

**Vydání  
srpen 2014**

**Přídavný modul**

# **RF- STABILITY**

**Součinitele kritického zatížení,  
vzpěrné délky a tvary vybočení**

**Popis  
programu**

Všechna práva včetně práv k překladu vyhrazena.

Bez výslovného souhlasu společnosti DLUBAL SOFTWARE S.R.O. není povoleno tento popis programu ani jeho jednotlivé části jakýmkoli způsobem dále šířit.

© **Dlubal Software s.r.o.**  
**Anglická 28 120 00 Praha 2**

Tel.: +420 222 518 568  
Fax: +420 222 519 218  
Email: [info@dlubal.cz](mailto:info@dlubal.cz)  
Web: [www.dlubal.cz](http://www.dlubal.cz)



# Obsah

	Obsah	Strana
<b>1.</b>	<b>Úvod</b>	<b>4</b>
1.1	Přídavný modul RF-STABILITY	4
1.2	Tým pro vývoj modulu RF-STABILITY	5
1.3	Poznámka k příručce	6
1.4	Spuštění modulu RF-STABILITY	6
<b>2.</b>	<b>Vstupní data</b>	<b>8</b>
2.1	Základní údaje	8
<b>3.</b>	<b>Výpočet</b>	<b>16</b>
3.1	Kontrola	16
3.2	Spuštění výpočtu	16
<b>4.</b>	<b>Výsledky</b>	<b>18</b>
4.1	Součinitele kritického zatížení	18
4.2	Vzpěrné délky a kritické síly	20
4.3	Vlastní tvary po uzlech	21
4.4	Vlastní tvary po prutech	23
4.5	Vlastní tvary po plochách	24
<b>5.</b>	<b>Vyhodnocení výsledků</b>	<b>25</b>
5.1	Tabulky výsledků	25
5.2	Výsledky na modelu v RFEMu	26
5.3	Filtrování výsledků	30
<b>6.</b>	<b>Výstup</b>	<b>31</b>
6.1	Výstupní protokol	31
6.2	Tisk zobrazení	31
<b>7.</b>	<b>Obecné funkce</b>	<b>33</b>
7.1	Případy v RF-STABILITY	33
7.2	Jednotky a desetinná místa	35
7.3	Export výsledků	36
<b>8.</b>	<b>Příklady</b>	<b>39</b>
8.1	Čtvercová deska	39
8.2	Kruhová deska	43
8.3	Konzola s náběhem	45
<b>A</b>	<b>Literatura</b>	<b>48</b>
<b>B</b>	<b>Index</b>	<b>49</b>

# 1. Úvod

## 1.1 Přídavný modul RF-STABILITY

Přídavný modul RF-STABILITY hlavního programu RFEM slouží k analýze vlastních čísel a k výpočtu součinitelů kritického zatížení a příslušných tvarů vybočení u prutových a plošných konstrukcí. Z výsledků se pak vychází při stabilitní analýze konstrukce; příslušný vlastní tvar vypovídá o oblasti ve statickém modelu konstrukce, které hrozí ztráta stability nebo vyboulení. Při této analýze se zohledňují také tělesa.

Modul RF-STABILITY umožňuje analyzovat několik tvarů vybočení či tvarů boulení současně. Po výpočtu se uživateli zobrazí rozhodující tvary selhání posuzovaného modelu konstrukce roztržené podle součinitele kritického zatížení. Příslušné vzpěrné délky a mezní zatížení ve vzpěru se použijí při dalších stabilitních analýzách pro tlakem namáhané konstrukční prvky.

Grafické zobrazení tvarů vybočení uživateli pomáhá identifikovat ohrožené oblasti v modelu konstrukce a vyvodit případná konstrukční opatření s cílem zabránit selhání stavebního dílce. Modul RF-STABILITY je tak neobyčejně užitečným nástrojem právě pro analýzu konstrukcí, kterým hrozí vybočení nebo vyboulení, např. štíhlých nosníků a tenkostěnných skořepin. Na základě zjištěného součinitele kritického zatížení lze tedy v první řadě posoudit, zda je stabilita konstrukce obecně ohrožena (posouzení vzpěru, klopení a boulení). V druhé řadě lze pak ze stanovených tvarů vybočení odvodit případné imperfekce a použít je pro výpočet v RFEMu.

Modul RF-STABILITY nabízí následující funkce:

- Určení několika tvarů vybočení v jediném výpočetním cyklu.
- Převzetí normálových sil ze zatěžovacích stavů nebo kombinací zatížení v RFEMu.
- Možnost zohlednit příznivé účinky tahových sil.
- Možnost zohlednit změny tuhosti v RFEMu.
- Analýza vlastních čísel; součinitel zvyšování zatížení může zadat sám uživatel.
- Výpočet tvarů vybočení nestabilních modelů pro odstranění problému.
- Účinné rovnicové metody pro výpočet vlastních čísel; parametry může zadat sám uživatel.
- Možnost normovat vlastní tvary.
- Zobrazení součinitelů kritického zatížení a příslušných vlastních tvarů v tabulce.
- Zobrazení tvarů vybočení a tvarů boulení s možností vytvořit animaci v grafickém prostředí RFEMu.
- Začlenění dat z tohoto modulu do výstupního tiskového protokolu RFEMu. Automatická aktualizace všech změn.
- Možnost využít tvary vybočení v přídavných modulech RF-IMP, RF-KAPPA, RF-STEEL EC3, RF-STEEL AISC/AS/BS/CS/GB/IS/NTC-DF/SANS/SIA/SP, RF-ALUMINIUM a RF-TIMBER Pro.
- Přímý export dat do MS Excelu, do aplikace Calc z balíku OpenOffice.org nebo do formátu CSV.

Přejeme Vám mnoho úspěchů a zábavy při práci s naším modulem RF-STABILITY.

Společnost DLUBAL SOFTWARE S.R.O.

## 1.2 Tým pro vývoj modulu RF-STABILITY

Na vývoji modulu RF-STABILITY se podíleli:

### Koordinátoři programu

Dipl.-Ing. Georg Dlubal

Dipl.-Ing. (FH) Younes El Frem

### Programátoři

Doc. Dr. Ing. Ivan Němec

Ing. Jiří Doležal

Dr. Ing. Radoslav Rusina

Ing. Petr Horák

Ing. Michal Balvon

Dr. Zbyněk Vlk

### Design programu

Dipl.-Ing. Georg Dlubal

Ing. Jan Milěř

### Testování programu

Ing. Pavel Bartoš

Dipl.-Ing. (FH) Adrian Langhammer

Ing. František Knobloch

### Lokalizace programu a manuály

Ing. Fabio Borriello

Eng.º Nilton Lopes Fernandes

Ing. Dmitry Bystrov

Mgr. Ing. Hana Macková

Eng.º Rafael Duarte

Ing. Téc. José Martínez Hernández

Ing. Jana Duníková

MA SKT Anton Mitleider

Dipl.-Ing. Frank Faulstich

Dipl.-Ü. Gundel Pietzcker

Ing. Lara Caballero Freyer

Mgr. Petra Pokorná

Ing. Alessandra Grosso

Dipl.-Ing. Jing Sun

BSc Eng Chelsea Jennings

Ing. Marcela Svitáková

Ing. Ladislav Kábrt

Dipl.-Ing. (FH) Robert Vogl

Ing. Aleksandra Kociolek

### Technická podpora a závěrečná kontrola

M.Eng. Cosme Asseya

Dipl.-Ing. (FH) Bastian Kuhn

Dipl.-Ing. (BA) Markus Baumgärtel

Dipl.-Ing. (FH) Adrian Langhammer

Dipl.-Ing. Moritz Bertram

Dipl.-Ing. (FH) Ulrich Lex

M.Sc. Sonja von Bloh

Dipl.-Ing. (BA) Sandy Matula

Dipl.-Ing. (FH) Steffen Clauß

Dipl.-Ing. (FH) Alexander Meierhofer

Dipl.-Ing. Frank Faulstich

M.Eng. Dipl.-Ing. (BA) Andreas Niemeier

Dipl.-Ing. (FH) René Flori

M.Eng. Dipl.-Ing. (FH) Walter Rustler

Dipl.-Ing. (FH) Stefan Frenzel

M.Sc. Dipl.-Ing. (FH) Frank Sonntag

Dipl.-Ing. (FH) Walter Fröhlich

Dipl.-Ing. (FH) Christian Stautner

Dipl.-Ing. Wieland Götzler

Dipl.-Ing. (FH) Lukas Sühnel

Dipl.-Ing. (FH) Paul Kieloch

Dipl.-Ing. (FH) Robert Vogl

## 1.3 Poznámka k příručce

Tematické oblasti jako instalace, uživatelské prostředí, vyhodnocení výsledků a výstup jsou podrobně popsány v manuálu k hlavnímu programu RFEM, a proto je v této příručce ponecháme stranou. Pozornost naopak soustředíme na zvláštnosti, které přináší práce s tímto přídatným modulem.



Při popisu modulu vycházíme z pořadí a struktury tabulek se vstupními a výstupními daty. V textu uvádíme popisované **ikony** (tlačítka) v hranatých závorkách, např. [Kontrola]. Tlačítka jsou zároveň zobrazena na levém okraji. **Názvy** dialogů, tabulek a jednotlivých nabídek jsou pak v textu pro přehlednost vyznačeny *kurzivou*.

Na závěr příručky připojujeme také index pro rychlé vyhledání určitých termínů. Pokud však ani tak nenaleznete to, co potřebujete, pak se Vám na našich webových stránkách [www.dlubal.cz](http://www.dlubal.cz) nabízí vyhledávač, pomocí kterého můžete dle zadaných kritérií listovat v rozsáhlém seznamu *Otázky a odpovědi*.

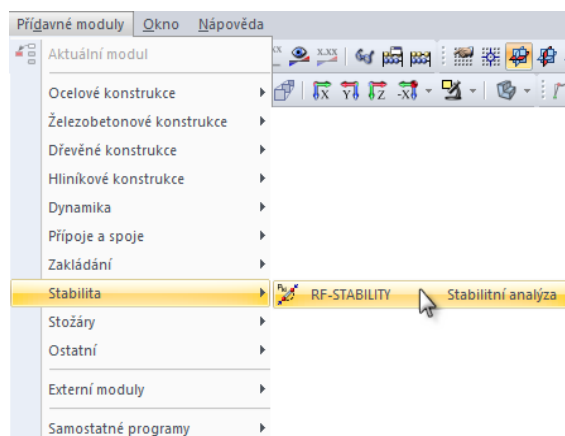
## 1.4 Spuštění modulu RF-STABILITY

Přídatný modul RF-STABILITY lze v RFEMu spustit několika způsoby.

### Hlavní nabídka

Modul RF-STABILITY můžeme vyvolat příkazem z hlavní nabídky programu RFEM

**Přídatné moduly** → **Stabilita** → **RF-STABILITY**.

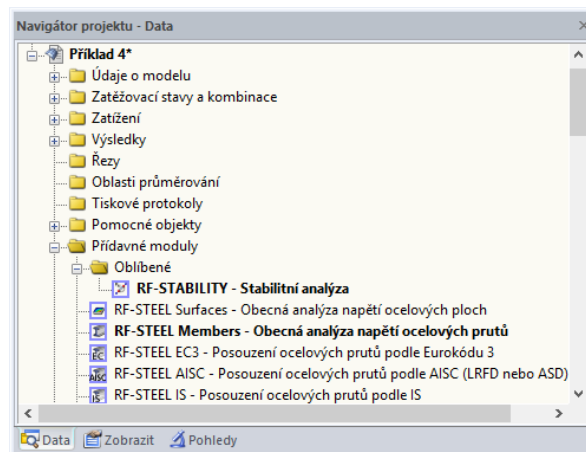


Obr. 1.1: Hlavní nabídka: *Přídatné moduly* → *Stabilita* → *RF-STABILITY*

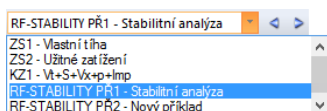
## Navigátor

Modul RF-STABILITY lze dále vyvolat z navigátoru *Data* kliknutím na položku

**Přidavné moduly → RF-STABILITY.**



Obr. 1.2: Navigátor Data: Přidavné moduly → RF-STABILITY

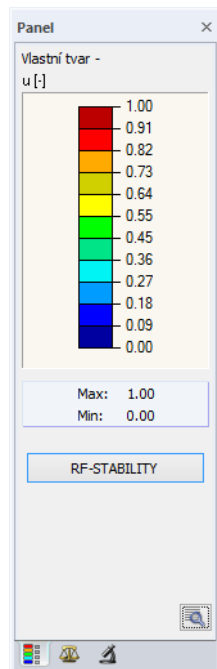


RF-STABILITY

## Panel

Pokud jsou v určitém modelu konstrukce v RFEMu již k dispozici výsledky z modulu RF-STABILITY, pak lze daný modul otevřít také z řídicího panelu: návrhový případ RF-STABILITY nastavíme v seznamu zatěžovacích stavů v panelu nástrojů. Pomocí tlačítka [Zobrazit výsledky] v grafickém okně zobrazíme tvar vybočení.

V panelu můžeme nyní použít tlačítko [RF-STABILITY], kterým lze daný modul spustit.



Obr. 1.3: Tlačítko [RF-STABILITY] v panelu

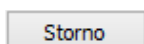
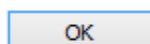
## 2. Vstupní data

Po spuštění přídatného modulu RF-STABILITY se zobrazí nové okno, v jehož levé části vidíme navigátor pro přístup ke všem stávajícím dialogům. Nad navigátorem se nachází rozbalovací seznam všech případně již zadaných stabilitních případů (viz kapitola 7.1, strana 33).

Pokud modul RF-STABILITY spouštíme poprvé, pak se v něm již vytvořené zatěžovací stavy a kombinace automaticky načtou.

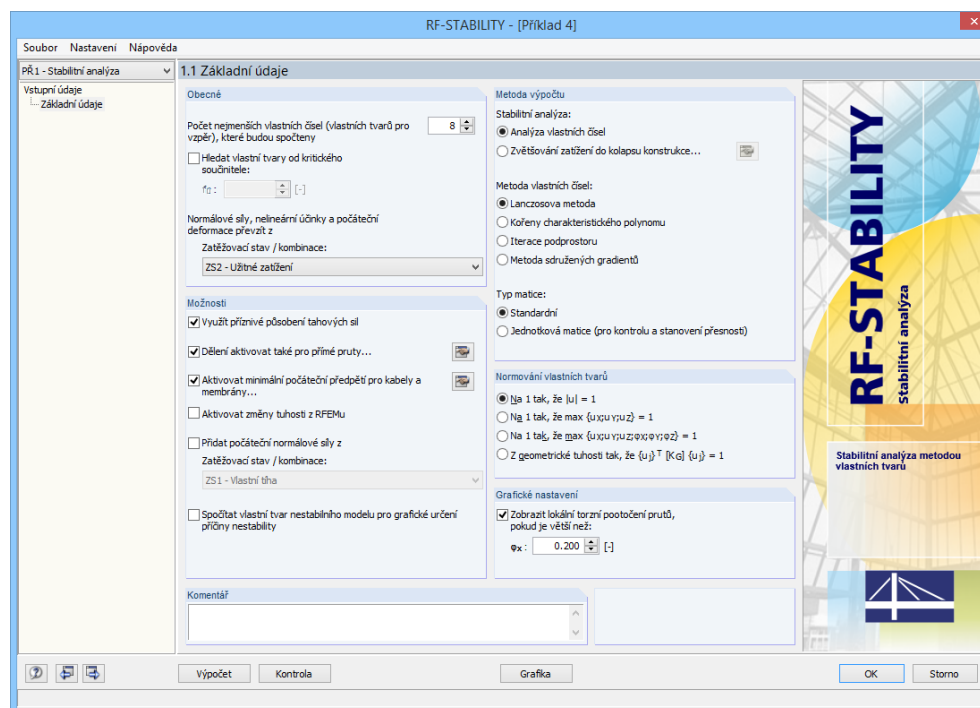
Dialogy lze otevřít kliknutím na jejich název v navigátoru modulu. Uživatel může mezi nimi také přepínat pomocí vlevo znázorněných tlačítek (listování dopředu či zpět) nebo pomocí funkčních kláves [F2] a [F3].

Tlačítkem [OK] uložíme zadané údaje a modul RF-STABILITY zavřeme. Vrátime se do hlavního programu. Tlačítkem [Storno] modul ukončíme bez uložení dat.



### 2.1 Základní údaje

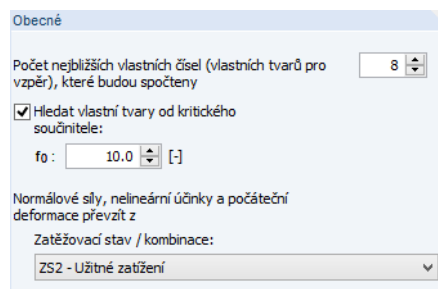
V dialogu 1.1 *Základní údaje* se stanoví všechny parametry pro stabilitní analýzu. Je to jediný vstupní dialog daného modulu.



Obr. 2.1: Dialog 1.1 *Základní údaje*



## Obecné



Obecné

Počet nejbližších vlastních čísel (vlastních tvarů pro vzpěr), které budou spočteny: 8

Hledat vlastní tvary od kritického součinitele:

fo : 10.0 [-]

Normálové síly, nelineární účinky a počáteční deformace převzít z

Zatěžovací stav / kombinace:

ZS2 - Užitné zatížení

Obr. 2.2: Zadání vlastních tvarů a normálových sil

### Počet nejmenších vlastních čísel

RF-STABILITY počítá nejméně příznivé stabilitní tvary konstrukce. Jejich počet se stanoví v tomto vstupním poli. Maximálně lze spočítat 1 000 tvarů vybočení, resp. tvarů boulení, jestliže to ovšem připouští počet stupňů volnosti a operační paměť počítače.



Pokud budou výsledkem analýzy záporné součinitele kritického zatížení, měl by se počet zjišťovaných vlastních tvarů přiměřeně zvýšit. Pokud je totiž zadán počet příliš malý, nelze vyřadit záporná vlastní čísla a zobrazit pouze kladné, realistické výsledky. Jestliže se chceme vyhnout záporným součinitelům kritického zatížení, můžeme také případně pro výpočet použít metodu sdružených gradientů (viz níže).

### Hledat vlastní tvary od kritického součinitele

Uživatel může také stanovit, aby modul RF-STABILITY zobrazil pouze vlastní čísla, která překračují určitou hodnotu kritického součinitele. Označíme příslušné zaškrtnuté políčko a ve vstupním poli následně zadáme minimální hodnotu kritického součinitele  $f_0$ .

### Normálové síly, nelineární účinky a počáteční deformace převzít ze zatěžovacího stavu / kombinace

Seznam obsahuje všechny zatěžovací stavy a kombinace zatížení daného modelu konstrukce. Je třeba vybrat některou z položek. Normálové síly a případně tuhosti zvoleného účinku se pak budou uvažovat při výpočtu stabilitního tvaru. Daný zatěžovací stav nebo kombinace by se měly v RFEMu spočítat podle teorie I. řádu a bez redukce tuhosti (materiál, průřez, prut, plocha).

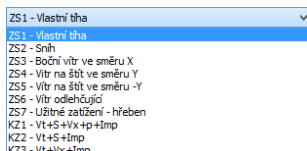
Kombinace výsledků v seznamu chybějí, protože z jejich výsledných maximálních/minimálních extrémních hodnot nelze vyvodit jednoznačné průběhy normálových sil.

Kromě normálových sil se z RFEMu převezmou také tuhostní poměry, což znamená, že se přebírá statický systém v okamžiku ukončení výpočtu zatěžovacího stavu nebo kombinace zatížení. Z daného systému se vychází při analýze vlastních čísel. V modulu RF-STABILITY tak lze při lineární analýze vlastních čísel přibližně zohlednit nelineární účinky jako například vypadávající pruty, podpory a klouby nebo nelinearity prutů.

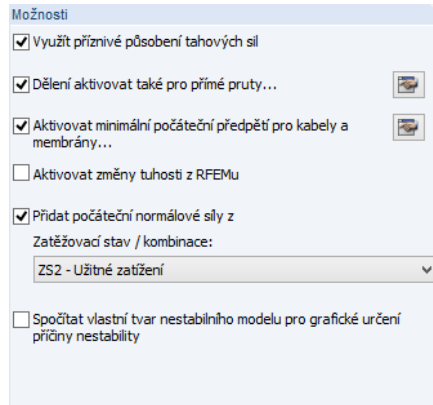
Pokud ještě u daného zatěžovacího stavu nebo kombinace zatížení nemáme k dispozici výsledky, vypočítají se automaticky před vlastní stabilitní analýzou.



Při výpočtu tvaru vybočení prutové konstrukce a vzpěrných délek má zatížení rozhodující význam, protože hodnoty vzpěru nezávisí pouze na statickém modelu, nýbrž také na poměru normálových sil a celkové kritické síly  $N_{cr}$ . Doporučujeme proto zadat zatěžovací stav s plně svislým zatížením (bez větru), aby na většinu prutů působily tlakové síly.



## Možnosti



Obr. 2.3: Možnosti

### Využit příznivé působení tahových sil

Pokud zaškrtneme toto políčko, zohlední se při výpočtu vlastních čísel i tahové normálové síly působící v modelu konstrukce. Tahové síly zpravidla přispívají ke stabilizaci konstrukce.

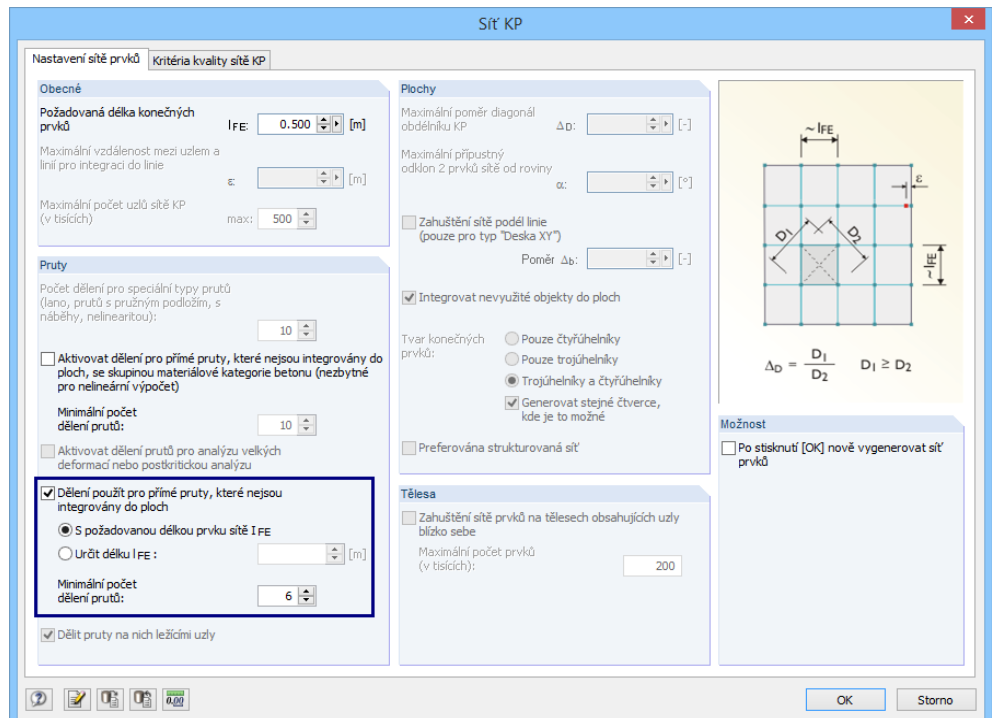
### Dělení aktivovat také pro přímé pruty

Lepší výsledky přibližnou metodou mohou někdy vyžadovat jemnější rozdělení prutu, zvláště jedná-li se o příhradové pruty, pruty s náběhy nebo pruty s podložím. Konkrétní případ naleznete na blogu firmy DLUBAL na adrese:

<https://www.dlubal.de/blog/12586>



Po kliknutí na tlačítko [Nastavit pro pruty síť prvků...] lze dělení prutu upravit. Otevře se dialog hlavního programu RFEM *Nastavení sítě prvků*.

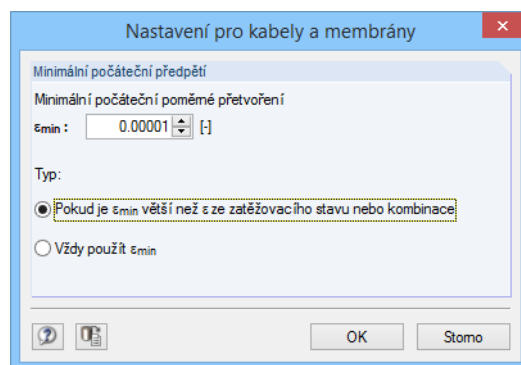

Obr. 2.4: Dialog *Nastavení sítě prvků*

### Aktivovat minimální počáteční předpětí pro kabely a membrány

Jestliže označíme příslušné zaškrtačací políčko, bude se u lanových prutů a membránových ploch uvažovat velmi malé předpětí. Zabráníme tak, aby dané prvky vypadly již na počátku výpočtu. Tento krok rovněž umožňuje stabilizovat konstrukci.



Po kliknutí na tlačítko [Nastavení pro kabely a membrány...] lze podrobně zadat velikost a typ počátečního předpětí.



Obr. 2.5: Dialog *Nastavení pro kabely a membrány*

### Aktivovat změny tuhosti z RFEMu

Daná volba umožňuje zohlednit při analýze vlastních čísel součinitele upravující tuhost materiálů, prutů, podpor, kloubů či průřezů, které jsme zadali v RFEMu. Tyto součinitele popisujeme v příslušných kapitolách manuálu k hlavnímu programu RFEM. Jestliže označíme dané zaškrtačací políčko, budou se při výpočtu v modulu RF-STABILITY uvažovat všechny součinitele tuhosti u zvoleného zatěžovacího stavu, resp. kombinace zatížení a zohlední se příslušná kritéria neúčinnosti.

V modulu RF-STABILITY tak máme možnost zohlednit změny tuhosti nezávisle na nastavení v RFEMu. Lze tak například spočítat v RFEMu normálové síly určité kombinace zatížení bez redukce tuhosti a následně v modulu RF-STABILITY kritické síly s upravenou tuhostí materiálů, prutů či průřezů.

Pokud jsme ovšem v RFEMu aktivovali změnu tuhosti u daného zatěžovacího stavu nebo kombinace zatížení, není toto zaškrtačací políčko přístupné: tím se má zajistit, aby vlastní tvary odpovídaly výchozím předpokladům daného modelu konstrukce.

Jestliže se vlastní tvary mají spočítat jako „charakteristická“ vlastnost modelu, změny tuhosti není třeba zohlednit.

### Přidat počáteční normálové síly ze zatěžovacího stavu / kombinace

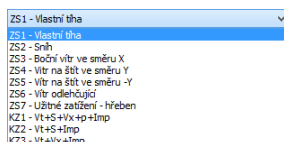
Pokud označíme toto políčko, můžeme vybrat zatěžovací stav nebo kombinaci zatížení, jejíž normálové síly se mají použít jako počáteční deformace. Tato volba nám například umožňuje zohlednit při výpočtu vlastních čísel stabilizující vliv jiného zatěžovacího stavu (než stavu zadaného výše v sekci *Obecně*).

Kombinace výsledků chybějí i v tomto seznamu, protože nevykazují jednoznačné průběhy normálových sil.

### Spočítat vlastní tvar nestabilního modelu pro grafické určení příčiny nestability

Daná volba umožňuje odhalit chyby, kterých se dopustíme při modelování konstrukce. Modely, které se vyhodnotí jako nestabilní, jsou podrobeny analýze vlastních čísel nezávisle na zatížení. Při grafickém vyhodnocení výsledků lze problémové oblasti jako např. nepřipojené pruty nebo pruty s příliš mnoha neomezenými stupni volnosti snadno rozpoznat.

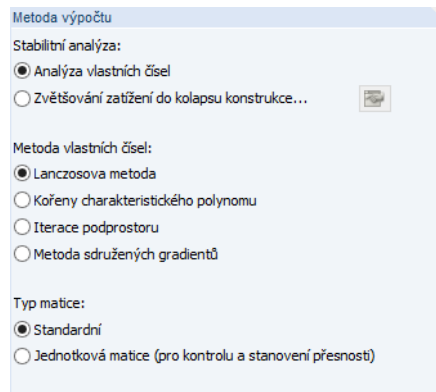
Přerušení výpočtu z důvodu přetížení touto funkcí nelze řešit.





Konkrétní příklad k dané funkci najdeme na blogu firmy DLUBAL na adrese <https://www.dlupal.de/blog/7903>

### Metoda výpočtu



Obr. 2.6: Metoda výpočtu

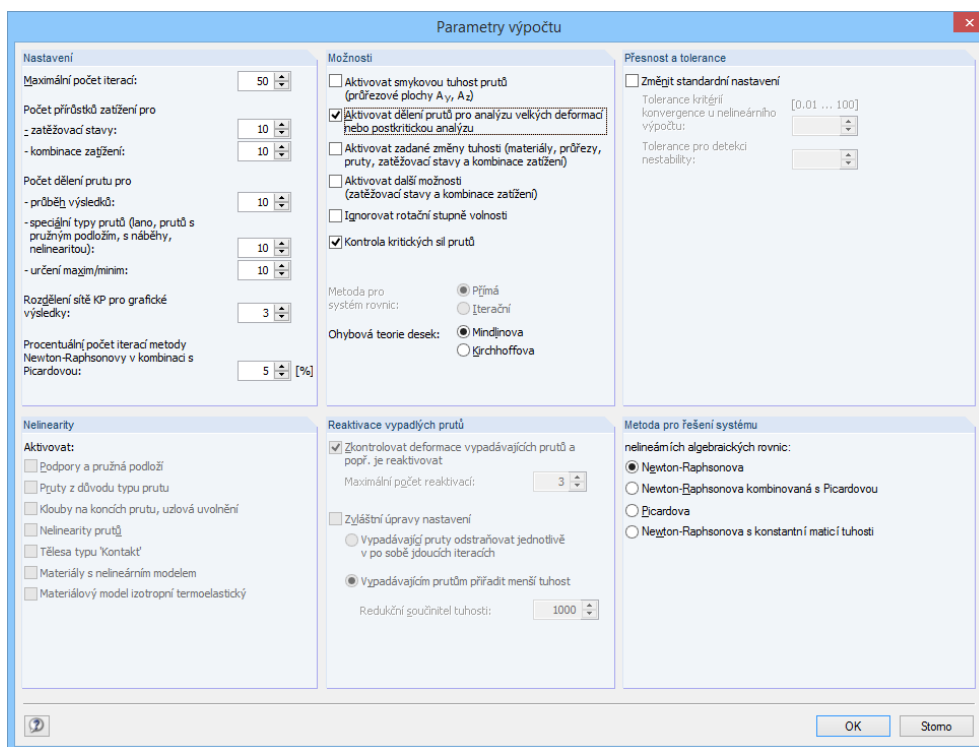
### Stabilitní analýza

Při standardním nastavení *Analýza vlastních čísel* se stabilitní tvary určují čistě lineárně. Vlastnosti nelineárně působících prvků jako například tahových prvků nebo podpor s kritériem neúčinnosti se v tomto případě nezohledňují. Tuhosti takových prvků se v matici uvažují jako prvky se stálým účinkem.

Volba *Po přitížení do kolapsu konstrukce...* umožňuje při výpočtu vlastních čísel zohlednit veškeré nelinearity. Při postupném zvyšování zatížení se zohledňují kritéria neúčinnosti a nelineární působení prutů, podloží, kloubů, materiálů atd. Výpočet probíhá iteračně, čemuž odpovídá i doba jeho trvání. Touto metodou lze v podstatě spolehlivě určit pouze nejnižší vlastní číslo.



Po kliknutí na tlačítko [Upravit parametry výpočtu...] můžeme zadat parametry pro iteraci.


Obr. 2.7: Dialog *Parametry výpočtu*

Dialog *Parametry výpočtu* popisujeme v kapitole 7.3.3 manuálu k hlavnímu programu RFEM. Výpočet probíhá automaticky přímou metodou řešení rovnic.

Pokud nastavíme 10 přírůstků zatížení stejně jako na obr. 2.7, bude se nejdříve uvažovat 10% zatížení, poté 20%, následně 30% ... 100%, 110% ... 480% atd.: zatížení se bude zvyšovat v 10% přírůstcích, dokud nedojde ke ztrátě stability konstrukce. Tak se zjistí součinitel kritického zatížení.



Dobu trvání výpočtu můžeme zkrátit nastavením následujících *parametrů výpočtu* (navrhované hodnoty uvádíme v závorkách):

- Nepříliš vysoký maximální počet iterací (50)
- Nepříliš jemné navyšování zatížení (5)
- Reaktivace vypadlých prutů vypnuta

### Metoda vlastních čísel

RF-STABILITY nám nabízí několik metod výpočtu:

- **Lanczosova metoda**

Vlastní tvary se spočítají přímou metodou. Daný algoritmus umožňuje většinou rychle dosáhnout konvergence. Lanczosova metoda je rychlejší než metoda iterace podprostoru (viz níže), a proto je v modulu RF-STABILITY předem nastavena.

Podrobnější informace najdeme například na adrese:

[http://en.wikipedia.org/wiki/Lanczos\\_algorithm](http://en.wikipedia.org/wiki/Lanczos_algorithm)

- **Kořeny charakteristického polynomu**

Také tato metoda se vyznačuje přímým postupem při výpočtu. V případě rozsáhlých konstrukcí může být výpočet touto metodou rychlejší než výpočet Lanczosovým algoritmem. Hlavní výhodou dané metody je přesnost výpočtu vyšších vlastních tvarů.

Více informací k této metodě nám nabízí například následující stránka:

[http://en.wikipedia.org/wiki/Characteristic\\_polynomial](http://en.wikipedia.org/wiki/Characteristic_polynomial)

- **Iterace podprostoru**

Výhodou této metody je, že se všechna vlastní čísla vypočítají v jediném kroku. Šířka pásu matice tuhosti má přitom značný vliv na dobu trvání výpočtu.

Při metodě iterace podprostoru se matice tuhosti ukládá do operační paměti počítače. Po jejím zaplnění se data ukládají na pevný disk. Tím se počítač znatelně zpomalí. Proto není tato metoda vhodná pro rozsáhlé konstrukce.

Výsledkem výpočtu touto metodou mohou být i záporné součinitele kritického zatížení.

Podrobnější informace najdeme například na adrese:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Krylov\\_subspace](http://en.wikipedia.org/wiki/Krylov_subspace)

- **Metoda sdružených gradientů**

Metoda sdružených gradientů ICG (*Incomplete Conjugate Gradient*) neklade vysoké nároky na operační paměť. Uloží se pouze součinitele matice tuhosti, které se nerovnají nule. Nevýhoda je, že vlastní čísla se počítají po sobě. Šířka pásu ovšem nemá žádný vliv na dobu trvání výpočtu.

Tato metoda by se měla uplatňovat v případě rozsáhlých konstrukcí, u nichž se zjišťuje menší počet vlastních čísel. Výsledkem výpočtu touto metodou nejsou žádné záporné součinitele kritického zatížení, protože se iteruje tak dlouho, dokud není dosažen předepsaný počet kladných vlastních čísel.

Při výpočtu metodou sdružených gradientů se občas nezjistí všechny nejnižší vlastní tvary.

Podrobnější informace najdeme například na adrese:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Conjugate\\_gradient\\_method](http://en.wikipedia.org/wiki/Conjugate_gradient_method)

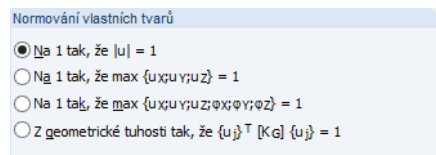
### Typ matice

V případě předem nastavené volby *Standardní* se v modulu RF-STABILITY uplatňuje geometrická matice tuhosti lineární soustavy rovnic.

*Jednotková matice* představuje kvadratickou matici s hodnotou jedna na hlavní diagonále. Měli bychom ji používat pouze pro numerickou a kinematickou analýzu. Zatížení a normálové síly nehrají při řešení zobecněného problému vlastních čísel žádnou roli.

Typy matice pro řešení vlastních čísel jsou blíže popsány v [3], kap. 7.

### Normování vlastních tvarů



Obr. 2.8: Normování vlastních tvarů

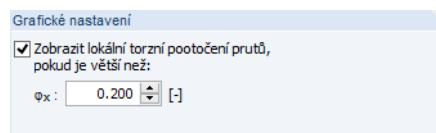
Vlastní tvary lze normovat různým způsobem („normování na jedničku“):

- Maximální posun  $|u| = 1$
- Maximální globální posun ( $\max z u_x, u_y, u_z = 1$ )
- Maximální globální deformace ( $\max z u_x, u_y, u_z, \phi_x, \phi_y, \phi_z = 1$ )
- Maximální hodnota součinu  $\{u_j\}^T \cdot [K_G] \cdot \{u_j\} = 1$

kdy  $\{u_j\}^T$  Transponovaný vektor vlastního tvaru  
 $[K_G]$  Geometrická tuhost  
 $\{u_j\}$  Vektor vlastního tvaru

Podle zadání představuje největší posun, resp. deformace referenční hodnotu 1, ostatní jsou v příslušném poměru menší.

### Nastavení pro grafiku



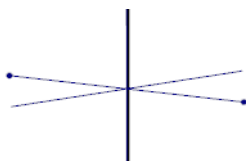
Obr. 2.9: Nastavení pro grafiku

Zaškrtnuté políčko v této sekci umožňuje rozhodnout, zda se mají ve výsledném grafickém znázornění vlastních tvarů *zobrazit lokální torzní pootočení prutů* (viz obrázek vlevo).

Standardně se zobrazují pouze torzní pootočení  $\phi_x$  s normovanými hodnotami většími než 0,2. Grafické znázornění je tak přehledné.

### Komentář

V tomto vstupním poli může uživatel uvést vlastní poznámku například k aktuálnímu stabilnímu případu.



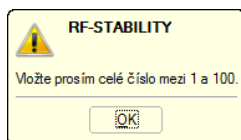
## 3. Výpočet

### 3.1 Kontrola

Kontrola

Před spuštěním výpočtu doporučujeme rychle zkontrolovat správnost zadaných vstupních dat. Kontrolu zahájíme pomocí tlačítka [Kontrola].

V případě, že program odhalí nesrovnalosti, zobrazí se příslušné hlášení.



Obr. 3.1: Výsledek kontroly správnosti

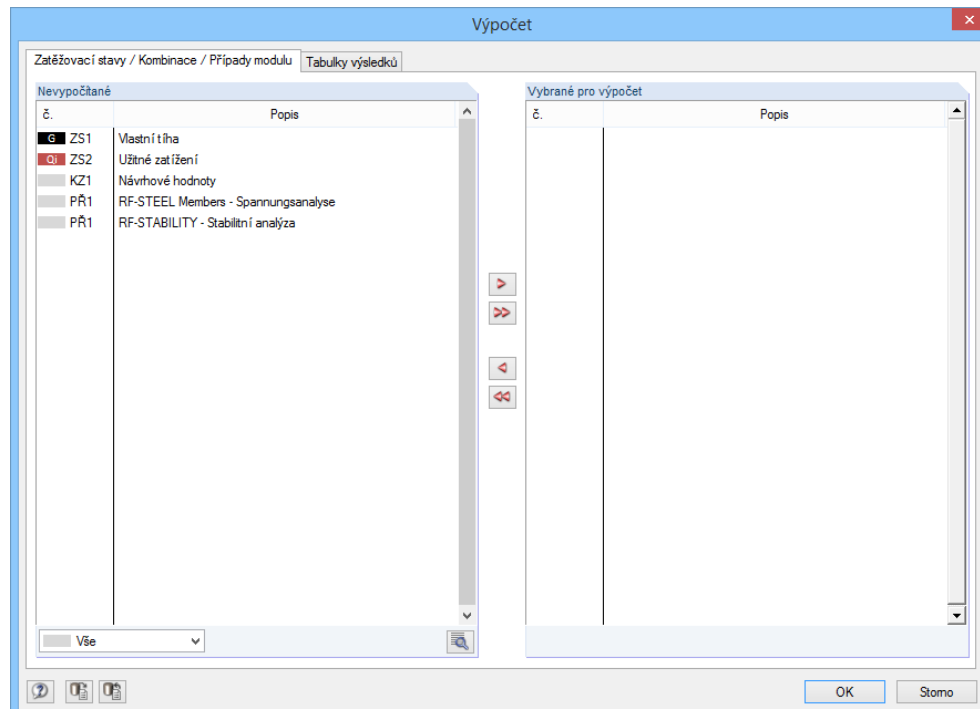
### 3.2 Spuštění výpočtu

Výpočet

Výpočet spustíme pomocí stejnojmenného tlačítka.

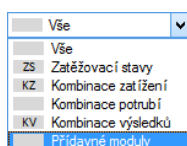
RF-STABILITY nejdříve vyhledá normálové síly, které se mají zohlednit při stabilitní analýze. Pokud ještě nejsou k dispozici výsledky daného zatěžovacího stavu, resp. kombinace zatížení, spustí se automaticky v RFEMu výpočet vnitřních sil.

Výpočet lze spustit také z uživatelského prostředí RFEMu. Případy z modulů se totiž zobrazí v dialogu *Výpočet* (který otevřeme z hlavní nabídky *Výpočet* → *Vybrat pro výpočet...*) v seznamu zatěžovacích stavů a kombinací zatížení.



Obr. 3.2: Dialog *Výpočet*

Pokud v seznamu *Nevypočítané* chybí případy z modulu RF-STABILITY, je třeba nastavit pod seznamem volbu *Vše* nebo *Přídavné moduly*.



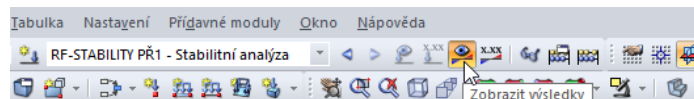




Tlačítkem ► převedeme vybrané stabilní případy do seznamu na pravé straně. Výpočet pak spustíme pomocí tlačítka [OK].

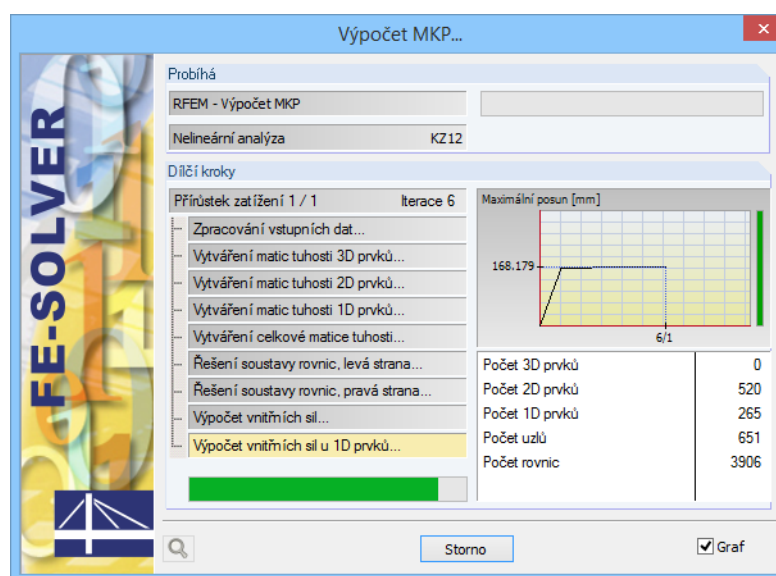


Výpočet určitého případu z modulu RF-STABILITY lze spustit přímo také z panelu nástrojů. V seznamu nastavíme požadovaný případ a následně klikneme na tlačítko [Zobrazit výsledky].



Obr. 3.3: Přímý výpočet případu z modulu RF-STABILITY v programu RFEM

Následně se zobrazí dialog, v kterém lze sledovat průběh stabilitní analýzy.



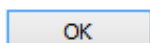
Obr. 3.4: Výpočet v modulu RF-STABILITY

Při analýze vlastních čísel, která probíhá některou z přímých metod výpočtu, se provádí takzvaná *Sturmova kontrola*, jak můžeme vidět na obrázku výše. Při této kontrole se ověřuje, zda v určitém intervalu nebylo vynecháno některé vlastní číslo. Používá se přitom diagonální matice z GAUSSOVA rozkladu, kdy počet záporných diagonálních prvků matice odpovídá počtu vlastních čísel pod hranicí příslušného intervalu. Sturmův test se tedy provádí pro dané intervalové meze a následně se stanoví rozdíl.

## 4. Výsledky

Výsledky se zobrazí ve výstupních tabulkách 2.1 až 2.5.

Okamžitě po skončení výpočtu se otevře tabulka 2.1 *Součinitele kritického zatížení*. Tabulky 2.2 až 2.5 obsahují vzpěrné délky a kritické síly a dále vlastní tvary seřazené podle určitých kritérií.



Všechny tabulky lze otevřít tak, že klikneme přímo na jejich název v navigátoru. Uživatel může mezi nimi přepínat také pomocí vlevo znázorněných tlačítek (listování dopředu či zpět) nebo pomocí funkčních kláves [F2] a [F3].

Tlačítkem [OK] výsledky uložíme a modul RF-STABILITY zavřeme. Vrátime se do hlavního programu.

V kapitole 4 *Výsledky* popíšeme jednotlivé výstupní tabulky v příslušném pořadí. Vyhodnocení a kontrole výsledků se budeme věnovat v následující kapitole 5 *Vyhodnocení výsledků* na straně 25.

### 4.1 Součinitele kritického zatížení

První výstupní tabulka nás informuje o součinitelích kritického zatížení daného modelu konstrukce.

Vl. číslo E.	Součinitel kritického zatížení f [-]	Faktor zvětšení α [-]
1	32 200	1,032
2	35 660	1,029
3	212 987	1,005
4	228 452	1,004
5	229 991	1,004
6	243 854	1,004
7	311 049	1,003
8	311 231	1,003

Obr. 4.1: Tabulka 2.1 *Součinitele kritického zatížení*

#### Vlastní tvar č.

Pro každé vlastní číslo se zobrazí součinitel kritického zatížení a faktor zvětšení. Výsledky jsou seřazeny vzestupně podle čísla stabilního tvaru.

#### Součinitel kritického zatížení f

Pro každé vlastní číslo se v tabulce uvede součinitel kritického zatížení. Součinitel menší než 1,00 poukazuje na nestabilitu konstrukce. Součinitel větší než 1,00 znamená, že zatížení vlivem



zadaných normálových sil vynásobené tímto součinitelem vede k porušení konstrukce vybočením nebo boulením.

Součinitele kritického zatížení menší než 10 vyžadují podle EN 1993-1-1, čl. 5.2.1(3) pro pružnostní analýzu výpočet podle teorie II. řádu.

Pokud je výsledkem výpočtu záporný součinitel kritického zatížení, nedochází vlivem tahových sil v konstrukci k porušení stability, a nelze tak zjistit očekávané chování ve vzpěru.

### Faktor zvětšení $\alpha$

Faktor zvětšení se počítá pomocí následující rovnice:

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{1}{f}}$$

Rovnice 4.1: Faktor zvětšení

Faktor zvětšení vyjadřuje vztah mezi momenty podle teorie I. a II. řádu.

$$M^{II} = \alpha \cdot M^I;$$

kdy  $M^I$  Moment podle teorie I. řádu, ovšem při zohlednění náhradního zatížení pro deformaci

$M^{II}$  Moment podle teorie II. řádu

Rovnice 4.2: Poměr momentů

Rovnice 4.2 platí však pouze v případě, že se ohybová čára vlivem zatížení blíží tvaru vybočení a že součinitel kritického zatížení  $f$  je větší než 1,00.

### Upozornění

Ve sloupci C se za určitých okolností objeví upozornění, že výsledkem výpočtu je záporný součinitel kritického zatížení. Tuto poznámku je třeba si vyložit tak, že při opačném směru působení zadaného zatížení (opačné znaménko) by došlo k porušení boulením nebo vybočením.



Tento problém lze vyřešit zvýšením počtu zjišťovaných vlastních čísel nebo uplatněním metody sdružených gradientů.

Pod tabulkou se uvádí *nekonečná norma matice tuhosti*. Danou matematickou normou lze stanovit řád nejvyššího vlastního tvaru. Tato hodnota je důležitá například pro přesnost řešení (viz [3], kapitola 3, 2.2.3 a kapitola 7).

Nekonečná norma matice tuhosti: 5.244e+011 [-]

## 4.2 Vzpěrné délky a kritické síly

2.2 Vzpěrné délky a kritické síly

Prut č.	Uzel č.		Délka prutu L [m]	Vl. tvar č.	Vzpěrná délka [m]		Souč. vzpěrné délky [-]		Kritická síla $N_{cr}$ [kN]
	Počátek	Konec			$L_{cr,y}$	$L_{cr,z}$	$K_{cr,y}$	$K_{cr,z}$	
58	59	64	3.546	1	14.288	8.678	4.029	2.447	169.549
				2	12.608	7.657	3.555	2.159	217.753
				3	12.209	7.415	3.443	2.091	232.193
				4	12.199	7.409	3.440	2.089	232.598
59	55	60	3.000	1	8.299	5.001	2.766	1.667	1110.330
				2	7.323	4.413	2.441	1.471	1426.000
				3	7.092	4.274	2.364	1.425	1520.570
				4	7.086	4.270	2.362	1.423	1523.220
60	60	65	3.000	1	25.903	15.609	8.634	5.203	113.988
				2	22.856	13.774	7.619	4.591	146.396
				3	22.134	13.338	7.378	4.446	156.104
				4	22.115	13.327	7.372	4.442	156.376
61	61	62	6.274	1	22.626	13.969	3.606	2.227	24.535
				2	19.965	12.326	3.182	1.965	31.510
				3	19.334	11.937	3.082	1.903	33.600
				4	19.317	11.927	3.079	1.901	33.659
62	62	63	6.274	1	22.541	13.917	3.593	2.218	24.720
				2	19.890	12.280	3.170	1.957	31.748
				3	19.262	11.892	3.070	1.895	33.853
				4	19.245	11.882	3.067	1.894	33.912
63	63	64	6.274	1	22.541	13.917	3.593	2.218	24.719
				2	19.890	12.280	3.170	1.957	31.747
				3	19.262	11.892	3.070	1.896	33.853
				4	19.245	11.882	3.067	1.894	33.912
64	64	65	6.274	1	22.626	13.970	3.606	2.227	24.534
				2	19.965	12.327	3.182	1.965	31.509
				3	19.335	11.937	3.082	1.903	33.599
				4	19.318	11.927	3.079	1.901	33.657
66	36	37	6.250	1	Tah v prutu -> žádný výpočet				
				2	Tah v prutu -> žádný výpočet				
				3	Tah v prutu -> žádný výpočet				
				4	Tah v prutu -> žádný výpočet				
67	37	38	6.250	1	Tah v prutu -> žádný výpočet				
				2	Tah v prutu -> žádný výpočet				

Seřadit podle:  Prutů  Tvarů vybočení

Obr. 4.2: Dialog 2.2 Vzpěrné délky a kritické síly

Tato výsledná tabulka se zobrazí, pokud konstrukce obsahuje pruty. Vzpěrné délky a kritické síly lze v seznamu seřadit buď podle *prutů* nebo *tvarů vybočení*.

### Prut č.

Výsledky stabilitní analýzy se zobrazí pro všechny pruty v konstrukci. Pruty namáhané tahovými silami a vypadlé pruty se vyznačí.

### Uzel č. - Počátek / Konec

Každý prut je definován svým počátečním a koncovým uzlem, jejichž čísla se zobrazí ve dvou příslušných sloupcích.

### Délka prutu L

V daném sloupci se uvádí geometrická délka každého prutu.

### Vlastní tvar č.

V případě, že položky jsou v seznamu seřazeny podle prutů, zobrazí se v tomto sloupci čísla vlastních tvarů.

### Vzpěrná délka $L_{cr,y}$ / $L_{cr,z}$

Vzpěrná délka  $L_{cr,y}$  (resp.  $L_{cr,u}$ ) udává chování ve vzpěru kolmo k hlavní ose prutu y (resp. u v případě nesymetrických průřezů),  $L_{cr,z}$  resp.  $L_{cr,v}$  vybočení kolmo k vedlejší ose prutu z (resp. v).

Vzpěrné délky  $L_{cr}$  se odvíjí od kritických sil uvedených ve sloupci I v tabulce, které jsou specifické pro jednotlivé pruty. Tyto síly pak závisí na příslušném kritickém zatížení celé konstrukce. Vzpěrné délky se tak vyhodnocují s ohledem na poměr normálových sil v prutu a celkového kritického zatížení. V jednoduchých případech jsou vzpěrné délky známy jako EULEROVY případy 1 až 4.

Nejméně příznivé kritické zatížení v konstrukci může někdy představovat kritická síla konkrétního uvolněného, tj. kloubově připojeného prutu. Danou situaci snadno rozpoznáme v grafickém znázornění vlastních tvarů, neboť pouze na příslušném prutu lze pozorovat sinusový výkyv. Jedná se o takzvanou lokální nestabilitu. Vzpěrné délky všech ostatních prutů pak pro daný případ selhání nelze použít, a proto je třeba převzít je z „vyššího“ tvaru vybočení. Teprve pak dochází k selhání celé konstrukce.

### Součinitel vzpěrné délky $k_{cr,y}$ / $k_{cr,z}$

Součinitele vzpěrných délek se vztahují k lokálním osám prutu y a z (resp. u a v) a vyjadřují poměr mezi vzpěrnou délkou a délkou prutu.

$$k_{cr} = \frac{L_{cr}}{L}$$

Rovnice 4.3: Součinitel vzpěrné délky  $k_{cr}$

### Kritická síla $N_{cr}$

V tomto sloupci se pro každý prut zobrazí kritická normálová síla  $N_{cr}$ , která se stanoví se zřetelem k příslušnému vlastnímu tvaru. To znamená, že jednotlivé kritické síly a příslušné vzpěrné délky je třeba vždy uvažovat v kontextu daného kritického zatížení celé konstrukce.

## 4.3 Vlastní tvary po uzlech

2.3 Vlastní tvary po uzlech

Uzel č.	Vl. tvar č.	Normalizované posuny [ ]			Normalizovaná pootočení [ ]		
		ux	uy	uz	φx	φy	φz
1	1	0.00000	0.00000	0.00000	0.01573	-0.00001	0.00000
	2	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	3	0.00000	0.00000	0.00000	0.00001	0.00001	0.00000
	4	0.00000	0.00000	0.00000	-0.00066	-0.00001	0.00000
2	1	0.00000	0.00000	0.00000	0.01574	-0.00001	0.00000
	2	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	3	0.00000	0.00000	0.00000	-0.00001	0.00001	0.00000
	4	0.00000	0.00000	0.00000	0.00066	-0.00001	0.00000
3	1	0.00005	0.09467	0.00000	0.01587	-0.00001	0.01418
	2	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	3	-0.00004	0.00003	0.00000	0.00001	0.00001	-0.00018
	4	0.00007	-0.00393	0.00000	-0.00065	-0.00001	0.00025
4	1	0.00005	0.14085	0.00001	0.02635	0.00000	0.01264
	2	-0.00001	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	3	-0.00004	-0.00046	-0.00001	0.00000	0.00000	-0.00014
	4	0.00007	-0.00332	0.00002	-0.00053	0.00000	0.00027
5	1	0.00005	0.18562	0.00002	0.04175	0.00000	0.00871
	2	-0.00001	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	3	-0.00004	-0.00071	-0.00001	0.00001	0.00000	0.00000
	4	0.00007	-0.00245	0.00003	-0.00035	0.00000	0.00034
6	1	0.00005	0.24304	0.00000	0.07103	0.00000	0.00000
	2	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	3	-0.00004	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00018
	4	0.00007	0.00000	0.00000	-0.00001	0.00001	0.00044
7	1	0.00005	0.18565	-0.00002	0.04177	0.00000	-0.00871
	2	-0.00001	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	3	-0.00004	0.00071	0.00001	-0.00001	0.00000	0.00000
	4	0.00007	0.00245	-0.00003	0.00033	0.00000	0.00034
8	1	0.00005	0.14089	-0.00001	0.02636	0.00000	-0.01263
	2	-0.00001	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	3	-0.00004	0.00046	0.00001	-0.00001	0.00000	-0.00014
	4	0.00007	0.00332	-0.00002	0.00052	0.00000	0.00027
9	1	0.00005	0.09472	0.00000	0.01587	-0.00001	-0.01418
	2	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Seřadit podle:  Uzlů  Tvarů vybočení

Obr. 4.3: Tabulka 2.3 Vlastní tvary po uzlech

Pro každý vlastní tvar se v této tabulce zobrazí normované posuny a pootočení uzlů v modelu konstrukce. Údaje v této tabulce lze uspořádat buď podle *uzlů* nebo *tvarů vybočení*.

### Uzel č.

Vlastní tvary se v seznamu zobrazí pro objekty v konstrukci definované v tabulce 1.1 *Uzly* v hlavním programu RFEM. V uzlech sítě prvků ani v dělicích bodech na prutu se výsledky v tabulkovém přehledu nezobrazí.

Seřadit podle:  Uzlů  Tvarů vybočení

### Vlastní tvar č.

Deformace se zobrazí pro každý spočítaný vlastní tvar.

### Normalizované posuny $u_x / u_y / u_z$

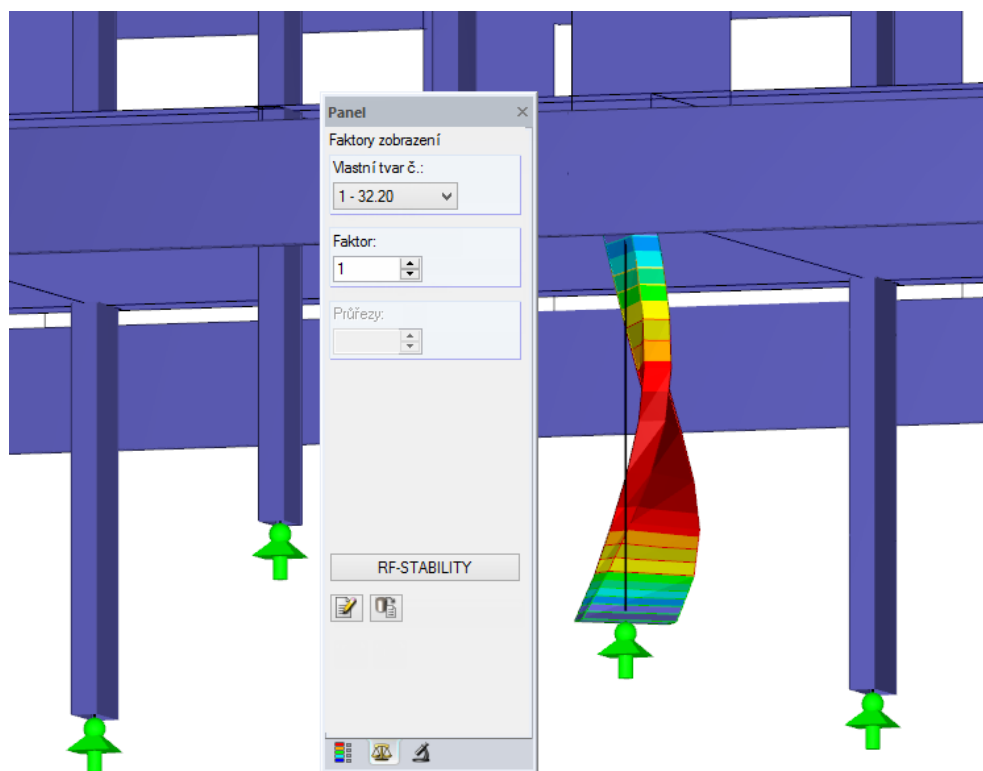
Ve sloupcích B až D je uveden seznam posunů ve vztahu k osám globálního souřadného systému. Normovány jsou na krajní hodnotu 1 celkového posunu, resp. na maximální hodnotu zadanou v dialogu 1.1 *Základní údaje* (viz obr. 2.8, strana 15).

### Normalizovaná pootočení $\varphi_x / \varphi_y / \varphi_z$

Ve sloupcích E až G se zobrazí normovaná pootočení uzlů.



Pokud se ve sloupci normovaných posunů prutové konstrukce zobrazí výhradně nulové hodnoty, lze většinou usuzovat na značné kroucení v samotných prutech (viz následující obrázek). Protože tento jev nemá vliv na posun koncových uzlů prutu, nemají zobrazené vzpěrné délky ani kritické síly pro dané pruty velkou výpočetní hodnotu.



Obr. 4.4: Kroucení tenkostěnného sloupu obdélníkového průřezu

## 4.4 Vlastní tvary po prutech

Tato výstupní tabulka se zobrazí pouze v případě, že model konstrukce obsahuje pruty.

2.4 Vlastní tvary po prutech

Prut č.	A		B		C	D			E			F			G			H			I					
	Uzel č.	Místo x [m]	Místo x [m]	Vl. tvar č.		$u_x$	$u_y$	$u_z$	$\varphi_x$	$\varphi_y$	$\varphi_z$	$u_x$	$u_y$	$u_z$	$\varphi_x$	$\varphi_y$	$\varphi_z$	$u_x$	$u_y$	$u_z$		$\varphi_x$	$\varphi_y$	$\varphi_z$		
43	43	0.000	2	0.00000	0.00000	0.00000	-0.00001	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000			
			3	0.00243	-0.00114	0.00104	0.06403	0.00003	0.49414																	
			4	-0.54816	-0.00266	-0.23449	0.01528	-0.00674	0.01537																	
			1.046	1	-0.00027	0.21385	0.00213	-0.26487	-0.00027	0.01872																
			2	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000		
			3	0.00243	0.42537	0.00098	0.06015	0.00008	0.32226																	
			4	-0.54816	0.01069	-0.22183	0.01288	-0.01716	0.01017																	
			2.091	1	-0.00027	0.23158	0.00240	-0.23599	-0.00024	0.01503																
			2	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000		
			3	0.00243	0.67452	0.00088	0.05627	0.00011	0.15527																	
			4	-0.54816	0.01867	-0.19924	0.01048	-0.02574	0.00512																	
			3.137	1	-0.00026	0.24490	0.00262	-0.20709	-0.00019	0.01026																
			2	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000		
			3	0.00243	0.75162	0.00075	0.05238	0.00014	-0.00702																	
			4	-0.54816	0.02145	-0.16864	0.00808	-0.03247	0.00021																	
			4.183	1	-0.00026	0.25267	0.00280	-0.17820	-0.00014	0.00440																
			2	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000		
			3	0.00243	0.66151	0.00058	0.04850	0.00017	-0.16450																	
			4	-0.54816	0.01916	-0.13196	0.00568	-0.03736	-0.00456																	
			5.228	1	-0.00026	0.25374	0.00291	-0.14932	-0.00007	-0.00253																
			2	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000		
			3	0.00243	0.40939	0.00040	0.04462	0.00018	-0.31710																	
			4	-0.54816	0.01196	-0.09115	0.00328	-0.04041	-0.00919																	
			44	6.274	1	-0.00026	0.24699	0.00295	-0.12043	0.00000	-0.01056															
			2	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000		
			3	0.00243	0.00000	0.00021	0.04074	0.00018	-0.46498																	
			4	-0.54816	0.00000	-0.04810	0.00088	-0.04161	-0.01367																	
			44	44	0.000	1	0.00026	0.24699	0.00295	-0.12043	0.00000	0.01056														
			2	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000		
			3	0.00243	0.00000	-0.00021	-0.04080	0.00018	-0.46498																	
			4	-0.54816	0.00000	0.04803	-0.00151	-0.04161	-0.01362																	
			1.046	1	0.00026	0.25374	0.00291	-0.14932	0.00007	0.00254																
			2	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000		
			3	0.00243	-0.40939	-0.00040	-0.04468	0.00018	-0.31710																	

Seřadit podle:  Prutů  Tvarů vybočení

Obr. 4.5: Tabulka 2.4 Vlastní tvary po prutech

Jednotlivé sloupce popisujeme v kapitole 4.3. Navíc se zobrazí *místo x* na prutu, v kterém se nachází příslušný počáteční nebo koncový uzel.

Údaje v této tabulce lze uspořádat buď podle *prutů* nebo *tvarů vybočení*.

Seřadit podle:  Prutů  Tvarů vybočení

## 4.5 Vlastní tvary po plochách

Tato tabulka se zobrazí pouze v případě, že model konstrukce obsahuje plochy.

2.5 Vlastní tvary po plochách

Plocha č.	Bod č.	Místo [m]			Vl. tvar č.	Normalizované posuny [.]			Normalizovaná pootočení [.]		
		X	Y	Z		$u_x$	$u_y$	$u_z$	$\varphi_x$	$\varphi_y$	$\varphi_z$
1	10	25.000	-17.000	-3.000	1	0.00012	0.99791	0.00916	-0.00317	-0.00266	-0.00022
					2	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
					3	0.00121	-0.00194	-0.00003	0.00001	-0.00006	-0.00017
					4	-0.33563	0.04910	0.00520	-0.00028	0.01711	0.00391
20	25.000	-19.500	-3.000	1	-0.00049	0.99782	0.00716	0.00857	-0.00553	-0.00028	
				2	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	
				3	0.00082	-0.00194	-0.00002	-0.00003	-0.00004	-0.00016	
				4	-0.32578	0.04916	0.00113	0.00388	0.01880	0.00396	
30	24.038	-18.500	-3.000	1	-0.00022	0.99813	0.00760	0.00158	-0.00319	-0.00026	
				2	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	
				3	0.00097	-0.00179	-0.00007	-0.00001	-0.00003	-0.00017	
				4	-0.32974	0.04535	0.01657	0.00135	0.01124	0.00393	
39	18.750	-15.000	-3.000	1	0.00043	0.99939	-0.00010	-0.00194	-0.00010	-0.00019	
				2	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	
				3	0.00152	-0.00097	-0.00001	0.00003	0.00010	-0.00015	
				4	-0.34357	0.02459	0.00380	-0.00481	-0.02298	0.00404	
40	25.000	-15.000	-3.000	1	0.00062	0.99786	0.00019	-0.00561	0.00004	-0.00045	
				2	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	
				3	0.00152	-0.00194	0.00000	-0.00002	-0.00034	-0.00030	
				4	-0.34325	0.04898	-0.00070	0.00617	0.07598	0.00319	
48	23.077	-16.500	-3.000	1	0.00023	0.99839	0.00422	-0.00185	-0.00129	-0.00024	
				2	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	
				3	0.00128	-0.00164	-0.00015	-0.00004	-0.00003	-0.00017	
				4	-0.33758	0.04158	0.03431	0.00815	0.00692	0.00391	
49	23.077	-17.000	-3.000	1	0.00012	0.99839	0.00501	-0.00129	-0.00168	-0.00024	
				2	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	
				3	0.00121	-0.00164	-0.00013	-0.00003	-0.00002	-0.00017	
				4	-0.33563	0.04158	0.03069	0.00636	0.00658	0.00391	
50	23.077	-17.500	-3.000	1	0.00001	0.99839	0.00547	-0.00055	-0.00197	-0.00024	
				2	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	
				3	0.00113	-0.00164	-0.00012	-0.00003	-0.00002	-0.00017	
				4	-0.33367	0.04158	0.02792	0.00474	0.00616	0.00392	
59	18.750	-20.000	-3.000	1	-0.00043	0.99940	0.00014	0.00074	-0.00012	-0.00019	
				2	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	

Seřadit podle:  Ploch  Tvarů vybočení

Obr. 4.6: Tabulka 2.5 Vlastní tvary po plochách

Údaje v této tabulce lze uspořádat buď podle *plach* nebo *tvarů vybočení*.

### Bod č.

Údaje se zobrazí pro každý rastrový bod plochy.

Rastrové body u plach může uživatel nastavit sám v hlavním programu RFEM. Příslušnou funkci popisujeme v kapitole 8.12 manuálu k programu RFEM. Pro výsledky je přitom předem nastaven rastr se vzdáleností 50 cm mezi body.

### Místo X / Y / Z

Ve sloupcích B až D (resp. C až E) je definována poloha rastrových bodů v globálním souřadném systému.

### Normalizované posuny $u_x$ / $u_y$ / $u_z$

Ve sloupcích F až H je uveden seznam posunů ve vztahu k osám globálního souřadného systému. Normovány jsou na krajní hodnotu, kterou jsme zadali v dialogu 1.1 *Základní údaje* (viz obr. 2.8, strana 15).

### Normalizovaná pootočení $\varphi_x$ / $\varphi_y$ / $\varphi_z$

Ve sloupcích I až K se zobrazí normovaná pootočení bodů.

Seřadit podle:  Ploch  Tvarů vybočení



## 5. Vyhodnocení výsledků

Výsledky analýzy vlastních čísel můžeme vyhodnotit různým způsobem. Pro grafické zhodnocení máme k dispozici pracovní okno RFEMu.

### 5.1 Tabulky výsledků

Ihned po skončení výpočtu se nám zobrazí tabulka 2.1 *Součinitele kritického zatížení*.

#### Záporný součinitel kritického zatížení

Záporný součinitel kritického zatížení poukazuje na to, že vlivem tahových normálových sil nemohlo být zjištěno porušení konstrukce vzpěrem nebo boulením. Znamená to, že při opačném směru působení zadaného zatížení (opačné znaménko) by došlo k porušení boulením nebo vybočením. Záporným součinitelům kritického zatížení můžeme předejít zvýšením počtu zjišťovaných stabilních tvarů nebo uplatněním metody sdružených gradientů.

#### Součinitel kritického zatížení < 1

Součinitel kritického zatížení menší než 1,00 znamená, že je konstrukce nestabilní.



2.1 Součinitele kritického zatížení

Vl. číslo č.	A		B	
	Součinitel kritického zatížení f [-]		Faktor zvětšení α [-]	
1	32.200			1.032
2	35.660			1.029
3	212.987			1.005
4	228.452			1.004

Obr. 5.1: Nestabilní konstrukce

Pouze kladný součinitel kritického zatížení větší než 1,00 znamená, že pokud zatížení vlivem zadaných normálových sil vynásobíme tímto součinitelem, dojde k porušení stabilní konstrukce vybočením nebo boulením.

#### Vzpěrné délky

U prutů se v tabulce 2.2 zobrazí pro jednotlivé tvary vybočení různé součinitele vzpěrné délky  $k_{cr}$ . Udávají chování ve vzpěru kolmo k příslušným osám.

2.2 Vzpěrné délky a kritické síly

Prut č.	A		B	C	D	E		G		H	I
	Uzel č. Počátek	Konec	Délka prutu L [m]	Vl. tvar č.	Vzpěrná délka [m] $L_{cr,y}$ $L_{cr,z}$		Souč. vzpěrné délky [-] $k_{cr,y}$ $k_{cr,z}$		$k_{cr,z}$	Kritická síla $N_{cr}$ [kN]	
1	1	3	6.000	1	55.541	11.703	9.257	1.950		323.847	
				2	49.009	10.327	8.168	1.721		415.920	
				3	47.461	10.000	7.910	1.667		443.501	
				4	47.420	9.992	7.903	1.665		444.274	

Obr. 5.2: Součinitele vzpěrné délky prutů  $k_{cr}$

Při analýze se normálové síly iterativně zvyšují tak dlouho, dokud nenastane kritický zatěžovací stav. Z daného součinitele kritického zatížení se pak spočítá kritická síla, která pak zpětně umožňuje stanovit vzpěrné délky a součinitele vzpěrné délky.

Pokud bychom tak například chtěli zjistit rozhodující součinitel vzpěrné délky  $k_{cr,y}$  pro vybočení kolmo k hlavní ose prutu, pak je zpravidla třeba spočítat několik tvarů vybočení. Pouze u čtvercových průřezů jsou vzpěrné délky a součinitele vzpěrné délky stejné ve směru obou os.



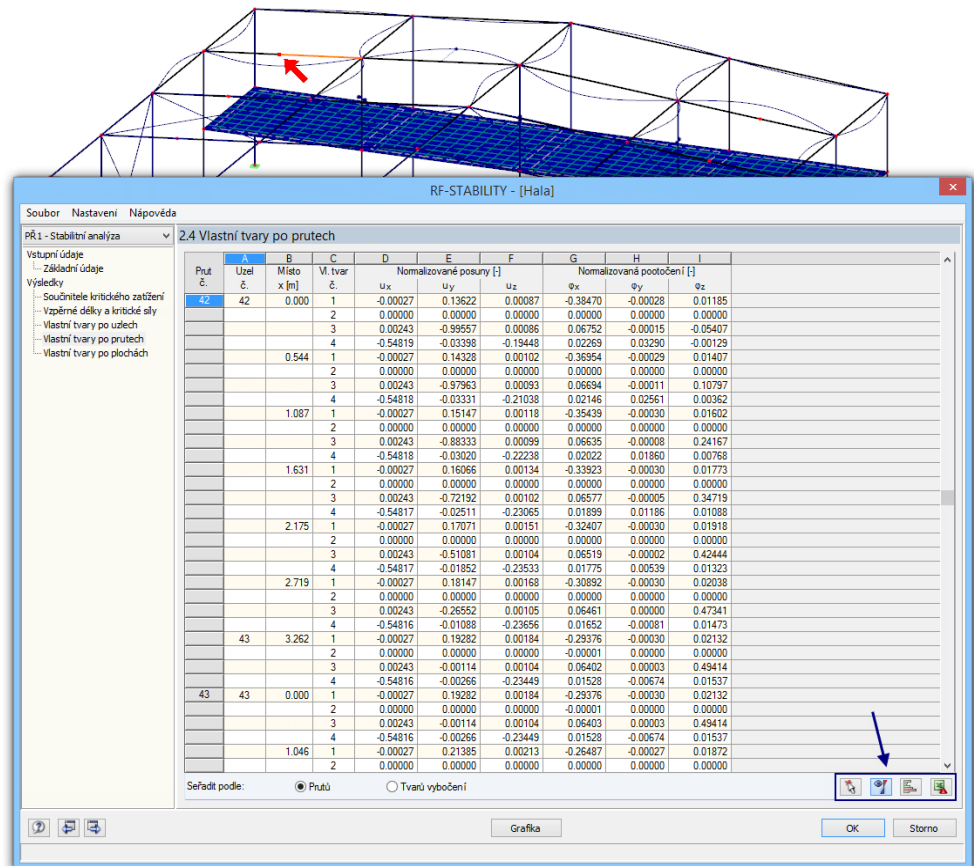
Součinitele vzpěrné délky pro sledy prutů nelze v modulu RF-STABILITY přímo spočítat. Máme pouze možnost posoudit výsledky jednotlivých prutů. Za rozhodující lze přitom ve sledu prutů považovat ten prut, u něhož se zobrazí nejmenší kritická síla  $N_{cr}$ . Hodnoty  $k_{cr}$  lze pak spočítat ze vzpěrné délky tohoto prutu a celkové délky sledu prutů.

## 5.2 Výsledky na modelu v RFEMu

Pro vyhodnocení výsledků posouzení lze využít i pracovní okno RFEMu.

### Grafické okno RFEMu na pozadí

Pracovní okno RFEMu na pozadí může být užitečné, pokud chceme ověřit polohu určité plochy nebo prutu v modelu konstrukce. Objekt, který jsme vybrali ve výstupní tabulce modulu RF-STABILITY, se v grafickém okně na pozadí vyznačí odlišnou barvou. Kromě toho se šipkou označí místo x na prutu, které je uvedeno v aktuálně vybraném řádku v tabulce. Někdy je k nalezení plochy nebo prutu v modelu třeba posunout okno modulu RF-STABILITY.







Obr. 5.3: Vyznačení prutu v zobrazení aktuálního vlastního tvaru modelu konstrukce v RFEMu



Pokud ani posunem okna modulu RF-STABILITY nezískáme požadovaný náhled, lze pomocí tlačítka [↖] vybrat požadovaný objekt graficky. Okno modulu RF-STABILITY se vypne a na pracovní ploše RFEMu lze nyní stanovit prut nebo plochu kliknutím myši. Navíc můžeme upravit náhled na konstrukci. K dispozici máme funkce z nabídky *Zobrazit*, například zoom, posun nebo natočení náhledu. Šipka, která vyznačuje místo x na prutu, přitom nezmizí.

Tlačítka ve výstupních tabulkách mají následující funkce:

Tlačítko	Název	Funkce
	Vybrat objekt v grafice a přejít na tento objekt v tabulce	Umožňuje graficky vybrat určitý objekt (prut, uzel, plochu) v pracovním okně RFEMu, jehož výsledné hodnoty chceme zobrazit v tabulce.
	Zobrazit aktuální tvar vybočení v	Zobrazí vlastní tvar z aktuálního řádku v tabulce v grafickém okně RFEMu.

	grafice	
	Zobrazit barvy v tabulce	Zobrazí, resp. skryje barevné pozadí v tabulkách výsledků podle referenční stupnice.
	Exportovat do Excelu	Exportuje tabulku do MS Excelu / Calcu z balíku OpenOffice → kapitola 7.3, strana 36

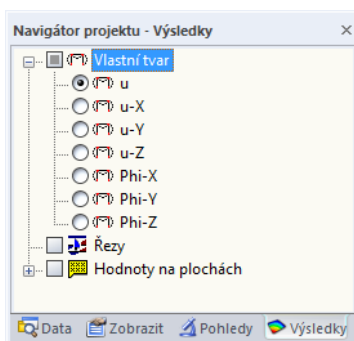
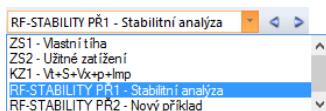
Tabulka 5.1: Tlačítka v tabulkách výsledků 2.1 až 2.5

### Pracovní okno RFEMu

Z grafického vyhodnocení jednotlivých vlastních tvarů můžeme dobře usuzovat na stabilitní chování modelu konstrukce: klikneme na tlačítko [Grafika] a modul RF-STABILITY zavřeme. V pracovním okně RFEMu se pak znázorní stabilitní tvary na modelu konstrukce podobně jako deformace od zatěžovacího stavu.

Předem nastaven je aktuální případ z modulu RF-STABILITY. V navigátoru *Výsledky* lze nastavit, které posuny nebo pootočení daného *vlastního tvaru* se mají v grafickém okně zobrazit.

Grafika

Obr. 5.4: Navigátor *Výsledky* pro RF-STABILITY

Kromě celkového vektoru  $u$  si můžeme prohlédnout konkrétní složky posunutí nebo pootočení v jednotlivých globálních směrech.

Možnosti *Řezy* a *Hodnoty na plochách* lze také použít pro grafické vyhodnocení stabilitních tvarů. Popis příslušných funkcí najdeme v kapitole 9.6 a 9.4 manuálu k programu RFEM.

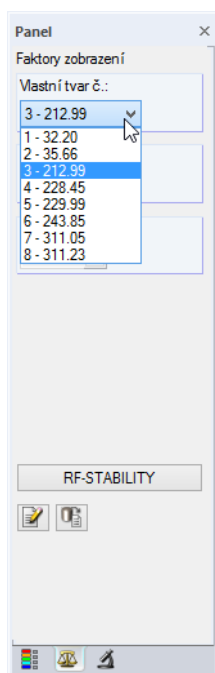
Pomocí tlačítka [Zobrazit výsledky] v panelu nástrojů můžeme v grafickém okně zobrazit nebo skrýt výsledné vlastní tvary. Tlačítko po pravé straně [Zobrazit výsledky s hodnotami] slouží k zobrazení výsledných číselných hodnot v obrázku.

Vzhledem k tomu, že tabulky RFEMu nemají pro vyhodnocení stabilitní analýzy žádný význam, lze je skrýt pomocí vlevo znázorněného tlačítka.

Řídicí panel je uzpůsoben modulu RF-STABILITY. Jeho standardní funkce podrobně popisujeme v kapitole 3.4.6 manuálu k programu RFEM.

V záložce *Faktory* řídicího panelu můžeme vybrat konkrétní vlastní tvary.



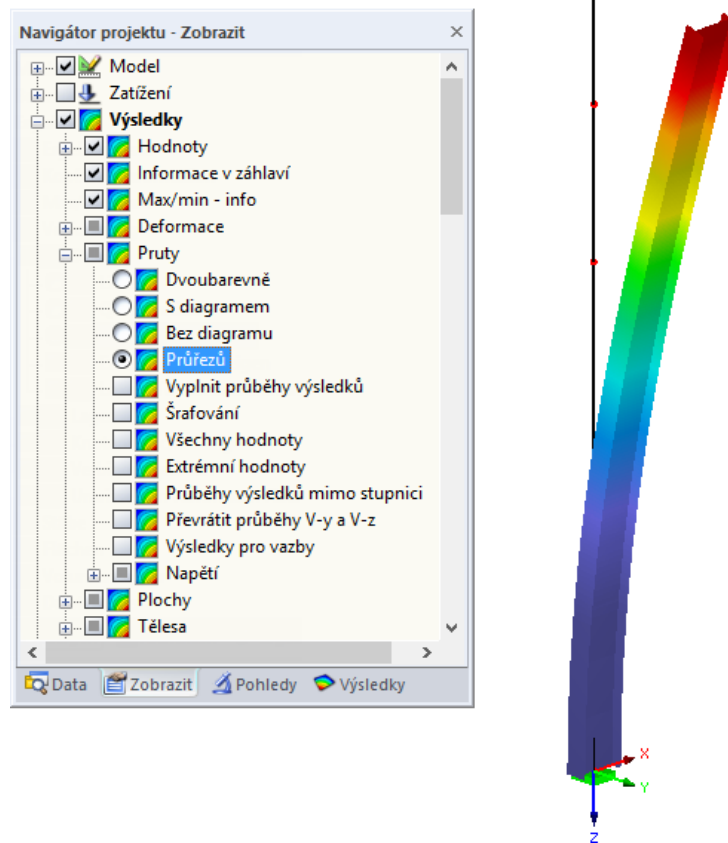


Obr. 5.5: Výběr vlastního tvaru v záložce *Faktory*



Pokud nelze vybočené pruty nebo vyboulené plochy v modelu konstrukce snadno rozpoznat, zvýšíme *faktor zobrazení* v druhé záložce řídicího panelu. Pomoci nám může také animace deformací, kterou aktivujeme kliknutím na vlevo znázorněné tlačítko.

Zobrazení výsledků na prutu lze nastavit v navigátoru *Zobrazit* v položce *Výsledky* → *Deformace* → *Pruty*. Standardně se tvary vybočení zobrazí jako *linie*. Ostatní volby pomáhají názorně zachytit chování konstrukce ve vzpěru.



Obr. 5.6: Navigátor Zobrazit: Výsledky → Deformace → Pruty → Průřezy barevně

Grafická zobrazení vlastních tvarů lze začlenit do výstupního protokolu (viz kapitola 6.2, strana 31).

RF-STABILITY

Do modulu se můžeme vrátit kliknutím na tlačítko [RF-STABILITY] v řídicím panelu.

## 5.3 Filtrování výsledků

Výstupní tabulky modulu RF-STABILITY umožňují již svým uspořádáním filtrovat výsledky podle určitých kritérií. Navíc lze ke grafickému vyhodnocení výsledků stabilitní analýzy použít filtrovací funkce, které jsou popsány v manuálu k programu RFEM v kapitole 9.9.

Pro filtrování prutů k jejich vyhodnocení lze využít takzvané *viditelnosti* (viz manuál k programu RFEM, kapitola 9.9.1).



Grafika



### Filtrování vlastních tvarů

Normované deformace lze nastavit jako kritérium pro filtrování výsledků v pracovním okně RFEMu. Otevřeme ho tlačítkem [Grafika]. K tomu je třeba zobrazit takzvaný řídicí panel. Pokud není aktivován, můžeme ho zapnout příkazem z hlavní nabídky RFEMu

#### Zobrazit → Řídicí panel

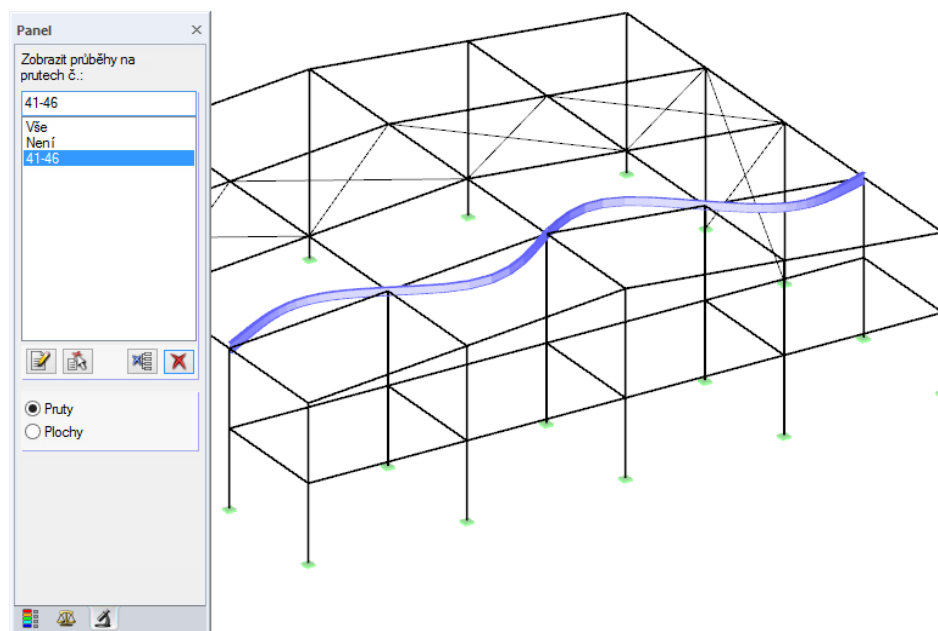
nebo kliknutím na příslušné tlačítko v panelu nástrojů.

Tento panel popisujeme v kapitole 3.4.6 manuálu k programu RFEM. Kritéria pro filtrování výsledků se nastavují v první záložce panelu (stupnice barev). Pokud jsme pro zobrazení tvarů vybočení prutů nastavili volbu *Linie* nebo *Průřezy*, je třeba v navigátoru *Zobrazit* přepnout na možnost *Průřezy barevně* (viz obr. 5.6).

V panelu můžeme například nastavit, aby se zobrazily pouze normované deformace větší než 0,5. Snáze tak v modelu konstrukce rozpoznáme oblasti, kterým hrozí vybočení nebo vyboulení.

### Filtrování ploch a prutů

V záložce *Filtry* řídicího panelu lze zadat čísla prutů nebo ploch, jejichž tvary vybočení nebo boulení si přejeme zobrazit v grafickém okně. Tuto funkci popisujeme v manuálu k programu RFEM v kapitole 9.9.3. Na rozdíl od funkce výřezu se přitom zobrazí celá konstrukce.



Obr. 5.7: Filtrování prutů pro zobrazení tvaru vybočení příčle haly

## 6. Výstup

### 6.1 Výstupní protokol

Pro údaje z modulu RF-STABILITY můžeme stejně jako pro data z hlavního programu RFEM vytvořit výstupní protokol, do něhož lze vkládat obrázky nebo vlastní vysvětlivky. Ve výstupním protokolu můžeme také stanovit, které údaje ze stabilitní analýzy se nakonec vytisknou.



Výstupní protokol popisujeme v manuálu k programu RFEM. Důležitá je především kapitola 10.1.3.4 *Výběr dat přídatných modulů*, která pojednává o výběru vstupních a výstupních dat přídatných modulů pro tisk.

### 6.2 Tisk zobrazení

Každý obrázek lze z pracovního okna RFEMu převést do výstupního protokolu nebo poslat přímo na tiskárnu. Do protokolu tak lze převzít také vlastní vektory znázorněné na modelu konstrukce v RFEMu.



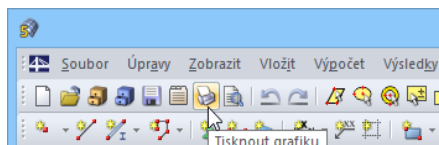
Tisk grafických zobrazení popisujeme v kapitole 10.2 manuálu k hlavnímu programu RFEM.

Aktuální grafické znázornění tvaru vybočení nebo boulení lze vytisknout příkazem z hlavní nabídky



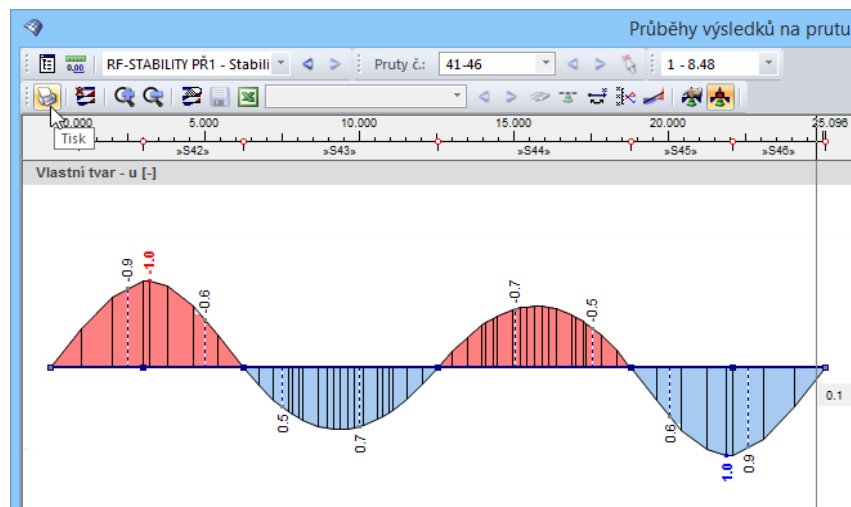
**Soubor** → **Tisk grafiky...**

nebo kliknutím na příslušné tlačítko v panelu nástrojů.



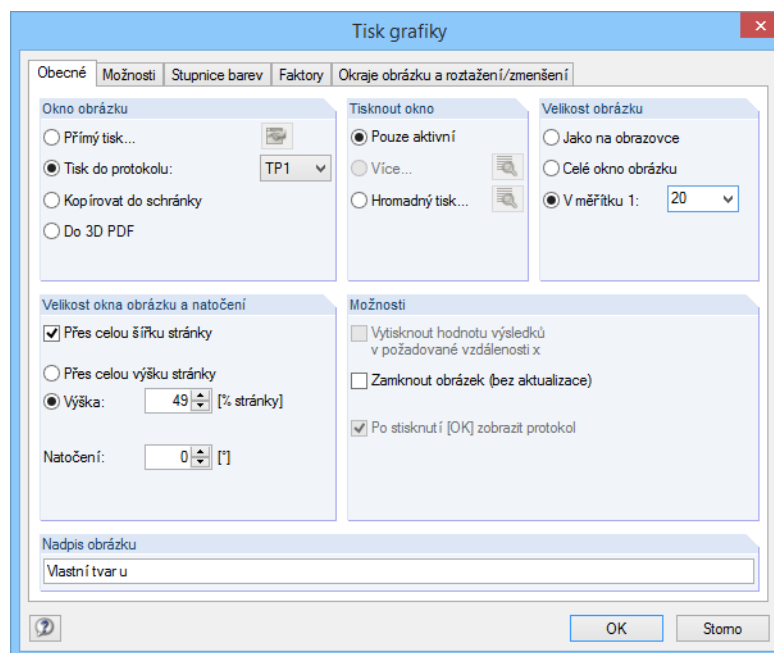
Obr. 6.1: Tlačítko *Tisknout grafiku* v panelu nástrojů RFEMu

Stejně tak lze převzít do protokolu nebo přímo vytisknout i průběhy výsledků na řezech nebo prutech kliknutím na tlačítko [Tisk] v daném okně.



Obr. 6.2: Tlačítko *Tisk* v panelu nástrojů v okně s průběhy výsledků

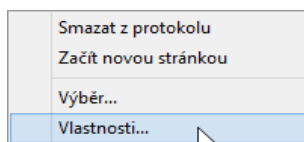
Otevře se dialog *Tisk grafiky* (viz následující obrázek).



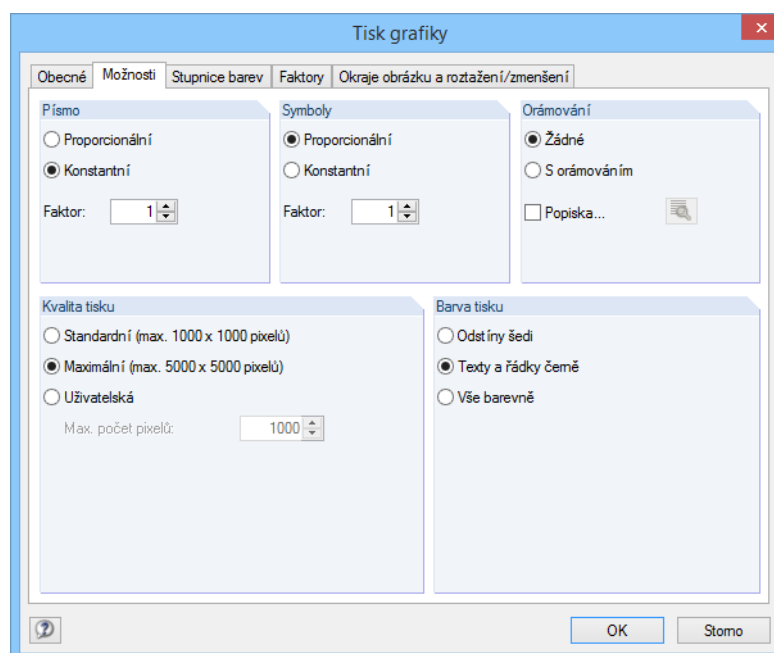
Obr. 6.3: Dialog *Tisk grafiky*, záložka *Obecné*

Tento dialog popisujeme v kapitole 10.2 manuálu k hlavnímu programu RFEM. Zabýváme se v ní i dalšími záložkami *Možnosti* a *Stupnice barev*.

Grafické zobrazení lze ve výstupním protokolu přesunout na jiné místo pomocí funkce Drag&Drop.



Vložené obrázky lze také dodatečně upravovat: pravým tlačítkem myši klikneme na příslušnou položku v navigátoru protokolu a v její místní nabídce vybereme *Vlastnosti...* Znovu se zobrazí dialog *Tisk grafiky*, v němž lze nastavit případné změny.



Obr. 6.4: Dialog *Tisk grafiky*, záložka *Možnosti*



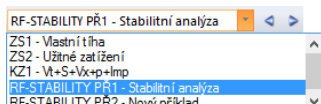
## 7. Obecné funkce

V této kapitole popisujeme běžně používané funkce z hlavní nabídky a také možnosti exportu výsledků stabilitní analýzy.

### 7.1 Případy v RF-STABILITY

Uživatel má možnost analyzovat stabilitu konstrukce z odlišných aspektů v několika různých stabilitních případech. Lze tak například posoudit vliv normálové síly z různých zatěžovacích stavů nebo kombinací zatížení s uvažováním tahových sil nebo bez nich.

Seznam zatěžovacích stavů v panelu nástrojů RFEMu obsahuje také analytické případy z modulu RF-STABILITY.

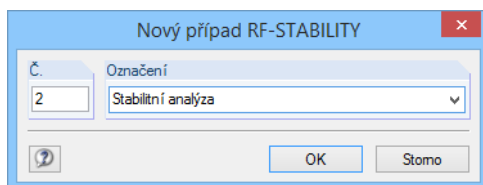


#### Vytvoření nového případu

Nový stabilitní případ lze vytvořit příkazem z hlavní nabídky v modulu RF-STABILITY

**Soubor** → **Nový případ...**

Otevře se následující dialog:



Obr. 7.1: Dialog *Nový případ RF-STABILITY*

V tomto dialogu je třeba vyplnit (dosud nezadané) *číslo* nového stabilitního případu. *Označení* slouží ke snazšímu výběru případů ze seznamu zatěžovacích stavů.

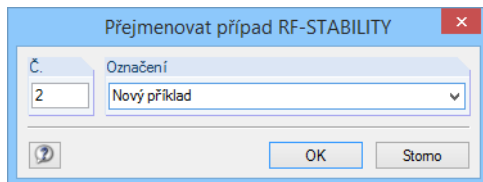
Po ukončení daného dialogu kliknutím na tlačítko [OK] se zobrazí dialog modulu RF-STABILITY 1.1 *Základní údaje*, v němž zadáme výpočetní parametry.

#### Přejmenování případu

Označení stabilitního případu lze změnit příkazem z hlavní nabídky modulu RF-STABILITY

**Soubor** → **Přejmenovat případ...**

Otevře se následující dialog:



Obr. 7.2: Dialog *Přejmenovat případ RF-STABILITY*

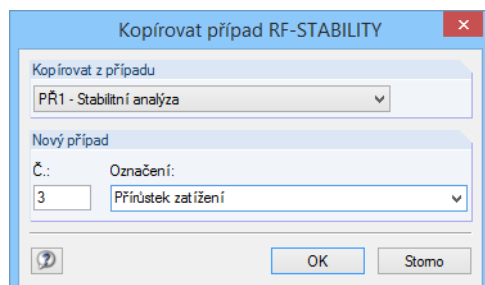
V tomto dialogu můžeme zadat u vybraného případu nejen jiné *označení*, ale také jiné *číslo*.

## Kopírování případu

Vstupní údaje aktuálního případu lze zkopírovat příkazem z hlavní nabídky v modulu RF-STABILITY

**Soubor** → **Kopírovat případ...**

Otevře se následující dialog:



Obr. 7.3: Dialog *Kopírovat případ RF-STABILITY*

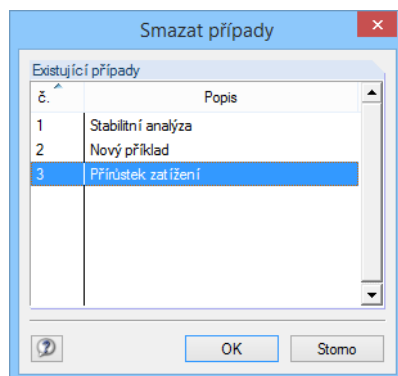
V něm uvedeme *číslo* a případně *označení* nového případu, do něhož se vybraný případ zkopíruje.

## Smazání případu

Uživatel má možnost stabilitní případy smazat příkazem z hlavní nabídky v modulu RF-STABILITY

**Soubor** → **Smazat případ...**

Otevře se následující dialog:



Obr. 7.4: Dialog *Smazat případy*

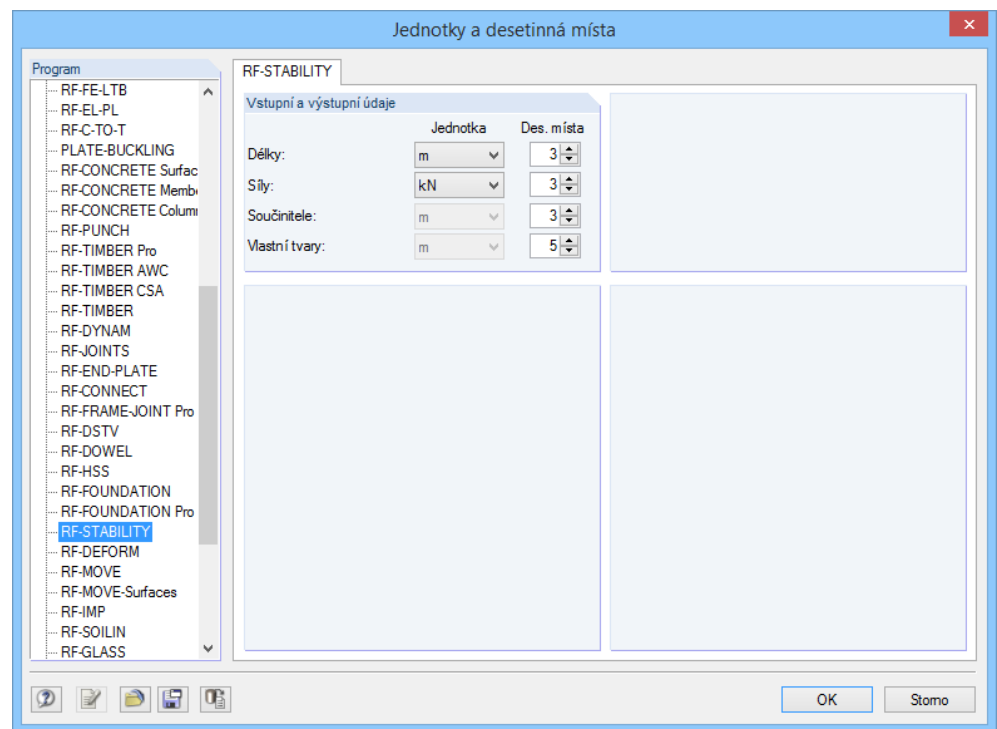
Stabilitní případ můžeme vybrat ze seznamu *Existující případy*. Po kliknutí na tlačítko [OK] se případ smaže.

## 7.2 Jednotky a desetinná místa

Jednotky a desetinná místa se pro RFEM i všechny jeho přídatné moduly nastavují společně. V modulu RF-STABILITY otevřeme dialog pro úpravu jednotek příkazem z hlavní nabídky

**Nastavení → Jednotky a desetinná místa...**

Otevře se dialog dobře známý z RFEMu. V seznamu *Program* je již předem nastaven modul RF-STABILITY.



Obr. 7.5: Dialog *Jednotky a desetinná místa*



Nastavení lze uložit jako uživatelský profil a použít i v jiných modelech. Popis příslušných funkcí najdeme v kapitole 11.1.3 v manuálu k programu RFEM.

## 7.3 Export výsledků

Výsledky analýzy z modulu RF-STABILITY lze použít i v jiných programech.

### Schránka

Označené řádky v tabulkách výsledků modulu RF-STABILITY lze pomocí tlačítek [Ctrl]+[C] zkopírovat do schránky a následně dvojicí tlačítek [Ctrl]+[V] převést například do některého textového procesoru. Nadpisy sloupců v tabulce exportovány nebudou.

### Výstupní protokol

Údaje z modulu RF-STABILITY lze odeslat do výstupního protokolu (viz kapitola 6.1, strana 31) a odtud pak exportovat příkazem z hlavní nabídky

**Soubor** → **Export do RTF...**

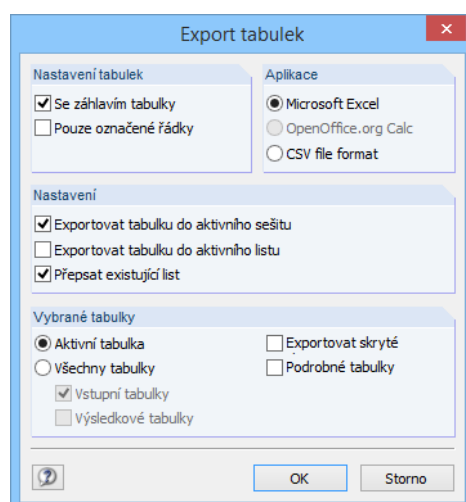
Tuto funkci popisujeme v kapitole 10.1.11 manuálu k programu RFEM.

### Excel / OpenOffice

RF-STABILITY umožňuje přímý export dat do MS Excelu i do aplikace Calc z balíku OpenOffice.org či do formátu CSV. Tuto funkci vyvoláme z hlavní nabídky

**Soubor** → **Exportovat tabulky...**

Otevře se následující dialog pro export dat:



Obr. 7.6: Dialog *Export - MS Excel*

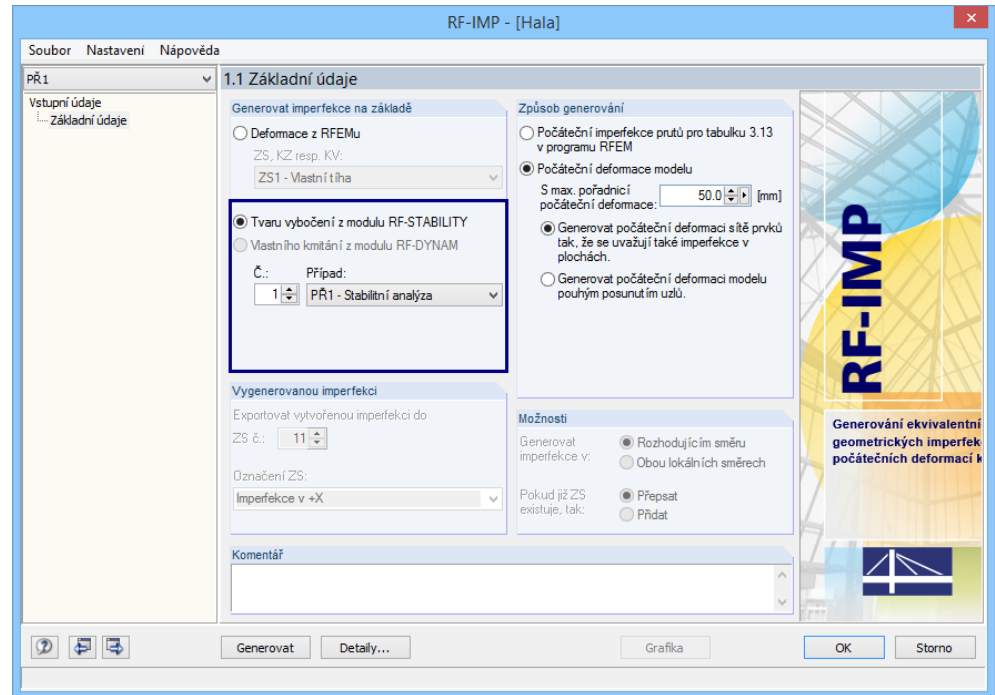
Jakmile zadáme požadované parametry, můžeme export zahájit kliknutím na tlačítko [OK]. Excel, resp. Calc nemusí běžet na pozadí, před exportem se automaticky spustí.

VI. číslo ž.	Součinitel kritického zatížení $f[-]$	Faktor zvětšení $\alpha[-]$	Upozornění
1	3,198	1,455	
2	3,460	1,407	
3	5,914	1,203	
4	6,143	1,194	

Obr. 7.7: Výsledky v Excelu

## RF-IMP

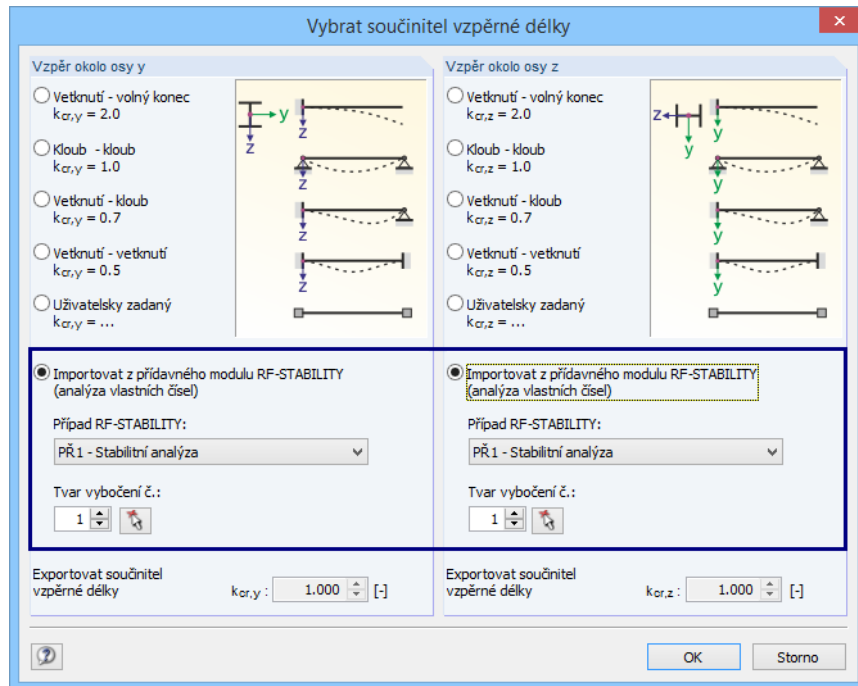
Pokud se má určitý stabilní tvar použit v přídatném modulu RF-IMP k vytvoření náhradních imperfekcí nebo náhradní konstrukce s počátečním přetvořením, není třeba ho exportovat. Číslo požadovaného vlastního tvaru i konkrétní případ z RF-STABILITY lze přímo vybrat v příslušném seznamu v modulu RF-IMP.



Obr. 7.8: Výběr vlastního tvaru v modulu RF-IMP

## RF-STEEL EC3 / RF-ALUMINIUM / RF-KAPPA / RF-TIMBER Pro

V přídatných modulech RF-STEEL AISC/AS/BS/CS/EC3/GB/IS/NTC-DF/SANS/SIA/SP, RF-ALUMINIUM, RF-KAPPA a RF-TIMBER Pro má uživatel možnost součinitele vzpěrné délky z modulu RF-STABILITY přímo použít pro posuzované pruty.

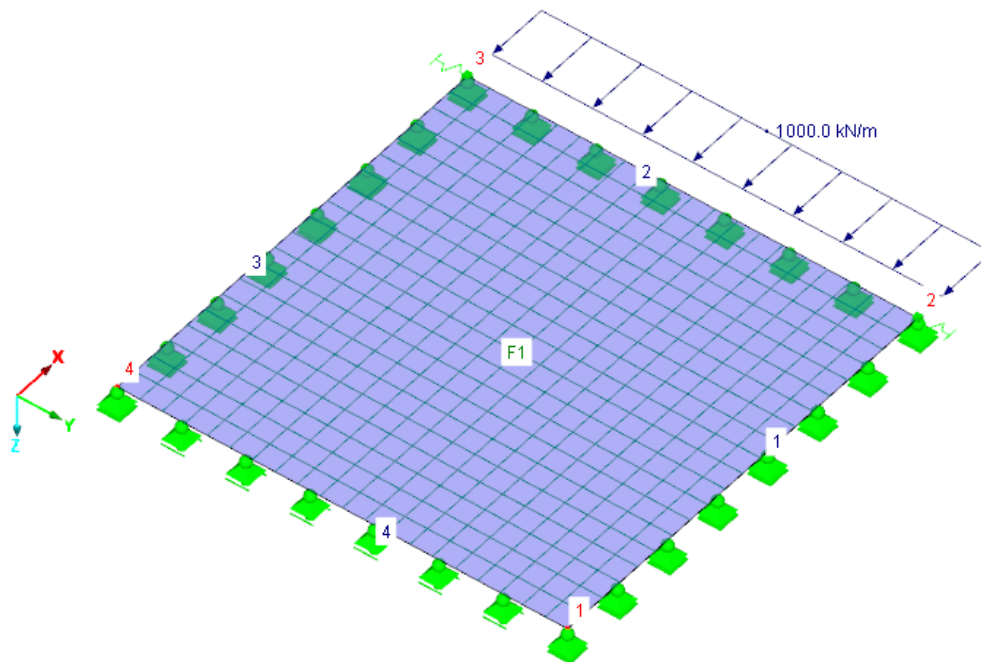


Obr. 7.9: Výběr součinitelů vzpěrné délky v modulu RF-STEEL EC3

## 8. Příklady

### 8.1 Čtvercová deska

V tomto příkladu se bude počítat kritické zatížení boulením na čtvercovou desku o délce strany 1 m.



Obr. 8.1: Model se sítí konečných prvků a zatížení

#### Analytické řešení

Tato plocha je na všech okrajích podepřena kloubově. Analyticky lze kritickou sílu  $N_{cr}$  určit pomocí následujícího vzorce:

$$N_{cr} = k \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot a^2}$$

Rovnice 8.1

Deska je čtvercová a délka jejích stran se rovná 100 cm, z toho vyplývá:

$$k = 4$$

$$a = 100 \text{ cm}$$

Deska je vyrobena z oceli S 235:

$$E = 21\,000 \text{ kN/cm}^2$$

$$\nu = 0,30$$

Plocha má tloušťku 2 cm:

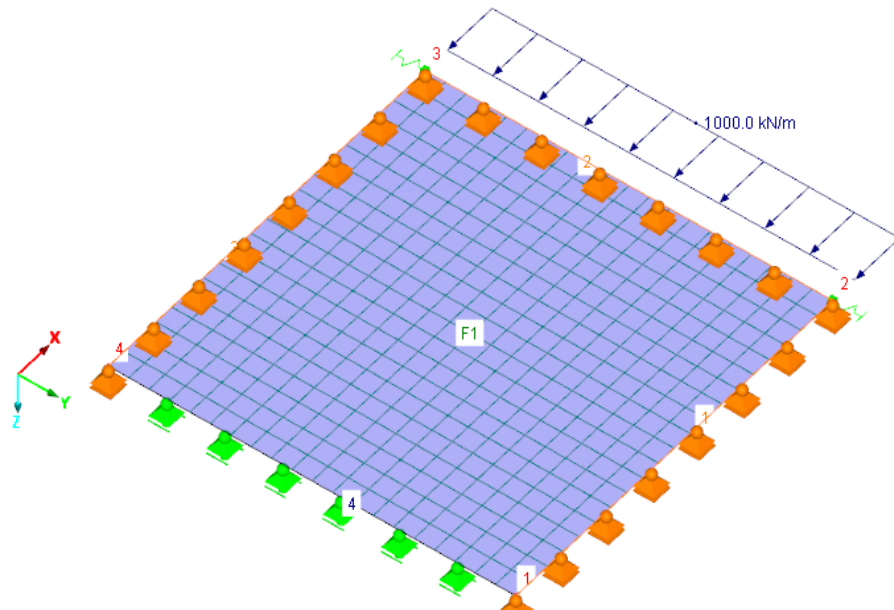
$$h = 2 \text{ cm}$$

Kritické zatížení boulením se tak vypočítá následovně:

$$N_{cr} = 4 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 2^3}{12 \cdot (1 - 0,30^2) \cdot 100^2} = 60,736 \text{ kN/cm} = 6073,6 \text{ kN/m}$$

### Řešení pomocí RFEMu

Pro desku jsou v RFEMu definovány následující podmínky uložení:



1.8 Liniové podpory

Podpora č.	A Na liniích č.	B Vztaž. systém	C Natočení β [°]	D Stěna v Z	E Podepření resp. pružina [kN/m <sup>2</sup> ] ux	F uy	G uz	H Vetknutí resp. pružina [kNm/rad/m] φx	I φy	J φz	K Komentář
1	1-3	Globální		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
2	4	Globální		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
3											
4											

Uzlové podpory | Liniové podpory | Plošné podpory | Liniové klouby | Průřezy | Klouby na koncích prutu | Excentricity prutu | Dělení prutu

Seznam podepřených linií (např. \*1,3,5-7)

Obr. 8.2: Liniové podpory

K tomu byly v uzlech 2 a 3 zadány bodové podpory s nízkou tuhostí pružiny pro podepření konstrukce ve směru Y.

1.7 Uzlové podpory

Podpora č.	A Na uzlech č.	B Osový systém	C Sloup v Z	D Podepření resp. pružina [kN/m] ux	E uy	F uz	G Vetknutí resp. pružina [kNm/rad] φx	H φy	I φz
1	2,3	Globální X,Y,Z	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.010	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2			<input type="checkbox"/>						
3									
4									

Tělesa | Otvory | Uzlové podpory | Liniové podpory | Plošné podpory | Liniové klouby | Průřezy | Klouby na koncích prutu

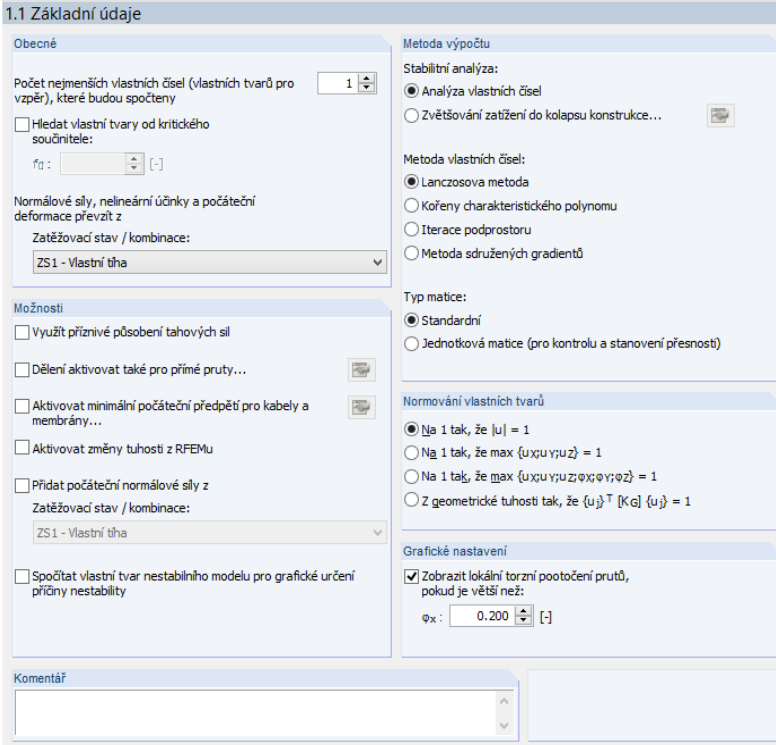
Obr. 8.3: Uzlové podpory

Vzdálenost mezi body sítě konečných prvků je 5 cm.

Čtvercová deska je zatížena silou 1000 kN/m, jak vidíme na obr. 8.1.



Vstupní dialog modulu RF-STABILITY vyplníme následovně:



Obr. 8.4: Dialog 1.1 *Základní údaje*

Výsledkem výpočtu v modulu RF-STABILITY je součinitel kritického zatížení **6,0453**.

2.1 Součinitele kritického zatížení		
Vl. číslo č.	A	B
	Součinitel kritického zatížení f [-]	Faktor zvětšení α [-]
1	6.0453	1.1988

Obr. 8.5: Součinitel kritického zatížení

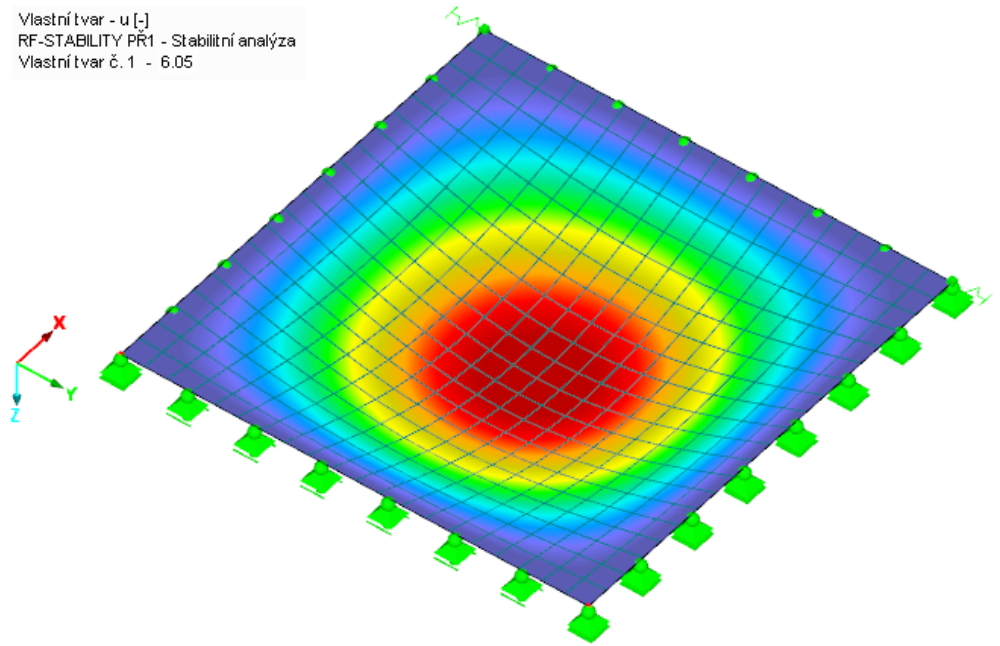
Ze součinitele kritického zatížení a působícího zatížení se stanoví kritická síla:

$$N_{cr} = 6,0453 \cdot 1000 \text{ kN/m} = 6045,3 \text{ kN/m}$$

Odchylka od analytického řešení tak činí přibližně 0,5 %.

Modul RF-STABILITY spočítá následující tvar boulení:

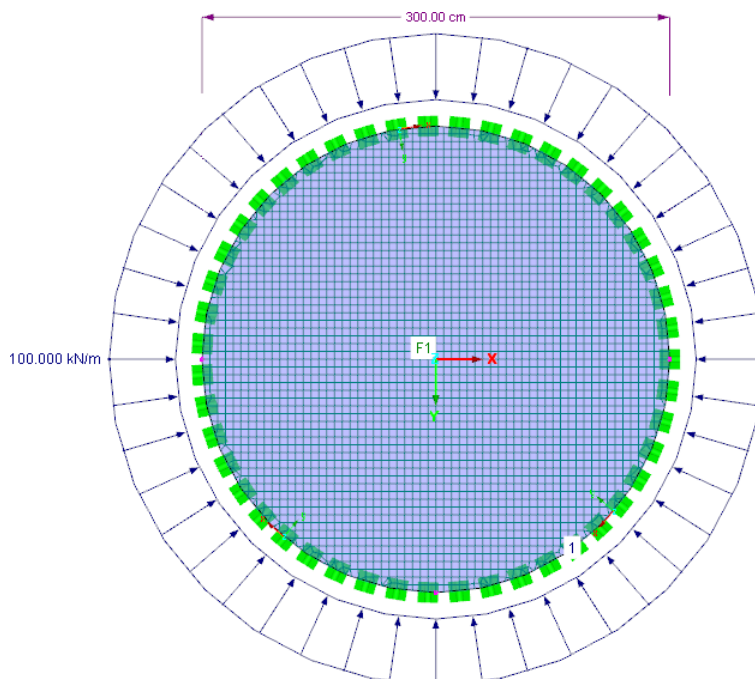
Vlastní tvar - u [-]  
RF-STABILITY PR1 - Stabilitní analýza  
Vlastní tvar č. 1 - 6.05



Obr. 8.6: Tvar boulení v modulu RF-STABILITY

## 8.2 Kruhová deska

V tomto příkladu budeme počítat kritické zatížení boulením na kruhovou desku o průměru 3 m.



Obr. 8.7: Model se sítí konečných prvků a zatížení

### Analytické řešení

Plocha je po celém okraji podepřena kloubově. Analyticky lze kritickou sílu  $N_{cr}$  určit pomocí následujícího vzorce (viz [4], str. 559):

$$N_{cr} = 14,68 \cdot \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot a^2}$$

Rovnice 8.2

Deska má poloměr 150 cm, z toho vyplývá:

$$a = 150 \text{ cm}$$

Deska je vyrobena z oceli S 235:

$$E = 21\,000 \text{ kN/cm}^2$$

$$\nu = 0,30$$

Plocha má tloušťku 2 cm:

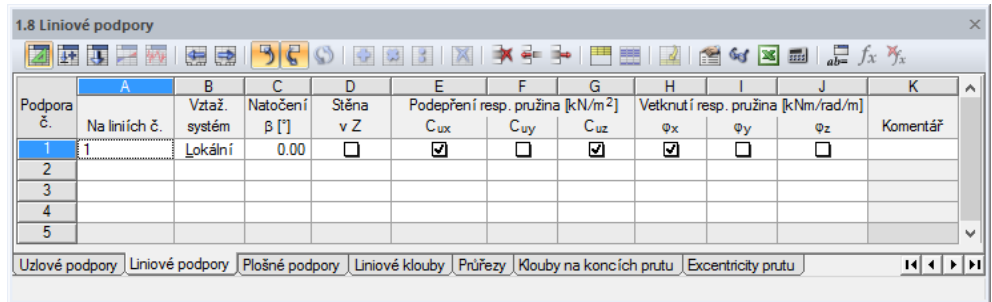
$$h = 2 \text{ cm}$$

Pro kritické zatížení boulením tak platí:

$$N_{cr} = 14,68 \cdot \frac{21\,000 \cdot 2^3}{12 \cdot (1 - 0,30^2) \cdot 150^2} = 10,038 \text{ kN/cm} = 1003,8 \text{ kN/m}$$

### Řešení pomocí RFEMu

Pro desku je v RFEMu lokálně definováno liniové podepření.



Podpora č.	A Na liniích č.	B Vztaž. systém	C Natočení $\beta$ [°]	D Stěna v Z	E Podepření resp. pružina $C_{ux}$	F $C_{uy}$	G $C_{uz}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	H Vetknutí resp. pružina $\phi_x$	I $\phi_y$	J $\phi_z$ [kNm/rad/m]	K Komentář
1	1	Lokální	0.00	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
2											
3											
4											
5											

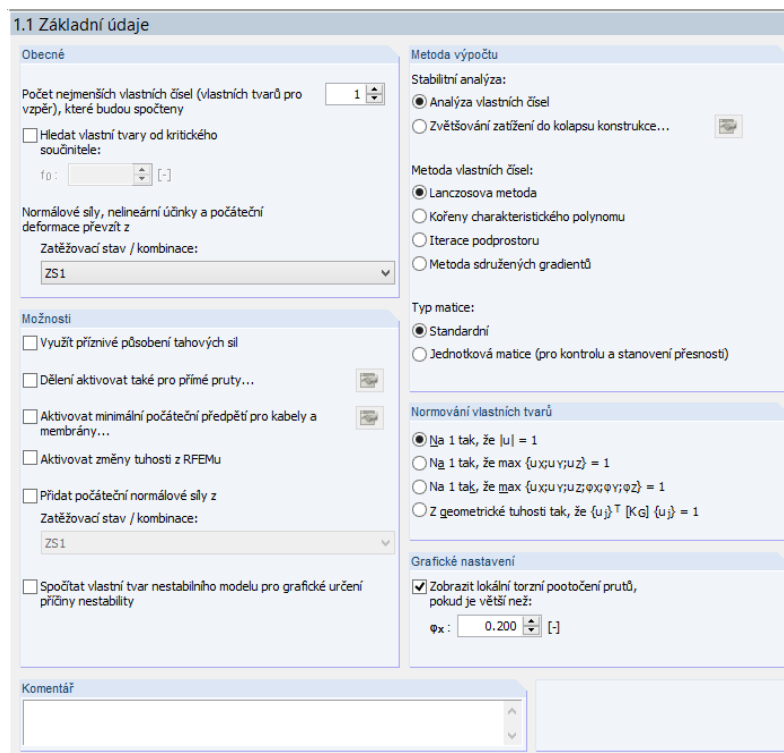
Obr. 8.8: Liniové podepření

Tím se zamezí pootočení desky na okraji. Kromě toho bude deska podepřena ve svislém směru. Podepření ve směru x linie brání pootočení desky okolo globální osy Z.

U sítě konečných prvků byla zadána vzdálenost 5 cm mezi jednotlivými body.

Na desku působí liniové zatížení o velikosti 100 kN/m, jak vidíme na obr. 8.7.

Vstupní dialog modulu RF-STABILITY vyplníme následovně:



**1.1 Základní údaje**

**Obecné**

Počet nejmenších vlastních čísel (vlastních tvarů pro vzpěr), které budou spočteny: 1

Hledat vlastní tvary od kritického součinitele:

$f_0$ : [ ] [-]

Normálové síly, nelineární účinky a počáteční deformace převzít z

Zatěžovací stav / kombinace: ZS1

**Možnosti**

Využít příznivé působení tahových sil

Dělení aktivovat také pro přímé pruhy...

Aktivovat minimální počáteční předpětí pro kabely a membrány...

Aktivovat změny tuhosti z RFEMu

Přidat počáteční normálové síly z

Zatěžovací stav / kombinace: ZS1

Spočítat vlastní tvar nestabilního modelu pro grafické určení příčiny nestability

**Metoda výpočtu**

Stabilitní analýza:

Analýza vlastních čísel

Zvětšování zatížení do kolapsu konstrukce...

**Metoda vlastních čísel:**

Lanczosova metoda

Kořeny charakteristického polynomu

Iterace podprostoru

Metoda sdružených gradientů

**Typ matice:**

Standardní

Jednotková matice (pro kontrolu a stanovení přesnosti)

**Normování vlastních tvarů**

Na 1 tak, že  $|u| = 1$

Na 1 tak, že  $\max\{u_x; u_y; u_z\} = 1$

Na 1 tak, že  $\max\{u_x; u_y; u_z; \phi_x; \phi_y; \phi_z\} = 1$

Z geometrické tuhosti tak, že  $(u_j)^T [K_G] (u_j) = 1$

**Grafické nastavení**

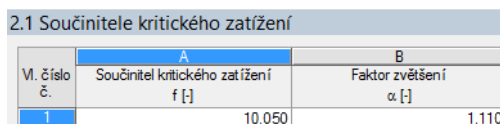
Zobrazit lokální torzní pootočení prutů, pokud je větší než:

$\phi_x$ : 0.200 [ ] [-]

**Komentář**

Obr. 8.9: Dialog 1.1 Základní údaje

Výsledkem výpočtu v modulu RF-STABILITY je součinitel kritického zatížení **10,050**.



Vl. číslo č.	A Součinitel kritického zatížení $f$ [ ]	B Faktor zvětšení $\alpha$ [ ]
1	10.050	1.110

Obr. 8.10: Součinitel kritického zatížení

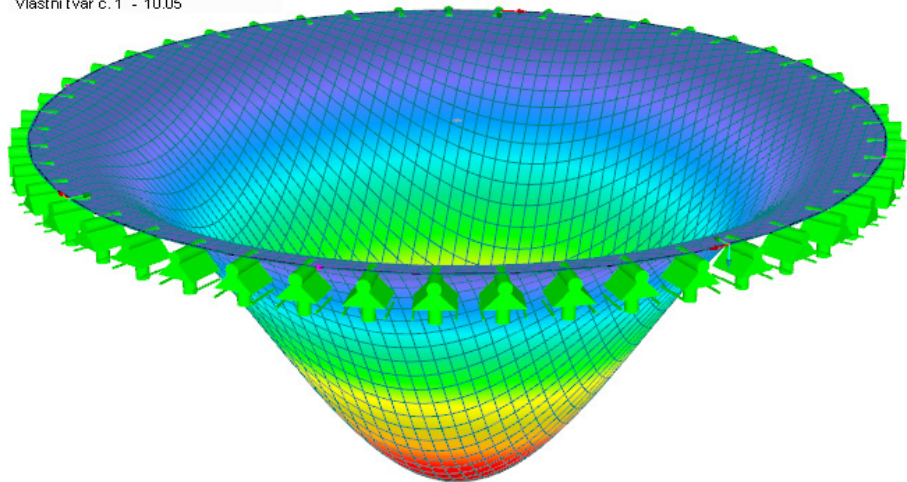
Ze součinitele kritického zatížení a působícího zatížení se stanoví kritická síla:

$$N_{cr} = 10,050 \cdot 100 \text{ kN/m} = 1005,0 \text{ kN/m}$$

Odchylka od analytického řešení tak činí přibližně 0,1 %.

Modul RF-STABILITY spočítá následující tvar boulení:

Vlastní tvar - u [-]  
 RF-STABILITY PR1 - Stabilitní analýza  
 Vlastní tvar č. 1 - 10.05

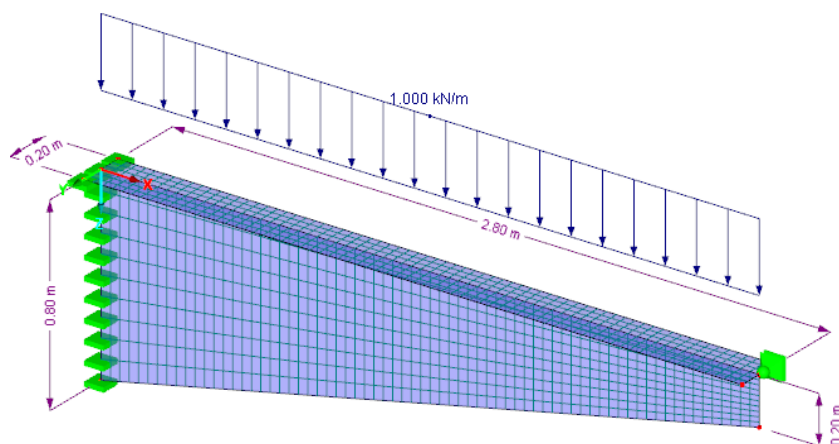


Obr. 8.11: Tvar boulení v modulu RF-STABILITY

### 8.3 Konzola s náběhem

Tento příklad jsme převzali z literatury [5]. V daném článku se zkoumají tvary selhání a dovolená zatížení konzolových T nosníků s náběhy. Uplatňuje se přitom experimentální postup a výpočet metodou konečných prvků.

V tomto případě se jedná o nosník 1 z tabulky 4.



Obr. 8.12: Model se sítí konečných prvků a zatížení

Nosník má následující rozměry:

Délka l	2800	mm
---------	------	----

Výška stojiny $h_{w0}$	800	mm
Výška stojiny $h_{w1}$	200	mm
Šířka pásnice $b$	200	mm
Tloušťka stojiny $t_w$	10	mm
Tloušťka pásnice $t_f$	20	mm

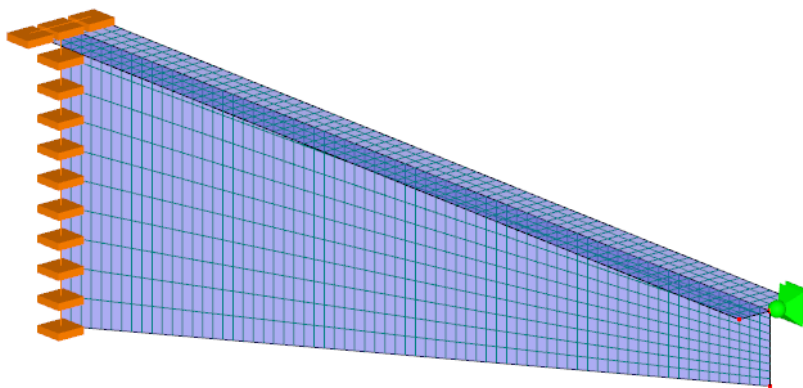
Tabulka 8.1: Geometrie nosníku

Na pásnici nosníku s náběhem působí liniové zatížení 1,0 kN/m.

V literatuře [5] se uvádí pružná kritická síla  $q_{cr} = 43,6 \text{ kN/m}$  jako výsledek výpočtu.

### Řešení pomocí RFEMu

Pro nosník jsou v místě vetknutí definovány následující podmínky uložení:



Podpora č.	Na liniích č.	Vztaž. systém	Natočení $\beta$ [°]	Stěna v Z	Podpěření resp. pružina [kN/m <sup>2</sup> ]			Vetknutí resp. pružina [kNm/rad/m]		
					$u_x$	$u_y$	$u_z$	$\varphi_x$	$\varphi_y$	$\varphi_z$
1	3,7,9	Globální		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2										
3										
4										

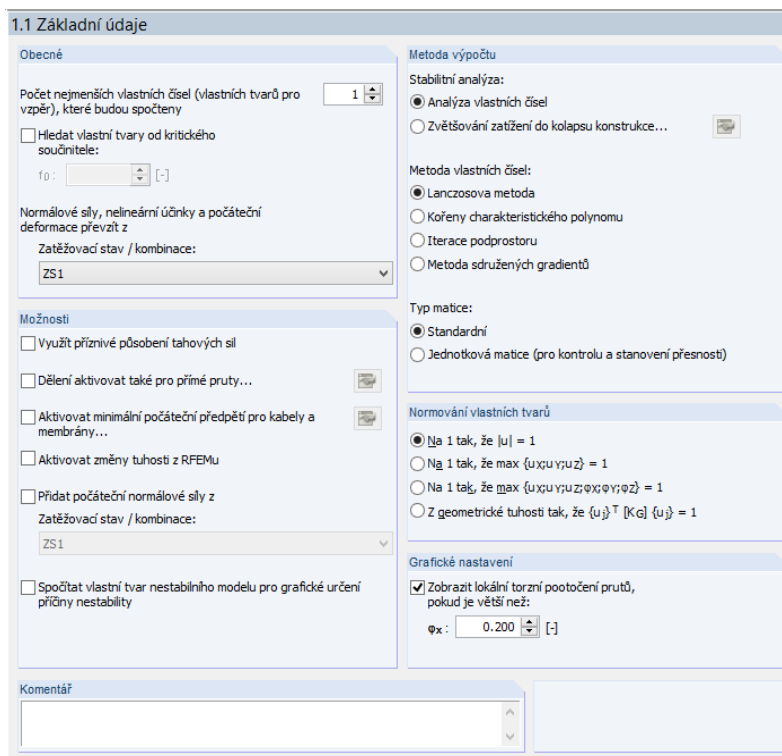
Obr. 8.13: Vetknutí nosníku

Kromě toho je bočně podepřena špička nosníku.

Požadovaná vzdálenost mezi body sítě konečných prvků je 4 cm.

Na nosník působí liniové zatížení 1 kN/m, jak vidíme na obr. 8.12.

Vstupní dialog modulu RF-STABILITY vyplníme následovně:



Obr. 8.14: Dialog 1.1 *Základní údaje*

Výsledkem výpočtu v modulu RF-STABILITY je součinitel kritického zatížení 41,710.

2.1 Součinitele kritického zatížení		
Vl. číslo č.	A	B
	Součinitel kritického zatížení f [-]	Faktor zvětšení α [-]
1	41.710	1.025

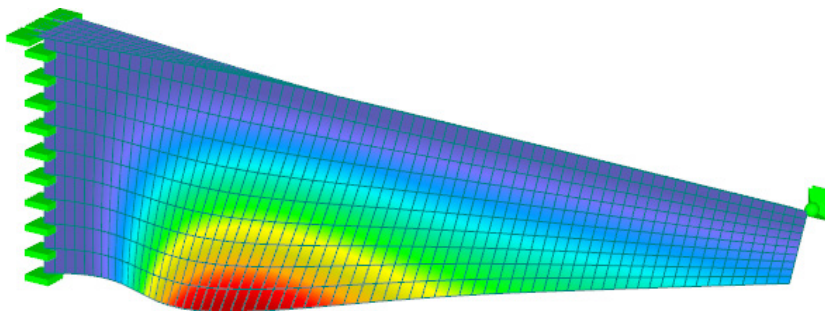
Obr. 8.15: Součinitel kritického zatížení

Ze součinitele kritického zatížení a působícího zatížení se stanoví kritická síla:

$$q_{cr} = 41,710 \cdot 1,0 = 41,7 \text{ kN/m}$$

Odchylka od výsledku uvedeného v literatuře [5] tak činí přibližně 4 %.

Modul RF-STABILITY spočítá následující boulení stojiny jako rozhodující tvar selhání:



Obr. 8.16: Tvar boulení v modulu RF-STABILITY

Tento výsledek se shoduje s výsledkem v článku [5].

## A Literatura

- [1] PETERSEN, Chr.: Statik und Stabilität der Baukonstruktionen, Friedrich Vieweg und Sohn, Braunschweig/Wiesbaden, 2. Auflage 1982
- [2] PETERSEN, Chr.: Stahlbau, Friedrich Vieweg und Sohn, Braunschweig/Wiesbaden, 1988
- [3] BARTH, C.; RUSTLER, W.: Finite Elemente in der Baustatik-Praxis, Beuth, Berlin/Wien/Zürich, 2. Auflage 2013
- [4] BAREŠ, R.: Tabulky pro výpočet desek a stěn, SNTL - Nakladatelství technické literatury, Praha 1989
- [5] FISCHER, M; SMIDA, M: Dimensionierung und Nachweis von gevouteten Kragträgern mit T-förmigem Querschnitt, in Stahlbau 70. Jahrgang (2001) Heft 12, S. 927-938, Ernst & Sohn, Berlin
- [6] WERKLE, H.: Finite Elemente in der Baustatik, Vieweg & Sohn, Wiesbaden, 3. Auflage 2008



# B Index

<b>A</b>	
Aktuální tvar vybočení .....	29
Analýza vlastních čísel.....	12
<b>B</b>	
Barevné zobrazení .....	32
Barvy v tabulce.....	29
<b>C</b>	
Charakteristický polynom .....	13
<b>D</b>	
Dělení prutu .....	10
Délka prutu.....	21
Desetinná místa .....	37
Dovolené zatížení .....	49
<b>E</b>	
Eulerovy případy .....	22
Excel.....	38
<b>F</b>	
Faktor zvětšení.....	20
Filtrování .....	32
Filtrování ploch .....	32
<b>G</b>	
Grafické okno na pozadí .....	28
Grafika .....	29
<b>I</b>	
Instalace .....	6
Iterace podprostoru .....	14
<b>J</b>	
Jednotková matice .....	15
Jednotky.....	37
<b>K</b>	
Kabely.....	11
Komentář .....	15
Kontrola.....	16
Kritická síla $N_{cr}$ .....	22, 41, 46
<b>L</b>	
Lanczosova metoda .....	13
Listování v dialogích.....	8
<b>M</b>	
Membrány .....	11
Metoda sdružených gradientů .....	14
Metoda vlastních čísel.....	13
Metoda výpočtu .....	12
Možnosti .....	10
<b>N</b>	
Náběh.....	10
Navigátor .....	8
Navigátor <i>Výsledky</i> .....	29
Navigátor <i>Zobrazit</i> .....	30, 32
Nekonečná norma matice tuhosti.....	20
Nelinearita .....	12
Nestabilita .....	27
Nestabilní model.....	11
Normalizované posuny .....	23, 26
Normálové síly .....	9
Normování .....	15
<b>O</b>	
OpenOffice .....	38
<b>P</b>	
Panel.....	7, 30, 32
Počáteční deformace.....	9
Počáteční normálové síly .....	11
Počáteční předpětí .....	11
Počet vlastních čísel.....	9
Porušení konstrukce boulením .....	20, 27
Porušení konstrukce vybočením .....	20, 27
Pracovní okno RFEMu.....	28, 33
Případ v RF-STABILITY .....	35
Prut .....	21
<b>R</b>	
Rastrový bod.....	26
Renderování.....	32
Řez.....	29, 33
RF-IMP.....	39
RF-STEEL EC3 .....	39
RF-TIMBER Pro.....	39
Řídicí panel.....	32
<b>S</b>	
Schránka.....	38
Sled prutů .....	27
Součinitel kritického zatížení .....	9, 19, 20, 27, 44, 49
Součinitel vzpěrné délky $k_{cr}$ .....	22, 27
Spuštění modulu RF-STABILITY.....	6

Spuštění výpočtu .....	16	Upozornění .....	20
Stabilitní analýza .....	12	Uživatelský profil .....	37
Stabilitní případ .....	36	<b>V</b>	
Stabilitní tvar.....	29	Viditelnost .....	32
Stupnice barev .....	32	Vlastní tvar.....	21, 23, 26, 29, 30
Sturmova kontrola.....	18	Vyhodnocení výsledků .....	27
<b>T</b>		Výpočet .....	16
Tahové síly.....	10, 20	Výsledky na prutu .....	30
Teorie II. řádu .....	20	Výsledné číselné hodnoty .....	29
Tisk .....	33	Výstupní protokol .....	33, 34
Tisk zobrazení .....	33	Výstupní tabulky .....	19
Tlačítka.....	29	Vyvolání programu.....	6
Torzní pootočení .....	15	Vzpěrná délka $L_{cr}$ .....	21, 22
Tvar vybočení .....	21, 33	<b>Z</b>	
Typ matice .....	15	Základní údaje .....	8
<b>U</b>		Změna tuhosti.....	11
Ukončení modulu RF-STABILITY .....	8	Zvyšování zatížení až do selhání konstrukce.....	12