

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

Katedra betonových a zděných konstrukcí



Bakalářská práce



## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Salák Jméno: Martin Osobní číslo: 426326

Zadávající katedra: k133 - Katedra betonových a zděných konstrukcí

Studijní program: SI - Stavební inženýrství

Studijní obor: C - Konstrukce pozemních staveb

### II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Napojení dvou různě vysokých prefabrikovaných trámů

Název bakalářské práce anglicky: Connection of precast beams of different structure height

Pokyny pro vypracování:

- výběr referenční stavby
- návrh tvaru jednotlivých prvků
- variantní návrh detailu napojení různě vysokých průvlaků
- výběr nejvhodnější varianty a výpočet vyztužení
- stanovení kritických oblastí detailu
- působení betonu při trojosém namáhání
- návrh výpočetního modelu

Seznam doporučené literatury:


Kohoutková A., Procházka J., Šmejkal J.; Modelování a vyztužování betonových prvků; ČVUT v Praze, Praha 2013

Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Michaela Frantová, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 24. 2. 2017

Termín odevzdání bakalářské práce: 28. 5. 2017

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu 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“.*

24. 2. 2017

Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta(ky)

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení vedoucího Ing Michaely Frantové, Ph.D.

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

.....

podpis

Rád bych poděkoval vedoucí me bakalářské práce Ing. Michaele Frantové, Ph.D. za odbornou pomoc a vstřícné vedení této práce. Doc. Ing. Petru Štemberkovi, Ph.D. a všem jeho doktorandům za konstruktivní podmínky a přátelskou atmosféru, zároveň děkuji svým spolužákům za kamarádkou podporu a motivaci. Děkuji své rodině, hlavně rodičům za to že se o mě tak starají a pečují, že mě tak podporují.

Napojení dvou různě vysokých  
prefabrikovaných trámů

Connection of Two Precast Beams of Different  
Structure Height

## **Abstrakt:**

Bakalářská práce se zabývá analýzou detailu napojení dvou prefabrikovaných trámů s rozdílnou výškou. Návrh detailu a jeho vyztužení je řešen metodou příhradové analogie. Vhodnost modelu příhradové analogie je ověřena pomocí lineární analýzy v programu SCIA Engineer a nelineární analýzy v programu Atena 2D. Na základě výsledků z modelu příhradové analogie je navržena výzuž. Práce popisuje možnosti porušení detailu a dále se zabývá přetížením konstrukce, jeho vlivu na detail napojení a možnostmi zvýšení únosnosti v úvodním návrhu.

**Klíčová slova:** *D-oblasti, lineární analýza, metoda konečných prvků, napojení prefabrikovaných prvků, nelineární analýza, ozuby prefabrikovaného nosníku, prefabrikace, přetížení nosníku, příhradová analogie, rozdílná výška trámů*

## **Abstract:**

The aim of this thesis is to analyze a connection between two precast beams with different structural heights. The design of the connection including reinforcement is solved by strut-and-tie model. The applicability of the model is compared to linear and nonlinear solutions using SCIA Engineer and Atena 2D. Furthermore, the thesis describes possible failure modes of the connection and its influence upon possible increase of resistance found in original solution.

**Keywords:** *Joint of Precast Beams, D regions, Dapped End, Different Structural Heights, Extreme Loads, Finite Element Method, Linear Analysis, Nonlinear Analysis, Precast Concrete Joints, Prefabrication, Strut and Tie Model*

## Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod.....</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>Styky prefabrikovaných dílců .....</b>	<b>10</b>
2.1	Uložení a napojení prefabrikátů obecně .....	10
2.2	Materiály styků .....	11
2.2.1	Cementové lože .....	12
2.2.2	Pryžové ložisko .....	12
2.3	Způsob návrhu spojů prefabrikovaných dílců .....	13
2.3.1	B-oblasti .....	13
2.3.2	D-oblasti.....	14
2.3.3	Příhradová analogie .....	15
2.3.4	Prvky příhradové analogie .....	17
2.3.5	Vybrané příhradové modely pro ozuby prefabrikovaných nosníků .....	18
<b>3</b>	<b>Návrh napojení dvou různě vysokých prvků .....</b>	<b>20</b>
3.1	Popis problému .....	21
3.2	Varianty řešení .....	22
3.3	Řešení uložení.....	23
3.4	Rozbor příčin porušení detailu.....	24
3.5	Výběr modelu příhradové analogie .....	25
3.6	Ověření navrženého modelu programem SCIA Engineer .....	28
3.7	Ověření navrženého modelu programem Atena 2D.....	29
3.8	Návrh výztuže .....	30
3.9	Zvyšování únosnosti.....	32
3.9.1	Přetížení menším vazníkem.....	33
3.9.2	Celkové zvětšení zatížení.....	35
<b>4</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>37</b>
	<b>Literatura .....</b>	<b>38</b>

# 1 Úvod

Přestože beton užívali již staří Římané, tak je to dodnes jeden z nejpoužívanějších stavebních materiálů a poznatky o něm každý den nabývají. Dnes dokážeme vyrobit mnoho druhů betonů či do něj přidat různé materiály, abychom upravili jeho výsledné chování.

Ač se původně beton připravoval přímo na stavbě, tak se pozdější dobou přesunula výroba betonové směsi do betonáren a na stavbu byla pak přivezena autodomíchávačem jako tekutá směs. Takto připravený beton šetří čas na stavbě a navíc lze snáze docílit požadovaných vlastností betonu. Jako další krok vývoje lze označit prefabrikované betonové dílce.

Dílce z prefabrikovaného betonu jsou vyrobeny z přesně určené směsi v betonárně, která je blízko k výrobně prefabrikátů tzv. prefě. Tam je také svázána výztuž, vytvořena forma, která se zalije betonem. Odtud se na stavbu doveze již hotový, pevný dílec, který je připravený pro zabudování do konstrukce.

Takto připravené dílce jsou velmi kvalitně provedeny, nejen výroba betonové směsi je pod přísným dohledem ale i samotné betonování a ošetřování. Za tuto cenu se však musí zaplatit návrhem, který musí počítat s různými typy zatížení a podepření při výrobě a přepravě, samotnou dopravou na stavbu a řešením styků dílců. [1]



Obrázek 1.1: Hala Cap Central, Pacov [2]



Aby jednotlivé dílce tvořily celistvou a pevnou konstrukci, je třeba dbát na jejich napojení. Tato napojení je třeba provést na stavbě a to tak, aby byla schopna přenést požadované síly v konstrukci. Jsou to také často kritická místa v konstrukci, protože na jejich návrhu a provedení závisí spolupůsobení celé konstrukce.

Nejčastější využití prefabrikátů v současné době lze nalézt na stavbách hal. Vazníky na velký rozpon se špatně betonují na stavbě, protože bývají často ve větších výškách. Navíc (jak je vidět na obrázku 1.1) se haly většinou skládají z mnohokrát se opakujících dílců, to usnadňuje jejich výrobu v prefě. Časté opakování jednotlivých prvků vyžaduje kvalitní návrh, který není zbytečně předimenzovaný, proto se snažíme navrhovat nejmenší možné průřezy. To může vést k složitějším detailům v místě napojení.

Bakalářská práce se zabývá návrhem styku různě vysokých trámů (obdobný případ je viditelný na obrázcích 1.2) při zachování roviny v horním líci konstrukce, což je podmínkou pro zachování střešní roviny hal. V rámci bakalářské práce jsou diskutovány různé možnosti napojení dvou různě vysokých nosníků.

V případě změny využití haly a s tím spojené změny zatížení lze dodatečně zvyšovat únosnost napojení jen velmi těžko, proto se bakalářská práce věnuje také přetížení konstrukce, jeho vlivu na napojení a případnému zesílení únosnosti v úvodním návrhu.



Obrázek 1.2: Obchodní centrum Litoměřice [3]

## 2 Styky prefabrikovaných dílců

### 2.1 Uložení a napojení prefabrikátů obecně

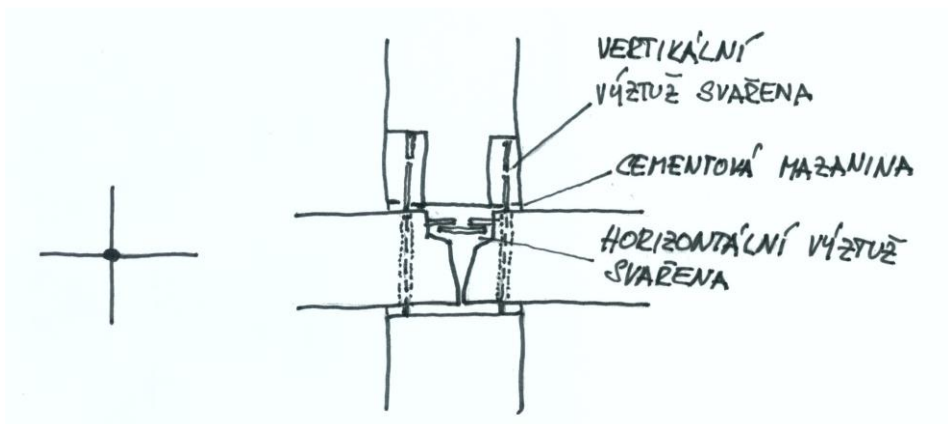
Betonové dílce tvoří většinou pouze prvek, část budovaného objektu, proto je nutné tyto prvky spojit dohromady, aby byla vytvořena celistvá konstrukce. Tyto spoje se budou lišit především podle toho, jaké síly potřebujeme, aby byly přeneseny.

Zjednodušeně se dá říct, že tam, kde stačí kloubové napojení, lze na sebe dílce pouze položit, případně zajistit proti vodorovným posuvům. V místech, kde potřebuji tuhé napojení, tedy takové, které dokáže přenést i ohybový moment, se musí napojit výztuž.

Pro nastínění řešení a fungování detailů napojení je zde ukázáno několik řešení styků sloup-průvlak-sloup a jejich statická schémata. [4]

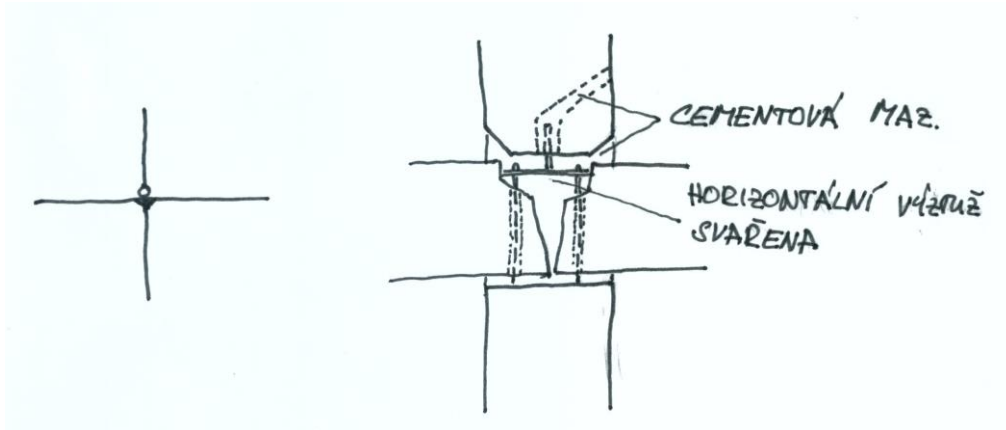
Na obrázcích 2.1, 2.2, a 2.3 jsou uvedeny příklady, na kterých lze vidět rozdíl mezi kloubovým spojem – prvek je pouze zajištěn proti pohybu, a tuhým spojem, kde je vidět napojení výztuže (například svařem), které je nutné pro přenesení tahových sil ve spoji.

- Tuhý styk



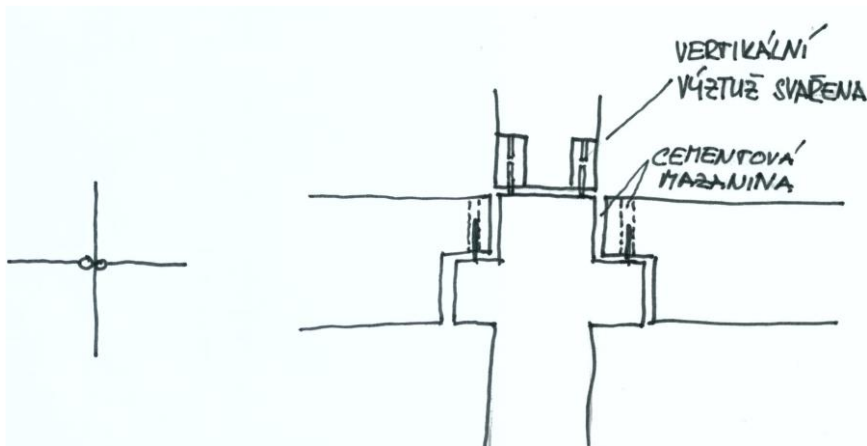
Obrázek 2.1: Tuhý styk sloup – průvlak – sloup

- Kloub v patě sloupu



Obrázek 2.2: Kloub v patě styku sloup – průvlak – sloup

- Kloubově připojené průvlaky



Obrázek 2.3: kloubové připojení průvlaků styku sloup – průvlak – sloup

## 2.2 Materiály styků

Zatímco tahová síla se přenáší napojenou výztuží, ta tlaková je přenášena plochou styku. Betonové dílce se nepokládají přímo na sebe, a to nejen z důvodů vyrovnání nerovností, ale také například pro utlumení vibrací. Používá se různých materiálů, které zprostředkují toto napojení, nejčastější jsou: cementové lože a pryžová ložiska.

### 2.2.1 Cementové lože

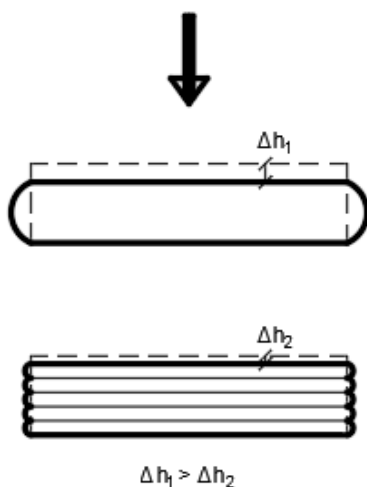
Styky v bytové výstavbě se nejčastěji tvoří právě pomocí cementové mazaniny. Je to jednoduché řešení, které snadno doplní výztuž procházející stykem. Tloušťky spár se zálivkou se většinou provádí 10 mm, je to proto, že taková je i přesnost vyrábění prefabrikovaných dílců.

V některých případech se volí zálivka polymercementová – tedy cementová zálivka s polymerovými přísadami pro zlepšení vlastností, která je nestékavá, trvale odolná vůči vodě, vysoce mrazuvzdorná a má zvýšenou tahovou pevnost. [5]

### 2.2.2 Pryžové ložisko

Pryžová (elastomerová) ložiska jsou výsledkem snahy zvýšit rychlost montáže, tedy potlačit mokré procesy na stavbě. Používá se především u rozměrných dílců s velikou hmotností, u kterých je problém jejich vyrovnání a stabilizace na stavbě.

Materiálem ložisek je především pryž vyráběná vulkanizací syntetického kaučuku s přísadou dalších látek. Takováto ložiska se vyznačují značnou pružností, poddajností, ale praktickou nestlačitelností – to se využívá například u mostních, hrncových ložisek, kde se uzavře pryž do ocelového hrnce, ve kterém pak roznáší zatížení podobně jako kapalina. Ložiska lze také vyztužit ocelovými plechy – ty v ložisku působí podobně jako výztuž v ovinutém betonu, vliv vyztužení je znázorněn na obrázku 2.4, vyztužením se snižuje namáhání spojovaných betonových dílců v místě styku.



Obrázek 2.4: Působení plechů v pryžovém ložisku

Výhodou elastomerových ložisek, kromě rychlé montáže, je umožnění posunu a natočení. Dokáží také tlumit dynamické účinky působící na konstrukci – tyto vlastnosti se uplatní především u mostních konstrukcí.

Styky s pryžovými ložisky se dají doplnit ocelovými spojovacími profily, ale z důvodu jejich poddajnosti je nutno posoudit jejich namáhání. Při posouzení konstrukce lze zanedbat tenká ložiska, pokud jsou však tlustší, je potřeba zavést do výpočtu jejich poddajnost. Přípustné stlačení (relativní deformaci) obvykle uvažujeme 12%, pokud dosáhne stlačení 30%, pak obvykle dochází k porušení. [4], [6]

### 2.3 Způsob návrhu spojů prefabrikovaných dílců

Při návrhu monolitické konstrukce se návrh omezí pouze na posuzování samotné konstrukce, pokud je však využito prefabrikovaných dílců, je třeba navrhnout i rozdělení konstrukce na jednotlivé prvky a posoudit nejen je, ale i spoje mezi nimi.

Aby bylo možno navrhnout konstrukci, je třeba vždy modelovat očekávané chování, toho lze docílit ručním výpočtem či pomocí výpočetní techniky. V betonových konstrukcích rozdělujeme oblasti návrhu na dvě hlavní: B- a D-oblasti.

#### 2.3.1 B-oblasti

Název pochází z anglického slova beam – tedy nosník (také B jako Bernoulli), jsou to oblasti, kde platí Bernoulli-Navierova hypotéza (zanedbání smykové deformace) a napětí po průřezu je rozděleno lineárně. Tyto předpoklady nám dovolují snadno popsat chování konstrukce výpočtem.

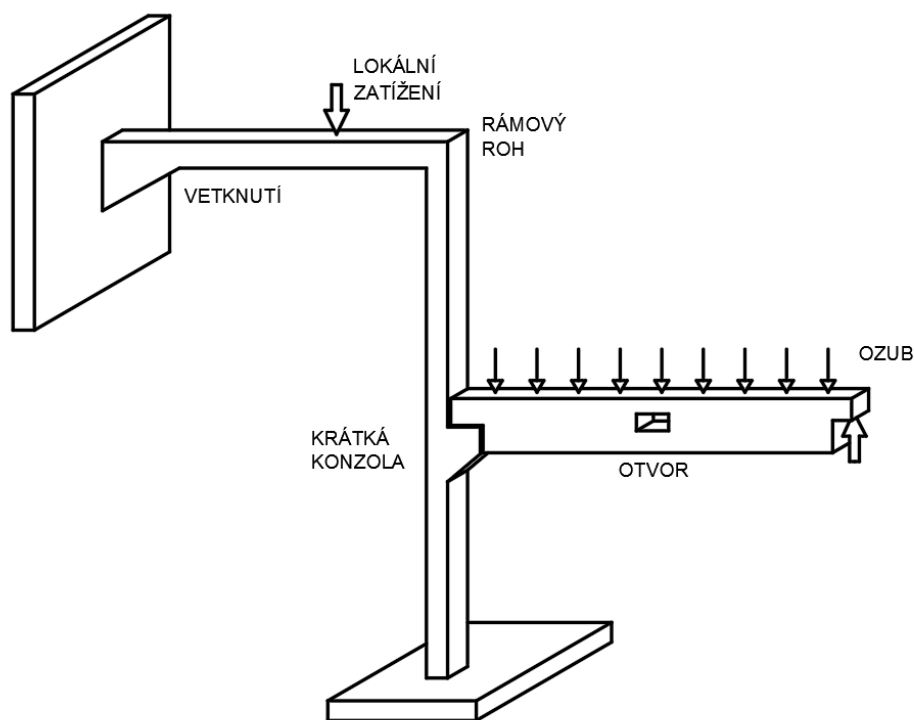
Bernoulli-Navierova hypotéza:

*Průřez rovinný a kolmý na střednici prutu před deformací zůstává rovinný a kolmý na střednici prutu i po deformaci.[7]*

Místa styků prefabrikovaných dílců jsou obvykle oblastmi s velkou koncentrací napětí, a proto je řadíme mezi poruchové oblasti (D-oblasti)

### 2.3.2 D-oblasti

Název odvozen z anglických slov Discontinued a Disturbed – tedy poruchové oblasti, jsou to oblasti změny průřezu, umístění lokálních sil, podpor a podobně, podrobně jsou tyto oblasti znázorněny na obrázku 2.5.



Obrázek 2.5: Příklady D oblastí na konstrukci

V těchto oblastech neplatí Bernoulli-Navierova hypotéza, to znamená, že nelze předpokládat lineární rozdělení napětí (a s tím i poměrného přetvoření) po průřezu. Podle hypotézy Saint Venanta lze říci, že lokální porucha vymizí ve vzdálenosti přibližně rovné výšce průřezu.

Tyto oblasti se navrhují obtížněji, a to pomocí metody příhradové analogie nebo pomocí programů založených na metodě konečných prvků.

### 2.3.3 Příhradová analogie

Metoda příhradové analogie je velmi atraktivní způsob, jak řešit detaily betonových konstrukcí, dovoluje nám velmi rychle a bez pomoci výpočetní techniky navrhnout jak betonový průřez, tak i tahovou výztuž. Tato metoda umožňuje řešiteli zviditelnit tok sil v konstrukci a tak celkem přirozeně zajistit kritická místa. V literatuře můžeme najít velké množství již vyřešených modelů příhradové analogie pro klasické detaily, avšak je nutné mít na paměti, že žádný takto připravený model neodpovídá plně skutečnosti. Výsledky se mohou lišit podle toho jaký model je zvolen, tím pádem je kladen velký důraz na řešitele detailu, aby zvolil vhodný model. Příklady řešení a postupy návrhů prvků lze nalézt v současné době v mnoha publikacích, například v [8][9][10].

Model příhradové analogie (anglicky strut-and-tie model) tvoří tři základní elementy:

Vzpěry (struts) – přenášejí tlak, reprezentují tlačný beton.

Táhla (ties) – přenášejí tah a reprezentují taženou výztuž.

Styčníky (nodes).

Kombinací těchto prvků lze vytvořit příhradovou konstrukci, která nahradí betonový prvek.

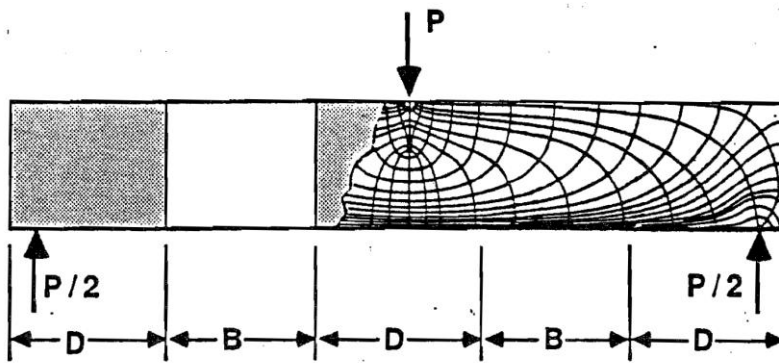
Základní předpoklady nutné k tomu, aby byl vytvořen kvalitní model, jsou uvedeny v [8]:

- Porušení nastane vznikem mechanismu, který vznikl dosažením meze kluzu v jednom z táhel.
- K drcení betonu dochází až po dosažení meze kluzu v táhlu (výztuži).
- V táhlech a vzpěrách uvažujeme pouze osové síly.
- Všechna vnější zatížení jsou umístěna do styčniců.

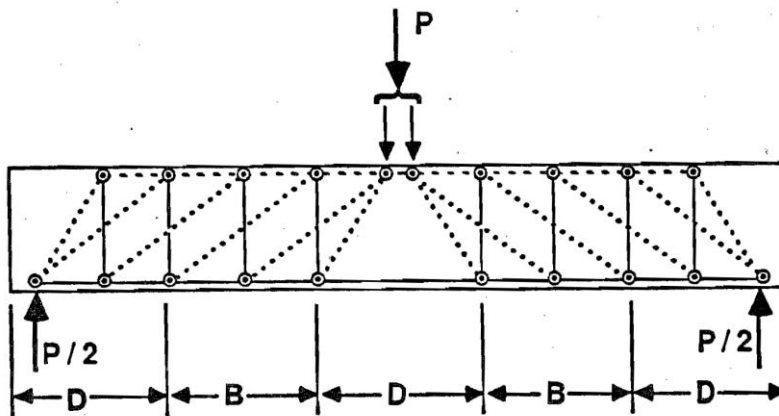
Pomocí metody příhradové analogie se dají navrhovat jak B-, tak i D-oblasti. Základní fungování příhradové analogie lze ilustrovat na příhradovém modelu prostého nosníku. Na obrázku 2.6 jsou ukázány B- a D-oblasti nosníku spolu s trajektoriemi hlavního napětí (a), dále vhodný příhradový model (b) a odpovídající vyztužení nosníku (c).

## 2 Styky prefabrikovaných dílců

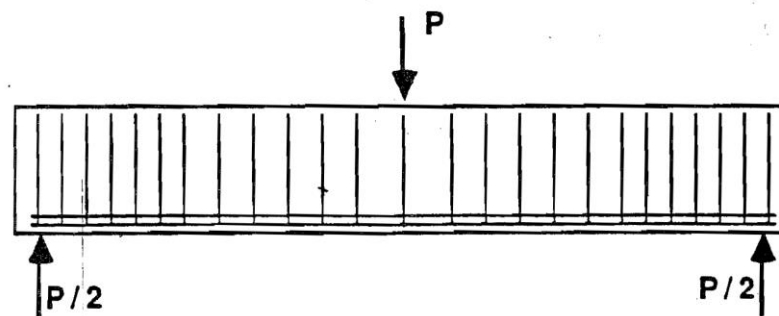
Na obrázcích jsou táhla kreslena plnou čarou, vzpěry čárkovanou, prvky se v modelu protínají pouze ve zvýrazněných styčnicích.



(a) Stress trajectories and B- and D-regions



(b) Truss model or strut-and-tie model



(c) Actual reinforcement layout

Obrázek 2.6: Princip příhradové analogie na prostém nosníku [11]



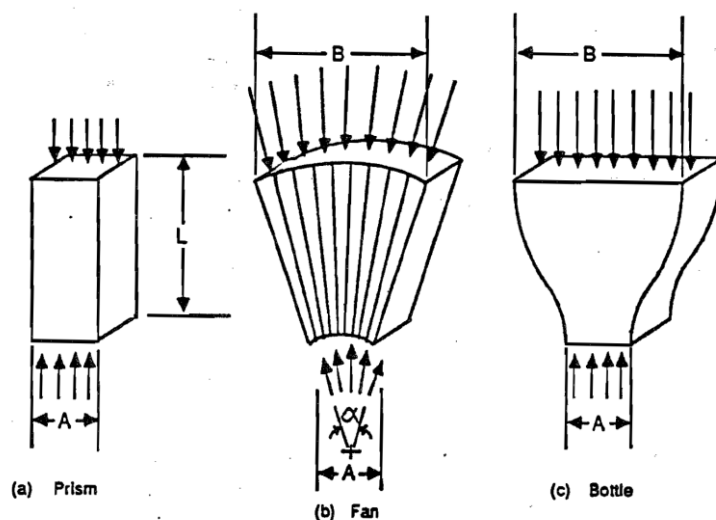
### 2.3.4 Prvky příhradové analogie

#### 2.3.4.1 Táhla

Táhla jsou prvky přenášející tah. Ve skutečné konstrukci pak představují výztuž v betonu, která je umístěna v místě táhla v celé jeho délce a musí být řádně zakotvena. Množství výztuže se navrhne podle síly v táhlu. Napětí ve výztuži uvažujeme na mezi kluzu, případně lze i snížit například pro omezení trhlin.

#### 2.3.4.2 Vzpěry

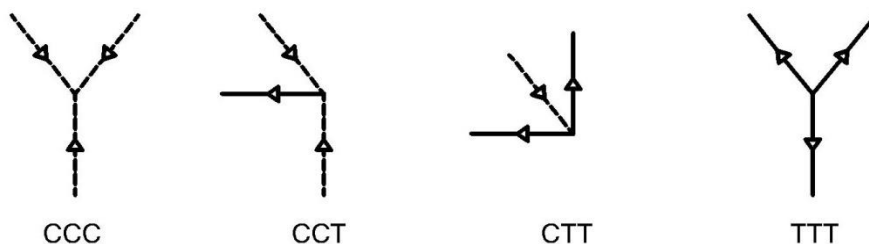
Vzpěry jsou prvky přenášející tlak. V konstrukci je obvykle představuje tlačný beton, umístíme je do těžiště tlačené oblasti. Rozlišujeme tři typy vzpěr (viz obrázek 2.7): Vzpěra s rovnoběžnými trajektoriemi napětí (prism) je nejjednodušším typem vzpěry, která má konstantní šířku. Baňkovitá vzpěra (bottle) kde zatáčející trajektorie tlakového napětí vytváří příčné tahové napětí, které musí být přeneseno tahovým napětím betonu či příčnou výztuží. Třetím typem je vějířovitá vzpěra (fan), která vyváří vějířovité pole napětí, takové lze najít například nad podporou.



Obrázek 2.7: Různé druhy vzpěr.[11]

## 2.3.4.3 Styčníky

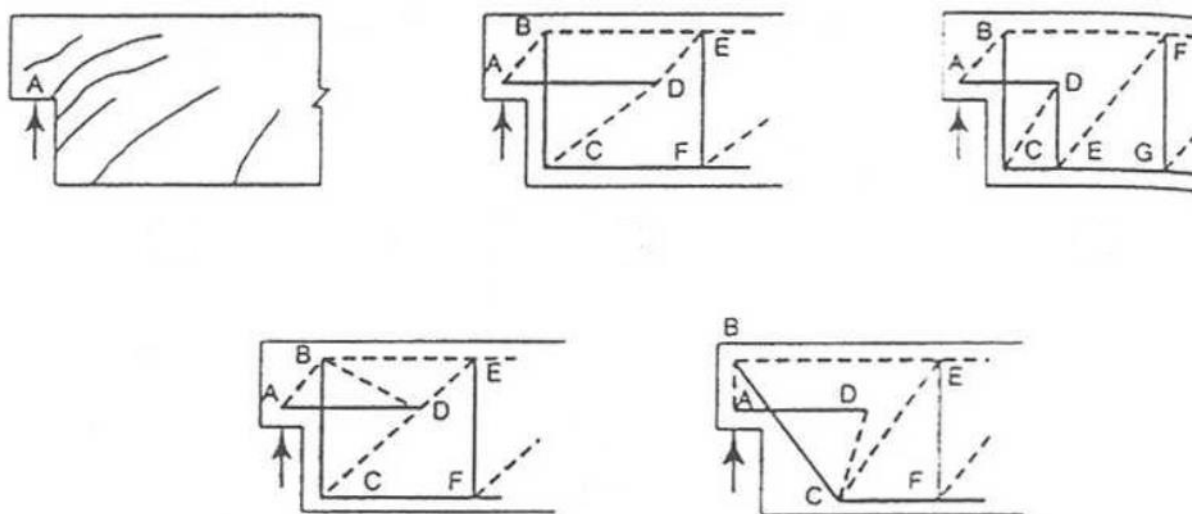
Styčníky jsou místa propojující prvky příhradového modelu, představují místa, kde se mění směry sil. Zabýváme se jimi, protože je nutné zajistit, aby přenesly požadované zatížení, a navíc určují požadavky na kotvení výztuže. Dělíme je podle působících sil na tři druhy (C - z anglického slova compression - tlak, T - tension - tah). Tyto druhy jsou CCC, CCT, CTT, případně i TTT.



Obrázek 2.8: Různé druhy styčníků.

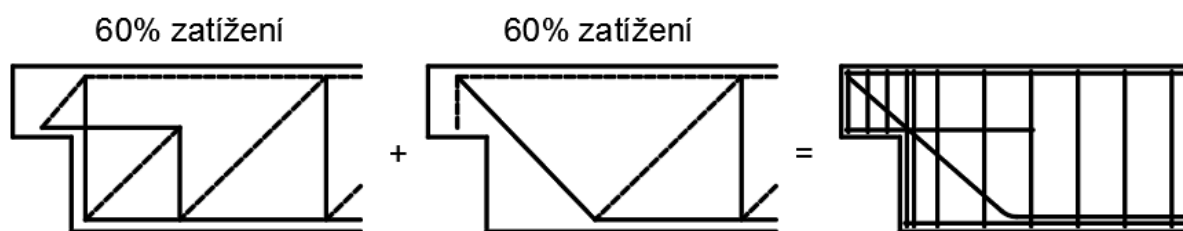
## 2.3.5 Vybrané příhradové modely pro ozuby prefabrikovaných nosníků

I když není žádné řešení pomocí příhradové analogie absolutní, tak pro klasické, často se opakující detaily jsou uvedeny vhodné příhradové modely, podle nichž lze provést kvalitní návrh detailu. Takovýmto detailem nejbližší k řešené problematice je příhradový model pro ozuby prefabrikovaných nosníků.



Obrázek 2.9: Příhradové modely pro ozuby nosníků [12]

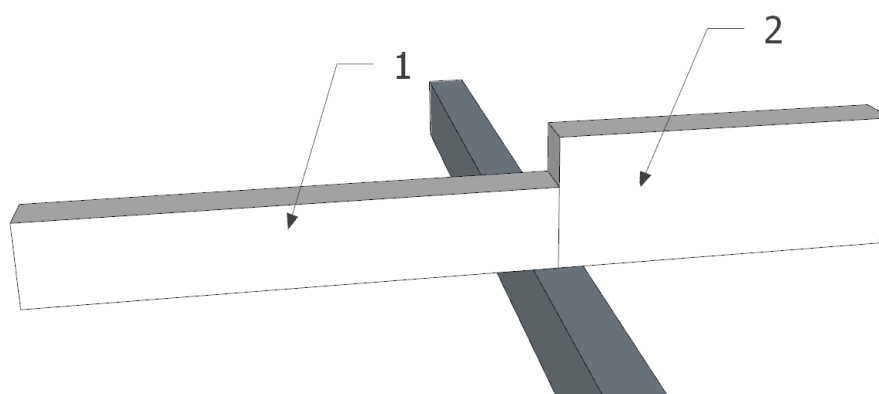
Jak je vidět z obrázku 2.9 lze vytvořit velké množství různých příhradových modelů nahrazujících chování železobetonu, z nichž některé jsou více a některé méně vhodné. Jelikož není prakticky možné vytvořit model, který by byl univerzální a zároveň optimální, tak se dnes většinou navrhuje výztuž na kombinaci dvou různých modelů. V [13] je uvedeno, že podle německé literatury se osvědčilo použít dva modely znázorněné na obrázku 2.10. Každý model se zatíží na 60% svislého zatížení, spočítá se potřebná plocha výztuže a poté se do nosníku vloží výztuž z obou modelů. Takto navržená výztuž disponuje 20% rezervou, která je využita na pokrytí rozdílných tuhostí modelu.



Obrázek 2.10: kombinace modelů vhodná pro návrh a výsledná výztuž

### 3 Návrh napojení dvou různě vysokých prvků

Často se může stát, že je potřeba zastřešit dvě lodě haly s různým rozponem. Potom vznikne problém napojení dvou vazníků s rozdílnými rozpony, tím pádem i rozdílnými výškami, jak je znázorněno na obrázku 3.1.



Obrázek 3.1: Obecný model detailu

Obvykle bývá vhodné tyto prvky napojit na sebe tak, aby lícovaly v horní části, jelikož je dobré zachovat rovinu střechy. A to zejména z důvodu zjednodušení řešení střešního pláště, snazšího odvodnění střechy a estetických důvodů. V opačném případě by se musela rovina střechy vyrovnat ve skladbě střešního pláště, což s sebou nese větší spotřebu materiálu a případně i větší zatížení.

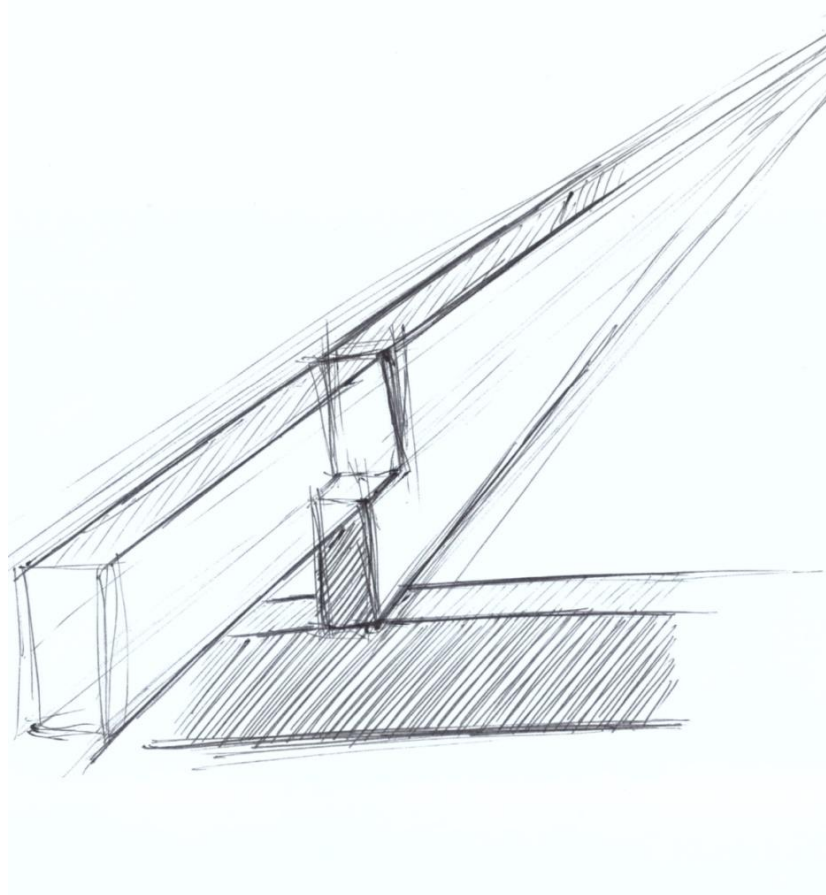
V dnešní době mají haly větší životnost, než je jejich plánované využití k původnímu účelu, proto je vhodné vždy myslet na další budoucí možné využití, tím pádem i rozdílné zatížení, se kterým není počítáno v úvodním návrhu (například zavěšení těžkých břemen na vazníky). Na ohyb se dají nosníky snadno zesílit (například přilepováním výztužných lamel), avšak oblasti uložení, D-oblasti, se velmi složitě zesilují, proto je účelné navrhnout tyto oblasti s ohledem na možné přetížení.

### 3.1 Popis problému

V rámci bakalářské práce bylo řešeno napojení dvou vazníků o rozponu 10 a 20 metrů, místo styku vazníků je podepřeno příčným trámem o šířce 300 mm. Vazníky mají rozdílnou výšku, ten kratší je vysoký 600 mm a delší 1300 mm. Šířka obou vazníků je 300 mm.

Zatížení na vazníky působí spojitě, je rovno 16 kN/m a odpovídá konstrukci lehké střechy a zatížení sněhem (sněhová oblast IV), vlastní tíha většího z vazníků je 14,9 kN/m a menšího vazníku 4,5 kN/m. Větší z nosníků je tvaru T, avšak v blízkosti podpory je zachován jen obdélníkový průřez. Neuvažuje se žádné předpětí ve vaznicích.

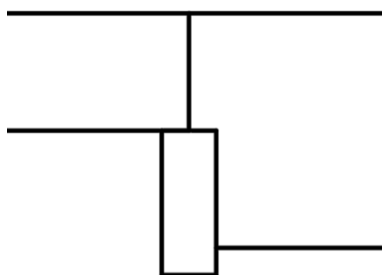
Předpokládá se, že je v hale více vazníků než sloupů, proto je uvažována nepřímá podpora příčným průvlakem pod napojením, viz obrázek 3.2. Výšky vazníků byly předběžně ověřeny na průhyb.



Obr 3.2: Skica řešeného detailu

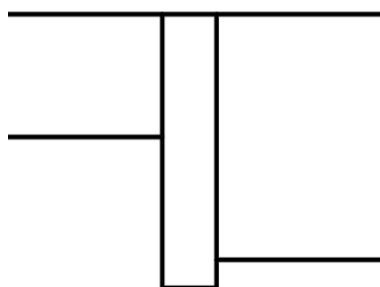
## 3.2 Varianty řešení

Je mnoho způsobů jak vyřešit tento detail napojení. Nejdůležitějším kritériem pro výběr jsou pravděpodobně dispoziční požadavky, dalšími důležitými faktory jsou statické působení a architektonické vyjádření. Na následujících obrázcích je uvedeno několik variant napojení a jsou popsány jejich výhody a nevýhody.



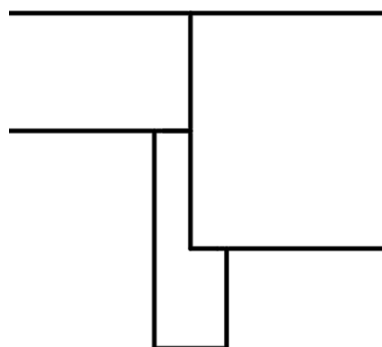
Varianta prostého uložení 1 (obrázek 3.3) obou vazníků na příčný trám je elegantní a jednoduché řešení, vyžaduje však větší výšku detailu a rozdílná zatížení na stranách vazníků způsobují krouticí moment v podporovém vazníku a při jeho větší výšce by bylo nutné řešit i jeho stabilitu.

Obrázek 3.3: Varianta uložení 1



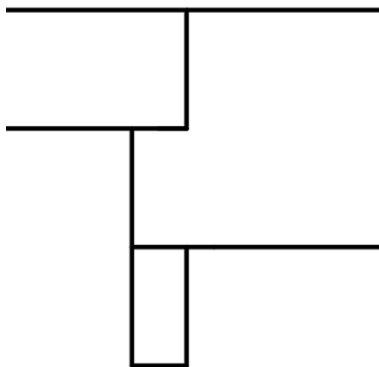
Na obrázku 3.4 je druhá varianta připojení vazníků na bok trámu, to nám dovoluje provést detail ve velmi malé celkové výšce detailu, tato varianta také způsobuje krouticí moment v podporovém vazníku. Zavěšení trámu v horní části je vhodné z hlediska stability v průběhu výstavby, ovšem pracnost tohoto typu napojení je velmi velká i v případě vybetonování „kapes“ na stěnách vazníku, do kterých by byly osazovány nosníky.

Obrázek 3.4: Varianta uložení 2



Nižší z trámů je na detailu 3 (obrázek 3.5) podepřen v jiné úrovni, toho lze docílit tvarem příčného trámu, nebo podložkou. Takové provedení by však vyžadovalo pravděpodobně širší, podporový trám, náročný na výrobu. Pomocí podložky by také šlo oba vazníky položit vedle sebe, takový detail by byl vhodný ze statického hlediska, protože by nekroutil příčný trám, ale vazníky by nenavazovaly v jedné rovině.

Obrázek 3.5: Varianta uložení 3



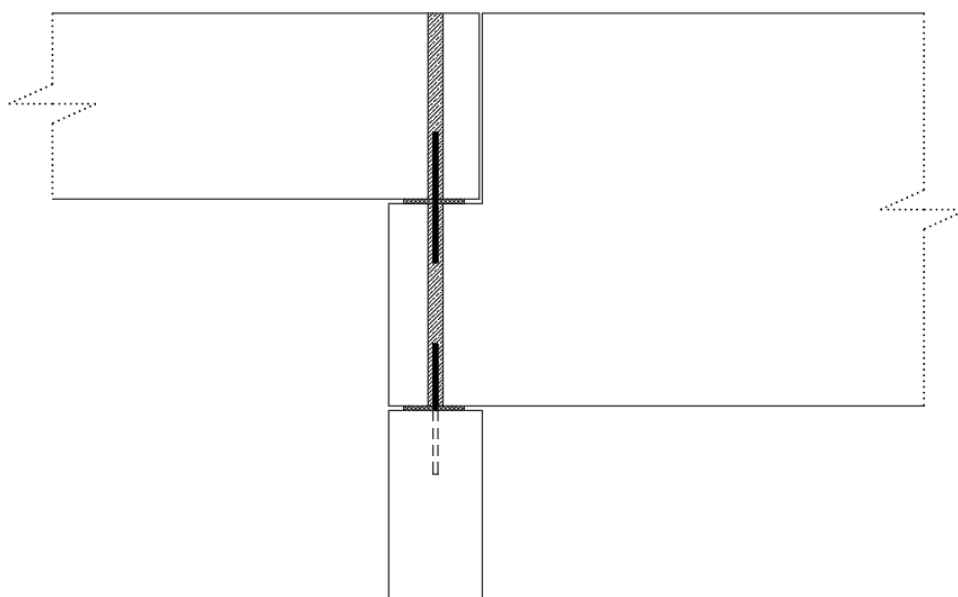
Napojení trámů takovýmto způsobem vyžaduje větší konstrukční výšku, zato však nekrotí příčný trám a zachovává esteticky čistě řešení. I když menší vazník přitěžuje větší, tak zároveň přebírá určitý moment z většího vazníku a tím trochu zmenšuje ohybový moment uprostřed rozpětí většího z vazníků. Proto všechno je také toto napojení vybráno jako detail, kterým se bude dále zabývat bakalářská práce.

Obrázek 3.6: Varianta uložení 4

### 3.3 Řešení uložení

Různé způsoby napojení prefabrikátů a materiály spojů jsou obecně popsány v kapitolách 2.1 a 2.2. Pro uložení obou trámů je v tomto detailu použito pryžové ložisko, hlavně kvůli malé pracnosti a snadnému proražení otvoru na procházející výztuž.

Oba vazníky jsou zajištěny proti vodorovnému posunutí probíhající výztuží, jeden trn je již zabetonován do příčného trámu v průběhu betonáže, druhý bude osazen mezi vazníky až na stavbě, aby nebránil zabetonování otvoru prvního vazníku. Předpokládané otvory jsou oválné s rozměry 30 x 50 mm, použity jsou trny o průměru 16 mm.



Obrázek 3.7: Schéma uložení vazníků

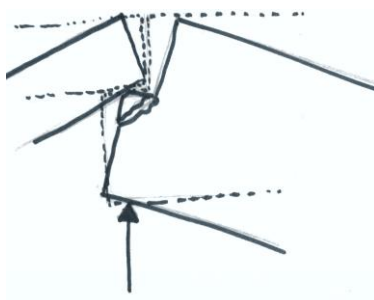
### 3.4 Rozbor příčin porušení detailu

Podrobnějšímu návrhu detailu by předcházela návrh celé konstrukce, tím se však tato bakalářská práce nezabývá. Rozměry jednotlivých prvků jsou voleny tak, aby odpovídaly zatížení a velikosti haly.

V této kapitole jsou nejdříve uvedeny očekávané problémy detailu a způsoby jeho porušení. V dalších kapitolách bude proveden návrh detailu pomocí příhradové analogie, která bude ověřena pomocí lineární i plastické analýzy výpočetními programy.

Menší z nosníků je prostě uložen, ten vyšší je přitížen a to brání jeho natočení. Ale jelikož přitížení od menšího nosníku nepůsobí nahoře, nýbrž přibližně v polovině průřezu, navíc reakce z něj je asi třetinová v porovnání s posouvající silou z vysokého vazníku, tak lze předpokládat, že působení i většího z vazníků bude velmi blízké prostému nosníku.

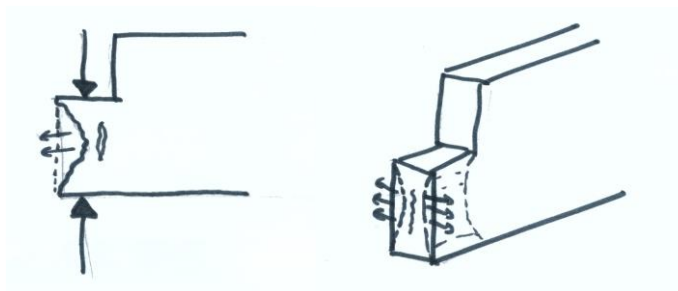
Při větším natočení obou nosníků se může porušit spodní nosník usmyknutím rohu, které je znázorněno na obrázku 3.8



Obrázek 3.8: Příklad porušení usmyknutím rohu

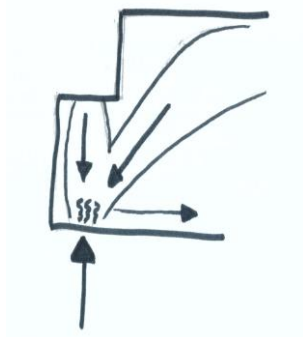
Velké přitížení nosníku nad podporou může způsobit porušení příčným tahem, to povede pravděpodobně k porušení betonu (znázorněno na obrázku 3.9) podobně jak je známe ze zkoušek betonových válců. A to jak ve směru pnutí vazníků, tak i ve směru na ně kolmém.





Obrázek 3.9: Příklad porušení příčným tahem

Zatížení z obou vazníků se koncentruje těsně nad podporou, tam by mohlo dojít k porušení betonu v tlaku, zároveň jakékoli trhliny v tomto místě by byly nepřijatelné pro kvalitní fungování modelu příhradové analogie, viz obrázek 3.10.



Obrázek 3.10: Porušením betonu v tlaku nad podporu

Tyto možné způsoby je potřeba vzít v úvahu při návrhu vhodného modelu pro navržení vybraného detailu.

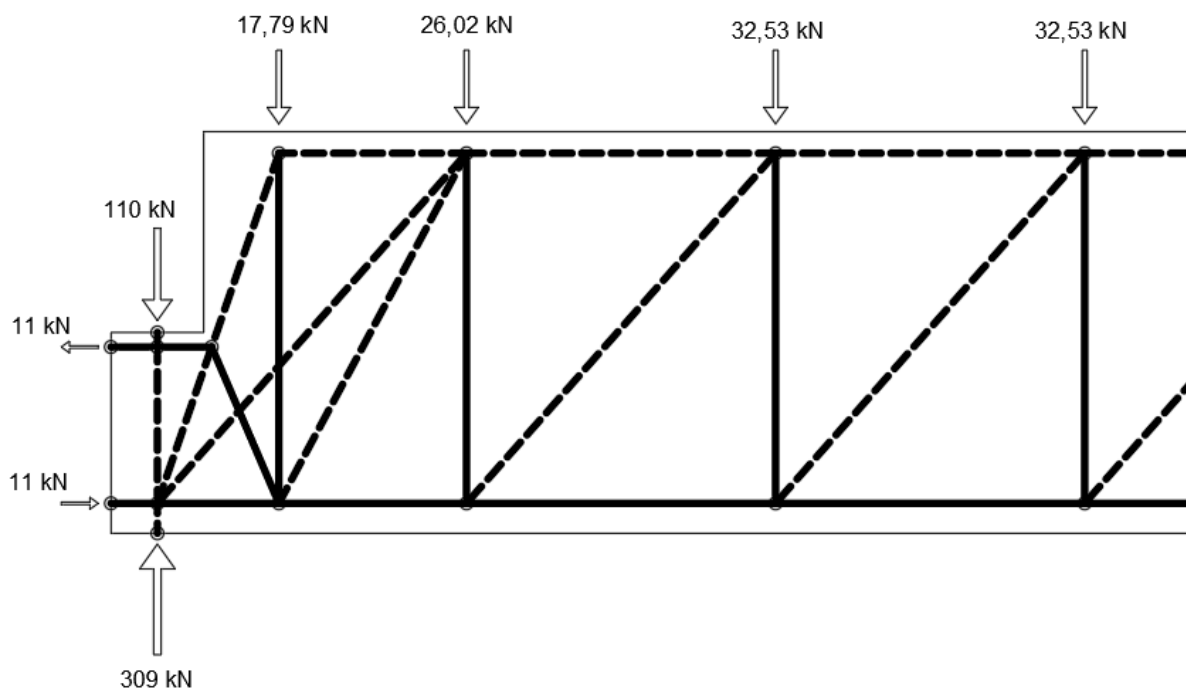
### 3.5 Výběr modelu příhradové analogie

Návrh modelu příhradové analogie je velmi důležitá část celého procesu, protože přímo určuje průběh vnitřních sil v příhradovině a tím i budoucí výztuž. Návrh se odvíjí od průběhu hlavního napětí v prvku. Základní příhradový model je ukázán na obrázku 3.11, takovýto model je vytvořen pro celý nosník a jsou na něm spočítány vnitřní síly, a to takovým způsobem že každý uzel v horní části je zatížen silou (skládá se ze spojitého zatížení na vazník i z vlastní tíhy) úměrnou vzdáleností uzlů od sebe tak, aby simulovala přírůstek spojitého zatížení.

### 3 Návrh napojení dvou různě vysokých prvků

Do modelu je zavedena i síla od menšího z vazníků, ten je zatížen stejným zatížením a celková síla zatěžující detail z tohoto vazníku je 110 kN. Přestože zde nevzniká žádná vodorovná síla, tak je pro bezpečný návrh předpokládána vodorovná tahová síla v hodnotě 10% svislého zatížení tedy 11 kN.

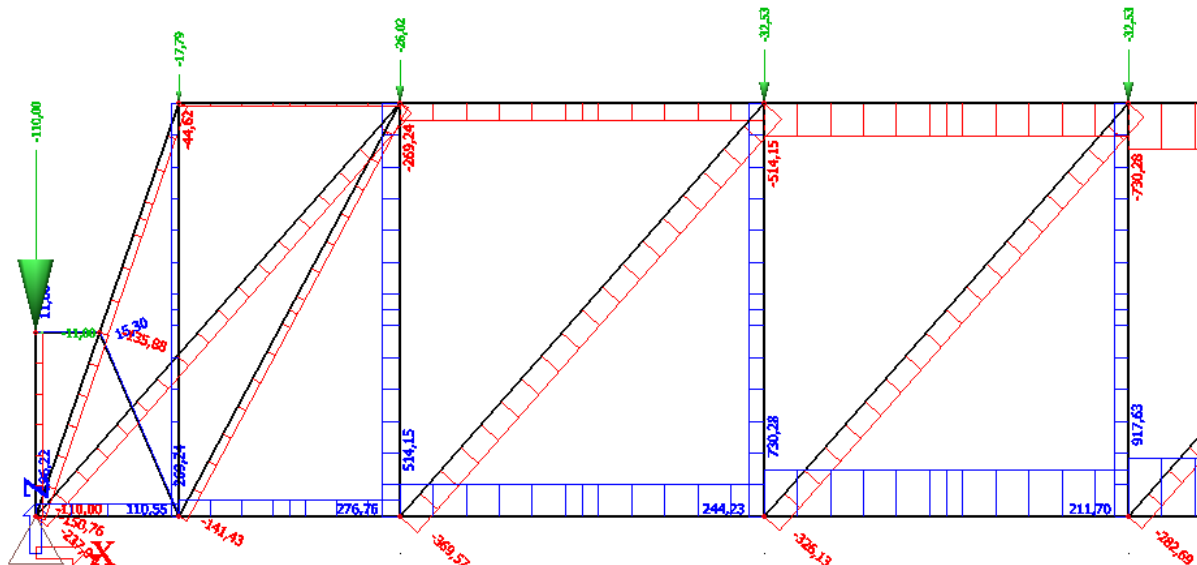
Dolní výztuž je navrhována jako 6 x Ø 32 mm, poskládaná do dvou řad po třech, táhlo bylo proto v modelu zvoleno tak aby odpovídalo svým umístěním těžišti ohybové výztuže, horní tlačena vzpěra byla umístěna do středu tlačené oblasti.



Obrázek 3.11: Schéma příhradového modelu se zatížením

Po vypočítání vnitřních sil (viz obrázek 3.12) v příhradovém modelu, následuje posouzení, obecné postupy jsou popsány v kapitole 2.3.

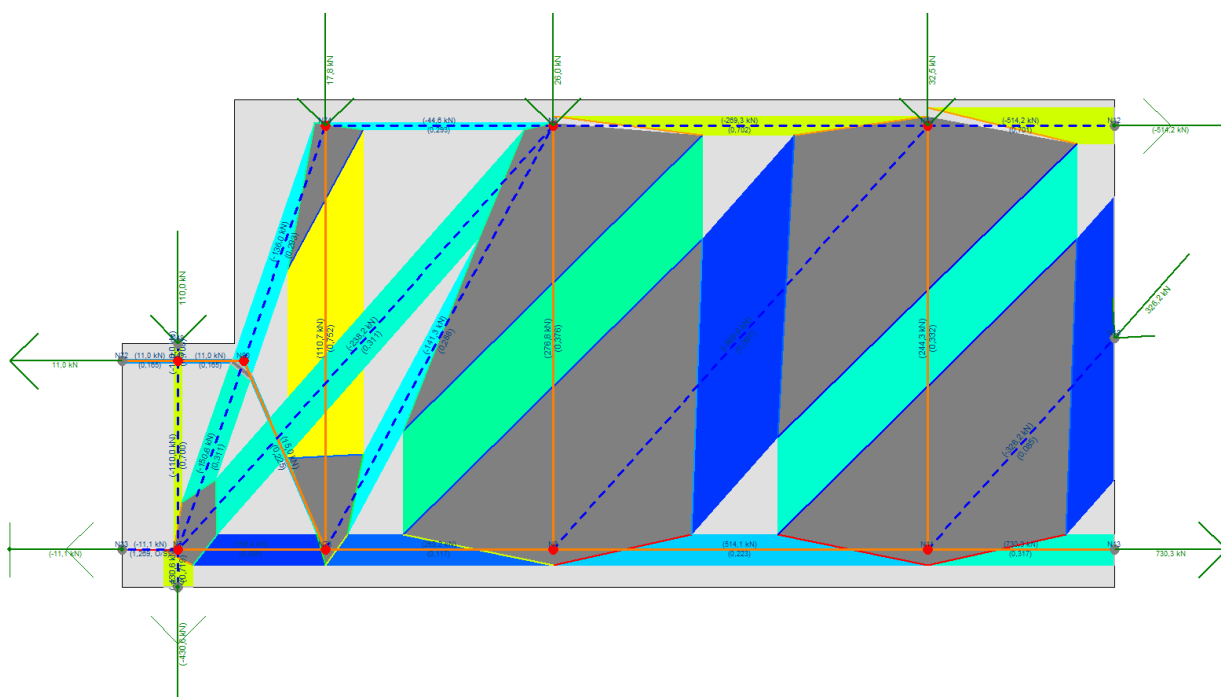
### 3 Návrh napojení dvou různě vysokých prvků



Obrázek 3.12: Průběh normálových sil na modelu z programu SCIA Engineer

K podrobnějšímu výpočtu oblasti napojení je použit program CAST, je to program vyvinutý přímo pro posuzování příhradových modelů. Počítá průběh sil na příhradovém modelu a navíc dovoluje definovat pruty, lze definovat a posoudit výztuž v táhlech a také zjistit potřebnou plochu betonu pro přenesení tlakové síly.

Na obrázku 3.13. jsou vidět výsledky výpočtu vnitřních sil, táhlům je přiřazena odpovídající výztuž včetně jejího rozptřeni po výšce a délce průřezu.



Obrázek 3.13: Výstup z programu CAST

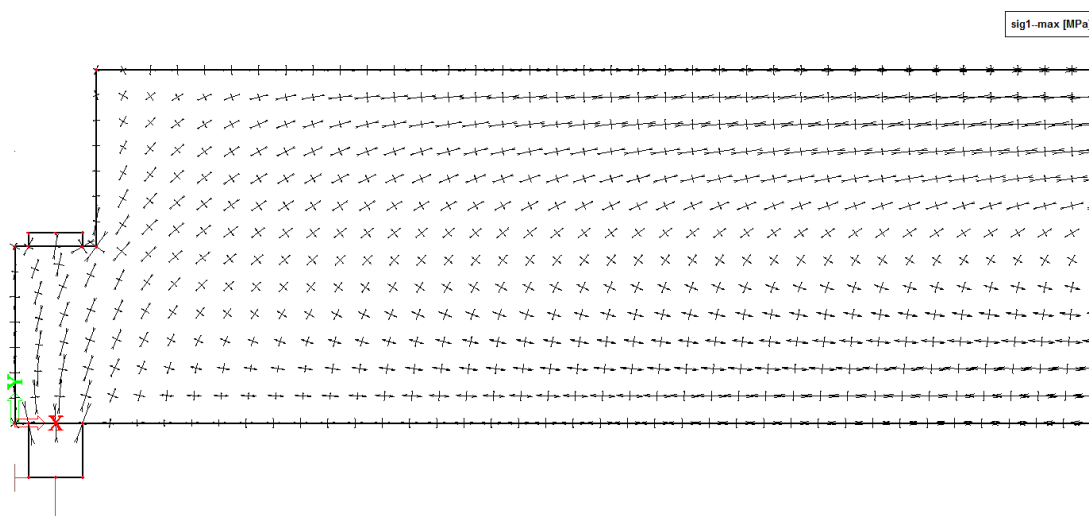
Z obrázku 3.13 lze usoudit, že síla z menšího vazníku je velmi malá a ve větším vazníku nezpůsobuje žádné problémy, také je možno vidět že při daném zatížení (takové návrhové zatížení, na které je předběžně navrhnut průřez na rozhodující průhyb) není problém přenést smykovou sílu, ani tlak v tlačené diagonále není kritický.

## 3.6 Ověření navrženého modelu programem SCIA Engineer

Správnost vytvořeného modelu příhradové analogie byla ověřena pomocí metody konečných prvků, která ukazuje reálné průběhy napětí v konstrukci. V této bakalářské práci je model ověřen elastickým (lineárním) výpočtem stěnového modelu v programu SCIA Engineer a v následující kapitole také modelem v programu Atena 2D, který počítá i s plastickým chováním vazníků a započítává vliv trhlin do výpočtu.

V programu SCIA Engineer je tvar příhradové analogie ověřen stěnovým modelem. Ten je zatížen spojitým zatížením a přitížení menším vazníkem (svislou i vodorovnou silou) je zavedeno do výpočtu jako lokální břemeno působící přes roznašecí desku, to vhodně modeluje skutečné působení. Podpory jsou kloubové, také působí přes roznašecí desku. [14]

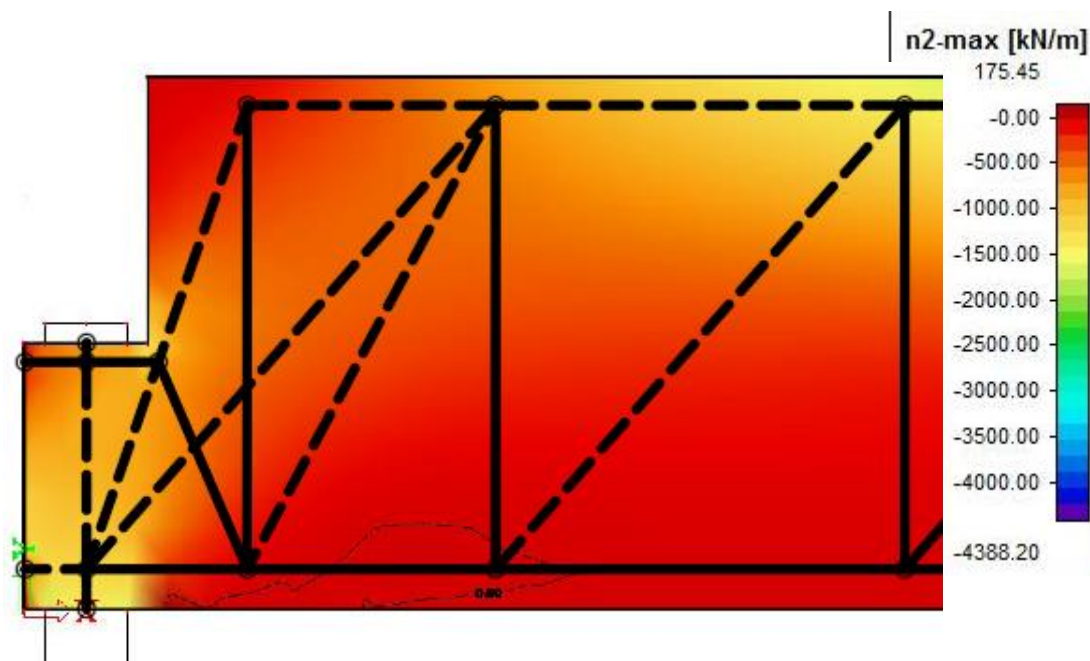
Na obrázku 3.14 jsou vykresleny směry hlavního napětí na deskovém modelu vazníku, takovéto působení odpovídá příhradovému modelu, jenž byl vytvořen v předcházející kapitole.



Obrázek 3.14: Trajektorie hlavního napětí, SCIA Engineer

### 3 Návrh napojení dvou různě vysokých prvků

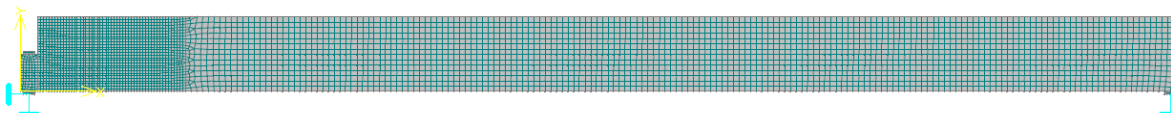
Na obrázku 3.15 jsou vykresleny hlavní tlaky v barevném přechodu, které jsou překryty zvoleným modelem příhradové analogie. Z tohoto porovnání lze konstatovat, že model přibližně odpovídá průběhům napětí.



Obrázek 3.15: Porovnání příhradové analogie s hlavními tlaky na stěnovém modelu

### 3.7 Ověření navrženého modelu programem Atena 2D

Dále byl detail podroben plastické analýze v programu Atena 2D. Tento program dokáže velmi kvalitně modelovat chování D-oblastí. Nejdříve je vymodelován vazník včetně uložení a výztuže, poté je zvolena síť prvků a následně je postupně zatěžován v zatěžovacích krocích. To že je konstrukce takto postupně zatěžována umožňuje sledování průběhu trhlin průřezu a na základě toho měnit vlastnosti modelu v rámci výpočtu. [15]

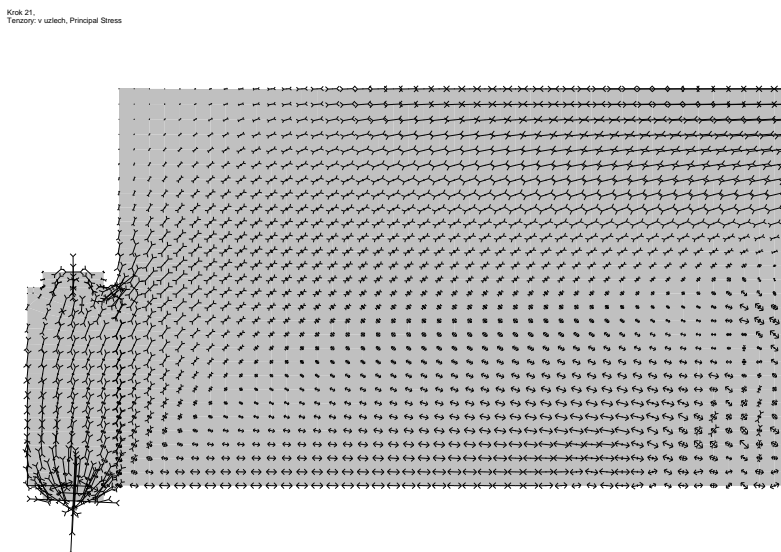


Obrázek 3.16: Síť prvků a výztuž, Atena 2D

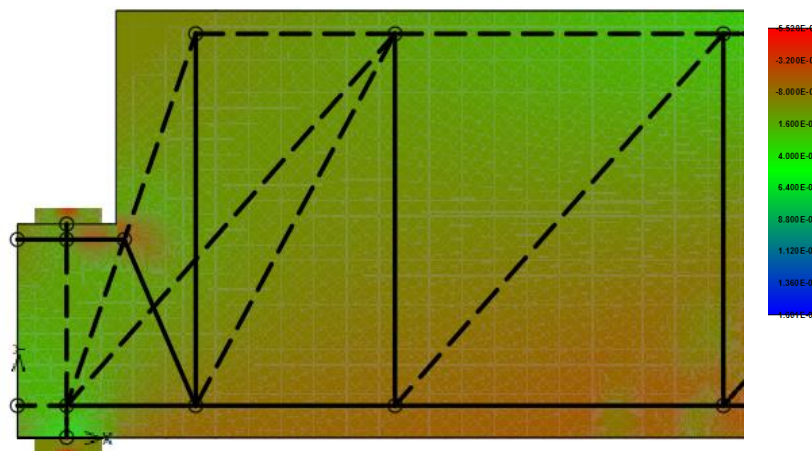
Jak je vidět z obrázku 3.16, síť prvků je zahuštěna v blízkosti uložení, délka strany čtyřúhelníkové sítě je 50 mm, ve zbytku konstrukce je zvolena síť s délkou strany prvku 100 mm.

### 3 Návrh napojení dvou různě vysokých prvků

Model z obrázku 3.16 je postupně zatěžován až na návrhové hodnoty zatížení. Na obrázku 3.17 jsou znázorněny směry hlavního napětí a na následujícím obrázku 3.18 je porovnání modelu příhradové analogie a průběhu přetvoření na konstrukci.



Obrázek 3.17: Trajektorie hlavních napětí



Obrázek 3.18: Provnání příhradové analogie a průběhu přetvoření

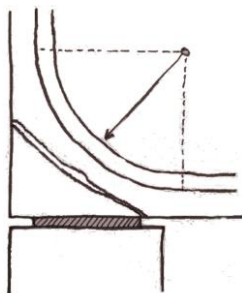
### 3.8 Návrh výztuže

Na základě vnitřních sil v modelu příhradové analogie je navržena výztuž ve dvou variantách, které jsou znázorněny na obrázcích 3.19 a 3.20.

Spodní výztuž (označenou číslem 1) lze zahnout v místě nad podporou a tím zajistit její dostatečné ukotvení, avšak v tomto případě nelze zajistit její, normou předepsaný, poloměr

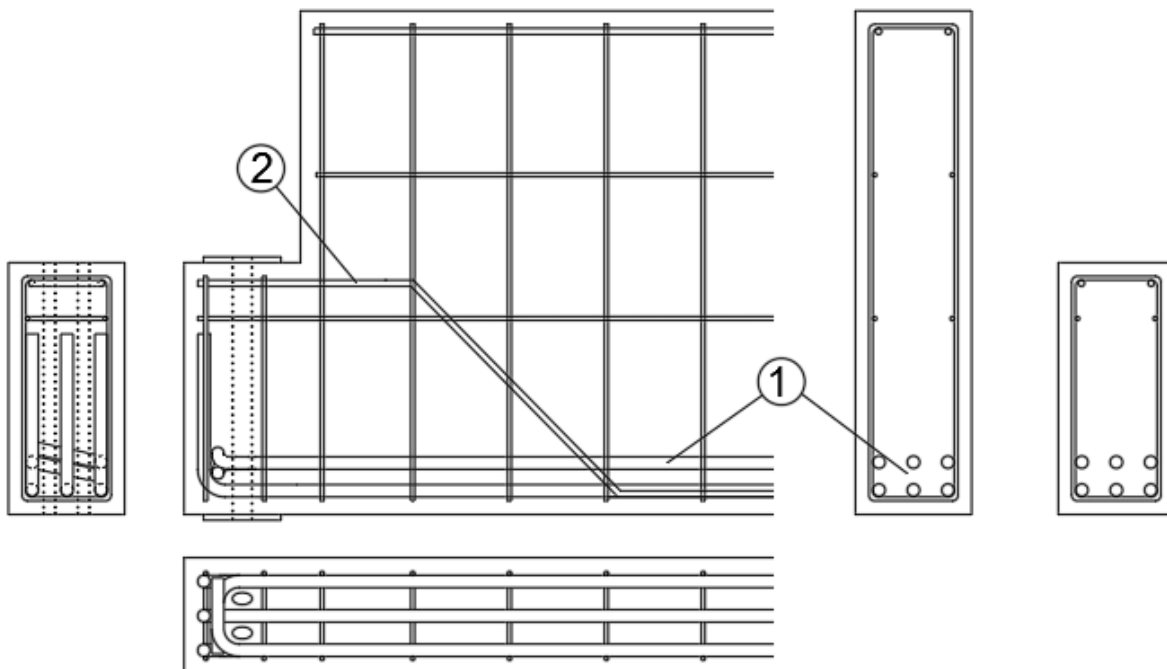
### 3 Návrh napojení dvou různě vysokých prvků

zakřivení, protože dolní výztuž je velkého průměru (32 mm) a to by vyžadovalo příliš velký ohyb – tím by vzniklo nebezpečí odštípnutí nevyztuženého rohu nad podporou, viz obrázek 3.21.



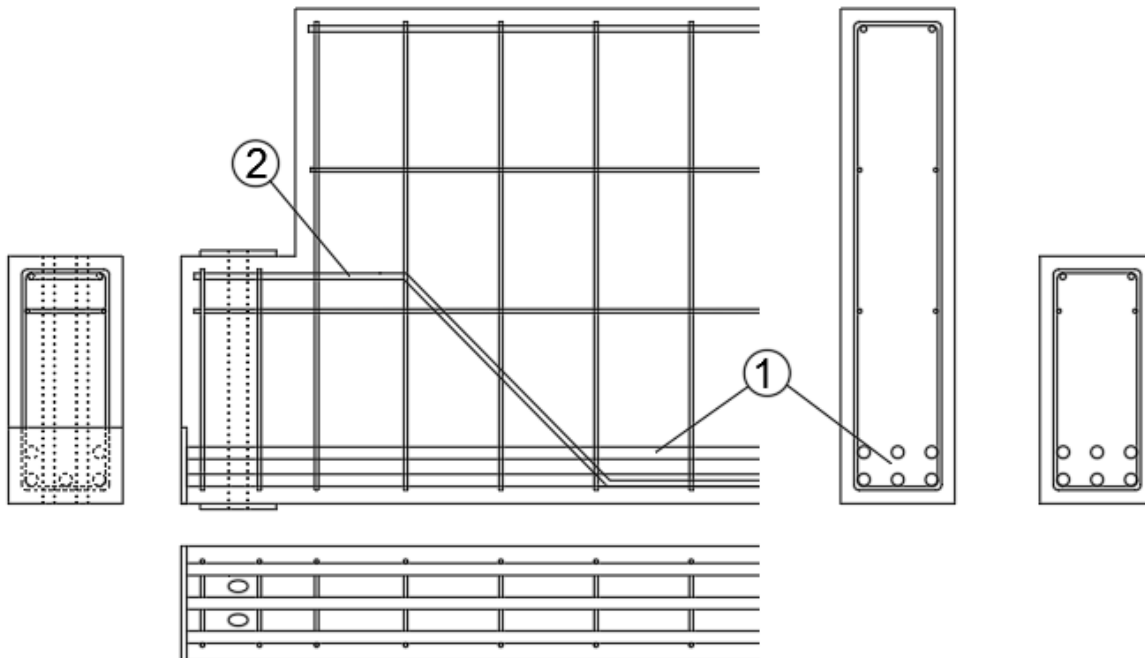
Obrázek3.19: Odštípnutí rohu mimo dolní výztuž

Na konci vazníku je tahová síla ve spodní výztuži (1) velmi malá, a pokud by se volila tato varianta (ohýbání výztuže), přistoupilo by se na ohýbání prutů s menším poloměrem než minimální poloměr (ten je určen na základě toho, aby při ohýbání nevznikly trhliny ve výztuži a aby nedošlo k drcení betonu v ohybu). Výztuž by se ohýbala v prefě či armovně pečlivě, pomalu, a i když by se předpokládalo poškození části průřezu výztuže (potrhaná část nemůže přenášet tah) tak se dá předpokládat, že výztuž sílu přeneše i s vnitřním poloměrem 1,25 x průměr výztuže (taková je použita na obrázku 3.20). [16]



Obrázek 3.20: Vyztužení detailu s ohyby

Druhou variantou je kotvení ohybové výztuže za použití kotevní desky. Jak je znázorněno na obrázku 3.21, spodní výztuž je přivařena k ocelové desce, která je v líci vazníku. Takové řešení je velmi čisté a funkční, nesnižuje únosnost prutů jako to předchozí, na druhou stranu je pracnější – výztuž je třeba svařit.



Obrázek 3.21: Vyztužení detailu s kotvicí deskou

### 3.9 Zvyšování únosnosti

Jak bylo popsáno již v úvodu této kapitoly, často se vyplatí dopředu počítat s možností změny využití v budoucnu. Taková úvaha velí navrhnout efektivně konstrukci, ale ponechat jí rezervy v místech, která jdou jen velmi těžko zesilovat. Bakalářská práce se zabývá dvěma způsoby přetížení, první je zvětšování přetížení menším vazníkem a druhé je zvyšování spojitého zatížení po celé délce obou vazníků. Na obrázku 3.22 je vidět zesílení vazníku, takovéto zesílení však nezvýší únosnost v místě uložení.

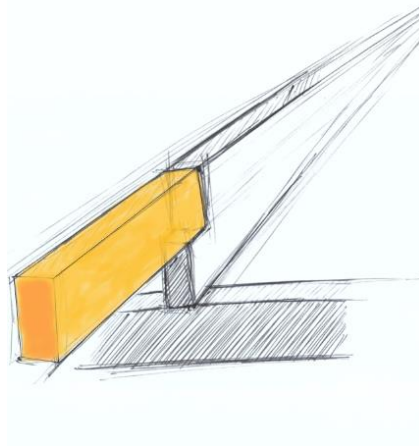


Obrázek 3.22: Zesílení střešního vazníku [17]



### 3.9.1 Přetížení menším vazníkem

K tomu může dojít při změně využití haly, například tak že se menší vazník zesílí na ohyb a přitom se zatíží například zavěšením břemene, zatížený nosník je vyznačen na obrázku 3.23.



Obrázek 3.23: Skica detailu, vyznačení přetíženého prvku

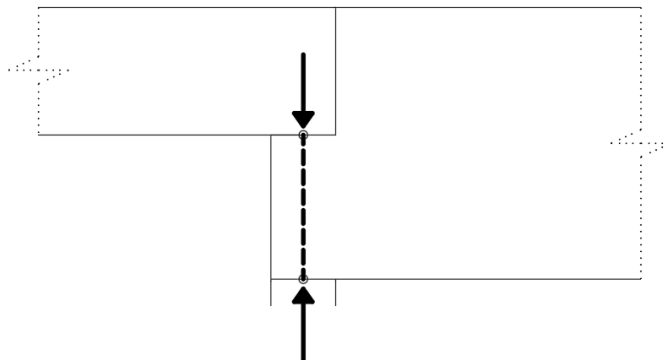
Jedná se o posouzení tlačné vzpěry, norma uvádí, že únosnost vzpěry, ve které mohou vznikat příčné tahy, se vypočítá jako: [18]

$$\sigma_{Rd,max} = 0,6v f_{cd}$$

Kde doporučenou hodnotu pro  $v$  lze spočítat jako ( $f_{ck}$  v MPa):

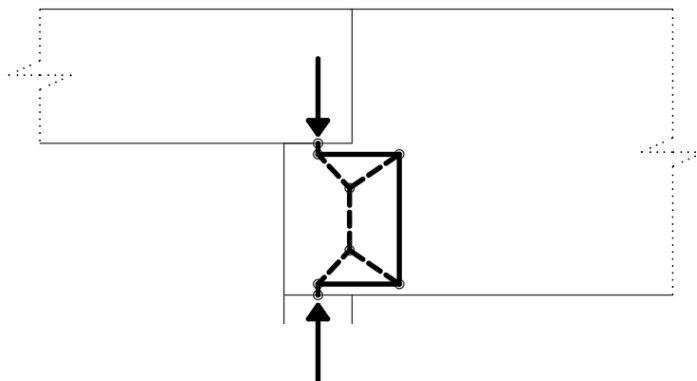
$$v = 1 - \frac{f_{ck}}{250}$$

Tím že spočítáme maximální napětí v tlačném prutu – vzpěře a známe přetížení vazníku lze spočítat potřebnou plochu k přenesení této tlakové síly. Nejjednodušší model příhradové analogie by vypadal jako na obrázku 3.24.



Obrázek 3.24: Příhradová analogie pro přetížení 1

Pokud by přetížení bylo moc veliké a plocha vzpěry by nebyla dostatečná, lze příhradový model upravit a tlačnou vzpěru pomocí táhel posunout směrem do nosníku – tím se zvětší tlačná plocha, příhradový model pro takový případ by mohl vypadat, jako na obrázku 3.25. Zde funkci táhel přebírá výztuž ve tvaru smyček, která zabraňuje deformacím a tím i příčné síle působící směrem k povrchu vazníku.

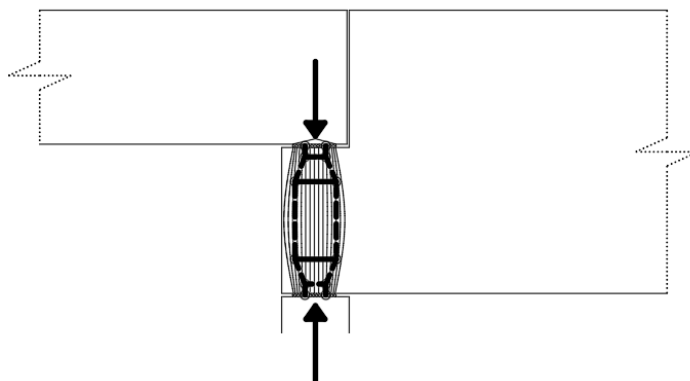


Obrázek 3.25: Příhradová analogie pro přetížení 2

Dalším způsobem (kromě zvětšení dostupné plochy) je zvýšení kritického napětí ve vzpěře. Toho lze docílit zabráněním příčným tahům a to například ovinutím betonové vzpěry výztuží, poté můžeme uvažovat větší kritické napětí  $\sigma_{Rd,max}$ .

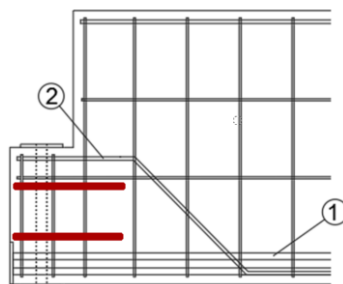
Pro příklad uvedený v předchozí části stačil první z modelů, i tak byla tlačná vzpěra zatížena pouze na 15% její únosnosti. Je nutné podotknout, že reálný průběh napětí bude fungovat v duchu druhého z modelů, (i když ve velmi malé míře) protože tam je výztuž v místech táhel již z předchozího návrhu a ta bude bránit deformaci ve směrech ven z vazníku.

Vzpěru nelze posoudit pouze na tlak, rozhodujícím faktorem je zpravidla příčný tah, proto je třeba upravit model příhradové analogie tak, aby bylo možné vznikající příčný tah spočítat a poté na něj navrhnout odpovídající výztuž. Jelikož menší vazník dosedá prakticky na celou plochu ozubu (rozměry ozubu: 300 x 300 mm, rozměry ložiska 250 x 250 mm) tak bude „baňkovitost“ vzpěry velmi malá, tudíž i příčné napětí vzniklé ze změny směru svislého napětí bude malé. Obrázek 3.26 ukazuje teoretické symetrické rozdělení tlakové síly. Pokud bychom uvažovali původní zatížení, zjistíme sílu v táhlech velmi malou, okolo 10 kN. Tuto sílu musí převzít výztuž rozmístěná v oblasti, kde napětí mění svůj směr (horních a spodních 300 mm, tedy výška rovna šířce vzpěry)



Obrázek 3.26: Teoretické rozdělení napětí a model příhradové analogie

Pokud by bylo třeba počítat s větším přitížením, tak by se rozmístila výztuž v podobě vodorovných smyček do míst zatáčejícího napětí, tedy do, míst kde se nachází táhlo v příhradovém modelu, viz obrázek 3.27.



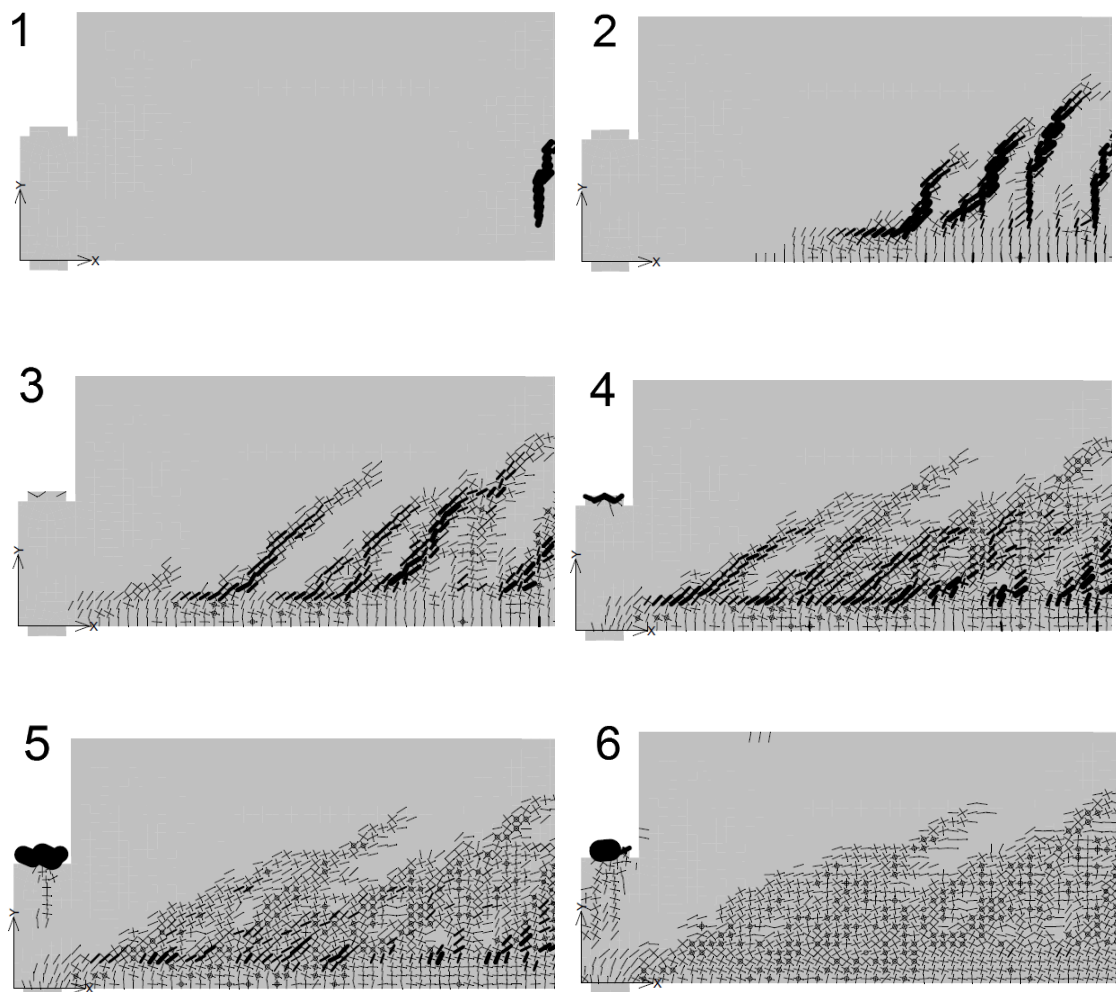
Obrázek 3.27: Umístění vodorovných smyček

#### 3.9.2 Celkové zvětšení zatížení

Jelikož se jedná o vazník s velkým rozpětím, tak je očekáváno, že při rozhodujícím zatížení pro návrh (tedy návrh na ohyb) nebude problém v detailu napojení. Avšak již z výše zmíněných důvodů se bakalářská práce zabývá únosností detailu ve větších mírách zatížení než návrhové.

Na obrázku 3.28 je v šesti krocích demonstrován průběh dalšího zatížení vazníku při daném vyztužení. Jedná se o výstupy z programu Atena 2D, jsou zde znázorněny trhliny na nedeformovaném (tedy deformace není vykreslena) vazníku.

### 3 Návrh napojení dvou různě vysokých prvků



Obrázek 3.28: Postupný vznik trhlin

Pro přehlednost jsou zde vykresleny pouze trhliny v rozmezí 0,0001 – 2 mm, kvůli tomu dochází ke zdánlivému zmenšování trhlin. Zatížení, při kterém se větší z trámů poruší, je asi 90 kN/m, to odpovídá asi pětinasobku původního, návrhového zatížení.

Při takovém zatížení dochází k již jistému porušení v oblasti detailu uložení, avšak rozhodujícím kritériem pro kolaps je ohybová pevnost vazníku. V předchozí části byla navržena výztuž odolávající tahu z menšího vazníku (výztuž označena číslovkou 2 na obrázcích 3.22 a 3.23), jedná se o smyčku s průměrem výztuže 10 mm. Předtím byla tato výztuž navržena spíše jako konstrukční, bylo zjištěno, že při pětinasobném zatížení (obrázek 3.28, krok 6) je výztuž zatížena na 90% návrhové únosnosti.

## 4 Závěr

Bakalářská práce se zabývala analýzou detailu napojení dvou prefabrikovaných vazníků s rozdílnou výškou. Nejdříve byly navrženy rozměry vazníků: Vazník na rozpon 20 m s výškou 1300 mm a vazník na rozpon 10 m s výškou 600 mm. Byly popsány různé způsoby provedení detailu a vhodná varianta byla vybrána. Pro zvolené uspořádání detailu byl proveden rozbor příčin možných poruch a následně navržen model příhradové analogie, správnost modelu byla ověřena pomocí lineární analýzy v programu SCIA Engineer a nelineární analýzy v programu Atena 2D. Na základě výsledků byla navržena výztuž pro návrhové zatížení.

Dále se bakalářská práce věnovala možné změně zatížení konstrukce, takové, k jaké by mohlo dojít při změně využití haly. Řešila se možnost nejprve přetížení pouze menšího z vazníků a poté přetížení celé konstrukce, přičemž byla hodnocena jak reálná únosnost detailu, tak i možnosti navyšování únosnosti v úvodním návrhu.

## Literatura

- [1] *Beton TKS: Prefabrikace - příloha 20 let ČBS*. 2013, **2013**(5). ISSN 12133116.
- [2] CAP Central Pacov. In: *RIEDER* [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.rieder.cz/fotogalerie/prefabrikovane-haly/cap-central-pacov.php>
- [3] Obchodní centrum Litoměřice 2013. In: *ARMADO a.s.* [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.armado.cz/fotogalerie/?idfg=54>
- [4] WITZANY, Jiří, Jan PAŠEK, Tomáš ČEJKA a Radek ZIGLER. *Konstrukce pozemních staveb 70: prefabrikované konstrukční systémy a části staveb*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-010-2656-6.
- [5] EL DEBS, M. K., A. DA SILVA RAMOS BARBOZA a A. M. MIOTTO. Development of material to be used for bearing pad in precast concrete connections. *Structural Concrete*. 2003, **4**(4), 185-193. DOI: 10.1680/stco.2003.4.4.185. ISSN 1464-4177. Dostupné také z: <http://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/stco.2003.4.4.185>
- [6] NEČAS, Radim. *ULOŽENÍ MOSTŮ, MOSTNÍ ZÁVĚRY*. Brno. Dostupné také z: [http://www.fce.vutbr.cz/BZK/studenti/BL012/BL12\\_prednaska.pdf](http://www.fce.vutbr.cz/BZK/studenti/BL012/BL12_prednaska.pdf)
- [7] ŠEJNOHA, Michal a Jitka BITTNAROVÁ. *Pružnost a pevnost I*. 1. Praha: ČVUT, 1996.
- [8] REINECK, Karl-Heinz. *Examples for the design of structural concrete with strut-and-tie models*. Farmington Hills, Mich.: American Concrete Institute, c2002. Publication SP, 208. ISBN 08-703-1086-0.
- [9] ŠMEJKAL, Jiří a Jaroslav PROCHÁZKA. Navrhování rámových rohů s použitím modelů náhradní příhradoviny. *Beton TKS*. 2010, (5), 66-73. ISSN 12133116.
- [10] ŠMEJKAL, Jiří a Jaroslav PROCHÁZKA. Navrhování nepřímě uložených a složených konzol s použitím modelů náhradní příhradoviny. *Beton TKS*. 2010, (1), 46-53. ISSN 12133116.

[11] BARTON, D. L., R. B. ANDERSON, A. BOUADI, J. O. JIRSA a J. E. BREEN. *AN INVESTIGATION OF STRUT-AND-TIE MODELS FOR DAPPED BEAM DETAILS*. Austin, Texas: Center for Transportation Research The University of Texas at Austin, 1991. The University of Texas at Austin.

[12] FU, Chung. *THE STRUT-AND-TIE MODEL OF CONCRETE STRUCTURES*. Maryland, USA, 2001. Dostupné také z: <http://www.best.umd.edu/files/2016/08/stm-oj2izh.pdf>

[13] KOHOUTKOVÁ, Alena, Jaroslav PROCHÁZKA a Jiří ŠMEJKAL. *Modelování a vyztužování betonových prvků: lokální modely železobetonových konstrukcí*. V Praze: České vysoké učení technické, 2013. ISBN 978-80-01-05329-4.

[14] SCIA ENGINEER *Topic Training: Finite Element Method*. SCIA Engineer, 2015. Dostupné také z: <https://www.scia.net/cs/support/downloads/scia-engineer-manuals>

[15] ČERVENKA, Vladimír, Libor JENDELE a Jan ČERVENKA. *ATENA Program Documentation: Theory*. Praha: Červenka Consulting, 2016. Dostupné také z: [http://www.cervenka.cz/assets/files/atena-pdf/ATENA\\_Theory.pdf](http://www.cervenka.cz/assets/files/atena-pdf/ATENA_Theory.pdf)

[16] HANZLOVÁ, Hana a Jiří ŠMEJKAL. *Betonové a zděné konstrukce 1: základy navrhování betonových konstrukcí*. V Praze: České vysoké učení technické, 2013. ISBN 978-80-01-05323-2.

[17] PEEM, spol. s r. o.: Zesílení stropního / střešního vazníku. *Speciální statické zesilování* [online]. Dostupné z: <http://www.zesilovanikonstrukci.cz/>

[18] ČSN EN 1992: Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí.