subkombinaci. Jak již bylo dříve zmíněno, doporučuje se dílčí součinitele aplikovat v rámci kombinací a ty následně přidávat do fázi výstavby. V takovém případě budou všichni dílčí součinitele v dialogu <i>převzít do kombinace výsledků</i> rovny 1,0. Pomocí přepínače <input checked="" type="radio"/> Stálé <input type="radio"/> Proměnné <input checked="" type="checkbox"/> lze definovat, jestli bude účinek daného krátkodobého zatížení přičten ke stálému zatížení působícímu v dané fázi, nebo zda-li subkombinace zobrazí pouze výsledky pro kombinaci krátkodobého zatížení, definovaného v dané fázi.

#### 2.4.5. Prohlížení výsledků

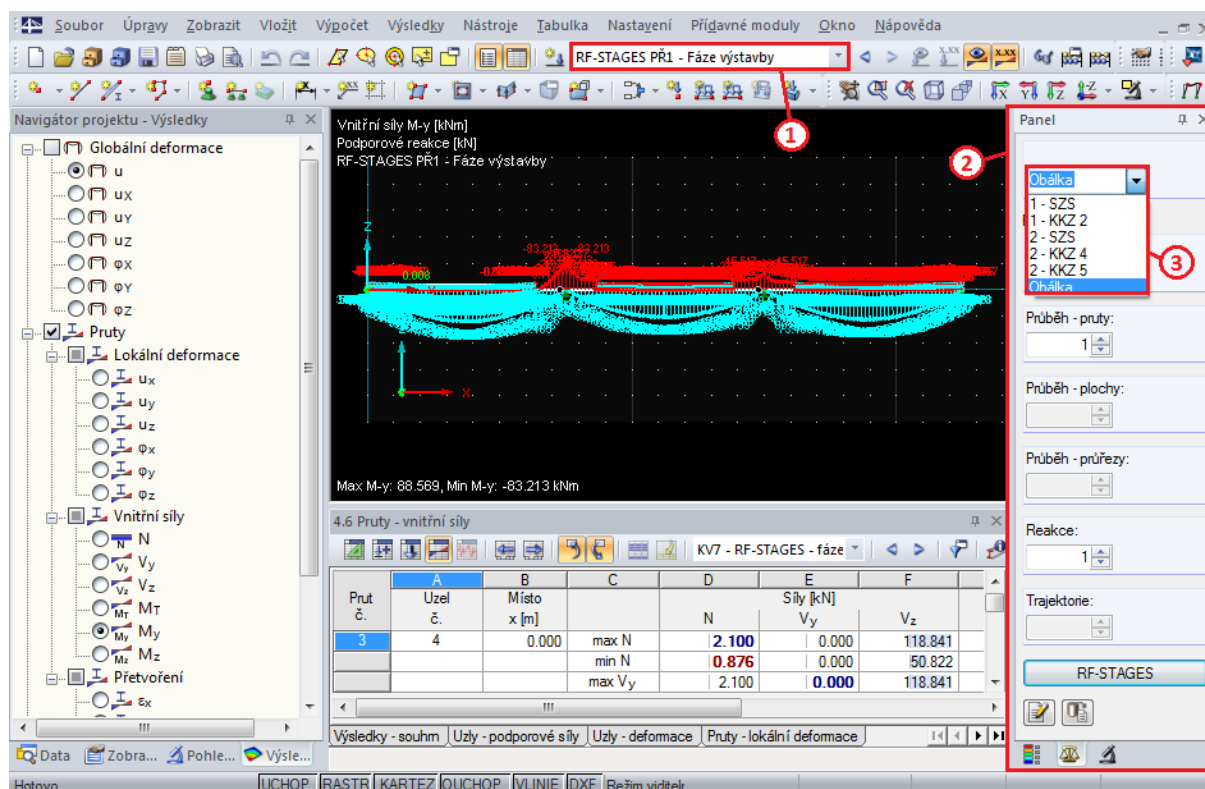
Po provedení výpočtu konstrukce v modulu RF-Stages, se v levém navigačním okně zobrazí karta *výsledky*. Na základě použitých prvků karta může obsahovat záložky s výsledky pro *uzly*, *pruty*, *plochy* či *tělesa*. Program RFEM umožňuje výsledky zobrazit dvěma způsoby. Výsledky je možno zobrazit přímo v modulu RF-Stages, kdy můžeme zvolit požadovanou záložku výsledků. V tom případě se zobrazí požadované výsledky v tabelované hodnotě, připravené pro export.



Obr. 21 Prohlížení výsledků v prostředí modulu RF-Stages – tabelované hodnoty

Č.	Symbol	Název	Popis
1	-	Výsledky	Umožňuje vybrat záložku s požadovanými výsledky. V závislosti na tom, jaké prvky byly v analýze použity, lze vybrat výsledky buď v uzlech, na prutech, na plochách či na tělesech.
2	-	Aktuální fáze	V dialogu lze vybrat požadovanou fázi výstavby, ve které chceme zobrazit výsledky.
3	-	Tabulka výsledků	Tabulka výsledků sumarizuje maximální a minimální hodnoty zobrazených výsledků.
4		Vybrat prut v grafice a přejít na tento prut do tabulky	Stisknutím tlačítka se pohled přepne do obecného prostředí RFEM. Zde je možné graficky vybrat prut, který je předmětem posouzení. Po vybrání prutu se pohled přepne zpět do modulu RF-Stages do tabulky výsledků pro vybraný prut.
5		Zobrazit aktuální výsledky v grafice	Stisknutím tlačítka při zobrazení požadovaných výsledků ve vybrané fázi výstavby a následným stisknutím jednoho z tlačítek grafika či ok se pohled přepne na požadované výsledky v dané fázi.
6		Zobrazit barvy v tabulce	Zobrazí grafy v buňkách tabulky, signalizující poměr příslušného účinku zatížení vůči maximální hodnotě.
7		Exportovat do Excelu	Stisknutím tlačítka lze exportovat aktuálně vybranou tabulku výsledků do prostředí programu Excel.

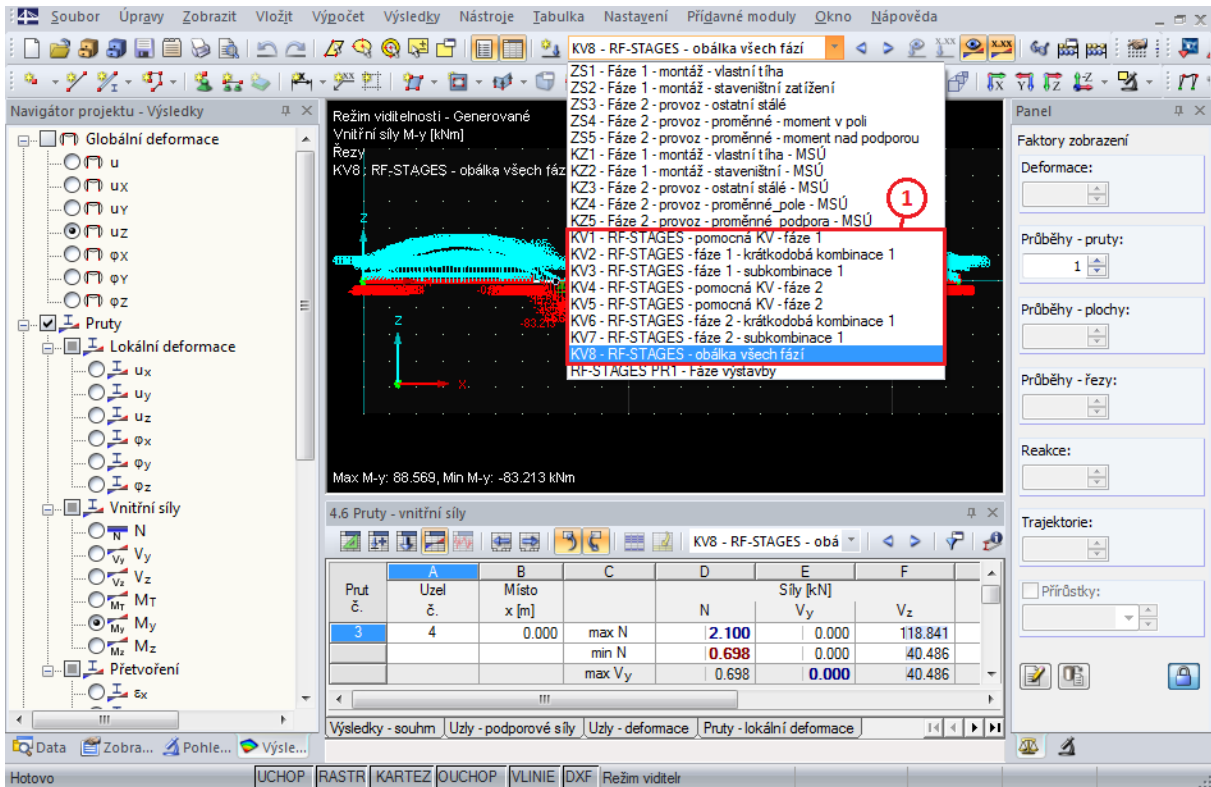
Po stisknutí jednoho z tlačítek *grafika*, respektive *ok* se pohled přepne do obecného prostředí RFEM a výsledky lze nechat přímo vykreslit na konstrukci, popřípadě je lze exportovat přímo z obecného prostředí programu RFEM do tabulkového procesoru, nebo exportovat grafiku stisknutím klávesové zkratky *ctrl+p*. Výsledky jsou však stále vázány na modul RF-Stages, proto mezi jednotlivými kombinacemi přepínáme v panelu pro zobrazení výsledků RF-Stages (viz obr.22). V tomto prostředí jsou zobrazeny výsledky v jednotlivých fázích zvláště pro stálé zatížení a krátkodobé zatížení. Pokud v panelu vybereme možnost *obálka*, zobrazí se obálka účinků všech definovaných subkombinací. **Díličí výsledky jednotlivých subkombinací však nelze při zobrazení v prostředí modulu RF-Stages zobrazit.**



Obr. 22 Prohlížení výsledků v prostředí modulu RF-Stages – vykreslení výsledků v grafice

Č.	Symbol	Název	Popis
1	-	<i>Aktuální ZS, KV, resp. případ modulu</i>	Pokud je v okně výsledků obecného prostředí programu RFEM vybrán případ modulu RF Stages – Fáze výstavby bude se zobrazení výsledků řídit pravidly modulu RF-Stages.
2	-	<i>Panel zobrazení výsledků</i>	Pokud se zobrazení výsledků řídí pravidly modulu RF-Stages, objeví se v pravé části speciální <i>panel zobrazení výsledků</i> , umožňující přepínat mezi jednotlivými fázemi výstavby.
3	-	-	V tomto okně lze zobrazit, účinky stálého zatížení, účinky krátkodobého zatížení v jednotlivých fázích a také obálku výsledků v subkombinacích všech fází výstavby. <b>Výsledky pro jednotlivé subkombinace zobrazit nelze.</b>

Možnost zobrazení výsledků v subkombinacích získáme až po stisknutí tlačítka *export* v modulu RF-Stages. Tím dojde k exportu výsledků do obecného prostředí programu RFEM. V okně výsledků se tak objeví výsledky pro jednotlivé fáze výstavby. V obecném prostředí lze potom zobrazit účinky jednotlivých krátkodobých zatížení v každé fázi a zároveň účinky zatížení v dílčích subkombinacích každé fáze a také obálku účinků všech definovaných subkombinací. **Není zde ovšem možné zobrazit účinky samotného stálého zatížení.** Výsledky exportované z modulu RF-Stages lze potom libovolně exportovat (jak hodnoty, tak grafiku) v souladu s obecnými pravidly programu RFEM. Zároveň je možné výsledky dále použít v přídatných modulech.



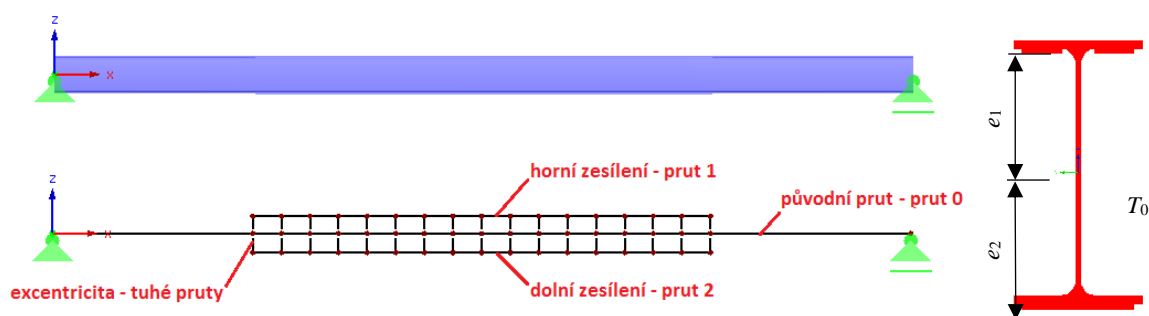
Obr. 23 Prohlížení výsledků v obecném prostředí programu RFEM po provedení exportu z modulu RF-Stages

## 2.5. Interpretace výsledků na fázovaných průřezích

Průřez, který se v jednotlivých fázích výstavby mění, je nazýván jako fázovaný průřez. Jak již bylo uvedeno dříve. Ve fázích výstavby není přímo možné změnit celý průřez prutu. Pokud je tedy třeba v průběhu fází výstavby průřez upravit, můžeme korektního výsledku dosáhnout připojením dalších prutů k původnímu prutu. Princip modelování fázovaného prutu je ilustrován na obrázku níže.

Tyto pruty se připojí na excentricitách tak, aby spolu s původním prutem tvořily sprážený průřez. Tímto způsobem lze modelovat postup výstavby ocelobetonových konstrukcí, zesilování prvků pod zatížením a další úlohy, kde je třeba zohlednit vliv postupu výstavby na namáhání konstrukce. Sprážení je možné zajistit buď připojením pomocí fiktivních tuhých prutů o délce rovnající se požadované excentricitě, případně lze sprážený prut modelovat jako zdvojený prut, přičemž přidávaný prut se vloží s definovanou excentricitou. Při výpočtu s fázemi výstavby není možné používat pruty typu žebro.





Obr. 24 Princip modelování fázovaného průřezu zesílené stropnice

Při použití tohoto postupu však vyvstává otázka, jak určit napětí a vnitřní síly na fázovaném průřezu. Vnitřní síly se totiž rozdělí do dílčích prutů fázovaného průřezu. Pokud tedy chceme určit vnitřní síly, musíme provést sumaci vnitřních sil v jednotlivých prutech fázovaného průřezu. Napětí v dílčím prutu průřezu můžeme jednoduše určit za použití vnitřních sil, působících v tomto prutu a průřezových charakteristik v tomto prutu.

### Výpočet vnitřních sil fázovaného průřezu

Normálová síla:

$$N_{\text{tot}} = N_0 + \sum N_i$$

Posouvající síla:

$$V_{\text{tot}} = V_0 + \sum V_i$$

Moment:

$$M_{\text{tot}} = M_0 + \sum M_i - \sum e_{1,i} N_{1,i} + \sum e_{2,i} N_{2,i}$$

Kde

- $N_{\text{tot}}$  je celková normálová síla působící na fázovaný průřez
- $N_0$  normálová síla působící na původní průřez (průřez v první fázi)
- $N_i$  normálové síly působící na části průřezu (pruty) přidané v dalších fázích
- $V_{\text{tot}}$  celková posouvající síla působící na fázovaný průřez
- $V_0$  posouvající síla působící na původní průřez (průřez v první fázi)
- $V_i$  posouvající síly působící na části průřezu (pruty) přidané v dalších fázích
- $M_{\text{tot}}$  celkový moment působící na fázovaný průřez
- $M_i$  momenty působící na části průřezu (pruty) přidané v dalších fázích
- $N_{1,i}$  normálové síly působící na části průřezu (pruty) přidané nad těžištěm původního průřezu v dalších fázích
- $e_{1,i}$  excentricita zesílení, tedy vzdálenost těžiště původního průřezu od těžišť částí průřezů přidaných v dalších fázích nad těžištěm původního průřezu
- $N_{2,i}$  normálové síly působící na části průřezu (pruty) přidané pod těžištěm původního průřezu v dalších fázích
- $e_{2,i}$  excentricita zesílení, vzdálenost těžiště původního průřezu od těžišť částí průřezů přidaných v dalších fázích pod těžištěm původního průřezu

### Výpočet napětí v části fázovaného průřezu

Normálové napětí v části průřezu:

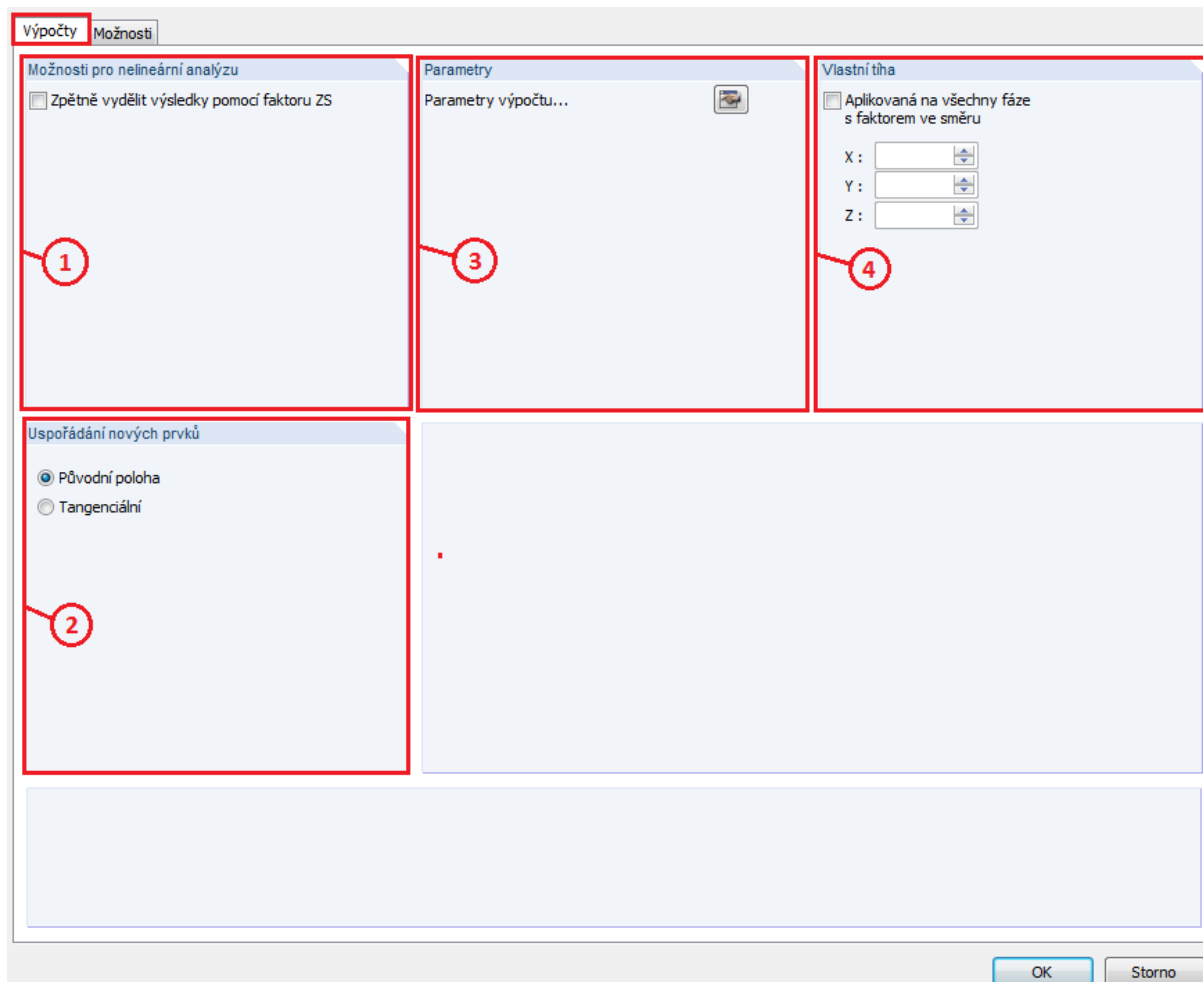
$$\sigma_{x,i} = \frac{N_i}{A_i} + \frac{M_i}{W_i}$$

Kde

- $\sigma_{x,i}$  je normálové napětí v posuzované části fázovaného průřezu
- $N_i$  normálová síla působící v posuzované části fázovaného průřezu
- $A_i$  plocha posuzované části fázovaného průřezu
- $M_i$  moment působící v posuzované části fázovaného průřezu
- $W_i$  pružný průřezový modul posuzované části fázovaného průřezu


## 2.6. Nastavení a detaily výpočtu

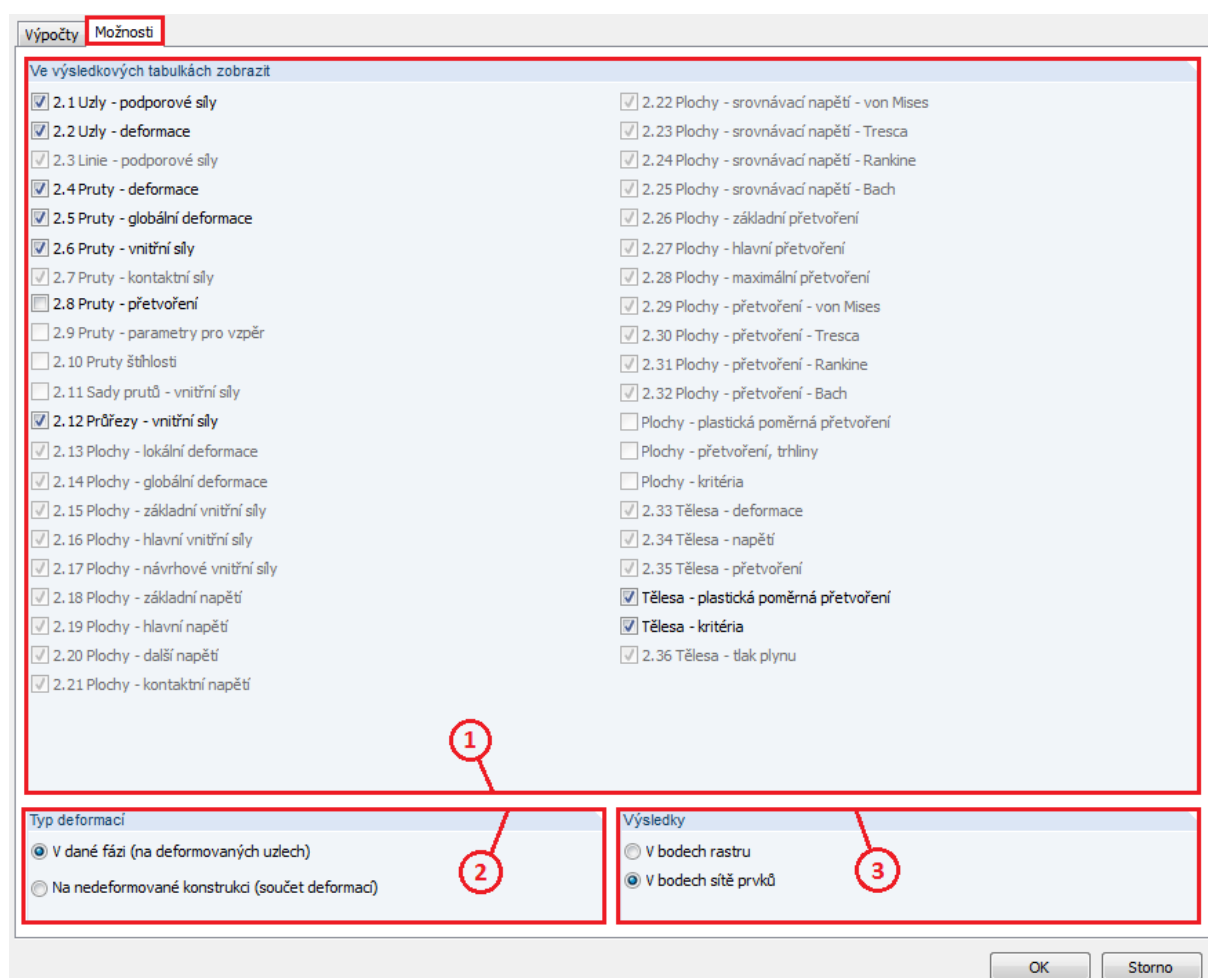
Stisknutí tlačítka *details* se zobrazí dialog umožňující upravit charakter výpočtu v modulu RF-Stages. Dialog detaily obsahuje záložky *výpočty* a *možnosti*.



Obr. 25 Detaily – nastavení výpočtu

Č.	Symbol	Název	Popis
1	-	<i>Možnosti pro nelineární analýzu</i>	Umožňuje zpětně vydělit výsledky dílčím součinitelem zatěžovacího stavu.
2	-	<i>Uspořádání nových prvků</i>	Na základě výběru uspořádání nových prvků. Pokud je zvolen možnost <i>původní poloha</i> , prut se vloží do původní pozice bez ohledu na deformaci konstrukce v předchozí fázi. Pokud se zvolí možnost <i>tangenciální</i> , bod vložení prutu se posune s ohledem na deformaci konstrukce v předcházející fázi. Vkládaný nosník se zároveň natočí tak, aby byl orientovaný rovnoběžně se směrnicí deformované konstrukce v místě připojení.

3		Parametry výpočtu	Umožňuje upravit parametry výpočtu. Princip nastavení je obdobný jako v obecném prostředí programu RFEM. V případě potíží se stabilitou výpočtu složité konstrukce se doporučuje upravit <i>procentuální počet iterací metody Newton-Raphsonovy v kombinaci s Picardovou</i> , případně <i>toleranci pro detekci nestability</i> , či <i>toleranci kritérií konvergence nelineárního výpočtu</i> .
4	-	Vlastní tíha	Umožňuje upravit součinitel vlastní tíhy v případě, že je zatížení vlastní tíhou ve fázích výstavby automaticky generováno programem RFEM.



Obr. 26 Detaily – možnosti zobrazení

Č.	Symbol	Název	Popis
1	-	<i>Ve výsledkových tabulkách zobrazit</i>	V dialogu je možno zakázat/povolit zobrazení jednotlivých výsledků.
2	-	<i>Typ deformací</i>	Umožňuje přepnout typ zobrazení deformací. Při volbě <i>v dané fázi</i> jsou deformace zobrazeny pouze pro zatížení působící v dané fázi – zobrazené deformace jsou tedy přírůstkem v dané fázi. Pokud zvolíme

			zobrazení deformací <i>na nedeformované konstrukci</i> jsou zobrazeny deformace, vztažené vůči původní poloze konstrukce v první fázi – jedná se tedy o součet deformací ve všech fázích až do aktuální zobrazené fáze.
3	-	Výsledky	Dialog umožní přepínat zobrazení výsledků. Ty mohou být zobrazeny buď v <i>bodech rastru</i> , nebo v bodech sítě konečných prvků.

### 3. Řešené příklady

#### 3.1. Posouzení ocelobetonového mostu v MSP

Smyslem příkladu je demonstrovat posouzení nejvíce namáhaného nosníku ocelobetonového mostu tvořeného nosníkovým roštem v mezním stavu použitelnosti pomocí výpočtu v modulu RF-Stages. Zadání a vstupní údaje jsou převzaty ze vzorového příkladu, uvedeného ve skriptech předmětu ocelové mosty 1 [8]. Most je při montáži nepodepřený a v průběhu životnosti dochází k dotvarování betonové desky vlivem působení ostatního stálého zatížení.

##### 3.1.1. Základní údaje a návrh konstrukce

Vstupní hodnoty úlohy jsou převzaty ze skript [8].

##### Základní údaje konstrukce

Typ konstrukce:	ocelobetonová, nosníkový rošt, 4 nosníky
Rozpětí mostu:	$L = 34$ m
Světlá šířka mezi svodidly:	$\check{s} = 10$ m
Spřahovací prvky:	trny
Směrové podmínky na mostě:	most v přímé
Příčný sklon:	jednostranný, 2,5 %
Podélný sklon:	2,0 %
Třída komunikace:	1

##### Materiálové charakteristiky

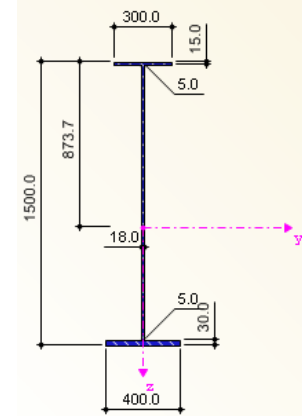
Ocel nosné konstrukce:	S 460 N
- charakteristická mez kluzu:	$f_{yk} = 460$ MPa
- návrhová mez kluzu – prosté namáhání:	$f_{yd} = f_{yk}/\gamma_{M0} = 460/1,0 = 460$ MPa
- návrhová mez kluzu – stabilita:	$f_{yd} = f_{yk}/\gamma_{M1} = 460/1,1 = 418,2$ MPa
- modul pružnosti:	$E = 210$ GPa
Beton nosné konstrukce:	C 30/37
- charakteristická hodnota válc. pevnosti:	$f_{ck} = 30$ MPa
- návrhová hodnota válc. pevnosti:	$f_{cd} = 0,85 \cdot f_{ck}/\gamma_c = 0,85 \cdot 30/1,5 = 17$ MPa
- střední hodnota sečného modulu pružnosti:	$E_{cm} = 33$ GPa

##### Charakteristiky krajního ocelobetonového nosníku

Ve skriptech [8] bylo ukázáno, že nejvíce namáhaným nosníkem je krajní (čtvrtý) ocelobetonový nosník. Tento bude tedy předmětem tohoto posouzení.

Navržené rozměry ocelové části nosníku:

- výška nosníku:  $h = 1500 \text{ mm}$
- šířka dolní pásnice:  $b_{f2} = 400 \text{ mm}$
- tloušťka dolní pásnice:  $t_{f2} = 30 \text{ mm}$
- šířka horní pásnice:  $b_{f1} = 300 \text{ mm}$
- tloušťka horní pásnice:  $t_{f1} = 15 \text{ mm}$
- tloušťka stěny:  $t_{f2} = 18 \text{ mm}$

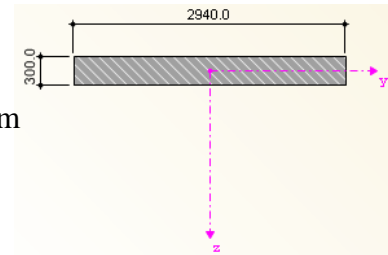


Potřebné průřezové charakteristiky ocelové části nosníku:

- plocha nosníku:  $A_a = 0,04269 \text{ m}^2$
- pružný průřezový modul – dolní vlákna:  $W_{ab} = 20,65 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$
- pružný průřezový modul – horní vlákna:  $W_{at} = -14,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$

Rozměry betonové části nosníku:

- tloušťka betonové desky:  $h_c = 300 \text{ mm}$
- zatěžovací šířka:  $b = 3125 \text{ mm}$
- spolupůsobící šířka:  $b_{\text{eff}} = 2940 \text{ mm}$
- pracovní součinitel – krátkodobé zatížení:  $n_S = 6,36$
- pracovní součinitel – dlouhodobé zatížení:  $n_L = 16,75$



Potřebné průřezové charakteristiky betonové části nosníku:

- plocha efektivní části desky:  $A_{c,\text{eff}} = 0,882 \text{ m}^2$
- pružný průřezový modul ef. části desky:  $W_{c,\text{eff}} = 44,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$

Fiktivní modul pružnosti – dlouhodobé zatížení:  $E_L = E_{\text{cm}} \cdot n_S / n_L = 33 \cdot 0,38 = 12,53 \text{ MPa}$

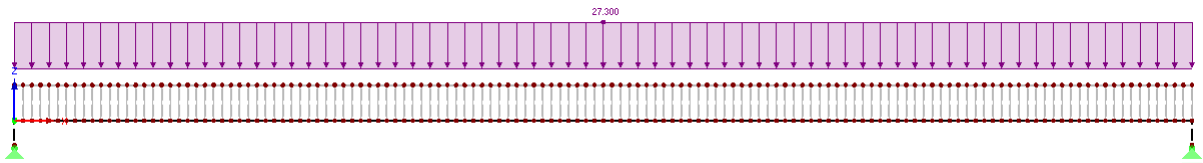
### 3.1.2. Zatížení na nejvíce namáhaný nosník

Zatížení přepočtené s využitím příčinkových čar příčného roznosu na krajní, nejvíce namáhaný nosníky konstrukce je převzato ze skript [8].

#### Zatěžovací stav ZS1 – montážní zatížení – fáze 1 - montáž

Montážní zatížení na krajní nosník:

- liniové – nese ocel. nosník:  $g_{0,k} = 27,3 \text{ kN/m}$

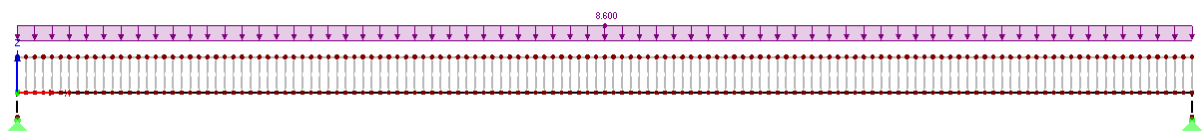


Obr. 27 Zatěžovací stav ZS1 – montážní zatížení

#### Zatěžovací stav ZS2 – ostatní stálé zatížení – fáze 2 – provozní stav - začátek/konec životnosti

Ostatní stálé zatížení na krajní nosník:

- liniové – nese sprážený průřez:  $g_{1,k} = 8,6 \text{ kN/m}$



Obr. 28 Zatěžovací stav ZS2 – ostatní stálé zatížení

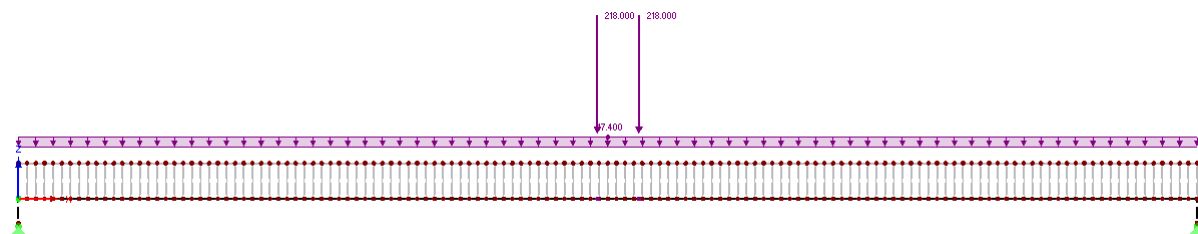
**Zatěžovací stav ZS3 – doprava – fáze 3 – provozní stav - začátek/konec životnosti**

Proměnné zatížení dopravou na krajní nosník:

- liniové – nese spřažený průřez:  $q_{2,k} = 17,4 \text{ kN/m}$

- nápravové síly – nese spřažený průřez:  $Q_{2,k} = 218,1 \text{ kN}$

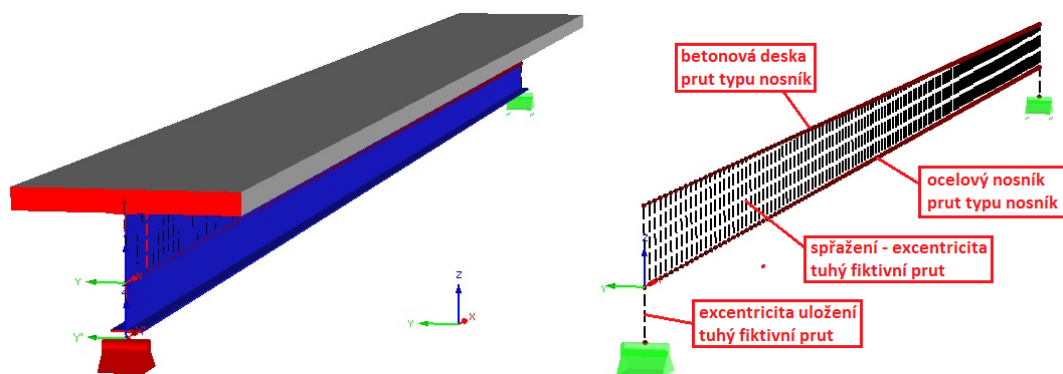
Pozn.: Nápravové síly jsou umístěny na nosník dle kritéria max max M.



Obr. 29 Zatěžovací stav ZS3 – proměnné zatížení dopravou

**3.1.3. Numerická analýza****Numerický model**

Výpočet je proveden v programu Dlubal RFEM. Fáze výstavby jsou zohledněny v přidavném modulu RF-Stages. Numerický model je tvořen prutovými prvky. Konstrukce není při montáži podepřena, proto při výpočtu uvažujeme fázovaný průřez. Ocelová část fázovaného průřezu je modelována prutem typu nosník stejně tak jako betonová část. Geometrie průřezu obou prutů byla znázorněna v kapitole 3.1.1. Betonová a ocelová část je spřažena fiktivními tuhými pruty o délce rovnající se vzdálenosti těžišť ocelového a betonového průřezu, tedy o délce 1024 mm. Nosník je prostě podepřen. Excentricita uložení je opět modelována pomocí fiktivních tuhých prutů.



Obr. 30 Numerický model: vlevo - render modelu; vpravo – drátěný model

**Modelování fázi výstavby**

Konstrukce není při montáži podepřena. Zároveň dochází k dotvarování betonové desky vlivem působení dlouhodobého (ostatního stálého) zatížení. Při posouzení MSP bude prověřeno napětí a průhyb. Vzhledem k tomu, že betonová deska dotvaruje, je nutné posouzení provést na začátku životnosti konstrukce (v čase  $t = 60$  dní) a na konci plánované životnosti konstrukce (v čase 36500). Vliv dotvarování bude v numerické analýze zohledněn pomocí proměnného modulu pružnosti. Výpočet bude tedy proveden dvakrát, přičemž pokaždé bude rozdělen do tří fází výstavby. Přehled fází výstavby je uveden níže:

#### Fáze výstavby pro posouzení na začátku životnosti:

Fáze 1 – montáž – montážní zatížení - nese ocelový průřez

Fáze 2 – provoz – ostatní stálé zatížení - nese spřažený krátkodobý průřez ( $E_{cm} = 33$  GPa)

Fáze 3 – provoz – doprava - nese spřažený krátkodobý průřez ( $E_{cm} = 33$  GPa)

#### Fáze výstavby pro posouzení na konci životnosti:

Fáze 1 – montáž – montážní zatížení - nese ocelový průřez

Fáze 2 – provoz – ostatní stálé zatížení – nese spřažený dlouhodobý průřez ( $E_L = 12,53$  GPa)

Fáze 3 – provoz – doprava - nese spřažený krátkodobý průřez ( $E_{cm} = 33$  GPa)

#### Postup zadání v modulu RF-Stages – posouzení na začátku životnosti

- V obecném prostředí RFEM vymodelujeme konstrukci.
- Po spouštění modulu RF-Stages definujeme v záložce *Vstupní údaje* → *Základní údaje* všechny 3 fáze výstavby:
  - Vytvořit novou fázi:* Fáze 1 – montáž (ocel)
  - Vytvořit novou fázi:* Fáze 2 – ostatní stálé (krátkodobý)
  - Vytvořit novou fázi:* Fáze 3 – doprava (krátkodobý)
- V záložce *Vstupní údaje* → *Pruty* přidáme pruty do jednotlivých fází a přidělíme jim materiál:
  - Fáze 1 – *Přidat pruty:* ocelový nosník – ocel S 460, tuhé fiktivní pruty uložení – bez materiálu
  - Fáze 2 – *Přidat pruty:* betonová deska – **beton C 30/37 krátkodobý ( $E_{cm} = 33$  GPa)**; tuhé fiktivní pruty spřažení – bez materiálu
  - Fáze 3 – prázdné
- V záložce *Vstupní údaje* → *Uzlové podpory* přidáme podpory:
  - Fáze 1 – *Přidat podpory:* všechny uzlové podpory
  - Fáze 2 – *Přidat podpory:* prázdné
  - Fáze 3 – *Přidat podpory:* prázdné
- V záložce *Vstupní údaje* → *Zatížení* přiřadíme zatěžovací stavy do jednotlivých fází. Pro účely této analýzy bude výhodné, pokud veškeré zatížení budeme v rámci RF-Stages uvažovat jako stálé:
  - Fáze 1 – *Stálé zatížení:* ZS1 – montážní zatížení; *Krátkodobé zatížení:* prázdné
  - Fáze 2 – *Stálé zatížení:* ZS2 – ostatní stálé zatížení; *Krátkodobé zatížení:* prázdné
  - Fáze 3 – *Stálé zatížení:* ZS3 – doprava; *Krátkodobé zatížení:* prázdné
- V dialogovém okně *Detaily* → *Výpočty* → *Uspořádání nových prutů* zvolíme možnost tangenciální vkládání nových prvků
- Spustíme výpočet

#### Postup zadání v modulu RF-Stages – posouzení na konci životnosti

- V obecném prostředí RFEM vymodelujeme konstrukci, nebo okopírujeme předchozí model a uložíme s novým názvem
- Po spouštění modulu RF-Stages definujeme v záložce *Vstupní údaje* → *Základní údaje* všechny 3 fáze výstavby:
  - Vytvořit novou fázi:* Fáze 1 – montáž (ocel)
  - Vytvořit novou fázi:* Fáze 2 – ostatní stálé (dlouhodobý)
  - Vytvořit novou fázi:* Fáze 3 – doprava (krátkodobý)
- V záložce *Vstupní údaje* → *Pruty* přidáme pruty do jednotlivých fází a přidělíme jim materiál. Ve třetí fázi musíme upravit materiál betonové desky:

Fáze 1 – Přidat pruty: ocelový nosník – ocel S 460, tuhé fiktivní pruty uložení – bez materiálu

Fáze 2 – Přidat pruty: betonová deska – **beton C 30/37 dlouhodobý ( $E_L = 12,53$  GPa)**, tuhé fiktivní pruty spřažení – bez materiálu

Fáze 3 – Upravit pruty: betonová deska – **beton C 30/37 krátkodobý ( $E_{cm} = 33$  GPa)**

- V záložce *Vstupní údaje* → *Uzlové podpory* přidáme podpory:
  - Fáze 1 – Přidat podpory: všechny uzlové podpory
  - Fáze 2 – Přidat podpory: prázdné
  - Fáze 3 – Přidat podpory: prázdné
- V záložce *Vstupní údaje* → *Zatížení* přiřadíme zatěžovací stavy do jednotlivých fází. Pro účely této analýzy bude výhodné, pokud veškeré zatížení budeme v rámci RF-Stages uvažovat jako stálé:
  - Fáze 1 – Stálé zatížení: ZS1 – montážní zatížení; Krátkodobé zatížení: prázdné
  - Fáze 2 – Stálé zatížení: ZS2 – ostatní stálé zatížení; Krátkodobé zatížení: prázdné
  - Fáze 3 – Stálé zatížení: ZS3 – doprava; Krátkodobé zatížení: prázdné
- V dialogovém okně *Detaily* → *Výpočty* → *Uspořádání nových prutů* zvolíme možnost tangenciální vkládání nových prvků
- Spustíme výpočet

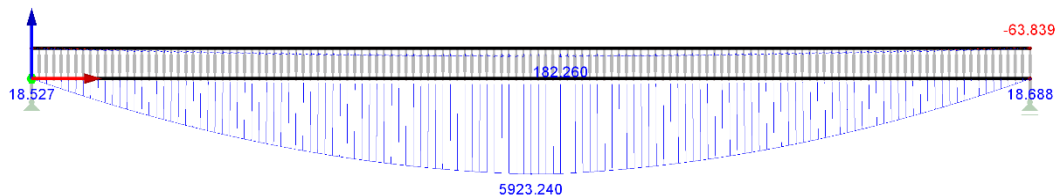
### 3.1.4. Posouzení napětí

#### Posouzení na začátku životnosti

Celkové vnitřní síly pro posouzení ocelobetonového nosníku na začátku životnosti odečteme z výsledků Fáze 3.

Moment působící na ocelový prut:  $M_a = 5923$  kNm

Moment působící na betonový prut:  $M_c = 160$  kNm

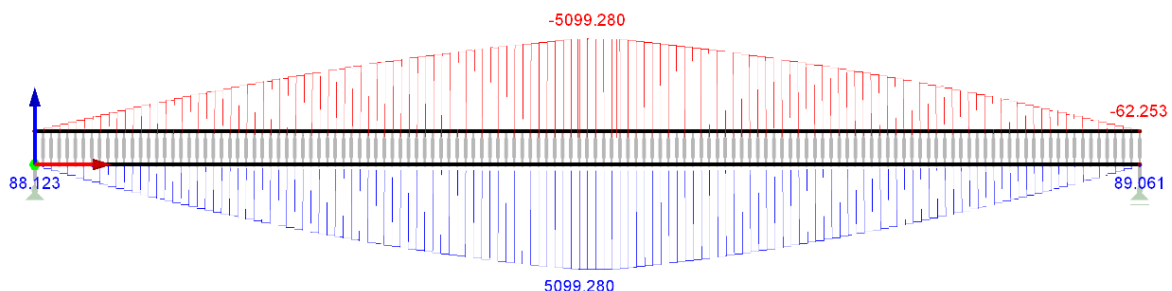


Obr. 31 Momenty působící na části spřaženého průřezu

Normálová síla působící na ocelový prut:  $N_a = 5099,3$  kN

Normálová síla působící na betonový prut:  $N_c = -5099,3$  kN

Vzdálenost těžišť ocel. a beton. Prutu (rameno vnitřních sil):  $e_1 = 1,024$  m



Obr. 32 Normálové síly působící na části spřaženého průřezu



Posouzení napětí na začátku životnosti:

Napětí v betonové desce – horní líc:

$$\sigma_{ct} = \frac{N_c}{A_{c,eff}} + \frac{M_c}{W_{c,eff}} = \frac{-5099,3}{0,882} - \frac{160}{44,1 \cdot 10^{-3}} = -9,4 \text{ MPa} < 0,6 * f_{ck} = -18 \text{ MPa}$$

**VYHOVUJE S VYUŽITÍM 52 %**

Napětí v betonové desce – dolní líc:

$$\sigma_{cb} = \frac{N_c}{A_{c,eff}} + \frac{M_c}{W_{c,eff}} = \frac{-5099,3}{0,882} + \frac{160}{44,1 \cdot 10^{-3}} = -2,1 \text{ MPa} < 0,6 * f_{ck} = -18 \text{ MPa}$$

**VYHOVUJE S VYUŽITÍM 12 %**

Napětí v ocelovém nosníku – horní líc:

$$\sigma_{at} = \frac{N_a}{A_a} + \frac{M_a}{W_{at}} = \frac{5099,3}{0,04269} - \frac{5923}{14,8 \cdot 10^{-3}} = -280,7 \text{ MPa} < f_{yk} = -460 \text{ MPa}$$

**VYHOVUJE S VYUŽITÍM 61 %**

Napětí v betonové desce – dolní líc:

$$\sigma_{ab} = \frac{N_c}{A_{c,eff}} + \frac{M_c}{W_{c,eff}} = \frac{5099,3}{0,04269} + \frac{5923}{20,65 \cdot 10^{-3}} = 406,3 \text{ MPa} < f_{yk} = 460 \text{ MPa}$$

**VYHOVUJE S VYUŽITÍM 88 %**

***Posouzení na konci životnosti***

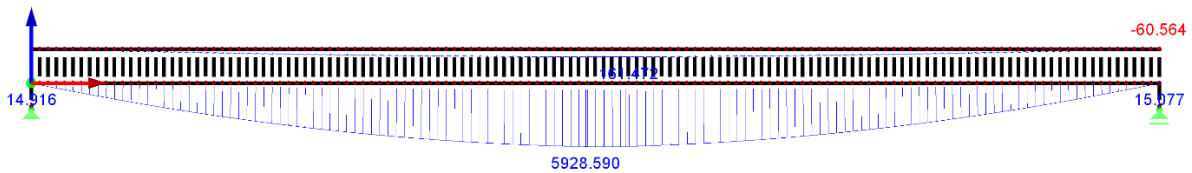
Celkové vnitřní síly pro posouzení ocelobetonového nosníku na konci životnosti odečteme z výsledků Fáze 3.

Moment působící na ocelový prut:

$$M_a = 5928,6 \text{ kNm}$$

Moment působící na betonový prut:

$$M_c = 139 \text{ kNm}$$



Obr. 33 Momenty působící na části spřaženého průřezu

Normálová síla působící na ocelový prut:

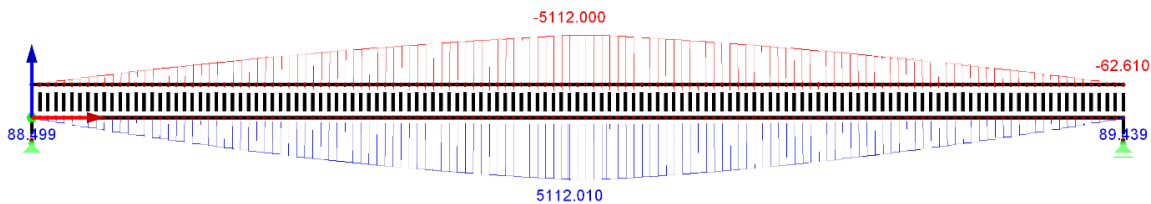
$$N_a = 5112 \text{ kN}$$

Normálová síla působící na betonový prut:

$$N_c = -5112 \text{ kN}$$

Vzdálenost těžišť ocel. a beton. Prutu (rameno vnitřních sil):

$$e_1 = 1,024 \text{ m}$$



Obr. 34 Normálové síly působící na části spřaženého průřezu

Posouzení napětí na konci životnosti:

Napětí v betonové desce – horní líc:

$$\sigma_{ct} = \frac{N_c}{A_{c,eff}} + \frac{M_c}{W_{c,eff}} = \frac{-5112}{0,882} - \frac{139}{44,1 \cdot 10^{-3}} = -8,9 \text{ MPa} < 0,6 * f_{ck} = -18 \text{ MPa}$$

**VYHOVUJE S VYUŽITÍM 49 %**

Napětí v betonové desce – dolní líc:

$$\sigma_{cb} = \frac{N_c}{A_{c,eff}} + \frac{M_c}{W_{c,eff}} = \frac{-5112}{0,882} + \frac{139}{44,1 \cdot 10^{-3}} = -2,6 \text{ MPa} < 0,6 * f_{ck} = -18 \text{ MPa}$$

**VYHOVUJE S VYUŽITÍM 14 %**

Napětí v ocelovém nosníku – horní líc:

$$\sigma_{at} = \frac{N_a}{A_a} + \frac{M_a}{W_{at}} = \frac{5112}{0,04269} - \frac{5928,6}{14,8 \cdot 10^{-3}} = -280,8 \text{ MPa} < f_{yk} = -460 \text{ MPa}$$

**VYHOVUJE S VYUŽITÍM 61 %**

Napětí v betonové desce – dolní líc:

$$\sigma_{ab} = \frac{N_c}{A_{c,eff}} + \frac{M_c}{W_{c,eff}} = \frac{5112}{0,04269} + \frac{5928,6}{20,65 \cdot 10^{-3}} = 407 \text{ MPa} < f_{yk} = 460 \text{ MPa}$$

**VYHOVUJE S VYUŽITÍM 88 %**

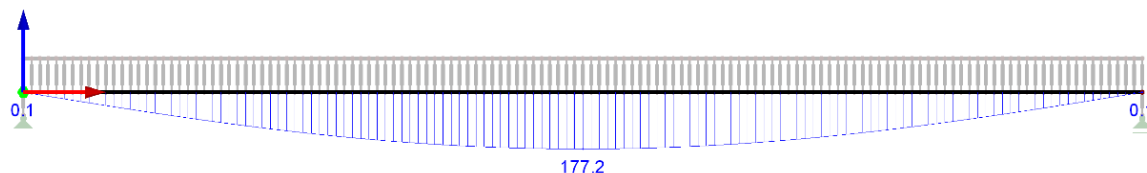
Pozn.: Na základě porovnání s výsledky ve skriptech [8] lze konstatovat dobrou shodu stanovených napětí.

### 3.1.5. Posouzení průhybů

Je zřejmé, že průhyb vlivem dotvarování vzroste. V rámci posouzení průhybu tedy bude prověřen stav na konci životnosti. Pokud chceme vykreslit průhyby pouze od zatížení, působícího v dané fázi, je třeba zvolit v dialogu *Detaily* → *Možnosti* → *Typ deformací* → *V dané fázi*.

Průhyb od montážního zatížení – ocelový průřez – 1. fáze:

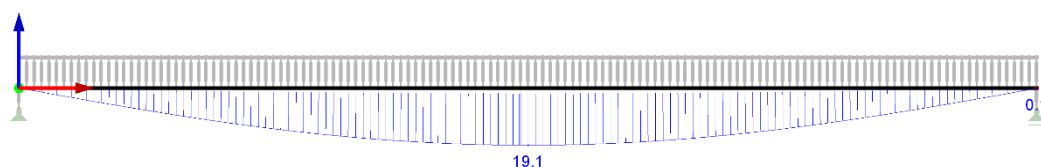
$$\delta_a = 177 \text{ mm}$$



Obr. 35 Průhyb od montážního zatížení – 1. fáze

Průhyb od ostatního stálého zatížení – sprážený dlouhodobý – 2. fáze:

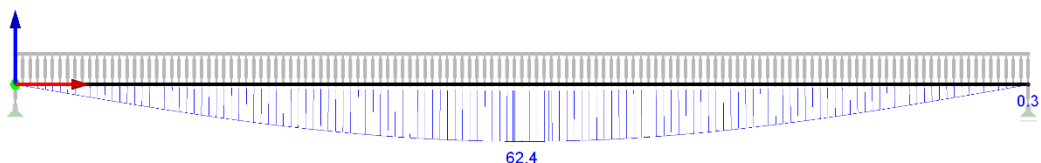
$$\delta_1 = 19,1 \text{ mm}$$



Obr. 36 Průhyb od ostatního stálého zatížení – 2. fáze

Průhyb od opravy – sprážený krátkodobý – 3. fáze:

$$\delta_2 = 62,4 \text{ mm} < \frac{L}{300} = 113 \text{ mm}$$

**VYHOVUJE**

Obr. 37 Průhyb od opravy – 3. fáze

Pozn.: Pokud porovnáme získané hodnoty průhybů s průhyby ve skriptech [8], lze konstatovat poměrně dobrou shodu. Rozdíl je pouze při porovnání průhybu od dopravy, ten je však ve skriptech vypočten zjednodušeným (ne zcela korektním) způsobem.

## 3.2. Zesílení ocelové stropnice pod zatížením

Kvůli změně užívání stávajícího objektu došlo ke zvýšení proměnného – užitného zatížení ze 2 kN/m na 4 kN/m. Stávající stropní konstrukce však není schopna nové zatížení přenést a je třeba navrhnout její zesílení. Stropní konstrukce je tvořena válcovanými profily IPE 330, betonovou deskou a konstrukcí podlahy. Ocelový nosník není z betonovou deskou spřažen. Zesílení bude provedeno příločkami na dolním lici dolní pásnice a na dolním lici horní pásnice. V objektu se nachází přemístitelné příčky s vlastní tíhou menší než 2 kN/m, ale větší než 1 kN/m. Při zesílení bude konstrukce předepnuta vnesením deformace (nadvýšením) za účelem dosažení lepšího využití prvků zesílení. Stanovení namáhání je provedeno se zohledněním fází výstavby v přidavném modulu RF-Stages programu RFEM. Zesílený prvek je posouzen v MSÚ i MSP.

### 3.2.1. Základní údaje konstrukce

#### Základní údaje konstrukce

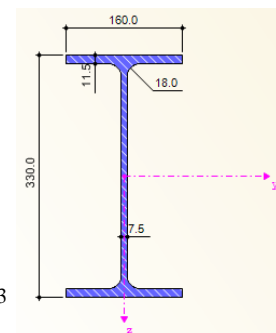
Typ konstrukce:	ocelový nosník s nespřaženou deskou
Statické působení:	prostý nosník
Rozpětí stropnice:	$L = 7,5 \text{ m}$
Rozteč stropnic (zat. šířka):	$b = 2,5 \text{ m}$
Ztráta příčné a torzní stability (klopení):	bráněno tuhou stropní tabulí

#### Materiálové charakteristiky původního nosníku a prvků zesílení

Ocel nosné konstrukce:	S 235 JR
- charakteristická mez kluzu:	$f_{yk} = 235 \text{ MPa}$
- návrhová mez kluzu – prosté namáhání:	$f_{yd} = f_{yk}/\gamma_{M0} = 460/1,0 = 235 \text{ MPa}$
- návrhová mez kluzu – stabilita:	$f_{yd} = f_{yk}/\gamma_{M1} = 460/1,0 = 235 \text{ MPa}$
- modul pružnosti:	$E = 210 \text{ GPa}$

#### Charakteristiky původního nosníku nosníku

Použitý profil:	IPE 330
Třída nosníku (rozhoduje ohyb):	1
Potřebné průřezové charakteristiky ocelové části nosníku:	
- plocha nosníku:	$A_a = 6,261 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$
- účinná smyková plocha:	$A_{a,vz} = 3,081 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$
- pružný průřezový modul:	$W_a = 0,7131 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$
- plastický průřezový modul:	$W_{pl,a} = 0,8043 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$



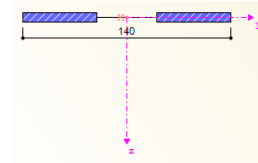
#### Charakteristiky zesílení horní pásnice

Vzhledem k tomu, že horní líc pásnice je krytý betonovou deskou, musí být zesílení provedeno dvěma pásy ploché oceli, převařenými k dolnímu lici horní pásnice.

Použitý profil zesílení:	2xP6x50
--------------------------	---------

Potřebné průřezové charakteristiky ocelové části nosníku:

- plocha nosníku:  $A_{s1} = 0,600 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$
- pružný průřezový modul:  $W_{s1} = 0,0006 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$
- excentricita zesílení:  $e_{1,s1} = 150 \text{ mm}$



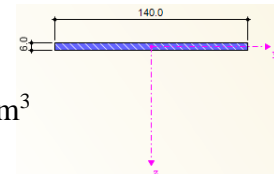
### Charakteristiky zesílení horní pásnice

Zesílení dolní pásnice je provedeno přivařením plechu k dolními líci dolní pásnice.

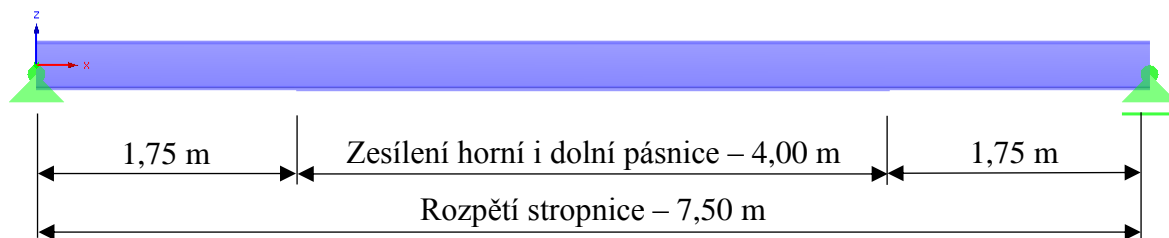
Použitý profil zesílení: P6x140

Potřebné průřezové charakteristiky ocelové části nosníku:

- plocha nosníku:  $A_{s2} = 0,840 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$
- pružný průřezový modul:  $W_{s2} = 0,000840 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$
- excentricita zesílení:  $e_{2,s2} = 168 \text{ mm}$



Zesílení je provedeno na 4 metrech uprostřed rozpětí dle schématu níže.



Obr. 38 Schéma zesílení konstrukce

### 3.2.2. Zatížení stropnice

#### Zatěžovací stav ZS1 – stálé zatížení – fáze 1

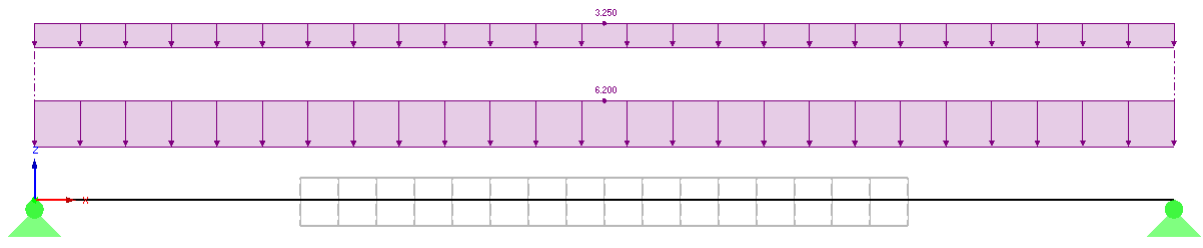
Vzhledem k tomu, že se jedná o kompaktní průřez, nehraje způsob realizace v tomto případě roli a stálé zatížení tedy není třeba rozlišovat na montážní a ostatní stálé.

Stálé zatížení – char. hodnota:

- vlastní tíha IPE 330:  $g_{01,k} = 0,5 \text{ kN/m}$
- plech TR 50/250/1:  $g_{02,k} = 2,5 \cdot 0,1 = 0,25 \text{ kN/m}$
- beton ztvrdlý (srovnaná tloušťka 87 mm):  $g_{03,k} = 2,5 \cdot 25 \cdot 0,087 = 5,44 \text{ kN/m}$
- podhled:  $g_{11,k} = 2,5 \cdot 0,1 = 0,25 \text{ kN/m}$
- konstrukce podlahy:  $g_{12,k} = 2,5 \cdot 1,2 = 3,00 \text{ kN/m}$

Stálé zatížení celkem – char. hodnota:  $g_{0,1,k} = 9,45 \text{ kN/m}$

Dílčí součinitel stálého zatížení:  $\gamma_G = 1,35$



Obr. 39 Zatěžovací stav ZS1 – stálé zatížení

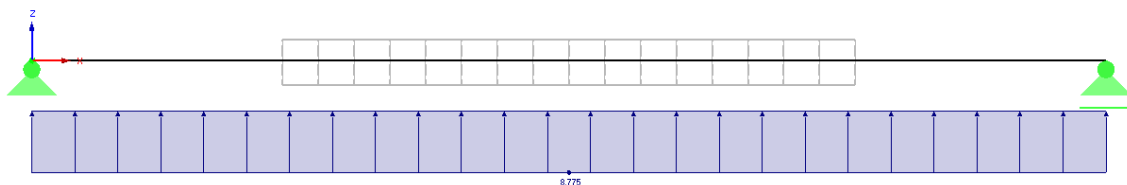
### Zatěžovací stav ZS2 – předpětí vnesením deformací – fáze 2

Abychom dosáhli lepšího využití prvků zesílení, bude konstrukce před aplikací zesílení nadvýšena o 15 mm. Této deformace bude dosaženo účinkem záporného liniového zatížení o hodnotě 8,775 kN/m. Je tedy zřejmé, že při nadzdvžení nosníku o 15 mm dojde k téměř kompletnímu odlehčení stálého zatížení.

Předpětí vnesením deformací:

- liniové zatížení - nadzdvžení:  $p_k = -8,775 \text{ kN/m}$

Dílčí součinitel pro předpětí:  $\gamma_p = 1,00$



Obr. 40 Zatěžovací stav ZS2 – předpětí vnesením deformací

### Zatěžovací stav ZS3 – stálé zatížení + proměnné zatížení + uvolnění předpětí – fáze 3

Ve třetí fázi výpočtu bude odstraněno předpětí nadvýšením. Na konstrukci bude působit malé přidavné stálé zatížení od prvků zesílení a zároveň také plné proměnné zatížení, tvořené užitečným zatížením a zatížením přemístitelnými příčkami.

Stálé zatížení:

- vlastní tíha horních plechů zesílení:  $p_k = 0,047 \text{ kN/m}$

- vlastní tíha dolního plechu zesílení:  $p_k = 0,066 \text{ kN/m}$

Dílčí součinitel stálého zatížení:  $\gamma_G = 1,00$

Proměnné zatížení:

- užité zatížení – katgorie C2:  $q_{1,k} = 2,5 \cdot 4,0 = 10,00 \text{ kN/m}$

- vlastní tíha dolního plechu zesílení:  $q_{2,k} = 2,5 \cdot 0,8 = 2,00 \text{ kN/m}$

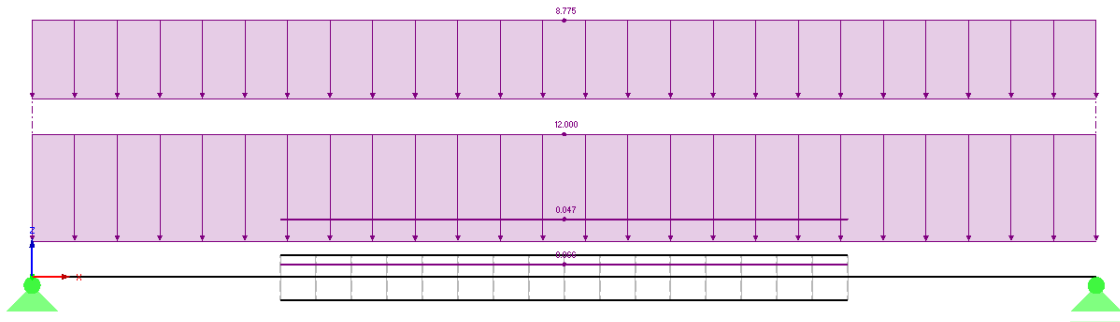
Proměnné zatížení celkem – char. hodnota:  $q_k = 12,00 \text{ kN/m}$

Dílčí součinitel stálého zatížení:  $\gamma_Q = 1,50$

Uvolnění předpětí:

- liniové zatížení:  $p_k = 8,775 \text{ kN/m}$

Dílčí součinitel pro předpětí:  $\gamma_p = 1,00$

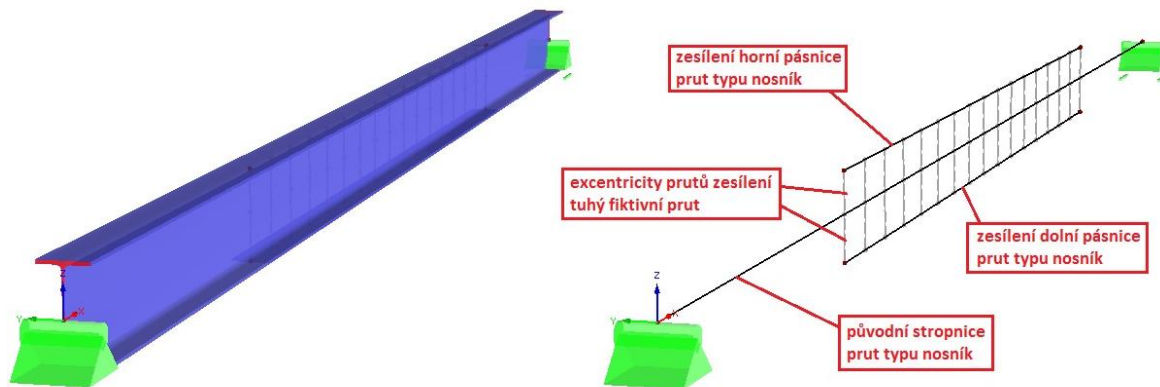


Obr. 41 Zatěžovací stav ZS3 – stálé zatížení + proměnné zatížení + vrácení předpětí

### 3.2.3. Numerická analýza

#### Numerický model

Výpočet je proveden v přídatném modelu RF-Stages programu Dlubal RFEM. Numerický model je tvořen prutovými prvky. Při výpočtu je uvažován fázovaný průřez. Původní stropnice bez zesílení je modelována prutovým prvkem s ohybovou tuhostí (prut typu nosník). Přídavné pruty zesílení jsou rovněž modelovány jako pruty s ohybovou tuhostí typu nosník. Zesílení je provedeno na 4 metrech uprostřed rozpětí nosníku dle schématu na obr. 39. Aby bylo dosaženo homogenity fázovaného průřezu, jsou zesilující prvky spojeny s prutem stropnice skrze fiktivní tuhé pruty. Délka fiktivních prutů odpovídá vzdálenosti těžišť připojovaných komponent od těžiště zesilované stropnice. Průřezové charakteristiky dílčích prutů jsou uvedeny v kapitole 3.2.1. Prut je prostě podepřen, na jedné straně je uložen na neposuvnou podporu a na straně druhé na podélně posuvnou podporu. Podpory umožňují pootočení čel nosníku ve svislé rovině.



Obr. 42 Numerický model: vlevo - render modelu; vpravo – drátěný model

#### Modelování fázi výstavby

Vzhledem k charakteru konstrukce není nutné uvažovat montážní fázi. Při rekonstrukci je uvažováno předpětí konstrukce nadvýšením, čímž je odlehčena značná část stálého zatížení za účelem většího využití zesilovacích příložek a tím i optimálnějšího působení zesíleného průřezu. Konstrukce tedy musí být rozdělena do tří fází výstavby. Celý výpočet musí být zároveň opakován dvakrát – jedno pro posouzení MSÚ a podruhé pro posouzení MSP. Postup výpočtu i nastavení v modulu RF-Stages je pro stanovení účinku zatížení v MSÚ i MSP téměř stejný, jediné co se liší jsou hodnoty zatížení. Ty jsou v MSP uvažována charakteristickou

hodnotou se součinitely zatížení rovnými 1,0, přičemž v MSÚ jsou tato zatížení uvažována návrhovou hodnotou.

#### Fáze výstavby pro posouzení MSÚ:

Fáze 1 – nezesílený průřez – stálé zatížení – návrhová hodnota zatížení

Fáze 2 – nezesílený průřez – předpětí vnesením deformace – návrhová hodnota zatížení

Fáze 3 – zesílený průřez – proměnné zatížení + přírůstek stálého zatížení + uvolnění předpětí – návrhová hodnota zatížení

#### Fáze výstavby pro posouzení MSP:

Fáze 1 – nezesílený průřez – stálé zatížení – charakteristická hodnota zatížení

Fáze 2 – nezesílený průřez – předpětí vnesením deformace – charakteristická hodnota zatížení

Fáze 3 – zesílený průřez – proměnné zatížení + přírůstek stálého zatížení + uvolnění předpětí – charakteristická hodnota zatížení

#### Postup zadání v modulu RF-Stages – posouzení MSÚ

- V obecném prostředí RFEM vymodelujeme konstrukci.
- Po spouštění modulu RF-Stages definujeme v záložce *Vstupní údaje* → *Základní údaje* všechny 3 fáze výstavby:
  - Vytvořit novou fázi:* Fáze 1 – stálé zatížení (nezesílený průřez)
  - Vytvořit novou fázi:* Fáze 2 – předpětí (nezesílený průřez)
  - Vytvořit novou fázi:* Fáze 3 – proměnné + přírůstek stálého + uvolnění předpětí (zesílený průřez)
- V záložce *Vstupní údaje* → *Pruty* přidáme pruty do jednotlivých fází a přidělíme jim materiál:
  - Fáze 1 – *Přidat pruty:* nosník stropnice – ocel S 235
  - Fáze 2 – prázdné
  - Fáze 3 – *Přidat pruty:* zesilovací příložky – ocel S 235; tuhé fiktivní pruty excentricity zesílení – bez materiálu
- V záložce *Vstupní údaje* → *Uzlové podpory* přidáme podpory:
  - Fáze 1 – *Přidat podpory:* všechny uzlové podpory
  - Fáze 2 – *Přidat podpory:* prázdné
  - Fáze 3 – *Přidat podpory:* prázdné
- V záložce *Vstupní údaje* → *Zatížení* přiřadíme zatěžovací stavy do jednotlivých fází. Pro účely této analýzy bude výhodné, pokud veškeré zatížení budeme v rámci RF-Stages uvažovat jako stálé:
  - Fáze 1 – *Stálé zatížení:* ZS1 – stálé zatížení; *Krátkodobé zatížení:* prázdné
  - Fáze 2 – *Stálé zatížení:* ZS2 – předpětí vnesením deformace; *Krátkodobé zatížení:* prázdné
  - Fáze 3 – *Stálé zatížení:* ZS3 – stálé zatížení + proměnné zatížení + vrácení předpětí; *Krátkodobé zatížení:* prázdné
- V dialogovém okně *Detaily* → *Výpočty* → *Uspořádání nových prutů* zvolíme možnost tangenciální vkládání nových prvků
- Spustíme výpočet

#### Postup zadání v modulu RF-Stages – posouzení MSP

- Výše popsany numerický model vytvořený pro posouzení zesílené stropnice v modulu RF-Stages zkopírujeme a uložíme pod novým jménem.



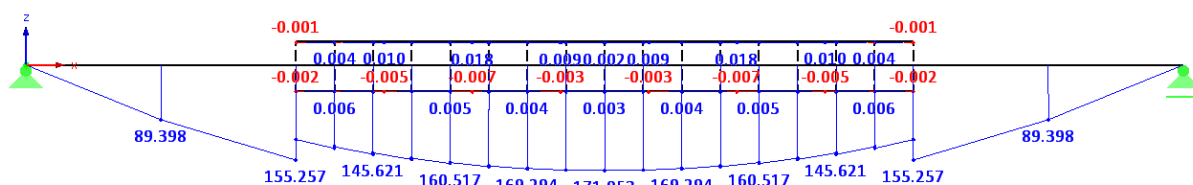
- V záložce *Vstupní údaje* → *Zatížení* návrhové zatěžovací stavy za charakteristické
- Spustíme výpočet

### 3.2.4. Posouzení MSÚ

Klopní nosníku je bráněno, proto je třeba v MSÚ posoudit nosník na prostý ohyb a smyk. Maximální namáhání konstrukce nastává ve třetí fázi. Odtud jsou převzaty vnitřní síly.

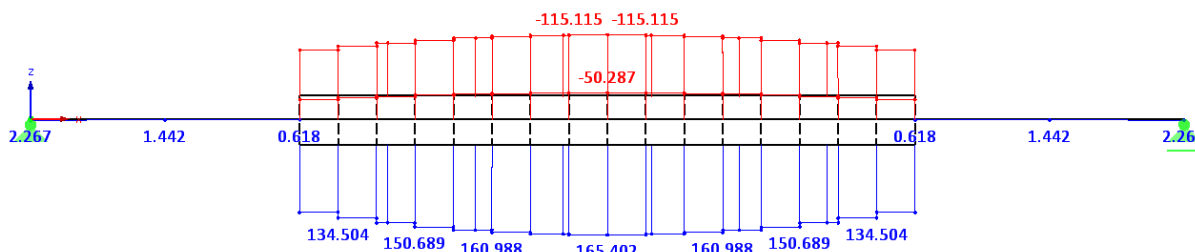
#### Posouzení - prostý ohyb – uprostřed rozpětí

Moment působící na stropnici:  $M_{a,d} = 172 \text{ kNm}$   
 Moment působící na horní příložku:  $M_{s1,d} = 0,002 \text{ kNm}$  (lze zanedbat)  
 Moment působící na dolní příložku:  $M_{s2,d} = 0,003 \text{ kNm}$  (lze zanedbat)



Obr. 43 Momenty působící na části zesíleného průřezu ve 3. fázi

Normálová síla působící na stropnici:  $N_{a,d} = -50,3 \text{ kN}$   
 Normálová síla působící na horní příložku:  $N_{s1,d} = -115,1 \text{ kN}$   
 Excentricita zesílení horní příložky:  $e_{1,s1} = -0,150 \text{ m}$   
 Normálová síla působící na dolní příložku:  $N_{s2,d} = 165,4 \text{ kN}$   
 Excentricita zesílení dolní příložky:  $e_{2,s2} = 0,168 \text{ m}$



Obr. 44 Normálové síly působící na části zesíleného průřezu ve 3. fázi

Celkový moment působící na průřez:  $M_{tot,d} = 172 + 0,15 \cdot 115,1 + 0,168 \cdot 165,4 = 217,1 \text{ kNm}$

Posouzení napětí – prostý ohyb zesíleného nosníku:

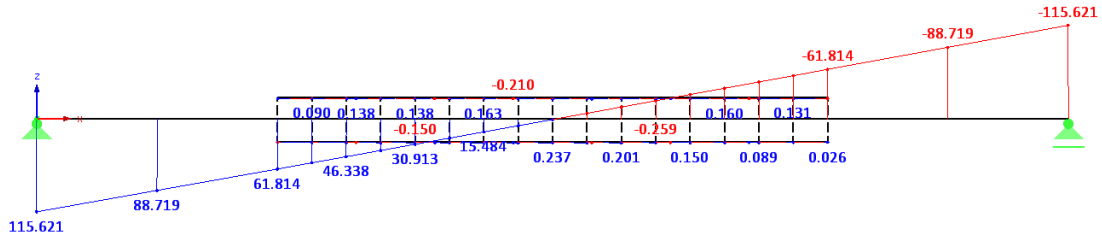
Posouzení:  $M_{tot,d} < W_{pl,1} \cdot f_{yd} + W_{pl,2} \cdot f_{yd}$   
 $217 < 0,8043 \cdot 10^{-3} \cdot 235 \cdot 10^{-3} + 0,6 \cdot 10^{-3} \cdot 0,15 \cdot 235 \cdot 10^{-3} + 0,84 \cdot 10^{-3} \cdot 0,168 \cdot 235 \cdot 10^{-3} = 243 \text{ kNm}$

**VYHOVUJE S VYUŽITÍM 89 %**

#### Posouzení – smyk – průřez nad podporou

Posouvající síla působící na stropnici:  $V_{a,d} = 172 \text{ kNm}$   
 Posouvající síla působící na horní příložku: není v kontrolovaném průřezu  
 Posouvající síla působící na dolní příložku: není v kontrolovaném průřezu





Obr. 45 Posouvající síly působící na části zesíleného průřezu ve 3. fázi

Posouzení napětí – prostý ohyb zesíleného nosníku:

Plastická únosnost ve smyku:  $V_{pl,Rd} = \frac{A_{vz} \cdot f_{yd}}{\sqrt{3}} = \frac{3,081 \cdot 10^{-3} \cdot 235000}{\sqrt{3}} = 418 \text{ kN}$

Posouzení:  $V_{a,d} = 172 < V_{pl,Rd} = 418 \text{ kN}$

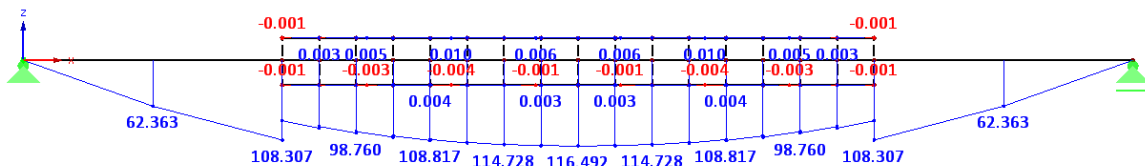
**VYHOVUJE S VYUŽITÍM 41 % (MALÝ SMYK)**

**3.2.5. Posouzení MSP**

Při posouzení v MSP je třeba prověřit jestli maximální charakteristická hodnota normálového napětí v konstrukci nepřekročí charakteristickou mez kluzu oceli a zároveň je třeba prověřit jestli nebyl překročen limitní průhyb.

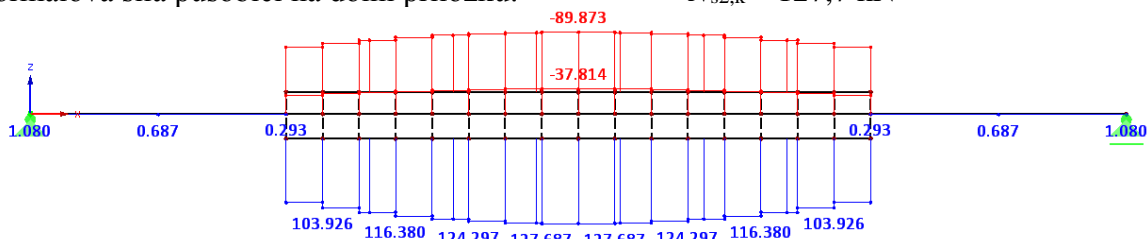
**Posouzení – normálové napětí – uprostřed rozpětí**

Moment působící na stropnici:  $M_{a,k} = 116 \text{ kNm}$   
 Moment působící na horní příložku:  $M_{s1,k} = 0,001 \text{ kNm}$   
 Moment působící na dolní příložku:  $M_{s2,k} = 0,002 \text{ kNm}$



Obr. 46 Momenty působící na části zesíleného průřezu ve 3. fázi

Normálová síla působící na stropnici:  $N_{a,k} = -37,8 \text{ kN}$   
 Normálová síla působící na horní příložku:  $N_{s1,k} = -89,8 \text{ kN}$   
 Normálová síla působící na dolní příložku:  $N_{s2,k} = 127,7 \text{ kN}$



Obr. 47 Normálové síly působící na části zesíleného průřezu ve 3. fázi

Posouzení napětí – 3. fáze:

Napětí v horní příložce – horní líc:

$$\sigma_{s1t} = \frac{N_{s1,k}}{A_{s1}} + \frac{M_{s1,k}}{W_{s1}} = \frac{-89,8}{0,600 \cdot 10^{-3}} - \frac{0,001}{0,0006 \cdot 10^{-3}} = -151 \text{ MPa} < f_{yk} = -235 \text{ MPa}$$

**VYHOVUJE S VYUŽITÍM 64 %**

Napětí v dolní příložce – dolní líc:

$$\sigma_{s2b} = \frac{N_{s2,k}}{A_{s2}} + \frac{M_{s2,k}}{W_{s2}} = \frac{127,7}{0,840 \cdot 10^{-3}} + \frac{0,002}{0,000840 \cdot 10^{-3}} = 155 \text{ MPa} < f_{ck} = 235 \text{ MPa}$$

**VYHOVUJE S VYUŽITÍM 66 %**

Napětí v ocelovém nosníku – horní líc:

$$\sigma_{at} = \frac{N_{ak}}{A_a} - \frac{M_{ak}}{W_a} = \frac{-37,8}{6,261 \cdot 10^{-3}} - \frac{116}{0,7131 \cdot 10^{-3}} = -169 \text{ MPa} < f_{yk} = -235 \text{ MPa}$$

**VYHOVUJE S VYUŽITÍM 72 %**

Napětí v ocelovém nosníku – dolní líc:

$$\sigma_{at} = \frac{N_{ak}}{A_a} + \frac{M_{ak}}{W_a} = \frac{-37,8}{6,261 \cdot 10^{-3}} + \frac{116}{0,7131 \cdot 10^{-3}} = 157 \text{ MPa} < f_{yk} = 235 \text{ MPa}$$

**VYHOVUJE S VYUŽITÍM 67 %**

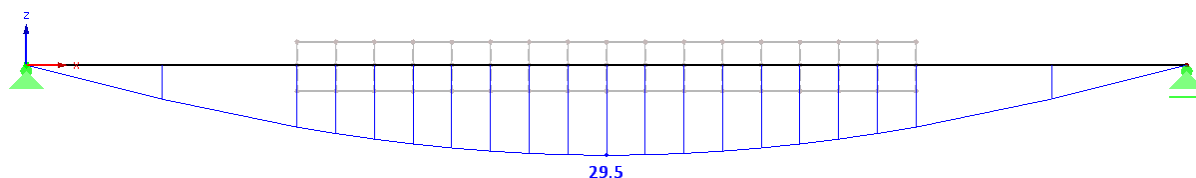
*Pozn.: Z výsledků je patrné, že se vlivem nesymetrického zesílení těžiště průřezu posunulo směrem dolů. Nejvíce namáhaná jsou tedy horní vlákna ocelového nosníku IPE 330.*

**Posouzení – normálové napětí – uprostřed rozpětí**

Požadavkem této úlohy je omezit celkový průhyb konstrukce, protože se jedná o případ, kdy průhyb může narušit vzhled objektu. Posouzen tedy bude průhyb ve 3. fázi. Pro odečet celkového průhybu ve 3. fázi je třeba nastavit možnost vykreslení deformace na nedeformované konstrukci v dialogu *Detaily* → *Možnosti* → *Typ deformací* → *Na nedeformované konstrukce (součet deformací)*.

Celkový limitní průhyb – zesílený nosník – 3. fáze:

$$\delta_{tot} = 29,5 \text{ mm}$$



Obr. 48 Celkový limitní průhyb – 3. fáze

**Posouzení napětí průhybu:**

Limitní průhyb:

$$\delta_{lim} = \frac{L}{250} = \frac{7500}{250} = 30 \text{ mm}$$

Posouzení:

$$\delta_{tot} = 29,5 \text{ mm} < \delta_{lim} = 30 \text{ mm} \quad \text{VYHOVUJE}$$

## Reference

### Normy a literatura

- [1] ČSN EN 1994-1-1. Navrhování spřažených ocelobetonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. Praha 2011
- [2] ČSN EN 1993-1-1. Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. Praha 2011
- [3] DOS T soubor 3: č.04. Doporučený standard technický – Skupina: konstrukce ocelové – Zesilování ocelových konstrukcí. ČKAIT. Praha 2000
- [4] ČSN 73 0038. Hodnocení a ověřování existujících konstrukcí – doplňující ustanovení. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. Praha 2019
- [5] Mikeš, K. Rekonstrukce ocelových a dřevěných konstrukcí: Přednášky, Praha: ČVUT
- [6] RF – Stages - FEA Calculations considering Different Stages – Program Description. Dlubal Engineering Software. Tiefenbach 2010
- [7] RFEM 5 – Prostorové konstrukce metodou konečných prvků – Popis programu. Dlubal Software s.r.o. Praha 2012
- [8] Ryjáček, P. Ocelové mosty - Cvičení, Praha: ČVUT, 2015.
- [9] Stančík, V. Ocelové mosty 2: Podklady k cvičení, Praha: ČVUT, 2018.

### Webové stránky

- [10] Dlubal.com, <https://www.dlubal.com/cs/podpora-a-skoleni/skoleni/webinare?query=RF-Stages> (accessed Jan 20, 2020)
- [11] Dlubal.com, <https://www.dlubal.com/cs/podpora-a-skoleni/podpora/databaze-znalosti/001411> (accessed Jan 20, 2020)
- [12] Dlubal.com, <https://www.dlubal.com/cs/podpora-a-skoleni/skoleni/webinare?> (accessed Jan 20, 2020)