

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA STAVEBNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**2020**

**MARTIN VLK**

# České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební



Katedra betonových a zděných konstrukcí

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Návrh štíhlého pilíře dálničního mostu**

Design of a slender pier of a highway bridge

Vypracoval: Martin Vlk

Vedoucí práce: Ing. Michal Drahorád, Ph.D.

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

Praha 2019/2020



## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Vlk Jméno: Martin Osobní číslo: 458813

Zadávatel katedra: Katedra betonových a zděných konstrukcí

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

### II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Návrh štíhlého pilíře dálničního mostu

Název bakalářské práce anglicky: Design of a slender pier of a highway bridge

Pokyny pro vypracování:

- 1) Rešerše problematiky štíhlých pilířů, historický vývoj, specifika a metody výpočtu
- 2) Přístup stávajících technických norem k problematice štíhlých tlačených prutů
- 3) Návrh a posouzení konkrétního pilíře dálničního mostu

Seznam doporučené literatury:

Janda, L. (1983) Štíhlé betonové tlačené pruty, SNTL - Nakladatelství technické literatury, s. 232

Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Michal Drahorád, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 27. 2. 2020

Termín odevzdání bakalářské práce: 17. 5. 2020

Údaj uveďte v souladu s datem vypracování příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.*

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že tuto bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně a veškeré podklady a citace jsou uvedeny na konci práce.

V Praze dne 24. 5. 2020

.....

Martin Vlk

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat trpělivému vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Michalu Drahorádovi, Ph.D., za poskytnutí odborných konzultací a cenných rad i za ztížených podmínek. Současně věnuji poděkování firmě SMP CZ, a. s. za poskytnutí podkladů a všem svým blízkým, kteří mi byli oporou při psaní této bakalářské práce.

Martin Vlk

## **Abstrakt**

Hlavním cílem této bakalářské práce je studium metod návrhu štíhlých železobetonových pilířů. Nejprve je však objasněno historické pozadí této problematiky. Dále jsou popsány a porovnány zjednodušené metody vyšetřující účinky II. řádu uvedené v normách platných v ČR i většině Evropy. Následuje jejich aplikace na návrh štíhlého pilíře dálničního mostu. V rámci této práce byl vytvořen automatizovaný interakční diagram v MS Excel založený na metodě mezních poměrných přetvoření. Ten je schopen dle zadaných dat vykreslit interakční diagram pro různé průřezy, materiály i vyztužení. Praktické posouzení navrženého pilíře probíhá právě v tomto programu. Součástmi návrhu štíhlého betonového pilíře jsou statické výpočty a výkresy pilíře.

## **Klíčová slova**

Štíhlý pilíř, betonový pilíř, vzpěr, Euler, dálniční most, účinky II. řádu, metoda založená na jmenovité tuhosti, metoda založená na jmenovité křivosti, metoda mezních poměrných přetvoření, interakční diagram, Eurokód

## **Abstract**

The main goal of this bachelor's thesis is a study of slender reinforced concrete piers design methods. Firstly a historical background of the problem is clarified. Furthermore simplified methods exploring effects of the second order stated in codes valid in Czech Republic as well as most of Europe are described and compared. Its application on the design of the slender highway pier follows. An automatic interaction diagram based on the ultimate relative strains method was created in MS Excel as a part of this thesis. It is able to draw an interaction diagram of variable cross sections, materials and reinforcement according to entered data. The practical assessing of the designed pier is running in this programme. Static calculations and drawings are parts of the slender concrete pier design.

## **Key words**

Slender pier, concrete pier, buckling, Euler, highway bridge, the second order effects, nominal stiffness method, nominal curvature method, ultimate relative strains method, interaction diagram, Eurocode



## Obsah

|   |    |
|---|----|
| <b>Rešerše</b> .....                                      | 3  |
| Úvod .....  | 3  |
| Historie .....  | 6  |
| Metody vyšetřování účinků 2. řádu .....                   | 10 |
| Metoda založená na jmenovitých ohybových tuhostech.....   | 10 |
| Metoda založená na jmenovité křivosti .....               | 12 |
| Obecná metoda výpočtu účinků druhého řádu.....            | 16 |
| <b>Přístup norem k problematice štíhlých pilířů</b> ..... | 16 |
| Obecný přehled Eurokódů .....                             | 16 |
| Přístup Eurokódů k štíhlým pilířům .....                  | 19 |
| Metody podle normy.....                                   | 21 |
| Obecná metoda.....  | 22 |
| Metoda založená na jmenovité tuhosti.....                 | 22 |
| Metoda založená na jmenovité křivosti .....               | 22 |
| Dvouosé namáhání ohybem.....                              | 22 |
| <b>Posouzení únosnosti pilíře</b> .....                   | 24 |
| Vlastnosti betonu .....                                   | 25 |
| Vlastnosti výztuže.....                                   | 28 |
| Metoda mezních přetvoření .....                           | 30 |
| <b>Návrh štíhlého betonového pilíře</b> .....             | 35 |
| Zatížení .....  | 36 |
| Návrh ohybové výztuže .....                               | 40 |
| Interakční diagram .....                                  | 41 |
| Prvotní návrh pomocí interakčního diagramu.....           | 42 |
| Vyšetřování účinků II. řádu .....                         | 45 |

|   |    |
|---|----|
| Dvouosé namáhání .....                                      | 45 |
| Posouzení ohybové výztuže .....                             | 46 |
| Návrh a posouzení smykové výztuže .....                     | 49 |
| Konstrukční řešení .....                                    | 49 |
| Podpurná konstrukce mostovky .....                          | 49 |
| <b>Závěr</b> .....  | 50 |
| Porovnání zjednodušených metod analýzy účinků 2. řádu ..... | 50 |
| Shrnutí analýzy účinků 2. řádu na pilíře .....              | 53 |
| <b>Seznam zdrojů</b> .....                                  | 55 |
| <b>Seznam obrázků</b> .....                                 | 56 |
| <b>Seznam tabulek</b> .....                                 | 57 |
| <b>Seznam příloh</b> .....                                  | 57 |

## Rešerše

### Úvod

Předmětem této bakalářské práce je specifická skupina tlačných prutů, které se označují jako štíhlé pilíře. Nejprve musíme definovat, v čem spočívá specifikum tlačných prutů obecně. Stejně jako u tažených prutů je pro úspěšné přenesení zatížení prutem klíčová tahová, respektive tlaková pevnost materiálu prutu. U prvků namáhaných osovou tlakovou silou na rozdíl od těch tažených však záleží i na stabilitě prvku, jelikož může dojít ke ztrátě stability a tím k vybočení prutu. Otázkou zůstává, který případ je při porušení prvku rozhodující a způsobí kolaps konstrukce, ztráta stability, vyčerpání tlakové pevnosti materiálu či kombinace obou případů. Já se rozhodl zabývat mostními pilíři, u kterých zásadní vliv hraje stabilita a kterým se, jak je již zmíněno výše, říká štíhlé pilíře.

Těmto jehlám tyčícím se často až do nebe a nesoucím mostovku ve výškách až několika set metrů rozhodně nebude nikdo upírat jejich název. Štíhle působí již na první pohled a mnohdy běžný smrtelník ani nechápe, jak je možné, že vlastně stále stojí a ještě k tomu nesou obrovskou zátěž. Nutno zmínit, že bez výpočetní techniky umožňující stavebním inženýrům efektivně a smysluplně aplikovat metody moderního mostního stavitelství, by zůstala mnohá údolí nepřeklenuta. Díky těmto metodám, které umožňují zahrnout do výpočtu vlivy nelineárního chování pilířů, trhlin v materiálu, plastizace nejvíce namáhaných oblastí či dotvarování betonu, je však naštěstí možné budovat směle konstrukce s ikonickými štíhlými pilíři.

Světovým zástupcem užití štíhlých mostních pilířů je bezpochyby francouzský Viadukt Millau, jehož pilíř P2 dosahuje neuvěřitelné výšky 245 m a je tak nejvyšším mostním pilířem na světě. U země má tento pilíř šířku 27 m, přičemž s výškou se zužuje až na 10 m. V horní části se pak dokonce rozděluje na dvě části, aby lépe snášel pohyby z důvodu teplotní roztažnosti ocelové mostovky. Efekt štíhlosti pak korunuje dalších 90 metrů vysoký pylon s lany podpírajícími mostovku. (1)



Obrázek 1: Viadukt Millau (1)

Českým zástupcem by pak mohl být most Vysočina se svými nejvyššími pilíři vysokými 55 m. I v tomto případě dochází směrem vzhůru k zúžení průřezu tvaru písmene H. Most prošel v roce 2019 modernizací a mostovka byla rozšířena o 75 cm v obou jízdních směrech. (2)



Obrázek 2: Most Vysočina (3)

Komplikovanost úkolu postavit elegantní, ale hlavně odolný pilíř, který nejen že unese mostovku i s dopravou, ale vydrží i mimořádná zatížení, je nepopíratelná. Pilíře jsou jednou z nejzranitelnějších částí mostu a jejich poškození často způsobuje kolaps přilehlých polí či celého mostu. Jako mimořádné zatížení můžeme považovat různé extrémní přírodní podmínky, jako je například neobvyklá povodeň či silné zemětřesení. To způsobilo zřícení dvoupatrového mostu Cypress Street Viaduct v Oaklandu. Na obrázku níže je vidět řada zborcených pilířů. (4)



Obrázek 3: Kolaps pilířů (4)

Dalším takovýmto extrémním zatížením na pilíř může být náraz dopravního prostředku, ať už lodí, automobilu či vlaku. Poslední zmíněný prostředek způsobil pád silničního mostu kousek od německé vesnice Eschede. Vysokorychlostní vlak vykolejil a v rychlosti okolo 200 km/h narazil do mostního pilíře, který se následně zřítíl a s ním i celý silniční most vedoucí přes železniční trať. Bohužel celá událost měla tragické následky a přinesla více než 100 obětí. (5)

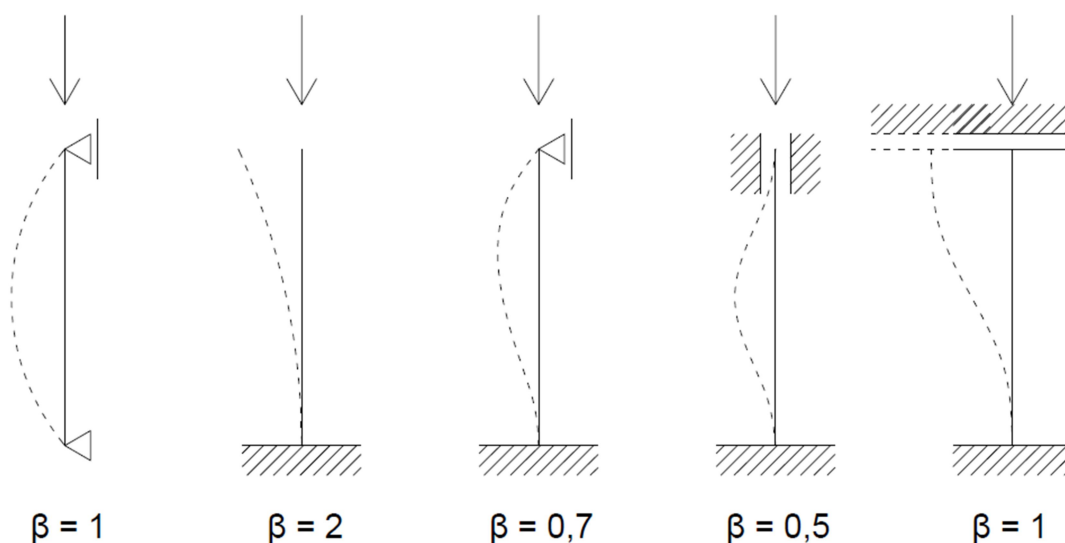
Z pohledu stavebního inženýrství však zůstává na pováženou, zda je prakticky možné do návrhových výpočtů započítávat i takováto velmi ojedinělá zatížení. Pilíře a celé mostní konstrukce by musely být výrazně předimenzované a tím by se logicky snížila jejich efektivita. Ke kolapsu pilíře téměř výhradně dochází právě při naprosto výjimečném zatížení nebo ještě během výstavby nedodržením technologických postupů. Jedním vysvětlením, proč tomu tak je, by mohlo být to, že pilíře jsou brány jako velice citlivé části konstrukcí a jejich výpočet byl odjakživa důsledný. Ve své práci tedy zůstanu u standartních postupů a pokusím se popsat historický vývoj ale hlavně moderní přístup k výpočtům štíhlých pilířů.

## Historie

Jedním z prvních, kdo se systematicky zabýval problematikou tláčeného prutu, byl Leonhard Euler (1707 – 1783). Tento švýcarský vědec zanechal významnou stopu v mnoha odvětvích, jako je například matematika, fyzika, astronomie nebo právě mechanika. Během svého dlouhého pobytu v Berlíně se Euler zabýval mimo jiné právě problematikou štíhlých prutů. Štíhlostním poměrem tláčeného prutu  $\lambda$ , neboli zkráceně štíhlostí, nazýváme poměr délky prutu a průřezových charakteristik příčného řezu prutu. Jde tedy o veličinu vyjadřující vztah výšky prutu k jeho rozměrům v příčném směru. (6)

$$\lambda = \frac{L_{vz}}{i} \quad [-] \quad (1)$$

Délka prutu do rovnice vstupuje v upraveném tvaru vzpěrné délky  $L_{vz}$ , a to o bezrozměrný součinitel vzpěrné délky  $\beta$ . Tento součinitel zohledňuje způsob uložení tláčeného prutu. Na obrázku 4 níže jsou zobrazeny základní typy uložení tláčeného prutu i s příslušnými hodnotami součinitele  $\beta$ .



Obrázek 4: Vzpěrné délky

Hodnoty součinitele vzpěrné délky vycházejí z relativní vzdálenosti inflexních bodů ohybové čáry prutu při vybočení (na obrázku čárkovaně). Vzpěrná délka  $L_{vz}$  se pak vypočítá jako celková délka prutu  $l_0$  násobená součinitelem  $\beta$ .

$$L_{vz} = \beta * l_0 \quad [m] \quad (2)$$

Jmenovatel zlomku ve výpočtu štíhlosti prutu pak tvoří charakteristika průřezu prutu, tedy poloměr setrvačnosti  $i$ , který se vypočte jako odmocnina poměru momentu setrvačnosti průřezu  $I$  k ploše průřezu  $A$ . Je nutné zmínit, že podle osy, ke které je vztažen moment setrvačnosti, získáme i příslušný poloměr setrvačnosti.

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad [m] \quad (3)$$

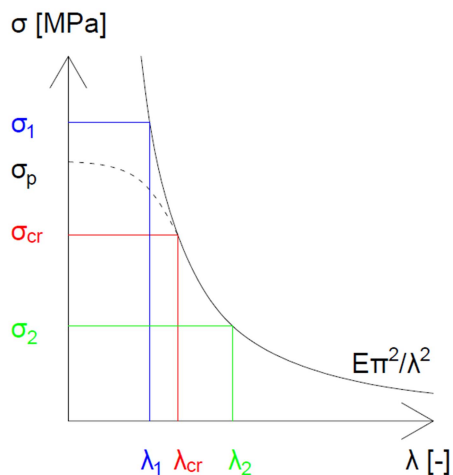
Euler zavedl v roce 1757 takzvanou kritickou sílu, dnes nazývanou Eulerovým nebo vzpěrným břemenem (podle ČSN EN 1992-1-1 je vzpěrné břemeno zatížení, při kterém dochází k vybočení s tím, že pro osamělé pružné prvky je totožné s Eulerovým břemenem). Při vzpěru (podle ČSN EN 1992-1-1 je vzpěr porušení vznikající v důsledku nestability prvku nebo konstrukce při dokonale dostředném tlaku bez příčného zatížení) podle Eulera existuje tedy jakási hraniční hodnota - kritická síla  $F_{cr}$ . (7)

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{vz}^2} \quad [N] \quad (4)$$

Z rovnice je zřejmé, že kritická síla závisí na tuhosti materiálu, což v rovnici reprezentuje Youngův modul pružnosti  $E$ , na rozměrech průřezu a na délce prutu včetně zohlednění uložení. Průřez prutu je zastoupen momentem setrvačnosti  $I$ , při čemž s rostoucím momentem setrvačnosti roste kritická síla. Délka prutu je v rovnici zastoupena kvadrátem již výše zmíněné vzpěrné délky  $L_{vz}$ .

Překročením kritické síly prut podle Eulera kolabuje, a to z důvodu ztráty stability tedy vybočením. Teoreticky by se dalo říci, že prut přechází ze stabilní rovnováhy, kdy je síla  $F$  působící na těleso menší než kritická síla  $F_{cr}$ , přes stav indiferentní rovnováhy, kdy  $F = F_{cr}$ , až ke stavu labilní rovnováhy, kdy již síla  $F$  překročí hodnotu  $F_{cr}$ . Stav stabilní rovnováhy je charakteristický tím, že po krátkodobém působení příčné síly a vychýlení prutu se prut opět navrátí do původní polohy. Indiferentní rovnováhu lze popsat tak, že se prut po krátkodobém působení příčné síly vychýlí a zůstane vychýlen, dokud ho neovlivní jiná příčná síla. Tento stav je hraniční a spíše teoretický, protože v praxi prut tuto hraniční hodnotu buď překročí, nebo jí vůbec nedosáhne. Posledním stavem je labilní rovnováha. Ta nastává již při drobném překročení kritické síly. Po následném krátkodobém působení příčné síly a vychýlení se prut zhroutí, jelikož deformace stále narůstá vlivem osově síly  $F$ .

Lépe by se daly tyto tři stavy popsat kritickým napětím  $\sigma_{cr}$  na grafu tzv. Eulerovy hyperboly. Ta využívá k popisu jevu napětí na jedné ose a štíhlost na druhé. Předpisem hyperboly je vyjádření právě kritického napětí  $\sigma_{cr}$  v závislosti na štíhlosti.



Obrázek 5: Eulerova hyperbola

Nejdůležitější hodnotou grafu je  $\lambda_{cr}$ , neboli kritická štíhlost, při které se dostaneme na kritické napětí  $\sigma_{cr}$ . Kritické napětí je zároveň mezí kluzu materiálu prutu. Čer ve vztahu pro kritické napětí lze jednoduše odvodit vzorec pro kritickou štíhlost.

$$\sigma_{cr} = \frac{F_{cr}}{A} \rightarrow \lambda_{cr} = \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_{cr}}} \quad (5)$$

V části grafu vlevo od spojnice  $\lambda_{cr}$  a  $\sigma_{cr}$  bude o kolapsu prutu rozhodovat pevnost materiálu prutu. Při štíhlosti  $\lambda_1$  tak nikdy nedosáhneme napětí  $\sigma_1$ , jelikož dříve narazíme na mez kluzu materiálu a zastavíme se tedy na hodnotě  $\sigma_{cr}$ , pokud budeme počítat pouze s pružnými deformacemi, respektive na mezi pevnosti materiálu vyjádřené čárkovanou čarou a hodnotou  $\sigma_p$ , pokud budeme počítat i s plastickými deformacemi materiálu. V části grafu vpravo od spojnice  $\lambda_{cr}$  a  $\sigma_{cr}$  naopak o selhání prutu rozhodne stabilita, protože prut je natolik štíhlý, že při vybočení buď vytvoří lokální místa plastifikace a následného kolapsu materiálu, nebo vůbec nedosáhneme pevnostních limitů materiálu a zhroutí se pouze ztrátou stability.

Euler při svých výpočtech únosnosti pilířů uvažoval několik předpokladů, které jsou zejména v případě betonových konstrukcí zdrojem nepřesností výpočtu:



1. Materiál pilíře je homogenní a izotropní.
2. Vlastní váha pilíře je zanedbána.
3. Výška pilíře je řádově větší než půdorysné rozměry.
4. Průřez pilíře je po výšce konstantní.
5. Pilíř je před zatěžováním dokonale přímý.
6. Zatížení působí v ose pilíře.
7. Materiál pilíře je elastický a chová se tedy podle Hookova zákona.
8. Uchycení pilíře je vždy ve svém smyslu dokonalé (např. ve vetknutí je zamezeno veškerému pootočení)
9. Materiál pilíře nedosahuje vlivem tlakového napětí plastických deformací a pilíř se hrouť pouze vlivem ztráty stability tvaru.

Při aplikaci výpočtu například na návrh pilíře pak postup vypadá tak, že porovnáváme štíhlost navrhovaného pilíře  $\lambda$  a kritickou štíhlost  $\lambda_{cr}$ . Pokud  $\lambda < \lambda_{cr}$ , jedná se o masivní pilíř, tudíž posuzujeme pouze tlakovou pevnost materiálu pilíře, protože víme, že pilíř nevybočí. Do tohoto výpočtu zavádíme náhodnou excentricitu  $e_i$ , čímž charakterizujeme nepřesnosti provedení pilíře a drobné odchylky zatížení od osy pilíře. I přes tuto excentricitu a zavedení ohybového momentu do výpočtu zůstává účinek zatížení konstantní a způsobuje pouze tlakové zatížení pilíře bez problému ztráty stability.

Pokud je však  $\lambda > \lambda_{cr}$ , jde o štíhlý pilíř a je nutno počítat se sníženou únosností materiálu, jelikož se vyskytnou oblasti, kde dojde k plastickým deformacím vlivem přetížení těchto oblastí při vybočování prutu. Nebo musíme účinky zatížení zvětšit o další imperfekce tak, že k náhodné excentricitě přidáme ještě excentricitu charakterizující průhyb prutu  $e_l$ . Tím se zvětší ohybový moment a sníží únosnost pilíře.

Eulerova metoda dnes již slouží spíše jen k předběžným návrhům pilířů nebo jsou využity jen její části doplněné o další výpočty. Důvodů je hned několik. Jedním z nich je bez pochyby to, že při výrobě dnes hlavně betonových pilířů nejsme schopni dosáhnout předpokladů, které Euler uvažoval. Jeho metoda vůbec neřeší dotvarování či trhliny v betonu. Tím buď riskujeme kolaps konstrukce anebo naopak nevyužíváme plný nosný potenciál prvku a nedosahujeme tak kýžené efektivity. Dalším důvodem jsou nové technologie, zejména v oblasti informatiky, které nám dovolují aplikovat mnohem komplikovanější výpočetní postupy.

## Metody vyšetřování účinků 2. řádu

Nejprve definujeme, co to znamená účinek druhého řádu. Je to jakýsi přidavný vliv zatížení na konstrukci vyvolaný deformacemi konstrukce. Do těchto deformací musí být započítány vlivy trhlin, nelineárních materiálových vlastností způsobené přechodem do plastického stavu a dotvarování.

Účinky druhého řádu mají vliv na konstrukci v průběhu zatěžování a mění její vlastnosti. Je proto důležité brát zřetel na stabilitu deformovaných prvků, zejména jedná-li se právě o štíhlé tlačené prvky. Pro správné vyšetření těchto prvků je zapotřebí analýza, která je schopná do výpočtů zahrnout vznik trhlin v kritických průřezech prutu, vliv dotvarování na prvek a přechod materiálů do plastických stavů a to v závislosti na průběhu zatěžování. Proto je taková analýza velice náročná a často vyžaduje použití výpočetních softwarů. Z tohoto důvodu byly zavedeny zjednodušené metody, které jsou schopné účinky druhého řádu zahrnout do statických výpočtů. Tyto metody však musí být kvůli bezpečnosti konzervativnější než detailní analýza deformované konstrukce.

(8)

## Metoda založená na jmenovitých ohybových tuhostech

První zjednodušenou metodou, která se zabývá ručním výpočtem návrhu štíhlého pilíře a je uvedena i v ČSN EN 1992-1-1, je metoda jmenovitých ohybových tuhostí. Tato metoda je již přizpůsobena přímo pro výpočet železobetonových pilířů. Na rozdíl od základní Eulerovy metody zahrnuje účinky trhlin, materiálové nelinearity, dotvarování a připojených prvků a to právě pomocí jakési jmenovité – nominální – ohybové tuhosti. Tu je nutné definovat tak, abychom výpočtem dostali celkové ohybové momenty vhodné pro návrh na MSÚ. Jmenovitou ohybovou tuhost získáme součtem opravených návrhových tuhostí pro beton a pro výztuž z rovnice níže:

$$EI = K_c E_{cd} I_c + K_s E_s I_s \quad (6)$$

$EI$  jmenovitá tuhost štíhlého tlačného prutu

$K_c$  opravný součinitel, jehož funkcí je zohlednit účinky trhlin, dotvarování a jiných imperfekcí betonu

$E_{cd}$  návrhová hodnota modulu pružnosti betonu  $E_{cd} = \frac{E_{cm}}{\gamma_{cE}}$ , kde  $E_{cm}$  je průměrný modul pružnosti, jehož hodnotu získáme z tabulek, a hodnota součinitele spolehlivosti  $\gamma_{cE}$  je doporučena 1,2

$I_c$  moment setrvačnosti betonového průřezu

$K_s$  opravný součinitel upravující vliv výztuže

$E_s$  návrhová hodnota modulu pružnosti výztuže, u oceli  $E_s = 200\text{GPa}$

$I_s$  moment setrvačnosti výztuže

Oba opravné součinitele  $K$  jsou závislé na stupni vyztužení  $\rho$ :

$$\text{Pokud } \rho \geq 0,002; \text{ pak } K_s = 1 \text{ a } K_c = \frac{k_1 k_2}{1 + \varphi_{ef}} \quad (7)$$

$\varphi_{ef}$  účinný součinitel dotvarování získaný ze součinu konečného součinitele dotvarování betonu a poměru ohybového momentu od dlouhodobě působícího zatížení v MSP a návrhového ohybového momentu od dlouhodobě působícího zatížení při MSÚ

$$\varphi_{ef} = \varphi(\infty, t_0) \frac{M_{Eqp}}{M_{Ed}} \quad (8)$$

$k_1; k_2$  součinitele zohledňující pevnost betonu, zatížení a štíhlost prutu

$$k_1 = \sqrt{\frac{f_{ck}[\text{MPa}]}{20}} \text{ a } k_2 = \frac{n \lambda}{170} \leq 0,20 \quad (9)$$

$n$  poměrová normálová síla

$$n = \frac{N_{Ed}}{A_c f_{cd}} \quad (10)$$

$$\text{Pokud } \rho \geq 0,001; \text{ pak } K_s = 0 \text{ a } K_c = \frac{0,3}{1 + \varphi_{ef}} \quad (11)$$

Po stanovení jmenovité ohybové tuhosti musíme spočítat návrhovou hodnotu ohybového momentu, na který budeme následně pilíř posuzovat. K tomu budeme potřebovat znát hlavně dvě hodnoty, tzv. vzpěrné břemeno  $N_B$ , do kterého se promítne právě jmenovitá ohybová tuhost, a moment prvního řádu zahrnující vliv imperfekcí  $M_{0Ed}$ .

$$N_B = EI \frac{\pi^2}{l_0^2} \quad (12)$$

$N_B$  vzpěrné břemeno

$EI$  jmenovitá ohybová tuhost pilíře

$l_0$  délka pilíře

$$M_{0E} = N_{Ed}(e_f + e_i) \quad (13)$$

$M_{0Ed}$  moment prvního řádu s vlivem imperfekcí

$N_{Ed}$  návrhová normálová síla

$e_f$  excentricita působící normálové síly

$e_i$  excentricita vznikající nepřesností výstavby

Návrhový moment  $M_{Ed}$  se pak spočítá podle následující rovnice

$$M_{Ed} = M_{0Ed} \left( \frac{\beta}{\frac{N_B}{N_{Ed}} - 1} \right) \quad (14)$$

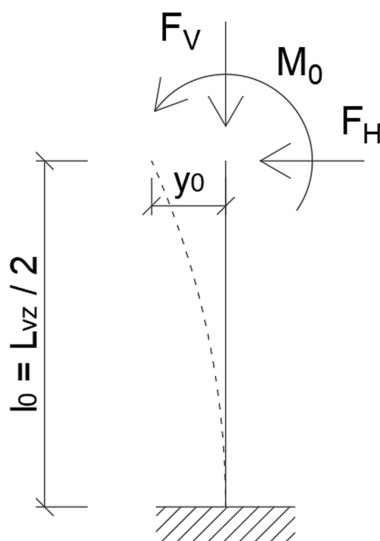
$\beta$  součinitel zohledňující rozdělení momentů prvního a druhého řádu, přičemž  $\beta = \frac{\pi^2}{c_0}$ , kde  $c_0$  je součinitel průběhu prvního řádu. Jeho hodnoty nabývají hodnot např.: 8 pro konstantní průběh či 9,6 pro parabolický průběh momentu prvního řádu.

Moment, na který můžeme navrhovat výztuž a který zahrnuje i vlivy druhého řádu, jsme tedy získali následovně. Moment prvního řádu, jenž sám o sobě zahrnuje imperfekce od zatížení a výroby, jsme násobili členem, do kterého se promítne jmenovitá ohybová tuhost skrytá do vzpěrného břemene. Jmenovitá ohybová tuhost pak obsahuje součinitele zohledňující vliv různých imperfekcí betonu, jakými jsou například trhlinky.

## Metoda založená na jmenovité křivosti

Obdobou metody založené na jmenovitých tuhostech je metoda založená na výpočtu jmenovité křivosti. Je vhodná především pro aplikaci na osamělé prvky

s konstantní normálovou silou a známou vzpěrnou délkou  $L_{vz}$ . Tato metoda se také někdy nazývá metoda náhradního štíhlého prutu. Spočívá v tom, že si navrhovaný pilíř převedeme na náhradní štíhlý prut, u kterého zanedbáme jeho vlastní váhu a modelujeme ho jako svislý přímý prut s vetknutým spodním a volným horním koncem. Na volný horní konec prutu pak necháme působit zatížení a to ve tvaru svislé síly  $F_V$ , vodorovné síly  $F_H$  a momentu  $M_0$ . Dále vycházíme z předpokladu, že přetvoření na horním konci prutu  $y_0$  je lineární funkcí křivosti  $y'' (= 1/r)$  ve vetknutí spodního konce po délce prutu  $l_0$ .



Obrázek 6: Křivost

Se znalostí těchto vstupních předpokladů můžeme směle přejít k výpočtu. Moment pro návrh průřezu je podobně jako u předchozí metody jmenovitých ohybových tuhostí dán momentem prvního řádu upraveným členem zahrnujícím vlivy druhého řádu. V tomto případě je to jmenovitý ohybový moment druhého řádu  $M_2$ .

$$M_{Ed} = M_{0Ed} + M_2 \quad (15)$$

$M_2$  jmenovitý ohybový moment druhého řádu

$$M_2 = N_{Ed} e_2 \quad (16)$$

$N_{Ed}$  návrhová normálová síla

$e_2$  průhyb druhého řádu

$$e_2 = 1/r \frac{L_{vz}^2}{c} \quad (17)$$

$1/r$  křivost, kde  $r$  je poloměr křivosti ohybové čáry

$L_{vz}$  vzpěrná délka

$c$  součinitel závislý na rozdělení křivosti, nabývá hodnot od 8 pro konstantní celkový moment (oproti  $c_0$ , který definuje rozdělní křivosti pouze od momentu prvního řádu). Pro konstantní příčný průřez  $c = 10$  ( $\approx \pi^2$ ; což odpovídá sinusovému rozdělení křivosti).

Již z názvu této metody je jasné, že klíčem k zavedení účinků druhého řádu zde bude křivost. Její výpočet u prvků s konstantním a symetrickým průřezem je odhalen v řádcích níže.

$$1/r = K_r K_\varphi 1/r_0 \quad (18)$$

$K_r$  opravný součinitel závislý na normálové síle

$K_\varphi$  součinitel zohledňující dotvarování

$$1/r_0 = \frac{\varepsilon_{yd}}{0,45 d} \quad (19)$$

$\varepsilon_{yd}$  přetvoření výztuže na mezi kluzu,  $\varepsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E_s}$ , kde  $f_{yd}$  je mez kluzu ocele a  $E_s$  je modul pružnosti ocele

$d$  účinná výška. Pokud výztuž není soustředěna jen u protilehlých okrajů, ale částečně i v rovině ohybu, lze stanovit ze vztahu  $d = 0,5 h + i_s$ , kde  $i_s$  je poloměr setrvačnosti veškeré výztuže

Výpočet součinitele  $K_r$ :

$$K_r = \frac{n_u - n}{n_u - n_{bal}} \leq 1 \quad (20)$$

$n$  poměrná normálová síla, viz výše

$n_{bal}$  hodnota  $n$  při maximální momentové únosnosti, lze uvažovat hodnotu 0,4

$$n_u = 1 + \omega \quad (21)$$

$\omega$  mechanický stupeň vyztužení

$$\omega = \frac{A_s f_{yd}}{A_c f_{cd}} \quad (22)$$

$A_s$  plocha veškeré podélné výztuže v průřezu

$f_{yd}$  mez kluzu výztuže

$A_c$  plocha betonu v průřezu

$f_{cd}$  pevnost betonu

Výpočet součinitele  $K_\varphi$ :

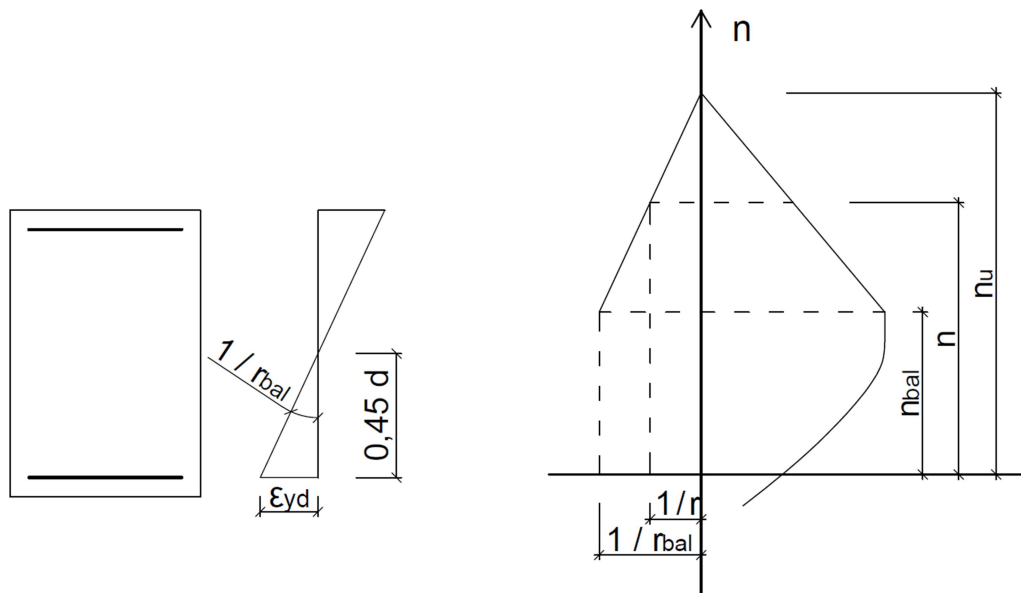
$$K_\varphi = 1 + \beta \varphi_{ef} \geq 1 \quad (23)$$

$\varphi_{ef}$  účinný součinitel dotvarování, viz výše

$$\beta = 0,35 + \frac{f_{ck}}{200} - \frac{\lambda}{150} \quad (24)$$

$\lambda$  štíhlost

Pro doplnění vztahů použitých výše lze nahlédnout do následujícího obrázku 7.



Obrázek 7:  $n_{bal}$

Tento výpočet je v normě upraven tak, že k němu není potřeba znát vlastní křivost prutu. Výpočet je samozřejmě možné provést i s výpočtem křivosti, jenž je dána

úhlem, který svírá rovina přetvoření s rovinou nepřetvořeného průřezu. Potřebujeme však určit polohu neutrální osy při působení  $N_{Ed}$  a  $M_{Ed}$  a dopočítat skutečnou křivost.

## Obecná metoda výpočtu účinků druhého řádu

Obě zjednodušené metody zmíněné výše jsou velice efektivním a naprosto dostačujícím nástrojem pro pilíře běžných tvarů s bezpečně definovatelnými okrajovými podmínkami. Avšak někdy se setkáme s pilíři s obecným průřezem, který se ještě mění s výškou, obecnými okrajovými podmínkami či obecným pracovním diagramem materiálu. Pak je potřeba sáhnout po obecné metodě výpočtu, která je schopna všechny tyto proměnné zahrnout do výpočtu. Využití této metody se značně zjednodušilo s nástupem výkonných počítačů, jelikož jedinou otázkou u tohoto postupu bývá právě výkon počítače. Při aplikování obecné metody je pak nutné vzít v potaz následující tři jednoduché předpoklady:

1. Je zachována rovinnost přetvoření
2. Dochází ke stejnému přetvoření betonu a výztuže ve stejném místě
3. Jsou dány pracovní diagramy betonu a výztuže

Dotvarování betonu je možno místo přesných modelů zahrnout do výpočtu i zjednodušeně pomocí součinitele  $(1 + \phi_{ef})$ , kde  $\phi_{ef}$  je účinný součinitel dotvarování stejně jako ve zjednodušených metodách výše. Důležitost tahového zpevnění betonu je pak na úsudku projektanta, je však možné ho zanedbat.

Přesnost a náročnost jdou u obecné metody ruku v ruce. Výpočty tak lze výrazně zjednodušit a urychlit například zahrnutím méně zkoumaných průřezů pilíře, čímž se ale na druhé straně sníží přesnost výpočtu. Je tedy na projektantovi, aby našel pomyslnou zlatou střední cestu mezi přesností a náročností výpočtu.

## Přístup norem k problematice štíhlých pilířů

### Obecný přehled Eurokódů

Česká republika je jakožto člen Evropské unie povinna řídit se jednotnou soustavou evropských technických norem – Eurokódy. Jedná se o unifikované normy, jejichž cílem je zajistit jednotné požadavky na stavby a jiné stavební produkty po celé EU, čímž se zjednodušuje mezistátní obchod se stavebními produkty v rámci unie.



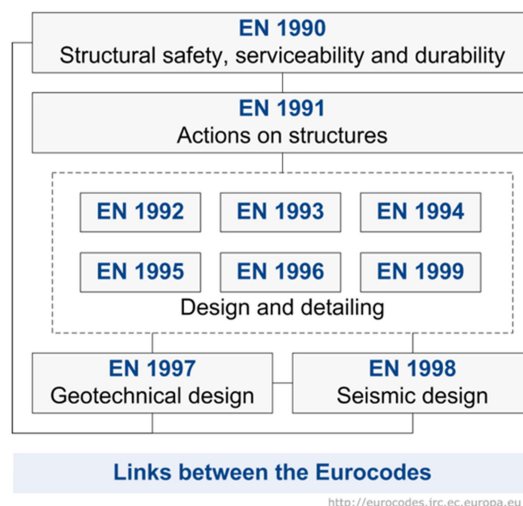
Navíc umožňují hladší vstup stavebních firem na trhy jiných zemí unie, jelikož jsou ve všech státech požadovány víceméně stejné nároky.

Přesto, že cílem je zajistit jednotné požadavky na produkty stavebního průmyslu, stále je nutné zajistit určitou diverzifikaci v jednotlivých státech. Vždyť už jen podnebí v členských zemích EU je od severu na jih velice proměnné. Pokud by Eurokódy měly pokrýt ve svých základních verzích absolutně všechny specifika různých přírodních podmínek po celé Evropě, ztratily by na své přehlednosti a nabyly by na objemu. Proto je umožněno jednotlivým státům zachovat si znalosti získané léty zkušeností s daným konkrétním prostředím a zahrnout je do Eurokódů formou národních příloh. Ty pak většinou upravují různé koeficienty, umožňují zanedbávat některé postupy, anebo definují hodnoty vstupující do výpočtu.

Eurokódů je celkem 10. Každý se zaměřuje na určitou oblast problematiky navrhování stavebních konstrukcí. Přehled všech Eurokódů a schéma jejich užívání je v tabulce a obrázku níže.

| <b>PŘEHLED EUROKÓDŮ</b> |                 |  |
|-------------------------|-----------------|--|
| <b>ČÍSLO</b>            | <b>OZNAČENÍ</b> | <b>OBLAST ZAMĚŘENÍ</b>                           |
| EN 1990                 | Eurokód 0       | Zásady navrhování konstrukcí                     |
| EN 1991                 | Eurokód 1       | Zatížení konstrukcí                              |
| EN 1992                 | Eurokód 2       | Navrhování betonových konstrukcí                 |
| EN 1993                 | Eurokód 3       | Navrhování ocelových konstrukcí                  |
| EN 1994                 | Eurokód 4       | Navrhování spřažených ocelobetonových konstrukcí |
| EN 1995                 | Eurokód 5       | Navrhování dřevěných konstrukcí                  |
| EN 1996                 | Eurokód 6       | Navrhování zděných konstrukcí                    |
| EN 1997                 | Eurokód 7       | Navrhování geotechnických konstrukcí             |
| EN 1998                 | Eurokód 8       | Navrhování konstrukcí odolných proti zemětřesení |
| EN 1999                 | Eurokód 9       | Navrhování hliníkových konstrukcí                |

**Tabulka 1: Přehled Eurokódů**



**Obrázek 8: Schéma Eurokódů (13)**

V rámci struktury Eurokódů funguje ještě sekundární rozdělení a to pomocí částí jednotlivých Eurokódů. Každý Eurokód je rozdělen na několik částí zabývajících se specifickými aspekty. Celkem pak existuje 58 takovýchto částí s tím, že jejich struktura je jednotná napříč všemi Eurokódy. Například část 1-1 se vždy zabývá obecnými pravidly a pravidly pro pozemní stavby, část 1-2 je zaměřena na protipožární odolnost staveb. Od části 3 a výš se zabývají specifickými prvky, jakými mohou být například sila, stožáry či jeřáby. Nás však bude zajímat hlavně část 2, která detailně rozebírá problematiku mostních konstrukcí. Tato část je k nalezení v Eurokódu 1, 2, 3, 4, 5 a 8.

Soustava Eurokódů začala být po EU zaváděna ke konci roku 2003. V České republice došlo k prvnímu zahrnutí o rok později, kdy byly přijaty paralelně s již stávajícími stavařskými normami ČSN (např. ČSN 73 1201 pro navrhování betonových konstrukcí). K datu 31. března 2010 se pak staly jedinými závaznými normami pro navrhování stavebních konstrukcí. Stejně tak se stalo po celé Evropské unii s tím, že někde jsou ale závazné pouze pro veřejné stavby. V praxi jsou však většinou vyžadovány i soukromými investory.

Při užívání Eurokódů je nutné si nejprve definovat prvek, který hodláme navrhovat. V našem případě je to dle zadání štíhlý pilíř dálničního mostu. Materiálem bude beton. Proto bychom měli určitě sáhnout po Eurokódu 2: Navrhování betonových konstrukcí. Jelikož se jedná o mostní pilíř, nabízí se jít rovnou do části 2 – Betonové mosty. Podle předmluvy této části oficiálně označené jako ČSN EN 1992-2 platí veškeré články obsažené v ČSN EN 1992-1, tedy v části 1 o obecných pravidlech pro navrhování betonových konstrukcí, pokud nejsou v části 2 přímo zrušeny nebo

upraveny. Dá se tedy říci, že část 2 je pouhým doplněním části 1 se zaměřením na mosty. Není tedy možné navrhovat mostní konstrukce výhradně podle ČSN EN 1992-2, ale ani podle ČSN EN 1992-1.

Pokud se podíváme na návrh mostu jako celku, bude pro úspěšný návrh nezbytný přístup i do dalších Eurokódů. Je samozřejmě nezbytné znát konkrétní zatížení. Tím se nám výčet potřebných částí norem zdvojnásobí, protože musíme přidat normu ČSN EN 1991-2: Zatížení mostů dopravou, která odkazuje na obecnou část ČSN EN 1991-1. Vhodné je také mít možnost podívat se do ČSN EN 1990 - zásady navrhování konstrukcí. Na tuto normu odkazují totiž některé články z norem následujících. Otázkou pak stále ještě zůstává mimo jiné založení mostní konstrukce, což znamená moci nahlédnout do ČSN EN 1997. Zde část 2 neodpovídá mostním konstrukcím, proto je nutné vybrat konkrétní část podle typu založení. Nakonec musí projektant určit, zda na jeho most bude působit i zemětřesení, protože tím se zabývá zase další norma, konkrétně ČSN EN 1998, část 2 pro mosty. Projektant mostní konstrukce jinými slovy musí disponovat přístupem k Eurokódu 0, Eurokódům 1 a 2 nebo alespoň k jejich prvním dvěma částem, a celému Eurokódu 7. Podle umístění konstrukce může ještě přibýt Eurokód 8 část 2. Vzhledem k velice malému výskytu zemětřesení na území České republiky však poslední zmíněný Eurokód není rozhodně tak klíčový, jako ty předchozí.

### **Přístup Eurokódů k štíhlým pilířům**

Jak bylo již zmíněno výše, problematikou štíhlých betonových a železobetonových mostních pilířů se zabývá ČSN EN 1992-2, kde pod kapitolou 5 – Analýza konstrukce, najdeme část 8 zabývající se analýzou účinků druhého řádu s normálovým zatížením. Po nalezení správné stránky zjistíme, že až na článek 5.8.3.3 o globálních účincích druhého řádu u pozemních staveb, který pro mosty neplatí vůbec, a článku 5.8.4 o dotvarování, který pro mosty může poskytovat i přesnější výpočty, můžeme bezstarostně a beze změny použít veškeré postupy z ČSN EN 1991-1-1. Zde se postupy povolené normou skrývají přehledně taktéž pod kapitolou 5.8 Analýza účinků druhého řádu s normálovým zatížením.

Norma v první části nejprve definuje několik základních pojmů jako vzpěr, vzpěrná délka či například účinky druhého řádu. Dále určuje několik základních pravidel o konstrukcích, jejichž chování je významně ovlivněno právě účinky druhého

řádu. Podle normy se musí při analýze konstrukce vzít v úvahu účinky zatížení vyvolané deformacemi konstrukce, jakými jsou například dotvarování, vliv trhlin či nelineární vlastnosti materiálů. Analýza musí zohledňovat případné účinky poddajnosti připojených prvků a základů. Tím může být například spolupůsobení konstrukce s podloží. Geometrické imperfekce se však musí uvažovat jako přídavné účinky prvního řádu.

Norma také určuje případy, kdy je možné od zahrnutí účinků druhého řádu do výpočtu upustit. Toto ověření by mělo být na jednom z prvních rádků výpočtu návrhu pilíře. Účinky druhého řádu mohou být zanedbány, pokud jsou nižší než 10% odpovídajících účinků prvního řádu. Alternativně lze účinky druhého řádu zanedbat, pokud štíhlost prvku  $\lambda$  je menší než hodnota limitní štíhlosti  $\lambda_{lim}$  podle následující rovnice.

$$\lambda_{lim} = \frac{20 A B C}{\sqrt{n}} \quad (25)$$

$$A = \frac{1}{1+0,2\varphi_{ef}} ; \text{ pokud neznáme } \varphi_{ef}, \text{ lze uvažovat } A = 0,7$$

$$B = \sqrt{1 + 2\omega} ; \text{ pokud neznáme } \omega, \text{ lze uvažovat } B = 1,1$$

$$C = 1,7 - r_m ; \text{ pokud neznáme } r_m, \text{ lze uvažovat } C = 0,7$$

$\varphi_{ef}$  účinný součinitel dotvarování, viz výše

$\omega$  mechanický stupeň vyztužení, viz výše

$n$  poměrná normálová síla, viz výše

$r_m$  poměr momentů,  $r_m = M_{01} / M_{02}$ , kde  $M_{01}$  a  $M_{02}$  jsou koncové momenty prvního řádu s tím, že  $|M_{02}| \geq |M_{01}|$ ; pro ztužené prvky, u nichž momenty prvního řádu vznikají převážně v důsledku imperfekcí nebo příčných zatížení, nebo pro obecně neztužené prvky se uvažuje  $r_m = 1,0$

Pokud je prvek namáhán dvojosým ohybem, lze rovnici výše použít pro oba směry namáhání odděleně a následně rozhodnout, zda lze účinek druhého řádu zanedbat v obou směrech, v jednom z nich nebo musí být započítán v obou směrech.

Další podkapitola Eurokódu se zaměřuje na určení štíhlostního poměru a vzpěrné délky. Pro osamělé prvky platí rovnice (1). Pro osamělé prvky s konstantním průřezem platí obrázek 1 se schématy základních vzpěrných délek ve vztahu k uložení prvku. Eurokód navíc dodává další dva speciální způsoby uložení. Pro pilíře pravidelných rámových konstrukcí musí být vzpěrná délka vypočítána z následujícího vztahu pro ztužené prvky:

$$L_{vz} = 0,5l_0 \sqrt{\left(1 + \frac{k_1}{0,45+k_1}\right) \left(1 + \frac{k_2}{0,45+k_2}\right)} \quad (26)$$

a pro neztužené prvky:

$$L_{vz} = l_0 \cdot \max \left\{ \sqrt{1 + 10 \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2}}; \left(1 + \frac{k_1}{1+k_1}\right) \left(1 + \frac{k_2}{1+k_2}\right) \right\} \quad (27)$$

$k_1, k_2$  poměrné poddajnosti v natočení konců prutu 1 a 2; eurokód uvádí výpočet i těchto koeficientů, ale pro svou bakalářskou práci to neshledávám podstatné, jelikož se nezabývám rámovými konstrukcemi

$l_0$  oproti normě používám ve své bakalářské práci označení  $l_0$  pro světlou délku tlačенého prutu a  $L_{vz}$  pro vzpěrnou délku

Pro pilíře s proměnnou normálovou silou a/nebo průřezem se nutnost započítání účinků druhého řádu podle rovnice (25) má posoudit při uvažování vzpěrné délky založené na vzpěrném břemenu NB.

$$L_{vz} = \pi \sqrt{\frac{EI}{N_B}} \quad (28)$$

### Metody podle normy

V normě jsou následně jmenovány tři metody, podle nichž může být prvek, který podle kritérií výše musí být podroben analýze zahrnující účinky druhého řádu, analyzován:

1. Obecná metoda založená na nelineární analýze druhého řádu
2. Zjednodušená metoda založená na jmenovité tuhosti
3. Zjednodušená metoda založená na jmenovité křivosti

Jelikož jsem základní principy těchto metod popsal již v předešlých kapitolách, zaměřím se nyní jen na konkrétní omezení a uplatnění uvedené v ČSN EN 1992-1-1.

## **Obecná metoda**

Obecnou metodu lze použít v MSÚ i v MSP za předpokladu splnění podmínek rovnováhy a spojitosti při uvažování nelineárního chování materiálů. V MSÚ však musíme ověřit schopnost kritických průřezů odolávat nepružným deformacím. Můžeme analyzovat podle prvního i druhého řádu.

Norma u této metody povoluje provést drobné zjednodušení, jelikož jsou obvykle podmínky rovnováhy a kompatibility přetvoření splněny v několika průřezech. Lze tedy uvažovat pouze kritické průřezy a změnu křivosti mezi nimi považovat za obdobnou například momentu prvního řádu.

Je také možné započítat pozitivní účinek tahového zpevnění betonu, ale stejně tak norma povoluje ho pro zjednodušení z výpočtů vynechat.

## **Metoda založená na jmenovité tuhosti**

Tato zjednodušená metoda je podrobně popsána v kapitole výše. Podle Eurokódu nalezne své uplatnění jak u výpočtů osamělých prvků tak i celých konstrukcí. Musí být však vhodně odhadnuty hodnoty jmenovitých tuhostí podle rovnice (6). Tyto tuhosti v sobě musí zahrnovat účinky trhlin, materiálových nelinearit a dotvarování.

## **Metoda založená na jmenovité křivosti**

Další zjednodušená metoda uvedená v normě je metoda založená na jmenovité křivosti. Jmenovitý moment druhého řádu je zde určen na základě průhybu. Uplatnění tohoto postupu lze nalézt především u osamělých prvků. Užití u konstrukcí je možné, avšak pouze pokud jsme schopni reálně odhadnout rozdělení křivosti. Podrobnějším popisem metody se tato práce zabývala v jedné z předchozích kapitol.

## **Dvousé namáhání ohybem**

Teď, když už víme, jak správně vyšetřovat účinky druhého řádu v jednotlivých směrech, je na čase podívat se na analýzu dvousého namáhání pilíře ohybem. Lze použít obecnou metodu v plném bez omezení nebo za určitých podmínek i

zjednodušené metody s tím, že musíme vždy věnovat zvláštní pozornost určení průřezu s kritickou kombinací momentů.

Při užití zjednodušených metod musíme postupovat za určitých podmínek, jak již bylo zmíněno výše. V prvním kroku můžeme provést samostatný návrh v každém hlavním směru bez ohledu na dvojosé namáhání ohybem. Imperfekce pak uvažujeme pouze v tom směru, kde mají nejnepříznivější účinek.

Od dalšího posuzování můžeme upustit, pokud splníme následující podmínky:

Pro štíhlosti:

$$\frac{\lambda_y}{\lambda_z} \leq 2 \quad a \quad \frac{\lambda_z}{\lambda_y} \leq 2 \quad (29)$$

$\lambda_y$  štíhlost ve směru osy  $y$

$\lambda_z$  štíhlost ve směru osy  $z$

Pro poměrné výstřednosti:

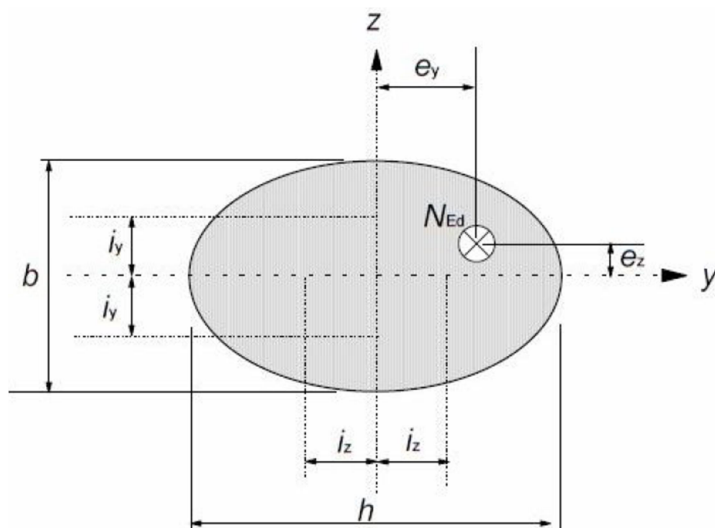
$$\frac{e_y/h_{eq}}{e_z/b_{eq}} \leq 0,2 \quad nebo \quad \frac{e_z/b_{eq}}{e_y/h_{eq}} \leq 0,2 \quad (30)$$

$b_{eq} = i_y \sqrt{12}$ ; pro ekvivalentní obdélníkový průřez

$h_{eq} = i_z \sqrt{12}$ ; pro ekvivalentní obdélníkový průřez

$e_y$  výstřednost ve směru osy  $y$

$e_z$  výstřednost ve směru osy  $z$



Obrázek 9: Dvousé namáhání (9)

Pokud nesplníme podmínky z rovnic (29) a (30), musíme uvažovat dvousé namáhání ohybem v každém směru včetně započítání účinků druhého řádu. Lze však použít mimo přesného návrhu i následující zjednodušený vztah.

$$\left(\frac{M_{Edz}}{M_{Rdz}}\right)^a + \left(\frac{M_{Edy}}{M_{Rdy}}\right)^a \leq 1,0 \quad (31)$$

$M_{Edy}$  návrhový moment k ose  $y$  včetně momentu druhého řádu

$M_{Edz}$  návrhový moment k ose  $z$  včetně momentu druhého řádu

$a$  exponent, pro kruhové a eliptické průřezy  $a = 2$ ; pro obdélníkové průřezy platí následující tabulka s možností lineární interpolace

|                   |     |     |     |
|-------------------|-----|-----|-----|
| $N_{Ed} / N_{Rd}$ | 0,1 | 0,7 | 1,0 |
| $a$               | 1,0 | 1,5 | 2,0 |

Tabulka 2

$N_{Ed}$  návrhová hodnota normálové síly

$N_{Rd}$  návrhová únosnost osově namáhaného průřezu

## Posouzení únosnosti pilíře

Po návrhu pilíře přichází na řadu posouzení jeho únosnosti. To provádíme podle kapitoly 6.1 ČSN EN 1992-2 zabývající se mezním stavem únosnosti (MSÚ) v případě účinku ohybového omentu s normálovou silou nebo bez ní. Norma se až na pár úprav ohledně předpětí, odkazuje plně na stejnou kapitolu v ČSN EN 1992-1-1. Vzhledem



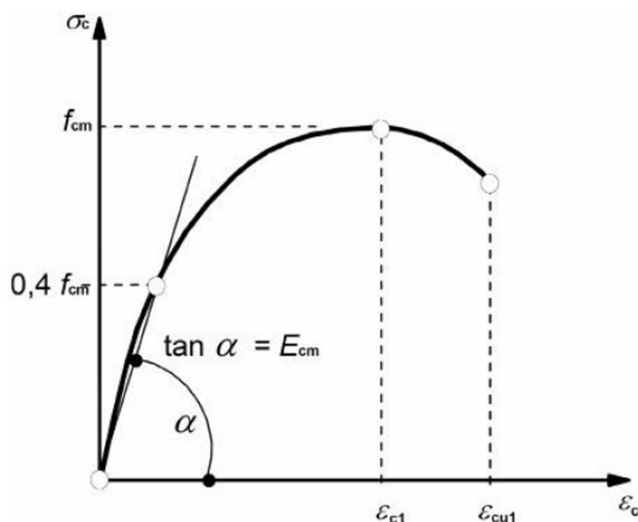
k návrhu pilíře v této bakalářské práci bez předpětí, nebude problematika předpětí více rozebírána.

Nejprve je nutné stanovit některé předpoklady, které uvažujeme pro konstrukční prvek, abychom ho mohli zahrnout do této skupiny prvků namáhaných ohybovým momentem s normálovou silou (v našem případě posuzování pilíře se případ bez normálové síly nevyskytuje). Jsou jimi:

1. Rovinné průřezy zůstávají rovinné
2. Poměrné přetvoření výztuže uvažované jako soudržné s betonem je stejné jako přetvoření okolního betonu. To platí v tlaku i tahu.
3. Tahová pevnost betonu se zanedbává.
4. Tlaková napětí v betonu jsou odvozena z pracovních diagramů betonu uvedených v normě jako vhodných pro výpočet.
5. Napětí ve výztuži jsou odvozena z pracovních diagramů příslušné oceli uvedených v normě jako vhodných pro výpočet.

### Vlastnosti betonu

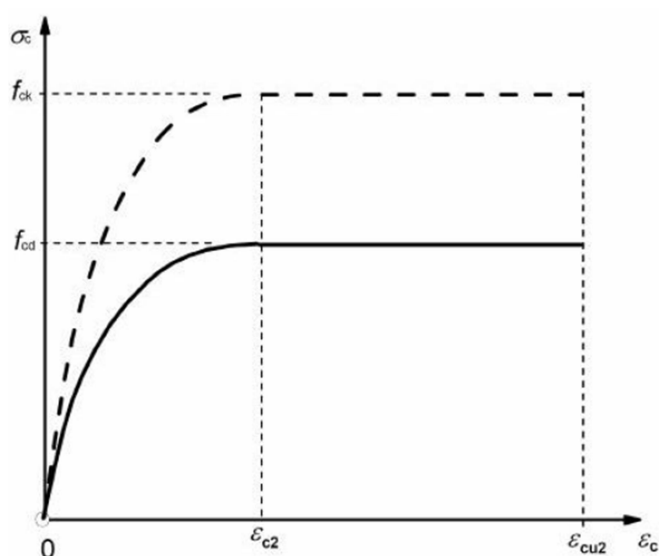
Pracovní diagram betonu získaný z laboratorních zkoušek je na obrázku 10. Je ale komplikované matematicky popsat jeho vývoj. Proto se přechází k různě zjednodušeným modelům, jejichž účelem je zjednodušit výpočet, přiblížit se k reálnému diagramu ale nikdy ho nepřekročit a být tak vždy na straně bezpečnosti. Jsou tedy vždy více konzervativní než reálný pracovní diagram betonu.



Obrázek 10: Pracovní diagram betonu - skutečný (9)

I u reálného pracovního diagramu betonu dochází k určitému zjednodušení a to při výpočtu modulu pružnosti  $E_{cm}$ , který je stanoven z přibližné hodnoty 0,4  $f_{cm}$ , tedy hodnoty průměrné pevnosti betonu v tlaku ve stáří 28 dní. Důvodem je nelineární chování betonu již od začátku zatěžování. Hodnota  $E_{cm}$  je pak určena pro každou pevnostní třídu betonu zvlášť. Hodnoty přetvoření  $\varepsilon_{c1}$  a  $\varepsilon_{cu1}$  jsou uvedeny společně s hodnotami klíčových přetvoření pro další diagramy betonů běžných pevností v tabulce 3 níže.

Nejpřesnějším zjednodušeným pracovním diagramem užívaným pro návrh průřezu je parabolicko-rektangulární pracovní diagram, viz obrázek 11.



Obrázek 11: Pracovní diagram betonu – parabolicko-rektangulární (9)

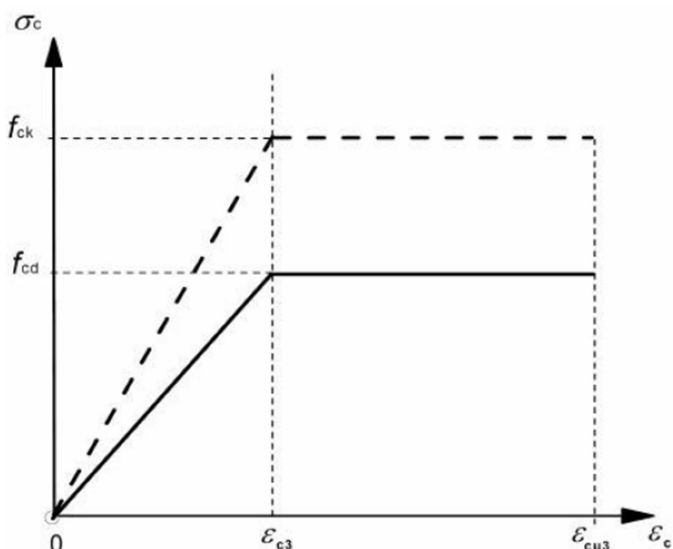
Nárůst pevnosti v rozsahu  $0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2}$  je popsán následující rovnicí pro napětí:

$$\sigma_c = f_{cd} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^n \right] \quad (32)$$

$f_{cd}$  návrhová tlaková pevnost betonu;  $f_{cd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$ , kde  $f_{ck}$  je charakteristická válcová pevnost betonu stáří 28 dní v tlaku,  $\alpha_{cc}$  je součinitel umožňující zohlednění dlouhodobých účinků na pevnost, ale většinou je uvažován  $\alpha_{cc} = 1$ ;  $\gamma_c$  je dílčí součinitel betonu, který je pro trvalé a dočasné návrhové situace  $\gamma_c = 1,5$ ; pro mimořádné pak  $\gamma_c = 1,2$

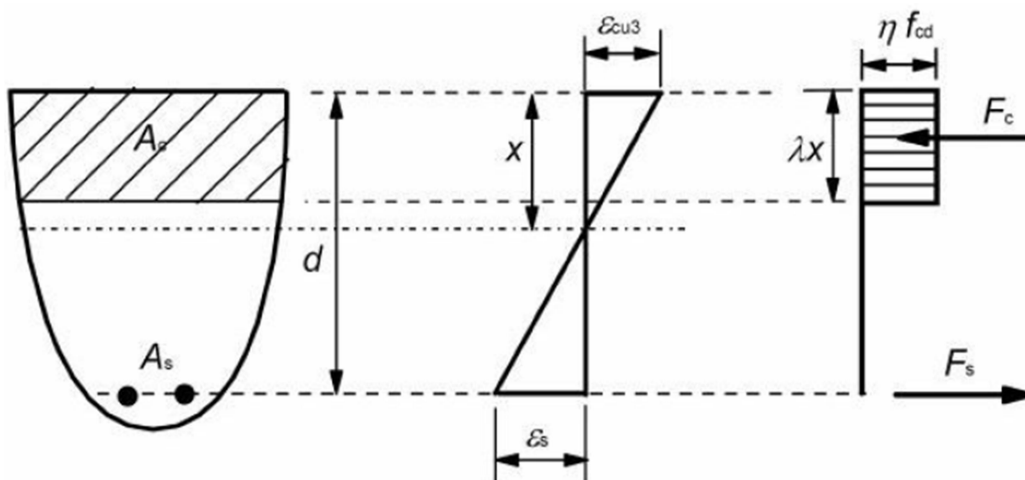
Po dosažení přetvoření  $\varepsilon_{c2}$  se nárůst napětí, které je beton schopen přenést, zastavuje a zůstává konstantní  $\sigma_c = f_{cd}$  až do mezního přetvoření  $\varepsilon_{cu2}$ .

Dalším přípustným diagramem je bilineární pracovní diagram betonu, viz obrázek 12. Ten nabízí zjednodušení v části nárůstu napětí (pokud  $0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c3}$ ) tím, že je tato část diagramu popsána lineární funkcí. Tou je jednoduchý vztah mezi modulem pružnosti a přetvořením definující napětí,  $\sigma_c = E_c \varepsilon_c$ . Stejně jako u předchozího případu je pak napětí od dosažení návrhové pevnosti konstantní, tedy  $\sigma_c = f_{cd}$  až do mezního přetvoření  $\varepsilon_{cu3}$ . Hodnoty jednotlivých přetvoření lze nalézt v tabulce 3 níže.



Obrázek 12: Pracovní diagram betonu - bilineární (9)

Podle normy lze předpokládat i obdélníkové, neboli rektangulární, rozdělení napětí. Tento model je nejkonzervativnější a nejvíce znemožňuje efektivní využití celé pevnostní kapacity betonového průřezu. Jeho zahrnutí do výpočtu je však nejjednodušší. Schéma užití tohoto diagramu je znázorněno na obrázku 13.



Obrázek 13: Pracovní diagram betonu - rektangulární (9)

Rozměr  $x$  na obrázku určuje polohu neutrální osy průřezu, tedy místa, kde nedochází k přetvoření betonu a případně ani výztuže. Součinitel  $\lambda$  definuje účinnou výšku tlačené oblasti a součinitel  $\eta$  účinnou pevnost. Pro betony běžných pevností ( $f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$ ) platí  $\lambda = 0,8$  a  $\eta = 1$ .

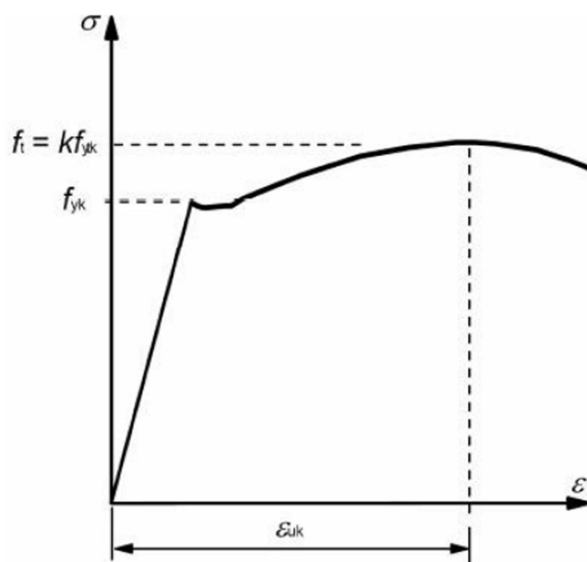
Tabulka 3 shrnuje klíčová přetvoření pro jednotlivé pracovní diagramy betonů běžných pevností ( $f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$ ).

| Pracovní diagram          | $\varepsilon_{cn}$ [‰]                 | $\varepsilon_{cu}$ [‰]    |
|---------------------------|--|---------------------------|
| Skutečný                  | $1,80 \leq \varepsilon_{c1} \leq 2,45$ | $\varepsilon_{cu1} = 3,5$ |
| Parabolicko-rektangulární | $\varepsilon_{c2} = 2,00$              | $\varepsilon_{cu2} = 3,5$ |
| Bilineární                | $\varepsilon_{c3} = 1,75$              | $\varepsilon_{cu3} = 3,5$ |
| Rektangulární             | $\varepsilon_{cu3} = 3,5$              |                           |

Tabulka 3: Přehled poměrných přetvoření

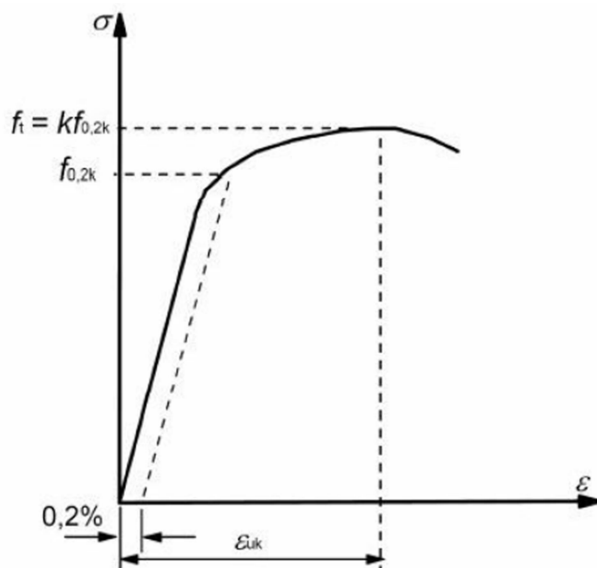
### Vlastnosti výztuže

Naprostá většina betonářské výztuže je ve formě ocelových prutů, tyčí, drátů, svařovaných sítí či příhradovin. Proto nás bude zajímat pracovní diagram oceli. Ocel může vykazovat chování dvojího typu, podle toho, zda byla při výrobě válcovaná za tepla či za studena. Typické pracovní diagramy pro oba případy jsou na obrázku 14 pro ocel za tepla válcovanou, resp. 15 pro ocel za studena válcovanou.



Obrázek 14: Pracovní diagram oceli – zřetelná mez kluzu (9)

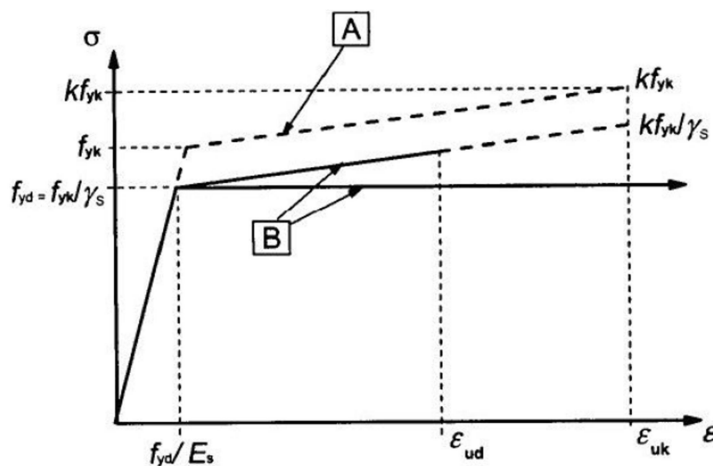
Ocel za tepla válcovaná se vyznačuje zřetelnou mezí kluzu  $f_{yk}$  a následným plastickým zpevněním.



Obrázek 15: Pracovní diagram oceli – bez zřetelné meze kluzu (9)

Ocel za studena válcovaná žádnou zřetelnou mez kluzu nemá. Proto se používá tzv. smluvní mez kluzu  $f_{0,2k}$ , které ocel dosahuje při relativním přetvoření  $\varepsilon = 0,2\%$ .

Stejně jako u betonu je však návrh pomocí těchto matematicky komplikovaných křivek prakticky nereálný. Proto se opět uchylujeme ke zjednodušeným, idealizovaným a návrhovým pracovním diagramům, viz obrázek 16.



Obrázek 16: Pracovní diagram oceli - idealizovaný (9)

Křivka označená písmenem A vykresluje idealizovaný pracovní diagram oceli. Křivky označené písmenem B pak znázorňují návrhové pracovní diagramy oceli s tím, že jedna z nich zahrnuje i zpevnění oceli za mezí kluzu a omezení přetvoření, kdežto druhá toto zpevnění neuvažuje a po dosažení meze kluzu je již napětí v oceli konstantní s neomezeným růstem přetvoření. Modul pružnosti oceli je stejný pro všechny diagramy

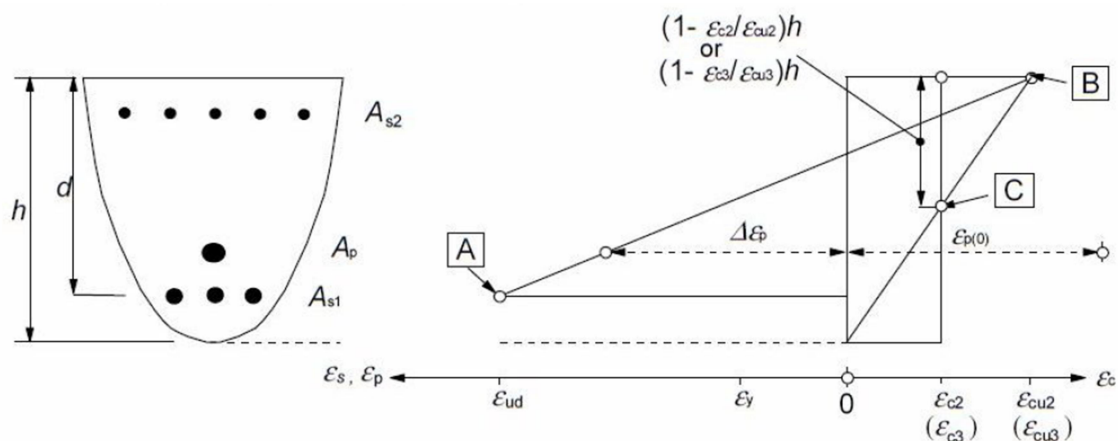
a je roven  $E_s = 200 \text{ GPa}$ . Pro doplnění hodnot veličin popisujících diagram je přiložena tabulka z normy, zde označena jako tabulka 4, přičemž hodnota  $\varepsilon_{ud} = 0,9 \varepsilon_{uk}$ .

| Výrobek   |  | Pruty a vyrovnané svitky      |             |                         | Svařované sítě                                |             |                         | Požadavek nebo hodnota kvantilu (%) |
|---|--|-------------------------------|-------------|-------------------------|---|-------------|-------------------------|-------------------------------------|
| Třída tažnosti  |  | A                             | B           | C                       | A   | B           | C                       | –                                   |
| Charakteristická mez kluzu $f_{yk}$ nebo $f_{0,2k}$ (MPa)                               |  | 400 až 600                    |             |                         |   |             |                         | 5,0                                 |
| Minimální hodnota $k = (f_t/f_y)_k$   |  | $\geq 1,05$                   | $\geq 1,08$ | $\geq 1,15$<br>$< 1,35$ | $\geq 1,05$                                   | $\geq 1,08$ | $\geq 1,15$<br>$< 1,35$ | 10,0                                |
| Charakteristická hodnota poměrného přetvoření při maximální síle $\varepsilon_{uk}$ (%) |  | $\geq 2,5$                    | $\geq 5,0$  | $\geq 7,5$              | $\geq 2,5$                                    | $\geq 5,0$  | $\geq 7,5$              | 10,0                                |
| Ohybatelnost  |  | zkouška ohybem/zpětným ohybem |             |                         | –   |             |                         |                                     |
| Pevnost ve smyku  |  | –                             |             |                         | 0,25 A $f_{yk}$ (A je průřezová plocha drátu) |             |                         | Minimum                             |
| Maximální odchylka od jmenovité hmotnosti (jednotlivý prut nebo drát) (%)               | Jmenovitý rozměr prutu (mm)<br>$\leq 8$<br>$> 8$ |                               |             |                         |   |             |                         | 5,0                                 |
|   |  |                               |             |                         |   |             |                         | $\pm 6,0$<br>$\pm 4,5$              |

Tabulka 4: Hodnoty poměrných přetvoření oceli (9)

### Metoda mezních přetvoření

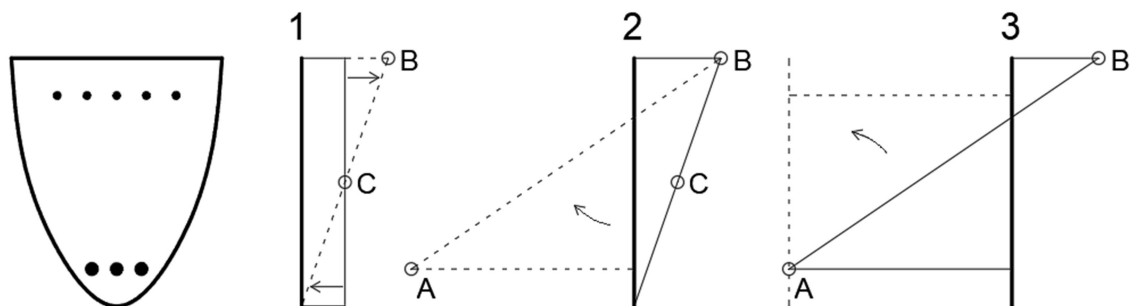
Se znalostí chování jednotlivých materiálů je možno přikročit k definování únosnosti průřezu. Vycházíme-li z vlastností materiálů popsaných výše, je vhodné náš postup založit na hodnotách maximálních poměrných přetvoření. Pokud známe konkrétní třídu betonu a konkrétní typ oceli výztuže, známe normou stanovená poměrná přetvoření na mezích jejich únosností. Můžeme tedy zkoumat únosnost průřezu cíleně tak, abychom dosahovali právě těchto mezních poměrných přetvoření. Tento postup se označuje jako metoda mezních přetvoření. Schéma možných průběhů poměrných přetvoření je znázorněn na obrázku 17.



Obrázek 17: Mezní přetvoření vyztuženého průřezu (9)

Obrázek je převzat z normy, což je důvodem zahrnutí předpětí do schématu ( $A_p$ ,  $\varepsilon_p$ ). Díky tomu, je však obrázek platný i pro pilíře, jelikož na pilíře primárně působí právě normálová tlaková síla. Bod označený písmenem A představuje mezní poměrné přetvoření betonářské výztuže, bod B mezní poměrné přetvoření betonu v tlaku a bod C mezní poměrné přetvoření betonu při prostém tlaku. S průběhem poměrných přetvoření se tedy můžeme pohybovat pouze v rámci mezí určených pracovními diagramy materiálů a zobrazených na obrázku 17.

Zaznamenáme-li tedy průběh změny poměrného přetvoření mezi jednotlivými body na obrázku 14 tak, abychom nepřekročili jejich maximální hodnoty, můžeme určit příslušný průběh napětí ve výztuži i v betonu. Vynásobením napětí ve výztuži plochou prutů dostaneme sílu působící ve výztuži. Obdobně pak získáme sílu působící v betonu, s tím rozdílem, že musíme integrovat napětí působící na tlačenu výšku průřezu, jelikož se tato výška mění se změnou poměrného přetvoření. Pokud známe síly, které působí v průřezu v určitém stavu, snadno z nich vypočítáme hodnotu  $N_{Rd}$ , tedy hodnotu normálové síly, kterou je schopen průřez v daném stavu přenést. Pokud navíc stejné síly vynásobíme vzdálenostmi působíště sil od osy průřezu, získáme součtem vzniklých hodnot ohybový moment, jenž je schopný průřez za předpokladu působení dané normálové síly přenést. Získáme tedy hodnotu  $M_{Rd}$ . Vyšetříme-li tímto způsobem celý možný průběh poměrného přetvoření tak, jak je naznačeno na obrázku 18, získáme jakousi množinu bodů se souřadnicemi  $[N_{Rd}; M_{Rd}]$ , tedy kombinací normálové síly a příslušného ohybového momentu, obou na mezi únosnosti.



Obrázek 18: Metoda mezních přetvoření

Na obrázku 18 je na zjednodušeném schématu vykreslen možný postup při změně poměrného přetvoření v krocích 1 až 3. Obrázek vychází z obrázku 17, jen jsou pro přehlednost vynechané některé popisky. Body A, B a C odpovídají tedy stejným bodům na onom obrázku. Původní stav přetvoření je znázorněn plnou čarou, nový stav čárkovanou. Pro přehlednost jsou přidány šipky ukazující směr změny poměrného přetvoření.

V prvním kroku měníme přetvoření z prostého tlaku, kdy je poměrné přetvoření v celém průřezu rovno  $\varepsilon_{cn}$  (hodnota  $\varepsilon_{cn}$  se odvíjí od zvoleného pracovního diagramu betonu, viz tabulka 3), na stav, kdy již dochází k ohybu, ale celý průřez je stále tlačný. Neutrální osa, tedy místo nulového poměrného přetvoření, je v novém stavu právě na okraji průřezu s tím, že na druhém okraji poměrné přetvoření betonu právě dosahuje hodnoty  $\varepsilon_{cu}$ .

V druhém kroku pokračujeme ve zvyšování poměrného přetvoření v dolní části průřezu až do chvíle, kdy dosáhneme v dolní výztuži na hodnotu  $\varepsilon_{ud}$ . V horní části průřezu je beton stále na mezním tlakovém poměrném přetvoření  $\varepsilon_{cu}$ . V novém stavu dosahujeme prostého ohybu. Napětí vyvolané poměrným přetvořením betonu v tahu do výpočtů nezapočítáváme, jak již bylo zmíněno výše.

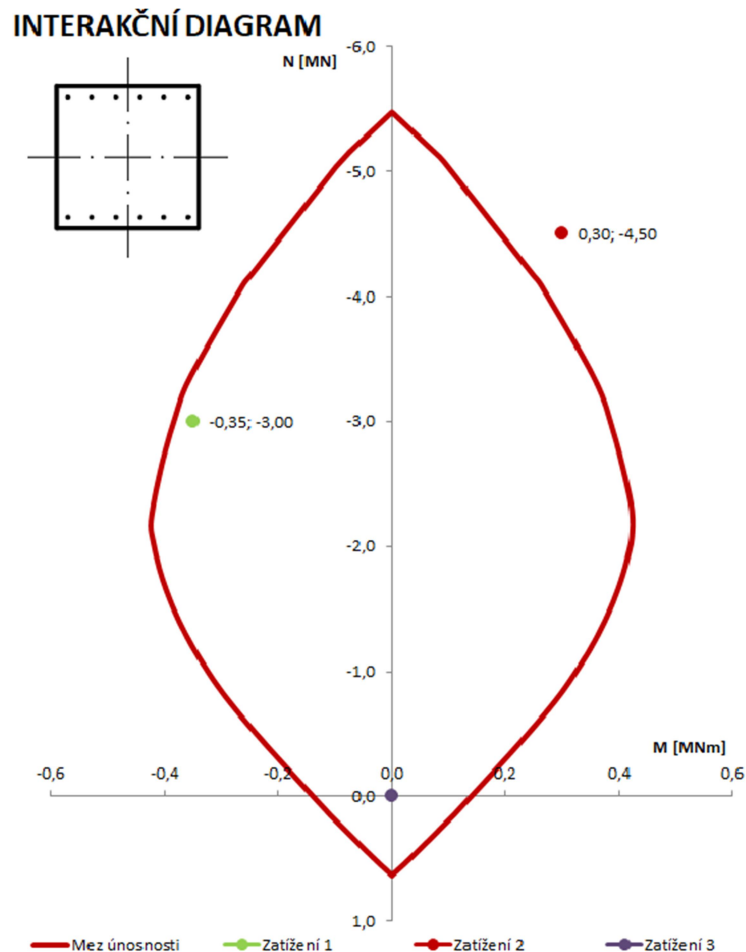
Ve třetím kroku se dostáváme do opačné situace než na začátku, do stavu prostého tahu. Poměrné přetvoření v celém průřezu je na hodnotě  $\varepsilon_{ud}$  s tím, že uvažujeme vyvolání napětí pouze ve výztuži.

Tímto postupem získáme polovinu bodů se souřadnicemi  $[ N_{Rd} ; M_{Rd} ]$ . Provedeme-li tento postup reverzně a se zaměněným horním a dolním povrchem průřezu, získáme druhou polovinu bodů. Když vyneseme všechny body do souřadnicového systému, kdy na svislou osu vynášíme hodnotu normálové síly a na vodorovnou osu hodnotu ohybového momentu, vytvoří body jakýsi uzavřený tvar.

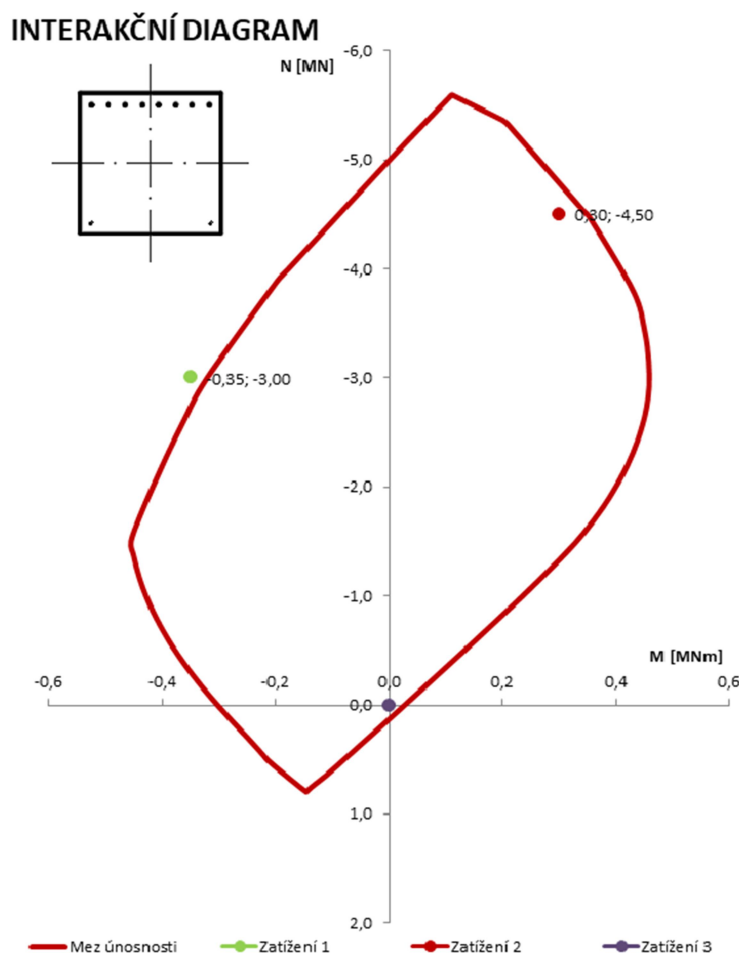


Jedná se o graf tzv. interakčního diagramu, který slouží právě pro posuzování pilířů či jiných prvků namáhaných kombinací normálové síly a ohybového momentu. Jeho aplikace je velice prostá. Uzávřená křivka znázorňuje mezní únosnost pilíře. Ze zatížení musíme určit různé kombinace normálové síly  $N_{Ed}$  a ohybového momentu  $M_{Ed}$  působící na pilíř. Pokud se bod o souřadnicích  $[ N_{Ed} ; M_{Ed} ]$  nachází uvnitř křivky, pilíř je schopen toto zatížení přenést. Nachází-li se však vně křivky, pilíř není schopen přenést dané zatížení a je nutné pozměnit vlastnosti průřezu.

Na obrázku 19 je vidět příklad interakčního diagramu se symetrickým vyztužením a příklady zatížení nedosahující mezní únosnosti průřezu a překračující je. Na obrázku 20 je pak obdobně zatížen nesymetricky vyztužený průřez.



Obrázek 19: Interakční diagram – symetrické vyztužení



Obrázek 20: Interakční diagram – asymetrické vyztužení

Někdy se při tvorbě interakčního diagramu za účelem zjednodušení nehledá celý průběh změn poměrného přetvoření (samozřejmě po krocích zvolené velikosti), nýbrž se vybere několik důležitých bodů křivky a souřadnice se spočítají pouze pro tyto body. Tyto body se vybírají tak, aby byly jasně dané okrajové podmínky daného stavu a výpočet souřadnic byl co nejjednodušší. Tento postup je méně přesný a za předpokladu, že máme k dispozici tabulkový editor, kterému nezáleží na množství bodů, které počítá, je pravděpodobně efektivnější použít metodu mezních přetvoření v plném rozsahu. Berme však v potaz, že zejména historicky tento předpoklad nebylo možné splnit a v tu chvíli se ukazuje zjednodušení na několik významných bodů jako velice efektivní.

Mezi těmito body by rozhodně neměl chybět prostý tlak ani prostý tah. Tyto body definují maximální resp. minimální hodnotu normálové síly. Ohybový moment je v těchto bodech však minimální, a proto je nutné vybrat body, které definují možnosti namáhání právě ohybovým momentem. Tím může být stav, kdy v tažené výztuži právě dosahujeme meze kluzu. Bude to bod, který nám ukáže maximální hodnotu ohybového momentu. Dalšími body mohou být ty, které jsou určeny nulovým přetvořením v horní,

resp. dolní výztuži. Posledním zajímavým bodem pro výpočet může být bod s nulovou souřadnicí normálové síly – prostý ohyb.

Spočítáme-li těchto 6 bodů, pro horní i dolní výztuž, získáme obdobnou uzavřenou křivku jako metodou mezních přetvoření v plném rozsahu. Ani u jednoho z postupů však nesmíme zapomenout na minimální výstřednost definovanou v normě. Jedná se o jakési omezení zatížení prostým tlakem, které na reálné konstrukci v podstatě nikdy nenastane. Proto norma zavádí minimální výstřednost  $e_0$ , pro kterou platí následující vztah:

$$e_0 = \max \left\{ \frac{h}{30}; 20\text{mm} \right\} \quad (33)$$

$h$       výška průřezu ve směru namáhání

Jelikož do výpočtu zavádíme minimální výstřednost, vždy vzniká ohybový moment a tím pádem nikdy nenastane prostý tlak. Toto omezení může být do interakčního diagramu vyznačeno, ale pokud je započítáno v zatížení, je to zbytečné.

## Návrh štíhlého betonového pilíře

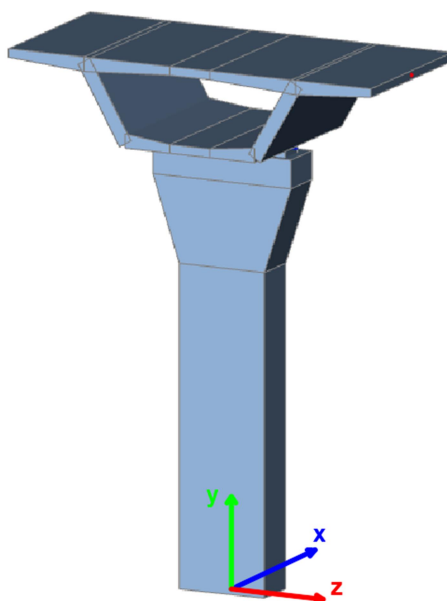
V této části bakalářské práce se zaměříme na návrh konkrétního štíhlého pilíře dálničního mostu. Nejprve je však vhodné zmínit několik informací o mostu jako celku. Jedná se o dilatačně oddělený dálniční most, jenž je součástí delší estakády přes inundační území řeky Labe poblíž města Opatovice nad Labem. Estakáda bude součástí dálnice D35 vedoucí od Hradce Králové přes Opatovice nad Labem, Vysoké Mýto a Mohelnicí na Olomouc a tvořící tzv. „Severní alternativu“ dálnice D1.

Most je navržen jako spojitý nosník s délkou 170 metrů o třech polích s délkami 52,5 metrů pro obě krajní pole a 65 metrů pro střední pole. Právě střední pole přemostuje řeku Labe. Celý úsek dálnice je budován jako 2 souběžné mosty - pro každý směr jeden samostatný most. V řešeném úseku není žádný připojovací pruh ani křížení, chodníky po stranách slouží pouze jako nouzové chodníky.

Základní studie přemostění obsahující 3 varianty návrhu nosné konstrukce proběhla v rámci projektu na katedře Betonových a zděných konstrukcí Fakulty stavební ČVUT v Praze. Pro nás je teď ale důležitá pouze vítězná varianta s komorovým průřezem budována technologií letmé betonáže. Ta byla zpracována

detailněji a právě na ni navazuje tato bakalářská práce. Podklady vycházejí z reálné situace s pozměněnou výškou terénu za účelem prodloužení pilířů. Tím bylo dosaženo toho, že se opravdu jedná o štíhlé pilíře tak, jak je vhodné pro účely této bakalářské práce. Návrh založení pilířů je zpracován v samostatném projektu na katedře Geotechniky Fakulty stavební ČVUT v Praze. Ze situace byl vybrán nejvyšší pilíř s pevnými ložisky. Důvodem je možnost aplikovat jeho návrh i na ostatní pilíře, jelikož na ně bude působit vždy už jen méně nepříznivé zatížení a menší vliv vzpěru. Tvar a rozměry pilíře byly odhadnuty v projektu a v této práci budou podrobeny detailnější analýze.

Důležité je určit souřadný systém nutný pro další výpočty. Obrázek 21 vše jasně vysvětluje. Směr staničení je shodný s osou  $x$ .



Obrázek 21: Schéma konstrukce

## Zatížení

Výpočet jednotlivých zatěžovacích stavů i jejich kombinací je proveden v příloze 1 – Výpočet zatížení. Většina dat je převzata z předcházejících projektů. Cílem je vyvodit co nejnepříznivější účinky na pilíř. Pilíře mají specifickou vlastnost v tom, že ne vždy nejhůře snášejí účinek kombinace s největšími hodnotami zatížení. Osově zatížení tlakem často působí v náš prospěch, jelikož má podobný efekt jako předpětí. Někdy je proto důležitější kombinace s menší normálovou silou a vysokou hodnotou ohybového momentu než se stejným momentovým zatížením ale vyšší normálovou silou.

Kombinace se skládají v principu ze 4 uvažovaných zatěžovacích stavů. Prvním stavem je situace, kdy máme pilíř již zhotoven, ale nosná konstrukce je ještě ve výstavbě a není tedy propojena s ostatními částmi nosné konstrukce. Výstavba nosné konstrukce je uvažována technologií letmé betonáže a veškerou tíhu mostovky i případné vnější vlivy tak musí nést jediný pilíř. Na konstrukci také nejsou instalovány římsy, vozovka ani zařízení mostu.

Druhý stav nastává již za provozu. Mostovka je tedy plně vybavena a zatížena dopravou, přesněji modelem LM1.

Třetí stav je téměř shodný s druhým, jen s tím rozdílem, že místo modelu LM1 působí na konstrukci model LM2.

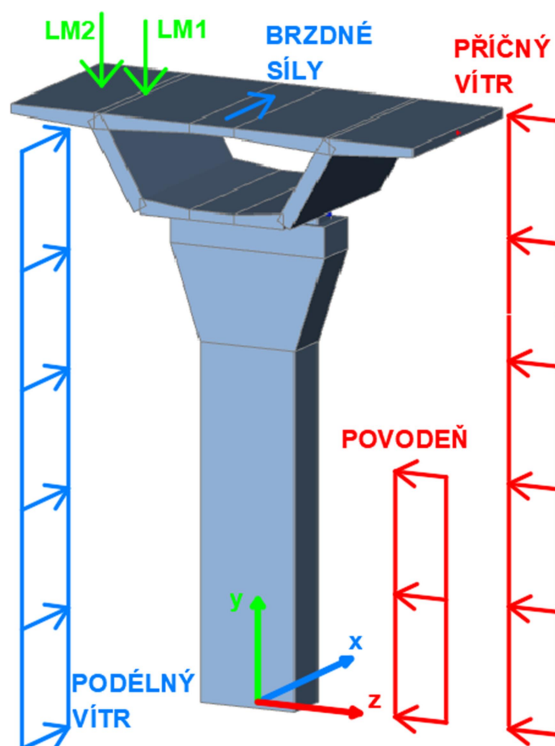
Čtvrtý stav pak simuluje opět hotovou konstrukci, avšak bez jakéhokoliv zatížení dopravou. Další modely zatížení dopravou jsou za účelem zjednodušení bakalářské práce vyloučeny. Vlivy teplotních změn rovněž nejsou uvažovány, jelikož uložení mostovky na ostatní pilíře je provedeno na posuvných ložiskách.

Pro každý z výše zmíněných stavů pak uvažujeme situace, kdy zatížení vlastní tíhou působí příznivě anebo naopak negativně. Tím se ze 4 stavů dostáváme na 8. Nakonec je počet kombinací znásoben třemi stavy příčného vodorovného zatížení. V příčném směru na konstrukci mohou působit v podstatě pouze 2 zatížení. Prvním z nich je zatížení větrem, který se opře o plochu mostovky i pilíře samotného. Jak již bylo zmíněno na začátku této kapitoly, most vede přes záplavové území, tudíž druhým zatížením působícím v příčném směru je tlak vody při hladině v řece na úrovni stoleté vody. Tato dvě zatížení jsou vždy uvažována jak samostatně, tak i společně. Otázkou je, zda a jaký kombinační součinitel u těchto zatížení použít. Po rozvaze byla ve výpočtu ponechána možnost koeficient měnit, avšak jeho hodnota je rovna  $\psi_0 = 1,0$ , přesto, že stoupající hladina snižuje plochu, na kterou může vítr působit. Většina účinků zatížení větrem totiž pochází z tlaku na plochu nosné konstrukce, která nebude hladinou vody nijak omezena. Záplavy navíc bývají často doprovázeny silným větrem, což vedlo k zavedení právě této hodnoty. Každopádně jsme se zastavili na počtu 24 kombinací. Konkrétní působení jednotlivých zatížení v kombinacích je zřetelné z tabulky 5.

Ještě je nutné zmínit, že během výstavbové fáze je uvažováno zatížení větrem i v podélném směru. Počítá se totiž s tím, že během počátečních betonáží nosné

konstrukce nemusí být ještě na druhé straně zhotoven pilíř, který by tomuto proudění bránil.

Na obrázku 22 je znázorněno zjednodušené schéma působení zatížení na konstrukci. Vlastní tíha, ať už jakékoli části konstrukce, je vždy uvažována ve směru osy  $y$  dle obrázku, se zápornou hodnotou a centricky vůči ose pilíře. Zatížení dopravou LM1 a LM2 působí excentricky a vyvozují tedy ohybový moment  $M_x$ .



Obrázek 22: Schéma působení zatížení

| <b>KOMBINAČNÍ KLÍČ</b> |                |                             |               |             |
|------------------------|----------------|-----------------------------|---------------|-------------|
| <b>VYSTAVBA</b>        |                |                             |               |             |
| #                      | Smysl působení | Směr účinku zatížení        |               |             |
|                        |                | Svislý                      | Příčný        | Podélný     |
| 1                      | -              | Vlastní tíha                | Vítr, povodeň | Vítr        |
|                        | +              | -                           | -             | -           |
| 2                      | -              | Vlastní tíha                | Vítr          | Vítr        |
|                        | +              | -                           | -             | -           |
| 3                      | -              | Vlastní tíha                | Povodeň       | Vítr        |
|                        | +              | -                           | -             | -           |
| 4                      | -              | -                           | Vítr, povodeň | Vítr        |
|                        | +              | Vlastní tíha                | -             | -           |
| 5                      | -              | -                           | Vítr          | Vítr        |
|                        | +              | Vlastní tíha                | -             | -           |
| 6                      | -              | -                           | Povodeň       | Vítr        |
|                        | +              | Vlastní tíha                | -             | -           |
| <b>PO DOKONČENÍ</b>    |                |                             |               |             |
| #                      | Smysl působení | Směr účinku zatížení        |               |             |
|                        |                | Svislý                      | Příčný        | Podélný     |
| 7                      | -              | Vlastní tíha, doprava - LM1 | Vítr, povodeň | Brzdné síly |
|                        | +              | -                           | -             | -           |
| 8                      | -              | Vlastní tíha, doprava - LM1 | Vítr          | Brzdné síly |
|                        | +              | -                           | -             | -           |
| 9                      | -              | Vlastní tíha, doprava - LM1 | Povodeň       | Brzdné síly |
|                        | +              | -                           | -             | -           |
| 10                     | -              | Doprava - LM1               | Vítr, povodeň | Brzdné síly |
|                        | +              | Vlastní tíha                | -             | -           |
| 11                     | -              | Doprava - LM1               | Vítr          | Brzdné síly |
|                        | +              | Vlastní tíha                | -             | -           |
| 12                     | -              | Doprava - LM1               | Povodeň       | Brzdné síly |
|                        | +              | Vlastní tíha                | -             | -           |
| 13                     | -              | Vlastní tíha, doprava - LM2 | Vítr, povodeň | Brzdné síly |
|                        | +              | -                           | -             | -           |
| 14                     | -              | Vlastní tíha, doprava - LM2 | Vítr          | Brzdné síly |
|                        | +              | -                           | -             | -           |
| 15                     | -              | Vlastní tíha, doprava - LM2 | Povodeň       | Brzdné síly |
|                        | +              | -                           | -             | -           |
| 16                     | -              | Doprava - LM2               | Vítr, povodeň | Brzdné síly |
|                        | +              | Vlastní tíha                | -             | -           |
| 17                     | -              | Doprava - LM2               | Vítr          | Brzdné síly |
|                        | +              | Vlastní tíha                | -             | -           |
| 18                     | -              | Doprava - LM2               | Povodeň       | Brzdné síly |
|                        | +              | Vlastní tíha                | -             | -           |
| 19                     | -              | Vlastní tíha                | Vítr, povodeň | -           |
|                        | +              | -                           | -             | -           |
| 20                     | -              | Vlastní tíha                | Vítr          | -           |
|                        | +              | -                           | -             | -           |
| 21                     | -              | Vlastní tíha                | Povodeň       | -           |
|                        | +              | -                           | -             | -           |
| 22                     | -              | -                           | Vítr, povodeň | -           |
|                        | +              | Vlastní tíha                | -             | -           |
| 23                     | -              | -                           | Vítr          | -           |
|                        | +              | Vlastní tíha                | -             | -           |
| 24                     | -              | -                           | Povodeň       | -           |
|                        | +              | Vlastní tíha                | -             | -           |

Tabulka 5: Kombinační klíč

V tabulce 6 lze pak nalézt číselné hodnoty vypočtených kombinací před a po zavedení minimální výstřednosti  $e_0$ . Tato zatížení jsou všechna prvního řádu, tedy bez započítání účinků dotvarování, trhlin atd. Hodnoty zatížení ohybovým momentem jsou rovnoměrně rozděleny na záporné a kladné proto, aby se při posuzování v interakčním diagramu zobrazovaly na obou stranách svislé osy a posouzení bylo přehlednější. Toto lze provést, pokud máme zatížení, jenž může působit v obou směrech symetricky a plánujeme tak symetrické vyztužení pilíře v obou směrech. Jinak by samozřejmě znaménka odpovídala smyslu působení zatížení.

| Kombinace zatížení |               | Posouvající síly |                | Moment I. řádu bez zavedení $e_0$ |                 | Moment I. řádu se zavedení $e_0$ |                 |
|--------------------|---------------|------------------|----------------|-----------------------------------|-----------------|----------------------------------|-----------------|
| #                  | $N_{Ed}$ [kN] | $V_{edx}$ [kN]   | $V_{edz}$ [kN] | $M_{edx}$ [kNm]                   | $M_{edz}$ [kNm] | $M_{edx}$ [kNm]                  | $M_{edz}$ [kNm] |
| 1                  | -28917,32     | 120,01           | 384,47         | 5340,37                           | 1191,97         | 5340,37                          | 1927,82         |
| 2                  | -28917,32     | 120,01           | 370,97         | 5293,89                           | -1191,97        | 5293,89                          | -1927,82        |
| 3                  | -28917,32     | 120,01           | 13,51          | 46,48                             | 1191,97         | 3084,51                          | 1927,82         |
| 4                  | -21420,24     | 120,01           | 384,47         | -5340,37                          | -1191,97        | -5340,37                         | -1428,02        |
| 5                  | -21420,24     | 120,01           | 370,97         | -5293,89                          | 1191,97         | -5293,89                         | 1428,02         |
| 6                  | -21420,24     | 120,01           | 13,51          | -46,48                            | -1191,97        | -2284,83                         | -1428,02        |
| 7                  | -39457,65     | 2667,38          | 377,75         | 22033,00                          | 40714,81        | 22033,00                         | 40714,81        |
| 8                  | -39457,65     | 2667,38          | 364,24         | 21986,52                          | -40714,81       | 21986,52                         | -40714,81       |
| 9                  | -39457,65     | 2667,38          | 13,51          | 16841,72                          | 40714,81        | 16841,72                         | 40714,81        |
| 10                 | -30883,46     | 2667,38          | 377,75         | -22033,00                         | -40714,81       | -22033,00                        | -40714,81       |
| 11                 | -30883,46     | 2667,38          | 364,24         | -21986,52                         | 40714,81        | -21986,52                        | 40714,81        |
| 12                 | -30883,46     | 2667,38          | 13,51          | -16841,72                         | -40714,81       | -16841,72                        | -40714,81       |
| 13                 | -33551,86     | 2667,38          | 377,75         | 7577,76                           | 40714,81        | 7577,76                          | 40714,81        |
| 14                 | -33551,86     | 2667,38          | 364,24         | 7531,28                           | -40714,81       | 7531,28                          | -40714,81       |
| 15                 | -33551,86     | 2667,38          | 13,51          | 2386,48                           | 40714,81        | 3578,87                          | 40714,81        |
| 16                 | -24977,68     | 2667,38          | 377,75         | -7577,76                          | -40714,81       | -7577,76                         | -40714,81       |
| 17                 | -24977,68     | 2667,38          | 364,24         | -7531,28                          | 40714,81        | -7531,28                         | 40714,81        |
| 18                 | -24977,68     | 2667,38          | 13,51          | -2386,48                          | -40714,81       | -2664,29                         | -40714,81       |
| 19                 | -33071,86     | 0,00             | 377,75         | 5237,76                           | 0,00            | 5237,76                          | 2204,79         |
| 20                 | -33071,86     | 0,00             | 364,24         | 5191,28                           | 0,00            | 5191,28                          | 2204,79         |
| 21                 | -33071,86     | 0,00             | 13,51          | 46,48                             | 0,00            | 3527,67                          | 2204,79         |
| 22                 | -24497,68     | 0,00             | 377,75         | -5237,76                          | 0,00            | -5237,76                         | 1633,18         |
| 23                 | -24497,68     | 0,00             | 364,24         | -5191,28                          | 0,00            | -5191,28                         | 1633,18         |
| 24                 | -24497,68     | 0,00             | 13,51          | -46,48                            | 0,00            | -2613,09                         | 1633,18         |

Tabulka 6: Hodnoty zatížení

## Návrh ohybové vyztuže

Ve výpočtech je počítáno se zjednodušeným tvarem pilíře. Jsou zanedbány zkosení v rozích a rozšíření v hlavě pilíře, jelikož na vzpěr mají oba faktory spíše kladný vliv.

Prvotní dimenze pilíře byly odhadnuty v rámci předcházejících projektů. Půdorysné rozměry stanovené na 3200 mm x 1600 mm v patě pilíře a 5200 mm x 1600 mm nevyhověly hned při prvním orientačním zadání do interakčního diagramu. Klíčovým se od začátku jeví podélný rozměr 1600 mm. Ten byl nejprve upraven na



1800 mm, což bylo pro účinky I. řádu hraniční, ale pro účinky II. řádu nevyhovující. Proto se nakonec tento rozměr pilíře zastavil na hodnotě 2000 mm. Druhý rozměr pilíře zůstal nezměněn.

## Interakční diagram

Při návrhu bylo hojně využito automatizovaného 2D interakčního diagramu pro stanovení množství potřebné výztuže. Ten byl vytvořen na základě metody mezních poměrných přetvoření tak, jak je popsáno v kapitole o této metodě výše. Program MS Excel se prokázal jako naprosto dostačující platforma.

Odvažme se automatizovaný interakční diagram nazývat zjednodušeným programem. Skládá se z 5 listů, každý s jedním pracovním diagramem a k němu příslušnými zadávacími daty a výsledky. První list slouží jako pracovní verze a pracuje samostatně. Další čtyři listy jsou rozděleny do dvojic a spolupracují spolu. První dva slouží k návrhu, kdy by měla být zadávána zatížení bez účinků II. řádu, přičemž každý z listů zkoumá jeden z na sebe navzájem kolmých směrů. Výsledky se použijí ke statickému výpočtu a k výpočtům účinků II. řádu. Ty jsou pak posouzeny v druhých dvou listech, opět pro každý směr jeden samostatný list.

V levém horním rohu se nachází jakýsi návod, který dává uživateli pokyny k užívání programu. Pro vykreslení diagramu je potřeba vyplnit zabarvená políčka, postupně v částech Rozměry pilíře, Vlastnosti betonu, Vlastnosti výztuže a nakonec Výztuž, ve které je upravena geometrie a rozmístění výztuže po průřezu. Spolupracující listy si poskytují data, takže ty hodnoty, které jsou stejné pro oba směry, není nutné zadávat vícekrát. Pro jistotu nenarušení vzorcového propojení programu jsou listy uzamčeny s možností přepsání pouze zabarvených polí. V návodu se také nachází informace o užití pracovních diagramů jednotlivých materiálů. Konkrétně je to bilineární pracovní diagram pro beton a bilineární pracovní diagram se zpevněním pro ocelovou výztuž.

Program umožňuje posuzování jedné nebo dvou řad výztuže, symetricky i asymetricky umístěné podle obou os s tím, že pro zadanou výztuž spočítá i doplňující hodnoty do navazujících statických výpočtů jako těžiště, moment setrvačnosti nebo například plochu.

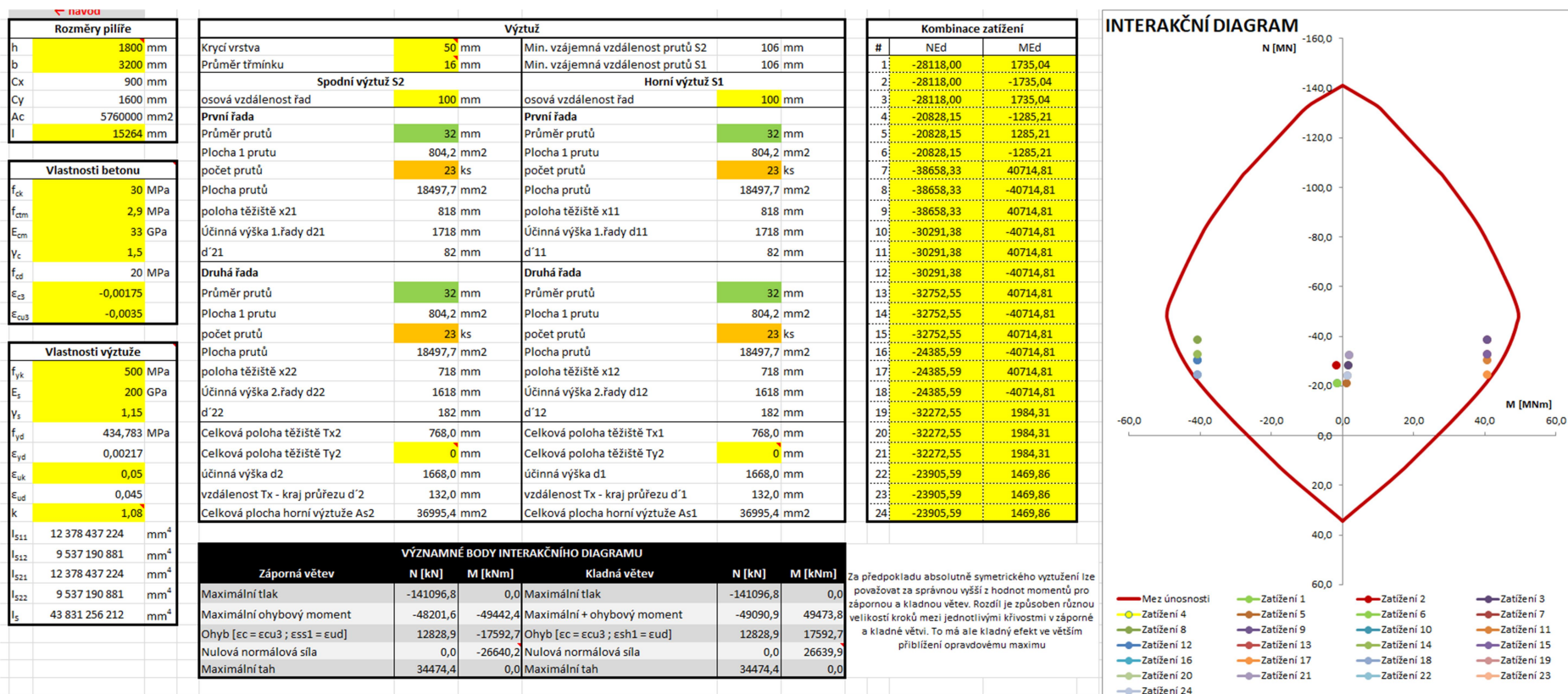
Po vyplnění všech charakteristik průřezu se vykreslí interakční diagram pro daný směr. Je tedy ještě nutné zadat hodnoty zatížení a posoudit, zda průřez vyhoví nebo ne. Program poskytuje možnost posoudit až 24 různých kombinací zatížení. To se zadává v části Kombinace zatížení a automaticky se vykreslí do diagramu. Tam pak stačí opticky zkontrolovat, jestli se body o daných hodnotách ohybového momentu a normálové síly nacházejí uvnitř nebo vně křivky meze únosnosti pilíře. Hodnoty zatížení jsou vypočteny v příloze 1 - Výpočet zatížení, nebo v tabulce 6.

Aby byl zajištěný hladký průběh grafu diagramu, bylo zvoleno rozdělení na 200 bodů s různým stavem poměrných přetvoření po průřezu. Dále se postupuje obdobně podle kapitoly o metodě mezních přetvoření.

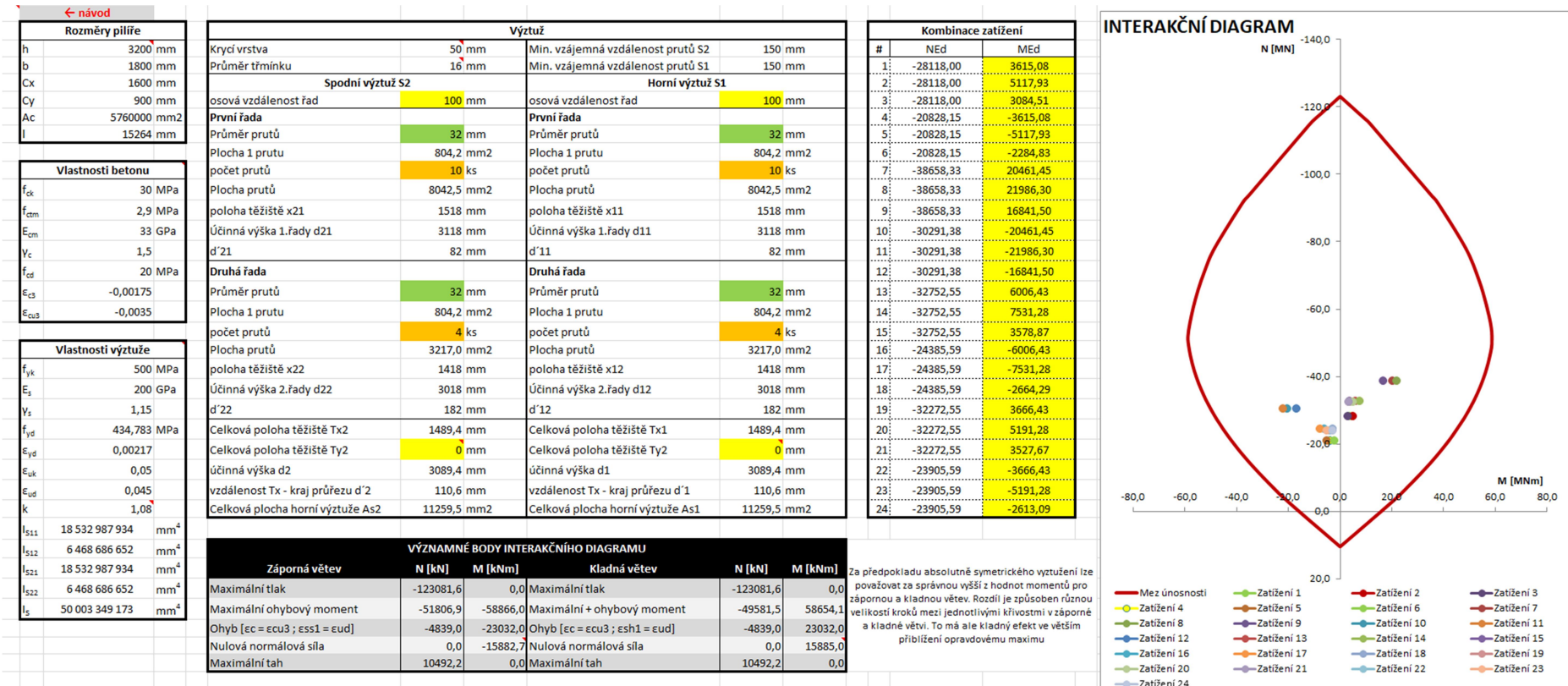
### **Prvotní návrh pomocí interakčního diagramu**

Na následujících obrázcích jsou vidět vstupní i výsledná data z programu při prvotním odhadu geometrie průřezu. Obrázek 23 zachycuje průřez namáhaný ohybem podle osy z. Obrázek 24 pak průřez namáhaný ohybem podle osy x.

Zatížení zde ještě není upraveno o účinky druhého řádu. Data z programu s těmito hodnotami jsou použity jako vstup pro statický výpočet, viz příloha 2. Některá však musela být upravena tak, aby průřez právě těmito účinkům odolal.



Obrázek 23: Automatizovaný ID – 1. řád osa z



Obrázek 24: Automatizovaný ID – 1.řád osa x

## Vyšetřování účinků II. řádu

V příloze 2 – Statický výpočet se nachází ověření štíhlostního kritéria, čímž zjistíme, jestli je nutné uvažovat při návrhu pilíře účinky druhého řádu. V našem případě to rozhodně nutné je. Ve výpočtu hodnoty štíhlosti pilíře  $\lambda$  byla použita hodnota vzpěrného součinitele  $\beta = 3$  přesto, že pilíře staticky působí jako vetknutí. Při hlubším zamyšlení si však musíme položit otázku, jak dokonalé toto vetknutí může být. Pro dokonalé vetknutí se uvažuje hodnota  $\beta = 2$ , avšak pokud umožníme již drobné pootočení ve vetknutí, hodnota součinitele stoupá. S přihlédnutím na výsledku z návrhu skupiny pilot jakožto založení pilíře jsme nakonec zvolili hodnotu součinitele  $\beta = 3$  bez dalších výpočtů opravdové tuhosti vetknutí. Jedná se rozhodně o reálnější a konzervativnější hodnotu, než uvažovat dokonalé vetknutí.

Účinky druhého řádu jsou vyšetřovány pomocí obou zjednodušených metod uvedených v normě a následně porovnány. Detailní výpočet metodami založenými na jmenovité tuhosti i jmenovité křivosti se nachází v příloze 2 – Statický výpočet. Je zde počítáno s maximálními hodnotami zatížení.

Součinitel závislý na průběhu momentu prvního řádu v metodě založené na jmenovité tuhosti byl stanoven  $c_0 = 9,6$ . Důvodem bylo lineární zatížení větrem vyvolující parabolický průběh momentu prvního řádu.

Součinitel závislý na rozdělení křivosti v metodě založené na jmenovité křivosti byl zvolen  $c = 10$ , jelikož podle normy lze pro konstantní průřez uvažovat tuto hodnotu. Jak již bylo zmíněno na začátku této kapitoly, rozšíření pilíře v hlavě je zanedbáno, tudíž se ve výpočtech jedná skutečně o konstantní průřez.

## Dvouosé namáhání

V normě jsou uvedena určitá kritéria, kdy je možné od posuzování ovlivňování jednotlivých směrů navzájem upustit. Pak stačí pouze posoudit jednotlivé směry, každý zvlášť. V našem případě však kritéria splněna nebyla a muselo dojít k posouzení dvouosého namáhání. Toto kritérium se nakonec ukázalo jako rozhodující a interakce namáhání v různých směrech tedy rozhodovala o dimenzích pilíře. Nakonec se podařilo splnit zjednodušené kritérium pro posouzení dvouosého namáhání, jehož kapacita je vyčerpána na 96,61%, viz příloha 2 – Statický výpočet.

## Posouzení ohybové výztuže

Posouzení ohybové výztuže proběhlo opět ve zjednodušeném programu interakčního diagramu. Výsledky posouzení si lze prohlédnout na obrázcích 25 a 26. Návrh ohybové výztuže vyhověl posouzení.

Při posouzení je ohybová výztuž pro daný směr uvažována pouze ve dvou řadách zavedených v programu. Výztuž použitá ve směru  $x$  se neprojevuje v interakčním diagramu pro směr  $z$ . Tato výztuž by lehce zvedla únosnost pilíře pro namáhání v tomto směru.

Stejně tak není uvažována ohybová výztuž ze směru  $z$  do únosnosti ve směru  $x$ , i když v tomto případě by vliv byl veliký. Pravděpodobně by stačila samotná ohybová výztuž ze směru  $z$  i pro přenesení účinků zatížení ve směru  $x$ . Pokud však vezmeme v úvahu i efekt dvouosého namáhání zjistíme, že by množství výztuže bylo potřebné právě pro splnění kritérií dvouosého namáhání.

← návod

| Rozměry pilíře |                         |
|----------------|-------------------------|
| h              | 2000 mm                 |
| b              | 3200 mm                 |
| Cx             | 1000 mm                 |
| Cy             | 1600 mm                 |
| Ac             | 6400000 mm <sup>2</sup> |
| I              | 15264 mm <sup>4</sup>   |

| Vlastnosti betonu |           |
|-------------------|-----------|
| f <sub>ck</sub>   | 35 MPa    |
| f <sub>ctm</sub>  | 3,2 MPa   |
| E <sub>cm</sub>   | 34 GPa    |
| γ <sub>c</sub>    | 1,5       |
| f <sub>cd</sub>   | 23,33 MPa |
| ε <sub>cs</sub>   | -0,00175  |
| ε <sub>cu3</sub>  | -0,0035   |

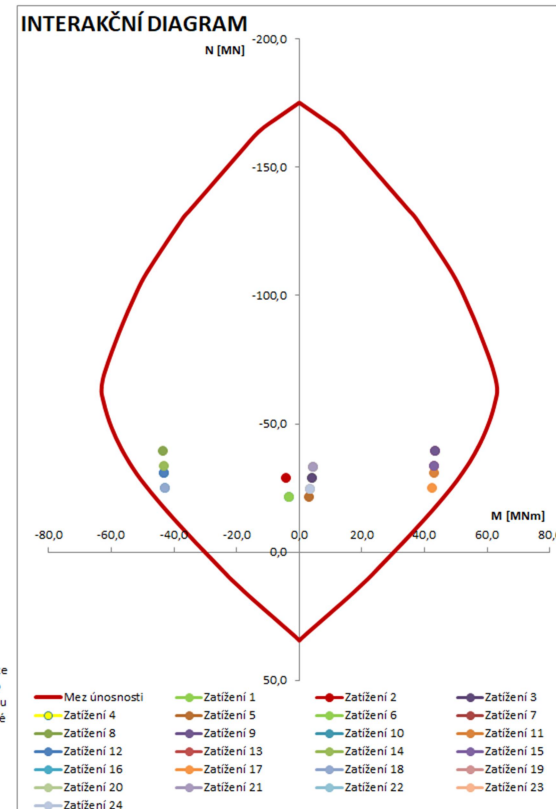
| Vlastnosti výztuže |                                |
|--------------------|--------------------------------|
| f <sub>yk</sub>    | 500 MPa                        |
| E <sub>s</sub>     | 200 GPa                        |
| γ <sub>s</sub>     | 1,15                           |
| f <sub>yd</sub>    | 434,783 MPa                    |
| ε <sub>yd</sub>    | 0,00217                        |
| ε <sub>uk</sub>    | 0,05                           |
| ε <sub>ud</sub>    | 0,045                          |
| k                  | 1,08                           |
| I <sub>s11</sub>   | 14 976 868 313 mm <sup>4</sup> |
| I <sub>s12</sub>   | 12 354 480 293 mm <sup>4</sup> |
| I <sub>s21</sub>   | 14 976 868 313 mm <sup>4</sup> |
| I <sub>s22</sub>   | 12 354 480 293 mm <sup>4</sup> |
| I <sub>s</sub>     | 54 662 697 212 mm <sup>4</sup> |

| Výztuž                           |                         |                                   |                         |  |  |
|----------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-------------------------|--|--|
| Krycí vrstva                     | 50 mm                   | Min. vzájemná vzdálenost prutů S2 | 100 mm                  |  |  |
| Průměr třmínku                   | 14 mm                   | Min. vzájemná vzdálenost prutů S1 | 100 mm                  |  |  |
| Spodní výztuž S2                 |                         |                                   | Horní výztuž S1         |  |  |
| osová vzdálenost řad             | 120 mm                  | osová vzdálenost řad              | 120 mm                  |  |  |
| První řada                       |                         |                                   | První řada              |  |  |
| Průměr prutů                     | 32 mm                   | Průměr prutů                      | 32 mm                   |  |  |
| Plocha 1 prutu                   | 804,2 mm <sup>2</sup>   | Plocha 1 prutu                    | 804,2 mm <sup>2</sup>   |  |  |
| počet prutů                      | 22 ks                   | počet prutů                       | 22 ks                   |  |  |
| Plocha prutů                     | 17693,4 mm <sup>2</sup> | Plocha prutů                      | 17693,4 mm <sup>2</sup> |  |  |
| poloha těžiště x21               | 920 mm                  | poloha těžiště x11                | 920 mm                  |  |  |
| Účinná výška 1.řady d21          | 1920 mm                 | Účinná výška 1.řady d11           | 1920 mm                 |  |  |
| d'21                             | 80 mm                   | d'11                              | 80 mm                   |  |  |
| Druhá řada                       |                         |                                   | Druhá řada              |  |  |
| Průměr prutů                     | 32 mm                   | Průměr prutů                      | 32 mm                   |  |  |
| Plocha 1 prutu                   | 804,2 mm <sup>2</sup>   | Plocha 1 prutu                    | 804,2 mm <sup>2</sup>   |  |  |
| počet prutů                      | 24 ks                   | počet prutů                       | 24 ks                   |  |  |
| Plocha prutů                     | 19301,9 mm <sup>2</sup> | Plocha prutů                      | 19301,9 mm <sup>2</sup> |  |  |
| poloha těžiště x22               | 800 mm                  | poloha těžiště x12                | 800 mm                  |  |  |
| Účinná výška 2.řady d22          | 1800 mm                 | Účinná výška 2.řady d12           | 1800 mm                 |  |  |
| d'22                             | 200 mm                  | d'12                              | 200 mm                  |  |  |
| Celková poloha těžiště Tx2       | 857,4 mm                | Celková poloha těžiště Tx1        | 857,4 mm                |  |  |
| Celková poloha těžiště Ty2       | 0 mm                    | Celková poloha těžiště Ty1        | 0 mm                    |  |  |
| účinná výška d2                  | 1857,4 mm               | účinná výška d1                   | 1857,4 mm               |  |  |
| vzdálenost Tx - kraj průřezu d'2 | 142,6 mm                | vzdálenost Tx - kraj průřezu d'1  | 142,6 mm                |  |  |
| Celková plocha horní výztuže As2 | 36995,4 mm <sup>2</sup> | Celková plocha horní výztuže As1  | 36995,4 mm <sup>2</sup> |  |  |

| Kombinace zatížení |           |           |
|--------------------|-----------|-----------|
| #                  | NEd       | MEd       |
| 1                  | -28917,32 | 4122,82   |
| 2                  | -28917,32 | -4122,82  |
| 3                  | -28917,32 | 4122,82   |
| 4                  | -21420,24 | -3133,84  |
| 5                  | -21420,24 | 3133,84   |
| 6                  | -21420,24 | -3133,84  |
| 7                  | -39457,65 | 43556,41  |
| 8                  | -39457,65 | -43556,41 |
| 9                  | -39457,65 | 43556,41  |
| 10                 | -30883,46 | -43041,69 |
| 11                 | -30883,46 | 43041,69  |
| 12                 | -30883,46 | -43041,69 |
| 13                 | -33551,86 | 43206,90  |
| 14                 | -33551,86 | -43206,90 |
| 15                 | -33551,86 | 43206,90  |
| 16                 | -24977,68 | -42659,73 |
| 17                 | -24977,68 | 42659,73  |
| 18                 | -24977,68 | -42659,73 |
| 19                 | -33071,86 | 4646,78   |
| 20                 | -33071,86 | 4646,78   |
| 21                 | -33071,86 | 4646,78   |
| 22                 | -24497,68 | 3546,57   |
| 23                 | -24497,68 | 3546,57   |
| 24                 | -24497,68 | 3546,57   |

| VÝZNAMNÉ BODY INTERAKČNÍHO DIAGRAMU  |           |          |  |           |         |
|--|-----------|----------|--|-----------|---------|
| Záporná větev  | N [kN]    | M [kNm]  | Kladná větev   | N [kN]    | M [kNm] |
| Maximální tlak   | -175230,1 | 0,0      | Maximální tlak   | -175230,1 | 0,0     |
| Maximální ohybový moment   | -62683,0  | -63191,6 | Maximální + ohybový moment   | -63916,4  | 63171,8 |
| Ohyb [ε <sub>c</sub> = ε <sub>cu3</sub> ; ε <sub>ss1</sub> = ε <sub>ud</sub> ] | 10085,1   | -22206,0 | Ohyb [ε <sub>c</sub> = ε <sub>cu3</sub> ; ε <sub>sh1</sub> = ε <sub>ud</sub> ] | 10085,1   | 22206,0 |
| Nulová normálová síla  | 0,0       | -30150,9 | Nulová normálová síla  | 0,0       | 30150,9 |
| Maximální tah  | 34474,4   | 0,0      | Maximální tah  | 34474,4   | 0,0     |

Za předpokladu absolutně symetrického vyztužení lze považovat za správnou vyšší z hodnot momentů pro zápornou a kladnou větev. Rozdíly je způsoben různou velikostí kroků mezi jednotlivými křivkami v záporné a kladné větvi. To má ale kladný efekt ve větším přiblížení opravdovému maximu



Obrázek 25: Automatizovaný ID – 2.řád osa z

← návod

| Rozměry pilíře |                        |
|----------------|------------------------|
| h              | 3200 mm                |
| b              | 2000 mm                |
| Cx             | 1600 mm                |
| Cy             | 1000 mm                |
| Ac             | 640000 mm <sup>2</sup> |
| l              | 15264 mm               |

| Vlastnosti betonu |                 |
|-------------------|-----------------|
| f <sub>ck</sub>   | 35 MPa          |
| f <sub>ctm</sub>  | 3,2 MPa         |
| E <sub>cm</sub>   | 34 GPa          |
| γ <sub>c</sub>    | 1,5             |
| f <sub>cd</sub>   | 23,33333333 MPa |
| E <sub>cs</sub>   | -0,00175        |
| E <sub>cu3</sub>  | -0,0035         |

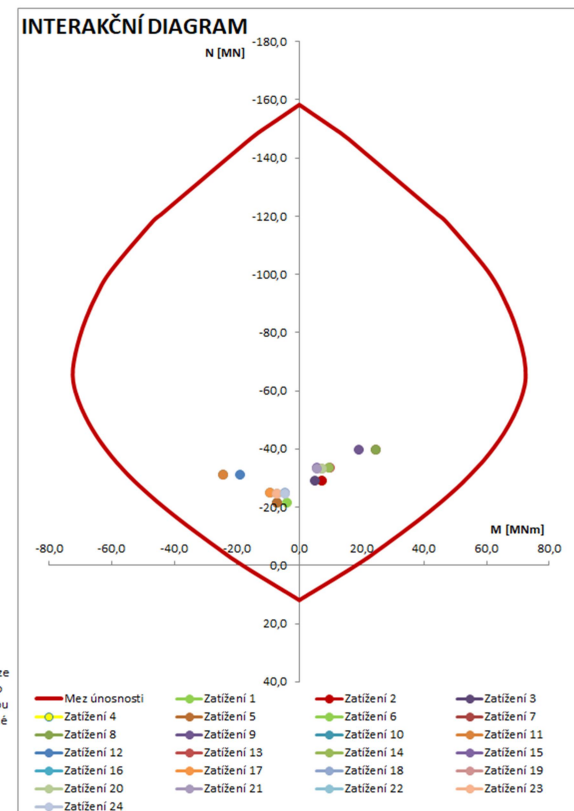
| Vlastnosti výztuže |                                |
|--------------------|--------------------------------|
| f <sub>yk</sub>    | 500 MPa                        |
| E <sub>s</sub>     | 200 GPa                        |
| ν <sub>s</sub>     | 1,15                           |
| f <sub>yd</sub>    | 434,783 MPa                    |
| E <sub>sd</sub>    | 0,00217                        |
| E <sub>sk</sub>    | 0,05                           |
| E <sub>sd</sub>    | 0,045                          |
| k                  | 1,08                           |
| I <sub>s11</sub>   | 14 865 483 221 mm <sup>4</sup> |
| I <sub>s12</sub>   | 10 377 780 947 mm <sup>4</sup> |
| I <sub>s21</sub>   | 14 865 483 221 mm <sup>4</sup> |
| I <sub>s22</sub>   | 10 377 780 947 mm <sup>4</sup> |
| I <sub>s</sub>     | 50 486 528 335 mm <sup>4</sup> |

| Výztuž                           |                         |                                   |                         |
|----------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| Krycí vrstva                     | 50 mm                   | Min. vzájemná vzdálenost prutů S2 | 231 mm                  |
| Průměr trmínku                   | 14 mm                   | Min. vzájemná vzdálenost prutů S1 | 231 mm                  |
| Spodní výztuž S2                 |                         | Horní výztuž S1                   |                         |
| osová vzdálenost řad             | 250 mm                  | osová vzdálenost řad              | 250 mm                  |
| První řada                       |                         | První řada                        |                         |
| Průměr prutů                     | 32 mm                   | Průměr prutů                      | 32 mm                   |
| Plocha 1 prutu                   | 804,2 mm <sup>2</sup>   | Plocha 1 prutu                    | 804,2 mm <sup>2</sup>   |
| počet prutů                      | 8 ks                    | počet prutů                       | 8 ks                    |
| Plocha prutů                     | 6434,0 mm <sup>2</sup>  | Plocha prutů                      | 6434,0 mm <sup>2</sup>  |
| poloha těžiště x21               | 1520 mm                 | poloha těžiště x11                | 1520 mm                 |
| Účinná výška 1.řady d21          | 3120 mm                 | Účinná výška 1.řady d11           | 3120 mm                 |
| d'21                             | 80 mm                   | d'11                              | 80 mm                   |
| Druhá řada                       |                         | Druhá řada                        |                         |
| Průměr prutů                     | 32 mm                   | Průměr prutů                      | 32 mm                   |
| Plocha 1 prutu                   | 804,2 mm <sup>2</sup>   | Plocha 1 prutu                    | 804,2 mm <sup>2</sup>   |
| počet prutů                      | 8 ks                    | počet prutů                       | 8 ks                    |
| Plocha prutů                     | 6434,0 mm <sup>2</sup>  | Plocha prutů                      | 6434,0 mm <sup>2</sup>  |
| poloha těžiště x22               | 1270 mm                 | poloha těžiště x12                | 1270 mm                 |
| Účinná výška 2.řady d22          | 2870 mm                 | Účinná výška 2.řady d12           | 2870 mm                 |
| d'22                             | 330 mm                  | d'12                              | 330 mm                  |
| Celková poloha těžiště Tx2       | 1395,0 mm               | Celková poloha těžiště Tx1        | 1395,0 mm               |
| Celková poloha těžiště Ty2       | 0 mm                    | Celková poloha těžiště Ty1        | 0 mm                    |
| účinná výška d2                  | 2995,0 mm               | účinná výška d1                   | 2995,0 mm               |
| vzdálenost Tx - kraj průřezu d'2 | 205,0 mm                | vzdálenost Tx - kraj průřezu d'1  | 205,0 mm                |
| Celková plocha horní výztuže As2 | 12868,0 mm <sup>2</sup> | Celková plocha horní výztuže As1  | 12868,0 mm <sup>2</sup> |

| Kombinace zatížení |           |           |
|--------------------|-----------|-----------|
| #                  | NEd       | MEd       |
| 1                  | -28917,32 | 7333,42   |
| 2                  | -28917,32 | 7286,95   |
| 3                  | -28917,32 | 5077,57   |
| 4                  | -21420,24 | -6889,26  |
| 5                  | -21420,24 | -6842,78  |
| 6                  | -21420,24 | -3833,71  |
| 7                  | -39457,65 | 24564,63  |
| 8                  | -39457,65 | 24518,15  |
| 9                  | -39457,65 | 19373,34  |
| 10                 | -30883,46 | -24134,13 |
| 11                 | -30883,46 | -24087,66 |
| 12                 | -30883,46 | -18942,85 |
| 13                 | -33551,86 | 9819,98   |
| 14                 | -33551,86 | 9773,51   |
| 15                 | -33551,86 | 5821,09   |
| 16                 | -24977,68 | -9343,74  |
| 17                 | -24977,68 | -9297,26  |
| 18                 | -24977,68 | -4430,27  |
| 19                 | -33071,86 | 7455,08   |
| 20                 | -33071,86 | 7408,60   |
| 21                 | -33071,86 | 5744,99   |
| 22                 | -24497,68 | -6975,11  |
| 23                 | -24497,68 | -6928,64  |
| 24                 | -24497,68 | -4350,44  |

| VÝZNAMNÉ BODY INTERAKČNÍHO DIAGRAMU   |           |          |  |              |         |
|---|-----------|----------|--|--------------|---------|
| Záporná větev   |           | N [kN]   | M [kNm]  | Kladná větev |         |
|   | N [kN]    | M [kNm]  |  | N [kN]       | M [kNm] |
| Maximální tlak  | -158340,9 | 0,0      | Maximální tlak   | -158340,9    | 0,0     |
| Maximální ohybový moment  | -67581,9  | -72496,0 | Maximální + ohybový moment   | -64491,4     | 72469,0 |
| Ohyb [ε <sub>c</sub> = ε <sub>cu3</sub> ; ε <sub>s1</sub> = ε <sub>ud</sub> ] | -2691,3   | -21977,0 | Ohyb [ε <sub>c</sub> = ε <sub>cu3</sub> ; ε <sub>sh1</sub> = ε <sub>ud</sub> ] | -2691,3      | 21977,0 |
| Nulová normálová síla   | 0,0       | -18143,5 | Nulová normálová síla  | 0,0          | 18147,9 |
| Maximální tah   | 11991,1   | 0,0      | Maximální tah  | 11991,1      | 0,0     |

Za předpokladu absolutně symetrického vyztužení lze považovat za správnou vyšší z hodnot momentů pro zápornou a kladnou větev. Rozdíl je způsoben různou velikostí kroků mezi jednotlivými klivostmi v záporné a kladné větvi. To má ale kladný efekt ve větším přiblížení opravdovému maximu



Obrázek 26: Automatizovaný ID – 2.řád osa x



## Návrh a posouzení smykové výztuže

V rámci této návrhu pilíře byl zhotoven i návrh smykové výztuže. Společně s posouzením je taktéž součástí přílohy 2 – Statický výpočet. Hodnota „ $z$ “ je zjednodušeně uvažována  $z = 0,9$ . Návrh smykové výztuže vyhověl posouzení.

Výztuž v rozšíření horní části pilíře do hlavice nebyla podrobena žádnému výpočtu z důvodů zjednodušení této práce. Profily a rozmístění byly odhadnuty a konzultovány s vedoucím bakalářské práce. Stejně tak se postupovalo u výztuže podložiskových bločků.

## Konstrukční řešení

### Podpůrná konstrukce mostovky

Technologií výstavby nosné konstrukce je zamýšlena letná betonáž. Pro tyto účely bude v montážním stádiu nutné vytvořit podpůrnou konstrukci k zajištění stability nosné konstrukce. Vzhledem k požadované výšce a dočasnosti podpůrné konstrukce bylo navrženo železniční pižmo, ke kterému by se mostovka přikotvila pomocí předpínacích kabelů. Korekci by pak umožňovaly hydraulické lisy umístěné na vrchu pižma.

Pro skutečnou funkčnost podpůrné konstrukce je nutné na ni zajistit určitý přítlak. Tím dojde k přenesení části zatížení do pižma a změní se výslednice sil působící na základovou patku a skupinu pilot a tím se může i zvýšit ohybový moment. Berme však v potaz, že se jedná o fázi výstavby, což znamená, že na konstrukci nepůsobí žádné zatížení dopravou ani vlastní tíha mostního vybavení. Únosnost založení pilíře  $N_{Rd}$ , na které působí pouze toto zatížení, dosahuje hodnoty vyčerpání z 21,47% (hodnoty získané z předcházejícího projektu, viz obrázek 27). Proto považujeme únosnost založení mostu za dostačující a není nutné zesilovat piloty kvůli fázi výstavby.

## Posouzení čís. 2

### Vstupní data pro dimenzaci piloty

Výpočet proveden pro kombinaci číslo 4. (VI. tíha + příčné zat.)  
Výztuž navržena pro všechny piloty ve skupině.

### Posouzení na tlak a ohyb

Vyztužení - 12 ks profil 30,0 mm; krytí 88,0 mm  
Typ konstrukce (stupně vyztužení) : pilota  
Stupeň vyztužení  $\rho = 1,080 \% > 0,318 \% = \rho_{\min}$   
Zatížení :  $N_{Ed} = -3014,10 \text{ kN}$  (tlak) ;  $M_{Ed} = 0,00 \text{ kNm}$   
Únosnost :  $N_{Rd} = -14040,73 \text{ kN}$ ;  $M_{Rd} = 468,02 \text{ kNm}$   
**Navržená výztuž piloty VYHOVUJE**

Obrázek 27: Posouzení skupiny pilot

## Závěr

### Porovnání zjednodušených metod analýzy účinků 2. řádu

Obě zjednodušené metody analýzy účinků druhého řádu se jeví jako efektivní nástroje výpočtu, zejména jedná-li se o osamělé prvky. Pilíř navrhovaný v této bakalářské práci je rozhodně osamělým prvkem, a proto užití obou metod nebyl problém. Pokud se však jedná o konstrukce, je vždy nutné u obou metod vhodně zvolit vlivy připojených částí. Je však výhodné, že nám norma poskytuje možnost vybrat si mezi hledáním tuhostí a křivostí.

Pokud obě metody postavíme vedle sebe, jedná se rozhodně o rovnocenné postupy. Náročnost obou metod je v podstatě stejná. Výsledky vycházejí velice podobně, pokud se jedná o větší hodnoty ohybových momentů prvního řádu, které upravujeme na hodnoty druhého řádu. Rozdíly zde jsou v řádech jednotek procent. Pokud se však zaměříme na nižší hodnoty ohybových momentů, jsou rozdíly mnohem větší, dosahují dokonce hodnoty přes 50%, viz tabulka 7.

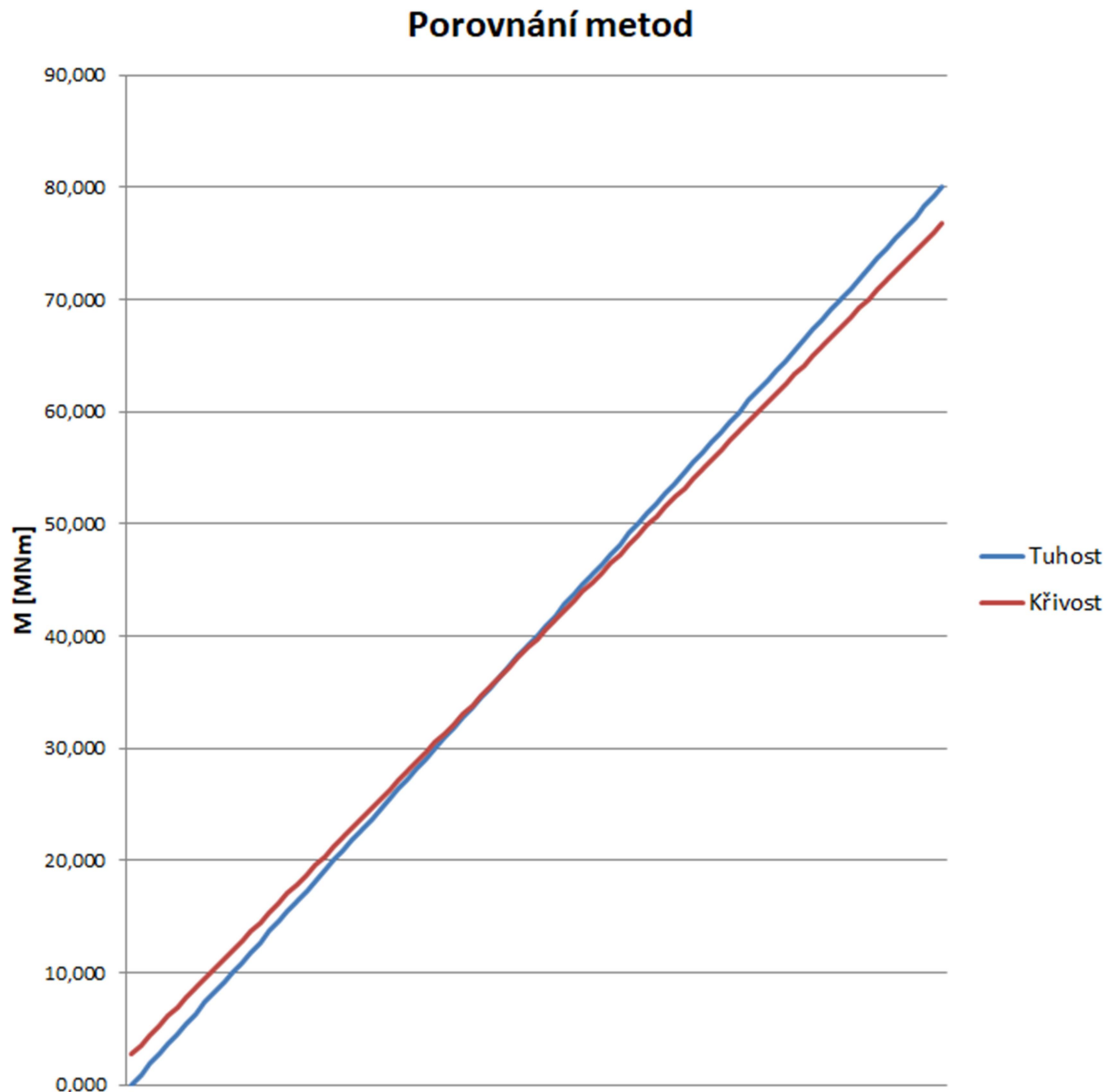
| Kombinace zatížení |               | I. řád          |                 | II. řád - jmenovitá tuhost |                 | II. řád - jmenovitá křivost |                 | Rozdíl        |               |
|--------------------|---------------|-----------------|-----------------|----------------------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|---------------|---------------|
| #                  | $N_{Ed}$ [MN] | $M_{edx}$ [MNm] | $M_{edz}$ [MNm] | $M_{edx}$ [MNm]            | $M_{edz}$ [MNm] | $M_{edx}$ [MNm]             | $M_{edz}$ [MNm] | $M_{edx}$ [%] | $M_{edz}$ [%] |
| 1                  | -28,917       | 5,340           | 1,928           | 5,612                      | 2,032           | 7,333                       | 4,123           | 23,5          | 50,7          |
| 2                  | -28,917       | 5,294           | 1,928           | 5,564                      | 2,032           | 7,287                       | 4,123           | 23,7          | 50,7          |
| 3                  | -28,917       | 3,085           | 1,928           | 3,242                      | 2,032           | 5,078                       | 4,123           | 36,2          | 50,7          |
| 4                  | -21,420       | 5,340           | 1,428           | 5,557                      | 1,488           | 6,889                       | 3,134           | 19,3          | 52,5          |
| 5                  | -21,420       | 5,294           | 1,428           | 5,509                      | 1,488           | 6,843                       | 3,134           | 19,5          | 52,5          |
| 6                  | -21,420       | 2,285           | 1,428           | 2,377                      | 1,488           | 3,834                       | 3,134           | 38,0          | 52,5          |
| 7                  | -39,458       | 22,033          | 40,715          | 23,429                     | 43,556          | 24,565                      | 43,504          | 4,6           | 0,1           |
| 8                  | -39,458       | 21,987          | 40,715          | 23,379                     | 43,556          | 24,518                      | 43,504          | 4,6           | 0,1           |
| 9                  | -39,458       | 16,842          | 40,715          | 17,909                     | 43,556          | 19,373                      | 43,504          | 7,6           | 0,1           |
| 10                 | -30,883       | 22,033          | 40,715          | 23,210                     | 43,042          | 24,134                      | 43,029          | 3,8           | 0,0           |
| 11                 | -30,883       | 21,987          | 40,715          | 23,161                     | 43,042          | 24,088                      | 43,029          | 3,8           | 0,0           |
| 12                 | -30,883       | 16,842          | 40,715          | 17,742                     | 43,042          | 18,943                      | 43,029          | 6,3           | 0,0           |
| 13                 | -33,552       | 7,578           | 40,715          | 8,007                      | 43,207          | 9,820                       | 43,184          | 18,5          | 0,1           |
| 14                 | -33,552       | 7,531           | 40,715          | 7,958                      | 43,207          | 9,774                       | 43,184          | 18,6          | 0,1           |
| 15                 | -33,552       | 3,579           | 40,715          | 3,782                      | 43,207          | 5,821                       | 43,184          | 35,0          | 0,1           |
| 16                 | -24,978       | 7,578           | 40,715          | 7,924                      | 42,659          | 9,344                       | 42,660          | 15,2          | 0,0           |
| 17                 | -24,978       | 7,531           | 40,715          | 7,875                      | 42,659          | 9,297                       | 42,660          | 15,3          | 0,0           |
| 18                 | -24,978       | 2,664           | 40,715          | 2,786                      | 42,659          | 4,430                       | 42,660          | 37,1          | 0,0           |
| 19                 | -33,072       | 5,238           | 2,205           | 5,532                      | 2,338           | 7,455                       | 4,647           | 25,8          | 49,7          |
| 20                 | -33,072       | 5,191           | 2,205           | 5,483                      | 2,338           | 7,409                       | 4,647           | 26,0          | 49,7          |
| 21                 | -33,072       | 3,528           | 2,205           | 3,726                      | 2,338           | 5,745                       | 4,647           | 35,2          | 49,7          |
| 22                 | -24,498       | 5,238           | 1,633           | 5,473                      | 1,710           | 6,975                       | 3,547           | 21,5          | 51,8          |
| 23                 | -24,498       | 5,191           | 1,633           | 5,425                      | 1,710           | 6,929                       | 3,547           | 21,7          | 51,8          |
| 24                 | -24,498       | 2,613           | 1,633           | 2,731                      | 1,710           | 4,350                       | 3,547           | 37,2          | 51,8          |

Tabulka 7: Porovnání zjednodušených metod

Vysvětlení je jednoduché, v metodě založené na jmenovité tuhosti násobíme moment prvního řádu zvětšujícím koeficientem zahrnujícím účinky druhého řádu. V metodě založené na jmenovité křivosti však k momentu prvního řádu přičítáme jmenovitý moment druhého řádu.

Z toho vyplývá, že v našem případě se sice odchylka zmenšuje směrem od malých momentů k momentům vyšším, ale tento pohled je omezený. Podíváme-li se na tento jev obecně, počínaje na hodnotě momentu prvního řádu rovné nule, rozdíl obou metod bude 100%. Z metody jmenovité tuhosti nezískáme žádný moment, jelikož zvětšující koeficient násobíme nulou. Avšak metodou jmenovité křivosti získáme moment roven právě jmenovitému momentu druhého řádu. S rostoucím momentem prvního řádu se nám odchylka zmenšuje, až dosáhneme bodu, kdy obě metody zvětšují

moment prvního řádu na stejnou hodnotu. S naším průřezem je tento bod okolo hodnoty 43 MN. To, co z tabulky 7 však není zřetelné, je, že pokračujeme-li ve zvyšování ohybového momentu prvního řádu, hodnota vypočtená metodou založenou na jmenovité tuhosti bude už vždy vyšší než hodnota vypočtená metodou jmenovité křivosti. Toto porovnání zobrazuje graf na obrázku 28.



Obrázek 28: Porovnání zjednodušených metod

Bezpečným přístupem se tedy jeví výpočet podle obou zjednodušených metod a uvažování vždy vyšší výsledné hodnoty zatěžujícího momentu. Tento postup byl zvolen i v této práci a zatížení do posouzení v automatizovaném interakčním diagramu bylo vybráno podle tabulky 8 – Návrhové hodnoty II. řádu.

| Kombinace zatížení |               | I. řád          |                 | II. řád - jmenovitá tuhost |                 | II. řád - jmenovitá křivost |                 | Návrhové hodnoty II. řádu |                 |
|--------------------|---------------|-----------------|-----------------|----------------------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|---------------------------|-----------------|
| #                  | $N_{Ed}$ [MN] | $M_{edx}$ [MNm] | $M_{edz}$ [MNm] | $M_{edx}$ [MNm]            | $M_{edz}$ [MNm] | $M_{edx}$ [MNm]             | $M_{edz}$ [MNm] | $M_{edx}$ [kNm]           | $M_{edz}$ [kNm] |
| 1                  | -28,917       | 5,340           | 1,928           | 5,612                      | 2,032           | 7,333                       | 4,123           | 7,333                     | 4,123           |
| 2                  | -28,917       | 5,294           | -1,928          | 5,564                      | -2,032          | 7,287                       | -4,123          | 7,287                     | -4,123          |
| 3                  | -28,917       | 3,085           | 1,928           | 3,242                      | 2,032           | 5,078                       | 4,123           | 5,078                     | 4,123           |
| 4                  | -21,420       | -5,340          | -1,428          | -5,557                     | -1,488          | -6,889                      | -3,134          | -6,889                    | -3,134          |
| 5                  | -21,420       | -5,294          | 1,428           | -5,509                     | 1,488           | -6,843                      | 3,134           | -6,843                    | 3,134           |
| 6                  | -21,420       | -2,285          | -1,428          | -2,377                     | -1,488          | -3,834                      | -3,134          | -3,834                    | -3,134          |
| 7                  | -39,458       | 22,033          | 40,715          | 23,429                     | 43,556          | 24,565                      | 43,504          | 24,565                    | 43,556          |
| 8                  | -39,458       | 21,987          | -40,715         | 23,379                     | -43,556         | 24,518                      | -43,504         | 24,518                    | -43,556         |
| 9                  | -39,458       | 16,842          | 40,715          | 17,909                     | 43,556          | 19,373                      | 43,504          | 19,373                    | 43,556          |
| 10                 | -30,883       | -22,033         | -40,715         | -23,210                    | -43,042         | -24,134                     | -43,029         | -24,134                   | -43,042         |
| 11                 | -30,883       | -21,987         | 40,715          | -23,161                    | 43,042          | -24,088                     | 43,029          | -24,088                   | 43,042          |
| 12                 | -30,883       | -16,842         | -40,715         | -17,742                    | -43,042         | -18,943                     | -43,029         | -18,943                   | -43,042         |
| 13                 | -33,552       | 7,578           | 40,715          | 8,007                      | 43,207          | 9,820                       | 43,184          | 9,820                     | 43,207          |
| 14                 | -33,552       | 7,531           | -40,715         | 7,958                      | -43,207         | 9,774                       | -43,184         | 9,774                     | -43,207         |
| 15                 | -33,552       | 3,579           | 40,715          | 3,782                      | 43,207          | 5,821                       | 43,184          | 5,821                     | 43,207          |
| 16                 | -24,978       | -7,578          | -40,715         | -7,924                     | -42,659         | -9,344                      | -42,660         | -9,344                    | -42,660         |
| 17                 | -24,978       | -7,531          | 40,715          | -7,875                     | 42,659          | -9,297                      | 42,660          | -9,297                    | 42,660          |
| 18                 | -24,978       | -2,664          | -40,715         | -2,786                     | -42,659         | -4,430                      | -42,660         | -4,430                    | -42,660         |
| 19                 | -33,072       | 5,238           | 2,205           | 5,532                      | 2,338           | 7,455                       | 4,647           | 7,455                     | 4,647           |
| 20                 | -33,072       | 5,191           | 2,205           | 5,483                      | 2,338           | 7,409                       | 4,647           | 7,409                     | 4,647           |
| 21                 | -33,072       | 3,528           | 2,205           | 3,726                      | 2,338           | 5,745                       | 4,647           | 5,745                     | 4,647           |
| 22                 | -24,498       | -5,238          | 1,633           | -5,473                     | 1,710           | -6,975                      | 3,547           | -6,975                    | 3,547           |
| 23                 | -24,498       | -5,191          | 1,633           | -5,425                     | 1,710           | -6,929                      | 3,547           | -6,929                    | 3,547           |
| 24                 | -24,498       | -2,613          | 1,633           | -2,731                     | 1,710           | -4,350                      | 3,547           | -4,350                    | 3,547           |

Tabulka 8: Návrhové hodnoty zahrnující účinky II. řádu

### Shrnutí analýzy účinků 2. řádu na pilíře

Analýza účinků druhého řádu na pilíře by se dala rozdělit na dva kroky. V prvním kroku se zkoumá, zda je vlastně nutné tyto účinky vyšetřovat porovnáváním limitní štíhlosti pro daný pilíř a zatížení s jeho skutečnou štíhlostí založenou na určení vzpěrné délky. Pokud pilíř vyhoví štíhlostnímu kritériu, jedná se o tzv. masivní pilíř a není nutné účinky druhého řádu vyšetřovat. Nevyhoví-li pilíř kritériu, je nutné ho podrobit analýze účinků druhého řádu.

Tyto účinky lze řešit dvěma zjednodušenými metodami založenými na jmenovité tuhosti a jmenovité křivosti. Obě zjednodušené metody fungují na principu zvětšení původního zatížení ohybovým momentem a přesto, že k tomu používají jiné principy, generují podobné výsledky. Jejich výpočty se navíc dají označit za nenáročné.

Další možností je obecná metoda, která je však rozhodně náročnější na výpočet. Na druhou stranu nám poskytuje přesnější výpočet a tedy i šanci na efektivnější konstrukci.

Navrhování štíhlých betonových pilířů je tak občas stále otázkou inženýrského citu projektanta založeném na porozumění základních principů a zkušenostech.

## Seznam zdrojů

1. Viaduc de Millau. [Online]  
<https://www.leviaducdemillau.com/en/understand/key-figures>.
2. Most Vysočina. [Online] <https://www.mostvysocina.cz/predstaveni-projektu/>.
3. Mapy.cz. [Online]  
<https://mapy.cz/zakladni?x=16.0147751&y=49.3607475&z=17&source=base&id=1718225&gallery=1>.
4. U.S. Geological Survey. [Online] <https://pubs.usgs.gov/dds/dds-29/screens/022sr.jpeg>.
5. Wikipedia. *Železniční nehoda v Eschede*. [Online]  
[https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%BDelezni%C4%8Dn%C3%AD\\_nehoda\\_v\\_Eschede](https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%BDelezni%C4%8Dn%C3%AD_nehoda_v_Eschede).
6. Wikipedia. *Leonhard Euler*. [Online]  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Leonhard\\_Euler](https://en.wikipedia.org/wiki/Leonhard_Euler).
7. Wikipedia. *Euler's critical load*. [Online]  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Euler%27s\\_critical\\_load](https://en.wikipedia.org/wiki/Euler%27s_critical_load).
8. **Jaroslav, Procházka.** *Navrhování betonových konstrukcí 1. Prvky z prostého a železového betonu: Prvky z prostého a železového betonu: dimenzování prvků s přihlédnutím k EN 1992-1-1*. Praha : ČBS Servis, 2005. str. 307.
9. *ČSN EN 1992-1-1: Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. 2. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. str. 202.
10. Tom Mares's webpage. [Online] <http://drone.fsid.cvut.cz/pp2/Stabilita.pdf>.
11. people.fsv.cvut.cz. [Online]  
[http://people.fsv.cvut.cz/www/dvorstom/v\\_beton/Priloha\\_13.pdf](http://people.fsv.cvut.cz/www/dvorstom/v_beton/Priloha_13.pdf).
12. Science Direct. [Online]  
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/euler-buckling>.

13. Eurocodes. [Online]

<https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/showpage.php?id=13#page>.

14. Ing, Jaroslav Procházka, CSc., a další, a další. *Štíhlé betonové tlačené pruty*. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1983. str. 232.

15. ČSN EN 1992-2: Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 2: Betonové mosty - Navrhování a konstrukční zásady. Praha : Český normalizační institut, 2007. str. 90.

## Seznam obrázků

|   |    |
|---|----|
| Obrázek 1: Viadukt Millau (1) .....                                       | 4  |
| Obrázek 2: Most Vysočina (3) .....  | 4  |
| Obrázek 3: Kolaps pilířů (4).....   | 5  |
| Obrázek 4: Vzpěrné délky .....  | 6  |
| Obrázek 5: Eulerova hyperbola .....                                       | 8  |
| Obrázek 6: Křivost .....  | 13 |
| Obrázek 7: $n_{bal}$ .....  | 15 |
| Obrázek 8: Schéma Eurokódů (13) .....                                     | 18 |
| Obrázek 9: Dvouosé namáhání (9) .....                                     | 24 |
| Obrázek 10: Pracovní diagram betonu - skutečný (9) .....                  | 25 |
| Obrázek 11: Pracovní diagram betonu – parabolicko-rektangulární (9) ..... | 26 |
| Obrázek 12: Pracovní diagram betonu - bilineární (9) .....                | 27 |
| Obrázek 13: Pracovní diagram betonu - rektangulární (9) .....             | 27 |
| Obrázek 14: Pracovní diagram oceli – zřetelná mez kluzu (9) .....         | 28 |
| Obrázek 15: Pracovní diagram oceli – bez zřetelné meze kluzu (9) .....    | 29 |
| Obrázek 16: Pracovní diagram oceli - idealizovaný (9) .....               | 29 |
| Obrázek 17: Mezní přetvoření vyztuženého průřezu (9) .....                | 31 |
| Obrázek 18: Metoda mezních přetvoření .....                               | 32 |
| Obrázek 19: Interakční diagram – symetrické vyztužení .....               | 33 |
| Obrázek 20: Interakční diagram – asymetrické vyztužení .....              | 34 |
| Obrázek 21: Schéma konstrukce .....                                       | 36 |
| Obrázek 22: Schéma působení zatížení .....                                | 38 |



|   |    |
|---|----|
| Obrázek 23: Automatizovaný ID – 1. řád osa z..... | 43 |
| Obrázek 24: Automatizovaný ID – 1.řád osa x.....  | 44 |
| Obrázek 25: Automatizovaný ID – 2.řád osa z.....  | 47 |
| Obrázek 26: Automatizovaný ID – 2.řád osa x.....  | 48 |
| Obrázek 27: Posouzení skupiny pilot.....          | 50 |
| Obrázek 28: Porovnání zjednodušených metod.....   | 52 |

## Seznam tabulek

|   |    |
|---|----|
| Tabulka 1: Přehled Eurokódů .....                           | 17 |
| Tabulka 2.....  | 24 |
| Tabulka 3: Přehled poměrných přetvoření.....                | 28 |
| Tabulka 4: Hodnoty poměrných přetvoření oceli (9).....      | 30 |
| Tabulka 5: Kombinační klíč.....                             | 39 |
| Tabulka 6: Hodnoty zatížení .....                           | 40 |
| Tabulka 7: Porovnání zjednodušených metod .....             | 51 |
| Tabulka 8: Návrhové hodnoty zahrnující účinky II. řádu..... | 53 |

## Seznam příloh

|  |
|--|
| Příloha 1 – Výpočet zatížení           |
| Příloha 2 – Statický výpočet           |
| Výkres 1 – Půdorys a podélný řez mostu |
| Výkres 2 – Výkres tvaru                |
| Výkres 3 – Výkres výztuže              |

# NÁVRH ŠTÍHLÉHO PILÍŘE DÁLNIČNÍHO MOSTU

## PŘÍLOHA 1

### VÝPOČET ZATÍŽENÍ

#### STÁLÉ ZATÍŽENÍ

##### I - Svislé

##### MOSTOVKA - NOSNÁ KONSTRUKCE

$$\begin{aligned} \text{Plocha průřezu} & S_{\text{mostovka}} := 12,652 \text{ m}^2 \\ \text{Délka pole} & L_{\text{pole}} := 58,75 \text{ m} \\ \text{Šířka mostovky} & w_{\text{mostovka}} := 13,650 \text{ m} \\ \text{Objem betonu} & V_{\text{mostovka}} := S_{\text{mostovka}} \cdot L_{\text{pole}} = 743,305 \text{ m}^3 \\ \text{Objemová hmotnost betonu} & \rho_{\text{beton}} := 2500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \\ \text{Tíhové zrychlení} & g := 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \\ \text{Měrná tíha betonu} & g_{\text{beton}} := \rho_{\text{beton}} \cdot g = 25000 \frac{\text{Pa}}{\text{m}} \\ \text{Vlastní tíha mostovky} & F_{\text{mostovka}} := g_{\text{beton}} \cdot V_{\text{mostovka}} = \\ & = 1,8583 \cdot 10^7 \text{ N} \\ & F_{\text{mostovka}} = 18582,625 \text{ kN} \end{aligned}$$

##### MOSTOVKA - VOZOVKA

$$\begin{aligned} \text{Objemová hmotnost asfaltového betonu} & \rho_{\text{asfalt,beton}} := 2200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \\ \text{Šířka vozovky} & W_{\text{vozovka}} := 11,75 \text{ m} \\ \text{Tloušťka vozovky} & T_{\text{vozovka}} := 0,12 \text{ m} \\ \text{Měrná tíha asfaltového betonu} & g_{\text{asfalt,beton}} := \rho_{\text{asfalt,beton}} \cdot g = \\ & = 22000 \frac{\text{Pa}}{\text{m}} \\ \text{Vlastní tíha vozovky} & F_{\text{vozovka}} := g_{\text{asfalt,beton}} \cdot W_{\text{vozovka}} \cdot T_{\text{vozovka}} \cdot L_{\text{pole}} = 1,8224 \cdot 10^6 \text{ N} \\ & F_{\text{vozovka}} = 1822,425 \text{ kN} \end{aligned}$$

##### MOSTOVKA - ŘÍMSY

$$\begin{aligned} \text{Plocha průřezu římsy} & S_{\text{římsa}} := 0,54 \text{ m}^2 \\ \text{Počet říms} & n_{\text{říms}} := 2 \end{aligned}$$

Vlastní tíha říms

$$F_{\text{řimsy}} := n_{\text{řims}} \cdot g_{\text{beton}} \cdot S_{\text{řimsa}} \cdot L_{\text{pole}} =$$
$$= 1,5862 \cdot 10^6 \text{ N}$$
$$F_{\text{řimsy}} = 1586,25 \text{ kN}$$

### **MOSTOVKA - SVODIDLA**

Hmotnost svodidla na 1 metr

$$m_{\text{svodidla}} := 42,67 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

Počet svodidel

$$n_{\text{svodidel}} := 2$$

Vlastní tíha svodidel

$$F_{\text{svodidla}} := n_{\text{svodidel}} \cdot m_{\text{svodidla}} \cdot g \cdot L_{\text{pole}} =$$
$$= 50137,25 \text{ N}$$
$$F_{\text{svodidla}} = 50,1372 \text{ kN}$$

### **LOŽISKA**

Hmotnost ložiska

$$m_{\text{ložisko}} := 700 \text{ kg}$$

Vlastní tíha ložiska

$$F_{\text{ložisko}} := m_{\text{ložisko}} \cdot g = 7000 \text{ N}$$
$$F_{\text{ložisko}} = 7 \text{ kN}$$

### **PILÍŘ**

Tloušťka pilíře

$$t_{\text{pilíř}} := 2,0 \text{ m}$$

Šířka pilíře

$$w_{\text{pilíř}} := 3,2 \text{ m}$$

Velikost zkosení

$$x := 0,0 \text{ m}$$

Plocha pilíře

$$A_{c,\text{pilíř}} := t_{\text{pilíř}} \cdot w_{\text{pilíř}} - 2 \cdot x \cdot x = 6,4 \text{ m}^2$$

Výška pilíře

$$h_{\text{pilíř}} := 15,264 \text{ m}$$

Vlastní tíha pilíře

$$F_{\text{pilíř}} := A_{c,\text{pilíř}} \cdot h_{\text{pilíř}} \cdot g_{\text{beton}} =$$
$$= 2,4422 \cdot 10^6 \text{ N}$$
$$F_{\text{pilíř}} = 2442,24 \text{ kN}$$

### **II - Podélné**

Nevyskytuje se

### **III - Příčné**

Nevyskytuje se

## PROMĚNNÉ ZATÍŽENÍ

### I - Svislé

#### DOPRAVA LM1

Šířka běžného zatěžovacího pruhu  $w_{pruh} := 3 \text{ m}$

Šířka vozovky s nejnižším spojitým zatížením

$$w_{zbytek} := W_{vozovka} - 2 \cdot w_{pruh} = 5,75 \text{ m}$$

TS - dvojnáprava

$$\text{Pruh 1} \quad F_{TS\_1} := 300 \text{ kN}$$

$$\text{Pruh 2} \quad F_{TS\_2} := 200 \text{ kN}$$

$$\text{Pruh 3} \quad F_{TS\_3} := 100 \text{ kN}$$

$$F_{TS} := F_{TS\_1} + F_{TS\_2} + F_{TS\_3} = 600 \text{ kN}$$

UDL - rovnoměrné zatížení

$$\text{Pruh 1} \quad f_{UDL\_1} := 9 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Pruh 2} \quad f_{UDL\_2} := 6 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Pruh 3} \quad f_{UDL\_3} := 3 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$f_{UDL} := (f_{UDL\_1} + f_{UDL\_2}) \cdot w_{pruh} + f_{UDL\_3} \cdot w_{zbytek} = 62,25 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Celkové svislé zatížení dopravou LM1

$$F_{doprava\_svislé\_LM1} := F_{TS} + f_{UDL} \cdot L_{pole} = 4,2572 \cdot 10^6 \text{ N}$$

$$F_{doprava\_svislé\_LM1} = 4257,1875 \text{ kN}$$

Rameno excentrického působení dopravy LM1

$$z_{LM1} := 2,6301 \text{ m}$$

## DOPRAVA LM2

Nápravová síla  $Q_{ak} := 400 \text{ kN}$

Regulační součinitel  $\beta_Q := 0,8$

Zatížení od modelu LM2  $F_{doprava\_svislé\_LM2} := Q_{ak} \cdot \beta_Q = 3,2 \cdot 10^5 \text{ N}$   
 $F_{doprava\_svislé\_LM2} = 320 \text{ kN}$

Rameno excentrického působení dopravy LM2

$$z_{LM2} := 4,875 \text{ m}$$

## II - Podélné

### DOPRAVA

Brzdné síly  $\alpha_{Q1} := 1$

$$\alpha_{q1} := 1$$

$$L_{most} := 170 \text{ m}$$

$$Q_k := 0,6 \cdot \alpha_Q \cdot (2 \cdot Q_k) + 0,1 \cdot \alpha_q \cdot q_k \cdot w_{pruh} \cdot L_{most}$$

$$\begin{aligned} \text{Pruh 1} \quad Q_{k1} &:= 0,6 \cdot \alpha_{Q1} \cdot (2 \cdot F_{TS\_1}) + 0,1 \cdot \alpha_{q1} \cdot f_{UDL\_1} \cdot w_{pruh} \cdot L_{most} = \\ &= 8,19 \cdot 10^5 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Pruh 2} \quad Q_{k2} &:= 0,6 \cdot \alpha_{Q1} \cdot (2 \cdot F_{TS\_2}) + 0,1 \cdot \alpha_{q1} \cdot f_{UDL\_2} \cdot w_{pruh} \cdot L_{most} = \\ &= 5,46 \cdot 10^5 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Pruh 3} \quad Q_{k3} &:= 0,6 \cdot \alpha_{Q1} \cdot (2 \cdot F_{TS\_3}) + 0,1 \cdot \alpha_{q1} \cdot f_{UDL\_3} \cdot w_{zbytek} \cdot L_{most} = \\ &= 4,1325 \cdot 10^5 \text{ N} \end{aligned}$$

Celkové zatížení brzdnými silami

$$Q_{k,celkové} := Q_{k1} + Q_{k2} + Q_{k3} = 1,7782 \cdot 10^6 \text{ N}$$

$$Q_{k,celkové} = 1778,25 \text{ kN}$$

Rameno působení si  $z_{brzdy} := h_{pilíř} = 15,264 \text{ m}$

## III - Příčné

### DOPRAVA

Odstředivé síly  $R > 1500 \text{ m} \rightarrow F_{odstředivá} := 0 \text{ kN}$

### TEKOUCÍ VODA - POVODĚŇ

|                                       |   |
|---------------------------------------|---|
| 100-letý průtok - Opatovice nad Labem | $Q_{100} := 822 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$                                    |
| Plocha průtoku při 100-letém průtoku  | $S_{100} := 964 \text{ m}^2$  |
| Rychlost vody při 100-leté vodě       | $v_{\text{voda}} := \frac{Q_{100}}{S_{100}} = 0,8527 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ |
| Výška zatopené části pilíře           | $h_{\text{zatopená}} := 6,881 \text{ m}$  |
| Šířka pilíře                          | $w_{\text{pilíř}} = 3,2 \text{ m}$  |
| Tvarový součinitel odporu pilíře      | $C_{D,tvar} := 1,8$   |
| Hustota vody                          | $\rho_{\text{voda}} := 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$                       |

Plošné zatížení tekoucí vodou

$$f_{\text{voda}} := \frac{1}{2} \cdot C_{D,tvar} \cdot \rho_{\text{voda}} \cdot v_{\text{voda}}^2 = 654,3831 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

Síla působící na pilíř při 100-leté povodni

$$F_{\text{voda}} := f_{\text{voda}} \cdot h_{\text{zatopená}} \cdot t_{\text{pilíř}} = 9005,6203 \text{ N}$$

$$F_{\text{voda}} = 9,0056 \text{ kN}$$

Rameno působení sil  $z_{\text{voda}} := \frac{h_{\text{zatopená}}}{2} = 3,4405 \text{ m}$

### VÍTR

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| Maximální dynamický tlak        | $q_p := (1 + 7 \cdot I_v) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{vzduch}} \cdot v_m^2$ |
| Hustota vzduchu                 | $\rho_{\text{vzduch}} := 1,25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$                         |
| Střední rychlost větru          | $v_m := c_r \cdot c_0 \cdot v_b$  |
| Výchozí základní rychlost větru | $v_b := 25 \frac{\text{m}}{\text{s}}$   |
| Součinitel orografie            | $c_0 := 1$  |
| Součinitel drsnosti             | $c_r := k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$                                    |
| Součinitel terénu               | $k_r := 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07}$                        |

|  |  |
|--|--|
| Délka drsnosti                               | $z_0 := 0,05 \text{ m}$  |
|  | $z_{0,II} := 0,05 \text{ m}$   |
| Součinitel terénu                            | $k_r = 0,19$   |
| Výška konstrukce                             | $z := 17 \text{ m}$  |
| Součinitel drsnosti                          | $c_r = 1,1075$   |
| Střední rychlost větru                       | $v_m = 27,6875 \frac{\text{m}}{\text{s}}$                            |
| Vliv turbulencí                              | $I_v := \frac{k_I}{c_0 \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}$         |
| Součinitel turbulence                        | $k_I := 1$   |
| Vliv turbulencí                              | $I_v = 0,1716$   |
| Maximální dynamický tlak                     | $q_p = 1054,5039 \text{ Pa}$   |
|  |  |
| Plocha soustředící tlak větru z NK do pilíře | $S_{NK} := h \cdot L_{pole}$   |
| Výška NK                                     | $h := 3,4 \text{ m}$   |
| Plocha soustředící tlak větru z NK do pilíře | $S_{NK} = 199,75 \text{ m}^2$  |
| Síla do jednoho pilíře z NK                  | $F_{vitr\_NK} := S_{NK} \cdot q_p =$<br>$= 210,6372 \text{ kN}$      |
| Plocha pilíře                                | $S_{pilíř} := t_{pilíř} \cdot h_{pilíř} =$<br>$= 30,528 \text{ m}^2$ |
| Síla větru působící na pilíř                 | $F_{vitr\_pilíř} := S_{pilíř} \cdot q_p =$<br>$= 32,1919 \text{ kN}$ |
| Působíště síly do NK                         | $Z_{NK} := h_{pilíř} = 15,264 \text{ m}$                             |
| Působíště síly do pilíře                     | $z_{pilíř} := \frac{h_{pilíř}}{2} = 7,632 \text{ m}$                 |
|  |  |
| Rameno sil od větru v příčném směru          |  |

$$Z_{vitr\_příčné} := \frac{F_{vitr\_NK} \cdot Z_{NK} + F_{vitr\_pilíř} \cdot z_{pilíř}}{F_{vitr\_NK} + F_{vitr\_pilíř}} = 14,2522 \text{ m}$$

## Zatížení při výstavbě

### VLASTNÍ TÍHA - stálé svislé

Délka konstrukce  $L_{pole, výstavba} := 60 \text{ m}$

Tíha mostovky  $F_{mostovka, výstavba} := L_{pole, výstavba} \cdot S_{mostovka} \cdot g_{beton} =$   
 $= 18978 \text{ kN}$

### VÍTR - proměnné podélné

Plocha akrytého čela  $S_{čelo} := 22868000 \text{ mm}^2 = 22,868 \text{ m}^2$

Síla větru na čelo  $F_{vítr\_NK\_čelo} := S_{čelo} \cdot q_p = 24,1144 \text{ kN}$

Plocha pilíře  $S_{pilíř\_podélné} := 53003024,89 \text{ mm}^2 =$   
 $= 53,003 \text{ m}^2$

Síla působící na pilíř  $F_{pilíř\_podélné} := S_{pilíř\_podélné} \cdot q_p =$   
 $= 55,8919 \text{ kN}$

Rameno sil od větru v podélném směru

$$z_{výstavba\_podélné} := \frac{F_{vítr\_NK\_čelo} \cdot z_{NK} + F_{pilíř\_podélné} \cdot z_{pilíř}}{F_{vítr\_NK\_čelo} + F_{pilíř\_podélné}} =$$

$= 9,9323 \text{ m}$

### VÍTR - proměnné příčné

Plocha soustředící tlak větru z NK do pilíře

$$S_{NK, výstavba} := h \cdot L_{pole, výstavba} = 204 \text{ m}^2$$

Síla působící na pilíř  $F_{vítr\_NK\_výstavba} := S_{NK, výstavba} \cdot q_p =$   
 $= 215,1188 \text{ kN}$

Rameno sil od větru v příčném směru

$$z_{výstavba\_příč} := \frac{F_{vítr\_NK\_výstavba} \cdot z_{NK} + F_{vítr\_pilíř} \cdot z_{pilíř}}{F_{vítr\_NK\_výstavba} + F_{vítr\_pilíř}} =$$

$= 14,2706 \text{ m}$



## KOMBINACE ZATÍŽENÍ

### SILOVÉ ZATÍŽENÍ

#### Svislé zatížení

$$G_{vlastní\_tíha} := \sum \left[ \begin{array}{ccc} F_{mostovka} & F_{vozovka} & F_{řimsy} \\ F_{svodidla} & 2 \cdot F_{ložisko} & F_{pilíř} \end{array} \right] = 24497,6772 \text{ kN}$$

$$G_{vlastní\_tíha\_výstavba} := F_{mostovka, výstavba} + F_{pilíř} = 21420,24 \text{ kN}$$

$$Q_{doprava\_LM1} := F_{doprava\_svislé\_LM1} = 4257,1875 \text{ kN}$$

$$Q_{doprava\_LM2} := F_{doprava\_svislé\_LM2} = 320 \text{ kN}$$

#### Podélné zatížení

$$Q_{brzdné\_síly} := Q_{k, celkové} = 1778,25 \text{ kN}$$

$$Q_{vítr\_výstavba\_podélné} := F_{vítr\_NK\_čelo} + F_{pilíř\_podélné} = 80,0063 \text{ kN}$$

#### Příčné zatížení

$$Q_{povodeň} := F_{voda} = 9,0056 \text{ kN}$$

$$Q_{vítr} := F_{vítr\_NK} + F_{vítr\_pilíř} = 242,8291 \text{ kN}$$

$$Q_{vítr\_výstavba\_příčné} := F_{vítr\_NK\_výstavba} + F_{vítr\_pilíř} = 247,3107 \text{ kN}$$

### MOMENTOVÉ ZATÍŽENÍ M<sub>x</sub>

#### Svislé zatížení

$$M_x G_{vlastní\_tíha} := 0 \text{ kN m}$$

$$M_x G_{vlastní\_tíha\_výstavba} := 0 \text{ kN}$$

$$M_x Q_{doprava\_LM1} := Q_{doprava\_LM1} \cdot z_{LM1} = 11196,8288 \text{ kN m}$$

$$M_x Q_{doprava\_LM2} := Q_{doprava\_LM2} \cdot z_{LM2} = 1560 \text{ kN m}$$

#### Podélné zatížení

$$M_x Q_{brzdné\_síly} := 0 \text{ kN m}$$

$$M_x Q_{vítr\_výstavba\_podélné} := 0 \text{ kN m}$$

### Příčné zatížení

$$MxQ_{povodeň} := F_{voda} \cdot z_{voda} = 30,9838 \text{ kN m}$$

$$MxQ_{vítr} := (F_{vítr_{NK}} + F_{vítr_{pilíř}}) \cdot z_{vítr_{příčné}} = 3460,8542 \text{ kN m}$$

$$MxQ_{vítr_{výstavba_{příčné}}} := (F_{vítr_{NK_{výstavba}} + F_{vítr_{pilíř}}) \cdot z_{výstavba_{příč}}$$

$$MxQ_{vítr_{výstavba_{příčné}}} = 3529,262 \text{ kN m}$$

### MOMENTOVÉ ZATÍŽENÍ Mz

#### Svislé zatížení

$$MzG_{vlastní_{tíha}} := 0 \text{ kN m}$$

$$MzG_{vlastní_{tíha}_{výstavba}} := 0 \text{ kN}$$

$$MzQ_{doprava_{LM1}} := 0 \text{ kN m}$$

$$MzQ_{doprava_{LM2}} := 0 \text{ kN m}$$

#### Podélné zatížení

$$MzQ_{brzdné_{sily}} := Q_{brzdné_{sily}} \cdot z_{brzdy} = 27143,208 \text{ kN m}$$

$$MzQ_{vítr_{výstavba_{podélné}}} := Q_{vítr_{výstavba_{podélné}} \cdot z_{výstavba_{podélné}} = 794,6491 \text{ kN m}$$

#### Příčné zatížení

$$MzQ_{vítr} := 0 \text{ kN m}$$

$$MzQ_{povodeň} := 0 \text{ kN m}$$

$$MzQ_{vítr_{výstavba_{příčné}}} := 0 \text{ kN m}$$

### KOMBINACE ZATÍŽENÍ PODLE ROVNICE 6.10

Kombinační součinitel  $\psi_0 := 1,0$

#### VÝSTAVBA

$$N_1 := 1,35 \cdot G_{\text{vlastní\_tíha\_výstavba}} = 28917,324 \text{ kN}$$

$$V_{x1} := 1,5 \cdot Q_{\text{vítr\_výstavba\_podélné}} = 120,0094 \text{ kN}$$

$$V_{z1} := 1,5 \cdot \psi_0 \cdot (Q_{\text{povodeň}} + Q_{\text{vítr\_výstavba\_příčné}}) = 384,4745 \text{ kN}$$

$$M_{x1} := 1,5 \cdot \psi_0 \cdot (MxQ_{\text{vítr\_výstavba\_příčné}} + MxQ_{\text{povodeň}}) = 5340,3687 \text{ kN m}$$

$$M_{z1} := 1,5 \cdot MzQ_{\text{vítr\_výstavba\_podélné}} = 1191,9737 \text{ kN m}$$

$$N_2 := 1,35 \cdot G_{\text{vlastní\_tíha\_výstavba}} = 28917,324 \text{ kN}$$

$$V_{x2} := 1,5 \cdot Q_{\text{vítr\_výstavba\_podélné}} = 120,0094 \text{ kN}$$

$$V_{z2} := 1,5 \cdot Q_{\text{vítr\_výstavba\_příčné}} = 370,966 \text{ kN}$$

$$M_{x2} := 1,5 \cdot MxQ_{\text{vítr\_výstavba\_příčné}} = 5293,8929 \text{ kN m}$$

$$M_{z2} := 1,5 \cdot MzQ_{\text{vítr\_výstavba\_podélné}} = 1191,9737 \text{ kN m}$$

$$N_3 := 1,35 \cdot G_{\text{vlastní\_tíha\_výstavba}} = 28917,324 \text{ kN}$$

$$V_{x3} := 1,5 \cdot Q_{\text{vítr\_výstavba\_podélné}} = 120,0094 \text{ kN}$$

$$V_{z3} := 1,5 \cdot Q_{\text{povodeň}} = 13,5084 \text{ kN}$$

$$M_{x3} := 1,5 \cdot MxQ_{\text{povodeň}} = 46,4758 \text{ kN m}$$

$$M_{z3} := 1,5 \cdot MzQ_{\text{vítr\_výstavba\_podélné}} = 1191,9737 \text{ kN m}$$

$$N_4 := G_{\text{vlastní\_tíha\_výstavba}} = 21420,24 \text{ kN}$$

$$V_{x4} := 1,5 \cdot Q_{\text{vítr\_výstavba\_podélné}} = 120,0094 \text{ kN}$$

$$V_{z4} := 1,5 \cdot \psi_0 \cdot (Q_{\text{povodeň}} + Q_{\text{vítr\_výstavba\_příčné}}) = 384,4745 \text{ kN}$$

$$M_{x4} := 1,5 \cdot \psi_0 \cdot (MxQ_{\text{vítr\_výstavba\_příčné}} + MxQ_{\text{povodeň}}) = 5340,3687 \text{ kN m}$$

$$M_{z4} := 1,5 \cdot MzQ_{\text{vítr\_výstavba\_podélné}} = 1191,9737 \text{ kN m}$$

$$N_5 := G_{\text{vlastní\_tíha\_výstavba}} = 21420,24 \text{ kN}$$

$$V_{x5} := 1,5 \cdot Q_{\text{vítr\_výstavba\_podélné}} = 120,0094 \text{ kN}$$

$$V_{z5} := 1,5 \cdot Q_{\text{vítr\_výstavba\_příčné}} = 370,966 \text{ kN}$$

$$M_{x5} := 1,5 \cdot MxQ_{\text{vítr\_výstavba\_příčné}} = 5293,8929 \text{ kN m}$$

$$M_{z5} := 1,5 \cdot MzQ_{\text{vítr\_výstavba\_podélné}} = 1191,9737 \text{ kN m}$$

$$N_6 := G_{\text{vlastní\_tíha\_výstavba}} = 21420,24 \text{ kN}$$

$$V_{x6} := 1,5 \cdot Q_{\text{vítr\_výstavba\_podélné}} = 120,0094 \text{ kN}$$

$$V_{z6} := 1,5 \cdot Q_{\text{povodeň}} = 13,5084 \text{ kN}$$

$$M_{x6} := 1,5 \cdot MxQ_{\text{povodeň}} = 46,4758 \text{ kN m}$$

$$M_{z6} := 1,5 \cdot MzQ_{\text{vítr\_výstavba\_podélné}} = 1191,9737 \text{ kN m}$$

PO DOKONČENÍ

$$N_7 := 1,35 \cdot G_{\text{vlastní\_tíha}} + 1,5 \cdot Q_{\text{doprava\_LM1}} = 39457,6455 \text{ kN}$$

$$V_{x7} := 1,5 \cdot Q_{\text{brzdě\_síly}} = 2667,375 \text{ kN}$$

$$V_{z7} := 1,5 \cdot \psi_0 \cdot (Q_{\text{povodeň}} + Q_{\text{vítr}}) = 377,752 \text{ kN}$$

$$M_{x7} := 1,5 \cdot MxQ_{\text{doprava\_LM1}} + 1,5 \cdot \psi_0 \cdot (MxQ_{\text{vítr}} + MxQ_{\text{povodeň}}) = 22033,0003 \text{ kN m}$$

$$M_{z7} := 1,5 \cdot MzQ_{\text{brzdě\_síly}} = 40714,812 \text{ kN m}$$

$$N_8 := 1,35 \cdot G_{\text{vlastní\_tíha}} + 1,5 \cdot Q_{\text{doprava\_LM1}} = 39457,6455 \text{ kN}$$

$$V_{x8} := 1,5 \cdot Q_{\text{brzdě\_síly}} = 2667,375 \text{ kN}$$

$$V_{z8} := 1,5 \cdot Q_{\text{vítr}} = 364,2436 \text{ kN}$$

$$M_{x8} := 1,5 \cdot (MxQ_{\text{doprava\_LM1}} + MxQ_{\text{vítr}}) = 21986,5245 \text{ kN m}$$

$$M_{z8} := 1,5 \cdot MzQ_{\text{brzdě\_síly}} = 40714,812 \text{ kN m}$$

$$N_9 := 1,35 \cdot G_{\text{vlastní\_tíha}} + 1,5 \cdot Q_{\text{doprava\_LM1}} = 39457,6455 \text{ kN}$$

$$V_{x9} := 1,5 \cdot Q_{\text{brzdě\_síly}} = 2667,375 \text{ kN}$$

$$V_{z9} := 1,5 \cdot Q_{\text{povodeň}} = 13,5084 \text{ kN}$$

$$M_{x9} := 1,5 \cdot (MxQ_{\text{doprava\_LM1}} + MxQ_{\text{povodeň}}) = 16841,719 \text{ kN m}$$

$$M_{z9} := 1,5 \cdot MzQ_{\text{brzdě\_síly}} = 40714,812 \text{ kN m}$$

$$N_{10} := G_{vlastní\_tíha} + 1,5 \cdot Q_{doprava\_LM1} = 30883,4585 \text{ kN}$$

$$V_{x10} := 1,5 \cdot Q_{brzdné\_síly} = 2667,375 \text{ kN}$$

$$V_{z10} := 1,5 \cdot \psi_0 \cdot (Q_{povodeň} + Q_{vítr}) = 377,752 \text{ kN}$$

$$M_{x10} := 1,5 \cdot MxQ_{doprava\_LM1} + 1,5 \cdot \psi_0 \cdot (MxQ_{vítr} + MxQ_{povodeň}) = \\ = 22033,0003 \text{ kN m}$$

$$M_{z10} := 1,5 \cdot MzQ_{brzdné\_síly} = 40714,812 \text{ kN m}$$

$$N_{11} := G_{vlastní\_tíha} + 1,5 \cdot Q_{doprava\_LM1} = 30883,4585 \text{ kN}$$

$$V_{x11} := 1,5 \cdot Q_{brzdné\_síly} = 2667,375 \text{ kN}$$

$$V_{z11} := 1,5 \cdot Q_{vítr} = 364,2436 \text{ kN}$$

$$M_{x11} := 1,5 \cdot (MxQ_{doprava\_LM1} + MxQ_{vítr}) = 21986,5245 \text{ kN m}$$

$$M_{z11} := 1,5 \cdot MzQ_{brzdné\_síly} = 40714,812 \text{ kN m}$$

$$N_{12} := G_{vlastní\_tíha} + 1,5 \cdot Q_{doprava\_LM1} = 30883,4585 \text{ kN}$$

$$V_{x12} := 1,5 \cdot Q_{brzdné\_síly} = 2667,375 \text{ kN}$$

$$V_{z12} := 1,5 \cdot Q_{povodeň} = 13,5084 \text{ kN}$$

$$M_{x12} := 1,5 \cdot (MxQ_{doprava\_LM1} + MxQ_{povodeň}) = 16841,719 \text{ kN m}$$

$$M_{z12} := 1,5 \cdot MzQ_{brzdné\_síly} = 40714,812 \text{ kN m}$$

$$N_{13} := 1,35 \cdot G_{vlastní\_tíha} + 1,5 \cdot Q_{doprava\_LM2} = 33551,8643 \text{ kN}$$

$$V_{x13} := 1,5 \cdot Q_{brzdné\_síly} = 2667,375 \text{ kN}$$

$$V_{z13} := 1,5 \cdot \psi_0 \cdot (Q_{povodeň} + Q_{vítr}) = 377,752 \text{ kN}$$

$$M_{x13} := 1,5 \cdot MxQ_{doprava\_LM2} + 1,5 \cdot \psi_0 \cdot (MxQ_{vítr} + MxQ_{povodeň}) = \\ = 7577,757 \text{ kN m}$$

$$M_{z13} := 1,5 \cdot MzQ_{brzdné\_síly} = 40714,812 \text{ kN m}$$

$$N_{14} := 1,35 \cdot G_{vlastní\_tíha} + 1,5 \cdot Q_{doprava\_LM2} = 33551,8643 \text{ kN}$$

$$V_{x14} := 1,5 \cdot Q_{brzdné\_síly} = 2667,375 \text{ kN}$$

$$V_{z14} := 1,5 \cdot Q_{vítr} = 364,2436 \text{ kN}$$

$$M_{x14} := 1,5 \cdot (MxQ_{doprava\_LM2} + MxQ_{vítr}) = 7531,2813 \text{ kN m}$$

$$M_{z14} := 1,5 \cdot MzQ_{brzdné\_síly} = 40714,812 \text{ kN m}$$

$$N_{15} := 1,35 \cdot G_{vlastní\_tíha} + 1,5 \cdot Q_{doprava\_LM2} = 33551,8643 \text{ kN}$$

$$V_{x15} := 1,5 \cdot Q_{brzdné\_síly} = 2667,375 \text{ kN}$$

$$V_{z15} := 1,5 \cdot Q_{povodeň} = 13,5084 \text{ kN}$$

$$M_{x15} := 1,5 \cdot (MxQ_{doprava\_LM2} + MxQ_{povodeň}) = 2386,4758 \text{ kN m}$$

$$M_{z15} := 1,5 \cdot MzQ_{brzdné\_síly} = 40714,812 \text{ kN m}$$

$$N_{16} := G_{vlastní\_tíha} + 1,5 \cdot Q_{doprava\_LM2} = 24977,6772 \text{ kN}$$

$$V_{x16} := 1,5 \cdot Q_{brzdné\_síly} = 2667,375 \text{ kN}$$

$$V_{z16} := 1,5 \cdot \psi_0 \cdot (Q_{povodeň} + Q_{vítr}) = 377,752 \text{ kN}$$

$$M_{x16} := 1,5 \cdot MxQ_{doprava\_LM2} + 1,5 \cdot \psi_0 \cdot (MxQ_{vítr} + MxQ_{povodeň}) = 7577,757 \text{ kN m}$$

$$M_{z16} := 1,5 \cdot MzQ_{brzdné\_síly} = 40714,812 \text{ kN m}$$

$$N_{17} := G_{vlastní\_tíha} + 1,5 \cdot Q_{doprava\_LM2} = 24977,6772 \text{ kN}$$

$$V_{x17} := 1,5 \cdot Q_{brzdné\_síly} = 2667,375 \text{ kN}$$

$$V_{z17} := 1,5 \cdot Q_{vítr} = 364,2436 \text{ kN}$$

$$M_{x17} := 1,5 \cdot (MxQ_{doprava\_LM2} + MxQ_{vítr}) = 7531,2813 \text{ kN m}$$

$$M_{z17} := 1,5 \cdot MzQ_{brzdné\_síly} = 40714,812 \text{ kN m}$$

$$N_{18} := G_{vlastní\_tíha} + 1,5 \cdot Q_{doprava\_LM2} = 24977,6772 \text{ kN}$$

$$V_{x18} := 1,5 \cdot Q_{brzdné\_síly} = 2667,375 \text{ kN}$$

$$V_{z18} := 1,5 \cdot Q_{povodeň} = 13,5084 \text{ kN}$$

$$M_{x18} := 1,5 \cdot (MxQ_{doprava\_LM2} + MxQ_{povodeň}) = 2386,4758 \text{ kN m}$$

$$M_{z18} := 1,5 \cdot MzQ_{brzdné\_síly} = 40714,812 \text{ kN m}$$

$$N_{19} := 1,35 \cdot G_{vlastní\_tíha} = 33071,8643 \text{ kN}$$

$$V_{x19} := 0 \text{ kN}$$

$$V_{z19} := 1,5 \cdot \psi_0 \cdot (Q_{povodeň} + Q_{vítr}) = 377,752 \text{ kN}$$

$$M_{x19} := 1,5 \cdot \psi_0 \cdot (MxQ_{vítr} + MxQ_{povodeň}) = 5237,757 \text{ kN m}$$

$$M_{z19} := 0 \text{ kN m}$$

$$N_{20} := 1,35 \cdot G_{vlastní\_tíha} = 33071,8643 \text{ kN}$$

$$V_{x20} := 0 \text{ kN}$$

$$V_{z20} := 1,5 \cdot Q_{vítr} = 364,2436 \text{ kN}$$

$$M_{x20} := 1,5 \cdot MxQ_{vítr} = 5191,2813 \text{ kN m}$$

$$M_{z20} := 0 \text{ kN m}$$

$$N_{21} := 1,35 \cdot G_{vlastní\_tíha} = 33071,8643 \text{ kN}$$

$$V_{x21} := 0 \text{ kN}$$

$$V_{z21} := 1,5 \cdot Q_{povodeň} = 13,5084 \text{ kN}$$

$$M_{x21} := 1,5 \cdot MxQ_{povodeň} = 46,4758 \text{ kN m}$$

$$M_{z21} := 0 \text{ kN m}$$

$$N_{22} := G_{vlastní\_tíha} = 24497,6772 \text{ kN}$$

$$V_{x22} := 0 \text{ kN}$$

$$V_{z22} := 1,5 \cdot \psi_0 \cdot (Q_{povodeň} + Q_{vítr}) = 377,752 \text{ kN}$$

$$M_{x22} := 1,5 \cdot \psi_0 \cdot (MxQ_{vítr} + MxQ_{povodeň}) = 5237,757 \text{ kN m}$$

$$M_{z22} := 0 \text{ kN m}$$

$$N_{23} := G_{vlastní\_tíha} = 24497,6772 \text{ kN}$$

$$V_{x23} := 0 \text{ kN}$$

$$V_{z23} := 1,5 \cdot Q_{vítr} = 364,2436 \text{ kN}$$

$$M_{x23} := 1,5 \cdot MxQ_{vítr} = 5191,2813 \text{ kN m}$$

$$M_{z23} := 0 \text{ kN m}$$

$$N_{24} := G_{vlastní\_tíha} = 24497,6772 \text{ kN}$$

$$V_{x24} := 0 \text{ kN}$$

$$V_{z24} := 1,5 \cdot Q_{povodeň} = 13,5084 \text{ kN}$$

$$M_{x24} := 1,5 \cdot MxQ_{povodeň} = 46,4758 \text{ kN m}$$

$$M_{z24} := 0 \text{ kN m}$$

$$N_{max} := \max \left( \begin{bmatrix} N_1 & N_2 & N_3 & N_4 & N_5 & N_6 & N_7 & N_8 \\ N_9 & N_{10} & N_{11} & N_{12} & N_{13} & N_{14} & N_{15} & N_{16} \\ N_{17} & N_{18} & N_{19} & N_{20} & N_{21} & N_{22} & N_{23} & N_{24} \end{bmatrix} \right) = 39457,6455 \text{ kN}$$

$$Vx_{max} := \max \left( \begin{bmatrix} V_{x1} & V_{x2} & V_{x3} & V_{x4} & V_{x5} & V_{x6} & V_{x7} & V_{x8} \\ V_{x9} & V_{x10} & V_{x11} & V_{x12} & V_{x13} & V_{x14} & V_{x15} & V_{x16} \\ V_{x17} & V_{x18} & V_{x19} & V_{x20} & V_{x21} & V_{x22} & V_{x23} & V_{x24} \end{bmatrix} \right) = 2667,375 \text{ kN}$$

$$Vz_{max} := \max \left( \begin{bmatrix} V_{z1} & V_{z2} & V_{z3} & V_{z4} & V_{z5} & V_{z6} & V_{z7} & V_{z8} \\ V_{z9} & V_{z10} & V_{z11} & V_{z12} & V_{z13} & V_{z14} & V_{z15} & V_{z16} \\ V_{z17} & V_{z18} & V_{z19} & V_{z20} & V_{z21} & V_{z22} & V_{z23} & V_{z24} \end{bmatrix} \right) = 384,4745 \text{ kN}$$

$$Mx_{max} := \max \left( \begin{bmatrix} M_{x1} & M_{x2} & M_{x3} & M_{x4} & M_{x5} & M_{x6} & M_{x7} & M_{x8} \\ M_{x9} & M_{x10} & M_{x11} & M_{x12} & M_{x13} & M_{x14} & M_{x15} & M_{x16} \\ M_{x17} & M_{x18} & M_{x19} & M_{x20} & M_{x21} & M_{x22} & M_{x23} & M_{x24} \end{bmatrix} \right) =$$

$$= 22033,0003 \text{ kN m}$$

$$Mz_{max} := \max \left( \begin{bmatrix} M_{z1} & M_{z2} & M_{z3} & M_{z4} & M_{z5} & M_{z6} & M_{z7} & M_{z8} \\ M_{z9} & M_{z10} & M_{z11} & M_{z12} & M_{z13} & M_{z14} & M_{z15} & M_{z16} \\ M_{z17} & M_{z18} & M_{z19} & M_{z20} & M_{z21} & M_{z22} & M_{z23} & M_{z24} \end{bmatrix} \right) =$$

$$= 40714,812 \text{ kN m}$$



# NÁVRH ŠTÍHLÉHO PILÍŘE DÁLNIČNÍHO MOSTU

## PŘÍLOHA 2

### STATICKÝ VÝPOČET

Pro následující výpočty je uvažováno maximální zatížení daného směru a smyslu. Hodnoty vycházejí z výpočtů zatížení v příloze 1. Přehled hodnot zatížení se nachází níže.

$$N_{max} := 39457,6455 \text{ kN}$$

$$Vx_{max} := 2667,375 \text{ kN}$$

$$Vz_{max} := 384,4745 \text{ kN}$$

$$Mx_{max} := 22033,0003 \text{ kN m}$$

$$Mz_{max} := 40714,812 \text{ kN m}$$

#### MINIMÁLNÍ EXCENTRICITA

Minimální excentricita

$$e_0 := \min \left( \left[ \left( \frac{h}{30} \right) (20 \text{ mm}) \right] \right)$$

Rozměr ve směru osy x

$$h := 2000 \text{ mm} = 2 \text{ m}$$

Rozměr ve směru osy z

$$b := 3200 \text{ mm} = 3,2 \text{ m}$$

Minimální excentricita pro ohyb podle osy x

$$e_{0_x} := \frac{b}{30} = 106,7 \text{ mm}$$

Minimální excentricita pro ohyb podle osy z

$$e_{0_z} := \frac{h}{30} = 66,6667 \text{ mm}$$

V tabulce níže je vidět změna hodnot momentů po zavedení minimální excentricity. Norma zavádí minimální excentricitu při dvouosém namáhání pouze v tom směru, kde má nejnepříznivější účinky na konstrukci. Pro zjištění těchto účinků byla zavedena v obou směrech a následně v interakčním diagramu porovnána příznivost jejich účinků.

| Kombinace zatížení |               | Posouvající síly |                | Moment I. řádu bez zavedení $e_0$ |                 | Moment I. řádu se zavedení $e_0$ |                 |
|--------------------|---------------|------------------|----------------|-----------------------------------|-----------------|----------------------------------|-----------------|
| #                  | $N_{ed}$ [kN] | $V_{edx}$ [kN]   | $V_{edz}$ [kN] | $M_{edx}$ [kNm]                   | $M_{edz}$ [kNm] | $M_{edx}$ [kNm]                  | $M_{edz}$ [kNm] |
| 1                  | -28917,32     | 120,01           | 384,47         | 5340,37                           | 1191,97         | 5340,37                          | 1927,82         |
| 2                  | -28917,32     | 120,01           | 370,97         | 5293,89                           | -1191,97        | 5293,89                          | -1927,82        |
| 3                  | -28917,32     | 120,01           | 13,51          | 46,48                             | 1191,97         | 3084,51                          | 1927,82         |
| 4                  | -21420,24     | 120,01           | 384,47         | -5340,37                          | -1191,97        | -5340,37                         | -1428,02        |
| 5                  | -21420,24     | 120,01           | 370,97         | -5293,89                          | 1191,97         | -5293,89                         | 1428,02         |
| 6                  | -21420,24     | 120,01           | 13,51          | -46,48                            | -1191,97        | -2284,83                         | -1428,02        |
| 7                  | -39457,65     | 2667,38          | 377,75         | 22033,00                          | 40714,81        | 22033,00                         | 40714,81        |
| 8                  | -39457,65     | 2667,38          | 364,24         | 21986,52                          | -40714,81       | 21986,52                         | -40714,81       |
| 9                  | -39457,65     | 2667,38          | 13,51          | 16841,72                          | 40714,81        | 16841,72                         | 40714,81        |
| 10                 | -30883,46     | 2667,38          | 377,75         | -22033,00                         | -40714,81       | -22033,00                        | -40714,81       |
| 11                 | -30883,46     | 2667,38          | 364,24         | -21986,52                         | 40714,81        | -21986,52                        | 40714,81        |
| 12                 | -30883,46     | 2667,38          | 13,51          | -16841,72                         | -40714,81       | -16841,72                        | -40714,81       |
| 13                 | -33551,86     | 2667,38          | 377,75         | 7577,76                           | 40714,81        | 7577,76                          | 40714,81        |
| 14                 | -33551,86     | 2667,38          | 364,24         | 7531,28                           | -40714,81       | 7531,28                          | -40714,81       |
| 15                 | -33551,86     | 2667,38          | 13,51          | 2386,48                           | 40714,81        | 3578,87                          | 40714,81        |
| 16                 | -24977,68     | 2667,38          | 377,75         | -7577,76                          | -40714,81       | -7577,76                         | -40714,81       |
| 17                 | -24977,68     | 2667,38          | 364,24         | -7531,28                          | 40714,81        | -7531,28                         | 40714,81        |
| 18                 | -24977,68     | 2667,38          | 13,51          | -2386,48                          | -40714,81       | -2664,29                         | -40714,81       |
| 19                 | -33071,86     | 0,00             | 377,75         | 5237,76                           | 0,00            | 5237,76                          | 2204,79         |
| 20                 | -33071,86     | 0,00             | 364,24         | 5191,28                           | 0,00            | 5191,28                          | 2204,79         |
| 21                 | -33071,86     | 0,00             | 13,51          | 46,48                             | 0,00            | 3527,67                          | 2204,79         |
| 22                 | -24497,68     | 0,00             | 377,75         | -5237,76                          | 0,00            | -5237,76                         | 1633,18         |
| 23                 | -24497,68     | 0,00             | 364,24         | -5191,28                          | 0,00            | -5191,28                         | 1633,18         |
| 24                 | -24497,68     | 0,00             | 13,51          | -46,48                            | 0,00            | -2613,09                         | 1633,18         |

## NÁVRH PILÍŘE

### MATERIÁLY

#### Beton

Pevnostní třída C 30/37

Tlaková pevnost  $f_{ck} := 35 \text{ MPa}$

Návrhový součinitel  $\gamma_c := 1,5$

Návrhová pevnost  $f_{cd} := \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 23,33 \text{ MPa}$

Průměrný modul pružnosti  $E_{cm} := 34 \text{ GPa}$

Poměrné přetvoření při maximálním napětí  $\varepsilon_{c3} := 0,00175$

Mezní poměrné přetvoření  $\varepsilon_{cu3} := 0,0035$

#### Výztuž

Ocel B500B

Pevnost  $f_{yk} := 500 \text{ MPa}$

Návrhový součinitel  $\gamma_s := 1,15$

Návrhová pevnost  $f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 434,783 \text{ MPa}$

Modul pružnosti  $E_s := 200 \text{ GPa}$

Smluvní mezní poměrné přetvoření  $\varepsilon_{yd} := \frac{f_{yd}}{E_s} = 0,00217$

### ROZMĚRY PILÍŘE

Odhad rozměrů pilíře vychází ze situace a je optimalizován v interakčním diagramu

Rozměr ve směru osy x  $h = 2 \text{ m}$

Rozměr ve směru osy z  $b = 3,2 \text{ m}$

Plocha betonového průřezu  $A_c := h \cdot b = 6,4 \cdot 10^6 \text{ mm}^2$

Odhad plochy betonového průřezu  $A_c \geq A_{c,Rq}$

Únosnost pilíře v dostředném tlaku

$$N_{Rd\_} := 0,8 \cdot A_c \cdot f_{cd} + A_s \cdot \sigma_s \geq N_{Ed}$$

Potřebná plocha betonového průřezu  $A_{c,Rq} := \frac{N_{max}}{0,8 \cdot f_{cd} + \rho_{odhad} \cdot \sigma_s}$

Odhad plochy výztuže podle ID  $A_{s,odhad} := 73990,8 \text{ mm}^2$

Odhad stupně vyztužení průřezu  $\rho_{odhad} := \frac{A_{s,odhad}}{A_c} = 1,16 \%$

Napětí ve výztuži  $\sigma_s := \varepsilon_{c3} \cdot E_s = 350 \text{ MPa}$

Hodnota potřebné plochy průřezu

$$A_{c,Rq} := \frac{N_{max}}{0,8 \cdot f_{cd} + \rho_{odhad} \cdot \sigma_s} = 1,7372 \text{ m}^2$$

Posouzení plochy průřezu  $A_c = 6,4 \text{ m}^2 > A_{c,Rq} = 1,7372 \text{ m}^2$

### KRYCÍ VRSTVA

Stupně vlivu prostředí: Karbonatace XC4

Chloridy XD1

Mráz XF2

Odhad průměru prutu  $c_{min,b} := 32 \text{ mm}$

Minimální hodnota krycí vrstvy pro trvanlivost

$$c_{min,dur} := 40 \text{ mm}$$

Beton bez ochranného nátěru  $\Delta c_{dur,add} := 0 \text{ mm}$

Nekorozivzdorná výztuž  $\Delta c_{dur,st} := 0 \text{ mm}$

Bezpečnostní složka  $\Delta c_{dur,\gamma} := 0 \text{ mm}$

Minimální krycí vrstva

$$c_{min} := \max \left( \left[ \left( c_{min,b} \right) \left( c_{min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add} \right) (10 \text{ mm}) \right] \right) = 40 \text{ mm}$$

Přídavek pro návrhovou odchylku  $\Delta c_{dev} := 10 \text{ mm}$

Nominální hodnota krycí vrstvy  $c_{nom} := c_{min} + \Delta c_{dev} = 50 \text{ mm}$

### NÁVRH VÝZTUŽE

Odhad potřebné výztuže proběhl na základě dat z interakčního diagramu

Odhad profilu třmínků  $\phi_{odhad,tř} := 14 \text{ mm}$

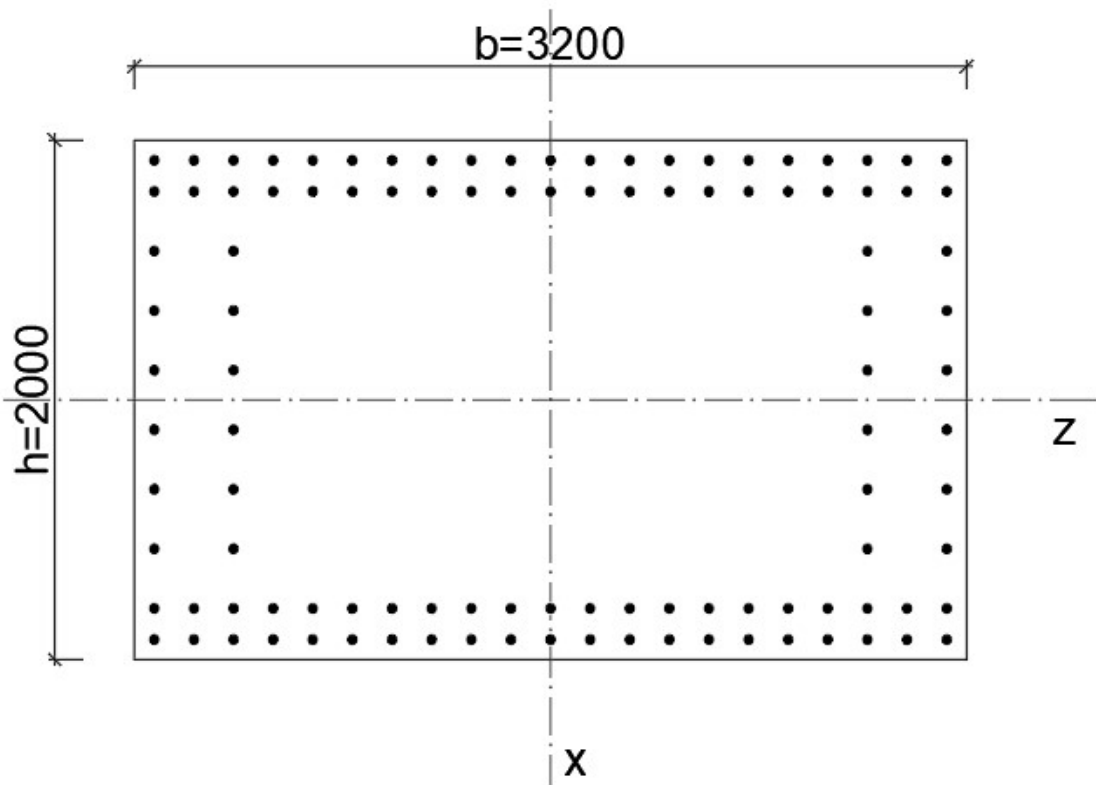
Odhad profilu hlavní výztuže  $\phi_{odhad,hl} := c_{min,b} = 32 \text{ mm}$

Maximální velikost zrna  $d_{max} := 22 \text{ mm}$

Minimální světlá vzdálenost výztuže

$$s_{min} := \max\left[\left[1, 2 \cdot d_{max}\right] \left(d_{max} + 5 \text{ mm}\right) (20 \text{ mm})\right] = 27 \text{ mm}$$

Výztuž bude rozmístěna do dvou řad podle následujícího orientačního náčrtu. Přesné rozmístění výztuže lze nalézt ve výkresu výztuže.



## OVĚŘENÍ ŠTÍHLOSTNÍHO KRITÉRIA

Účinky druhého řádu lze zanedbat, pokud  $\lambda_{lim} > \lambda$   
Lze posoudit pro každý směr zvlášť

### **NAMÁHANÍ OHYBOVÝM MOMENTEM ROVNOBĚŽNÝM S OSOU Z**

Limitní štíhlost 
$$\lambda_{lim} := \frac{20 \cdot A \cdot B \cdot C}{\sqrt{n}}$$

Koeficient A, norma umožňuje zjednodušeně uvažovat  $A := 0,7$

Koeficient B, norma umožňuje zjednodušeně uvažovat  $B := 1,1$

Koeficient C, norma umožňuje zjednodušeně uvažovat  $C := 0,7$

Poměrná normálová síla 
$$n := \frac{N_{Ed}}{A_c \cdot f_{cd}}$$

Návrhová hodnota normálové síly 
$$N_{Ed} := N_{max} = 39457,6455 \text{ kN}$$

Plocha betonového průřezu 
$$A_c = 6,4 \cdot 10^6 \text{ mm}^2$$

Návrhová pevnost betonu v tlaku 
$$f_{cd} = 23,3333 \text{ MPa}$$

Tlaková únosnost betonového průřezu 
$$A_c \cdot f_{cd} = 1,4933 \cdot 10^5 \text{ kN}$$

Hodnota poměrné normálové síly 
$$n := \frac{N_{Ed}}{A_c \cdot f_{cd}} = 0,2642$$

Hodnota limitní štíhlosti 
$$\lambda_{lim} := \frac{20 \cdot A \cdot B \cdot C}{\sqrt{n}} = 20,9716$$

Štíhlost pilíře 
$$\lambda_z := \frac{L_{vz}}{i_{c_z}}$$

Vzpěrná délka 
$$L_{vz} := \beta \cdot l_0$$

Součinitel  $\beta$  
$$\beta := 3$$

Světlná výška pilíře 
$$l_0 := 15264 \text{ mm}$$

Hodnota kritické délky 
$$L_{vz} := \beta \cdot l_0 = 45792 \text{ mm}$$

Poloměr setrvačnosti průřezu 
$$i_{c_z} := \sqrt{\frac{I_c}{A_c}}$$

Moment setrvačnosti 
$$I_{c_z} := \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3$$

Rozměr v hlavním směru h 
$$h = 2 \text{ m}$$

Rozměr ve vedlejším směru b 
$$b = 3,2 \text{ m}$$

Hodnota momentu setrvačnosti 
$$I_{c_z} := \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 = 2,1333 \text{ m}^4$$

Hodnota poloměru setrvačnosti  $i_{c_z} := \sqrt{\frac{I_{c_z}}{A_c}} = 0,5774 \text{ m}$

Hodnota štíhlosti pilíře  $\lambda_z := \frac{L_{vz}}{i_{c_z}} = 79,3141$

Posouzení štíhlostního kritéria  $\lambda_{lim} = 20,9716 < \lambda_z = 79,3141$

→ pro směr "z" účinky druhého řádu nelze zanedbat

### **NAMÁHANÍ OHYBOVÝM MOMENTEM ROVNOBĚŽNÝM S OSOU X**

Limitní štíhlost  $\lambda_{lim} := \frac{20 \cdot A \cdot B \cdot C}{\sqrt{n}} = 20,9716$

Štíhlost pilíře  $\lambda_x := \frac{L_{vz}}{i_{c_x}}$

Hodnota kritické délky  $L_{vz} := \beta \cdot l_0 = 45792 \text{ mm}$

Poloměr setrvačnosti průřezu  $i_{c_x} := \sqrt{\frac{I_{c_x}}{A_c}}$

Moment setrvačnosti  $I_{c_x} := \frac{1}{12} \cdot h \cdot b^3 = 5,4613 \text{ m}^4$

Poloměr setrvačnosti průřezu  $i_{c_x} := \sqrt{\frac{I_{c_x}}{A_c}} = 0,9238 \text{ m}$

Hodnota štíhlosti pilíře  $\lambda_x := \frac{L_{vz}}{i_{c_x}} = 49,5713$

Posouzení štíhlostního kritéria  $\lambda_{lim} = 20,9716 < \lambda_x = 49,5713$

→ pro směr "x" účinky druhého řádu nelze zanedbat

### **ANALÝZA ÚČINKŮ DRUHÉHO ŘÁDU NA PILÍŘĚ**

#### **METODA ZALOŽENÁ NA JMENOVITÉ TUHOSTI**

##### **Směr "z"**

Jmenovitá tuhost  $EI := K_c \cdot E_{cd} \cdot I_{c_z} + K_s \cdot E_s \cdot I_{s_z}$

Návrhová hodnota modulu pružnosti betonu  $E_{cd} := \frac{E_{cm}}{\gamma_{CE}}$

V ČR platí doporučená hodnota součinitele  $\gamma_{CE} := 1,2$

Průměrný modul pružnosti betonu dané pevnosti  $E_{cm} = 34 \text{ GPa}$

Návrhová hodnota modulu pružnosti betonu

$$E_{cd} := \frac{E_{cm}}{\gamma_{CE}} = 28,3333 \text{ GPa}$$

Moment setrvačnosti betonového průřezu  $I_{c\_z} = 2,1333 \text{ m}^4$

Návrhová hodnota modulu pružnosti výztuže  $E_s := 200 \text{ GPa}$

Moment setrvačnosti výztuže

$$I_{s\_z} := 54662697212 \text{ mm}^4 = 0,0547 \text{ m}^4$$

$\rho_{odhad} = 1,16 \% \geq 0,2 \% \rightarrow$  lze použít následující hodnoty

Součinitel zohledňující příspěvek výztuže  $K_s := 1$

Součinitel zohledňující vliv trhlin a dotvarování

$$K_c := \frac{k_1 \cdot k_2}{(1 + \phi_{ef})} \quad k_1 := \sqrt{\frac{f_{ck}}{20 \text{ MPa}}} = 1,3229 \quad k_2 := n \cdot \frac{\lambda_z}{170} \leq 0,20$$

$$k_2 = 0,1233$$

Hodnota součinitele dotvarování byla určena z grafů z normy, viz obrázek níže, vstupní hodnoty jsou popsány také níže

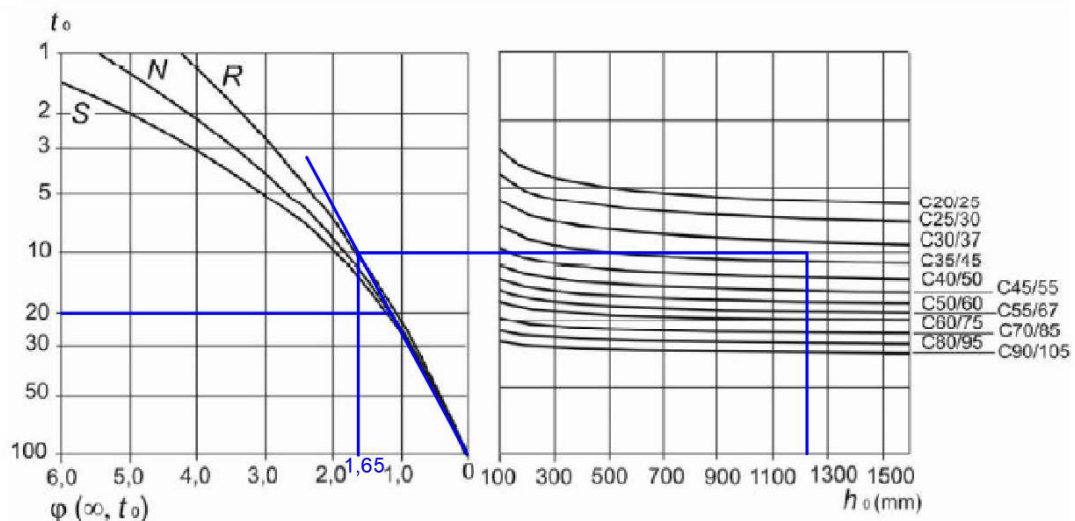
Rychlost vývoje počátečních pevností uvažována normální  $\rightarrow N$

Stáří betonu při počátku zatěžování je z důvodů přípravy podložiskových bločků, osazování ložisek a bednění nosné konstrukce uvažováno 20 dní  $\rightarrow t_0 := 20 \text{ day}$

Náhradní rozměr průřezu  $h_0 := \frac{2 \cdot A_c}{u}$

Obvod části průřezu vystavené vysychání  $u := 2 \cdot (h + b) = 10,4 \text{ m}$

Hodnota náhradního rozměru průřezu  $h_0 = 1,2308 \text{ m}$





Hodnota součinitele dotvarování  $\varphi_{ef} := 1,65$

Hodnota součinitele zohledňujícího vliv trhlin  
a dotvarování

$$K_c := \frac{k_1 \cdot k_2}{(1 + \varphi_{ef})} = 0,0615$$

Hodnota jmenovité tuhosti

$$EI := K_c \cdot E_{cd} \cdot I_{c_z} + K_s \cdot E_s \cdot I_{s_z} = 14652,2168 \text{ MN m}^2$$

Návrhový moment II.řádu  $M_{Ed\_tuhost\_z} := M_{0Ed} \cdot \left( 1 + \frac{\beta_M}{\frac{N_B}{N_{Ed}} - 1} \right)$

Součinitel rozdělení momentů I. a II. řádu  $\beta_M := \frac{\pi}{c_0}$

Součinitel závislý na průběhu momentu I. řádu  $c_0 := 9,6$

Hodnota součinitele rozdělení momentu I. a II. řádu

$$\beta_M = 1,0281$$

Návrhová hodnota normálového zatížení

$$N_{Ed} := N_{max} = 39457,6455 \text{ kN}$$

Vzpěrné břemeno zahrnující jmenovitou tuhost

$$N_B := EI \cdot \frac{\pi^2}{l_0^2} = 6,2068 \cdot 10^5 \text{ kN}$$

Návrhový moment I. řádu

$$M_{0Ed} := MZ_{max} = 40714,812 \text{ kN m}$$

Celkový návrhový moment

$$M_{Ed\_tuhost\_z} := M_{0Ed} \cdot \left( 1 + \frac{\beta_M}{\frac{N_B}{N_{Ed}} - 1} \right) = 43556,4666 \text{ kN m}$$

### Směr "x"

Jmenovitá tuhost

$$EI := K_c \cdot E_{cd} \cdot I_{c_x} + K_s \cdot E_s \cdot I_{s_x}$$

Návrhová hodnota modulu pružnosti betonu

$$E_{cd} := \frac{E_{cm}}{\gamma_{CE}} = 28,3333 \text{ GPa}$$

Moment setrvačnosti betonového průřezu  $I_{c_x} = 5,4613 \text{ m}^4$

Návrhová hodnota modulu pružnosti výztuže  $E_s := 200 \text{ GPa}$

Moment setrvačnosti výztuže

$$I_{s\_x} := 50486528335 \text{ mm}^4 = 0,0505 \text{ m}^4$$

$$A_{s,odhad\_x} := 25735,9 \text{ mm}^2$$

$$\rho_{odhad\_x} := \frac{A_{s,odhad\_x}}{A_c} = 0,4 \% \geq 0,2\% \rightarrow \text{lze použít následující hodnoty}$$

Součinitel zohledňující příspěvek výztuže  $K_s := 1$

Součinitel zohledňující vliv trhlin a dotvarování

$$K_c := \frac{k_1 \cdot k_2}{(1 + \varphi_{ef})} \quad k_1 := \sqrt{\frac{f_{ck}}{20 \text{ MPa}}} = 1,3229 \quad k_2 := n \cdot \frac{\lambda_x}{170} \leq 0,20$$
$$k_2 = 0,077$$

Hodnota součinitele dotvarování  $\varphi_{ef} = 1,65$

Hodnota součinitele zohledňujícího vliv trhlin a dotvarování

$$K_c := \frac{k_1 \cdot k_2}{(1 + \varphi_{ef})} = 0,0385$$

Hodnota jmenovité tuhosti

$$EI := K_c \cdot E_{cd} \cdot I_{c\_x} + K_s \cdot E_s \cdot I_{s\_x} = 16048,7894 \text{ MN m}^2$$

Návrhový moment II.řádu  $M_{Ed\_tuhost\_x} := M_{0Ed} \cdot \left( 1 + \frac{\beta_M}{\frac{N_B}{N_{Ed}} - 1} \right)$

Hodnota součinitele rozdělení momentu I. a II. řádu

$$\beta_M = 1,0281$$

Návrhová hodnota normálového zatížení

$$N_{Ed} := N_{max} = 39457,6455 \text{ kN}$$

Vzpěrné břemeno zahrnující jmenovitou tuhost

$$N_B := EI \cdot \frac{\pi^2}{l_0^2} = 6,7984 \cdot 10^5 \text{ kN}$$

Návrhový moment I. řádu

$$M_{0Ed} := Mx_{max} = 22033,0003 \text{ kN m}$$

Celkový návrhový moment

$$M_{Ed\_tuhost\_x} := M_{0Ed} \cdot \left( 1 + \frac{\beta_M}{\frac{N_B}{N_{Ed}} - 1} \right) = 23428,7112 \text{ kN m}$$

## METODA ZALOŽENÁ NA JMENOVITÉ KŘIVOSTI

### Směr "z"

Poznámka: křivost je v následujících výpočtech označována "κ" [1/m]

Návrhový moment  $M_{Ed\_křivost\_z} := M_{0Ed} + M_2$

Návrhový moment I. řádu  $M_{0Ed} := Mz_{max} = 40714,812 \text{ kN m}$

Jmenovitý moment II. řádu  $M_2 := N_{Ed} \cdot e_2$

Návrhová hodnota normálové síly  $N_{Ed} := N_{max} = 39457,6455 \text{ kN}$

Průhyb  $e_2 := \kappa \cdot \frac{l_0^2}{c}$

Výška pilíře  $l_0 = 15,264 \text{ m}$

Součinitele závislý na rozdělení křivosti, podle normy může být pro konstantní průřez:  $c := 10$

Křivost  $\kappa := K_r \cdot K_\varphi \cdot \kappa_0$

Průřezová křivost  $\kappa_0 := \frac{\varepsilon_{yd}}{0,45 \cdot d_z}$

Účinná výška vypočtená z těžiště obou řad výztuže

$$d_z := 1857,4 \text{ mm}$$

Hodnota průřezové křivosti  $\kappa_0 = 0,0026 \cdot \frac{1}{m}$

Opravný součinitel  $K_r := \frac{n_u - n}{n_u - n_{bal}} \leq 1$

Poměrná normálová síla  $n := \frac{N_{Ed}}{A_c \cdot f_{cd}} = 0,2642$

Hodnota "n" při maximální momentové únosnosti, dle normy lze uvažovat hodnotu  $n_{bal}$  následovně  $n_{bal} := 0,4$

Účinná poměrná normálová síla  $n_u := 1 + \omega$

Poměr únosností  $\omega := \frac{A_{s,odhad} \cdot f_{yd}}{A_c \cdot f_{cd}} = 0,2154$

Účinná poměrná normálová síla  $n_u = 1,2154$

Opravný součinitel  $K_r := \max \left( \left[ \left( \frac{n_u - n}{n_u - n_{bal}} \right) (1) \right] \right) = 1,1665$

|  |   |
|--|---|
| Součinitel křivosti pto dotvarování  | $K_\varphi := 1 + \beta_\kappa \cdot \varphi_{ef} \geq 1$   |
| Součinitel dotvarování   | $\varphi_{ef} = 1,65$   |
| Součinitel   | $\beta_\kappa := 0,35 + \frac{f_{ck}}{200 \text{ MPa}} - \frac{\lambda_z}{150}$                       |
| Štíhlost   | $\lambda_z = 79,3141$   |
| Pevnost betonu v tlaku   | $f_{ck} = 35 \text{ MPa}$   |
| Hodnota součinitele  | $\beta_\kappa = -0,0038$  |
| Součinitel křivosti pro dotvarování  | $K_\varphi := \max\left(\left[\left(1 + \beta_\kappa \cdot \varphi_{ef}\right) (1)\right]\right) = 1$ |
| Křivost  | $\kappa := K_r \cdot K_\varphi \cdot \kappa_0 = 0,003 \cdot \frac{1}{m}$                              |
| Průhyb   | $e_2 := \kappa \cdot \frac{l_0^2}{c} = 0,0707 \text{ m}$  |
| Jmenovitý moment II. řádu  | $M_2 := N_{Ed} \cdot e_2 = 2789,2015 \text{ kN m}$  |
| Celkový návrhový moment  | $M_{Ed\_křivost\_z} := M_{0Ed} + M_2 = 43504,0135 \text{ kN m}$                                       |
| <b>Směr "x"</b>  |   |
| Návrhový moment  | $M_{Ed\_křivost\_z} := M_{0Ed} + M_2$   |
| Návrhový moment I. řádu  | $M_{0Ed} := M_{x_{max}} = 22033,0003 \text{ kN m}$  |
| Jmenovitý moment II. řádu  | $M_2 := N_{Ed} \cdot e_2$   |
| Návrhová hodnota normálové síly  | $N_{Ed} := N_{max} = 39457,6455 \text{ kN}$   |
| Průhyb   | $e_2 := \kappa \cdot \frac{l_0^2}{c}$   |
| Součinitele závislý na rozdělení křivosti, podle normy může být pro konstantní průřez: | $c := 10$   |
| Křivost  | $\kappa := K_r \cdot K_\varphi \cdot \kappa_0$  |
| Průřezová křivost  | $\kappa_0 := \frac{\varepsilon_{yd}}{0,45 \cdot d_x}$   |
| Účinná výška vypočtená z těžiště obou řad výztuže                                      | $d_x := 2995,0 \text{ mm}$  |

Hodnota průřezové křivosti  $\kappa_0 = 0,0016 \cdot \frac{1}{m}$

Opravný součinitel  $K_r := \max \left[ \left[ \left( \frac{n_u - n}{n_u - n_{bal}} \right) (1) \right] \right] = 1,1665$

Součinitel křivosti pro dotvarování  $K_\varphi := 1 + \beta_\kappa \cdot \varphi_{ef} \geq 1$

Součinitel dotvarování  $\varphi_{ef} = 1,65$

Součinitel  $\beta_\kappa := 0,35 + \frac{f_{ck}}{200 \text{ MPa}} - \frac{\lambda_x}{150}$

Štíhlost  $\lambda_x = 49,5713$

Součinitel  $\beta_\kappa = 0,1945$

Součinitel křivosti pto dotvarování  $K_\varphi := \max \left[ \left[ \left( 1 + \beta_\kappa \cdot \varphi_{ef} \right) (1) \right] \right] = 1,321$

Křivost  $\kappa := K_r \cdot K_\varphi \cdot \kappa_0 = 0,0025 \cdot \frac{1}{m}$

Průhyb  $e_2 := \kappa \cdot \frac{l_0^2}{c} = 0,0579 \text{ m}$

Jmenovitý moment II. řádu  $M_2 := N_{Ed} \cdot e_2 = 2284,9677 \text{ kN m}$

Celkový návrhový moment  $M_{Ed\_křivost\_x} := M_{0Ed} + M_2 = 24317,968 \text{ kN m}$

### DVOUOSÉ NAMÁHÁNÍ

Pokud návrh vyhoví následujícím podmínkám, lze dle normy od dalších výpočtů upustit a stačí posoudit každý směr zvlášť

$$\frac{\lambda_x}{\lambda_z} = 0,625 \leq 2$$

Ověření podmínek pro poměr štíhlostí

$$\frac{\lambda_z}{\lambda_x} = 1,6 \leq 2$$

Ověření poměrných výstředností  $\frac{e_x}{h} \leq 0,2$  nebo  $\frac{e_z}{b} \leq 0,2$

$$\frac{e_z}{b} \leq 0,2 \quad \text{nebo} \quad \frac{e_x}{h} \leq 0,2$$

Výstřednost ve směru osy x 
$$e_x := \frac{M_{Edz}}{N_{Ed}}$$

Výstřednost ve směru osy z 
$$e_z := \frac{M_{Edx}}{N_{Ed}}$$

Návrhové momenty zahrnující účinky druhého řádu jsou určeny jako vyšší z výsledků obou zjednodušených metod pro daný směr.

Návrhový moment ve směru osy x

$$M_{Edx} := \max \left( \left[ M_{Ed\_křivost\_x} \quad M_{Ed\_tuhost\_x} \right] \right) = 24317,968 \text{ kN m}$$

Návrhový moment ve směru osy z

$$M_{Edz} := \max \left( \left[ M_{Ed\_křivost\_z} \quad M_{Ed\_tuhost\_z} \right] \right) = 43556,4666 \text{ kN m}$$

Návrhová hodnota normálové síly  $N_{Ed} = 39457,6455 \text{ kN}$

Výstřednost ve směru osy x 
$$e_x := \frac{M_{Edz}}{N_{Ed}} = 1,1039 \text{ m}$$

Výstřednost ve směru osy z 
$$e_z := \frac{M_{Edx}}{N_{Ed}} = 0,6163 \text{ m}$$

Ověření poměrných výstředností 
$$\frac{e_x}{\frac{h}{b}} = 2,8658 > 0,2$$

$$\frac{e_z}{\frac{e_x}{h}} = 0,3489 > 0,2$$

→ účinky dvouosého namáhní nelze zanedbat

Zjednodušené kritérium pro posouzení dvouosého namáhání

$$\left( \frac{M_{Edz}}{M_{Rdz}} \right)^a + \left( \frac{M_{Edx}}{M_{Rdx}} \right)^a \leq 1,0$$

Ohybové únosnosti pro jednotlivé směry jsou určeny na základě interakčního diagramu

Ohybová únosnost ve směru osy x  $M_{Rdx} := 72496,0 \text{ kN m}$

Ohybová únosnost ve směru osy z  $M_{Rdz} := 63191,6 \text{ kN m}$

Hodnoty exponentu "a" nabývají hodnot podle následující tabulky (s možností lineární interpolace)

|                 |     |     |     |
|-----------------|-----|-----|-----|
| $N_{Ed}/N_{Rd}$ | 0,1 | 0,7 | 1,0 |
| a =             | 1,0 | 1,5 | 2,0 |

Návrhová únosnost osově namáhaného průřezu

$$N_{Rd} := A_c \cdot f_{cd} + A_{s, odhad} \cdot f_{yd} = 1,815 \cdot 10^5 \text{ kN}$$

Poměr  $\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} = 0,2174$

Hodnota exponentu  $a := 1,0 + \frac{\left(\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} - 0,1\right) \cdot (1,5 - 1,0)}{0,7 - 0,1} = 1,0978$

Zjednodušené kritérium pro posouzení dvouosého namáhání

$$\left(\frac{M_{Edz}}{M_{Rdz}}\right)^a + \left(\frac{M_{Edx}}{M_{Rdx}}\right)^a = 0,9661 < 1,0$$

**NÁVRH:** Horní výztuž - 1. řada 22 x  $\phi := 32 \text{ mm}$   
 Horní výztuž - 2. řada 24 x  $\phi := 32 \text{ mm}$   
 Spodní výztuž - 1. řada 22 x  $\phi := 32 \text{ mm}$   
 Spodní výztuž - 2. řada 24 x  $\phi := 32 \text{ mm}$

## NÁVRH SMYKOVÉ VÝZTUŽE PILÍŘE

### SMĚR Z

Únosnost tlačené diagonály  $V_{Rd,max} := \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v \cdot f_{cd}}{\cot(\theta) + \tan(\theta)}$

Průměrné napětí od normálové síly  $\sigma_{c,prům} := 9,7373 \text{ MPa}$

Součinitel  $\alpha_{cw} := 1,25$

Šířka trámu  $b_w := b = 3,2 \text{ m}$

Rameno vnitřních sil  $z := 0,9 \cdot d$

Účinná výška  $d_x = 2995 \text{ mm}$

Rameno vnitřních sil  $z := 0,9 \cdot d_x = 2695,5 \text{ mm}$

Návrhová pevnost betonu v tlaku  $f_{cd} = 23,3333 \text{ MPa}$

Úhel smykových trhlin

$$\theta := 33^\circ$$

$$\cot(\theta) = 1,5399$$

Pro  $f_{ck} < 60$  MPa platí redukční součinitel  $\nu := 0,6$

Únosnost tlačené diagonály  $V_{Rd,max} := \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot \nu \cdot f_{cd}}{\cot(\theta) + \tan(\theta)} =$   
 $= 68,9489$  MN

Návrh plochy třmínek  $V_{Rd,s} := \frac{A_{sw}}{s_1} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot(\theta)$

$$V_{Ed,1} \leq V_{Rd,s}$$

Plocha 1 třmínku  $A_{sw,1} := \frac{n_{střižné} \cdot \pi \cdot \phi_{odhad,tř}^2}{4}$

Třmínky jsou n-střižné  $n_{střižné} := 4$

Odhad průměru třmínku  $\phi_{odhad,tř} = 14$  mm

Plocha 1 třmínku  $A_{sw,1} := \frac{n_{střižné} \cdot \pi \cdot \phi_{odhad,tř}^2}{4} =$   
 $= 615,7522$  mm<sup>2</sup>

Osová vzdálenost třmínek  $s_1 := \frac{A_{sw,1} \cdot f_{yd}}{V_{Ed,1}} \cdot z \cdot \cot(\theta)$

Mez kluzu výztuže  $f_{yd} = 434,7826$  MPa

Návrhové zatížení  $V_{Ed,1} := VZ_{max} = 384,4745$  kN

Minimální vzdálenost třmínek  $s_1 := \frac{A_{sw,1} \cdot f_{yd}}{V_{Ed,1}} \cdot z \cdot \cot(\theta) =$   
 $= 2,8902$  m

### SMĚR X

Únosnost tlačené diagonály  $V_{Rd,max} := \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot \nu \cdot f_{cd}}{\cot(\theta) + \tan(\theta)}$

Součinitel  $\alpha_{cw} := 1 + \frac{\sigma_{c,prům}}{f_{cd}} = 1,4173$

Šířka trámu  $b_w := h = 2$  m

Rameno vnitřních sil  $z := 0,9 \cdot d$



|                              |   |
|------------------------------|---|
| Účinná výška                 | $d_z = 1857,4 \text{ mm}$   |
| Rameno vnitřních sil         | $z := 0,9 \cdot d_z = 1671,66 \text{ mm}$   |
| Únosnost tlačené diagonály   | $V_{Rd,max} := \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v \cdot f_{cd}}{\cot(\theta) + \tan(\theta)} =$<br>$= 30,302 \text{ MN}$ |
| Návrh plochy třmínků         | $V_{Rd,s} := \frac{A_{sw}}{s_2} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot(\theta)$<br>$V_{Ed,1} \leq V_{Rd,s}$                             |
| Plocha 1 třmínku             | $A_{sw,1} := \frac{n_{střižné} \cdot \pi \cdot \phi_{odhad,tř}^2}{4}$   |
| Třmínky jsou n-střižné       | $n_{střižné} := 4$  |
| Odhad průměru třmínku        | $\phi_{odhad,tř} = 14 \text{ mm}$   |
| Plocha 1 třmínku             | $A_{sw,1} := \frac{n_{střižné} \cdot \pi \cdot \phi_{odhad,tř}^2}{4} =$<br>$= 615,7522 \text{ mm}^2$                              |
| Osová vzdálenost třmínků     | $s_2 := \frac{A_{sw,1} \cdot f_{yd}}{V_{Ed,1}} \cdot z \cdot \cot(\theta)$  |
| Mez kluzu výztuže            | $f_{yd} = 434,7826 \text{ MPa}$   |
| Návrhové zatížení            | $V_{Ed,1} := Vz_{max} = 384,4745 \text{ kN}$  |
| Minimální vzdálenost třmínků | $s_2 := \frac{A_{sw,1} \cdot f_{yd}}{V_{Ed,1}} \cdot z \cdot \cot(\theta) =$<br>$= 1,7924 \text{ m}$                              |

### KONSTRUKČNÍ ZÁSADY

Minimální konstrukční vzdálenost třmínků

$$s_{konstrukční} := \min \left( \left[ \left( 0,75 \cdot d_x \right) \left( 400 \text{ mm} \right) \right] \right) = 400 \text{ mm}$$

Maximální stupeň vyztužení  $\rho_{sw,max} := \frac{0,5 \cdot v \cdot f_{cd}}{f_{ywd}}$

Maximální napětí v třmínkách  $f_{ywd} := f_{yd} = 434,7826 \text{ MPa}$

Maximální stupeň vyztužení  $\rho_{sw,max} := \frac{0,5 \cdot v \cdot f_{cd}}{f_{ywd}} = 1,61 \%$

Minimální stupeň vyztužení  $\rho_{sw,min} := \frac{0,08 \cdot \sqrt{f_{ck} \text{ MPa}}}{f_{yk}} =$   
 $= 0,0947 \%$

Skutečný stupeň vyztužení "z"  $\rho_{sw} := \frac{A_{sw,1}}{b \cdot s_{konstrukční}} = 0,0481 \%$

Skutečný stupeň vyztužení "x"  $\rho_{sw} := \frac{A_{sw,1}}{h \cdot s_{konstrukční}} = 0,077 \%$

Vzdálenost mezi třmínky  $s := 200 \text{ mm}$

Skutečný stupeň vyztužení "z"  $\rho_{sw} := \frac{A_{sw,1}}{b \cdot s} = 0,0962 \%$

Skutečný stupeň vyztužení "x"  $\rho_{sw} := \frac{A_{sw,1}}{h \cdot s} = 0,1539 \%$

**NÁVRH: Třmínek čtyřstřížný**  $\phi_{tř} := 14 \text{ mm} \quad s = 200 \text{ mm}$

### POSOUZENÍ

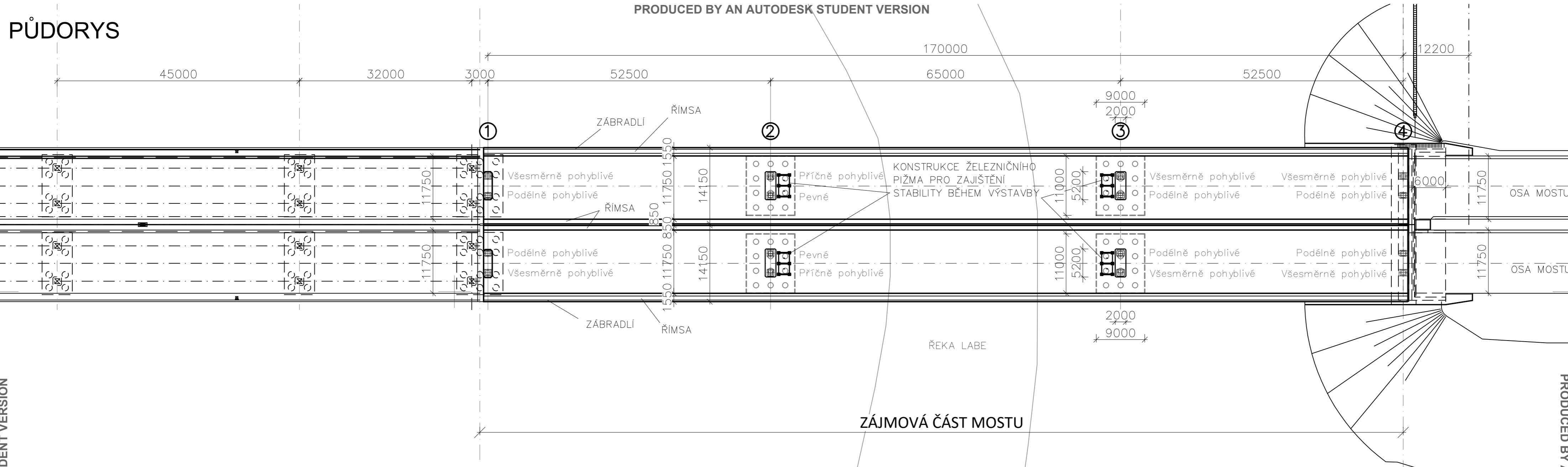
Smyková únosnost  $V_{Rd,1} := \frac{A_{sw,1} \cdot f_{yd}}{s} \cdot z \cdot \cot(\theta) = 3445,7098 \text{ kN}$

Maximální zatížení  $V_{Ed,max} := \max \left( \left[ V_{x,max} \quad V_{z,max} \right] \right) = 2667,375 \text{ kN}$

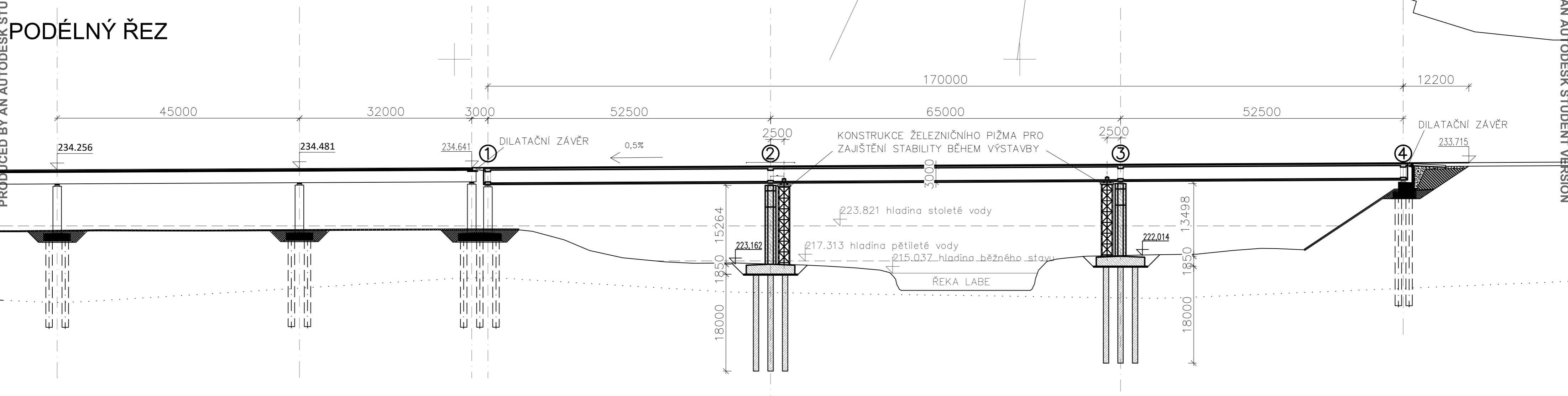
$$V_{Rd,1} \geq V_{Ed,max}$$

# PŮDORYS

PRODUCED BY AN AUTODESK STUDENT VERSION



# PODÉLNÝ ŘEZ

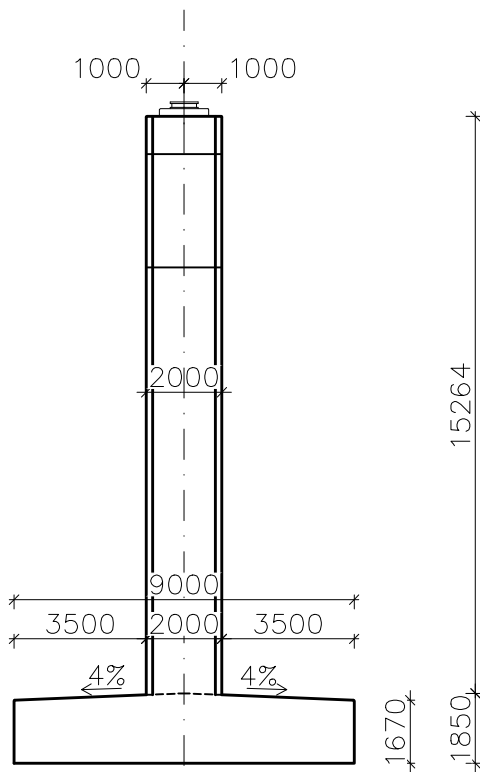


- BETON C 25/30 – PILOTY
- BETON C 12/15 – PODKLADNÍ BETON
- BETON C 30/37 – ZÁKLADOVÁ PATKA
- BETON C 35/45 – PILÍŘ
- BETON C 35/45 – NOSNÁ KONSTRUKCE

|                          |                        |                |   |
|--------------------------|------------------------|----------------|---|
| OBOR                     | KATEDRA                | JMÉNO STUDENTA |   |
| KD                       | 133                    | MARTIN VLK     |   |
| ROČNÍK                   | VEDOUcí BP             |                |   |
| 4                        | ING. M. DRAHORÁD Ph.D. |                |   |
| AKCE :                   |                        |                | <h2>ŠTÍHLÝ PILÍŘ</h2>   |
| OBSAH :                  |                        |                |   |
| PŮDORYS A PODÉLNÝ ŘEZ PM |                        |                | FORMÁT: A2<br>MĚŘÍTKO: 1:500<br>DATUM: 20.5.2020<br>Č. VÝKR.: 1 |

PRODUCED BY AN AUTODESK STUDENT VERSION

# VÝKRES TVARU



BETON C 35/45 – PILÍŘ

ZÁKLADOVÁ PATKA:

BETON C 30/37 XF3

OCEL B500B

KRYTÍ MIN 50 mm (POD ZÁKLADOVOU PATKOU BUDE NEJPRVE BETONOVÁN PODKLADNÍ BETON C 12/15 TL. 150 mm BEZ VÝZTUŽE)

PILÍŘ:

BETON C 30/37 XF4

OCEL B500B

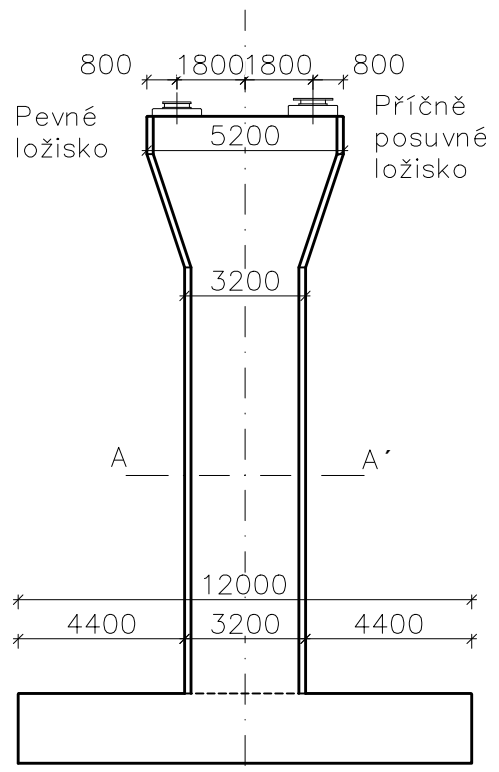
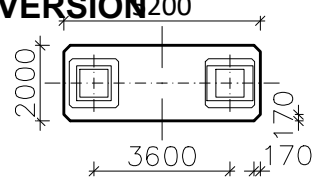
KRYTÍ MIN 50 mm

PODLOŽISKOVÉ BLOČKY:

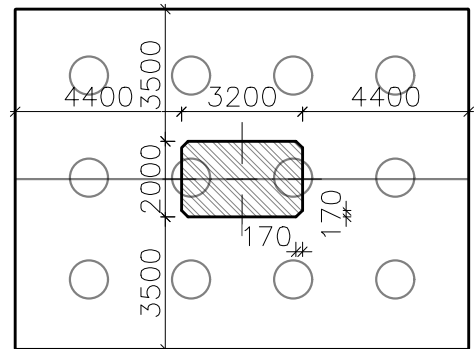
BETON C 35/45 XF4

OCEL B500B

KRYTÍ MIN 50 mm



ŘEZ A-A'



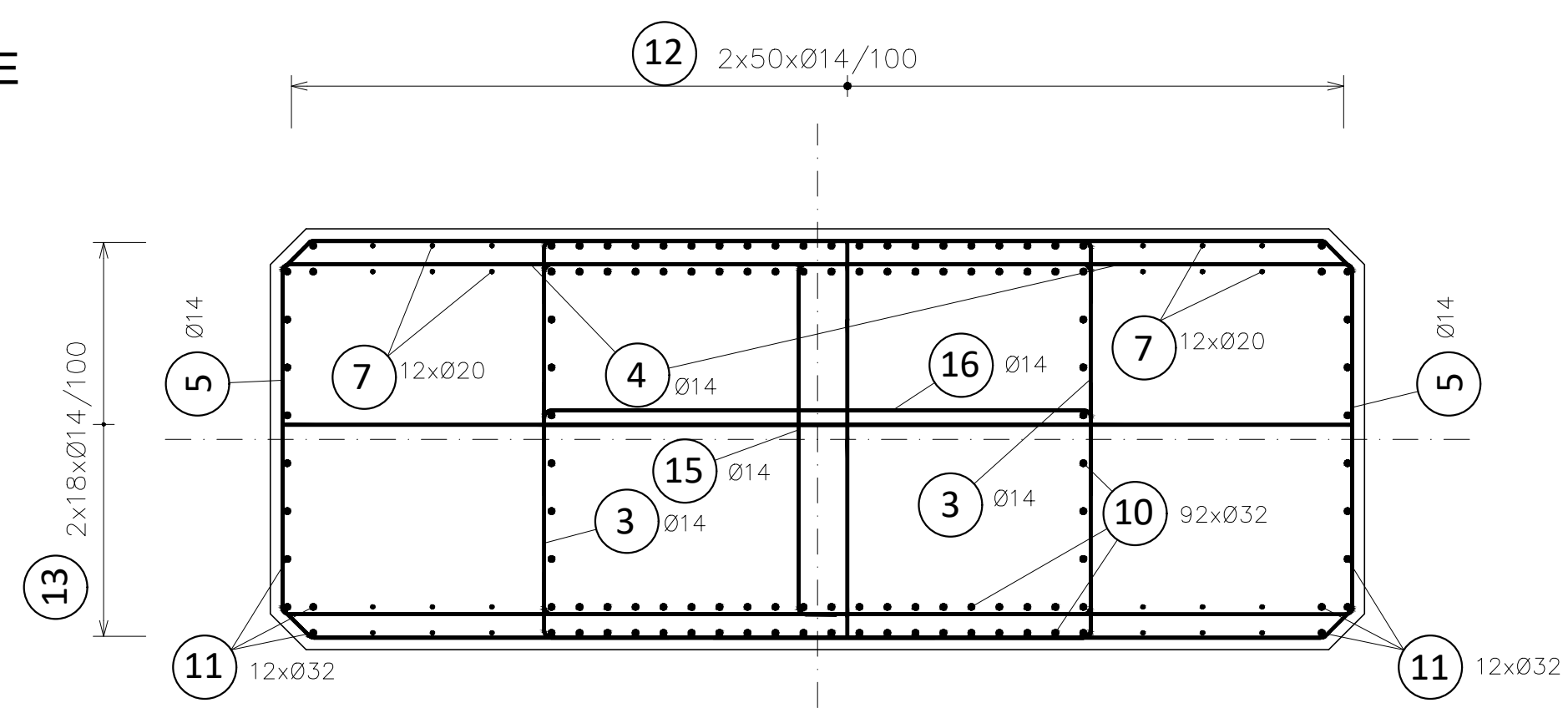
PRODUCED BY AN AUTODESK STUDENT VERSION

|                       |                        |                |          |           |
|-----------------------|------------------------|----------------|----------|-----------|
| OBOR                  | KATEDRA                | JMÉNO STUDENTA |          |           |
| KD                    | 133                    | MARTIN VLK     |          |           |
| ROČNÍK                | VEDOUcí BP             |                |          |           |
| 4                     | ING. M. DRAHORÁD Ph.D. |                |          |           |
| AKCE :                |                        |                | FORMÁT   | A4        |
| <h2>ŠTÍHLÝ PILÍŘ</h2> |                        |                | MĚŘÍTKO  | 1:200     |
|                       |                        |                | DATUM    | 20.5.2020 |
| OBSAH :               |                        |                | Č. VÝKR. | 2         |
| <h2>VÝKRES TVARU</h2> |                        |                |          |           |

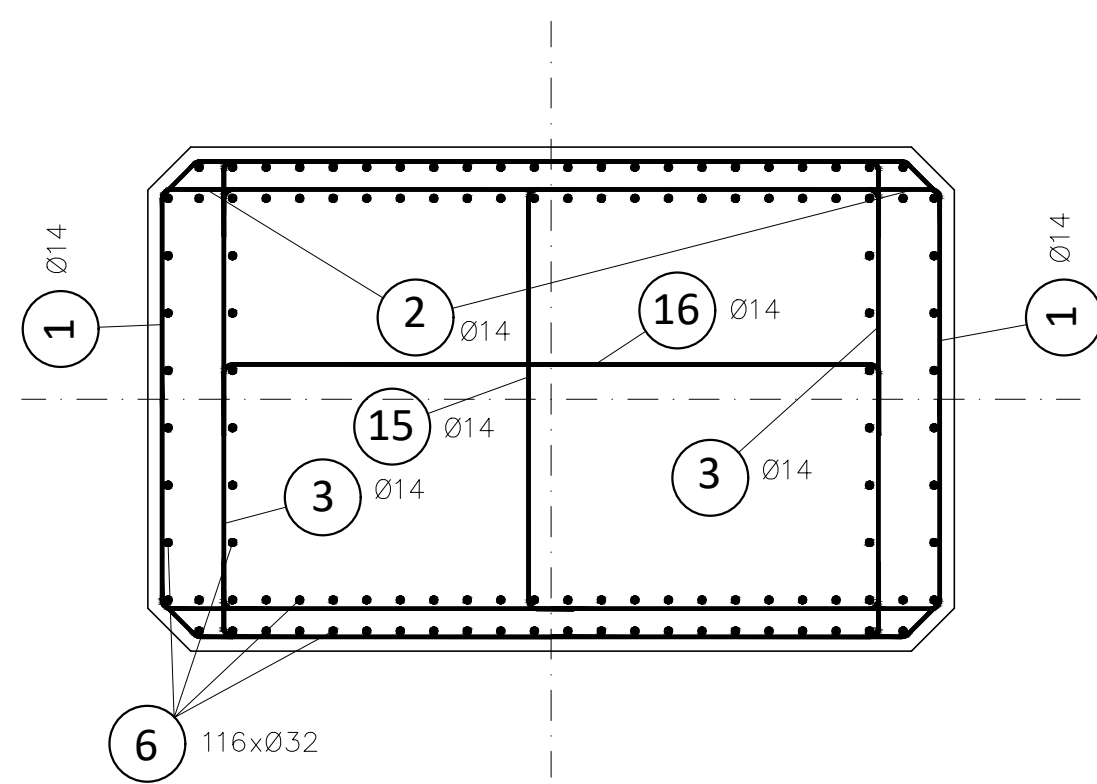
# VÝKRES VÝZTUŽE

PRODUCED BY AN AUTODESK STUDENT VERSION

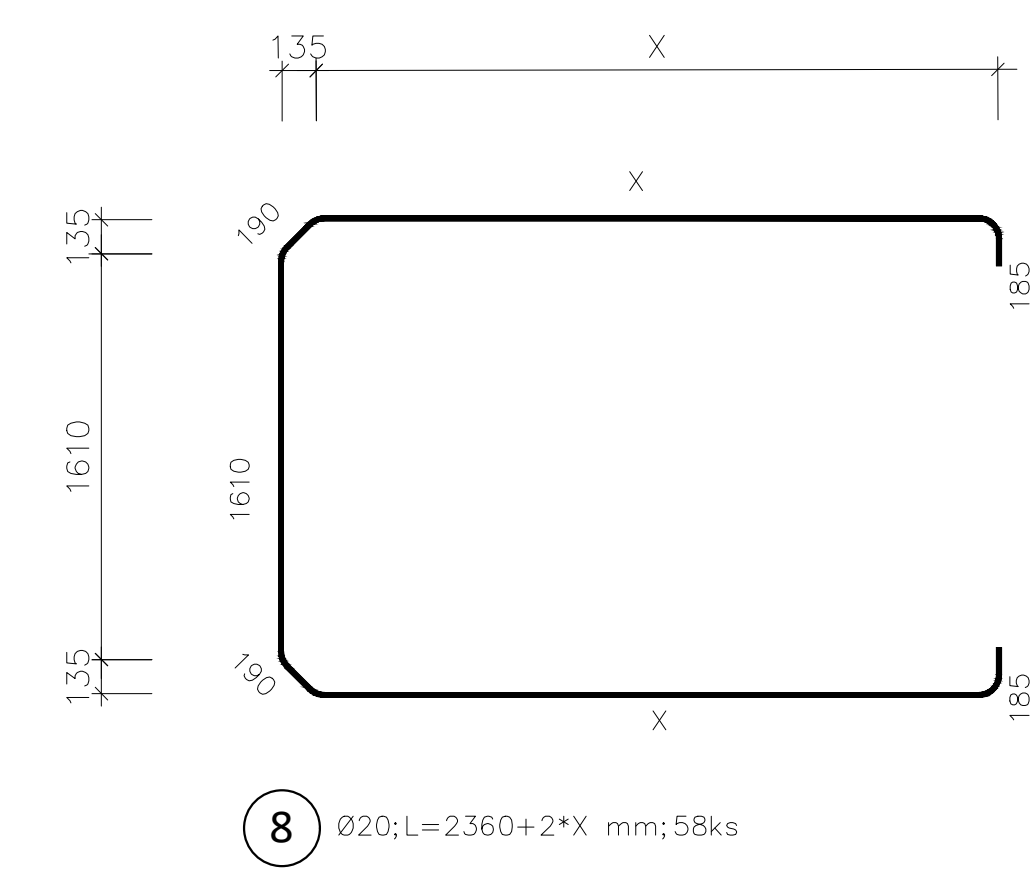
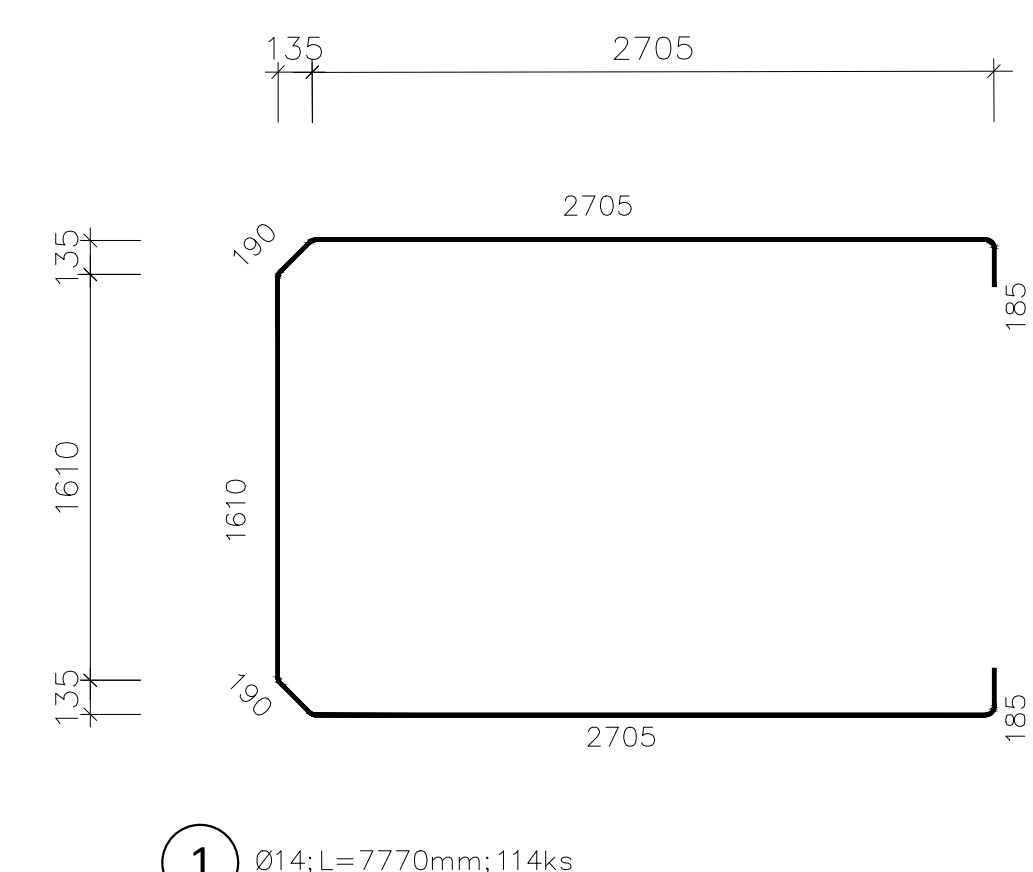
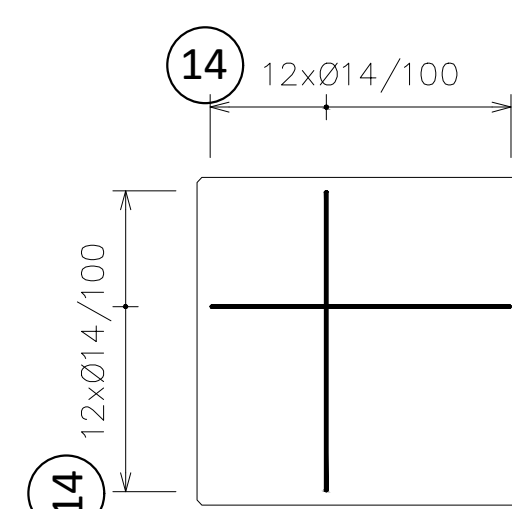
ŘEZ V HLAVĚ PILÍŘE



ŘEZ V PATĚ PILÍŘE

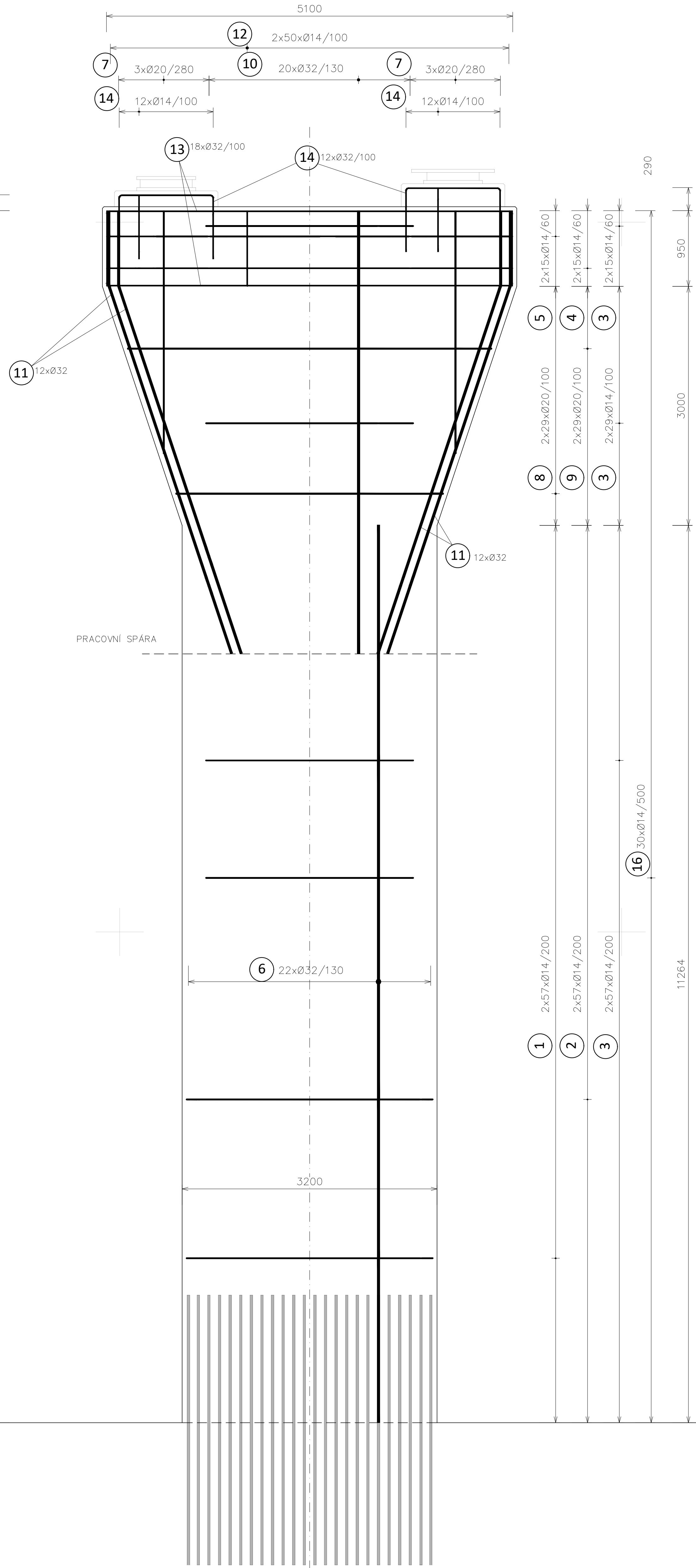


VÝZTUŽ PODLOŽISKOVÉHO BLOČKU

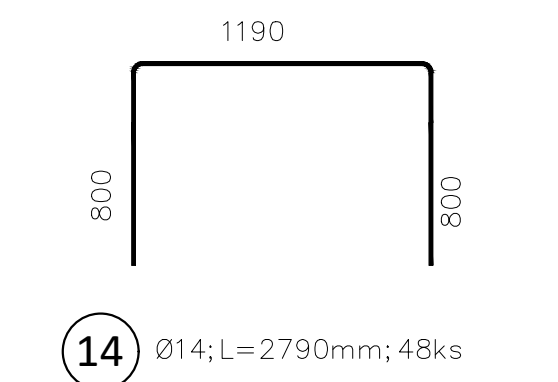
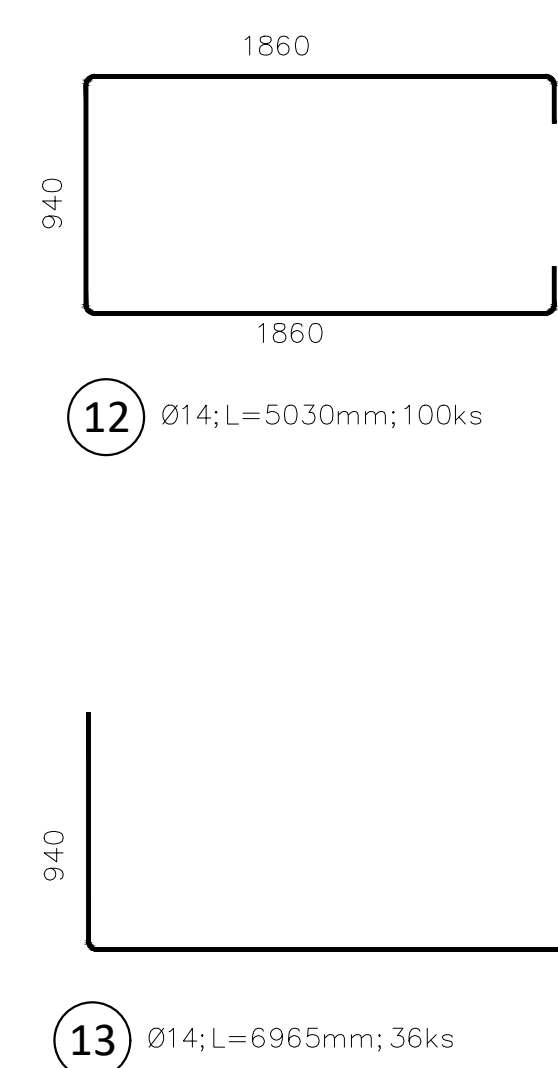
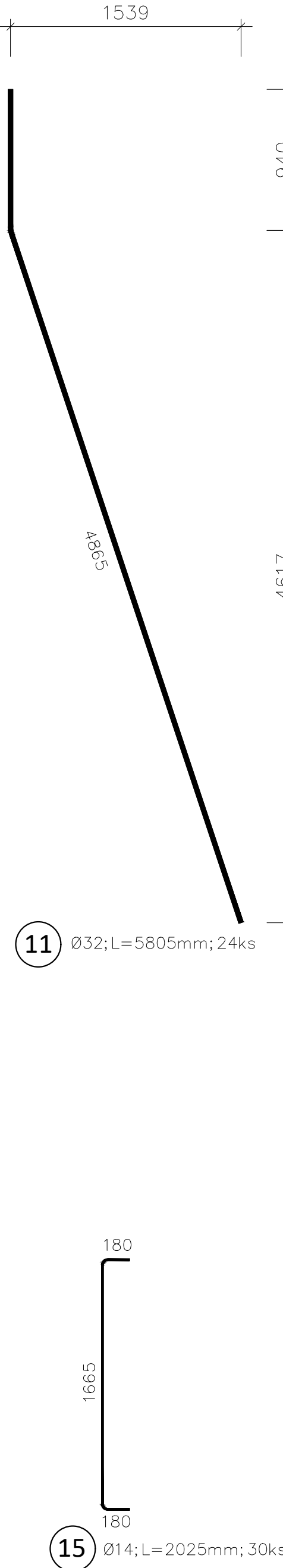
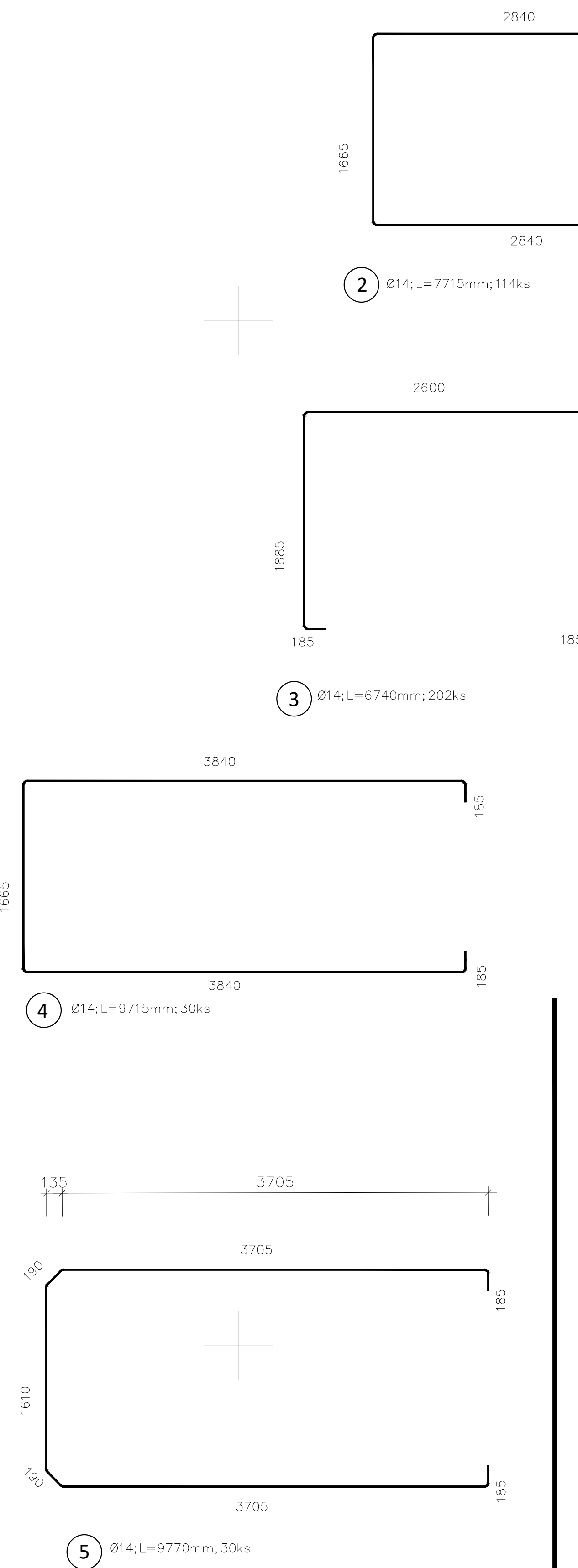
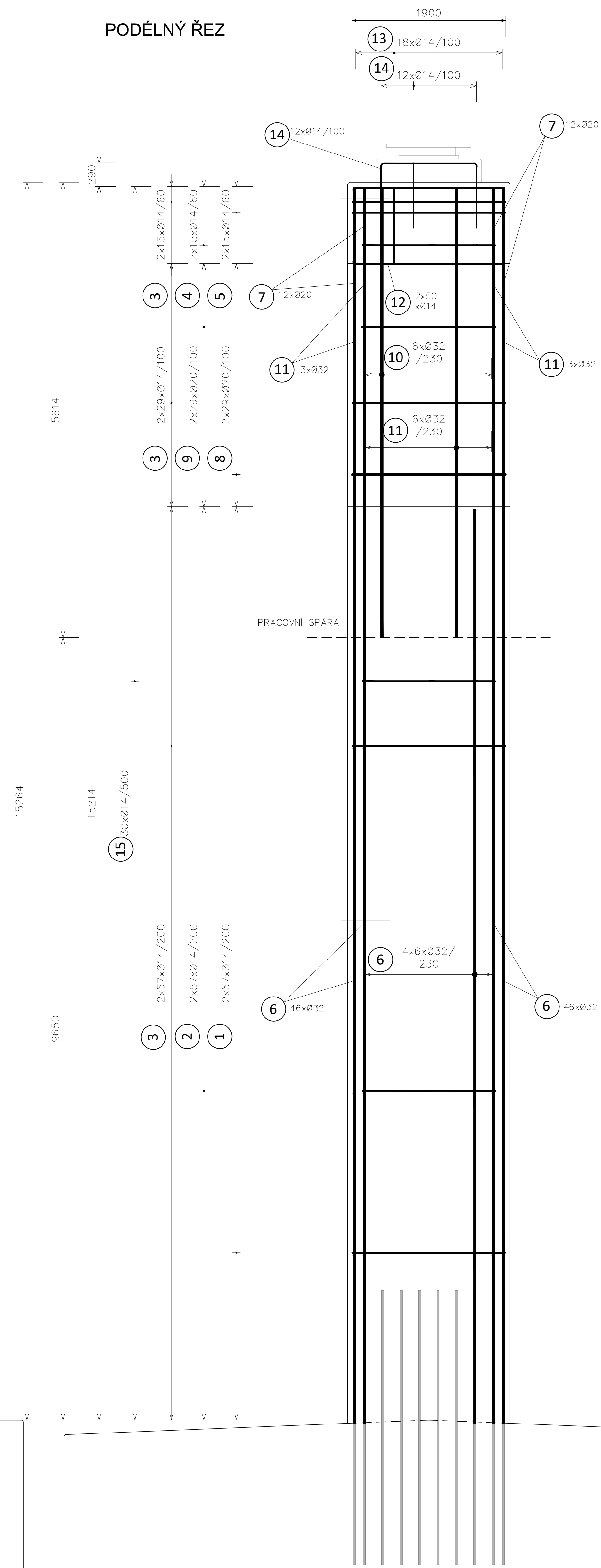


| #   | X 8 [mm] | X 9 [mm] |
|-----|----------|----------|
| 2 x | 2740     | 2875     |
| 2 x | 2775     | 2910     |
| 2 x | 2810     | 2945     |
| 2 x | 2840     | 2975     |
| 2 x | 2875     | 3010     |
| 2 x | 2910     | 3045     |
| 2 x | 2940     | 3075     |
| 2 x | 2975     | 3110     |
| 2 x | 3010     | 3145     |
| 2 x | 3040     | 3175     |
| 2 x | 3075     | 3210     |
| 2 x | 3110     | 3245     |
| 2 x | 3140     | 3275     |
| 2 x | 3175     | 3310     |
| 2 x | 3210     | 3345     |
| 2 x | 3240     | 3375     |
| 2 x | 3275     | 3410     |
| 2 x | 3310     | 3445     |
| 2 x | 3340     | 3475     |
| 2 x | 3375     | 3510     |
| 2 x | 3410     | 3545     |
| 2 x | 3440     | 3575     |
| 2 x | 3475     | 3610     |
| 2 x | 3510     | 3645     |
| 2 x | 3540     | 3675     |
| 2 x | 3575     | 3710     |
| 2 x | 3610     | 3745     |
| 2 x | 3640     | 3775     |
| 2 x | 3675     | 3810     |

PRÍČNÝ ŘEZ



PODÉLNÝ ŘEZ



OCEĽ  
B500B

BEŤON  
C15/45 XC4; XD1; XF2

KRYTÍ  
VŠECHNY PLOŠKY  $c_{min}=50mm$

- POZNÁMKY:
1. VEŠKERÁ VÝZTUŽ JE KÓTOVÁNA NA OSU
  2. MINIMÁLNÍ PÓDMĚRY ZAKRÍVENÍ PRUTŮ
    - 2.1  $\phi 14$  28mm
    - 2.2  $\phi 20$  70mm
    - 2.3  $\phi 32$  112mm
  3. MINIMÁLNÍ KOTEVNÍ DÉLKY PRUTŮ
    - 3.1  $\phi 14$  323mm
    - 3.2  $\phi 20$  461mm
    - 3.3  $\phi 32$  738mm
  4. MINIMÁLNÍ DÉLKY PŘESAHY PRUTŮ
    - 4.1  $\phi 14$  692mm
    - 4.2  $\phi 20$  988mm
    - 4.3  $\phi 32$  1581mm
  5. KONSTRUKČNÍ VÝZTUŽ – PLOŽKY 7, 15, 16

| Položka               | Profil | Délka [mm] | ks  | VÝKAZ VÝZTUŽE             |           |            |
|-----------------------|--------|------------|-----|---------------------------|-----------|------------|
|                       |        |            |     | Celková délka profilu [m] |           |            |
|                       |        |            |     | 14                        | 20        | 32         |
| 1                     | 14     | 7770       | 114 | 885,780                   |           |            |
| 2                     | 14     | 7715       | 114 | 879,510                   |           |            |
| 3                     | 14     | 6740       | 202 | 1 361,480                 |           |            |
| 4                     | 14     | 9715       | 30  | 291,450                   |           |            |
| 5                     | 14     | 9770       | 30  | 293,100                   |           |            |
| 6                     | 32     | 11270      | 116 |                           |           | 1 307,320  |
| 7                     | 20     | Y          | 24  |                           |           |            |
| 8                     | 20     | 2360+2*X   | 58  |                           | 73,200    |            |
| 9                     | 20     | 2035+2*X   | 58  |                           | 509,040   |            |
| 10                    | 32     | 5550       | 92  |                           | 505,850   |            |
| 11                    | 32     | 5805       | 24  |                           |           | 510,600    |
| 12                    | 14     | 5030       | 100 | 503,000                   |           | 139,320    |
| 13                    | 14     | 6965       | 36  | 250,740                   |           |            |
| 14                    | 14     | 2790       | 48  | 133,920                   |           |            |
| 15                    | 14     | 2025       | 30  | 60,750                    |           |            |
| 16                    | 14     | 3160       | 30  | 94,800                    |           |            |
| Celková délka [m]     |        |            |     | 4 754,530                 | 1 088,090 | 1 957,240  |
| Hmotnost [kg]         |        |            |     | 5 745,439                 | 2 683,393 | 12 356,731 |
| Celková hmotnost [kg] |        |            |     | 20 785,563                |           |            |

|        |                        |                |
|--------|------------------------|----------------|
| OBOR   | KATEDRA                | JMÉNO STUDENTA |
| ROČNÍK | VEDOUcí BP             | MARTIN VLK     |
| AKCE   | ING. M. DRAHOŘAD Ph.D. |                |

**ŠTÍHLÝ PILÍŘ**

FORMÁT 16 x A4  
MĚŘÍTKO 1:30  
DATUM 20.5.2020  
Č. VÝKR. 3

OBSAH :  
VÝKRES VÝZTUŽE

| #   | Y [mm] |
|-----|--------|
| 8 x | 2200   |
| 8 x | 3050   |
| 8 x | 3900   |

PRODUCED BY AN AUTODESK STUDENT VERSION