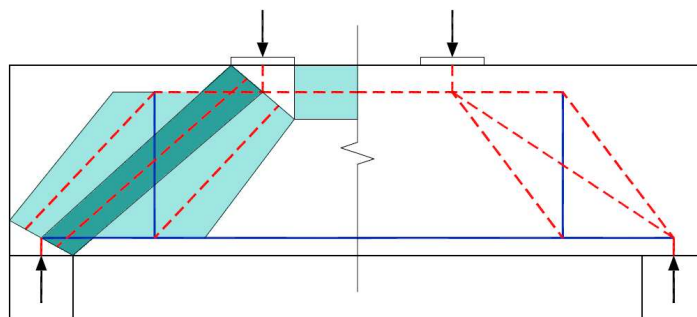


## ŘEŠENÉ PŘÍKLADY BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ POMOCÍ PŘÍHRADOVÉ ANALOGIE



Vypracoval Karel Semrád a Csaba Szücs v rámci projektu FRVŠ 2311/2009/G1

<http://concrete.fsv.cvut.cz/pomucky/...>

## OBSAH

1. Úvod .....	3
2. Metoda příhradové analogie .....	4
2.1. Principy modelování .....	4
2.1.1. B- a D- oblasti .....	5
2.1.2. Základní předpoklady výpočtu pomocí příhradové analogie .....	7
2.1.3. Postup výpočtu .....	7
2.1.4. Základní pravidla pro tvorbu příhradových modelů .....	8
2.2. Síly ve vzpěrách a táhlech - zásady navrhování .....	12
2.2.1. Předpoklady pro únosnost vzpěr a táhel modelů náhradní příhradoviny .....	12
2.2.2. Vzpěry .....	12
2.2.3. Táhla .....	16
2.2.4. Styčníky .....	16
2.3. Konstrukční zásady při tvorbě příhradových modelů .....	20
2.3.1. Geometrie styčníků .....	20
2.3.2. Táhla a uzlové oblasti .....	21
2.3.3. Minimální vyztužení D oblastí .....	22
2.4. Osamělé břemeno u podpory .....	22
2.5. Náhlá změna průřezu .....	24
2.6. Konzoly .....	25
2.6.1. Postup návrhu konzoly .....	25
2.6.2. Principy vyztužení konzoly .....	26
2.7. Ozuby na průvlacích .....	27
2.7.1. Modely náhradní příhradoviny .....	27
3. Řešené příklady .....	30
3.1. Nosník zatížený osamělými břemeny .....	30
3.2. Nosník zatížený osamělým břemenem .....	41
3.3. Krátká konzola .....	47
3.4. Dlouhá konzola .....	50
3.5. Příklad ozubu – uložení průvlaku .....	53
3.6. Stěnový nosník s otvorem .....	58
3.7. Stěna s otvory .....	66
3.8. Nosník s proměnnou výškou .....	77
3.9. Základový práh nad skupinou pilot .....	82
3.10. Kotevní oblasti .....	89

# 1. ÚVOD

V řadě běžných případů postačí při analýze konstrukce globální výpočet, kdy je pro stanovení účinků zatížení konstrukce idealizována jako celek a na tyto účinky jsou posouzeny jednotlivé průřezy konstrukce. Pro určité části prvků a konstrukcí je třeba doplnit lokální výpočet. Je nezbytný všude tam, kde neplatí předpoklad lineárního rozložení poměrných přetvoření. Tyto části konstrukcí a prvků můžeme souhrnně nazvat poruchovými oblastmi (D-oblasti). Praktický návrh poruchových oblastí jen na základě analogie s běžnými pravidly bývá nejčastější příčinou závad a poruch železobetonových konstrukcí. Patří sem části konstrukce:

- v blízkosti podpor
- v okolí soustředěných zatížení
- ve stycích konstrukčních prvků, např. v rámových styčnicích
- v kotevních oblastech předpjatých prvků
- v místech náhlé změny průřezu
- v blízkosti otvorů
- ve zvláštních případech.

Při zobecnění uvedených úvah pro navrhování konstrukcí je tedy vhodné rozlišovat dva typy oblastí. Konstrukce je rozdělena na B-(Beam nebo Bernoulli) oblasti s běžným chováním, ve kterých se může při dimenzování použít standardních postupů – platí v nich předpoklad zachování rovinnosti průřezů před a po přetvoření (poměrné přetvoření je lineárně závislé na vzdálenosti od neutrální osy), a na D-(Discontinuity nebo Disturbed) oblasti, kde je porušen ustálený tok průběhu vnitřních sil, tj. poruchové oblasti se statickou nebo geometrickou nespojitostí.

V zásadě existuje několik možností, jak poruchové oblasti řešit: oblíbené jsou přibližné a empirické vzorce, možný je rozklad sil, nejčastější a dobře propracovaná je metoda příhradové analogie. Nejpokročilejším nástrojem jsou programy pro nelineární výpočet betonových konstrukcí.

Vývoj modelů příhradové analogie nám nabízí jednotné výpočetní postupy, které mohou být použity pro návrh D- i B-oblastí. Uplatnění příhradové analogie rovněž zdůrazňuje nezbytnou roli detailního návrhu výztuže.

## **Dimenzování podle současných norem**

Návrhové principy a požadavky uváděné v současných normách jsou definovány pro posouzení celé konstrukce a ne jen jednotlivých průřezů. Naproti těmto principům se návrhové postupy a posouzení zaměřují na ověření pouze jednotlivých průřezů a jsou uvedeny oddělené postupy pro posouzení jednotlivých silových účinků jako jsou ohybový moment a posouvající síla. K tomu jsou pak v normě uvedena obecná pravidla, při jejichž dodržení je zajištěna celková bezpečnost konstrukce.

Nebezpečí návrhu posouzením pouze jednotlivých průřezů spočívá v tom, že se tak může přehlédnout celkový tok vnitřních sil a tím opominout kritické oblasti konstrukce. Obzvláště oblasti s nespojitostí v geometrii nebo zatížení (D-oblasti) nejsou často přesně dimenzovány a jejich návrh je řešen užitím obecných normových pravidel a doporučení. Tyto úvahy a požadavky na vytvoření jasných výpočetních postupů vedly k rozvoji obecných modelů příhradové analogie. (Schlaich, Breen 1991). Většina základních pravidel pro tvorbu analogických příhradových modelů byla převzata z FIP Commission 3 „Practical Design“ a následně z FIP Recommendations „Practical design of structural concrete“ 1999.

Současné normy (ČSN EN 1992-1-1 - Eurokód 2) se drží tradičního konceptu návrhu betonových konstrukcí, ale byly do nich dodány nové kapitoly a přílohy zabývající se problematikou návrhu D-oblastí. (kap. 6.5 Navrhování pomocí modelů náhradní příhradoviny, kap. 9.9 Oblasti s diskontinuitou v geometrii nebo zatížení a Příloha J: Pravidla pro konstrukční uspořádání výztuže ve zvláštních případech). Shrňme-li ale, tyto informace v normě jsou velmi stručné a obecné.

Nutno zmínit, že modely příhradové analogie byly úspěšně používány již od konce devatenáctého století pro definování smykové únosnosti třmínků, později pro krátké konzoly a zvláštní případy vyztužených konstrukcí.

Použití příhradové analogie:

- Metoda příhradové analogie je jednotným výpočetním postupem, který zohledňuje všechny zatěžovací stavy dohromady (M, N, V, T).
- Příhradová analogie je velmi účinným nástrojem pro posouzení konstrukcí namáhaných velkými smykovými silami a poruchových oblastí.
- Reálná konstrukce je modelována zjednodušenými příhradovými modely. Příhradové modely jsou logické, názorné a snadno kontrolovatelné.

## 2. METODA PŘÍHRADOVÉ ANALOGIE

Napětí nebo vnitřní síly v konstrukci mohou být znázorněny ve formě trajektorií hlavních napětí. Toky sil směřující od zatíženého okraje konstrukce k podpoře jsou účinným nástrojem pro porozumění chování konstrukce. Pokud známe takové toky nebo trajektorie napětí, můžeme je lokalizovat a napřímít ve formě tlačných a tažených prvků příhradového modelu. Říká se jim modely strut-and-tie (modely vzpěra - táhlo). Modelování železobetonových konstrukcí pomocí příhradových analogických modelů má širší použití než jen v poruchových oblastech. Tradičně jsou tyto modely používány k výpočtu konstrukcí a rovinných prvků zatížených ve vlastní rovině – a zejména takových oblastí, u nichž neplatí jednoduché geometrické předpoklady pro stanovení deformací. Samostatnou sféru použití tvoří konstruování detailů.

### 2.1. Principy modelování

Příhradové modely pro výpočet železobetonových konstrukcí jsou obvykle vytvořeny koncentrací trajektorií hlavních napětí do tlačných a tažených prutů, které probíhají podél střednic polí napětí, která znázorňují. Jako základ pro vytvoření modelu může posloužit pružné řešení oblasti analytickými metodami nebo metodou konečných prvků. Pomocí izolinií nebo izoploch hlavních napětí lze pak zkonstruovat soustavu náhradních prutů. Příhradové modely lze pak snadno řešit výpočetními programy pro prutové konstrukce. Liší se od původních modelů obecnějším přístupem a umožňují s jistými omezeními i výpočet deformací.

Principy metody spočívají v tom, že příhradový model tvoří táhla, vzpěry a uzly. Táhla jsou obvykle výslednice soustavy prutů betonářské nebo předpínací výztuže, vzpěra reprezentuje výslednici pole tlakového napětí. Uzel je ohraničený objem betonu, kde se vzpěry buď protínají nebo jsou odkloněny táhly kotvenými v uzlech. Uzly jsou umístěny rovněž v místech, kde je odkloněna nebo stykována výztuž. Vzpěry, táhla i uzly musejí být navrženy tak, aby napětí od účinků návrhového zatížení nepřekročilo příslušná pevnostní kritéria a aby byly splněny příslušné konstrukční požadavky.

Veškeré síly v těchto prutových prvcích musejí být v rovnováze s vnějším zatížením a s reakcemi, jednotlivé prvky modelu mají být orientovány podle napětí stanovených pružným

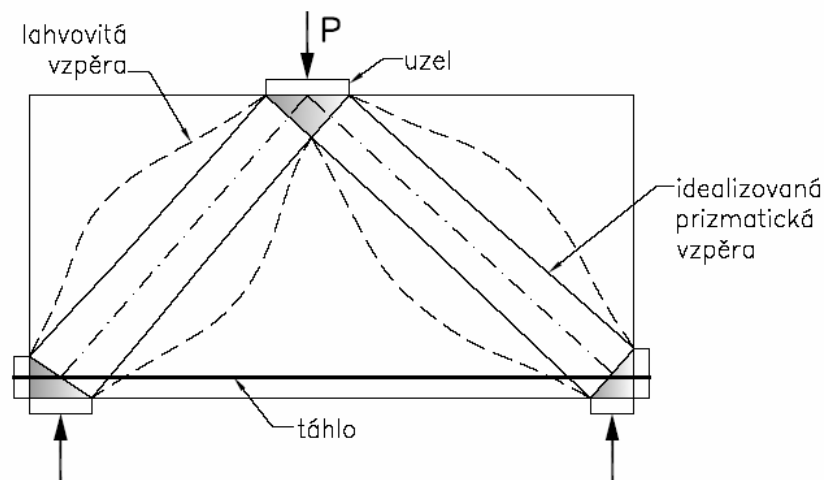
řešením. Model však může být upraven s ohledem na vznik trhlin v betonu a dosažení meze kluzu v oceli. Poloha předpokládaných uzlů a táhel musí odpovídat uspořádání výztuže a zároveň musí být model v souladu s přílehlou B-oblastí.

Podle hodnot sil v tlačenech prvcích je posuzováno napětí v betonu a ověřovány rozměry prvku. Síly v tažených prvcích určují množství výztuže včetně uvážení směru jejího vedení a tvaru výztužných prutů a v odpovídajícím uzlu musí být zajištěno jejich správné zakotvení. Návrh je doplněn požadavky na minimální plochy výztuže případně i s ohledem na vznik a šířku trhlin.

### 2.1.1. B- a D- oblasti

Jednotlivé části betonové konstrukce mohou být rozděleny na nosníkové B-oblasti (beam regions), ve kterých platí předpoklad lineárního rozdělení poměrného přetvoření po průřezu a poruchové D-oblasti (disturbed regions), v jejichž blízkosti dochází k náhlým změnám v zatížení lokálními břemeny a reakcemi nebo k náhlé změně geometrie konstrukce jako jsou otvory a změny průřezů. V těchto oblastech neplatí lineární rozložení poměrného přetvoření po průřezu. K návrhu a posouzení B- a D- oblastí se proto musí přistupovat zcela odlišně.

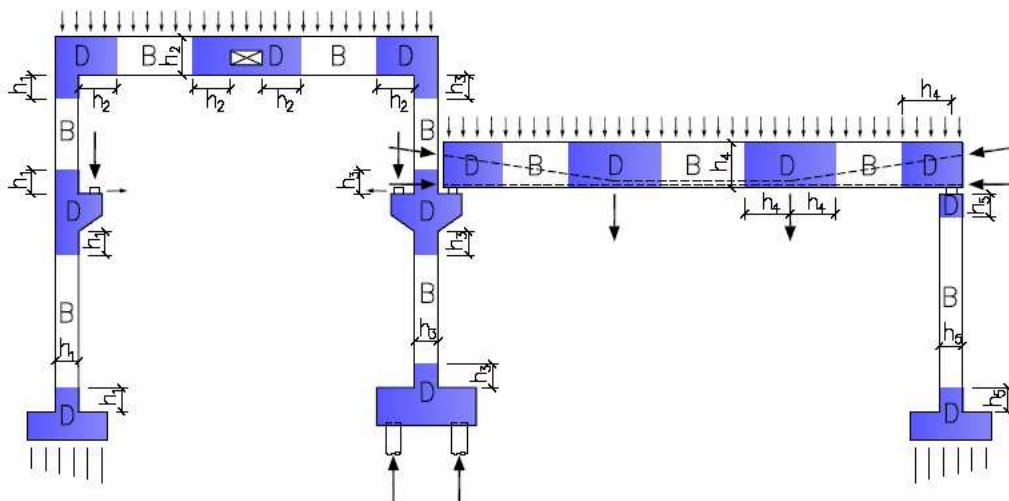
Při navrhování B-oblastí lze použít tradičních návrhových postupů pro ohyb a smyk železobetonových konstrukcí. V D-oblastech je převážná část vnějšího zatížení přenášena přímo do podpor rovinnými tlakovými silami betonu a tahem výztužných prutů. Pro návrh D-oblastí je tedy potřeba užití zcela odlišného přístupu. D-oblasti se modelují pomocí příhradových modelů skládajících se z betonových vzpěr, výztužných táhel a jejich vzájemných spojů – uzlů.



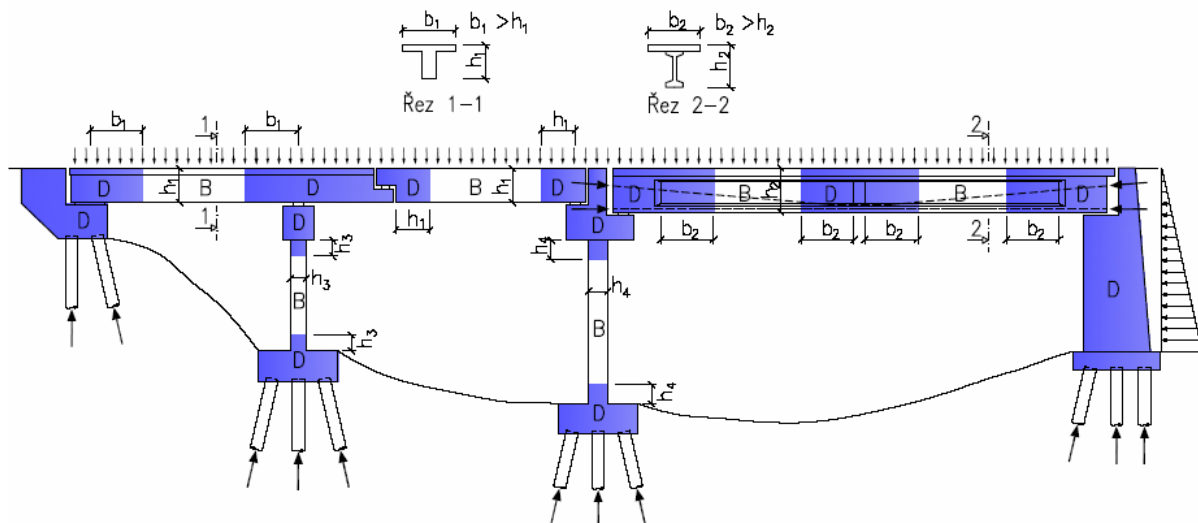
Obr. 2.1 Příhradový model pro vysoký nosník

Na obr. 2.1 je znázorněn příhradový model stěnového nosníku, skládající se ze dvou nakloněných betonových vzpěr spojených vodorovným táhlem. V uzlech je zprostředkován přenos sil z betonových vzpěr do táhel a podpor. Porušení může nastat drcením betonových vzpěr, průtahem výztužných táhel, vyčerpáním únosnosti uzlů (drcení betonu) nebo nedostatečným zakotvením táhel. Únosnost betonových vzpěr a uzlů je určena dosažením návrhové pevnosti na konci betonových vzpěr a hranici uzlů.

St. Venantův princip a teorie pružnosti předpokládají, že účinek lokálního břemene nebo geometrické nespojitosti vymizí zhruba ve vzdálenosti rovné výšce průřezu  $h$  od místa působení. Z tohoto důvodu bývají D-oblasti modelovány „vyříznutím“ části konstrukce rovné výšce průřezu před a za lokálním silovým účinkem nebo náhlou změnou průřezu.



Obr. 2.2 Příklad poruchových oblastí

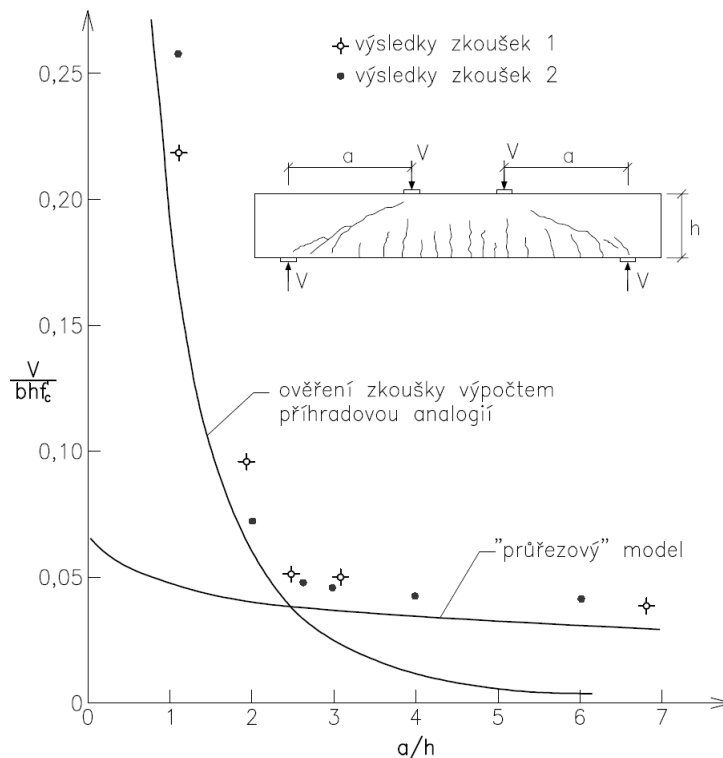


Obr. 2.3 Příklad poruchových oblastí – mosty

Pokud se dvě D-oblasti, každá délky rovnající se výšce průřezu  $h$ , dotýkají nebo překrývají, uvažuje se tato oblast jako kombinovaná D-oblast. V tomto případě se pro přenos posouvající síly prostřednictvím tlacené diagonály může uvažovat vzdálenost  $2h$  od místa působení zatížení. Tento předpoklad určuje nejmenší možný úhel mezi tlakovou diagonálou (vzpěrou) a táhlem jako  $\arctan(h/2h) = 26.5^\circ$ , zaokrouhлено na  $25^\circ$ .

Na obr. 2.4 je porovnání mezního smykového napětí nosníku obdrženého ze zatěžovacích zkoušek a napětí získaného výpočtem pomocí příhradové analogie a běžným „průřezovým“ postupem. Jak je z obrázku patrné, chování nosníku jako B-oblasti začíná při poměru  $a/h \geq 2,5$ . Chování nosníku jako D-oblasti končí u poměru  $a/h \leq 2,5$ , což se projevuje strmým stoupáním křivky nalevo od této hodnoty.

(Obrázek a výsledky zkoušek převzaty z Figure 2, Prestressed Concrete Structures – Collins and Mitchell, 1991)



Obr. 2.4 Mezní napětí při porušení smykem pro různé vzdálenosti břemen od podpor

### 2.1.2. Základní předpoklady výpočtu pomocí příhradové analogie

- Zachování rovnováhy sil
- Idealizace chování konstrukce – plastické chování
- Síly v táhlech a vzpěrách jsou uvažovány jednoosé
- Působení betonu v tahu se zanedbává
- Vnější síly jsou vnášeny do výpočetního modelu pouze v uzlech (i vlastní tíha konstrukce je uvažována vnesením vnějšího zatížení v uzlech, popřípadě se vlastní tíha zanedbává)
- Předpětí je uvažováno jako vnější zatížení

### 2.1.3. Postup výpočtu

Proces výpočtu se skládá z pěti základních kroků.

- 1) Definování hranice poruchové oblasti a určení hraničních sil (mezní návrhové síly) – reakce a průřezové síly od zatížení.
- 2) Sestavení příhradového modelu včetně určení rozměrů jednotlivých prvků a vyšetření vnitřních sil v jednotlivých prutech.
- 3) Zvolení plochy betonářské nebo předpínací výztuže odpovídající požadované únosnosti táhla a zajištění řádného zakotvení výztuže v uzlech.
- 4) Posouzení velikosti vzpěr a uzlů tak, aby jejich únosnost byla dostatečná k přenesení sil v jednotlivých prutech příhradoviny.
- 5) Navržení uspořádané výztuže rozložené do několika prutů v místě každého táhla tak, aby byla zajištěna duktilita prvku a dodržení konstrukčních zásad.

Výpočetní proces není vždy jednoznačný a mnohdy si vyžaduje vrátit se zpět k předešlému kroku a např. upravit množství výztuže či rozměry jednotlivých prvků. Při řešení složitých

příhradových modelů je vhodné určité iterace mezi jednotlivými kroky výpočtu. Především při řešení staticky neurčitých příhradových modelů se objevuje otázka optimalizace výpočtu.

Bezpečnost návrhu konstrukce tímto postupem je zaručena dolní mezí únosnosti vyplývající z teorie plasticity. Ve všech v úvahu připadajících návrhových situacích návrhové účinky zatížení splňující rovnováhu vnějších a vnitřních sil nepřestoupí mezní návrhovou odolnost konstrukce. Odolnost konstrukce a jejích jednotlivých částí se stanoví pomocí **návrhových hodnot charakteristik materiálů a rozměrů**. Při porušení je dříve dosaženo mezního poměrného přetvoření výztuže nežli betonu.

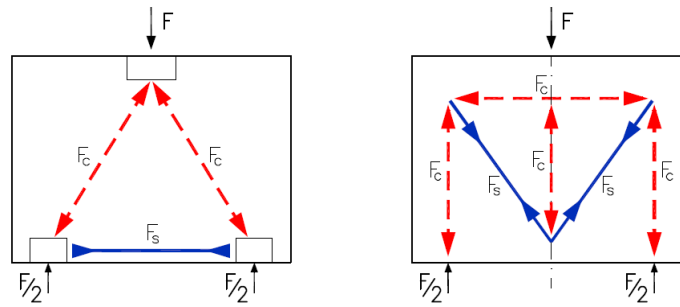
Naopak nebezpečnost vzniká tím, že metoda automaticky nesplňuje podmínky kompatibility deformací a dostatečná duktilita konstrukce musí být zajištěna jiným způsobem. - Při tvorbě výpočetního prutového modelu je jím např. pravidlo „příliš“ se neodchylovat od pružného chování konstrukce a dodržení minimálního stupně vyztužení.

#### 2.1.4. Základní pravidla pro tvorbu příhradových modelů

- Vycházet z lineárně pružného stavu – modelové tlačené pruty orientovat pokud možno ve směru hlavních tlakových napětí, směr a umístění tlačných a tažených prutů by měly odpovídat v řádu  $\pm 15^\circ$  pomyslným výslednicím trajektorií hlavních napětí dle pružného řešení.
- Vzpěry jsou obvykle rovnoběžné s očekávaným směrem trhlin vyvozených vznikajícími příčnými tahovými silami v betonové části průřezu.
- Pokud jsou známé příklady porušení podobných typů konstrukcí, je vhodné použít obdobnou polohu a směr tlačných vzpěr při uvažování zásady, že diagonální vzpěry jsou rovnoběžné s trhlínami. Vzpěry nesmí nikdy kolmo křížit hlavní trhlíny.
- Pro sestavení geometrie příhradového modelu uvažovat osy vzpěr a výztužných táhel, při tom je nutno uvažovat skutečnou šířku vzpěr, táhel a uzlů, přičemž tyto rozměry jsou také závislé na velikosti podpor a ploch pro vnesení zatížení.
- Tažené pruty uvažovat podle skutečného způsobu vyztužení, pro výztuž volit raději přímé pruty.
- Vzpěry se nesmějí křížit – pokud by se vzpěry křížily, došlo by k jejich přetížení.
- Táhla se mohou křížit se vzpěrami a jinými táhly, ve vzpěrách ale musí být zohledněna změna napětí, které převezme táhlo.
- Úhly, které svírají tlačené a tažené pruty v jednom uzlu volit blízké  $45^\circ$ , nejmenší dovolený sklon vzpěry a táhla je  $25^\circ$ .
- Soustředěná zatížení jako jsou osamělá břemena, podporové reakce a kotevní síly působící na okraji nebo v rohu konstrukce pokud možno rozložit na větší plochu – zpřesnění modelu.
- Raději převzít a přizpůsobit osvědčený model nové situaci nežli experimentovat.

Obr. 2.5 ukazuje dvě možnosti modelu téže oblasti, obě splňují podmínky rovnováhy. **Pro výběr nejvhodnějšího modelu z možných variant obvykle platí pravidlo, že model s kratší délkou tažených prutů je účinnější. Příhradový model se vzpěrami rovnoběžnými s počátečními trhlínami bude dobře odpovídat skutečnému chování konstrukce.** U složitějších konstrukcí je možno počítat s tvorbou staticky neurčitých modelů, kde se objevují otázky spojené s jejich optimalizací.



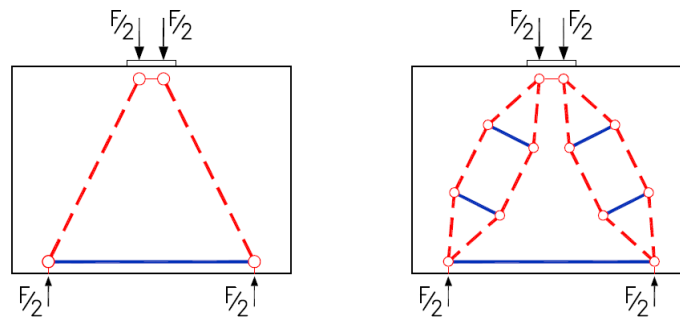


vhodný model

nevhodný model

Obr. 2.5 Jednoznačnost modelu – výběr vhodnější varianty

Modelů pro konkrétní případ může být celá řada, ale jen některé jsou vhodné. Modely závisí na řadě dalších parametrů, např. na místě působení zatížení. Obr. 2.6 ukazuje zpřesnění jednoduchého modelu tak, aby podrobnější model dokázal popsat příčné tahy ve vzpěrách. Při volbě tvaru výpočetního modelu je třeba zkušeností a je doporučováno užít raději ověřený model z literatury a příliš neexperimentovat, a tím se vyvarovat zásadních chyb.

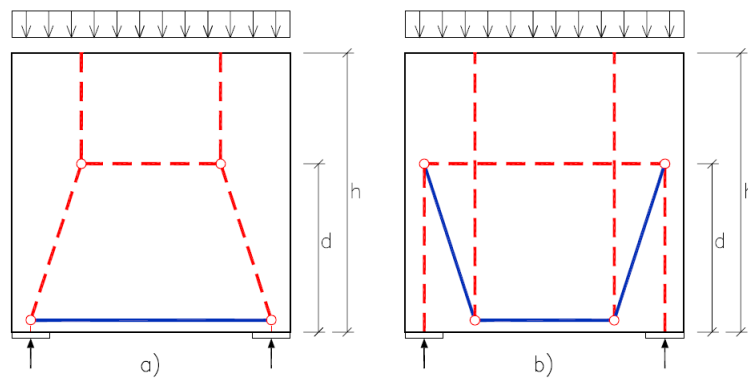


Obr. 2.6 Zpřesňování modelu

Při srovnání platných modelů na obr. 2.7 je možno označit za nevhodný model b), který neodpovídá pravidlu volit modely s co nejkratšími táhly. Také zde nejsou dodržena pravidla, že se nemají křížit vzpěry a úhly mezi některými tlačеныmi a taženými pruty jsou menší než  $25^\circ$ .

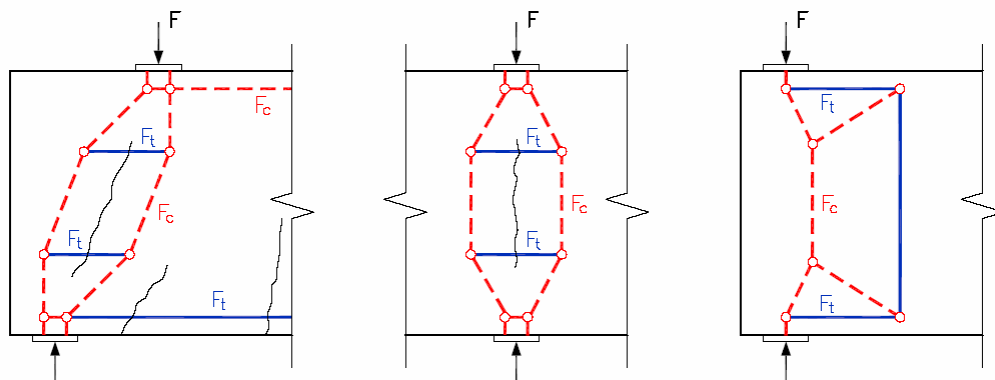
**Nevhodný model vyžaduje pro tahové porušení výztuže velkého přetvoření konstrukce, což neodpovídá možnostem omezené plastické deformace betonu. Tak by bylo dříve dosaženo mezního poměrného přetvoření v betonu a tím by došlo ke křehkému porušení, čemuž se snažíme zabránit.**

**Vhodný model odpovídá pravidlům, že vnější zatížení je přenášeno do podpor nejjednodušší a nejkratší cestou a pro porušení konstrukce musí být uvolněno minimální množství energie. Jinak řečeno vhodný model je ten, který minimalizuje vznik trhlin.**



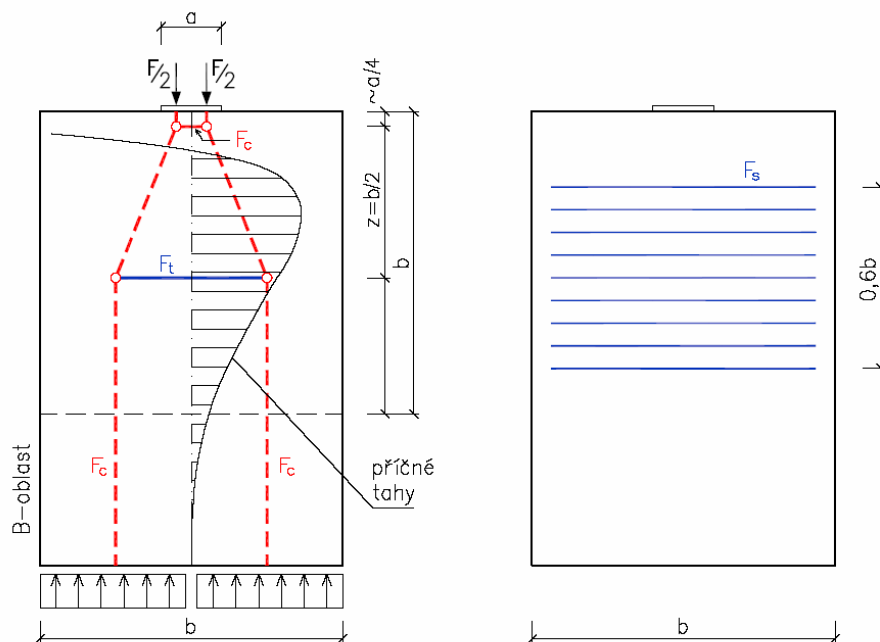
Obr. 2.7 Stěnový nosník, a) vhodný model, b) nevhodný model

Vliv polohy zatížení na model, a tím i na vyztužení, ukazuje obr. 2.8 pro prvky zatížené soustředěným zatížením v blízkosti podpory nebo nad ní, např. osamělé břemeno umístěné v blízkosti rohu nosníku. Síly v táhlech  $F_t$  znázorňují příčné tahy se štěpným účinkem na prvek. Platí obecně: tam, kde jsou umístěna táhla v modelu, je třeba navrhnout výztuž podle předepsaných zásad. Ale i naopak: předpokládáme-li příčné tahy v konstrukci a víme, že podle konstrukčních pokynů určité uspořádání výztuže v konstrukci bude vyžadováno, je třeba umístit v uvažovaném místě ve výpočetním modelu táhla.



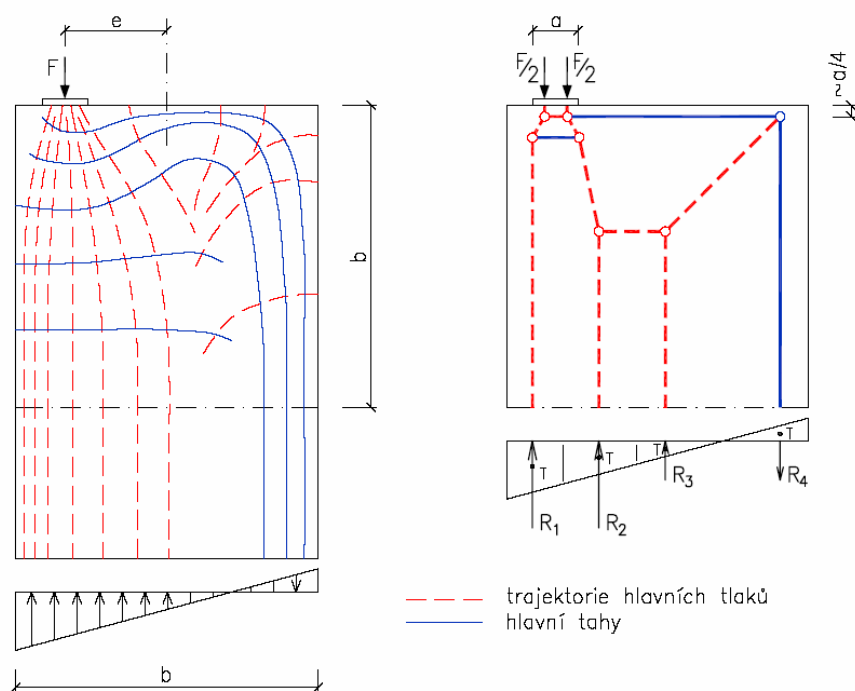
Obr. 2.8 Modely pro vodorovné vyztužení u soustředěného zatížení nad podporou

Obr.2.9 ukazuje úzkou souvislost příhradových modelů s konstrukčními zásadami pro vedení výztuže. V příkladu je znázorněna doporučená velikost oblasti, v níž je rozmístěna výztuž odpovídající poloze jediného vodorovného táhla  $F_t$  modelujícího příčné tahy v konstrukci.



Obr. 2.9 Rozmístění výztuže pro příčný tah

D- oblasti jsou často pouze částí rozsáhlé konstrukce, které musejí být „vyříznuty“ a na jejich hranicích musejí být aplikovány správným způsobem vnitřní síly z přilehlé části konstrukce. Na obr.2.10 je uveden přechod mezi D- a B- oblastmi konstrukce, což je obecně důležité pro mnoho případů. Při sestavování příhradového modelu je dobré vycházet z trajektorií hlavních napětí, které dostaneme pružným výpočtem. Poloha vzpěr a táhel lze poměrně přesně určit z podmínky rovnováhy sil na hranici B- a D- oblasti. Osy jednotlivých prutů umísťujeme do těžišť pomyslných částečných obrazců průběhu napětí a potřebné reakce na hranici B- a D- oblasti obdržíme integrací napětí po jednotlivých částech průřezu (výslednicí napětí z odřezané konstrukce).



Obr. 2.10 Přechod mezi D- a B- oblastí

Příhradový model představuje také základ pro jednotnou koncepci v navrhování železobetonových konstrukcí. Nejen pro oblasti nespojitosti ale i pro běžné oblasti konstrukce dobře funguje představa příhradového modelu. Důležitým důsledkem je možnost v libovolném místě (např. v tlačném pásu nosníku) stanovit sílu od kombinace namáhání ohybem, smykem a normálovou silou a zároveň průřez navrhnout i posoudit. Uzel se může vložit v místě konstrukce, kde výztuž mění směr nebo je stykována. Vysvětlení a zavedení rozhodujících detailů jako je uspořádání sil v místě uzlů, přenášení sil třením ve spoji nebo styku nebo přenášení sil přes trhlinu zároveň ukazuje jejich vliv na únosnost prvků modelu (je tedy předpokládán i vznik trhlin). Konkrétní požadavky na tvary, přesahy a kotevní délky výztužných prutů vyplývající z tohoto uspořádání, dávají úplnou a jasnou představu o vlastnostech prvků, a tím i o chování modelu. Jednotné pojetí představuje nový kvalitativní krok v přechodu od posuzování jednotlivých průřezů k posuzování celkového chování konstrukce.

## 2.2. Síly ve vzpěrách a táhlech - zásady navrhování

Vzpěry, táhla i uzly musejí být navrženy tak, aby napětí od účinků návrhového zatížení nepřekročilo příslušná pevnostní kritéria a aby byly splněny příslušné konstrukční požadavky. Obecně lze zapsat podmínky spolehlivosti v mezních stavech únosnosti jako:

$$E_d \leq R_d \quad (2.1)$$

kde  $E_d$  je návrhová hodnota účinku zatížení uvažovaného v mezních stavech únosnosti  
 $R_d$  je návrhová únosnost

Při návrhu je však nutné ověřovat nejen stavy únosnosti jednotlivých částí modelu (a popř. jejich stav použitelnosti), ale i splnit předepsaná konstrukční ustanovení pro splnění všech požadavků návrhu (např. trvanlivosti konstrukce), jako je minimální stupeň vytyžení, návrh třídy betonu a krycích vrstev s ohledem na třídu agresivity prostředí aj.

### 2.2.1. Předpoklady pro únosnost vzpěr a táhel modelů náhradní příhradoviny

- Síly ve vzpěrách a táhlech jsou jen jednoosé
- V táhlech je dosaženo meze kluzu výztuže před vyčerpáním pevnosti betonových vzpěr
- Tahové síly v betonu jsou zanedbány
- Ve všech styčnicích musí být zajištěna rovnováha
- K redistribuci vnitřních sil a aktivaci táhel dochází po vzniku trhlin v betonu

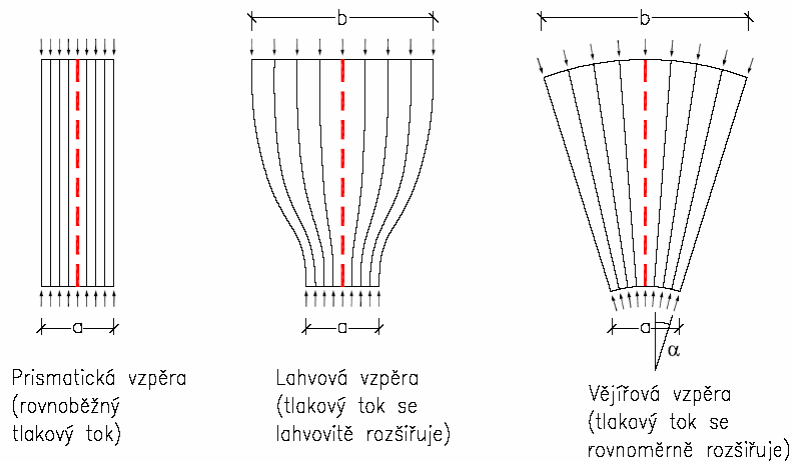
### 2.2.2. Vzpěry

Vzpěra reprezentuje výslednici pole tlakových napětí. Únosnost vzpěry je odvozována z hodnoty jednoosé pevnosti v tlaku  $f_{cd}$ , jejíž hodnota je upravena v závislosti na typu vzpěry, příčném napětí a výskytu trhlin.

Při posouzení se napětí ve vzpěře předpokládá po celém průřezu konstantní.

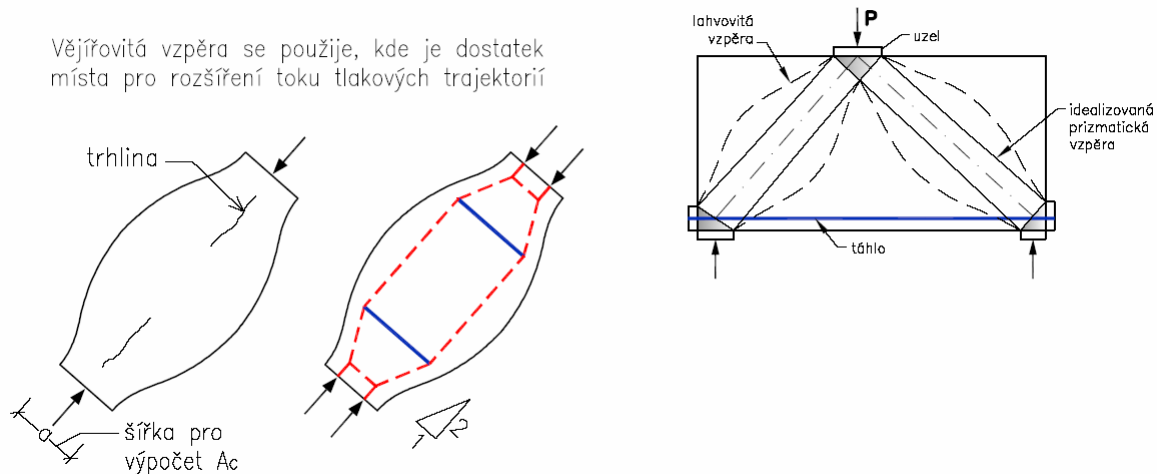
#### Typy vzpěr

Rozeznáváme tři typy vzpěr. Tlakové pole může mít tvar paralelní, vějířový nebo lahvový. (obr. 2.11) Nejčastěji jsou vzpěry modelovány prismatickými popřípadě rovnoměrně se zužujícími pruty.



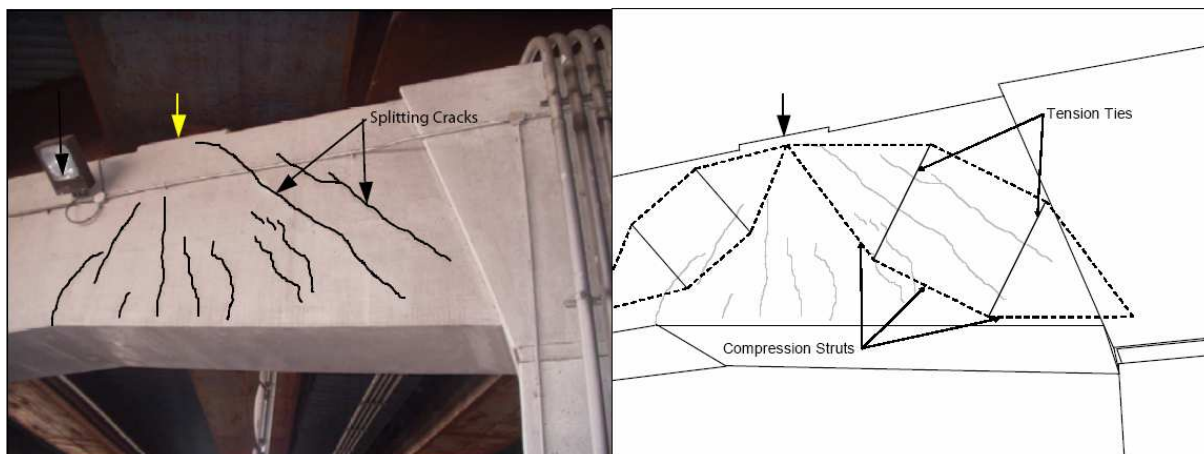
Obr 2.11 Typy vzpěr

Většina vzpěr v rovinných příhradových modelech má však lahvovitý tvar. Tam kde to geometrie konstrukce dovoluje se tlakové trajektorie rozšiřují do okolního betonu a vytváří lahvové vzpěry. (obr. 2.12)

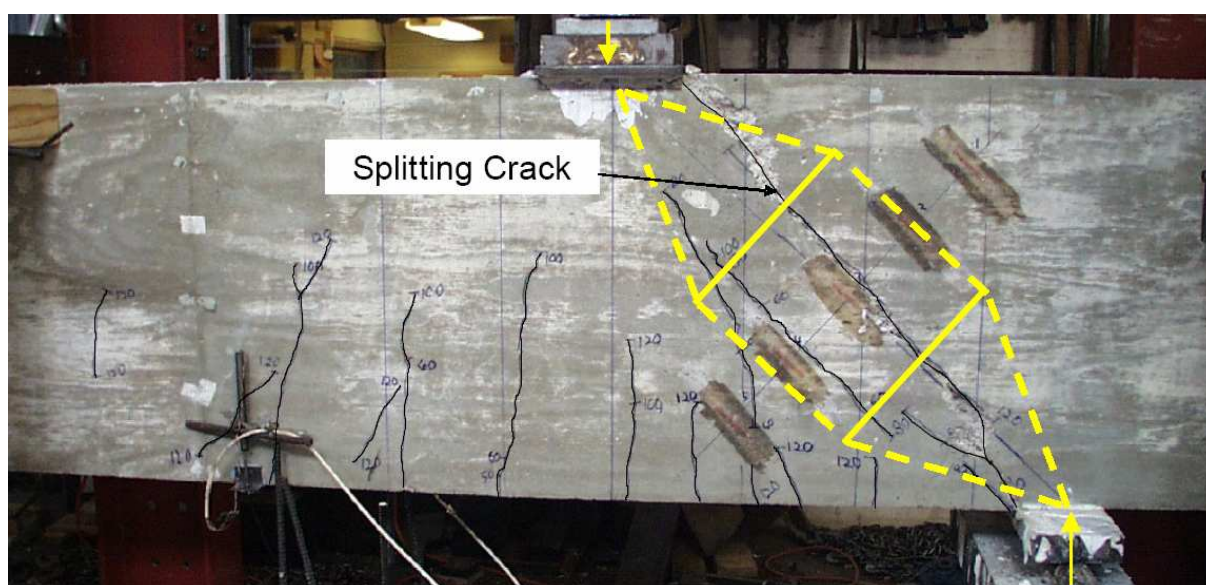


Obr. 2.12 Použití lahvové vzpěry

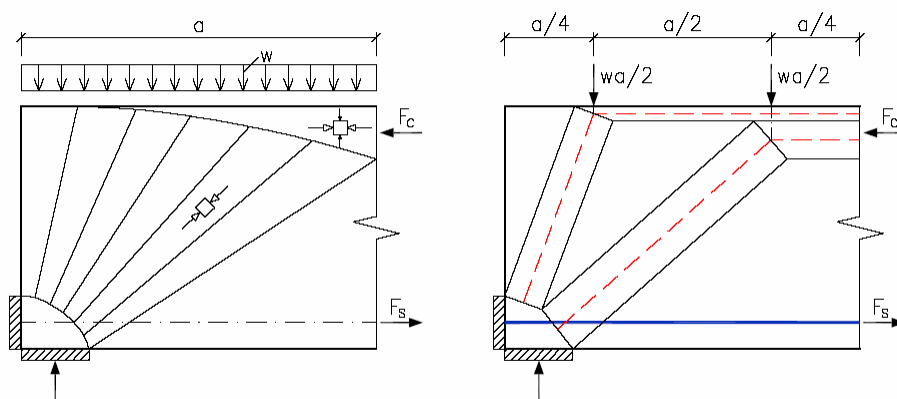
Vzpěry jsou často širší uprostřed nežli na koncích, neboť šířka, do které se může šířit tlakové napětí, je zpravidla větší uprostřed vzpěry nežli v místě uzlů. Zakřivené čárkované čáry na obr. 2.12 ukazují efektivní hranici typických (lahvových) vzpěr. V návrhu se lahvové vzpěry modelují soustavou prizmatických vzpěr. Zakřivení tlakových napětí v blízkosti uzlů vyvozuje příčné tahy, jejichž důsledkem je vznik podélných trhlin. Celková příčná síla v oblasti mezi uzlem a zakřivenou hranicí lahvové vzpěry se v návrhu uvažuje max 25% celkové tlakové síly ve vzpěře. Vzpěry mají být opatřeny příčnou výztuží pro přenesení příčných tahů, které se uvolňují při vzniku podélných trhlin. Pokud nejsou vzpěry patřičně vyztuženy, aby zabránili vzniku podélných trhlin, snižují trhliny únosnost vzpěr.



Obr. 2.13 Příklad lahvové vzpěry v reálné konstrukci



Obr.2.14 Zatěžovací zkouška vysokého nosníku – lahvová vzpěra



Obr. 2.15 Modelování vějířové vzpěry soustavou prizmatických vzpěr

Na obr. 2.15 je rovněž uplatněno pravidlo, že vnější zatížení (popř. vlastní tíha) se vnáší do výpočetního modelu pouze v uzlech.

Únosnost vzpěry je odvozována z hodnoty jednoosé návrhové pevnosti v tlaku  $f_{cd}$ , která je počítána plnou hodnotou v případě, kdy v příčném směru není napětí nebo v případě dvojosé napjatosti, je-li příčné napětí tlakem. V případě víceosého tlaku je dovoleno hodnotu pevnosti zvýšit. (např. v trojrozměrných konstrukcích, jako jsou základové prahy nad skupinou pilot). Naopak hodnota návrhové pevnosti vzpěry je snižována, je-li v příčném směru tah a vznikají trhliny.

Rozměry vzpěry by měli být takové, aby nebyla překročena návrhová pevnost betonu  $\sigma_{Rd,max}$ .

$$A_c = \frac{F_d}{\sigma_{Rd,max}} \quad (2.2)$$

**Návrhovou pevnost (návrhové napětí na mezi únosnosti) pro betonové tlačené pruty náhradní příhradoviny v oblasti s příčným tlakovým napětím nebo bez příčného napětí lze vypočítat z výrazu (2.3).**

$$\sigma_{Rd,max} = \nu_2 f_{cd} \quad (2.3)$$

Pro vzpěry neporušené trhlinami a s rovnoměrným poměrným přetvořením je hodnota  $\nu_2 = 1$ . Tyto vzpěry např. odpovídají tlačným pásům průřezů namáhaných ohybem.

V oblastech s víceosým tlakem lze předpokládat vyšší návrhovou pevnost. Maximální hodnota lze uvažovat jako  $3,0 f_{cd}$ .

**Návrhová pevnost pro betonové tlačené pruty má být redukována v tlakových oblastech s příčným tahem a trhlinami.** Návrhovou pevnost lze stanovit z výrazu (2.4).

$$\sigma_{Rd,max} = \nu \cdot \nu_2 f_{cd} \quad (2.4)$$

$$\nu = 1 - f_{ck} / 250 \quad (f_{ck} \text{ v MPa}) \quad (2.5)$$

Vzpěry s trhlinami rovnoběžnými s osou vzpěry a řádně zakotvenou příčnou výztuží – návrhová pevnost je redukována v důsledku příčných tahů a vznikem trhlin součinitelem  $\nu_2 = 0,8$ .

Vzpěry přenášející tlakové napětí přes trhliny s normální šířkou (např. stojiny nosníků)  $\nu_2 = 0,6$ .

Vzpěry přenášející tlakové napětí přes trhliny s velkou šířkou (např. prvky s osovým tahem nebo v tažených přírubách)  $\nu_2 = 0,45$ .

**V tlačných prutech nemusí být ověřována návrhová napětí, pokud napětí v uzlových bodech vyhovují návrhovému napětím a pokud je vzpěra patřičně vyztužena ortogonální výztuží proti příčným tahům.**

V betonové vzpěře vznikají příčná tahová napětí. Požadovaná výztuž, která má odolávat příčným tahovým silám, může být rozptýlena po délce tlačného prvku (viz obr. 2.18). Pokud výztuž v oblasti styčnicku přesahuje přes uvažovanou délku prvku, má být výztuž rozmístěna na délce, kde jsou tlakové trajektorie zakřiveny (táhla a vzpěry). Tahovou sílu  $T$  lze stanovit:

a) pro částečně nespojitě oblasti ( $b \leq H/2$  a  $b_{eff} = b$ ), viz obr. 2.18 a:

$$T = \frac{1}{4} \frac{b-a}{b} F \quad (2.6)$$

b) pro zcela nespojitě oblasti ( $b > H/2$ ), viz obr. 2.18 b:

$$T = \frac{1}{4} \left( 1 - 0,7 \frac{a}{h} \right) F \quad (2.7)$$

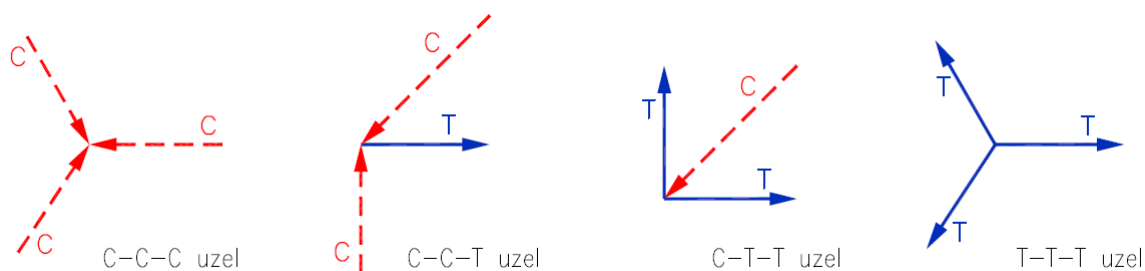




zatížení, v podporách, v kotevních oblastech s koncentrovanou nebo předpínací výztuží, v ohybech výztužných prutů a ve spojích a rozích tlačených a tažených prvků.

Pravidla pro uzly je v tomto smyslu možno použít pro libovolné místo v konstrukci, kde vznikají soustředěné styčníky vnitřních sil, i když k návrhu nebyla použita metoda příhradové analogie.

Podle sil směřujících do styčníku rozeznáváme 3, (resp.4) druhy styčníků – CCC, CCT, CTT, (TTT).



Obr. 2.19 Druhy styčníků

Návrhové hodnoty pro tlaková napětí ve styčnicích lze určit:

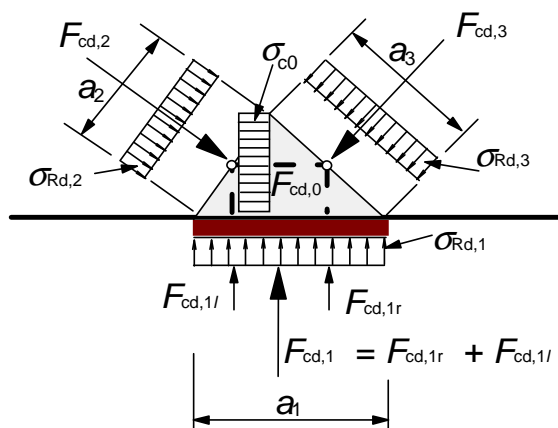
a) **ve styčnicích s tlakovými silami, ve kterých nejsou kotvena táhla** (viz obr. 2.20) podle vztahu:

$$\sigma_{Rd,max} = k_1 \nu \cdot f_{cd} \quad (2.8)$$

$$\nu = 1 - f_{ck} / 250$$

$$k_1 = 1,0$$

kde  $\sigma_{Rd,max}$  je maximální napětí, které může působit na hranách styčníku.



Obr. 2.20 Styčník s tlakovými silami bez táhel

Rovinné styčníky s tlakovými silami spojující tři tlačené pruty lze ověřovat podle obr. 2.20. Maximální průměrná hlavní napětí ve styčnicí ( $\sigma_{c0}$ ,  $\sigma_{c1}$ ,  $\sigma_{c2}$ ,  $\sigma_{c3}$ ) mají být posouzena podle vztahu 2.8. Obvykle lze předpokládat, že:

$$F_{cd,1}/a_1 = F_{cd,2}/a_2 = F_{cd,3}/a_3, \text{ což znamená, že } \sigma_{cd,1} = \sigma_{cd,2} = \sigma_{cd,3} = \sigma_{cd,0}.$$

U styčnicku namáhaného víceosým tlakem se tedy předpokládá stejné napětí na všech styčných plochách tlačných betonových prutů. Oblast styčnicku se nazývá hydrostatická uzlová – styčnicková zóna.

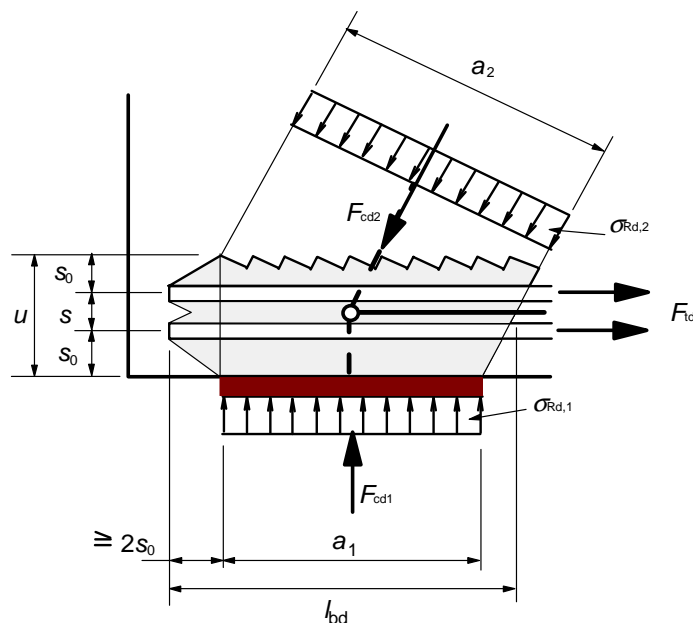
b) ve **styčnicích s tlakovými i tahovými silami s táhly kotvenými v jednom směru** (viz obr. 2.21) podle vztahu:

$$\sigma_{Rd,max} = k_2 \nu \cdot f_{cd} \quad (2.9)$$

$$\nu = 1 - f_{ck} / 250$$

$$k_2 = 0,85$$

kde  $\sigma_{Rd,max}$  je maximální hodnota z  $\sigma_{Rd,1}$  a  $\sigma_{Rd,2}$ .



Obr. 2.21 Styčník s tlakovými i tahovými silami a výztuží v jednom směru

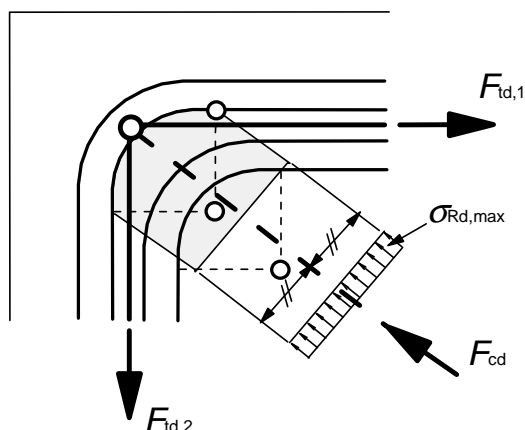
Kotvení výztuže ve styčnicích s tlakovými a tahovými silami začíná na hranici rozšířené uzlové oblasti, např. v případě podpory začíná kotvení na vnitřním líci (viz obr. 2.21). Kotevní délka má zasahovat přes celou délku styčnicku. V určitých případech se může výztuž zakotvit až za styčnickem. Pro kotvení a ohýbaní výztuže platí pravidla uvedená v normě.

c) ve **styčnicích s tlakovými i tahovými silami s kotvenými táhly ve více směrech** (viz obr. 2.22) podle vztahu:

$$\sigma_{Rd,max} = k_3 \nu \cdot f_{cd} \quad (2.10)$$

$$\nu = 1 - f_{ck} / 250$$

$$k_3 = 0,75$$



Obr. 2.22 Stýčnick s tlakovými i tahovými silami s výztuží ve dvou směrech

Hodnoty návrhového tlakového napětí uvedené v předešlých třech případech lze zvýšit až o 10%, pokud je splněna nejméně jedna z následujících podmínek:

- je zaručen trojosý tlak;
- všechny úhly mezi tlačnými pruty a táhly jsou  $\geq 55^\circ$ ;
- napětí působící v uložení nebo v místě zatížení jsou rovnoměrně rozložené a stýčnick je ovinutý třmínky;
- výztuž je umístěna v několika vrstvách;
- pohyb stýčnicku je spolehlivě omezen uspořádáním v uložení nebo třením.

Pokud je známé rozdělení zatížení do všech tří směrů tlačných prutů, návrhová pevnost pro trojose tlačené stýčnicky je definována vztahem:

$$\sigma_{Rd,max} = k_4 \nu' f_{cd} \quad (2.11)$$

$$\nu = 1 - f_{ck} / 250$$

$$k_4 = 3,0$$

Stýčnicky v ohybech výztuže mohou být vyšetřovány podle obr. 2.22.

Minimální průměr ohybu prutu musí být takový, aby se vyloučily ohybové trhliny v prutu a nedošlo k porušení betonu uvnitř ohybu prutu.

Aby se vyloučilo porušení výztuže nemá být vnitřní průměr zakřivení prutu (průměr trnu) menší než  $\varnothing_{m,min}$ .

Průměr prutu	Nejmenší průměr trnu $\varnothing_{m,min}$
$\varnothing \leq 16 \text{ mm}$	4 $\varnothing$
$\varnothing > 16 \text{ mm}$	7 $\varnothing$

Tab. 2.1

Průměr trnu není třeba kontrolovat z hlediska porušení betonu, pokud jsou splněny následující podmínky:

- kotvení prutu nevyžaduje od konce ohybu délku větší než  $5\varnothing$
- prut není umístěn u okraje prvku (rovina ohybu není blízko povrchu betonu) a uvnitř ohybu je umístěn příčný prut o průměru  $\geq \varnothing$  prutu
- průměr trnu je rovný popř. větší než hodnoty doporučené v tabulce 2.1

V ostatních případech má být průměr trnu  $\varnothing_{m,min}$  zvětšen podle vztahu 2.12

$$\varnothing_{m,min} \geq F_{bt} \left( \frac{1}{a_b} + \frac{1}{2\varnothing} \right) / f_{cd} \quad (2.12)$$

kde  $F_{bt}$  je tahová síla na začátku ohybu při mezním zatížení prutu

$a_b$  pro uvažovaný prut je to polovina osové vzdálenosti mezi pruty kolmo na rovinu ohybu. Pro prut nebo skupinu prutů přilehlých k povrchu betonu prvku má být za  $a_b$  uvažována tloušťka krycí vrstvy zvětšená o  $\varnothing/2$ .

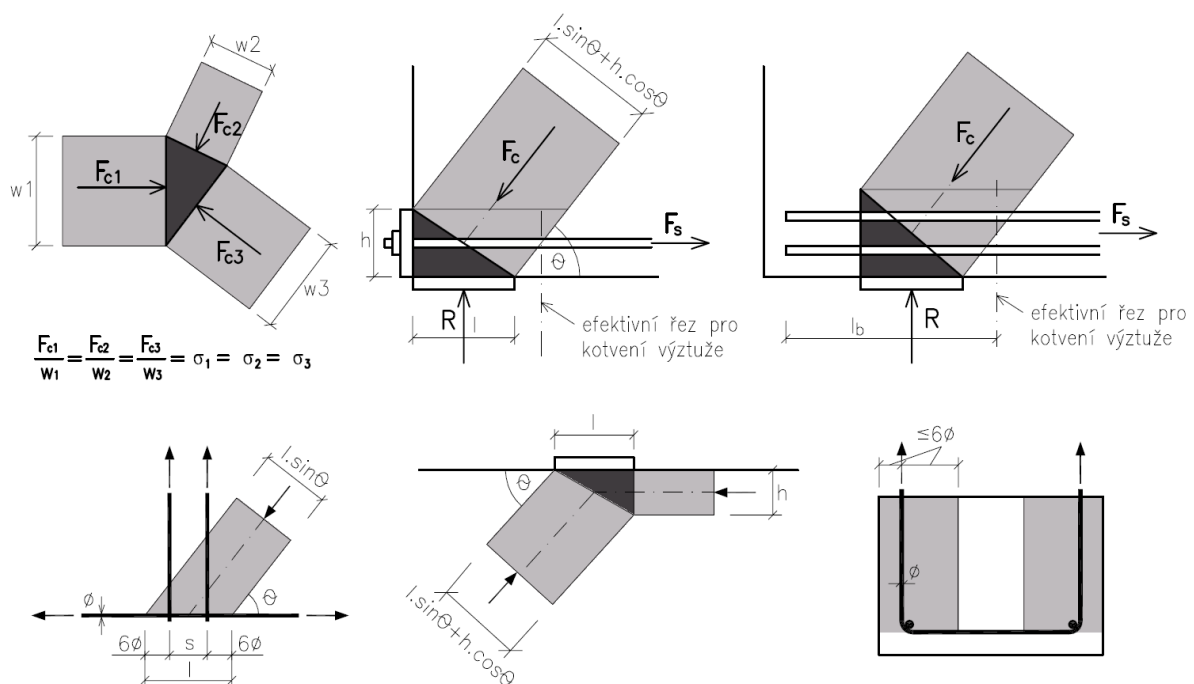
## 2.3. Konstrukční zásady při tvorbě příhradových modelů

### 2.3.1. Geometrie styčnicků

Šířka uzlu se uvažuje stejná jako šířka vzpěry na konci, která do uzlu směřuje. Rozměry uzlových oblastí a tím pádem šířka vzpěr závisí na poloze a rozmístění výztuže a na velikosti podpor/ploch vnášení reakcí a vnějšího zatížení.

Při sestavování geometrie uzlových oblastí a posuzování rovnováhy v uzlu vycházíme z těchto předpokladů:

- geometrie styčnicků vychází z geometrie výpočetního příhradového modelu – směru a polohy vzpěr a táhel
- velikosti podpor / oblastí vnášení vnějších zatížení
- polohy, rozmístění a množství tahové výztuže a rozměrů kotev



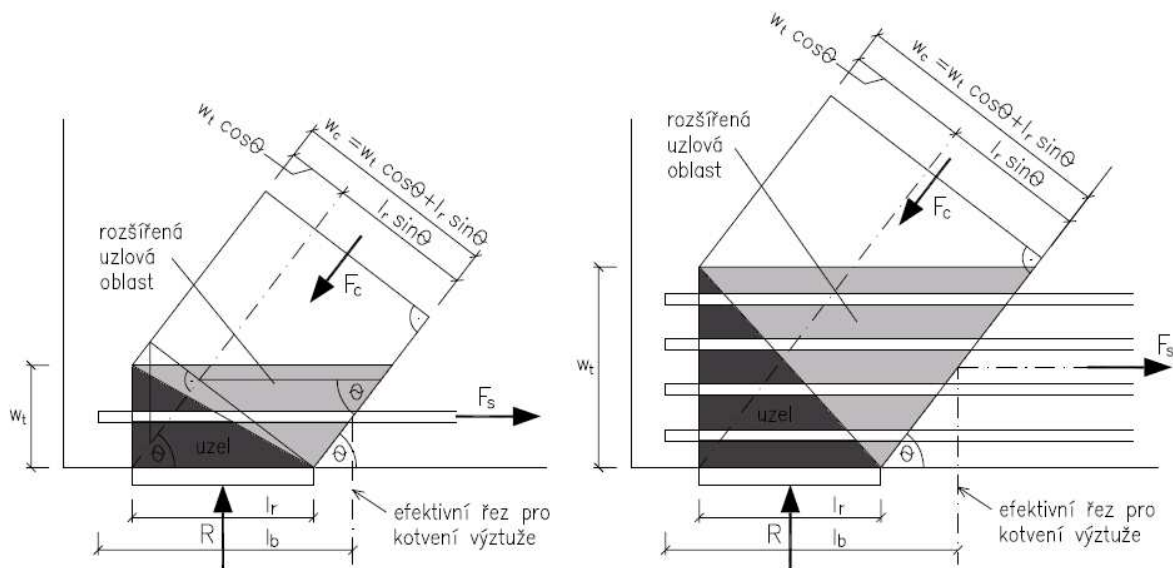
Obr 2.23 Určování geometrie styčnicků

**Vzpěry a táhla by měly být navrhovány tak, že koncová napětí v uzlech jsou hydrostatická, tj. že napětí na všech stranách uzlu by měla být stejná.** Tato podmínka rovnováhy hranových napětí mnohdy komplikuje návrh uzlových oblastí.

Hrany hydrostatického uzlu jsou kolmé k osám vzpěr a táhel směřujících do uzlu. Pokud jsou napětí na všech stranách uzlu stejná, jsou strany uzlové oblasti ve stejném poměru jako síly ve vzpěrách směřující do uzlu.

Obecně je nejjednodušší dosáhnout hydrostatického napětí v uzlu, do kterého směřují tři vzpěry. Jak bude ukázáno v příkladech dále, v uzlech není mnohdy dosaženo hydrostatického napětí. Hlavní napětí v uzlových oblastech má často rozdílné hodnoty různých směrech. To je způsobeno jednak tvarem výpočetního modelu a geometrií konstrukce – šířkou podpor a ploch vnášení vnějšího zatížení, rozmístěním výztuže – šířkou táhel. Velikost hlavního napětí je určena také způsobem namáhání v daném místě konstrukce - zda jde o převládající smykové nebo ohybové namáhání.

Při výpočtech jsou vzpěry obvykle idealizovány jako hranolové tlačené prvky. Pokud se liší návrhové napětí na koncích vzpěr, z důvodu rozdílného návrhového napětí v uzlech nebo z důvodu rozdílné šířky podpor a ploch vnášení zatížení, mají být vzpěry idealizovány jako rovnoměrně se rozšiřující (vějířové) vzpěry.



Obr 2.24 Velikost uzlů – vztahy mezi rozměry podpor, množstvím a polohou výztuže

Z obrázku 2.24 můžeme odvodit vztah mezi šířkou vzpěr, táhel a podpor. Pro posouzení napětí ve vzpěrách (resp. na tlačené plošce v uzlové oblasti) se vždy uvažuje nejužší šířka vzpěry kolmá na její osu.

$$w_c = w_t \cos \Theta + l_r \sin \Theta \quad (2.13)$$

Tento vztah je užitečný při sestavování velikosti uzlů. Šířka vzpěry  $w_c$  tak může být upravena změnou šířky podpory  $l_b$  nebo šířkou táhla  $w_t$ , a obdobně. Po úpravě šířky vzpěry nebo táhla je zapotřebí zkontrolovat napětí na všech hranách uzlu, která by měla být v rovnováze.

### 2.3.2. Táhla a uzlové oblasti

Táhla jsou tvořena výztuží a obklopující částí betonu. V případě větších uzlových oblastí je třeba výztuž rozmístit rovnoměrně po celé šířce táhla. To lze snadno docílit uložením výztuže v několika vrstvách. Poloha táhla je pak určena střednicí výztužných prutů. Šířka táhla s jednou vrstvou výztužných prutů je rovna šířce prutu plus dvakrát tloušťka betonové krycí vrstvy.

Obecně hlavním problémem při návrhu táhel je jejich zakotvení v uzlových oblastech. Při posuzování uzlových oblastí musíme vždy posoudit, zda je výztuž v uzlu dostatečně zakotvena. Pro rozhraní účinné kotevní oblasti lze uvažovat hranici mezi rozšířenou uzlovou oblastí a táhlem. (Rozšířená uzlová oblast je tlačená oblast závisající na velikosti podpory a sklonu a velikosti vzpěry. Tlakové napětí zde zprostředkovává přenos sil ze vzpěry do vzpěry nebo táhla do vzpěry.) Pokud výztuž nemá dostatečnou kotevní délku za hranicí rozšířené

uzlové oblasti, musí být výztuž zahnutá, zakotvena nebo přivařena k příčné tahové výztuži za hranicí uzlu nebo zakotvena mechanicky (pomocí kotev). Pro stanovení potřebné plochy kotevního plechu se vychází z rovnosti napětí na ostatních hranách uzlu. Efektivní plocha kotevní oblasti (plechu) se získá podělením tahové síly ve výztuži dovoleným napětím na hranici vzpěry a uzlu.

### 2.3.3. Minimální vyztužení D oblastí

Pro zachycení příčných tahů v betonových vzpěrách má být navržena ortogonální výztuž dle vztahů 2.6 a 2.7.

Obecně pro omezení šířky trhlin D oblastí je nutné při povrchu konstrukce vložit minimálně konstrukční ortogonální výztuž s plochou nejméně  $A_s \geq 0,003A_c$ . Maximální vzdálenost výztužných prutů musí být menší než 300 mm. Tato minimální vyztuž má za úkol odolávat příčným tahům na koncích lahvovitých vzpěr po vzniku podélných trhlin a zajistit minimální duktilitu konstrukce.

Podle Americké normy ACI 318-2002 je minimální plocha tahové výztuže protínající vzpěru pro betony s  $f_{ck} \leq 50$  MPa rovna

$$\sum \frac{A_{s_i}}{b_s s_i} \sin \alpha_i \geq 0,003 \quad (2.14)$$

kde  $A_{s_i}$  – celková plocha tahové výztuže protínající vzpěru  
 $s_i$  – vzdálenosti mezi pruty smykové výztuže  
 $\alpha_i$  – úhel mezi smykovou výztuží a osou vzpěry  
 $b$  – šířka tlačené vzpěry

Obecně by tato výztuž měla být umístěna při obou površích vzpěr ve dvou na sebe kolmých směrech. Požadavek minimální plochy výztuže může být splněn pouze jedním směrem výztuže ve vodorovném či svislém směru, nebo v obou směrech. Pokud je provedena výztuž pouze v jednom směru, má být úhel mezi výztužnými pruty a osou vzpěry  $> 40^\circ$ .

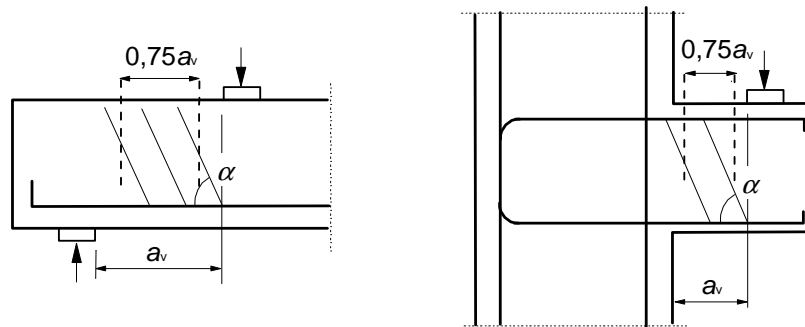
## 2.4. Osamělé břemeno u podpory

Při zatížení osamělým břemenem v blízkosti podpory je nutné navrhnout svislou a vodorovnou výztuž. Vodorovná výztuž se navrhuje na vznikající příčné tahy. Návrh svislé výztuže vychází z geometrie oblasti. Působí-li osamělé břemeno na horním líci ve vzdálenosti  $a_v$  od líce uložení, lze navrhnout svislou smykovou výztuž na redukovanou posouvající sílu  $\beta V_{ED}$ . Redukci působící posouvající síly lze provést pro vzdálenost  $a_v$ , pro niž platí:

$$0,5 \leq a_v \leq 2d, \quad (2.15)$$

kde  $d$  je účinná výška průřezu; součinitel  $\beta$  má hodnotu:

$$\beta = a_v / (2d) \quad (2.16)$$



Obr 2.23 Osamělá břemena v blízkosti uložení

Pro vzdálenosti  $a_v \leq 0,5d$  uvažujeme minimální posouvající sílu v hodnotě  $0,25 V_{ED}$ . V tomto případě se předpokládá, že se zatížení přenáší do podpory přímo tlakovou diagonálou. V tomto případě je vhodné navrhnout vodorovnou výztuž na zachycení příčných tahů - viz vztahy 2.6, 2.7.

Pro posouvající síly v hodnotě  $V_{ED}$  vypočtené bez redukce součinitelem  $\beta$  musí být vždy splněna následující podmínka:

$$V_{ED} \leq 0,5 b_w d v f_{cd}, \quad (2.17)$$

kde  $b_w$  je nejmenší šířka průřezu mezi tlačným a taženým pásem,  $v$  redukční součinitel pevnosti betonu při porušení smykem v hodnotě

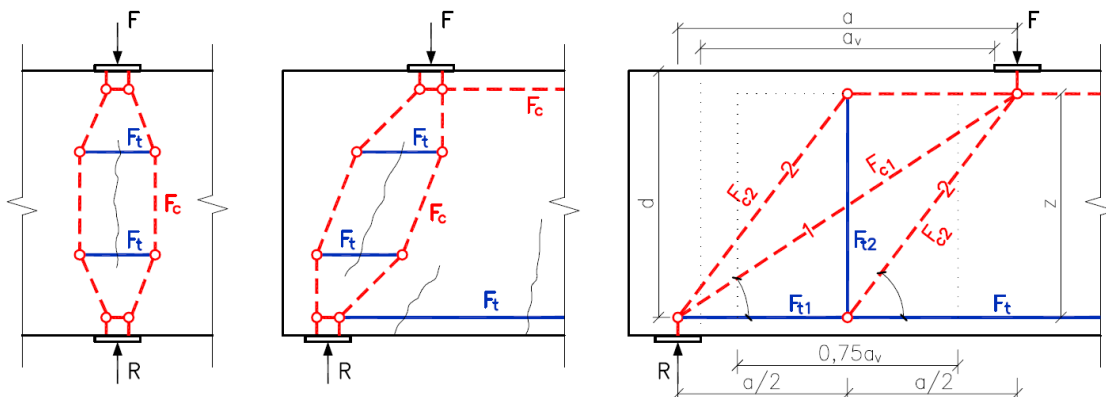
$$v = 0,6 (1 - f_{ck} / 250) \quad (2.18)$$

U prvků vyžadujících návrh smykové výztuže musí být navíc splněna podmínka pro redukovanou posouvající sílu

$$V_{ED} \leq A_{sw} f_{ywd} \sin \alpha, \quad (2.19)$$

kde  $A_{sw} f_{ywd}$  je únosnost smykové výztuže protínající šikmou smykovou trhlinu mezi zatíženými oblastmi a  $\alpha$  je sklon smykové výztuže. Smyková výztuž se však má uvažovat pouze ve střední části délky  $0,75 a_v$ . (viz obr. 2.23) Pouze v této oblasti jsou svislé třmínky účinné proti rozvoji poruchové trhliny. Redukce posouvající síly součinitelem  $\beta$  se má použít pouze pro výpočet smykové výztuže a pouze tehdy, pokud je podélná výztuž dostatečně zakotvená v uložení.

Kromě svislých smykových třmínků je nutné oblast doplnit ortogonální výztuží pro zachycení příčných tahů v betonové vzpěře dle vztahů 2.6 a 2.7. Tato konstrukční výztuž se rovnoměrně rozmístí po celé délce vzpěry (celková plocha výztuže bude tedy navržena na sílu  $2T!$ ). Ortogonální výztuž není většinou kolmá na směr vznikajících trhlin v betonové vzpěře, a proto musí být tahová síla rozložena do vodorovného a svislého směru (resp. do dvou ortogonálních směrů smykové a konstrukční výztuže). Proto je doporučeno plochu výztuže v každém směru zvětšit o 20 %.



Obr 2.24 Osamělé břemeno v blízkosti podpory

Nosníky s osamělým břemenem v blízkosti uložení a na krátkých konzolách mohou být alternativně navrženy podle modelů náhradní příhradoviny viz obr. 2.24.

Podle FIP Recommendations (1998) je přechod mezi D- a B- oblastí ve vzdálenosti rovné výšce průřezu  $h$  od účinku lokálního břemene nebo geometrické nespojitosti. Pokud se dvě D-oblasti, každá délky rovnající se výšce průřezu  $h$ , dotýkají nebo překrývají, hovoříme o kombinované D-oblasti o délce  $2h$ .

Pro smykové oblasti s poměrem  $a/z = \langle 0,5; 2 \rangle$ , kde  $a$  je délka D-oblasti a  $z = j.d$  je rameno vnitřních sil mezi výslednicemi tahových a tlakových sil při ohybu, platí, že část z celkové smykové síly  $V_2$ , je přenášena do podpory přímo prostřednictvím skloněné tlakové diagonály a zbytek smykové síly  $V_1 = V - V_2$  je přenášena smykovou výztuží  $A_{sw}$ .

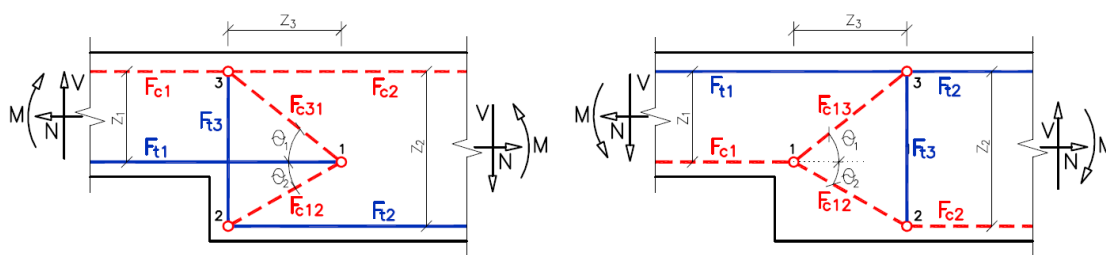
Pro  $a/z = \langle 0,5; 2 \rangle$  je hodnota smykové síly  $V_1$ , která musí být přenesena smykovou výztuží, dána vzorcem:

$$V_1 = V \frac{\left( \frac{2a}{z} - 1 \right)}{3} \quad (2.20)$$

Svislá výztuž pro vynášení svislého zatížení  $V_1$  je účinná pouze v oblasti  $a_w = 0,85a - z/4$ . V krajních případech, kdy je  $a/z = 0,5$  nebo  $2$ , nám vztah 2.14 dává hodnoty  $V_1=0$  a  $V_1=V$ . Pro  $a/z = 0,5$  tedy platí, že veškerá smyková síla  $V$  je přenášena do podpor tlakovou diagonálou, zatímco pro  $a/z = 2$  předpokládáme, že veškerá smyková síla musí být přenesena smykovými třmínky.

## 2.5. Náhlá změna průřezu

Při náhlé změně průřezu vznikají v oblasti změny tahy a tlaky dle obr 2.25.



a) kladný ohybový moment

b) záporný ohybový moment

Obr 2.25 Náhlá změna průřezu

Vzdálenost  $z_3$  lze vyjádřit  $z_3 = 1,5(z_1(z_2 - z_1))^{1/2}$ . Při kladném ohybovém momentu je tahová síla  $F_{t3}$  rovna

$$F_{t3} = F_{t1} \frac{z_1(z_2 - z_1)}{z_2 \cdot z_3} \quad (2.21)$$

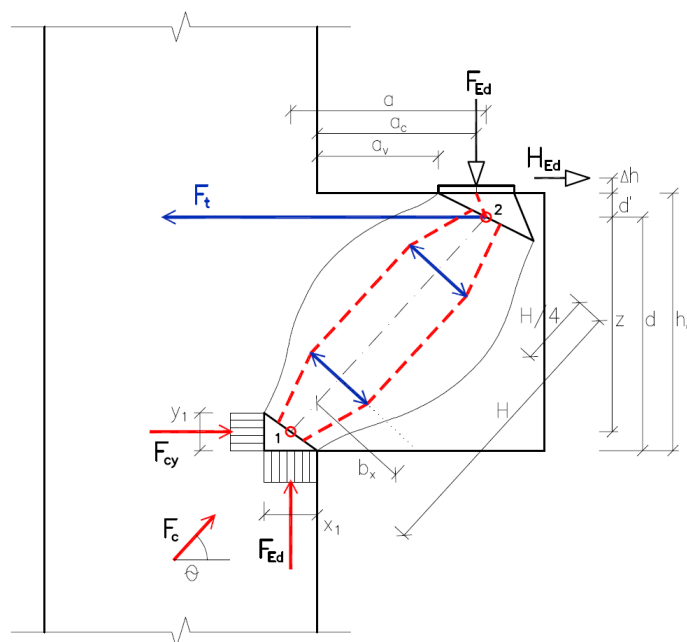
Při záporném ohybovém momentu je tahová síla  $F_{t3}$  rovna

$$F_{t3} = -F_{c1} \frac{z_1(z_2 - z_1)}{z_2 \cdot z_3} \quad (2.22)$$



## 2.6. Konzoly

Při přenosu zatížení z konzoly do sloupu záleží na poměru délky  $a_v$  mezi vnitřním lícem styčné desky a lícem sloupu a účinné výšky průřezu  $d$ . Pokud platí  $a_v \leq 0,5d$ , hovoříme o krátké konzole a zatížení se přenáší přímo šikmou tlakovou diagonálou do sloupu. Pokud platí  $0,5d \leq a_v \leq 2d$ , jedná se o dlouhou konzolu a zatížení se přenáší nejen diagonálou, ale i vloženou příhradovinou. Pro delší konzoly řešíme oblast uložení na sloup jako rámový roh. Základní model pro návrh přímo zatížené a přímo uložené konzoly podle ČSN EN 1992-1-1 je uveden na obrázku. Zatížení z konzoly se přenáší hlavní tlacenou betonovou diagonálou do styčnicku 1 při okraji sloupu a tahovou vodorovnou výztuží v horní části konzoly přímo do sloupu. Při návrhu konzol je nutné uvažovat i vodorovnou sílu. Minimální doporučená hodnota vodorovné síly je  $H_{Ed} = 0,2F_{Ed}$ . Vliv vodorovné síly  $H_{Ed}$  se projevuje především zvětšením množství hlavní tahové výztuže. Dále se doporučuje počítat s excentricitou  $e$  a zatížení  $F_{Ed}$ , která může vzniknout jako důsledek výrobních tolerancí a montážních nepřesností.



Obr 2.26 Příhradový model pro návrh krátké konzoly

### 2.6.1. Postup návrhu konzoly

Nejjednodušší model je pro krátké přímo zatížené konzoly (zatížení je vnášeno na horní hraně konzoly). Model náhradní příhradoviny je na obrázku 2.26. Návrh vnitřních sil vychází z podmínky rovnováhy ve styčnicku 1 ve svislém směru. Odtud stanovíme šířku tlacené oblasti  $x_1$  od okraje sloupu. Z momentové rovnováhy ve styčnicku 1 stanovíme výšku tlacené oblasti  $y_1$ . V dalším kroku stanovíme rameno vnitřních sil  $z$  a rameno vnějších sil  $a$ . Z jejich poměru vypočteme sklon tlacené diagonály  $\Theta$ . Hlavní tahovou sílu stanovíme z podmínky rovnováhy ve vodorovném směru ve styčnicku 2, z rovnováhy ve svislém směru stanovíme tlakovou sílu v betonové diagonále.

Pro velmi krátké konzoly s úhlem  $\Theta \geq 68^\circ$  uvažujeme ve výpočtu vnitřních sil s úhlem  $\Theta = 68^\circ$ . Hranice pro velmi krátkou konzolu odpovídá kritériu v normě pro maximální redukci posouvající síly  $\beta = 0,25$ . Svislá výztuž na velmi krátkých konzolách je velmi málo využita. Vodorovná výztuž je nutná především pro zachycení příčných tahů vznikajících v betonové vzpěře.

Návrh dlouhé konzoly zůstává v principu stejný jako návrh krátké konzoly. Navíc oproti návrhu krátké konzoly je nutné navrhnout svislé třmínky v oblasti mezi lícem sloupu a vnitřním lícem styčné – ložiskové desky. Rozhodující pro posouzení svislé výztuže je opět poměr ramene vnějších sil a vnitřních sil  $z$ . Pro dlouhé konzoly se předpokládá částečné vynášení svislého zatížení nepřímo – vloženou příhradovinou a část přímo skloněnou tlakovou diagonálou. Velikost rozdělení zatížení mezi diagonálu a vloženou příhradu závisí na tuhostním poměru obou částečných staticky určitých soustav. Hodnotu svislé síly, která je přenášena diagonálou a zbylá část vloženou příhradovinou, můžeme stanovit podle vzorce 2.20. Při návrhu můžeme také postupovat podle EC2 jako u krátké konzoly a tahovou sílu stanovíme pomocí redukčního součinitele  $\beta$ .

### Postup výpočtu:

- Šířka tlačené oblasti ve sloupu  $x_1 = \frac{F_{Ed}}{\sigma_{Rd,max} \cdot b}$
- Rameno vnější síly  $a = a_c + 0,5x_1 + \frac{H_{Ed}}{F_{Ed}}(d' + \Delta h)$
- Výška tlačené oblasti  $y_1 = d - \sqrt{d^2 - 2x_1(a + H_{Ed}/F_{Ed} \cdot (d' + \Delta h))}$
- Rameno vnitřních sil  $z = d - 0,5y_1$
- Tahová síla při horním líci konzoly  $F_t = F_{Ed} \frac{a}{z} + H_{Ed}$
- Síla v betonové diagonální vzpěře  $F_c = F_{Ed} / \sin \Theta$   
U dlouhé konzoly se síla rozdělí do dvou diagonál.
- Napětí v betonu pod styčnou deskou – zjednodušeně  $\sigma_c = \frac{\sqrt{F_{Ed}^2 + H_{Ed}^2}}{A_{desky}}$
- Kontrola zakotvení tahové výztuže při horním líci konzoly. Horní tahovou výztuž obvykle navrhujeme ve tvaru smyček. Jejich délku zakotvení uvažujeme od vnitřního líce styčné – ložiskové desky. Pro výpočet zakotvení je rozhodující vnitřní poloměr zakřivení smyčky. V podporujícím prvku má být výztuž zakotvena u vzdálenějšího líce, kotevní délka se měří od svislé výztuže umístěné u bližšího líce.
- Stanovení svislé výztuže konzoly  $A_{sv} = \beta \cdot F_{Ed} / f_{yd}$   
kde  $\beta = a_v / (2d)$ , nejméně však je  $\beta = 0,25$ . Svislá výztuž se umístí do oblasti  $0,75a_v$ .
- Doplnění konstrukční ortogonální výztuže pro zachycení vznikajících příčných tahů v tlačené betonové diagonále. Celkovou příčnou tahovou sílu je nutné rozložit do směrů navrhnuté ortogonální výztuže. Svislé a vodorovné třmínky nejsou kolmé na směr rozvíjejících se podélných trhlin v tlačené diagonále, proto je vhodné množství výztuže v každém směru zvětšit o 20%.

### 2.6.2. Principy vyztužení konzoly

U krátkých konzol je nutné konstrukční vyztužení především vodorovnou výztuží pro zachycení příčných tahů v nakloněné vzpěře, u dlouhých konzol je nutné především vyztužení svislými třmínky. Pro vyztužení konzol platí následující zásady:

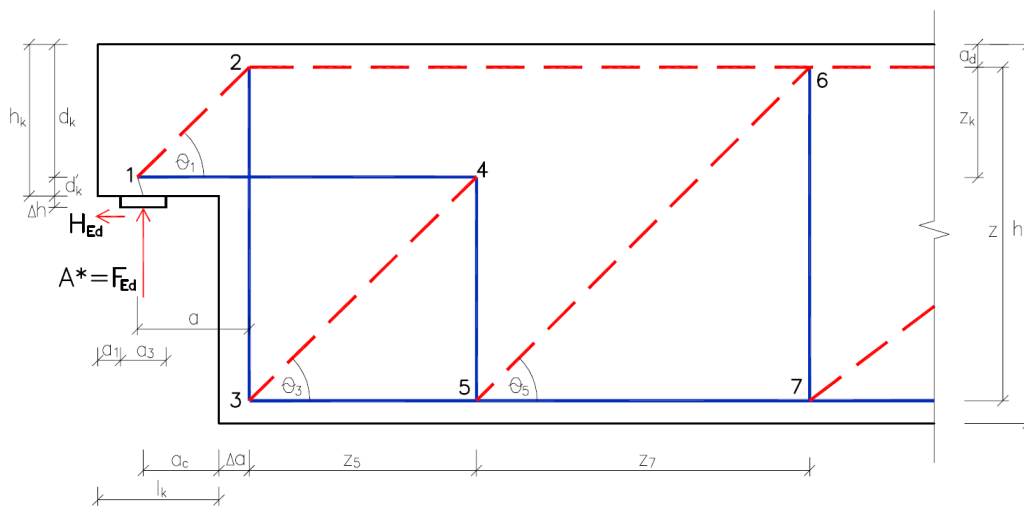
- maximálně dvě vrstvy horní tahové výztuže
- větší průměr zakřivení smyček hlavní tahové výztuže
- krátké konzoly - minimálně dva podélné vodorovné třmínky průměru 8mm, plocha přídatných uzavřených vodorovných nebo šikmých třmínků u krátkých konzol by měla

být větší než 25% až 50% hlavní tahové výztuže. Přitom vodorovné třmínky jsou umístěny obvykle jako třmínky sloupu první od vnějšího líce prvku.

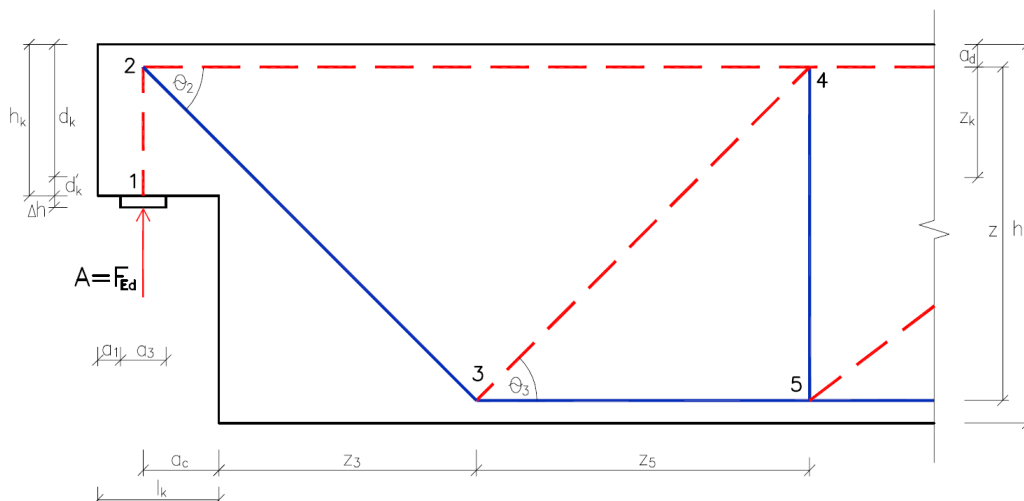
- dlouhé konzoly - minimálně tři uzavřené svislé třmínky průměru 8mm, u dlouhých konzol by měly svislé třmínky přenést minimálně sílu  $0,5F_{Ed}$  až  $0,7F_{Ed}$ , Svislé třmínky jsou obvykle umístěny jako druhé od líce sloupu v úrovni s podélnou výztuží sloupu.
- pokud jsou zvláštní požadavky na omezení trhlin, jsou účinné šikmé třmínky u horního vnitřního rohu konzoly.
- zhustit třmínky sloupu pod a nad konzolou, podélnou výztuž sloupu nestykovat v oblasti konzoly na sloup
- styčná – roznášecí plocha desky nesmí přesahovat obrys výztuže konzoly při uvažování roznášení zatížení pod úhlem  $45^\circ$ .

## 2.7. Ozuby na průvlacích

### 2.7.1. Modely náhradní příhradoviny



Obr 2.27 Ozub – uložení průvlaku - Příhradový model 1



Obr 2.28 Ozub – uložení průvlaku - Příhradový model 2

Při návrhu ozubů uložení průvlaků je optimální vytvořit příhradový model kombinací obou uvedených modelů 1 a 2. Model 1 má velkou koncentraci tahové výztuže na vnitřním líci u ozubu a výztuž není optimálně skloněna k redukci šířky poruchové trhliny. Model 2 má

šikmou tahovou výztuž optimálně umístěnou na redukci rozvíjející se poruchové trhliny, nepřenáší však žádné vodorovné účinky. Model 2 nelze použít samostatně k přenesení celého zatížení, jeho maximální podíl na přenášení celkového zatížení je 70%. Zbytek zatížení musí přenést náhradní příhradovina modelu 1 včetně celého vodorovného zatížení.

Při návrhu ozubu obdobně jako u návrhu konzol je nutné uvažovat i vodorovnou sílu. Minimální doporučená hodnota je  $H_{Ed} = 0,2F_{Ed}$ . Pro návrh ozubu podle kombinace modelu 1 a 2 musíme nejprve rozdělit zatížení. V počátku je optimální přiřadit každému modelu 50% zatížení ( $A^* = 0,5A$ ). V rámci optimalizace výztuže lze rozdělení upravit a ozub přepočítat. Pro rozlišení horní index <sup>(1)</sup> znamená síly prvního modelu a <sup>(2)</sup> druhého modelu, pokud se uvažují síly z obou modelů současně.

Nejprve přepokontrolujeme napětí v betonu pod styčnou deskou. Návrhová mez únosnosti betonu v tlaku odpovídá styčníku CCT.

### Postup výpočtu pro model 1:

- Stanovíme množství tahové výztuže u líce ozubu. Za předpokladu  $T_{23} = A^*$  dostaneme  $A_s = 1,2 \cdot T_{23} / f_{yd}$  a stanovíme třmínkové vyztužení. V jeho těžišti ( $\Delta a$  od líce) bude bod 2.
- Stanovíme rameno a reakce  $A^*$ .  $a = a_c + \Delta a + (H_{Ed}/A^*) \cdot d_k'$
- Odhadneme rameno vnitřních sil ozubu  $z_k = h_k - d_k' - a_d$
- Stanovíme sklon tlačené diagonály  $C_{12}$   $\theta_1 = \arctan(z_k/a)$
- Stanovíme sílu v tlačené diagonále  $C_{12} = A^*/\sin \theta_1$
- Tlaková síla při horním líci ozubu  $C^{(1)+(2)} = C_{12}^{(1)} \cdot \cos \theta_1 + (A - A^*) / \tan \theta_2^{(2)}$
- Výška tlačeného pásu při horním líci  $y_2 = C^{(1)+(2)} / \sigma_{Rd,max}$ , kde  $\sigma_{Rd,max}$  je návrhová pevnost v tlaku ve styčníku CCT
- Upřesníme těžiště horního tlačeného pásu  $a_d = 0,5 \cdot y_2$
- Tím je dána geometrie prvního modelu, přepokontrolujeme rameno vnitřních sil  $z_k$  a sílu v první vzpěře  $C_{12}$ .
- Stanovíme sílu v táhle  $T_{14}$   $T_{14} = (A^* \cdot a + H_{Ed} \cdot z_k) / z_k$
- Přepokontrolujeme zakotvení výztuže táhla  $T_{14}$  ve formě smyček ve styčníku 1 a přepokontrolujeme zakotvení táhla – rovných prutů za styčníkem 4.
- Přepokontrolujeme zakotvení táhla  $T_{23}$  ve formě třmínků ve styčníku 2.
- Přepokontrolujeme zakotvení hlavní tahové výztuže průvlaku ve styčníku 3.
- Stanovíme výztuž v táhle  $T_{45}$  a  $T_{67}$   $T_{45} = T_{23} = T_{67}$  a  $A_s = T_{23} / f_{yd}$
- Stanovíme příčný tah vznikající v první vzpěře  $C_{12}^{(1)}$ . Na tah navrhujeme ortogonální výztuž. Svislou výztuž ozubu doplníme výztuží na redukovanou posouvající sílu  $\beta \cdot A^*$  obdobně jako u konzoly. Součinitel  $\beta = (a_c + \Delta a - 0,5a_3) / 2d_k$ . Vodorovnou výztuž doplníme výztuží zachycující příčný tah z první vzpěry  $C_{12}^{(2)}$ .

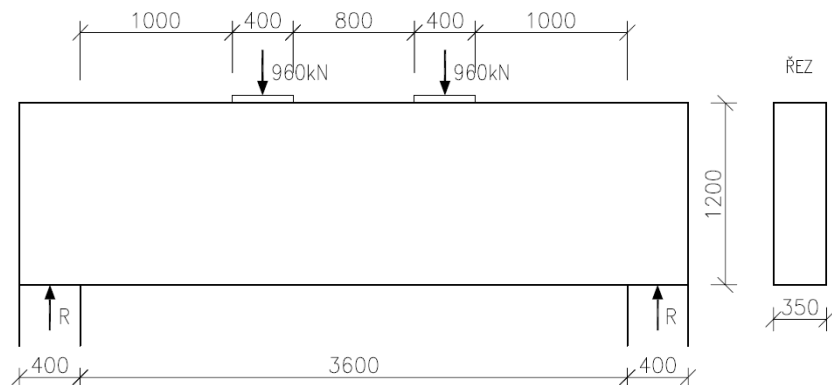
### **Výpočetní postup pro model 2**

- Stanovíme sklon šikmé výztuže  $\theta_2$ . Optimální sklon je kolmý na poruchovou trhlinu, sklon je dán geometrií navržené výztuže. Na začátku vyjdeme ze sklonu  $45^\circ$ , po navržení výztuže sklon upřesníme a posouzení opakujeme se skutečným sklonem táhla  $T_{23}$ . Síla v táhle  $T_{23}$  je  $T_{23} = (A-A^*) / \sin \theta_2$ .
- Překontrolujeme zakotvení táhla ve styčnicku 2. Šikmou výztuž navrhujeme obvykle ve tvaru smyček nebo rovné výztuže s kotevní deskou.

### 3. ŘEŠENÉ PŘÍKLADY

#### 3.1. Nosník zatížený osamělými břemeny

Navrhněte prostě podepřený nosník o rozměrech dle obrázku, který je zatížen dvěma osamělými břemeny o návrhové hodnotě  $G_d+Q_d = 960\text{kN}$ . Nosník je z betonu C30/37 a ocel třídy B500B. Krytí výztuže uvažujte hodnotou 30mm. Vlastní tíhu nosníku můžeme zanedbat. Šířka nosníku je 350mm. Osamělá břemena jsou uložena na roznášecích plechách o rozměrech 350x400 mm.



Materiály:

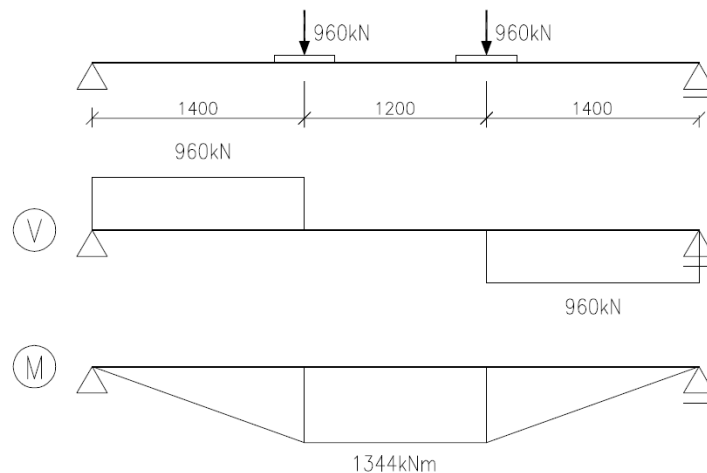
Beton C30/37

$$f_{cd} = 1.30/1.5 = 20 \text{ MPa}$$

Výztuž B500B

$$f_{yd} = 500/1.15 = 434.8 \text{ MPa}$$

#### Sestavení příhradového modelu



Pro sestavení příhradového modelu je nejdříve zapotřebí odhadnout rozměry horního tlačeného pásu a dolního táhla. Znalost těchto parametrů nám umožní určit geometrii příhradového modelu. Předpokládejme, že spodní výztuž bude umístěna ve dvou vrstvách.

Efektivní výška průřezu pak bude

$$d = h - c - \varnothing_{tr} - \varnothing_s - \frac{1}{2} \text{ vzdál výztuže}$$

$$d = 1200 - 30 - 12 - 25 - \frac{1}{2} \cdot 80 = 1093 \text{ mm}$$

Potřebnou plochu výztuže spodního táhla navrhne odhadem ramene vnitřních sil.

$$z = 0,9 \cdot d = 0,9 \cdot 1093 = 984 \text{ mm}$$

$$A_{s, \text{req}} = M_{\text{sd}} / (z \cdot f_{\text{yd}})$$

$$A_{s, \text{req}} = 1344 \cdot 10^6 / (434,8 \cdot 984) = 3141 \text{ mm}^2$$

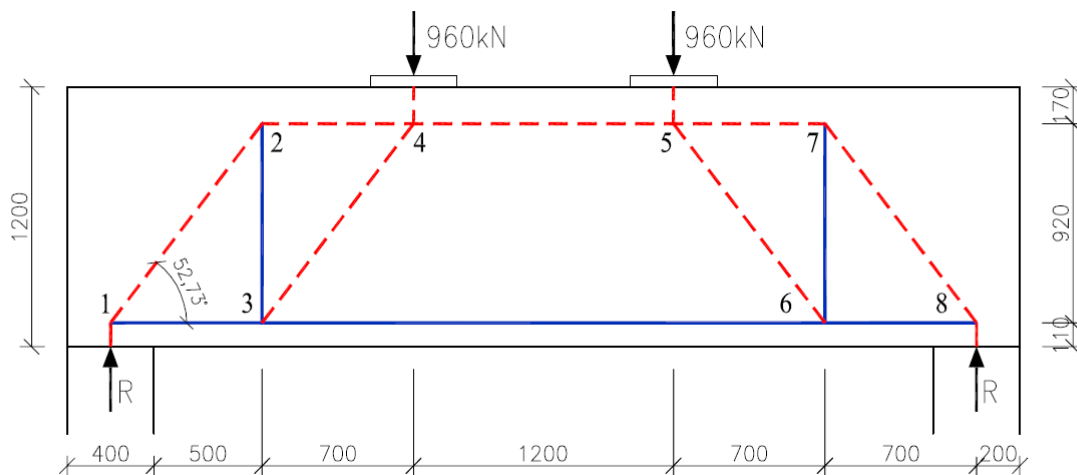
$$\text{Navrženo } 8 \text{ } \varnothing 25 \quad A_{s, \text{prov}} = 3928 \text{ mm}^2$$

Výška spodního táhla  $t = 30 + 12 + 25 + 80 + 25 + 42 = 214 \text{ mm}$  (zaokr. na 220 mm)

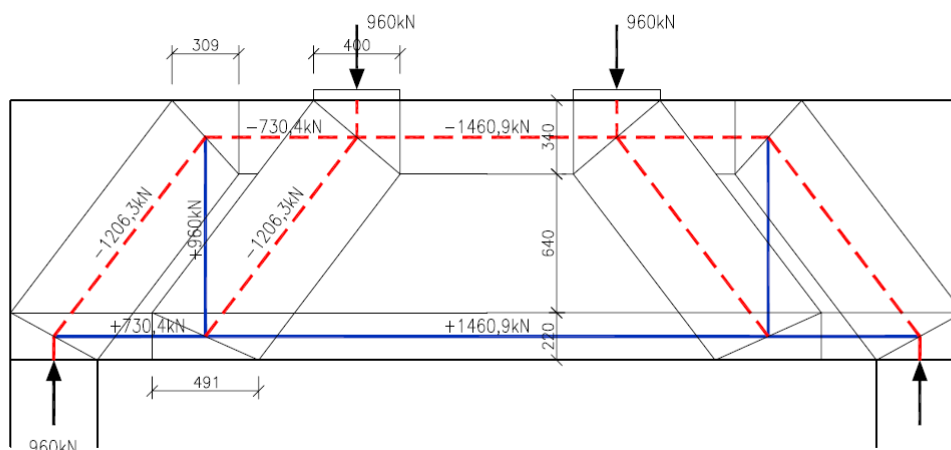
$$x = A_{s, \text{prov}} \cdot f_{\text{yd}} / (0,8 \cdot b \cdot f_{\text{cd}}) = 3928 \cdot 434,8 / (0,8 \cdot 350 \cdot 20) = 305 \text{ mm}$$

Vzdálenost horních nejvíce namáhaných tlačných vláken a neutrální osy je 305 mm. Výšku horního tlačného pásu pro výpočet pomocí příhradové analogie zvolíme výšky 340 mm. (Pozn. Pokud nám geometrie výpočtového modelu umožňuje je vhodné volit výšku tlačných prutů trochu větší. Vychází tak lépe ověření napětí v uzlech.)

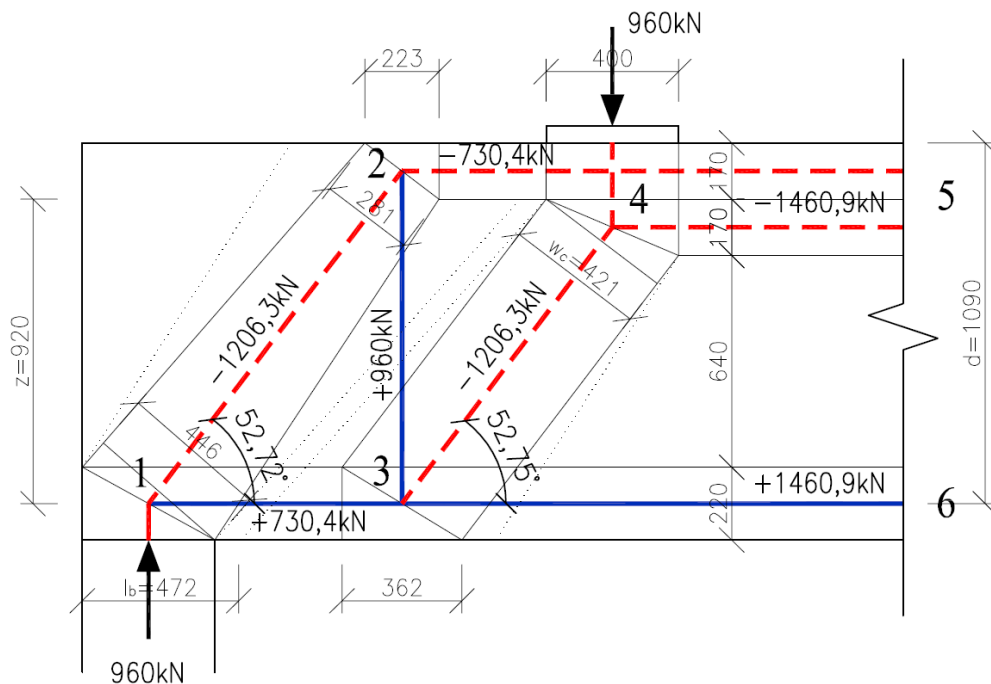
Nyní známe rozměry horního a spodního pásu, můžeme tak určit geometrii příhradového modelu.



V souladu se zvolenou geometrií příhradového modelu získáme tyto vnitřní síly a šířky vzpěr a táhel.



## Zpřesnění modelu



### Ověření napětí v uzlech

#### Uzel 4 - C-C-C-C uzel

- styčník s tlakovými silami

$$\sigma_{Rd,max} = k_1 \nu \cdot f_{cd} \quad \nu = 1 - f_{ck} / 250 \quad k_1 = 1,0$$

$$\sigma_{Rd,max} = 1,0 \cdot (1 - 30/250) \cdot 20 = 17,60 \text{ MPa}$$

šířka horního tlačného pásu  $w_{c45} = 340 \text{ mm}$

šířka tlačné diagonály  $w_{c43} = w_c \cos \alpha + l_r \sin \alpha = 170 \cdot \cos 52,73 + 400 \cdot \sin 52,73 = 421 \text{ mm}$

$$\sigma_{Sd\ 43} = 1206,3 \cdot 10^3 / (350 \cdot 421) = 8,19 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Sd\ 43} < \sigma_{Rd,max}$$

$$\sigma_{Sd\ 45} = 1460,9 \cdot 10^3 / (350 \cdot 340) = 12,28 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Sd\ 45} < \sigma_{Rd,max}$$

$$\sigma_{Sd\ 42} = 730,4 \cdot 10^3 / (350 \cdot 170) = 12,28 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Sd\ 42} < \sigma_{Rd,max}$$

$$\sigma_{Sd\ 4R} = 960 \cdot 10^3 / (350 \cdot 400) = 6,86 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Sd\ 4R} < \sigma_{Rd,max}$$

#### Uzel 2 - C-C-T uzel

- styčník s tlakovými silami a táhlem kotveným v jednom směru

$$\sigma_{Rd,max} = k_2 \nu \cdot f_{cd} \quad \nu = 1 - f_{ck} / 250 \quad k_2 = 0,85$$

$$\sigma_{Rd,max} = 0,85 \cdot (1 - 30/250) \cdot 20 = 14,96 \text{ MPa}$$

šířka horního tlačného pásu  $w = 170 \text{ mm}$

geometrii styčníku získáme z vědomí, že délky stran hydrostatického styčníku jsou ve stejném poměru jako styčnickové síly

$$730,4 / 170 = 960 / a$$

$$a = 960 \cdot 170 / 730,4 = 223 \text{ mm}$$

$$b = 1206,3 \cdot 170 / 730,4 = 281 \text{ mm}$$

$$\sigma_{Sd\ 21} = \sigma_{Sd\ 23} = \sigma_{Sd\ 24} = 1206,3 \cdot 10^3 / (350 \cdot 281) = 960 \cdot 10^3 / (350 \cdot 223) = 730,4 \cdot 10^3 / (350 \cdot 170) = 12,28 \text{ MPa}$$



Ve skutečnosti je však vzpěra 1-2 vějířovitá vzpěra, která se rozšiřuje od podpory směrem k hornímu líci nosníku.

### Uzel 3 - C-T-T-T uzel

- styčnick s tlakovou silou a táhly kotvenými ve více směrech

$$\sigma_{Rd,max} = k_3 \nu \cdot f_{cd} \quad \nu = 1 - f_{ck} / 250 \quad k_3 = 0,75$$

$$\sigma_{Rd,max} = 0,75 \cdot (1 - 30/250) \cdot 20 = 13,20 \text{ MPa}$$

Dosažení hydrostatického napětí v případě styčnicku s táhly ve více směrech není nutné dodržet, neboť ocel má úplně jiné pevnostní parametry než beton. V tomto případě ověříme napětí v uzlu na konci betonové diagonály.

šířka táhla  $w_t = 220 \text{ mm}$

šířka tlačené diagonály  $w_c = 421 \text{ mm}$  (viz uzel 4)

$$\sigma_{Sd\ 34} = 1206,3 \cdot 10^3 / (350 \cdot 421) = 8,19 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Sd\ 34} < \sigma_{Rd,max}$$

Ve skutečnosti je vzpěra 3-4 vějířovitá vzpěra, která se rozšiřuje od místa lokálního zatížení na horní hraně nosníku směrem ke spodnímu líci nosníku. Šířka vzpěry v dolní části nosníku závisí na rozmístění smykové výztuže.

### Uzel 1 - C-C-T uzel

- jedná se o styčnick s tlakovými silami a táhly kotvenými v jednom směru - návrhové napětí

$\sigma_{Rd,max}$  na hranách uzlu tedy bude rovno hodnotě

$$\sigma_{Rd,max} = k_2 \nu \cdot f_{cd} \quad \nu = 1 - f_{ck} / 250 \quad k_2 = 0,85$$

$$\sigma_{Rd,max} = 0,85 \cdot (1 - 30/250) \cdot 20 = 14,96 \text{ MPa}$$

$w_c = 446 \text{ mm}$

$$\sigma_{Sd\ 12} = 1206,3 \cdot 10^3 / (350 \cdot 446) = 7,73 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Sd\ 12} < \sigma_{Rd,max}$$

$$\sigma_{Sd\ 1R} = 960 \cdot 10^3 / (350 \cdot 400) = 6,86 \text{ MPa}$$

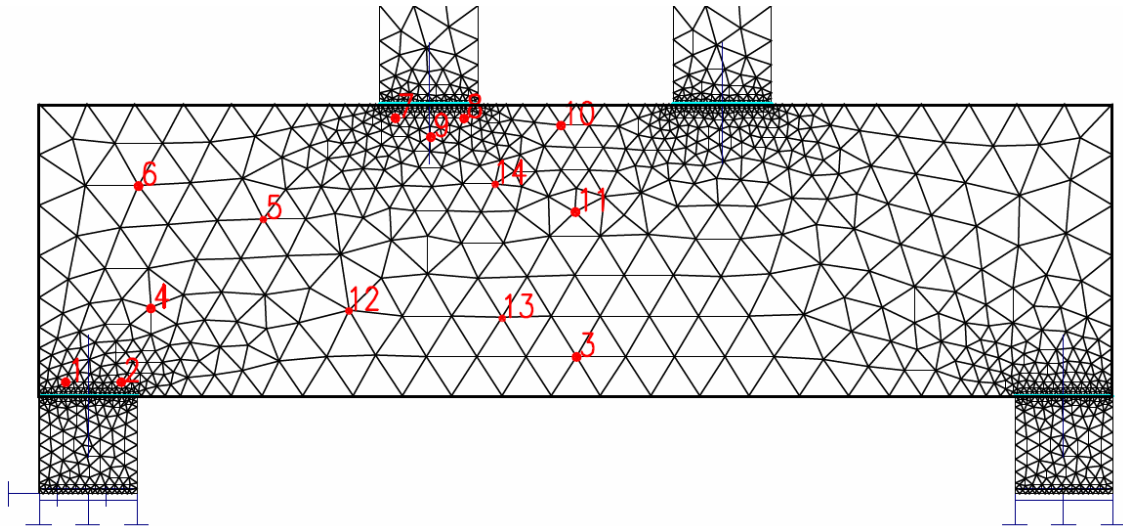
$$\sigma_{Sd\ 1R} < \sigma_{Rd,max}$$

$$\sigma_{Sd\ 13} = 730,4 \cdot 10^3 / (350 \cdot 220) = 9,49 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Sd\ 13} < \sigma_{Rd,max}$$

Ve styčnicku opět není dosaženo hydrostatické napětí. Geometrie styčnicku je dána skutečnou šířkou táhla tvořeného dvěma vrstvami výztužných prutů. Hydrostatické napětí by mohlo být jednoduše dosaženo rozšířením táhla.

V uzlech nám nevycházela hydrostatická napětí. Pro porovnání si spočítejme velikosti a směr hlavních napětí v několika bodech konstrukce pomocí softwaru metodou konečných prvků. Velikost a směr hlavních napětí si vyčíslíme v bodech 1 až 14 – viz následující obrázky a tabulka hlavních napětí.

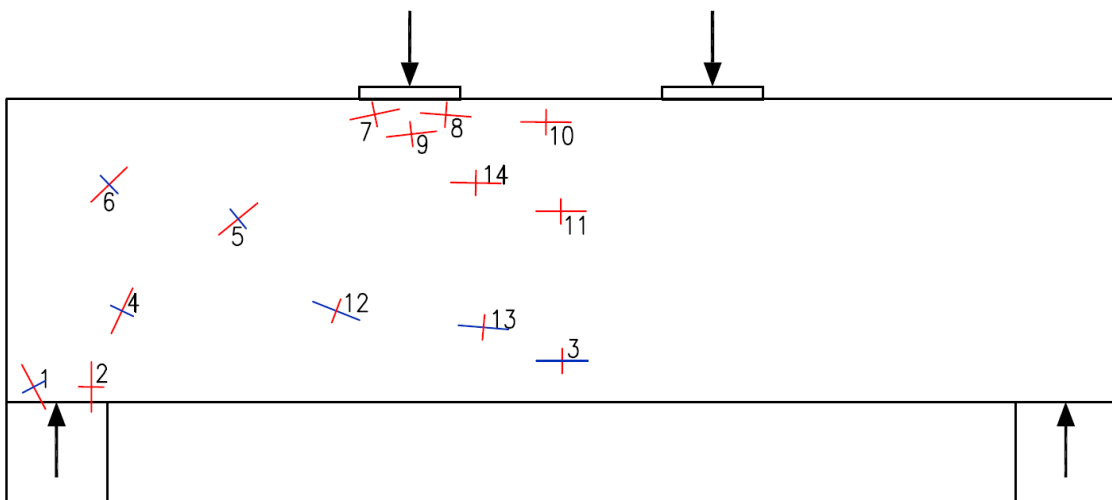


### HLAVNÍ NAPĚTÍ

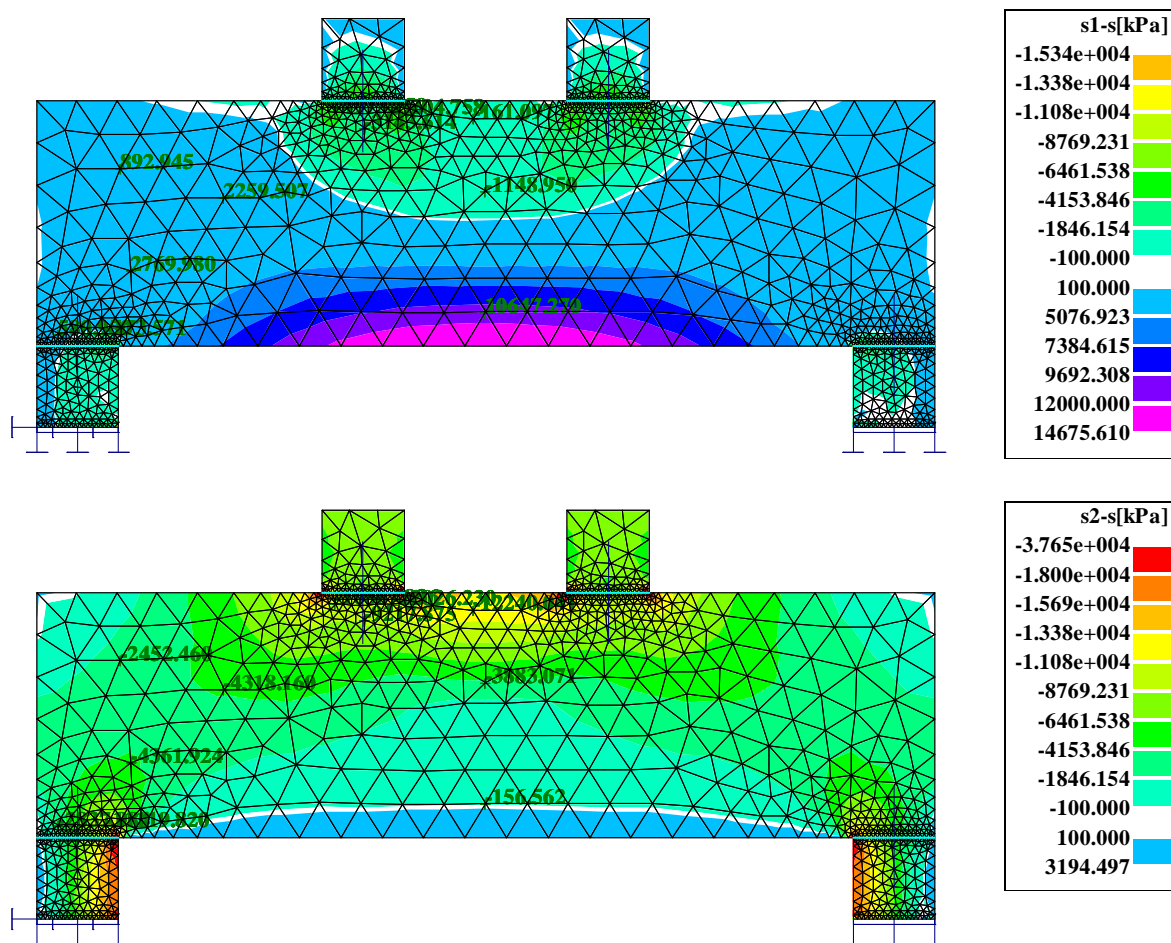
$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\operatorname{tg} 2\alpha_1 = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}$$

Bod	$\sigma_x$ [kPa]	$\sigma_y$ [kPa]	$\tau_{xy}$ [kPa]	$\sigma_1$ [kPa]	$\sigma_2$ [kPa]	$\alpha_1$	$\alpha_2$
1	-172	-2085	1417	581	-2838	28,0	118,0
2	-174	-11120	-34	-174	-11120	-0,2	89,8
3	10647	-157	-7	10647	-157	0,0	90,0
4	1496	-3088	-2731	2769	-4361	-25,0	65,0
5	-1658	-400	-3228	2260	-4318	129,5	39,5
6	-841	-719	-1672	893	-2453	134,0	44,0
7	-10614	-5227	-1196	-4973	-10868	102,0	12,0
8	-11984	-5247	533	-5205	-12026	85,5	-4,5
9	-9143	-3218	-670	-3143	-9218	96,4	6,4
10	-12239	-162	94	-161	-12240	89,6	-0,4
11	-3883	-1149	-2	-1149	-3883	90,0	0,0
12	4397	-417	-2255	5288	-1308	-21,6	68,4
13	6439	-461	-622	6495	-517	-5,1	84,9
14	-5734	-2122	64	-2121	-5735	-1,0	89,0



Směry hlavních napětí (červeně tlak, modře tah)



Velikosti hlavních napětí získaných pružným výpočtem

Nyní se vraťme k porovnání napětí ve styčníku 4 vypočteného příhradovou analogií a pružným výpočtem pomocí softwaru metodou konečných prvků.

Podle výpočtu pomocí příhradové analogie jsme obdrželi napětí na hranách uzlu ve vodorovném směru 12,28 MPa a ve svislém směru vychází napětí 8,19 a 6,86MPa.

Pružným výpočtem pomocí MKP vychází hodnoty v uzlech 7 a 8 10,9 a 12,0MPa, což se blíží hodnotě 12,28MPa. Ve svislém směru vychází napětí podle příhradové analogie 8,19 a 6,86MPa. Když porovnáme tato napětí s hodnotami izolinií získaných výpočtem softwarem metodou konečných prvků, zjistíme, že poměr hlavních napětí  $\sigma_2/\sigma_1$  je ve velmi podobném poměru (zhruba 1,7) jako poměr napětí ve vodorovném směru a napětí ve svislém směru v uzlu 4 vypočteného příhradovou analogií. Je podstatné, že v obou případech dosahuje větších hodnot napětí ve vodorovném směru. Z obrázku výše jsou vidět také směry hlavních napětí, které jsou v souladu s geometrií příhradového modelu.

Mnohdy není dosaženo hydrostatického napětí v uzlech. Hlavní napětí v uzlových oblastech má často rozdílné hodnoty v na sebe kolmých směrech. To je způsobeno tvarem výpočetního modelu a geometrií konstrukce – šířkou vzpěr, šířkou podpor a ploch vnášení vnějšího zatížení a rozmístěním výztuže – šířkou táhel.

Velikost hlavních napětí je určena především způsobem namáhání v daném místě konstrukce - zda jde o převládající smykové nebo ohybové namáhání.

### Ověření napětí ve vzpěrách

Vzpěra 1-2  $F_c = -1206,3 \text{ kN}$

- vzpěra přenáší tlakové napětí přes trhliny s normální šířkou

$$\sigma_{Rd,max} = v \cdot v_2 \cdot f_{cd} \quad v = 1 - f_{ck} / 250 \quad v_2 = 0,6$$

$$\sigma_{Rd,max} = 0,6 \cdot (1 - 30/250) \cdot 20 = 10,56 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Sd 12} = 1206,3 \cdot 10^3 / (350 \cdot 446) = 7,63 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Sd 12} < \sigma_{Rd,max}$$

$\sigma_{Sd 21} < \sigma_{Rd,max}$  - ve skutečnosti je vzpěra 1-2 vějířovitá vzpěra, která se rozšiřuje od podpory směrem k hornímu líci nosníku - (v příhradovém modelu znázorněno tečkovanými čarami)

Vzpěra 3-4  $F_c = -1206,3 \text{ kN}$

- vzpěra přenáší tlakové napětí přes trhliny s normální šířkou  $v_2 = 0,6$

$$\sigma_{Rd,max} = 0,6 \cdot (1 - 30/250) \cdot 20 = 10,56 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Sd 43} = 1206,3 \cdot 10^3 / (350 \cdot 524) = 6,58 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Sd 43} < \sigma_{Rd,max}$$

$\sigma_{Sd 34} < \sigma_{Rd,max}$  - vzpěra 3-4 je vějířovitá vzpěra, která se rozšiřuje od lokálního břemene na horní hraně nosníku směrem ke spodnímu líci nosníku.

Vzpěra 2-4  $F_c = -730,4 \text{ kN}$

- tlačení pás průřezu namáhaného ohybem, vzpěry neporušené trhlinami a s rovnoměrným poměrným přetvořením

$$\sigma_{Rd,max} = v_2 \cdot f_{cd} \quad v_2 = 1,0$$

$$\sigma_{Rd,max} = 1,0 \cdot 20 = 20,0 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Sd 24} = 730,4 \cdot 10^3 / (350 \cdot 140) = 12,28 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Sd 24} < \sigma_{Rd,max}$$

Vzpěra 4-5  $F_c = -1460,9 \text{ kN}$

$$\sigma_{Rd,max} = 1,0 \cdot 20 = 20,0 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Sd 45} = 1460,9 \cdot 10^3 / (350 \cdot 340) = 12,28 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Sd 45} < \sigma_{Rd,max}$$

**Pozn.: V tlačných prutech nemusí být ověřována návrhová napětí, pokud napětí v uzlových bodech vyhovují návrhovým napětím a pokud je vzpěra patřičně vyztužena ortogonální vyztuží proti příčným tahům.**

### Návrh vyztuže

Poté co máme ověřeny únosnost vzpěr a uzlů, můžeme přistoupit k návrhu vyztuže.

#### Táhlo 1-3

$$F_{t 13} = 730,4 \text{ kN}$$

$$A_{s,req} = 730,4 \cdot 10^3 / 434,8 = 1486 \text{ mm}^2 < A_{s,prov} = 3928 \text{ mm}^2 (8 \text{ } \varnothing 25)$$

Vyztuž je potřeba v uzlu řádně zakotvit. Zakotvení může být provedeno zajištěním dostatečné kotevní délky, ohybem prutů, popř. mechanickým zakotvením za hranici uzlu.

Mezní napětí v soudržnosti

$$f_{bd} = 2,25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd} = 2,25 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 2,0/1,5 = 3,0 \text{ MPa}$$

Základní kotevní délka

$$\sigma_{sd} = \frac{A_{s,req}}{A_{s,prov}} \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_M} \quad l_{b,rqd} = \frac{\phi}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}$$

$$\sigma_{sd} = 1486 / 3928 \cdot (500 / 1,15) = 164,5 \text{ MPa}$$

$$l_{b,rqd} = 25 / 4 \cdot (164,5 / 3,0) = 343 \text{ mm}$$

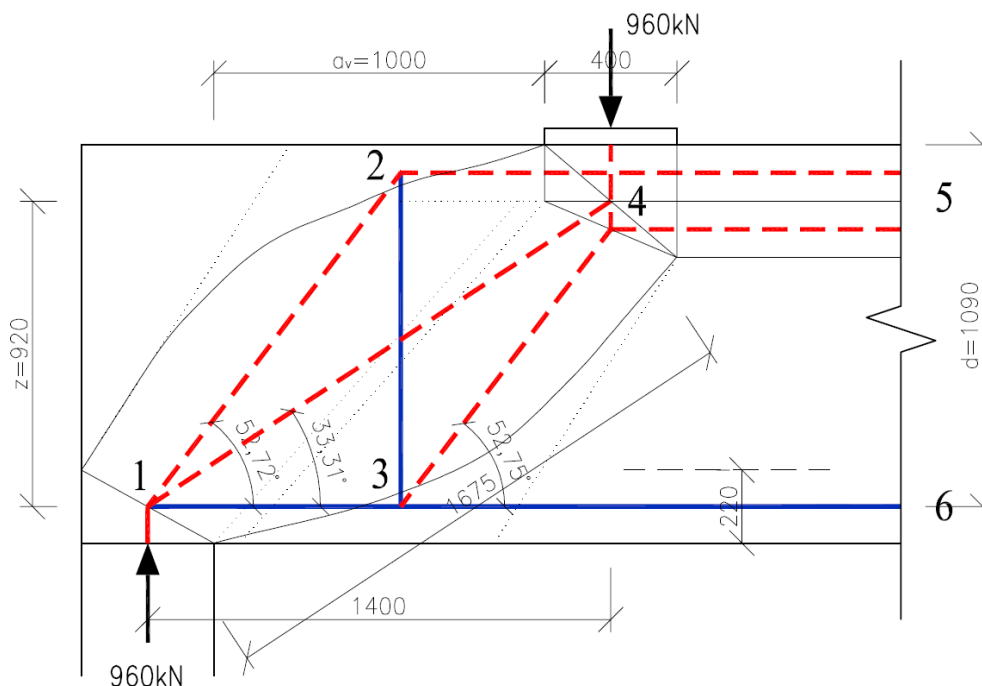
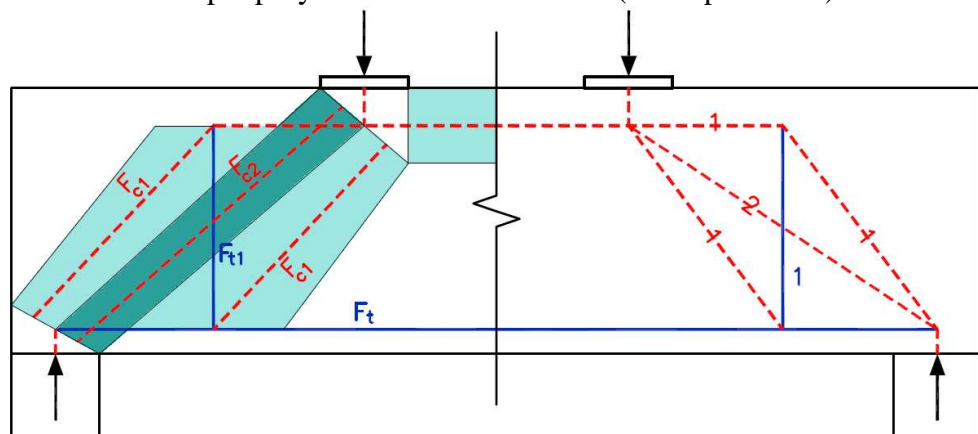
### Táblo 3-6

$$F_{t36} = 1460,9 \text{ kN}$$

$$A_{s,req} = 1460,9 \cdot 10^3 / 434,8 = 3360 \text{ mm}^2 < A_{s,prov} = 3928 \text{ mm}^2 (8 \text{ } \varnothing 25)$$

### Návrh svislé a vodorovné výztuže

Pro návrh svislé a vodorovné výztuže je vhodné superponovat příhradový model s modelem s jednou šikmou vzpěrou směřující od podpory k místu uložení lokálního břemene - tento model nám poslouží pro výpočet příčných tahů. V tomto kombinovaném modelu je část zatížení přenášeno od místa uložení lokálního břemene přímo do podpory prostřednictvím skloněné tlakové diagonály modelu 2. Zbylá část zatížení je přenášena svislými třmínky příhradového modelu 1 (původní model). V tomto případě mohou být zatěžovací účinky obou modelů superponovány. Rozdělení zatížení mezi tyto dva mechanismy závisí na poměru vzdálenosti břemene od podpory a ramene vnitřních sil. (viz kapitola 2.4).



Kombinace příhradových modelů

Nejdříve musí být ověřena podmínka pro neredukovanou posouvající sílu:

$$V_{ED} \leq 0,5b_w d v f_{cd}$$

$$V_{ED} = 960 \text{ kN} \leq 0,5 \cdot 350 \cdot 1090 \cdot 0,6 \cdot (1 - 30/250) \cdot 20 = 2014 \text{ kN} \quad \text{OK}$$

Podle EC2 můžeme navrhnout svislou smykovou výztuž na redukovanou posouvající sílu  $\beta \cdot V_{ED}$ .

$$\beta = a_v / (2d) = 1000 / (2 \cdot 1090) = 0,46$$

$$\beta V_{ED} = 0,46 \cdot 960 = 442 \text{ kN}$$

$$A_{s,req} = 442 \cdot 10^3 / 434,8 = 1016 \text{ mm}^2 - \text{v oblasti } 0,75a_v = 0,75 \cdot 1000 = 750 \text{ mm}$$

$$A_{s,prov} = 1131 \text{ mm}^2 - 5 \text{ dvoustřížných třmínků } \varnothing R12/160 (120) \text{ mm}$$

Konstrukční ortogonální výztuž na vznikající příčné tahy navrhne z alternativního modelu s jednou šikmou vzpěrou v pravé části nosníku - viz. obrázek. Pro výpočet příčných tahů jsme nahradili dvě vějířovité vzpěry jednou šikmou lahvovitou vzpěrou. Délka betonové vzpěry je  $h = 1675 \text{ mm}$ , šířka vzpěry je  $w_c(a) = w_t \cos \alpha + l_r \sin \alpha = 220 \cdot \cos 33,31 + 400 \cdot \sin 33,31 = 404 \text{ mm}$  a síla v betonové vzpěře je  $F = -960 / \sin 33,31 = -1748 \text{ kN}$ .

Příčný tah betonové vzpěry je:

$$2 \cdot F_t = 0,5 \cdot (1 - 0,7 \cdot a/h) \cdot F = 0,5 \cdot (1 - 0,7 \cdot 404/1675) \cdot 1748 = 0,416 \cdot 1748 = 727 \text{ kN}$$

Příčný tah se rozdělí do svislé složky  $727 \cdot \cos 33,31 = 608 \text{ kN}$  a vodorovné složky  $727 \cdot \sin 33,31 = 399 \text{ kN}$ .

Celkovou svislou výztuž navrhne na sílu  $442 + 1,2 \cdot 608 = 1172 \text{ kN}$

$$A_{s,req} = 1172 \cdot 10^3 / 434,8 = 2695 \text{ mm}^2$$

$A_{s,prov} = 2714 \text{ mm}^2$  – celkově navrhne 12 dvoustřížných třmínků  $\varnothing R12/120 \text{ mm}$  v oblasti od konce nosníku po líc sloupu na horní hraně nosníku.

Vodorovná konstrukční výztuž pro zachycení příčných tahů

$$A_{s,req} = 1,2 \cdot 399 \cdot 10^3 / 434,8 = 1102 \text{ mm}^2$$

$$A_{s,prov} = 1357 \text{ mm}^2 - 12 \varnothing R12/150 \text{ mm}$$

$$A_{s,min} = 0,003 \cdot A_c = 0,003 \cdot 980 \cdot 350 = 1029 \text{ mm}^2 \quad \text{OK}$$

Pozn: Podle EC2 se má použít redukční součinitel  $\beta$  pro výpočet smykové výztuže pouze tehdy, pokud je podélná výztuž plně zakotvená v uložení. Nelze tedy redukovat osovou sílu v betonové vzpěře součinitelem  $(1 - \beta)$ .

Podle CEB FIP Recommendations je hodnota smykové síly  $V_1$ , která musí být přenesena

smykovou výztuží rovna  $V_1 = V \left( \frac{2a}{z} - 1 \right) / 3$ , zbylá část smykové síly  $V_2 = V - V_1$ , je

přenášena do podpory přímo skloněnou tlakovou diagonálou.

$$V_1 = 960 \cdot (2 \cdot 1400 / 920 - 1) / 3 = 960 \cdot 0,681 = 654 \text{ kN}$$

$$A_{s,req} = 654 \cdot 10^3 / 434,8 = 1504 \text{ mm}^2 - \text{účinná pouze v oblasti } a_w = 0,85a - z/4 = 0,85 \cdot 1400 - 920/4 = 960 \text{ mm}$$

$$A_{s,prov} = 1131 \text{ mm}^2 - 7 \text{ dvoustřížných třmínků } \varnothing R12 (\text{á } 150 \text{ mm})$$

$$V_2 = 960 - 654 = 306 \text{ kN}$$

Pro výpočet příčných tahů můžeme uvažovat redukovanou sílu ve skloněné tlačené diagonále  $V_2 = 306 \text{ kN}$ . Délka betonové vzpěry je  $h = 1675 \text{ mm}$ , šířka vzpěry je  $w_c = 404 \text{ mm}$ . Síla v betonové vzpěře je  $F = -306 / \sin 33,31 = -557 \text{ kN}$ .

Příčný tah v betonové vzpěře je:

$$2.F_t = 0,5 \cdot (1 - 0,7 \cdot a/h) \cdot F = 0,5 \cdot (1 - 0,7 \cdot 404/1675) \cdot 557 = 0,416 \cdot 557 = 231 \text{ kN}$$

Příčný tah se rozdělí do svislé složky  $231 \cdot \cos 33,31 = 193 \text{ kN}$  a vodorovné složky  $231 \cdot \sin 33,31 = 127 \text{ kN}$ .

Celkovou svislou výztuž navrhne na sílu  $654 + 1,2 \cdot 193 = 886 \text{ kN}$

$$A_{s, \text{req}} = 886 \cdot 10^3 / 434,8 = 2037 \text{ mm}^2$$

$A_{s, \text{prov}} = 2262 \text{ mm}^2$  – celkově navrhne 10 dvoustržných třmínků  $\varnothing R12/140 \text{ mm}$  v oblasti od konce nosníku po líc sloupu na horní hraně nosníku.

Vodorovná konstrukční výztuž pro zachycení příčných tahů

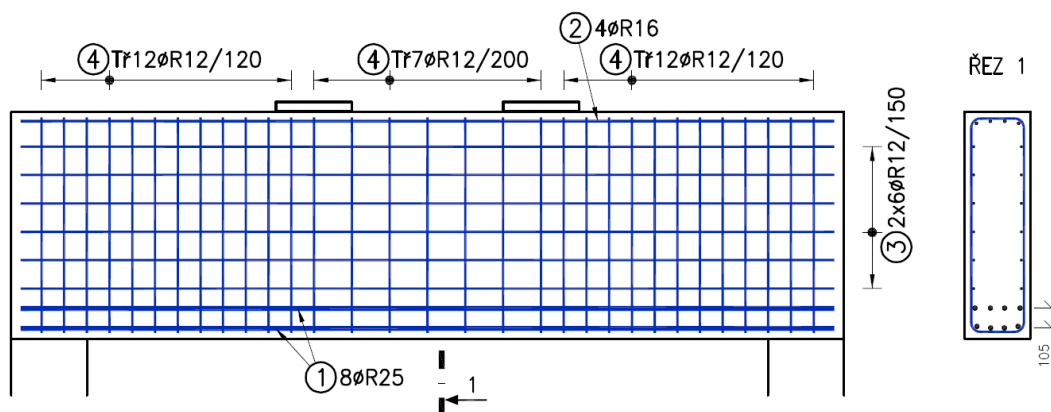
$$A_{s, \text{req}} = 1,2 \cdot 127 \cdot 10^3 / 434,8 = 351 \text{ mm}^2$$

$$A_{s, \text{min}} = 0,003 \cdot A_c = 0,003 \cdot 980 \cdot 350 = 1029 \text{ mm}^2$$

$$A_{s, \text{prov}} = 1131 \text{ mm}^2 - 10 \varnothing R12/180 \text{ mm}$$

Z uvedeného výpočtu je zřejmé, že návrh podle CEB FIP Rec. svislé a vodorovné výztuže proti příčným tahům betonových tlakových diagonál u podpor je úspornější, protože zde můžeme uvažovat redukovanou tlakovou sílu v betonové vzpěře. V příkladech dále budeme používat pro návrh svislé a vodorovné výztuže D oblastí postup podle EC2.

### Schéma výztuže

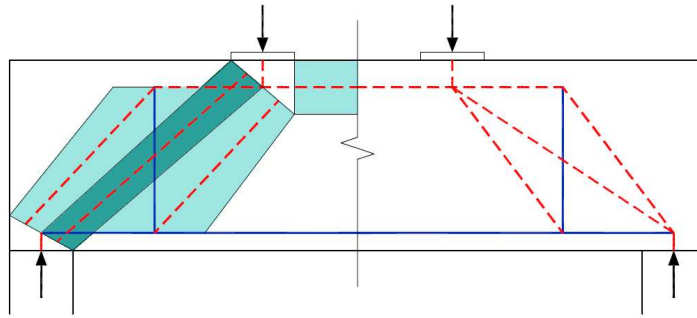


### Alternativní model

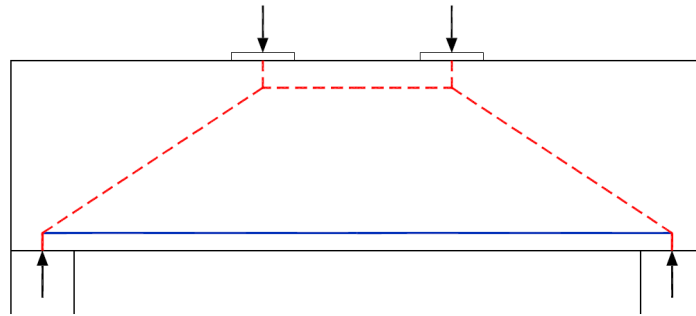
Příhradový model řešený v příkladu 3.1 je jedním z několika vhodných modelů, pomocí kterých může být vyřešena únosnost nosníku. Uvažovaný model byl tvořen dvěma tlakovými diagonálami a táhlem mezi podporou a místem působení lokálního břemene. Tento model byl vybrán kvůli své jednoduchosti a protože zohledňuje návrh smykové výztuže u podpor, což je v tomto případě na straně bezpečné.

Pro návrh svislé a vodorovné výztuže je vhodné superponovat příhradový model s modelem s jednou šikmou vzpěrou směřující od podpory k místu uložení lokálního břemene - tento model nám poslouží pro výpočet příčných tahů. Na obrázku dole je model doporučený v CEB FIP Recommendations 1999. V tomto modelu je část zatížení přenášeno od roznášecího plechu přímo do podpory prostřednictvím skloněné tlakové diagonály. Zbývá část zatížení je přenášena svislými třmínky příhradového modelu, který se skládá ze dvou nakloněných vzpěr s táhlem. V tomto případě mohou být zatěžovací účinky obou modelů superponovány.

Rozdělení zatížení mezi tyto dva mechanismy závisí na poměru vzdálenosti břemene od podpory a ramene vnitřních sil.



Pro návrh je možné použít ještě jiný model, který uvažuje přímý přenos zatížení skloněnými tlakovými diagonálami rovnou do podpor. (viz následující obrázek). Tento model nevyžaduje pro zachování rovnováhy svislé smykové třmínky. Avšak bez přítomnosti třmínků dochází ke vzniku širokých trhlin při zatížení hluboko pod mezní kapacitou nosníku a proto návrh jen pomocí tohoto modelu není vhodný. Nabízí se zde diskuze o vhodnosti tohoto modelu v případě provedení minimálního vyztužení smykovou výztuží.





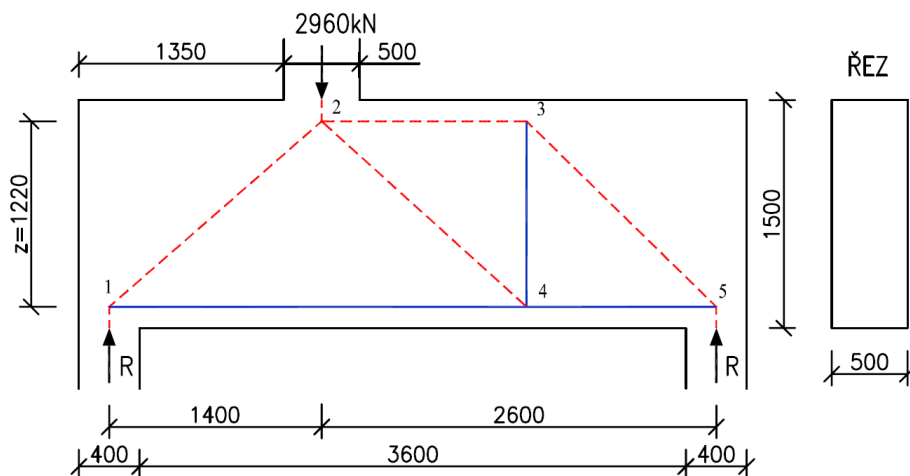
### 3.2. Nosník zatížený osamělým břemenem

Navrhněte nosník o rozměrech dle obrázku, který je zatížen osamělým břemenem o návrhové hodnotě  $G_d+Q_d = 2960$  kN. Toto zatížení již v sobě zahrnuje vlastní tíhu nosníku. Nosník je uložen na sloupech, se kterými je monoliticky spojen. Ve skutečnosti toto spojení se sloupy vykazuje jistou tuhost v pootočení a vodorovném posunutí, my však pro jednoduchost předpokládejme prosté uložení. Nosník je z betonu C30/37 a ocel třídy B500B. Šířka nosníku je 500mm. Krytí výztuže uvažujte hodnotou 30mm.

Materiály:

Beton C30/37  $f_{cd} = 1.30/1.5 = 20$  MPa

Výztuž B500B  $f_{yd} = 500/1.15 = 434.8$  MPa



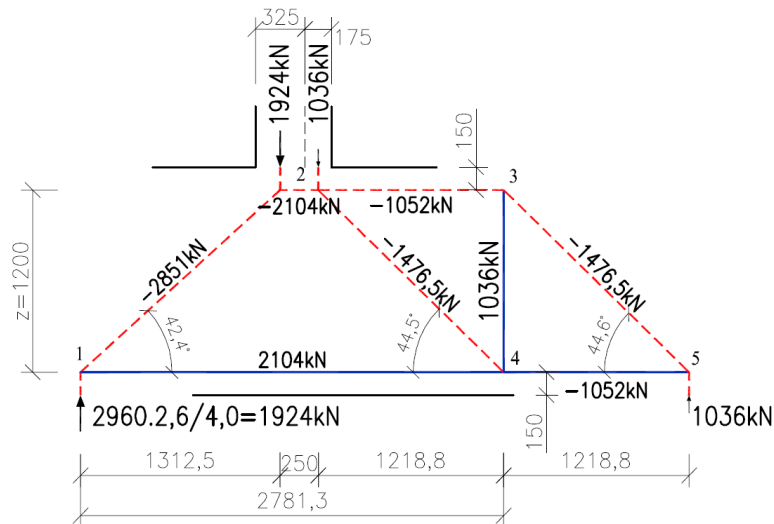
Obr.1 – Rozměry a zatížení nosníku, výchozí příhradový model

#### Výchozí příhradový model

Zvolený příhradový model odpovídá poloze lokálního břemene. V pravé části budou model tvořit dvě tlakové diagonály s táhlem, neboť jedna tlaková diagonála s velkým sklonem není příliš vhodná a bezpečná. Navíc pravidla pro tvorbu příhradových modelů požadují minimální sklon mezi vzpěrou a táhlem  $25^\circ$ .

Pro určení ramene vnitřních sil (vzdálenosti horního tlačného a dolního taženého prutu) z je nejdříve vhodné zvolit zkušební model. Z tohoto zkušebního modelu dostaneme síly ve vzpěrách a táhlech a porovnáním vypočtených napětí s návrhovými napětími v uzlech zjistíme potřebnou minimální výšku uzlů resp. minimální rozměry dolního táhla a horní vodorovné vzpěry. Podle potřebné geometrie uzlových bodů upravíme výpočetní model.

Pro analýzu uzlu 2 je vhodné rozdělit lokální zatížení a místo působení těchto sil na dvě části v poměru vzdáleností zatížení od podpor a rozpětí (v poměru reakcí). Dva uzlové „body“ zobrazené v uzlu 2 jsou součástí jedné uzlové oblasti. Pro takto sestavený zkušební příhradový model obdržíme tyto vnitřní síly ve vzpěrách a táhlech (obr.2).



Obr.2

Porovnáním napětí v uzlu 1 s návrhovým napětím  $\sigma_{Rd,max}$  určíme potřebnou šířku táhla a betonové vzpěry.

### Uzel 1

Uzel 1 je typu C-C-T, návrhové napětí  $\sigma_{Rd,max}$  na hranách uzlu tedy bude rovno hodnotě

$$\sigma_{Rd,max} = k_2 \nu \cdot f_{cd} \quad \nu = 1 - f_{ck} / 250 \quad k_2 = 0,85$$

$$\sigma_{Rd,max} = 0,85 \cdot (1 - 30/250) \cdot 20 = 14,96 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Sd1R} = 1924 \cdot 10^3 / (400 \cdot 500) = 9,62 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Sd1R} < \sigma_{Rd,max}$$

$$w_{t14} = F_{14} / (\sigma_{Rd,max} \cdot b) = 2104 \cdot 10^3 / (14,96 \cdot 500) = 281 \text{ mm}$$

Šířku táhla zvolíme 300 mm.

$$w_{c12} = w_t \cdot \cos\theta + l_r \cdot \sin\theta$$

$$w_{c12} = 300 \cdot \cos 42,4 + 400 \cdot \sin 42,4 = 491 \text{ mm}$$

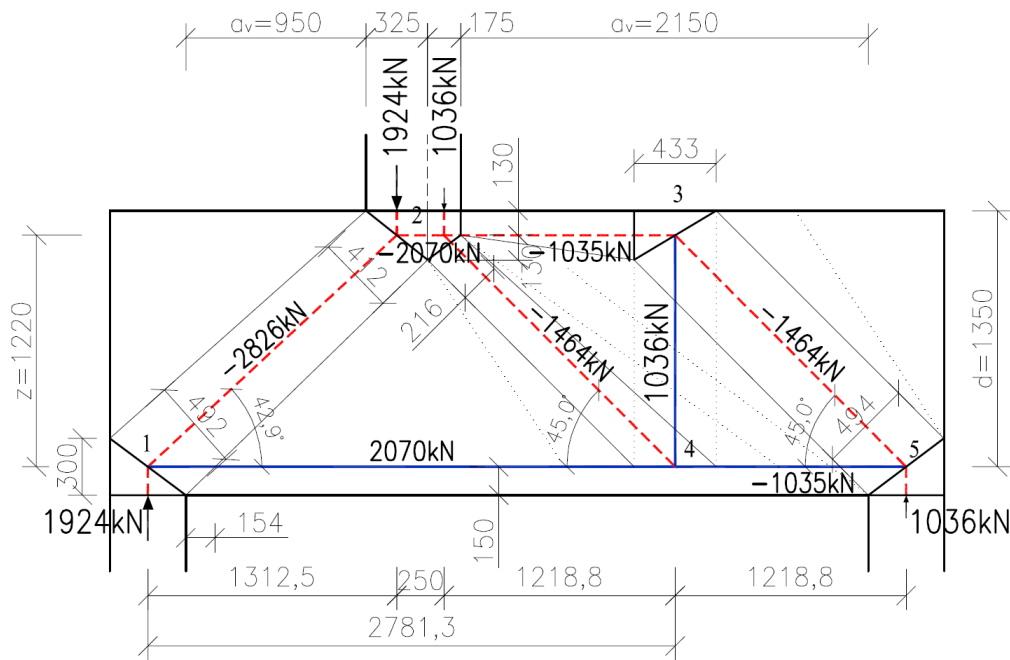
$$\sigma_{Sd12} = 2851 \cdot 10^3 / (491 \cdot 500) = 11,61 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Sd12} < \sigma_{Rd,max}$$

V uzlu je splněna podmínka maximálního návrhového napětí. Šířka táhla je 300 mm a šířka vzpěry  $w_c$  (šířka roviny kolmé k ose prutu v místě uzlu) vychází 491 mm.

V závislosti na šířce táhla vypočteného z rovnováhy v uzlu 1 a za předpokladu, že uzel 2 je typu C-C-C ( $k_1 = 1,0$ ) dostaneme výšku uzlové oblasti 2 rovno 255 mm ( $300 \cdot 0,85 / 1,0$ ). Výšku uzlové oblasti 2 budeme uvažovat 260 mm.

Nyní můžeme upravit geometrii příhradového modelu  $z = 1500 - (300 + 260) / 2 = 1220 \text{ mm}$ . Z upraveného modelu dostaneme tyto vnitřní síly (viz. obr.3).



Obr.3

### Uzel 2

- styčník s tlakovými silami - C-C-C-C uzel

$$\sigma_{Rd,max} = k_1 \nu \cdot f_{cd} \quad \nu = 1 - f_{ck} / 250 \quad k_1 = 1,0$$

$$\sigma_{Rd,max} = 1,0 \cdot (1 - 30/250) \cdot 20 = 17,60 \text{ MPa}$$

výška uzlu = 260mm

šířka uzlu 325+175mm

šířka vzpěry v místě uzlu  $w_{c23} = 260\text{mm}$

$$\sigma_{Sd2R} = (1924 + 1036) \cdot 10^3 / (500 \cdot 500) = 11,84 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Sd2R} < \sigma_{Rd,max}$$

$$w_{c21} = w_{c23} \cos \alpha + l_r \sin \alpha = 260 \cdot \cos 42,9 + 325 \cdot \sin 42,9 = 412 \text{ mm}$$

$$\sigma_{Sd21} = 2826 \cdot 10^3 / (500 \cdot 412) = 13,7 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Sd21} < \sigma_{Rd,max}$$

$$w_{c24} = 0,5 \cdot w_{c23} \cos \alpha + l_r \sin \alpha = 130 \cdot \cos 45 + 175 \cdot \sin 45 = 216 \text{ mm}$$

$$\sigma_{Sd24} = 1464 \cdot 10^3 / (500 \cdot 216) = 13,6 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Sd24} < \sigma_{Rd,max}$$

$$\sigma_{Sd23} = 1035 \cdot 10^3 / (500 \cdot 130) = 15,9 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Sd23} < \sigma_{Rd,max}$$

### Uzel 3 a 4

Ve skutečnosti bude vzpěra 3-5 vějířovitá vzpěra, která se bude rozšiřovat od podpory k hornímu líci nosníku. To samé můžeme předpokládat i o vzpěře 2-4, vzpěra se bude rozšiřovat směrem od uzlu 2 ke spodnímu líci nosníku. Šířka vzpěr bude ovlivněna rozmístěním svislé smykové výztuže.

Je zřejmé, že napětí v uzlu 3 a 4 není třeba ověřovat.

Uzel 5 bude vyhovovat maximálním hranovým napětím na hranici uzlu, neboť geometrie uzlu je stejná a síly směřující do uzlu jsou dvakrát menší než v případě uzlu 1.

### Výztuž táhla 1-4

$$F_{t14} = 2070 \text{ kN}$$

$$A_{s,req} = 2070 \cdot 10^3 / 434,8 = 4761 \text{ mm}^2 < A_{s,prov} = 5890 \text{ mm}^2 (12 \text{ } \varnothing 25)$$

Výztuž je potřeba v uzlu řádně zakotvit.

Mezní napětí v soudržnosti

$$f_{bd} = 2,25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd} = 2,25 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 2,0 / 1,5 = 3,0 \text{ MPa}$$

Základní kotevní délka

$$\sigma_{sd} = \frac{A_{s,req}}{A_{s,prov}} \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_M} \quad l_{b,rqd} = \frac{\phi}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}$$

$$\sigma_{sd} = 4761 / 5890 \cdot (500 / 1,15) = 351,5 \text{ MPa}$$

$$l_{b,rqd} = 25 / 4 \cdot (351,5 / 3,0) = 732 \text{ mm}$$

$l_{bd} = 740 \text{ mm}$  – výztuž bude zakotvena pomocí ohybů s minimálním průměrem zaoblění  $7\varnothing$ , v případě ohybu můžeme použít redukční součinitel  $\alpha_1 = 0,7$ .

Kontrola zakřivení prutu

$$\varnothing_{m,min} \geq F_{bt} \cdot ((1/a_b) + 1/(2\varnothing)) / f_{cd}$$

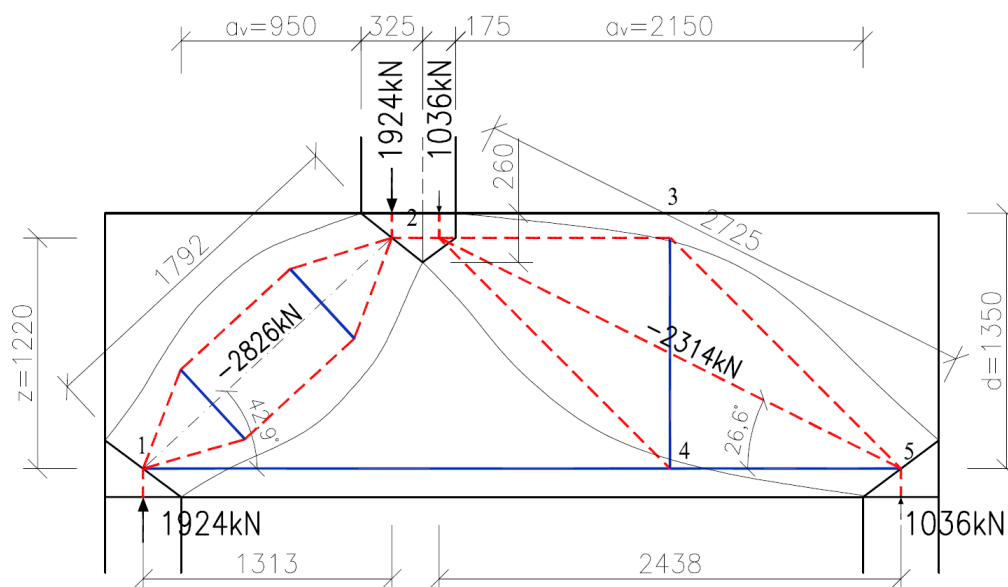
$$F_{bt} = 351,5 \cdot 491 = 172,5 \text{ kN}$$

$$a_b = 30 + 12 + 25 / 2 = 54,5 \text{ mm}$$

$$\varnothing_{m,min} \geq 172500 \cdot ((1/54,5) + 1/(2 \cdot 25)) / 20 = 331 \text{ mm} \text{ – poloměr zakřivení háku bude } 7\varnothing = 175 \text{ mm}$$

### Návrh svislé a vodorovné výztuže v levé části nosníku

Pro návrh svislé a vodorovné výztuže použijeme rozměry a geometrii příhradových modelů z obrázku 4.



Obr.4

Nejdříve musí být ověřena podmínka pro neredukovanou posouvající sílu:

$$V_{ED} \leq 0,5b_w d v f_{cd}$$

$$V_{ED} = 1924 \text{ kN} \leq 0,5 \cdot 500 \cdot 1350 \cdot 0,6 \cdot (1 - 30/250) \cdot 20 = 3564 \text{ kN}$$

OK

Svislou smykovou výztuž navrhne na redukovanou posouvající sílu  $\beta V_{ED}$ .

$$\beta = a_v / (2d) = 950 / (2 \cdot 1350) = 0,352$$

$$\beta V_{ED} = 0,352 \cdot 1924 = 677,2 \text{ kN}$$

$$A_{s,req} = 677,2 \cdot 10^3 / 434,8 = 1558 \text{ mm}^2 - \text{v oblasti } 0,75a_v = 0,75 \cdot 950 = 712 \text{ mm}$$

$$A_{s,prov} = 1810 \text{ mm}^2 - 4 \text{ čtyřstřížné třmínky } \varnothing R12/150 \text{ mm}$$

Dále navrhne konstrukční ortogonální výztuž na vznikající příčné tahy. Délka betonové vzpěry je  $h = 1792 \text{ mm}$ , šířka vzpěry je  $w_c = w_c \cos \alpha + l_r \sin \alpha = 260 \cdot \cos 42,9 + 325 \cdot \sin 42,9 = 412 \text{ mm}$  a síla v betonové vzpěře je  $F = -2826 \text{ kN}$ .

Příčný tah betonové vzpěry je:

$$2 \cdot F_t = 0,5 \cdot (1 - 0,7 \cdot a/h) \cdot F = 0,5 \cdot (1 - 0,7 \cdot 412/1792) \cdot 2826 = 0,42 \cdot 2826 = 1186 \text{ kN}$$

Příčný tah se rozdělí do svislé složky  $1186 \cdot \cos 42,9 = 868 \text{ kN}$  a vodorovné složky  $1186 \cdot \sin 42,9 = 807 \text{ kN}$ .

Celkovou svislou výztuž navrhne na sílu  $677,2 + 1,2 \cdot 868 = 1719 \text{ kN}$

$$A_{s,req} = 1719 \cdot 10^3 / 434,8 = 3953 \text{ mm}^2$$

$A_{s,prov} = 4072 \text{ mm}^2$  – celkově navrhne 9 čtyřstřížných třmínků  $\varnothing R12/150 \text{ mm}$  v oblasti od konce nosníku po líc sloupu na horní hraně nosníku.

Vodorovná konstrukční výztuž pro zachycení příčných tahů

$$A_{s,req} = 1,2 \cdot 807 \cdot 10^3 / 434,8 = 2227 \text{ mm}^2$$

$A_{s,prov} = 2463 \text{ mm}^2 - 16 \varnothing R14/150 \text{ mm}$  - stupeň výztužení  $\rho = 308 / (500 \cdot 150) = 4,1\% > 3\%$   
OK

### **Návrh svislé a vodorovné výztuže v pravé části nosníku**

Svislou smykovou výztuž navrhne na redukovanou posouvající sílu  $\beta V_{ED}$ .

$$\beta = a_v / (2d) = 2150 / (2 \cdot 1350) = 0,796$$

$$\beta V_{ED} = 0,796 \cdot 1036 = 825 \text{ kN}$$

$$A_{s,req} = 825 \cdot 10^3 / 434,8 = 1898 \text{ mm}^2 - \text{v oblasti } 0,75a_v = 0,75 \cdot 2150 = 1612 \text{ mm}$$

$$A_{s,prov} = 2262 \text{ mm}^2 - 5 \text{ čtyřstřížných třmínků } \varnothing R12/200 \text{ mm}$$

Konstrukční ortogonální výztuž na vznikající příčné tahy navrhne z alternativního modelu s jednou šikmou vzpěrou v pravé části nosníku viz. obr.4. Pro výpočet příčných tahů jsme nahradili dvě vějířovité vzpěry jednou šikmou lahvovitou vzpěrou. Délka betonové vzpěry je  $h = 2725 \text{ mm}$ , šířka vzpěry je  $w_c = w_c \cos \alpha + l_r \sin \alpha = 260 \cdot \cos 26,6 + 175 \cdot \sin 26,6 = 311 \text{ mm}$  a síla v betonové vzpěře je  $F = -1036 / \sin 26,6 = 2314 \text{ kN}$ .

Příčný tah betonové vzpěry je:

$$2 \cdot F_t = 0,5 \cdot (1 - 0,7 \cdot a/h) \cdot F = 0,5 \cdot (1 - 0,7 \cdot 311/2725) \cdot 2314 = 0,46 \cdot 2314 = 1065 \text{ kN}$$

Příčný tah se rozdělí do svislé složky  $1065 \cdot \cos 26,6 = 952 \text{ kN}$  a vodorovné složky  $1065 \cdot \sin 26,6 = 477 \text{ kN}$ .

Celkovou svislou výztuž navrhne na sílu  $825 + 1,2 \cdot 952 = 1967 \text{ kN}$

$$A_{s,req} = 1967 \cdot 10^3 / 434,8 = 4525 \text{ mm}^2$$

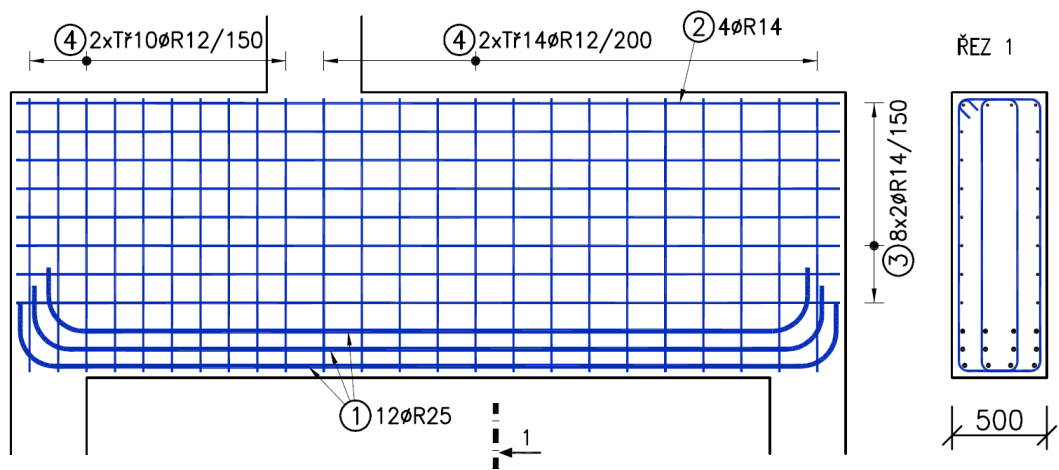
$A_{s,prov} = 4976 \text{ mm}^2$  – celkově navrhne 11 čtyřstřížných třmínků  $\varnothing R12/200 \text{ mm}$  v oblasti od konce nosníku po líc sloupu na horní hraně nosníku.

Vodorovná konstrukční výztuž pro zachycení příčných tahů

$$A_{s,req} = 1,2 \cdot 477 \cdot 10^3 / 434,8 = 1316 \text{ mm}^2$$

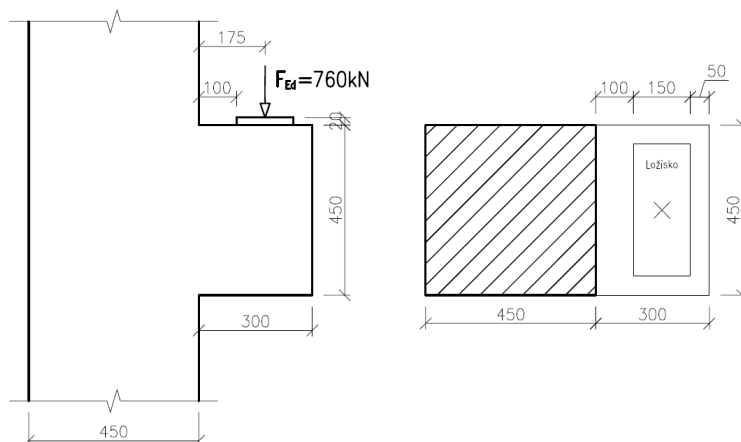
$A_{s,prov} = 2463 \text{ mm}^2 - 16 \varnothing R14/150 \text{ mm}$  – stejná výztuž jako v levé části nosníku

### Schéma výztuže



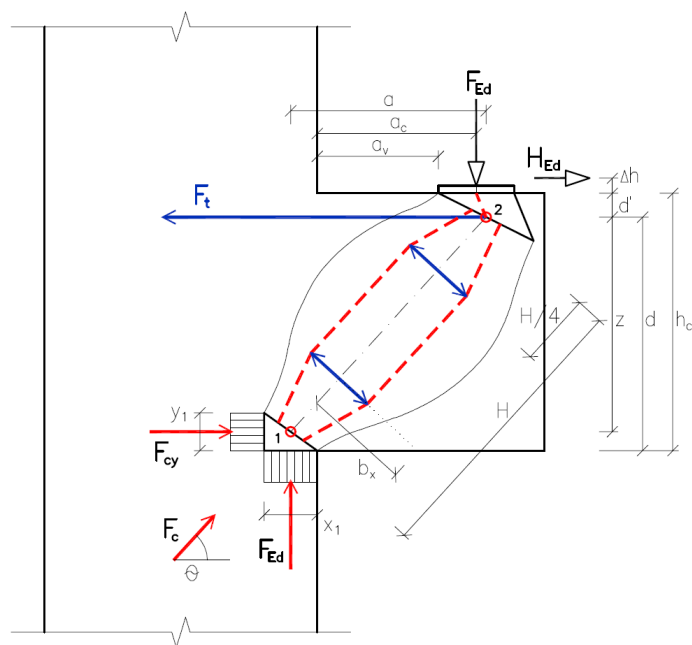
### 3.3. Krátká konzola

Navrhněte výztuž konzoly prefabrikovaného sloupu o rozměrech dle obrázku zatížené svislou silou  $F_{Ed} = 760\text{kN}$ . Zatížení je uloženo na roznášecí desce  $150 \times 350\text{ mm}$ . Konzola je z betonu třídy C40/50, krytí je  $25\text{ mm}$ . Výztuž je třídy B500B.



Konzolu navrhne také na minimální doporučenou hodnotu vodorovné síly  $H_{Ed} = 0,2F_{Ed} = 0,2 \cdot 760 = 152\text{kN}$ .

$a_v = 100 \leq 0,5d = 0,5 \cdot (450 - 70) = 190\text{ mm}$ . Jde tedy o krátkou konzolu a pro návrh použijeme tento výpočetní model:



Materiály:

Výztuž B500B

$$f_{yd} = 500 / 1,15 = 434,8 \text{ MPa}$$

Beton C40/50

$$f_{cd} = 1,40 / 1,5 = 26,67 \text{ MPa}$$

$$v = 1 - f_{ck} / 250 = 1 - 40 / 250 = 0,84$$

Uzel typu C-C-C

$$k_1 = 1,0, \sigma_{Rd,max} = 1,0 \cdot 0,84 \cdot 26,67 = 22,40 \text{ MPa}$$

Uzel typu C-C-T

$$k_2 = 0,85, \sigma_{Rd,max} = 0,85 \cdot 0,84 \cdot 26,67 = 19,04 \text{ MPa}$$

Šířku svislé vzpěry ve sloupu určíme tak, že uvažujeme tlakové napětí ve svislém směru ve styčnicku 1 shodné s návrhovou hodnotou únosnosti styčnicku CCC.

$$\text{Šířka tlačené oblasti } x_1 = F_{Ed} / (\sigma_{Rd,max} \cdot b) = 760 \cdot 10^3 / (22,4 \cdot 450) = 75,4 \text{ mm}$$

Rameno síly  $F_{Ed}$  vzhledem ke styčnicku 1 je:

$$a = a_c + 0,5x_1 + \frac{H_{Ed}}{F_{Ed}}(d' + \Delta h) = 175 + 38 + 0,2 \cdot (73 + 20) = 231,6 \text{ mm}$$

$$d' = 25 + 12 + 16 + 20 = 73 \text{ mm}$$

Výška tlačené oblasti  $y_1$  je:

$$y_1 = d - \sqrt{d^2 - 2x_1(a + H_{Ed} / F_{Ed} \cdot (d' + \Delta h))}$$

$$y_1 = 377 - \sqrt{377^2 - 2 \cdot 76 \cdot (231,6 + 0,2 \cdot 93)} = 54,4 \text{ mm}$$

$$d = 450 - 73 = 377 \text{ mm}$$

$$\text{Rameno vnitřních sil } z = d - 0,5y_1 = 377 - 0,5 \cdot 54,4 = 349,8 \text{ mm}$$

$$\text{Hlavní tahová síla } F_t = F_{Ed} \frac{a}{z} + H_{Ed} = 760 \cdot 231,6 / 349,8 + 152 = 655,2 \text{ kN}$$

$$\text{Hlavní tahová výztuž } A_{s,req} = 655,2 \cdot 10^3 / 434,8 = 1507 \text{ mm}^2$$

$A_{s,prov} = 2236 \text{ mm}^2$  – celkově navrhujeme 4 smyčky z  $\varnothing$  R16 ve dvou vrstvách (mezera mezi vrstvami 40mm) a dva zahnuté pruty  $\varnothing 20 \text{ mm}$ .

Základní kotevní délka

$$\sigma_{sd} = \frac{A_{s,req}}{A_{s,prov}} \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_M} \quad l_{b,rqd} = \frac{\phi}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}$$

$$f_{bd} = 2,25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd} = 2,25 \cdot 1,1 \cdot 2,5 / 1,5 = 3,75 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{sd} = 1507 / 2236 \cdot (500 / 1,15) = 0,674 \cdot 434,8 = 293,0 \text{ MPa}$$

$$\varnothing 16 - l_{b,rqd} = 16 / 4 \cdot (293,0 / 3,75) = 312 \text{ mm}$$

$$\text{Návrhová kotevní délka je } l_{b,d} = 312 \cdot 0,7 = 219 \text{ mm}$$

Kontrola zakřivení prutu

$$\varnothing_{m,min} \geq F_{bt} \left( (1/a_b) + 1/(2\varnothing) \right) / f_{cd}$$

$$F_{bt} = 293,0 \cdot 201 = 58,9 \text{ kN}$$

$$a_b = 25 + 12 + 16/2 = 45 \text{ mm}$$

$$\varnothing_{m,min} \geq 58900 \cdot ((1/28) + 1/(2 \cdot 16)) / 26,67 = 148 \text{ mm}$$

Pro zakotvení prutu je k dispozici délka 300mm (od konce ložiskové desky do středu oblouku smyčky) – kotevní délka smyčky vyhovuje.

$$\varnothing 20 - l_{b,rqd} = 20 / 4 \cdot (293,0 / 3,75) = 391 \text{ mm}$$

$$\text{Návrhová kotevní délka je } l_{b,d} = 391 \cdot 0,7 = 274 \text{ mm}$$

Kontrola zakřivení prutu

$$\varnothing_{m,min} \geq F_{bt} \left( (1/a_b) + 1/(2\varnothing) \right) / f_{cd}$$

$$F_{bt} = 293,0 \cdot 314 = 92,0 \text{ kN}$$

$$a_b = 25 + 12 + 20/2 = 47 \text{ mm}$$

$$\varnothing_{m,min} \geq 92000 \cdot ((1/47) + 1/(2 \cdot 20)) / 26,67 = 160 \text{ mm}$$



Svislou výztuž navrhne na redukovanou posouvající sílu  $\beta V_{ED}$ .

$$\beta = a_v / (2d) = 100 / (2 \cdot 377) = 0,133 \leq 0,25 \text{ proto } \beta = 0,25$$

$$\beta F_{ED} = 0,25 \cdot 760 = 190 \text{ kN}$$

Dále navrhne konstrukční ortogonální výztuž na vznikající příčné tahy v betonové diagonále.

$$\text{Sklon vzpěry je } \Theta = \arctg \frac{h - d' - 0,5y_1}{a - 0,5x_1} = \arctg ((450 - 73 - 0,5 \cdot 54,4) / (231,6 - 0,5 \cdot 75,4)) = 61^\circ$$

$$\text{Délka vzpěry je } H = \sqrt{(h - d' - 0,5y_1)^2 + (a - 0,5x_1)^2} = (349,8^2 + 193,9^2)^{0,5} = 400 \text{ mm}$$

$$\text{Šířka vzpěry je } a_w = 150 / \sin \Theta = 150 / \sin 61 = 172 \text{ mm}$$

$$\text{Síla v betonové vzpěře je } F_c = F_{ED} / \sin \Theta = 760 / \sin 61 = 869 \text{ kN}$$

Příčný tah betonové vzpěry je:

$$2 \cdot F_t = 0,5 \cdot (1 - 0,7 \cdot a/h) \cdot F = 0,5 \cdot (1 - 0,7 \cdot 172/400) \cdot 869 = 0,35 \cdot 869 = 304 \text{ kN}$$

Příčný tah se rozdělí do svislé složky  $304 \cdot \cos 61 = 147 \text{ kN}$  a vodorovné složky  $304 \cdot \sin 61 = 266 \text{ kN}$ .

U krátké konzoly navrhne svislou výztuž na větší svislou sílu ze 190 a 147 kN.

$$A_{s,req} = 190 \cdot 10^3 / 434,8 = 437 \text{ mm}^2$$

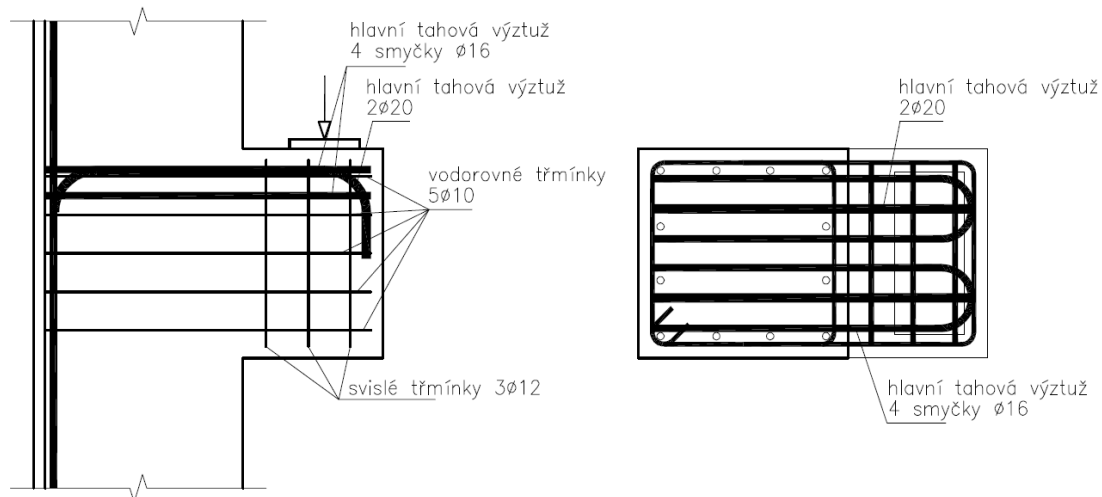
$A_{s,prov} = 452 \text{ mm}^2$  – navrhne 2 třmínky  $\varnothing R12$  – výztuž by měla být v oblasti  $0,75a_v$  (třetí třmínek dodáme z konstrukčních důvodů)

Vodorovná konstrukční výztuž pro zachycení příčných tahů

$$A_{s,req} = 1,2 \cdot 266 \cdot 10^3 / 434,8 = 734 \text{ mm}^2$$

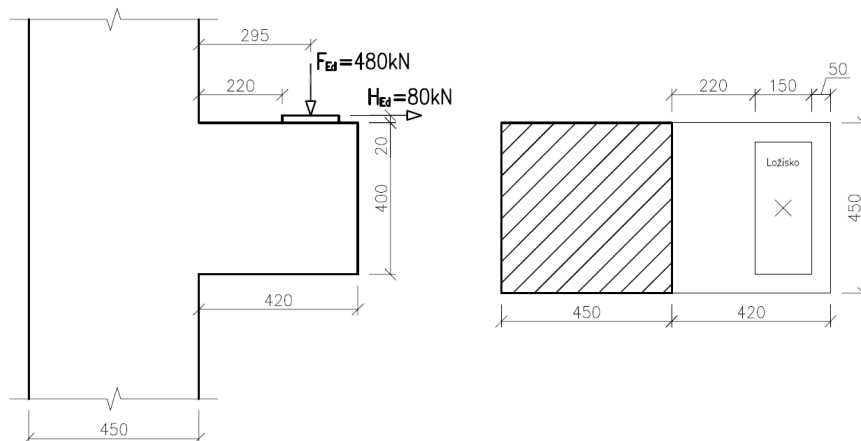
$$A_{s,prov} = 785 \text{ mm}^2$$
 – 5 třmínků  $\varnothing R10$

### Schéma výztuže

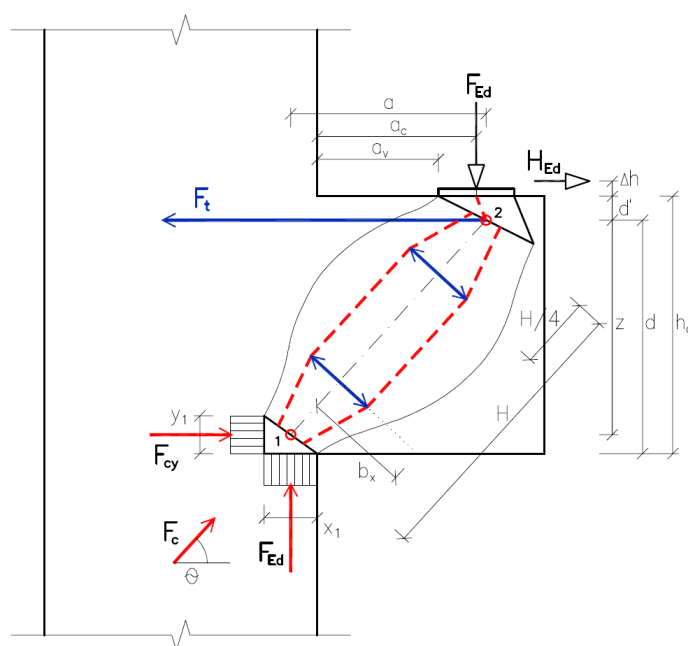


### 3.4. Dlouhá konzola

Navrhněte výztuž konzoly prefabrikovaného sloupu o rozměrech dle obrázku zatížené svislou silou  $F_{Ed} = 480\text{kN}$  a vodorovnou silou  $H_{Ed} = 80\text{kN}$ . Zatížení je uloženo na roznášecí desce  $150 \times 350\text{ mm}$ . Konzola je z betonu třídy C40/50, krytí je  $25\text{ mm}$ . Výztuž je třídy B500B.



$a_v = 220 \leq 0,5d = 0,5 \cdot (400 - 70) = 165\text{ mm}$ . Jde tedy o dlouhou konzolu. Pro návrh můžeme použít stejný postup a obdobný výpočetní model jako v předešlém příkladě. Lišit se bude jen návrh svislé výztuže.



Materiály:

Výztuž B500B

$$f_{yd} = 500 / 1,15 = 434,8 \text{ MPa}$$

Beton C40/50

$$f_{cd} = 1,40 / 1,5 = 26,67 \text{ MPa}$$

$$v = 1 - f_{ck} / 250 = 1 - 40 / 250 = 0,84$$

Uzel typu C-C-C

$$k_1 = 1,0, \sigma_{Rd,max} = 1,0 \cdot 0,84 \cdot 26,67 = 22,40 \text{ MPa}$$

Uzel typu C-C-T

$$k_2 = 0,85, \sigma_{Rd,max} = 0,85 \cdot 0,84 \cdot 26,67 = 19,04 \text{ MPa}$$

Šířku svislé vzpěry ve sloupu určíme tak, že uvažujeme tlakové napětí ve svislém směru ve styčnicku 1 shodné s návrhovou hodnotou únosnosti styčnicku CCC.

Šířka tlačené oblasti  $x_1 = F_{Ed} / (\sigma_{Rd,max} \cdot b) = 480 \cdot 10^3 / (22,4 \cdot 450) = 47,6 \text{ mm}$

Rameno síly  $F_{Ed}$  vzhledem ke styčníku 1 je:

$$a = a_c + 0,5x_1 + \frac{H_{Ed}}{F_{Ed}} (d' + \Delta h) = 295 + 24 + 80 / 480 \cdot (73 + 20) = 336,2 \text{ mm}$$

$$d' = 25 + 12 + 16 + 20 = 73 \text{ mm}$$

Výška tlačené oblasti  $y_1$  je:

$$y_1 = d - \sqrt{d^2 - 2x_1(a + H_{Ed} / F_{Ed} \cdot (d' + \Delta h))}$$

$$y_1 = 327 - \sqrt{327^2 - 2 \cdot 480 \cdot (336,2 + 80 \cdot 93 / 480)} = 56,5 \text{ mm}$$

$$d = 400 - 73 = 327 \text{ mm}$$

Rameno vnitřních sil  $z = d - 0,5y_1 = 327 - 0,5 \cdot 56,5 = 298,8 \text{ mm}$

Hlavní tahová síla  $F_t = F_{Ed} \frac{a}{z} + H_{Ed} = 480 \cdot 336,2 / 298,8 + 80 = 620,1 \text{ kN}$

Hlavní tahová výztuž  $A_{s,req} = 620,1 \cdot 10^3 / 434,8 = 1426 \text{ mm}^2$

$A_{s,prov} = 1860 \text{ mm}^2$  – celkově navrhne 4 smyčky z  $\varnothing$  R14 ve dvou vrstvách a dva zahnuté pruty  $\varnothing 20 \text{ mm}$ .

Základní kotevní délka

$$\sigma_{sd} = \frac{A_{s,req}}{A_{s,prov}} \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_M} \quad l_{b,rqd} = \frac{\phi}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}$$

$$f_{bd} = 2,25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd} = 2,25 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 2,5 / 1,5 = 3,75 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{sd} = 1426 / 1860 \cdot (500 / 1,15) = 0,767 \cdot 434,8 = 333,3 \text{ MPa}$$

$$\varnothing 14 - l_{b,rqd} = 14 / 4 \cdot (333,3 / 3,75) = 311 \text{ mm}$$

Návrhová kotevní délka je  $l_{b,d} = 311 \cdot 0,7 = 218 \text{ mm}$

Kontrola zakřivení prutu

$$\varnothing_{m,min} \geq F_{bt} \left( (1/a_b) + 1/(2\varnothing) \right) / f_{cd}$$

$$F_{bt} = 333,3 \cdot 154 = 51,3 \text{ kN}$$

$$a_b = 25 + 12 + 14/2 = 44 \text{ mm}$$

$$\varnothing_{m,min} \geq 51300 \cdot ((1/44) + 1/(2 \cdot 14)) / 26,67 = 112 \text{ mm}$$

Pro zakotvení prutu je k dispozici délka 300 mm (od konce ložiskové desky do středu oblouku smyčky) – kotevní délka smyčky vyhovuje.

$$\varnothing 20 - l_{b,rqd} = 20 / 4 \cdot (333,3 / 3,75) = 444 \text{ mm}$$

Návrhová kotevní délka je  $l_{b,d} = 444 \cdot 0,7 = 311 \text{ mm}$

Kontrola zakřivení prutu

$$\varnothing_{m,min} \geq F_{bt} \left( (1/a_b) + 1/(2\varnothing) \right) / f_{cd}$$

$$F_{bt} = 333,3 \cdot 314 = 104,7 \text{ kN}$$

$$a_b = 25 + 12 + 20/2 = 47 \text{ mm}$$

$$\varnothing_{m,min} \geq 104700 \cdot ((1/47) + 1/(2 \cdot 20)) / 26,67 = 182 \text{ mm}$$

Svislou výztuž navrhne na redukovanou posouvající sílu  $\beta V_{ED}$ .

$$\beta = a_v / (2d) = 220 / (2 \cdot 327) = 0,336$$

$$\beta F_{ED} = 0,336 \cdot 480 = 161,2 \text{ kN}$$

$$A_{s,req} = 161,2 \cdot 10^3 / 434,8 = 371 \text{ mm}^2$$

$$A_{s,prov} = 452 \text{ mm}^2 - 2 \text{ třmínky } \varnothing R12 \text{ v oblasti } 0,75 a_v$$

Dále navrhujeme konstrukční ortogonální výztuž na vznikající příčné tahy v betonové diagonále.

$$\text{Sklon vzpěry je } \Theta = \arctg \frac{h - d' - 0,5y_1}{a - 0,5x_1} = \arctg ((400 - 73 - 0,5 \cdot 56,5) / (336,2 - 0,5 \cdot 47,6)) = 43,7^\circ$$

$$\text{Délka vzpěry je } H = \sqrt{(h - d' - 0,5y_1)^2 + (a - 0,5x_1)^2} = (298,8^2 + 312,4^2)^{0,5} = 432,2 \text{ mm}$$

$$\text{Šířka vzpěry je } a_w = 150 / \sin \Theta = 150 / \sin 43,7 = 217 \text{ mm}$$

$$\text{Síla v betonové vzpěře je } F_c = F_{Ed} / \sin \Theta = 480 / \sin 43,7 = 694,8 \text{ kN}$$

Příčný tah betonové vzpěry je:

$$2 \cdot F_t = 0,5 \cdot (1 - 0,7 \cdot a/h) \cdot F = 0,5 \cdot (1 - 0,7 \cdot 217 / 432,2) \cdot 694,8 = 0,324 \cdot 694,8 = 225,3 \text{ kN}$$

Příčný tah se rozdělí do svislé složky  $225,3 \cdot \cos 43,7 = 162,9 \text{ kN}$  a vodorovné složky  $225,3 \cdot \sin 43,7 = 155,7 \text{ kN}$ .

U dlouhé konzoly navrhujeme svislou výztuž na sílu  $161,2 + 1,2 \cdot 162,9 \text{ kN} = 356,7$ .

$$A_{s,req} = 356,7 \cdot 10^3 / 434,8 = 820 \text{ mm}^2$$

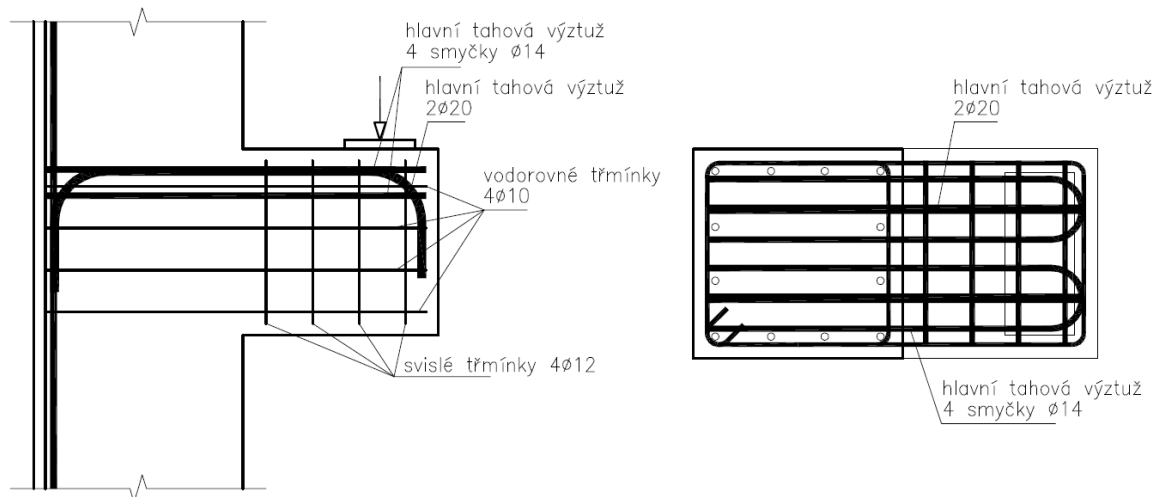
$$A_{s,prov} = 905 \text{ mm}^2 - \text{navrhujeme 4 třmínky } \varnothing R12 - 2 \text{ třmínky by měli být v oblasti } 0,75 a_v$$

Vodorovná konstrukční výztuž pro zachycení příčných tahů

$$A_{s,req} = 1,2 \cdot 155,7 \cdot 10^3 / 434,8 = 430 \text{ mm}^2$$

$$A_{s,prov} = 628 \text{ mm}^2 - 4 \text{ třmínky } \varnothing R10$$

### Schéma výztuže



### 3.5. Příklad ozubu – uložení průvlaku

Navrhněte výztuž ozubu průvlaku z betonu C40/50 s betonářskou výztuží B500B, betonové krytí uvažujte hodnotou 25mm. Průřez průvlaku je v poli 800x400mm, ozub má rozměry 350x400x400mm, průvlak je prostě podepřen, je pnutý na rozpětí 7,2m a je zatížen rovnoměrným zatížením ( $g_d + q_d$ ) = 172 kN/m. Reakce průvlaku je 619,2 kN, průvlak je při dolním líci vyztužen 4xØ28+3xØ28 a při horním líci 4xØ20, třmínková výztuž je profilu Ø12. Uvažujte minimální doporučenou horizontální sílu v uložení  $H_{Ed} = 0,2A = 123,8$  kN. Roznášecí deska je plochy 300 x 150 mm.

Pro návrh a posouzení výztuže budeme předpokládat rozdělení namáhání do dvou modelů náhradní příhradoviny v poměru 50%.

Materiály:

Výztuž B500B  $f_{yd} = 500/1,15 = 434,8$  MPa

Beton C35/45  $f_{cd} = 1,40/1,5 = 26,67$  MPa

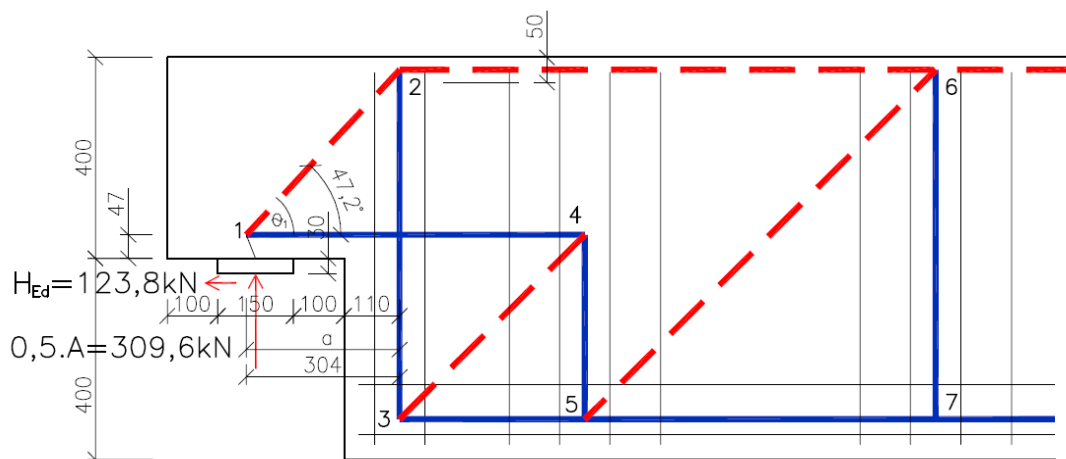
$$v = 1 - f_{ck} / 250 = 1 - 40/250 = 0,84$$

Uzel typu C-C-C  $k_1 = 1,0, \sigma_{Rd,max} = 1,0,84 \cdot 26,67 = 22,40$  MPa

Uzel typu C-C-T  $k_2 = 0,85, \sigma_{Rd,max} = 0,85 \cdot 0,84 \cdot 26,67 = 19,04$  MPa

Tlak pod styčnou deskou je  $\sigma_{max} = (0,6192^2 + 0,1238^2)^{0,5} / (0,3 \cdot 0,15) = 14,03$  MPa < 19,04 MPa

#### Návrh výztuže prvního modelu



Příhradový model 1a

$$A^* = 0,5 \cdot A = 0,5 \cdot 619,2 = 309,6 \text{ kN}$$

Navrhneme výztuž táhla  $T_{23}$

$$A_s = 1,2 \cdot T_{23} / f_{yd} = 1,2 \cdot 309,6 \cdot 10^3 / 434,8 = 854,5 \text{ mm}^2 = 8 \text{Ø}12 = 905 \text{ mm}^2 - \text{navrhneme 2 čtyřstřížné třmínky á 100mm}$$

$$\text{Rameno a reakce } A^* \text{ bude } a = 175 + 110 + 0,4 \cdot 47 = 304 \text{ mm}$$

$$\text{Dále odhadneme rameno vnitřních sil ozubu } z_k = 400 - (25 + 12 + 10) - 50/2 = 328 \text{ mm}$$

$$\text{Sklon tlačené diagonály } C_{12} \text{ je } \theta_1 = \arctan(z_k/a) = \arctan(328/304) = 47,2^\circ$$

$$\text{Tlaková síla v betonové vzpěře je } C_{12} = A^* / \sin \theta_1 = 309,6 / \sin 47,2 = 422 \text{ kN}$$

Tlaková síla při horním líci ozubu  $C^{(1)+(2)} = C_{12}^{(1)} \cdot \cos \theta_1 + (A-A^*) / \operatorname{tg} \theta_2$ ,  $C^{(1)+(2)} = 422 \cdot \cos 47,2 + (619,2 - 309,6) / \operatorname{tg} 45 = 286,7 + 309,6 = 596,3 \text{ kN}$

Výška tlačené oblasti  $x = 596,3 / 19,04 = 31,3 \text{ mm}$

Překontrolujeme hodnotu ramene vnitřních sil  $z_k = 400 - (25+12+10) - 31,3/2 = 337,3 \text{ mm}$

Síla v táhle  $T_{14} = (A^* \cdot a + H_{Ed} \cdot z_k) / z_k$ ,  $T_{14} = (309,6 \cdot 304 + 123,8 \cdot 337,3) / 337,3 = 402,8 \text{ kN}$

Jako výztuž táhla  $T_{14}$  navrhujeme smyčky průměru 20mm.

$A_{s,req} = T_{14} / f_{yd} = 402,8 \cdot 10^3 / 434,8 = 927 \text{ mm}^2 \rightarrow 4\text{Ø}20$   $A_{s,prov} = 1257 \text{ mm}^2$  – navrhujeme 2 smyčky Ø20mm. Výztuž bude využita ze 74%.

Základní kotevní délka výztužného prutu Ø20 je

$$\sigma_{sd} = \frac{A_{s,req}}{A_{s,prov}} \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_M} \quad l_{b,rqd} = \frac{\phi}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}$$

$f_{bd} = 2,25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd} = 2,25 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 2,5 / 1,5 = 3,75 \text{ MPa}$

$\sigma_{sd} = 0,74 \cdot (500 / 1,15) = 320,5 \text{ MPa}$

$l_{b,rqd} = 20 / 4 \cdot (320,5 / 3,75) = 427 \text{ mm}$

Návrhová kotevní délka je  $l_{b,d} = 427 \cdot 0,7 = 299 \text{ mm}$

Kontrola zakřivení prutu

$$\text{Ø}_{m,\min} \geq F_{bt} \cdot ((1/a_b) + 1/(2\text{Ø})) / f_{cd}$$

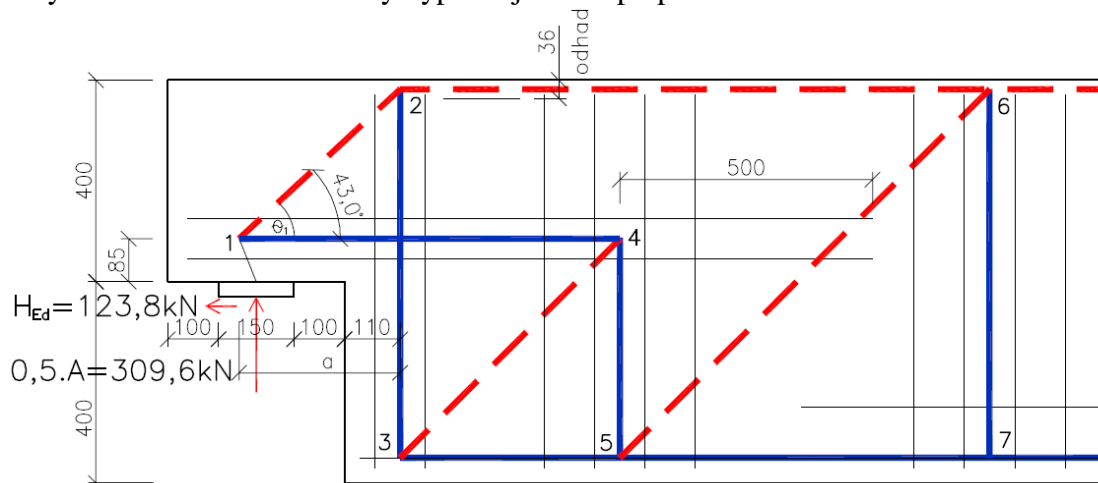
$F_{bt} = 320,5 \cdot 314,2 = 100,7 \text{ kN}$

$a_b = 25+12+20/2 = 47 \text{ mm}$

$\text{Ø}_{m,\min} \geq 100700 \cdot ((1/47) + 1/(2 \cdot 20)) / 26,67 = 175 \text{ mm}$  – smyčku navrhujeme průměru 200mm

Pro zakotvení prutu je k dispozici délka  $210-100+3,14 \cdot 200/4 = 267 \text{ mm}$  (od konce ložiskové desky do středu oblouku smyčky) – kotevní délka poloviny smyčky nevyhovuje. Jinou možností zakotvení výztužných prutů táhla  $T_{14}$  je zahnutí výztuže nahoru a zakotvení výztuže u horního líce nosníku.

- Z důvodu nedostatečné kotevní délky výztuže navrhujeme výztuž táhla  $T_{14}$  z menších profilů uložených ve dvou vrstvách. Celý výpočet je třeba přepočítat.



Příhradový model 1b

Rameno a reakce  $A^*$  bude  $a = 175 + 110 + 0,4 \cdot (25 + 12 + 8 + 80/2) = 319 \text{ mm}$

Dále odhadneme rameno vnitřních sil ozubu  $z_k = 400 - (25 + 12 + 8 + 80/2) - 36/2 = 297 \text{ mm}$   
 Sklon tlačené diagonály  $C_{12}$  je  $\theta_1 = \arctan(z_k/a) = \arctan(297/319) = 43^\circ$

Tlaková síla v betonové vzpěře je  $C_{12} = A^*/\sin \theta_1 = 309,6/\sin 43 = 454 \text{ kN}$

Tlaková síla při horním líci ozubu  $C^{(1)+(2)} = C_{12}^{(1)} \cdot \cos \theta_1 + (A-A^*) / \operatorname{tg} \theta_2$ ,  $C^{(1)+(2)} = 454 \cdot \cos 43 + (619,2 - 309,6) / \operatorname{tg} 45 = 332,5 + 309,6 = 642,1 \text{ kN}$

Výška tlačené oblasti  $x = 642,1 / 19,04 = 33,7 \text{ mm}$

85  
Překontrolujeme hodnotu ramene vnitřních sil  $z_k = 400 - (25+12+8+80/2) - 33,7/2 = 298 \text{ mm}$

Síla v táhle  $T_{14} = (A^* \cdot a + H_{Ed} \cdot z_k) / z_k$ ,  $T_{14} = (309,6 \cdot 319 + 123,8 \cdot 298) / 298 = 455,2 \text{ kN}$

Jako výztuž táhla  $T_{14}$  navrhne smyčky průměru 14 mm.

$A_{s,req} = T_{14} / f_{yd} = 455,2 \cdot 10^3 / 434,8 = 1047 \text{ mm}^2 \rightarrow 8\text{Ø}14$   $A_{s,prov} = 1232 \text{ mm}^2$  – navrhne 2x2 smyčky Ø14 mm. Výztuž bude využita z 85%.

Základní kotevní délka výztužného prutu Ø14 je

$$\sigma_{sd} = \frac{A_{s,req}}{A_{s,prov}} \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_M} \quad l_{b,rqd} = \frac{\phi}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}$$

$\sigma_{sd} = 0,85 \cdot (500 / 1,15) = 369,5 \text{ MPa}$

$l_{b,rqd} = 14/4 \cdot (369,5 / 3,75) = 345 \text{ mm}$

Návrhová kotevní délka je  $l_{b,d} = 345 \cdot 0,7 = 241 \text{ mm}$

Kontrola zakřivení prutu

$$\phi_{m,min} \geq F_{bt} \cdot ((1/a_b) + 1/(2\phi)) / f_{cd}$$

$F_{bt} = 369,5 \cdot 153,9 = 56,9 \text{ kN}$

$a_b = 25+12+14/2 = 44 \text{ mm}$

$\phi_{m,min} \geq 56900 \cdot ((1/44) + 1/(2 \cdot 14)) / 26,67 = 125 \text{ mm}$  – smyčku navrhne průměru 200 mm

Pro zakotvení prutu je k dispozici délka  $210-100+3,14 \cdot 200/4 = 267 \text{ mm}$  (od konce ložiskové desky do středu oblouku smyčky) – kotevní délka poloviny smyčky vyhovuje.

Na druhém konci zakotvíme výztužné pruty za styčником 4 – přímý prut bez kladného působení tlaku při špatných podmínkách soudržnosti.

$l_{b,rqd} = 14/4 \cdot (369,5 / (3,75 \cdot 0,7)) = 493 \text{ mm}$

V táhle  $T_{45}$  a  $T_{67}$  je podle modelu náhradní příhradoviny síla rovna reakci  $A^*$  v uložení průvlastku. Staticky nutná plocha třmínek je  $A_s = 1,2 \cdot T_{45}/f_{yd} = 1,2 \cdot 309,6 \cdot 10^3 / 434,8 = 854,5 \text{ mm}^2 = 8\text{Ø}12 = 905 \text{ mm}^2$  – navrhne 4 dvoustřížné třmínky Ø12 á 100 mm.

V dalším kroku navrhne svíslou a vodorovnou výztuž vlastního ozubu. Součinitel  $\beta$  se rovná  $\beta = 210/(2 \cdot 315) = 0,333$ . Svislé třmínky musí přenést tahovou sílu  $0,333 \cdot 309,6 = 103,2 \text{ kN}$ . Ke svislé síle musíme připočítat i vznikající příčné tahy v tlakové diagonále 1. a 2. modelu. Posouzení provedeme po návrhu výztuže 2. modelu.

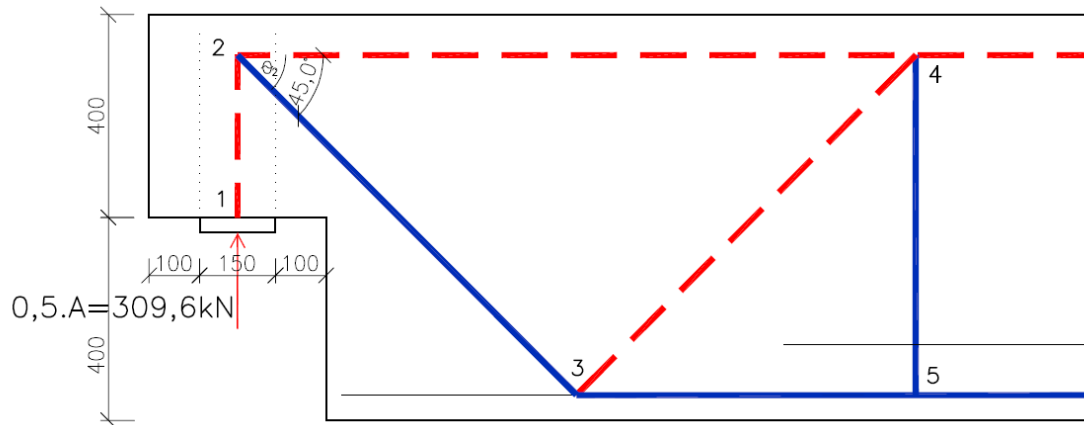
Dále je potřeba posoudit zakotvení dolní tahové výztuže průvlastku 4+3Ø28. Výztuž je umístěna ve dvou vrstvách při spodním líci. 4Ø28 jsou dovedeny až na konec nosníku, 3Ø28 tvoří příložky ve střední části nosníku.

Jedná se o nepřímé uložení výztuže. Z modelu náhradní příhradoviny vyplývá, že tahová síla ve výztuži je 309,6 kN. Stejná síla je i ve svislém táhle  $T_{23}$ . 2 výztužné vložky Ø28 budou dovedeny do konce a 2Ø28 budou zahnuty a zakotveny u horního líce nosníku. Tyto dva pruty budou zároveň tvořit výztuž táhla  $T_{23}$ . 2Ø28 jsou využity z 58% - tj.  $309600/(2 \cdot 615,8 \cdot 434,8) = 0,578$ . Základní kotevní délka výztužného prutu Ø28 je  $l_{b,rqd} = 28/4 \cdot (0,578 \cdot 434,8 / 3,75) = 469,1/0,7 = 670 \text{ mm}$

$\phi_{m,min} \geq 0,578 \cdot 267700 \cdot ((1/71) + 1/(2 \cdot 28)) / 26,67 = 185 \text{ mm}$

4Ø28 budou na konci zakotveny pomocí ohybů o minimálním poloměru 200 mm a délce přesahu 250 mm.

## Návrh výztuže druhého modelu



Příhradový model 2

Sklon šikmého taženého prutu je zvolen  $45^\circ$ . Síla v táhle  $T_{23} = 309,6/\sin 45 = 437,8 \text{ kN}$ .  $A_{s, \text{req}} = 437,8 \cdot 10^3 / 434,8 = 1007 \text{ mm}^2$ . Navrhne šikmou výztuž ze  $4\text{Ø}20$ ,  $A_{s, \text{prov}} = 1257 \text{ mm}^2$ . Pro zakotvení výztuže použijeme přivařené kotevní desky nebo zakotvení soudržností výztuže ve tvaru smyček. Minimální rozměr kotevní desky stanovíme podle maximálního tlakového napětí v betonu  $A_D = (1007/1257) \cdot 314 \cdot 434,8 / 19,04 = 5744 \text{ mm}^2$ . – min rozměr kotevní desky  $80 \times 80 \text{ mm}$  pro každý prut. + Je třeba navrhnout svar mezi kotevní deskou a výztužnými pruty (dle ČSN EN ISO 17660-1).

Pokud bychom chtěli použít zakotvení smyčkami, bude rozhodující zakotvení smyček ve styčnicku 2. Základní kotevní délka výztužného prutu  $\text{Ø}20$  je  $l_{b, \text{rqd}} = 20/4 \cdot (0,80 \cdot 434,8 / 3,75) = 464 \text{ mm} \cdot 0,7 = 325 \text{ mm}$ . Pro zakotvení je k dispozici délka  $150/\sin 45 = 212 \text{ mm}$ .

$\text{Ø}_{m, \text{min}} \geq 0,8 \cdot 314 \cdot 434,8 \cdot ((1/57) + 1/(2 \cdot 20)) / 26,67 = 174 \text{ mm}$  – smyčky navrhne z konstrukčních důvodů průměru  $200 \text{ mm}$ . Kotevní délka poloviny smyčky je  $212 - 100 + 3,14 \cdot 200 / 4 = 269 \text{ mm} < 325 \text{ mm}$ . Navržená kotevní délka nevyhovuje. Využijeme proto zakotvení výztuže pomocí čelních desek  $80 \times 80 \text{ mm}$ . Pokud bychom chtěli použít zakotvení smyčkami, bylo by třeba navrhnout více menších profilů (např.  $2 \times 4\text{Ø}14$ ), nebo snížit zatížení přenášené druhou částí modelu a celý příklad přepočítat znovu.

## Návrh konstrukční svislé a vodorovné výztuže ozubu

V tlačené diagonále první části modelu je tlaková síla  $C_{12} = 422 \text{ kN}$ . Délka vzpěry je  $h = 436 \text{ mm}$ , šířka vzpěry ve styčnicku 1 je  $a = 150/\sin 47,2 = 204,1 \text{ mm}$ . Příčná tahová síla při úplné nespojitosti oblasti je  $2 \cdot F_t = 0,5 \cdot (1 - 0,7 \cdot a/h) \cdot F = 0,5 \cdot (1 - 0,7 \cdot 204,1/436) \cdot 422 = 0,336 \cdot 422 = 141,9 \text{ kN}$ . Příčný tah se rozdělí do svislé a vodorovné složky. Přitom pro výztuž, která omezuje vznik trhlin a není kolmá na jejich směr, je vhodné zvětšit její plochu o 20%.

Svislou výztuž je třeba navrhnout na sílu  $1,2 \cdot 141,9 \cdot \cos 47,2 = 115,7 \text{ kN}$

Vodorovná výztuž musí přenést sílu  $1,2 \cdot 141,9 \cdot \sin 47,2 = 124,9 \text{ kN}$

V tlačené vzpěře druhé části modelu je tlaková síla  $C_{12} = 309,6 \text{ kN}$ . Délka vzpěry je přibližně  $h = 320 \text{ mm}$ , šířka vzpěry ve styčnicku 1 je  $a = 150 \text{ mm}$ . Příčná tahová síla při úplné nespojitosti oblasti je  $2 \cdot F_t = 0,5 \cdot (1 - 0,7 \cdot a/h) \cdot F = 0,5 \cdot (1 - 0,7 \cdot 150/320) \cdot 309,6 = 0,336 \cdot 309,6 = 104 \text{ kN}$ .

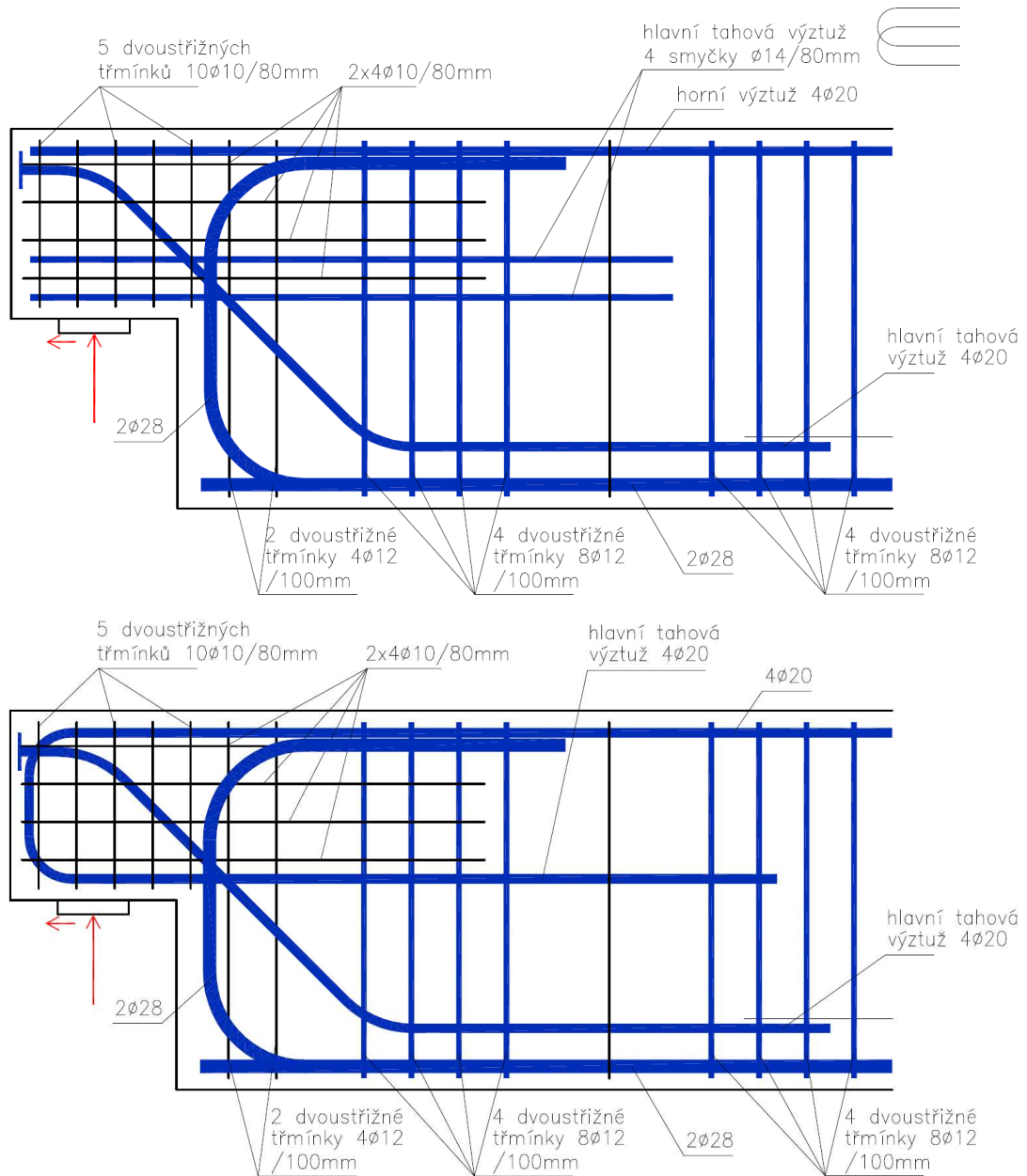
Celková plocha vodorovné výztuže ozubu je  $124,9 + 104 = 228,9 \text{ kN}$

Celková plocha svislé výztuže ozubu je  $115,7 + 103,2$  (\*smyková síla prvního modelu, která musí být zachycena svislými třmínky) =  $218,9 \text{ kN}$

$A_{s, \text{req}} = 228,9 \cdot 10^3 / 434,8 = 526 \text{ mm}^2$ ,  $A_{s, \text{prov}} = 628 \text{ mm}^2$  tj.  $2 \times 4\text{Ø}10$  á  $80 \text{ mm}$  (vodorovná výztuž),  $2 \times 5\text{Ø}10$  á  $80 \text{ mm}$  (svislá výztuž - třmínky)  $10\text{Ø}10$  – z konstrukčních důvodů

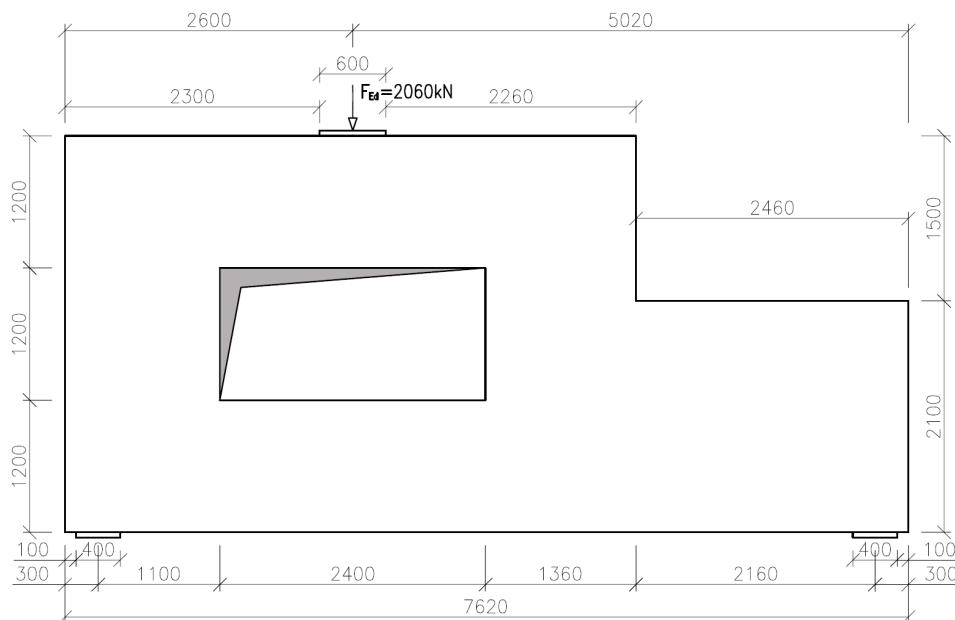


## Schémata možného vyztužení



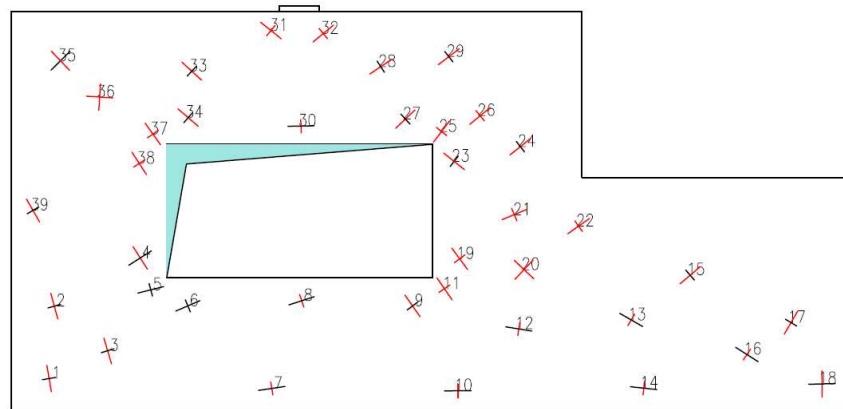
### 3.6. Stěnový nosník s otvorem

Navrhněte výztuž nosníku s otvorem. Vzhledem ke složité geometrii a lokálnímu zatížení je vhodné uvažovat celou konstrukci stěnového nosníku s otvorem jako D-oblast. Nosník je zatížen osamělým břemenem o návrhové hodnotě  $G_d+Q_d = 2060\text{kN}$ . Pro zjednodušení výpočtu toto zatížení již v sobě zahrnuje vlastní tíhu nosníku. Nosník je široký 300mm a je prostě uložen. Nosník je z betonu C30/37 a ocel třídy B500B. Krytí výztuže je 30mm.



Pro výpočet konstrukce je nejdůležitější správná volba příhradového modelu. Nabízí se nám několik možných příhradových modelů.

Příhradový model zvolíme s ohledem na velikosti a trajektorie hlavních napětí spočtené pružným výpočtem v softwaru metodou konečných prvků.



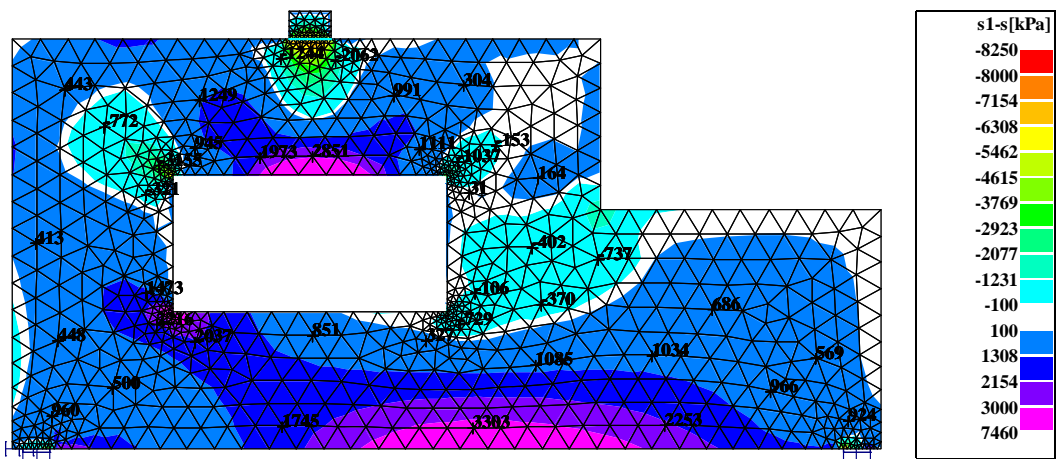
Směry hlavních napětí (červeně tlak, modře tah)

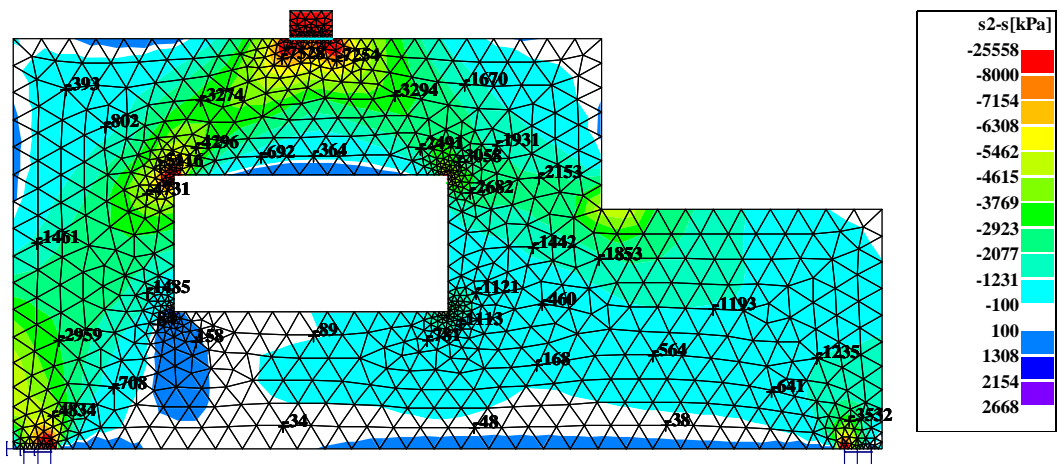
#### HLAVNÍ NAPĚTÍ

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad \text{tg } 2\alpha_1 = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}$$

Bod	$\sigma_x$ [kPa]	$\sigma_y$ [kPa]	$\tau_{xy}$ [kPa]	$\sigma_1$ [kPa]	$\sigma_2$ [kPa]	$\alpha_1$	$\alpha_2$
1	803	-4677	942	960	-4834	9,5	99,5
2	200	-2711	885	448	-2959	15,7	105,7

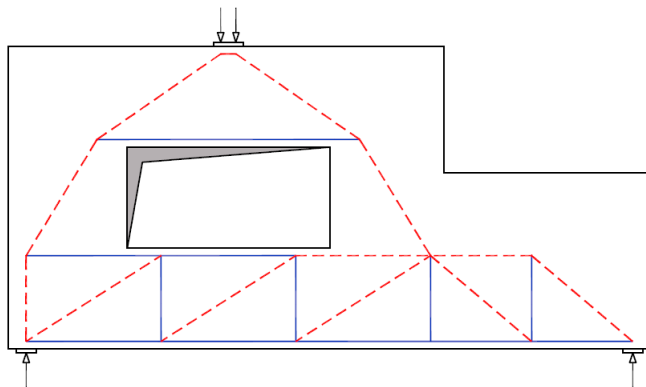
3	394	-602	342	500	-708	17,2	107,2
4	607	-620	1346	1473	-1486	32,7	122,7
5	2083	217	515	2216	84	14,4	104,4
6	1743	452	683	2037	158	23,3	113,3
7	1701	10	277	1745	-34	9,1	99,1
8	764	-2	272	851	-89	17,7	107,7
9	-46	-407	524	328	-781	35,5	125,5
10	3303	-48	18	3303	-48	0,3	90,3
11	-854	-989	180	-729	-1114	34,7	124,7
12	1055	-138	-190	1085	-168	-8,8	81,2
13	647	-176	-685	1035	-564	-29,5	60,5
14	2228	-12	-241	2254	-38	-6,1	83,9
15	-407	-100	-927	686	-1193	130,3	40,3
16	495	-170	-731	966	-641	-32,8	57,2
17	120	-786	-780	569	-1235	-29,9	60,1
18	923	-3530	73	924	-3531	0,9	90,9
19	-465	-762	485	-106	-1121	36,5	126,5
20	-412	-417	-45	-369	-460	-43,4	46,6
21	-1286	-558	-372	-402	-1442	112,8	22,8
22	-1480	-1110	-526	-737	-1853	125,3	35,3
23	-1026	-1626	-1323	31	-2683	-38,6	51,4
24	-1263	-726	-1127	164	-2153	128,3	38,3
25	-1789	-2305	-977	-1037	-3057	-37,6	52,4
26	-1209	-876	-873	-154	-1931	129,6	39,6
27	-823	-557	-1796	1111	-2491	132,9	42,9
28	-1964	-340	-1983	991	-3295	123,9	33,9
29	-940	-426	-953	304	-1670	127,5	37,5
30	2849	-362	80	2851	-364	1,4	91,4
31	-5121	-3650	3055	-1243	-7528	51,8	141,8
32	-5151	-4165	-2549	-2062	-7254	129,5	39,5
33	-1211	-814	2252	1248	-3273	47,5	137,5
34	-2045	-1307	2594	944	-4296	49,0	139,0
35	13	38	-418	444	-393	134,1	44,1
36	-802	-772	2	-772	-802	86,2	176,2
37	-3827	-4444	931	-3155	-5116	35,8	125,8
38	-1616	-3436	2008	-321	-4731	32,8	122,8
39	-59	-989	814	413	-1461	30,1	120,1





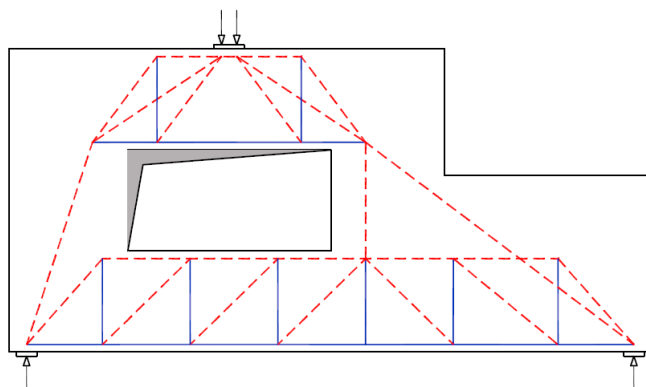
Velikosti hlavních napětí získaných pružným výpočtem

### Příhradový model 1



Konstrukce se chová jako horní stěnový nosník podporovaný nakloněnými sloupy, které jsou uloženy na spodním stěnovém nosníku.

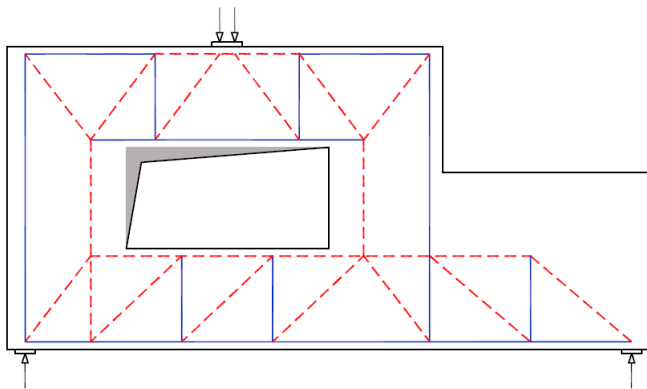
### Příhradový model 2



Tento model je variantou prvního modelu, kde je pravá nakloněná vzpěra rozdělena ve svislou a skloněnou vzpěru. Tento model ilustrativně obsahuje chybu. V oblasti vlevo pod otvorem vychází podle pružného řešení tahová napětí. Příhradový model se však v této oblasti skládá jen z tlacených vzpěr. Přestože se tento model jeví jako správný, není tomu tak. Pokud bychom konstrukci navrhli pomocí tohoto modelu, nevycházela by nám v oblasti vlevo pod otvorem žádná vodorovná výztuž. Jak již bylo řečeno, je vždy lepší provést pro danou konstrukci nejprve pružný výpočet a podle převládajících směrů a hodnot hlavních napětí sestavit příhradový model.

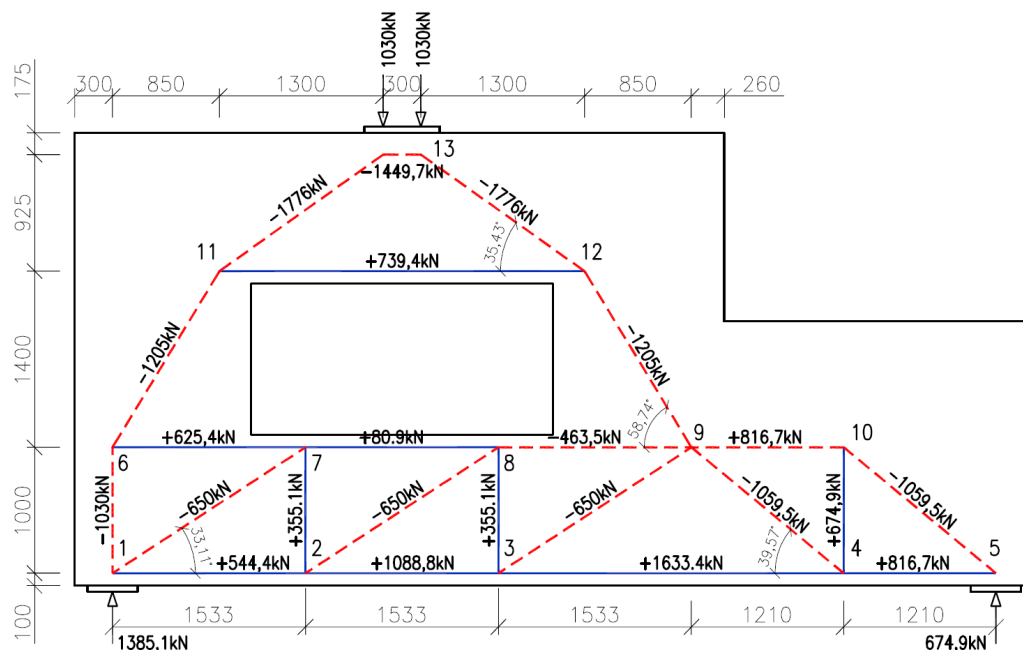
### Příhradový model 3

Model 3 zohledňuje rámové chování svislých částí konstrukce po obou stranách otvoru.



Nejvhodnější pro výpočet se jeví kombinace modelu 1 a 3. Model jedna splňuje nejlépe podmínku minimalizace přetvárné energie – je sestaven z minimální délky tažených prvků. Tento model by však bylo vhodné doplnit modelem 3, který uvažuje možné rámové působení horního nosníku se svislými částmi konstrukce. Větší důraz však dáváme modelu 1, který použijeme pro výpočet.

### Geometrie příhradového modelu a vnitřní síly



Materiály:

Beton C30/37

$$f_{cd} = 1,30/1,5 = 20 \text{ MPa}$$

Výztuž B500B

$$f_{yd} = 500/1,15 = 434,8 \text{ MPa}$$

$$v = 1 - f_{ck} / 250 = 1 - 30/250 = 0,88$$

Uzel typu C-C-C

$$k_1 = 1,0, \sigma_{Rd,max} = 1,0 \cdot 88 \cdot 20,0 = 17,6 \text{ MPa}$$

Uzel typu C-C-T

$$k_2 = 0,85, \sigma_{Rd,max} = 0,85 \cdot 88 \cdot 20,0 = 14,96 \text{ MPa}$$

## Návrh výztuže táhel

Táhlo	$F_t$ [kN]	$A_{s,req}$ [mm <sup>2</sup> ]	$\varnothing$ $A_{s,\varnothing}$ [mm <sup>2</sup> ]	Počet $\varnothing$	$A_{s,prov}$ [mm <sup>2</sup> ]
1-2	544,4	1252	25 490,9	6	2945
2-3	1088,8	2504	25 490,9	6	2945
3-4	1633,4	3757	25 490,9	9	4418
4-5	816,7	1878	25 490,9	9	4418
6-7	625,4	1438	20 314,2	6	1885
7-8	80,9	186	20 314,2	3	942
2-7, 3-8	355,1	817	12 113,1	8 á 200mm	1131
4-10	674,9	1552	14 153,9	12 á 150mm	1847
11-12	739,4	1701	20 314,2	6	1885

## Ověření napětí v uzlech

Nejdříve ověříme únosnost v uložení nosníku – uzly 1, 5 a 13.

### Styčnick 1 - C-C-C-T uzel

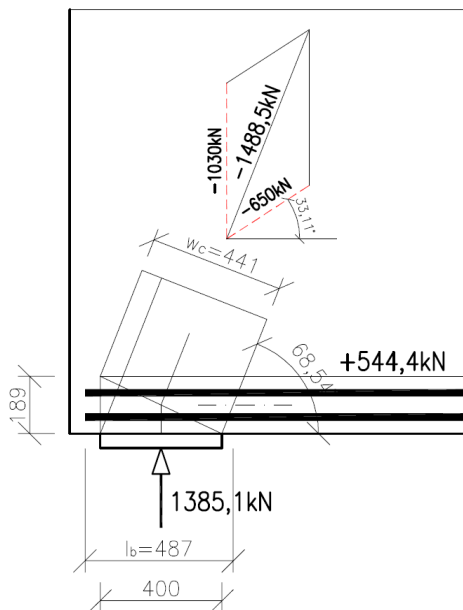
- styčnick s tlakovými silami a táhlem kotveným v jednom směru

$$\sigma_{Rd,max} = 0,85 \cdot (1 - 30/250) \cdot 20 = 14,96 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{SdR1} = 1373,3 \cdot 10^3 / (400 \cdot 300) = 11,44 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{SdR1} < \sigma_{Rd,max}$$

Pro ověření návrhových napětí ve styčnicku nejdříve určíme výslednici tlakových sil  $C_{16}$  a  $C_{17}$ .



šířka tlacené diagonály  $w_c = w_t \cos \alpha + l_r \sin \alpha$

$$w_c = 189 \cdot \cos 68,54 + 400 \cdot \sin 68,54 = 441 \text{ mm}$$

$$\sigma_{Sd1c} = 1488,5 \cdot 10^3 / (300 \cdot 441) = 11,25 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Sd1c} < \sigma_{Rd,max}$$

$$\sigma_{Sd12} = 544,4 \cdot 10^3 / (189 \cdot 300) = 9,60 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Sd12} < \sigma_{Rd,max}$$

### Zakotvení výztuže ve styčnicku 1

Základní kotevní délka

$$\sigma_{sd} = \frac{A_{s,req}}{A_{s,prov}} \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_M} \quad l_{b,rqd} = \frac{\phi}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}$$

$$f_{bd} = 2,25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ct0,05d} = 2,25 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 2,0 / 1,5 = 3,0 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{sd} = 1252 / 2945 \cdot (500 / 1,15) = 0,425 \cdot 434,8 = 184,9 \text{ MPa}$$

$$\varnothing 25 - l_{b,rqd} = 25 / 4 \cdot (184,9 / 3,0) = 385 \text{ mm}$$

Návrhová kotevní délka je  $l_{b,d} = 385 \cdot 1 = 385 \text{ mm}$

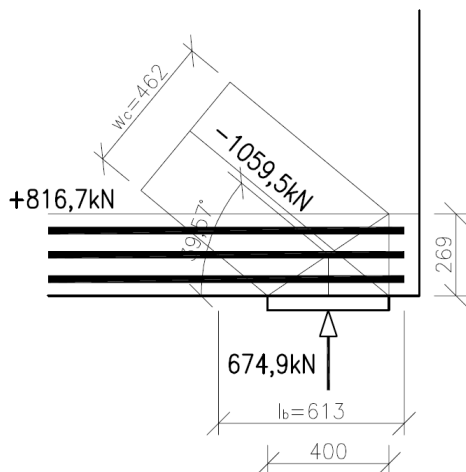
### Styčnick 5 - C-C-T uzel

- styčnick s tlakovými silami a táhlem kotveným v jednom směru

$$\sigma_{Rd,max} = 0,85 \cdot (1 - 30/250) \cdot 20 = 14,96 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{SdR5} = 674,9 \cdot 10^3 / (400 \cdot 300) = 5,62 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{SdR5} < \sigma_{Rd,max}$$



šířka tlačené diagonály  $w_c = w_t \cos\alpha + l_r \sin\alpha$

$$w_c = 269 \cdot \cos 39,57 + 400 \cdot \sin 39,57 = 462 \text{ mm}$$

$$\sigma_{Sd5,10} = 1059,5 \cdot 10^3 / (300 \cdot 462) = 7,64 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Sd5,10} < \sigma_{Rd,max}$$

$$\sigma_{Sd5,4} = 816,7 \cdot 10^3 / (269 \cdot 300) = 10,12 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Sd5,4} < \sigma_{Rd,max}$$

Zakotvení výztuže ve styčnicku 1

Základní kotevní délka

$$\sigma_{sd} = \frac{A_{s,req}}{A_{s,prov}} \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_M} \quad l_{b,rqd} = \frac{\phi}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}$$

$$f_{bd} = 2,25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ct0,05d} = 2,25 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 2,0 / 1,5 = 3,0 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{sd} = 1878 / 2945 \cdot (500 / 1,15) = 0,638 \cdot 434,8 = 277,3 \text{ MPa}$$

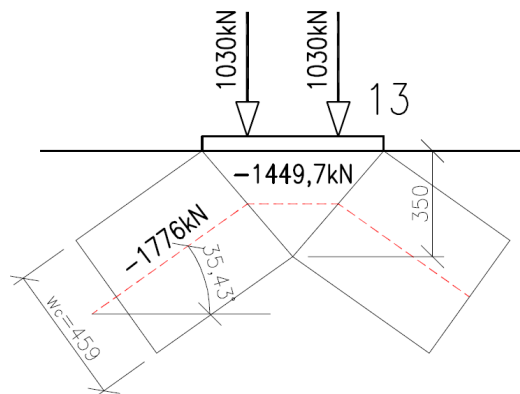
$$\text{Ø}25 - l_{b,rqd} = 25 / 4 \cdot (277,3 / 3,0) = 578 \text{ mm}$$

Návrhová kotevní délka je  $l_{b,d} = 578 \cdot 1,0 = 578 \text{ mm}$

Pro zakotvení výztuže je k dispozici 613 mm - OK

### Styčnick 13 - C-C-C uzel

- styčnick s tlakovými silami a táhlem kotveným v jednom směru



$$\sigma_{Rd,max} = 1,0 \cdot (1 - 30/250) \cdot 20 = 17,6 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{SdR13} = 2060 \cdot 10^3 / (600 \cdot 300) = 11,44 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{SdR13} < \sigma_{Rd,max}$$

šířka tlačené diagonály  $w_c = w_t \cos\alpha + l_r \sin\alpha$

$$w_c = 350 \cdot \cos 35,43 + 300 \cdot \sin 35,43 = 459 \text{ mm}$$

$$\sigma_{Sd13,11} = 1776 \cdot 10^3 / (350 \cdot 459) = 11,06 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Sd13,11} < \sigma_{Rd,max}$$

$$\sigma_{Sd13} = 1449,7 \cdot 10^3 / (350 \cdot 300) = 13,81 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Sd13} < \sigma_{Rd,max}$$

### Návrh svislé a vodorovné výztuže části nad otvorem

Pro návrh výztuže „horního nosníku“ použijeme stejná pravidla jako pro návrh smykové výztuže břemene u podpory.

Nejdříve musí být ověřena podmínka pro neredukovanou posouvající sílu:

Uvažujeme, že posouvající síla je rovna polovině hodnoty osamělé síly.

$$V_{ED} \leq 0,5 b_w d v f_{cd}$$

$$V_{ED} = 1030 \text{ kN} \leq 0,5 \cdot 300 \cdot 1100 \cdot 0,6 \cdot (1 - 30/250) \cdot 20 = 1742,4 \text{ kN} \quad \text{OK}$$

Svislou smykovou výztuž navrhne na redukovanou posouvající sílu  $\beta V_{ED}$ .

$$\beta = a_v / (2d) = 900 / (2 \cdot 1100) = 0,409$$

$$\beta V_{ED} = 0,409 \cdot 1030 = 421,4 \text{ kN}$$

$$A_{s,req} = 421,4 \cdot 10^3 / 434,8 = 969 \text{ mm}^2 - \text{v oblasti } 0,75 a_v = 0,75 \cdot 900 = 675 \text{ mm}$$

$$A_{s,prov} = 1232 \text{ mm}^2 - 4 \text{ dvoustřížné třmínky } \text{Ø}R14/150 \text{ mm}$$

Dále navrhne konstrukční ortogonální výztuž na vznikající příčné tahy v betonové vzpěře. Délka betonové vzpěry je  $h = 1590\text{mm}$ , nejmenší šířka vzpěry je  $w_c = 459\text{mm}$  a síla v betonové vzpěře je  $F = -1776\text{kN}$ . Sklon vzpěry je  $35,43^\circ$ .

Příčný tah v betonové vzpěře je:

$$2.F_t = 0,5 \cdot (1 - 0,7 \cdot a/h) \cdot F = 0,5 \cdot (1 - 0,7 \cdot 459/1590) \cdot 1776 = 0,399 \cdot 1776 = 708,6\text{kN}$$

Příčný tah se rozdělí do svislé složky  $708,6 \cdot \cos 35,43 = 577\text{kN}$  a vodorovné složky  $708,6 \cdot \sin 35,43 = 411\text{kN}$ .

Celkovou svislou výztuž navrhne na sílu  $421 + 1,2 \cdot 577 = 1113\text{kN}$

$$A_{s,\text{req}} = 1113 \cdot 10^3 / 434,8 = 2560 \text{ mm}^2$$

$$A_{s,\text{prov}} = 2771 \text{ mm}^2 - \text{celkově navrhne 9 dvoustřížných třmínků } \varnothing R14/150 \text{ mm}$$

Vodorovná konstrukční výztuž pro zachycení příčných tahů

$$A_{s,\text{req}} = 1,2 \cdot 411 \cdot 10^3 / 434,8 = 1134 \text{ mm}^2$$

$$A_{s,\text{prov}} = 1357 \text{ mm}^2 - 12 \varnothing R12/150 \text{ mm}$$

$$\text{Stupeň vyztužení } \rho_s = 113,1 \cdot 10^{-6} / (0,15 \cdot 0,3) = 0,005 > \rho_{s,\text{min}} = 0,003 \quad \text{OK}$$

### Návrh svislé a vodorovné výztuže vlevo a vpravo od otvoru

#### Vzpěra 6-11, 9-12

Délka betonové vzpěry je  $h = 1640\text{mm}$ , šířku vzpěry budeme předpokládat  $w_c = 500\text{mm}$  a síla v betonové vzpěře je  $F = -1205\text{kN}$ . Sklon vzpěry je  $58,7^\circ$ .

Příčný tah v betonové vzpěře je:

$$2.F_t = 0,5 \cdot (1 - 0,7 \cdot a/h) \cdot F = 0,5 \cdot (1 - 0,7 \cdot 500/1640) \cdot 1205 = 0,393 \cdot 1205 = 474\text{kN}$$

Příčný tah se rozdělí do svislé složky  $474 \cdot \cos 58,7 = 246\text{kN}$  a vodorovné složky  $474 \cdot \sin 58,7 = 405\text{kN}$ .

Svislou výztuž navrhne na sílu  $1,2 \cdot 246 = 295\text{kN}$

$$A_{s,\text{req}} = 295 \cdot 10^3 / 434,8 = 679 \text{ mm}^2$$

$$A_{s,\text{prov}} = 1357 \text{ mm}^2 - \text{navrhne 2 vrstvy } \varnothing R12/200 \text{ mm}$$

Vodorovná konstrukční výztuž pro zachycení příčných tahů

$$A_{s,\text{req}} = 1,2 \cdot 405 \cdot 10^3 / 434,8 = 1118 \text{ mm}^2$$

$$A_{s,\text{prov}} = 1357 \text{ mm}^2 - 12 \varnothing R12/200 \text{ mm}$$

$$\text{Stupeň vyztužení } \rho_s = 226,2 \cdot 10^{-6} / (0,2 \cdot 0,3) = 0,0038 > \rho_{s,\text{min}} = 0,003 \quad \text{OK}$$

Posouzení tlačných prutů na vznikající příčné tahy zde bylo uvedeno spíše ilustrativně. Šířku vzpěr jsme uvažovali  $500\text{mm}$ , což je stále konzervativní odhad. Výsledek návrhu výztuže nám ukázal, že jsme se přiblížili minimálnímu doporučenému stupni vyztužení. V tomto případě by tedy stačilo navrhout výztuž na minimální stupeň vyztužení 3%, jelikož se nejedná o tlačné pruty, které jsou přímo zatížené koncentrovanou silou na úzké roznášecí ploše.

### Návrh výztuže v pravé části u podpory

Zde je potřeba navrhout smykovou výztuž pro zachycení posouvající síly  $674,9\text{kN}$  a tuto výztuž doplnit výztuží proti příčným tahům. V tomto případě bude vzpěra 5-10 vějířovitého tvaru, tudíž ve vzpěře nebudou vznikat velké příčné tahové síly.

$$A_{s,\text{req}} = 674,9 \cdot 10^3 / 434,8 = 1552 \text{ mm}^2$$

Pro svislou výztuž navrhne 2 vrstvy  $\varnothing R12/150\text{mm}$  a vodorovnou výztuž budou tvořit 2 vrstvy  $\varnothing R12/200\text{mm}$ .



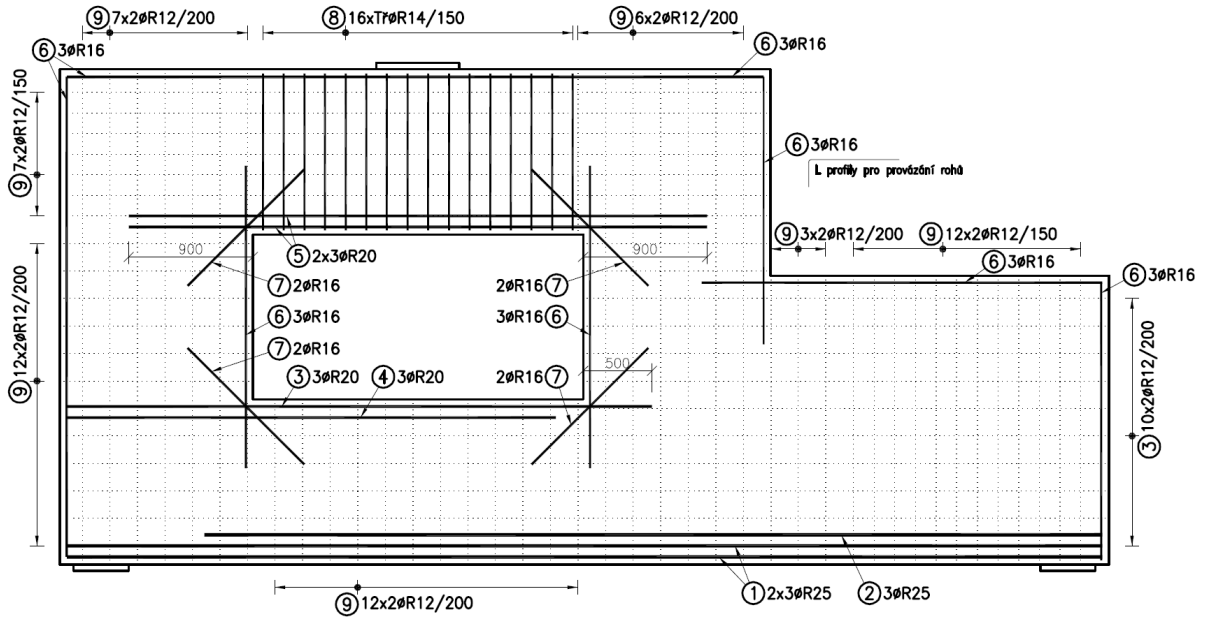


Schéma výztuže

### 3.7. Stěna s otvory

400mm tlustá stěna výšky 12400mm a šířky 6400mm má uvnitř dva čtvercové otvory velikosti 2400 x 2400mm. Na stěnu působí tři zatěžovací stavy.

Zatěžovací stav 1: dvě svislé osamělé síly o velikosti 1575kN na horní hraně stěny – stálé zatížení působící.

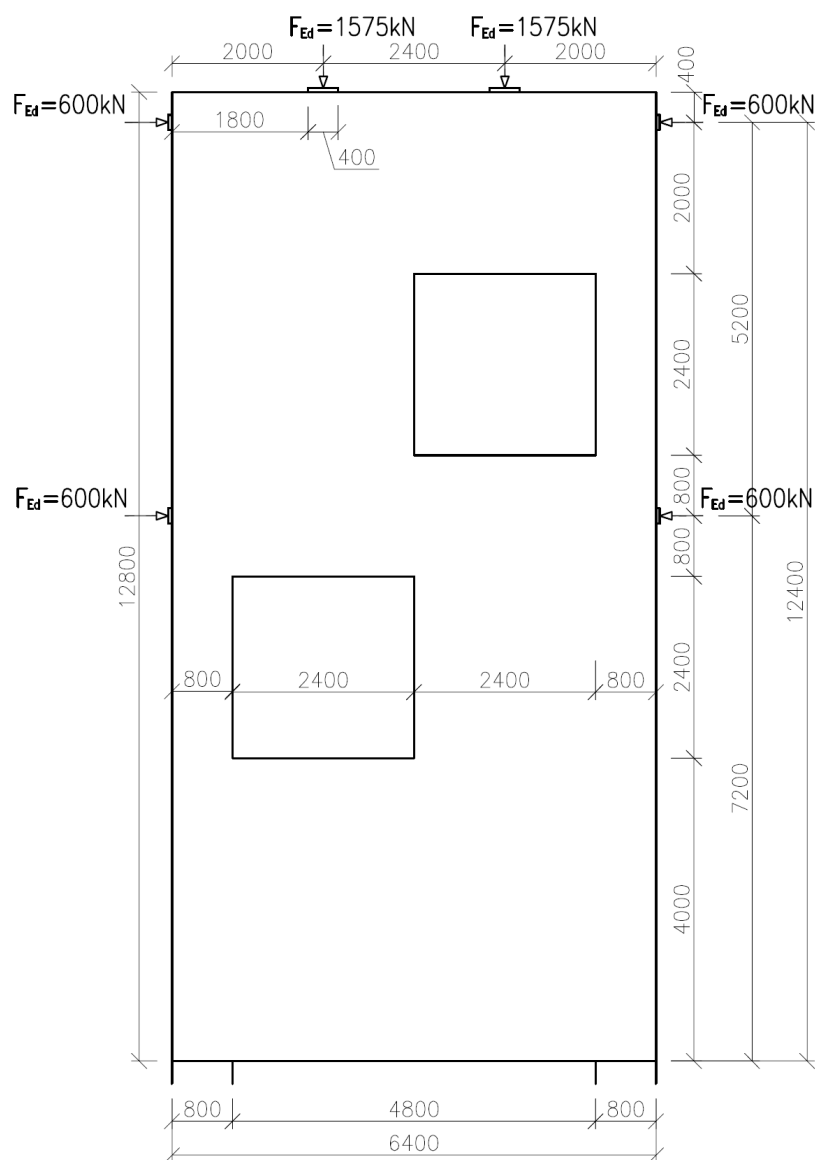
Zatěžovací stav 2: dvě vodorovné síly o velikosti 600kN působící na pravé straně zdi

Zatěžovací stav 3: dvě vodorovné síly o velikosti 600kN působící na levé straně zdi

Zatěžovací stav 2 a 3 jsou proměnná zatížení působící samostatně v kombinaci se svislým stálým zatížením. Vše zatěžovací stavy jsou uvedeny v návrhových hodnotách.

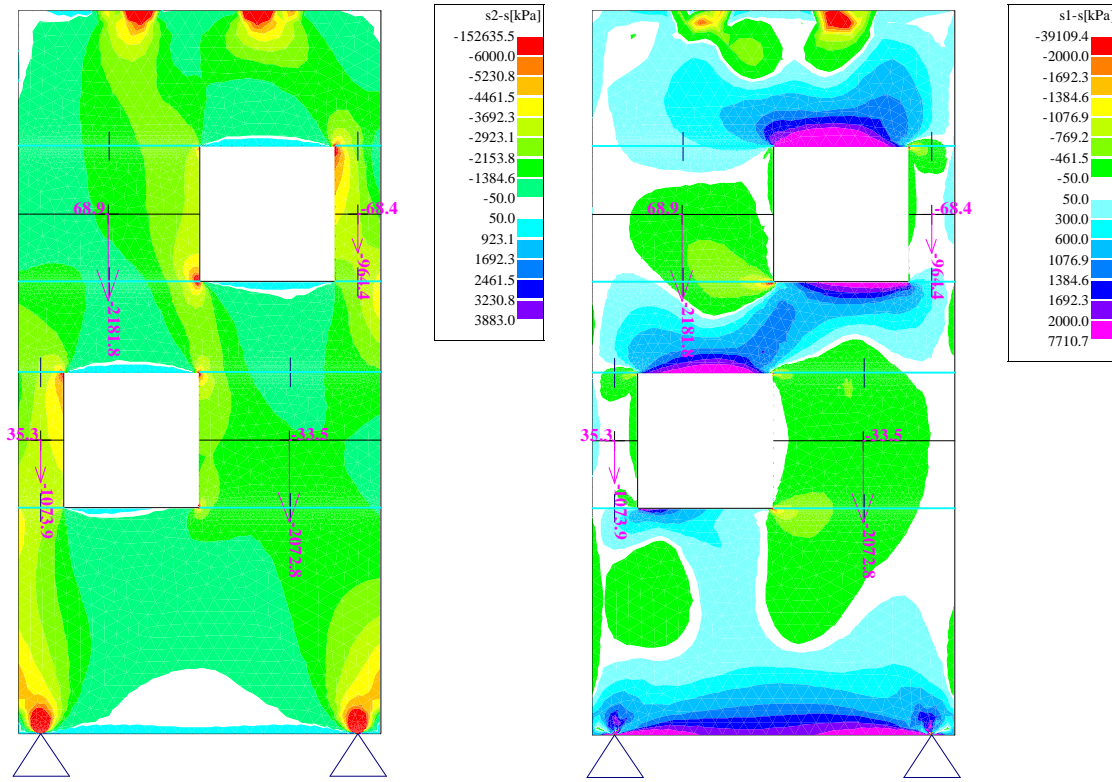
Stěna je z betonu C25/30 a výztuž je třídy B500B.

Navrhněte výztuž a posuďte stěnu na kombinaci zatěžovacích stavů ZS1+ZS2 a ZS1+ZS3.



Pro zatěžovací stav 1 a kombinace zatěžovacích stavů 1+2 a 1+3 sestrojíme výpočetní modely. Vzpěry a táhla příhradových modelů mají být orientovány podle trajektorií hlavních napětí získaných pružným výpočtem a s ohledem na směr vyztužení (v tomto případě ortogonální směr).

## Zatěžovací stav 1



ZS1 - Izolinie hlavních napětí

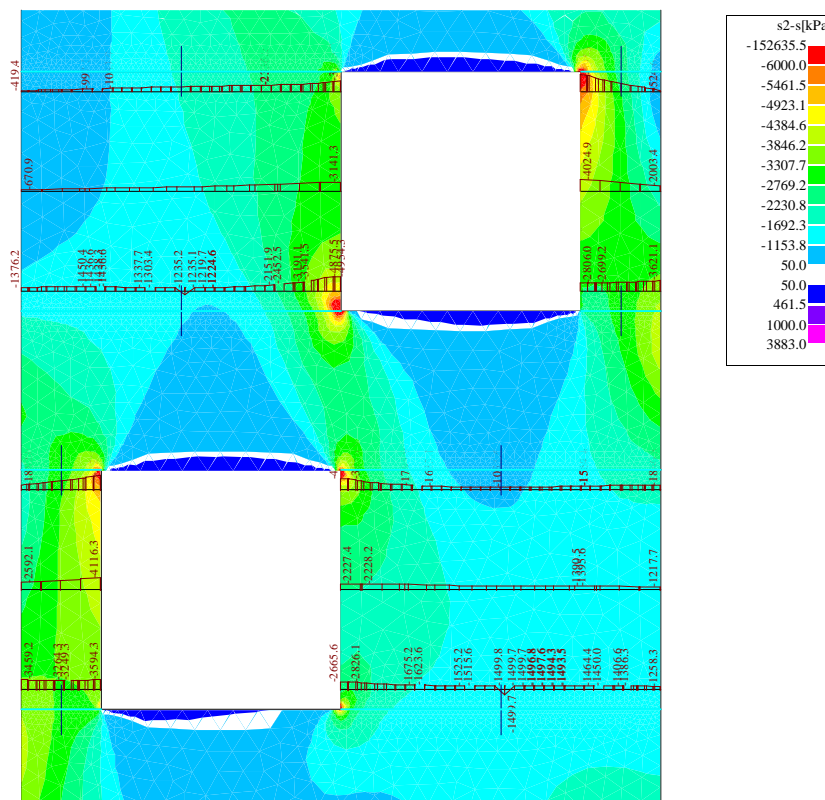
Výpočetní model pro první zatěžovací stav je staticky neurčitý. Nejdříve je potřeba rozdělit svislé zatížení do napětíových toků proudících vnějšími částmi kolem otvorů pomocí pružného výpočtu. Zintegrováním napětí získaných pružným výpočtem po ploše řezu získáme svislé síly, které musí být ve vzpěrách příhradového modelu.

Pravým sloupem proudí 964kN tj. 61% a levým sloupem 1074kN tj. 68% svislého zatížení z oblasti nad otvorem.

Při sestavování příhradového modelu a určování polohy vzpěr bychom měli vzpěry umístit do výsledného těžiště silám odpovídajících napětíových ploch.

Výsledná síla uprostřed pravého sloupu působí nalevo od střednice a v levém sloupu napravo od střednice sloupu. V horní části sloupu je excentricita výslednicové síly ještě větší, v dolních částech sloupu je naopak excentricita na opačné straně od střednice. Tlačené pruty příhradoviny ve sloupech by proto měli být mírně nakloněné. Pro zjednodušení však můžeme vzpěry umístit do středů sloupů. Toto malé zjednodušení nebude mít na přesnost výsledku výrazný vliv.

Část zatížení, které putuje střední částí stěny mezi otvory, je pro jednoduchost a názornost výpočtu rozdělena do dvou tlakových toků. Je tak jasné, jak velká část svislého zatížení putuje kolem otvorů a pokračuje dále do podpor. Toto rozdělení není nezbytné, dvě cesty mohou být spojeny v jednu silovou trajektorii uprostřed stěny.

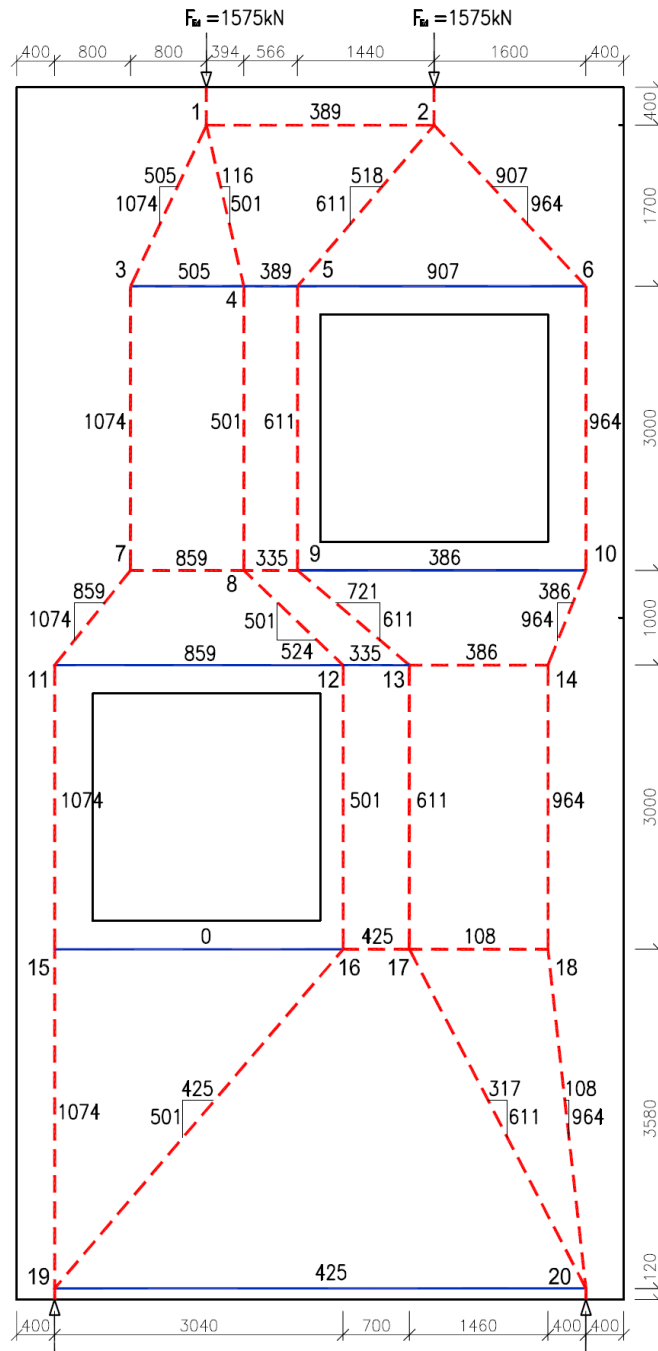


Hlavní tlaková napětí v řezech otvory

Pro výpočet vnitřních sil staticky neurčité příhradové konstrukce je nutné začít rovnováhami ve dvojných bodech – styčnicích, ve kterých jsou neznámé hodnoty osových sil jen ve dvou prutech neležících v jedné přímce. Proto je nezbytné na začátku výpočtu určit rozdělení svislých sil do tlakových diagonál 1-3, 1-4 a 2-5, 2-6 pomocí odhadu nebo přesněji integrací napětí po průřezu získaných pružným výpočtem. Vodorovnou složku síly a tím sklon vzpěry 1-4 pak určíme z rovnováhy ve styčnicí 4. Stejným způsobem postupujeme pro výpočet zbylých osových sil.

Příhradová analogie je přibližným výpočtetním postupem pro modelování napět'ových toků v konstrukci. Při sestavování příhradového modelu jde o jisté zjednodušení a napřímení napět'ových toků do jejich přímých silových výslednic. **Pokud se však příhradový model bude značně lišit od hlavních napět'ových trajektorií získaných pružným výpočtem, budou se v reálné konstrukci navržené podle nevhodného příhradového modelu vytvářet značné trhliny, neboť se bude napětí v konstrukci redistribuovat také v závislosti na skutečném provedení vyztužení.**

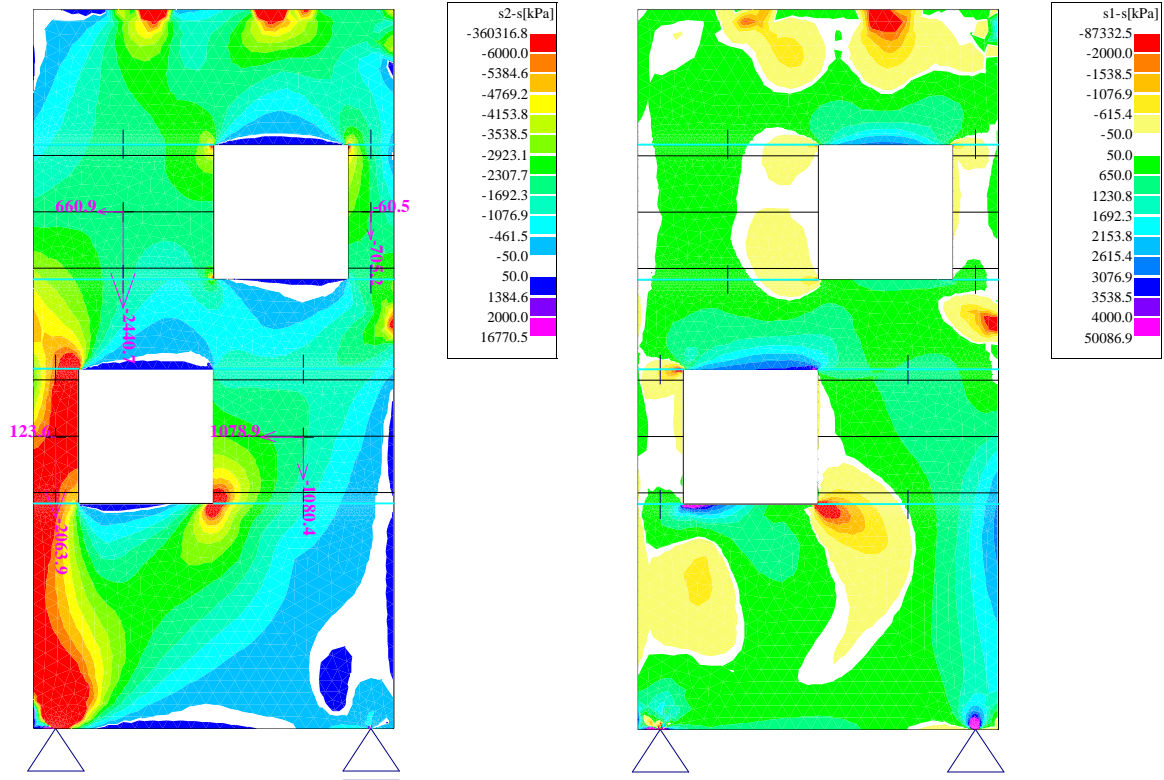
**Příhradové modely, které co nejlépe odpovídají pružnému rozdělení napětí v konstrukci, budou vždy vyžadovat méně vyztuže, než ty modely, které se od pružného řešení výrazně liší.** Pro kontrolu výsledků získaných výpočtem příhradovou analogií je jistě velmi dobré porovnání s výsledky získanými nelineárními MKP metodami.



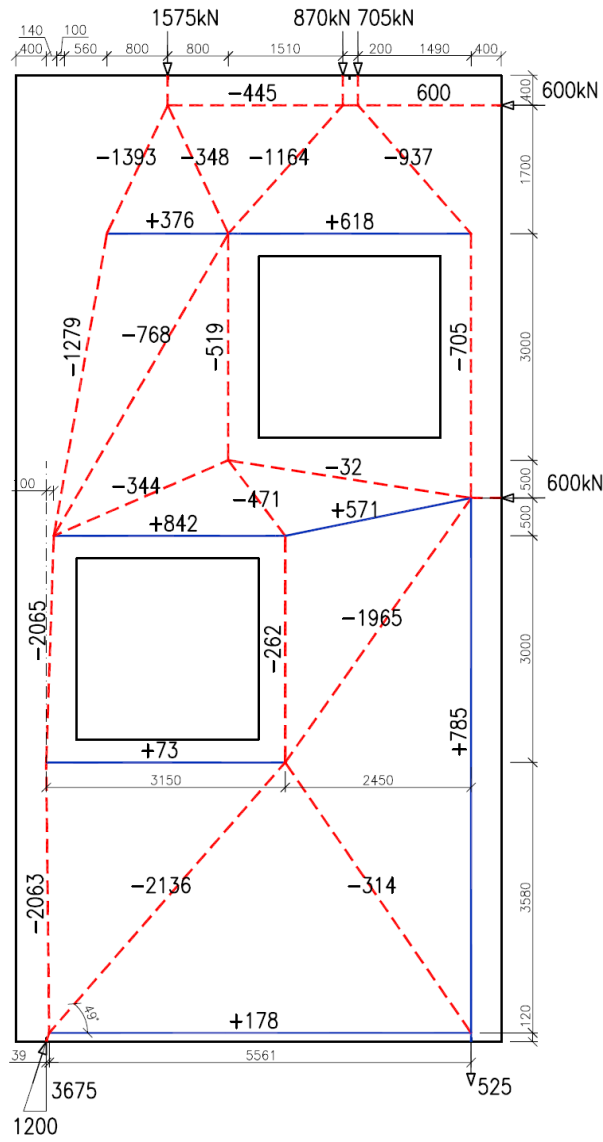
Příhradový model - Zatěžovací stav 1

### Kombinace zatěžovacích stavů 1 a 2

Příhradový model pro kombinaci zatěžovacích stavů 1 a 2 byl sestaven s ohledem na geometrii modelu pro 1. zatěžovací stav kvůli jejich následné superpozici. Polohu vzpěr a táhel volíme opět v souladu s ortogonálním směrem výztužných prutů a výsledků získaných pružným řešením.

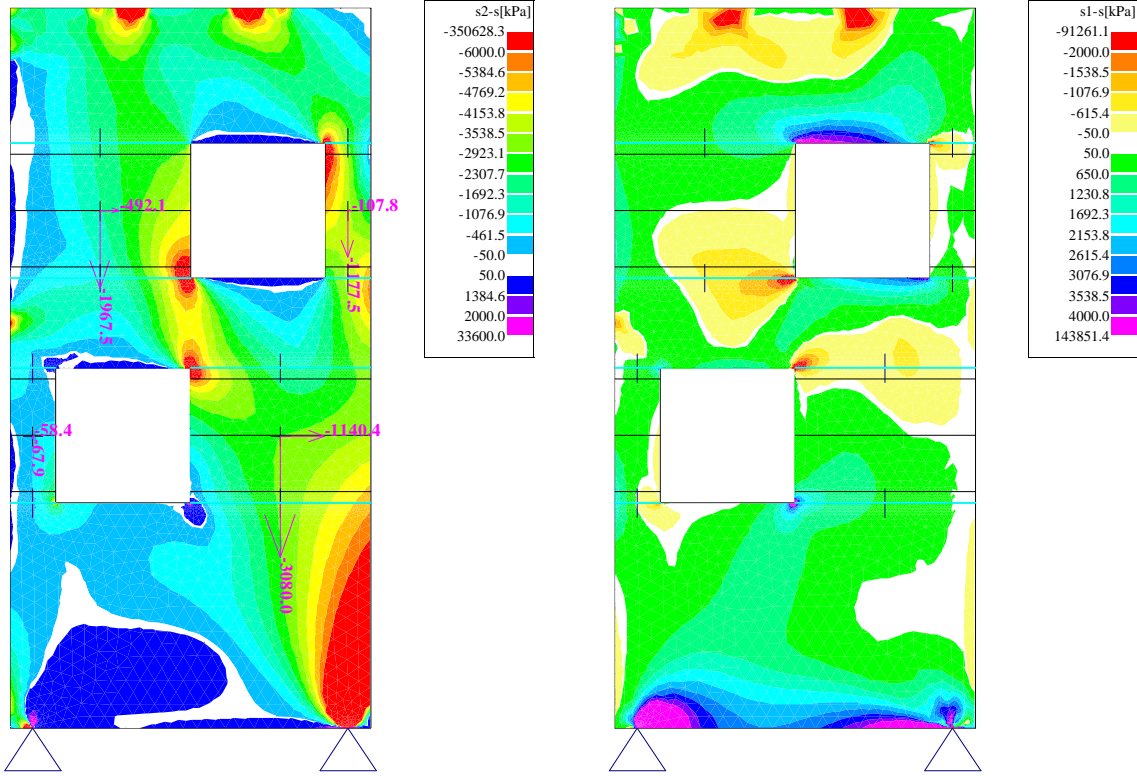


Kombinace zatěžovacích stavů ZS1+ZS2 - Izolinie hlavních napětí



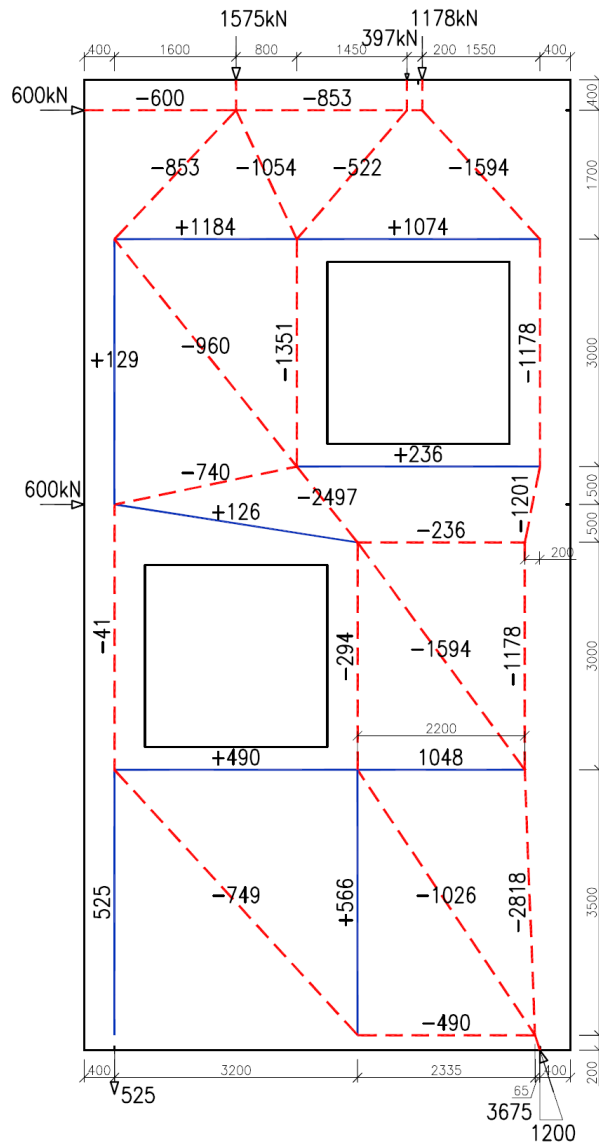
Kombinace zatěžovacích stavů ZS1+ZS2

**Kombinace zatěžovacích stavů 1 a 3**



Kombinace zatěžovacích stavů ZS1+ZS3 - Izolinie hlavních napětí





Kombinace zatěžovacích stavů ZS1+ZS3

Materiály:

Beton C25/30

$$f_{cd} = 1.25/1.5 = 16.67 \text{ MPa}$$

$$v = 1 - f_{ck} / 250 = 1 - 25/250 = 0.9$$

Uzel typu C-C-C

$$k_1 = 1.0, \sigma_{Rd,max} = 1.0 \cdot 0.9 \cdot 16.67 = 15.0 \text{ MPa}$$

Uzel typu C-C-T

$$k_2 = 0.85, \sigma_{Rd,max} = 0.85 \cdot 0.9 \cdot 16.67 = 12.75 \text{ MPa}$$

Uzel typu C-T-T

$$k_3 = 0.75, \sigma_{Rd,max} = 0.75 \cdot 0.9 \cdot 16.67 = 11.25 \text{ MPa}$$

Výztuž B500B

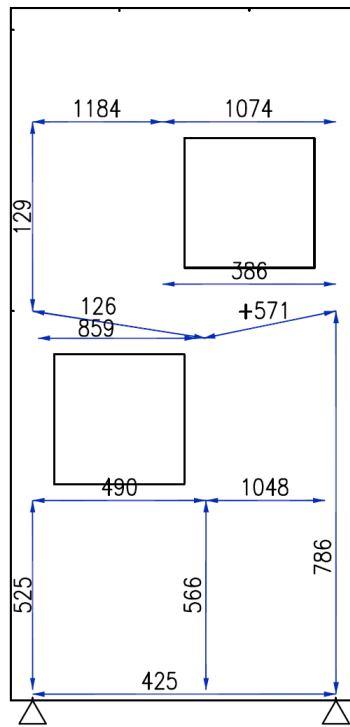
$$f_{yd} = 500/1.15 = 434.8 \text{ MPa}$$

### Návrh výztuže

Pro zachycení příčných tahů v tlačenech prutech (kontrolu trhlin) bude do celého modelu navržena minimální konstrukční výztuž. Jelikož je pro tři kombinace zatěžovacích stavů vždy rozdílná poloha a směr tlačenech prvků, navrhne ortogonální výztuž.

V obou směrech navrhne minimální konstrukční ortogonální výztuž plochy  $A_s \geq 0.003A_c$ .  
 $A_s = 0.003 \cdot 400 \cdot 1000 = 1200 \text{ mm}^2/\text{m}$  – tj. 2x  $\phi 12/180 \text{ mm}$ , tj.  $A_s = 1256 \text{ mm}^2$

Pro přehledný návrh vyztužení je v následujícím obrázku sestavena obálka tahových sil pro všechny kombinace zatěžovacích stavů.



Obálka tahových sil

Tabulka – návrh výztuže

$F_t$ [kN]	$A_{s,req}$ [mm <sup>2</sup> ]	$\varnothing$	$A_{s\varnothing}$ [mm <sup>2</sup> ]	Počet $\varnothing$	$A_{s,prov}$ [mm <sup>2</sup> ]	$l_{b,rqd}$
1184	2723	20	314,2	10	3142	698
1074	2470	20	314,2	10	3142	633
129	297	12	113,1	4	452	317
386	888	16	201,1	6	1206	474
126	290	12	113,1	4	452	310
859	1976	16	201,1	12	2413	527
571	1313	16	201,1	8	1608	524
490	1127	20	314,2	4	1257	721
1048	2410	20	314,2	8	2513	772
525	1208	12	113,1	12	1357	430
566	1302	12	113,1	14	1583	397
785	1806	16	201,1	8 $\varnothing$ 16+8 $\varnothing$ 12	2514	463
425	978	16	201,1	6	1206	522

Základní kotevní délka

$$\sigma_{sd} = \frac{A_{s,req}}{A_{s,prov}} \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_M} \quad l_{b,rqd} = \frac{\phi}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}$$

$$f_{bd} = 2,25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ct0,05d} = 2,25 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,8 / 1,5 = 2,7 \text{ MPa}$$

### Posouzení uzlových oblastí

Porovnání třech zatěžovacích stavů ukazuje, že nejvíce namáhaný styčník je oblast u levého uložení stěny při kombinaci zatěžovacích stavů 1 a 2.

#### Oblast levé podpory - C-C-C-T uzel

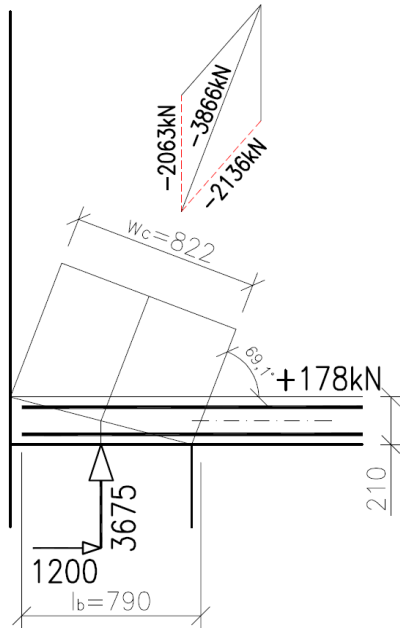
- styčník s tlakovými silami a táhlem kotveným v jednom směru

$$\sigma_{Rd,max} = 0,85 \cdot (1 - 25/250) \cdot 16,67 = 12,75 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{SdR} = 3675 \cdot 10^3 / (400 \cdot 800) = 11,48 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{SdR} < \sigma_{Rd,max}$$

Pro ověření návrhového napětí ve styčníku určíme výslednici sil v tlačných vzpěrách.



$$\text{šířka tlačné diagonály } w_c = w_t \cos \alpha + l_r \sin \alpha$$

$$w_c = 210 \cdot \cos 69,1 + 800 \cdot \sin 69,1 = 822 \text{ mm}$$

$$\sigma_{Sdc} = 3866 \cdot 10^3 / (400 \cdot 822) = 11,75 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Sdc} < \sigma_{Rd,max}$$

$$\sigma_{Sdt} = 178 \cdot 10^3 / (400 \cdot 210) = 2,1 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Sdt} < \sigma_{Rd,max}$$

Větší tahová síla ve výztuži vychází z prvního zatěžovacího stavu  $F_t = 425 \text{ kN}$ , na kterou je také navržena výztuž ( $6\phi R16$ )

$$\sigma_{Sdt} = 425 \cdot 10^3 / (400 \cdot 210) = 5,06 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Sdt} < \sigma_{Rd,max}$$

Zakotvení výztuže ve styčníku

Požadovaná kotevní délka výztuže ve styčníku je 522 mm (viz. tabulka – návrh výztuže)

$$l_{b,rqd} = 522 \text{ mm} < 790 \text{ mm}$$

#### Požadovaná roznášecí plocha pro vnášená zatížení

Osamělé síly na horní hraně stěny ve všech zatěžovacích stavech vytvářejí C-C-C styčníky. Proto pro posouzení lokálního namáhání použijeme návrhové napětí  $\sigma_{Rd,max} = 1,0 \cdot 9 \cdot 16,67 = 15,0 \text{ MPa}$ .

$$\text{Roznášecí plocha je rovna } A = 1575 \cdot 10^3 / 15 = 105000 \text{ mm}^2$$

Minimální požadovaná šířka roznášecí plochy (popř. plechu) je  $105000 / 400 = 262,5 \text{ mm} \sim 300 \text{ mm}$

Uložení vodorovných sil zatěžovacích stavů 2 a 3 tvoří C-T-T styčníky. Návrhové napětí ve styčnicích bude rovno  $\sigma_{Rd,max} = 0,75 \cdot 0,9 \cdot 16,67 = 11,25 \text{ MPa}$

$$\text{Roznášecí plocha je rovna } A = 600 \cdot 10^3 / 11,25 = 53333 \text{ mm}^2$$

Minimální požadovaná šířka roznášecí plochy (popř. plechu) je  $53333 / 400 = 133 \text{ mm} \sim 150 \text{ mm}$

Výše posouzené uzlové oblasti jsou nejvíce namáhaná místa / uzly v konstrukci pro vše zatěžovací stavy. Přestože jsou v konstrukci 2 velké otvory, je v jejich okolí dostatek místa pro bezproblémový roznos zatížení – šířky všech vzpěr a uzlů jsou dostatečné pro splnění podmínky maximálního návrhového napětí.

#### Zakotvení výztuže

V tabulce – návrh výztuže jsou uvedeny požadované kotevní délky výztuže táhel pro obálku zatěžovacích stavů. Zakotvení výztuže všech táhel v tomto případě nevyžaduje žádné ohnutí

výztuže či háky. Geometrie všech uzlových oblastí a šířka tlačných prutů – šířka tlakových oblastí potřebných pro zakotvení výztuže je dostatečná pro provedení rovných kotevních délek. Svislá i vodorovná výztuž celé stěny bude po obvodu a v otvorech zakončena U profily  $\text{Ø}12$ .

Jedinými místy v konstrukci, které vyžadují detailnější návrh zakotvení výztuže, jsou oblasti tažených podpor pro kombinace zatěžovacích stavů 1+2 a 1+3. Výztuž svislých táhel v těchto případech bude zakotvena v podporách.

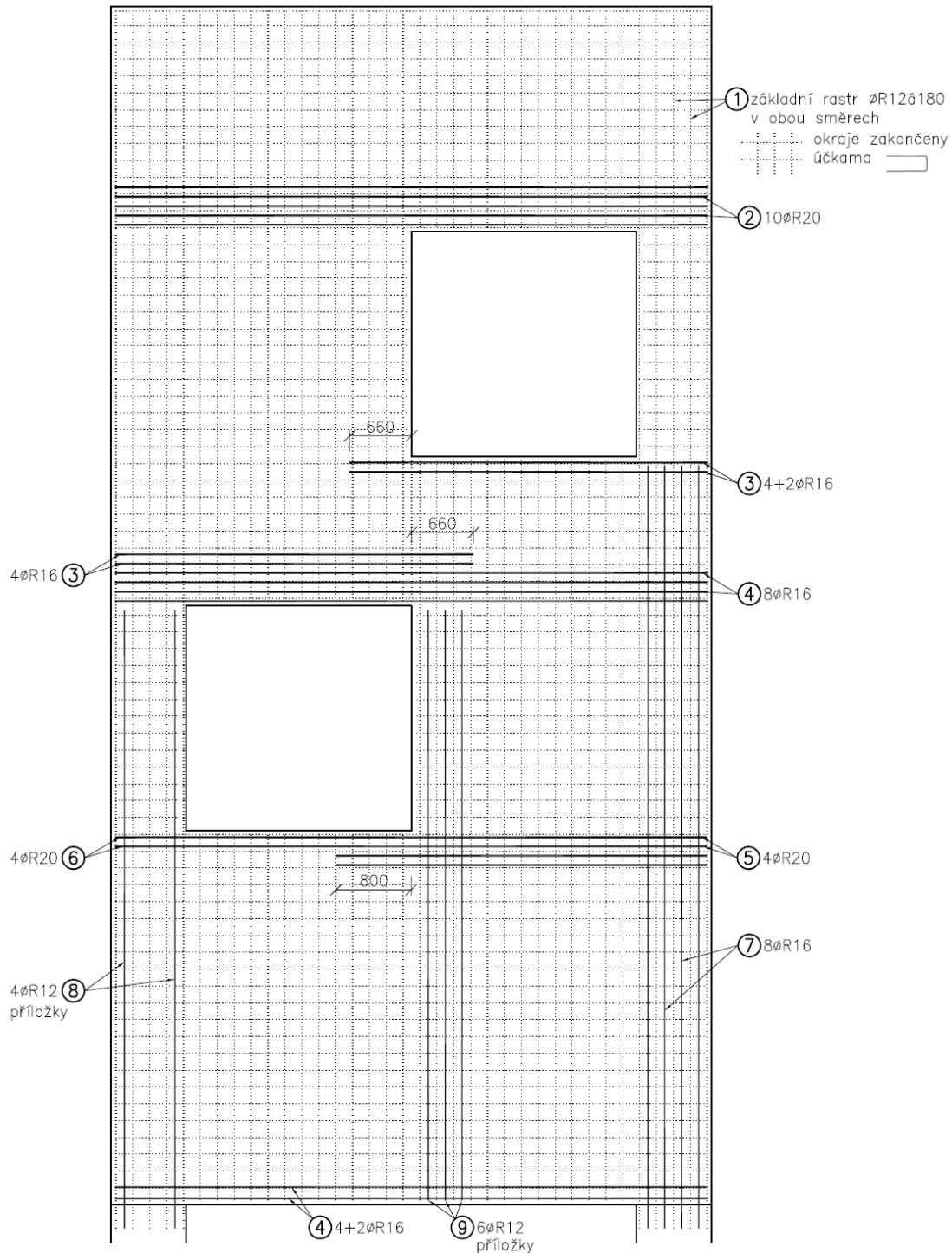
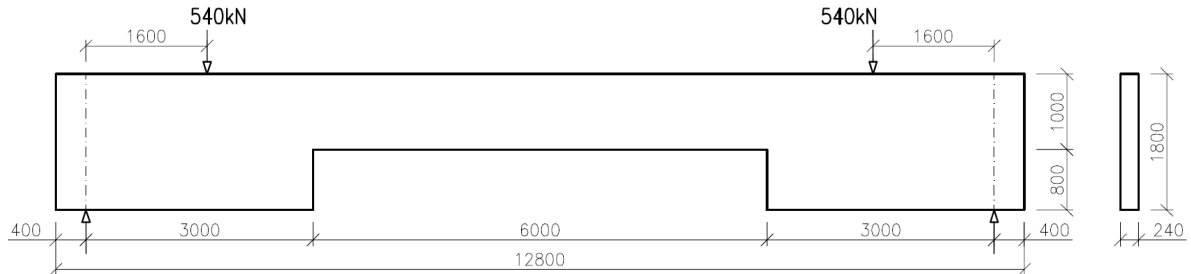


Schéma výztuže

### 3.8. Nosník s proměnnou výškou

Navrhněte výztuž nosníku s proměnnou výškou. Účinné rozpětí nosníku je 12,0m, šířka nosníku je 0,24m, výška nosníku u podpor 1,8m, výška ve střední části 1,0m. Nosník je zatížen dvěma lokálními silami návrhové hodnoty  $F_d = 1600\text{kN}$  s působištem 1,6m od podpor. Vlastní tíha konstrukce je v tomto zatížení zahrnuta. Nosník je z betonu C30/37 a oceli třídy B500B. Krytí je 25mm.



#### Materiály

Beton C30/37

$$f_{cd} = 1.30/1.5 = 20\text{MPa}$$

$$v = 1 - f_{ck} / 250 = 1 - 30/250 = 0.88$$

Uzel typu C-C-C

$$k_1 = 1.0, \sigma_{Rd,max} = 1.0 \cdot 0.88 \cdot 20.0 = 17.60\text{MPa}$$

Uzel typu C-C-T

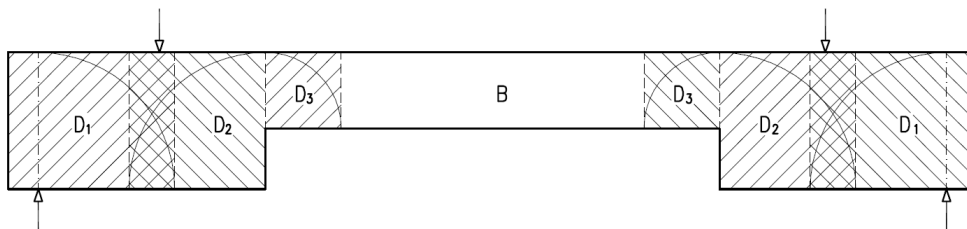
$$k_2 = 0.85, \sigma_{Rd,max} = 0.85 \cdot 0.88 \cdot 20.0 = 14.96\text{MPa}$$

Výztuž B500B

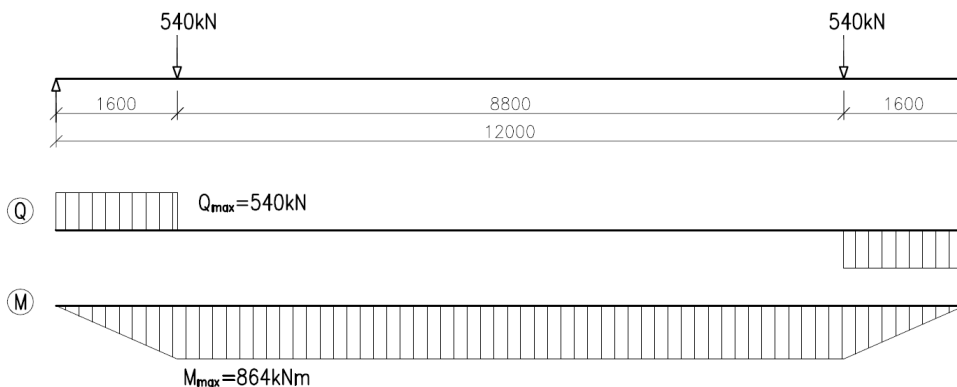
$$f_{yd} = 500/1.15 = 434.8\text{MPa}$$

#### Rozdělení nosníku na B- a D-oblasti

Nosník lze rozdělit na oblasti spojitosti (B-oblasti) a oblasti nespojitosti, poruchové oblasti (D-oblasti). Prostřední část nosníku lze považovat za B-oblast, bude zde platit předpoklad zachování rovinnosti průřezu. Zbývající části se skládají z D-oblastí, které dohromady vytváří dvě kombinované D-oblasti. Šířka D-oblasti se uvažuje rovna výšce průřezu.



#### Vnitřní síly



#### Výpočet sil v B-oblasti

Nejdříve je nutné stanovit vnitřní síly na hranici D-oblastí. Pro určení tahové a tlakové síly a jejich poloh budeme uvažovat klasickou teorii ohybu.

$$0,8 \cdot x \cdot b \cdot f_{cd} \cdot (d - 0,4x) = M_{Sd}$$

uvedený vztah vede na kvadratickou rovnici:

$$(0,32 \cdot b \cdot f_{cd}) \cdot x^2 - (0,8 \cdot b \cdot f_{cd} \cdot d) \cdot x + M_{Sd} = 0$$

odhad účinné výšky  $d = 1000 - (25 + 12 + 10 + 80) = 873 \text{ mm}$

po dosazení:

$$(0,32 \cdot 300 \cdot 20) \cdot x^2 - (0,8 \cdot 300 \cdot 20 \cdot 873) \cdot x + 864 \cdot 10^6 = 0,$$

$$1920 \cdot x^2 - 4190400 \cdot x + 864 \cdot 10^6 = 0,$$

odtud získáme  $x_1 = 1952 \text{ mm}$ ,

$$x_2 = 231 \text{ mm}.$$

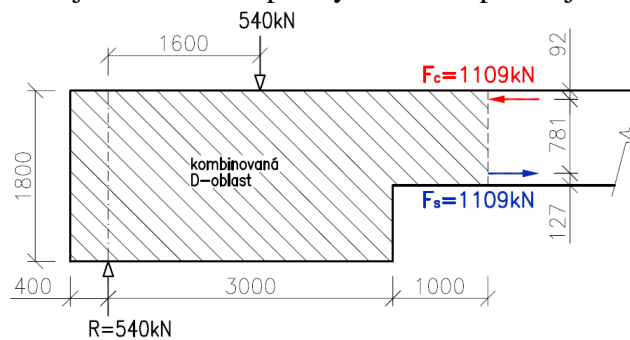
kontrola výšky tlačené oblasti  $\xi = x/d = 231/873 = 0,265$  OK

Síla v betonu bude rovna  $F_c = 0,8 \cdot x \cdot b \cdot f_{cd} = 0,8 \cdot 231 \cdot 300 \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 1109 \text{ kN}$ , a působí ve vzdálenosti  $0,4 \cdot x = 0,4 \cdot 231 = 92,4 \text{ mm}$  od horního líce průřezu.

Tahová síla ve výztuži se rovná tlakové síle v betonu, tedy  $F_s = F_c = 1109 \text{ kN}$  a působí v těžišti výztužných prutů – tj. ve vzdálenosti 127 mm od spodního líce průřezu.

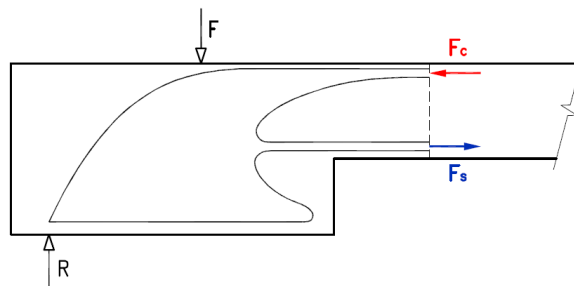
### Okrajové podmínky D-oblasti

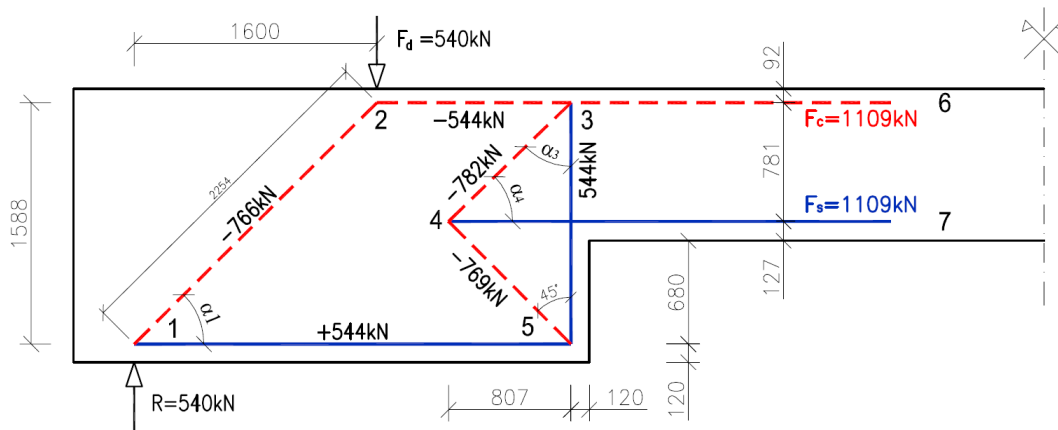
Nyní můžeme „vyříznout“ D-oblast z konstrukce a definovat vnitřní síly na její hranici. Síly  $F_c$  a  $F_s$  z přilehlé B-oblasti jsou tzv. hraničními silami uvažovaných D-oblastí. Tyto síly společně s jejich polohami jsou základem pro vytvoření odpovídajícího příhradového modelu.



### Příhradový model

Pro D-oblast lze uvažovat tok sil podle následujícího obrázku. S ohledem na předpokládané trajektorie sil (napětí) v konstrukci sestojíme odpovídající příhradový model.





### Výpočet sil v prutech příhradového modelu

Síly z přilehlé B-oblasti:  $F_{36} = F_c = -1109 \text{ kN}$

$$F_{47} = F_s = 1109 \text{ kN}$$

Styčnick 1:  $F_{12} = -R/\sin\alpha_1$   
 $\alpha_1 = \arctan 1588/1600 = 44,8^\circ$   
 $F_{12} = -540/\sin 44,8 = -766 \text{ kN}$   
 $F_{15} = -F_{12} \cdot \cos\alpha_1$   
 $F_{15} = 766 \cdot \cos 44,8 = 544 \text{ kN}$

Styčnick 2:  $F_{23} = F_{12} \cdot \cos\alpha_1 = -F_{15} = -544 \text{ kN}$

Styčnick 5:  $F_{45} = -F_{15}/\cos 45 = -544/\cos 45 = -769 \text{ kN}$   
 $F_{53} = -F_{54} \cdot \cos 45 = 769 \cdot \cos 45 = 544 \text{ kN}$

Styčnick 3:  $F_{34} = -F_{35}/\cos\alpha_3 = -544/\cos 45,9 = -782 \text{ kN}$   
 $\alpha_3 = 807/781 = 45,9^\circ$   
 $F_{34} = 548/\cos 46,3 = 793 \text{ kN}$

Kontrola – podmínka rovnováhy ve vodorovném směru ve styčnicku 3:

$$F_{23} + F_{34} \cdot \sin\alpha_3 + F_{36} = -544 - 782 \cdot \sin 45,9 + 1109 \equiv 0 \text{ kN} \quad \text{OK}$$

### Návrh výztuže

Návrh tahové výztuže střední části nosníku

$$F_{47} = 1109 \text{ kN}$$

$$A_{s,req} = 1109000/434,8 = 2551 \text{ mm}^2 - \text{navrhujeme } 9\phi 20 - A_{s,prov} = 2827 \text{ mm}^2$$

Zakotvení výztuže ve styčnicku 4

Základní kotevní délka

$$\sigma_{sd} = \frac{A_{s,req}}{A_{s,prov}} \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_M} \quad l_{b,rqd} = \frac{\phi}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}$$

$$f_{bd} = 2,25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ct0,05d} = 2,25 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 2,0/1,5 = 3,0 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{sd} = 2551/2827 \cdot (500/1,15) = 392,3 \text{ MPa}$$

$$\phi 20 - l_{b,rqd} = 20/4 \cdot (392,3/3,0) = 654 \text{ mm}$$

$$\text{Návrhová kotevní délka je } l_{b,d} = 654 \cdot 1/0,7 = 934 \text{ mm}$$

Návrh výztuže táhla  $F_{15}$  a  $F_{53}$

$$F_{15} = F_{53} = 544 \text{ kN}$$

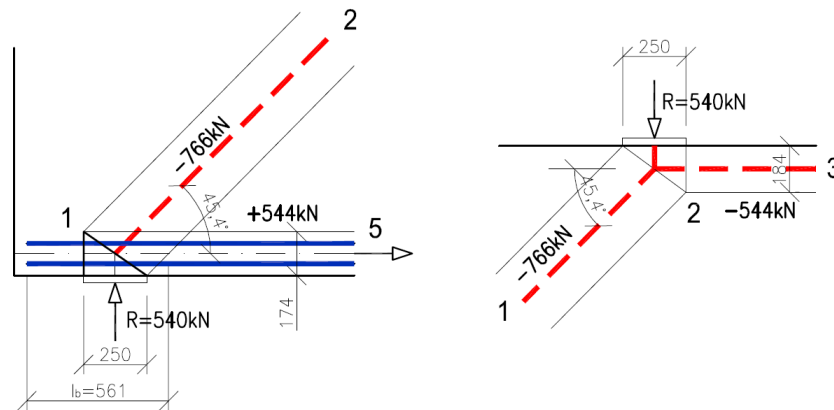
$$A_{s,req} = 544000/434,8 = 1251 \text{ mm}^2 - \text{navrhujeme } 6\phi 20 - A_{s,prov} = 1885 \text{ mm}^2$$

Základní kotevní délka

$$\sigma_{sd} = 1251/1885 \cdot (500/1,15) = 0,664 \cdot 434,8 = 289 \text{ MPa}$$

$$l_{b,rqd} = 20/4 \cdot (289/3,0) = 481 \text{ mm}$$

## Posouzení styčnicků



### Styčnick 1- C-C-T uzel

Je potřeba navrhnout velikost roznášecí desky tak, aby byla splněna podmínka návrhového napětí ve styčnicku.

Uzel typu C-C-T  $k_2 = 0,85$ ,  $\sigma_{Rd,max} = 0,85 \cdot 0,88 \cdot 20,0 = 14,96 \text{ MPa}$

$A_{req} = R / \sigma_{Rd,max} = 540 \cdot 10^3 / 14,96 = 36096 \text{ mm}^2$  – navrhne roznášecí desku 250x200mm

šířka tlačené diagonály  $w_{c12} = w_t \cos \alpha + l_r \sin \alpha = 174 \cdot \cos 45,4 + 250 \cdot \sin 45,4 = 300 \text{ mm}$

$\sigma_{Sd 12} = 766 \cdot 10^3 / (240 \cdot 300) = 10,6 \text{ MPa}$

$\sigma_{Sd 12} < \sigma_{Rd,max}$

$\sigma_{Sd 15} = 544 \cdot 10^3 / (240 \cdot 174) = 13,0 \text{ MPa}$

$\sigma_{Sd 1R} < \sigma_{Rd,max}$

Pro zakotvení tahové výztuže bude výztuž dovedena ke konci nosníku. Pro zakotvení výztuže je k dispozici délka 561mm >  $l_{b,rqd} = 481 \text{ mm}$

Styčnick 1 vyhovuje.

### Styčnick 2- C-C-C uzel

Pro uložení bodové síly ve styčnicku 2 použijeme roznášecí desku stejných rozměrů 250x200mm.

Uzel typu C-C-C  $k_1 = 1,0$ ,  $\sigma_{Rd,max} = 1,0 \cdot 0,88 \cdot 20,0 = 17,60 \text{ MPa}$

šířka tlačené diagonály  $w_{c12} = w_{c23} \cos \alpha + l_r \sin \alpha = 184 \cdot \cos 45,4 + 250 \cdot \sin 45,4 = 307 \text{ mm}$

$\sigma_{Sd 21} = 766 \cdot 10^3 / (240 \cdot 307) = 10,4 \text{ MPa}$

$\sigma_{Sd 21} < \sigma_{Rd,max}$

$\sigma_{Sd 23} = 544 \cdot 10^3 / (240 \cdot 184) = 12,3 \text{ MPa}$

$\sigma_{Sd 23} < \sigma_{Rd,max}$

Styčnick 2 vyhovuje.

### Zakotvení výztuže táhla 35

Výztuž zakotvíme pomocí ohybů do tlačené zóny.

$l_{b,rqd} = 20/4 \cdot (289/3,0) = 481 \text{ mm}$

Návrhová kotevní délka je  $l_{b,d} = 481 \cdot 0,7/0,7 = 481 \text{ mm}$

- součinitel 0,7 =  $\alpha_1$  – součinitel tvaru prutu - ohyb

- součinitel 1/0,7 – špatné podmínky soudržnosti

Kontrola průměru ohnutí prutů

$\varnothing_{m,min} \geq (0,664 \cdot 434,8 \cdot 314) \cdot ((1/47) + 1/(2 \cdot 20)) / 20 = 210 \text{ mm}$



### Návrh smykové výztuže a výztuže na zachycení příčných tahů

V oblasti mezi uložením a bodovou silou musíme navrhnout svislou smykovou výztuž a výztuž na zachycení vznikajících příčných tahů v betonové vzpěře. Svislou smykovou výztuž navrhujeme na redukovanou posouvající sílu  $\beta V_{ED}$ .

$$\beta = a_v/(2d) = (1600-250)/(2 \cdot 1713) = 0,394, \beta V_{ED} = 0,39 \cdot 540 = 213 \text{ kN}$$

$$A_{s,req} = 213 \cdot 10^3 / 434,8 = 490 \text{ mm}^2 - \text{v oblasti } 0,75a_v = 0,75 \cdot 1350 = 1013 \text{ mm}$$

Smykovou výztuž doplníme výztuží zachycující příčné tahy v betonové vzpěře.

Délka betonové vzpěry je  $h = 2254 \text{ mm}$ , šířka vzpěry je  $w_c = 300 \text{ mm}$  a síla v betonové vzpěře je  $F_{12} = -766 \text{ kN}$ .

Příčný tah betonové vzpěry je:

$$2 \cdot F_t = 0,5 \cdot (1 - 0,7 \cdot a/h) \cdot F = 0,5 \cdot (1 - 0,7 \cdot 300/2254) \cdot 766 = 0,453 \cdot 766 = 347 \text{ kN}$$

Příčný tah se rozdělí do svislé složky  $347 \cdot \cos 45,4 = 244 \text{ kN}$  a vodorovné složky  $347 \cdot \sin 45,4 = 247 \text{ kN}$ .

Celkovou svislou výztuž navrhujeme na sílu  $213 + 1,2 \cdot 244 = 506 \text{ kN}$

$$A_{s,req} = 506 \cdot 10^3 / 434,8 = 1164 \text{ mm}^2$$

– navrhujeme  $2\text{Ø}R10/150 \text{ mm}$  v oblasti od konce nosníku po místo uložení zatížení na horní hraně nosníku.

Vodorovná konstrukční výztuž pro zachycení příčných tahů

$$A_{s,req} = 1,2 \cdot 247 \cdot 10^3 / 434,8 = 296 \text{ mm}^2$$

– navrhujeme  $2\text{Ø}R10/200 \text{ mm}$

$$\rho_s = 157 / (200 \cdot 240) = 0,033 > \rho_{min} = 0,03 \quad \text{OK}$$

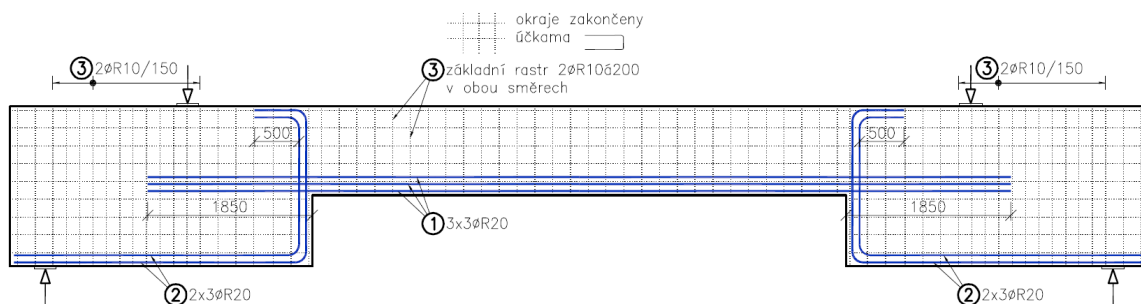
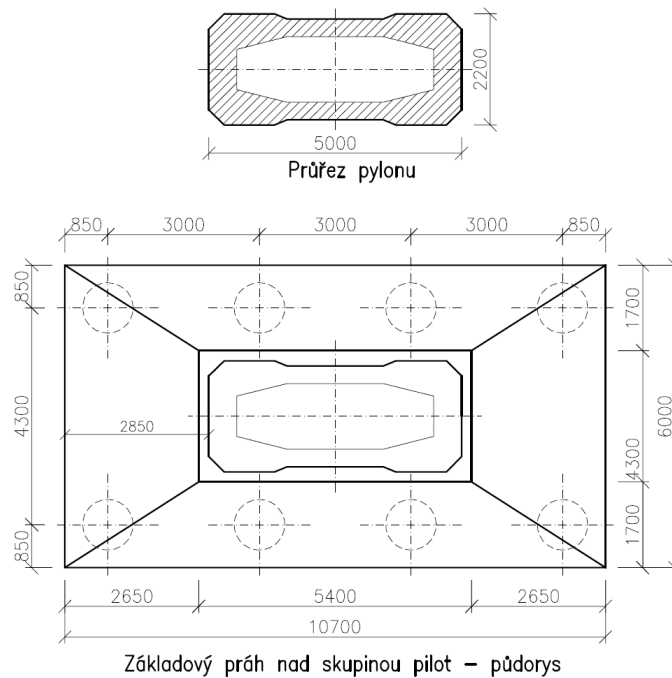


Schéma výztuže

### 3.9. Základový práh nad skupinou pilot

Mostní pylon je založen na skupině 8 pilot. Síly z pylonu se roznášejí do pilot přes základový práh. Na obrázku je uvedena geometrie konstrukce a návrhové hodnoty zatížení (MSÚ) mostního pylonu.



Kvůli zjednodušení výpočetního modelu budeme pro určení normálového napětí na konci pylonu uvažovat průřez pylonu jako plný.

Normálové napětí na hranici základového prahu a pylonu bude dosahovat hodnot:

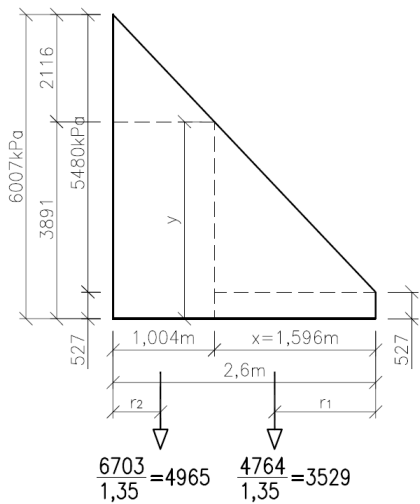
$$\sigma_{1,2} = N/A \pm M/W$$

$$W = 1/6 \cdot b \cdot h^2 = 1/6 \cdot (5,42,6^2) = 6,084 \text{ m}^3$$

$$\sigma_{1,2} = 45870 / (2,65,4) \pm 16672 / 6,084 = 3267 \pm 2740 = 6007 \text{ kPa}$$

$$527 \text{ kPa}$$

Pro sestavení geometrie příhradového modelu musíme určit polohu bodových sil na rozhraní pylonu a roznášecího prahu. Poloha sil odpovídá těžišti příslušných napěťových ploch.



$$3529 = 527 \cdot x + 5480/2,6 \cdot x \cdot x/2$$

$$1054 \cdot x^2 + 527 \cdot x - 3529 = 0$$

$$x_{1,2} = +1,596$$

$$-2,097$$

$$F_1 = 527 \cdot 1,6 + 5480/2,6 \cdot 1,6^2/2 = 3529$$

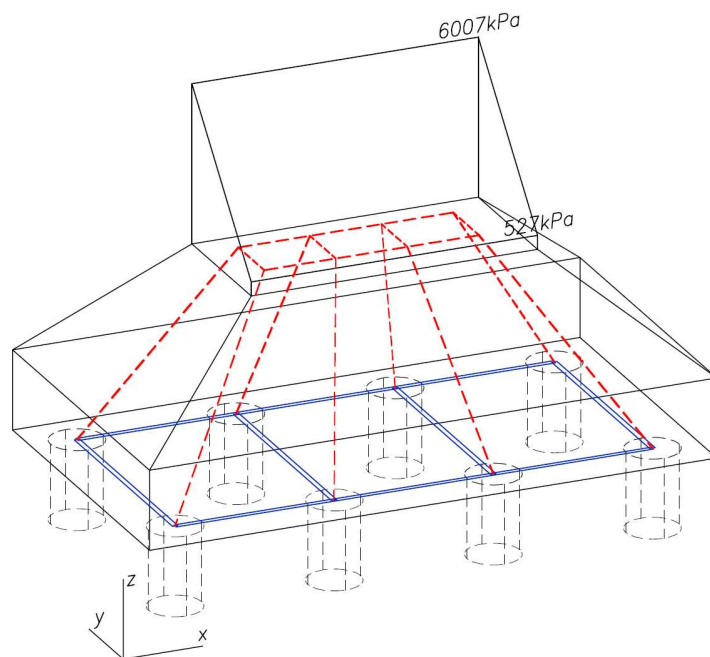
$$y = 527 + (5480/2,6) \cdot x = 527 + (5480/2,6) \cdot 1,596 = 3890,9$$

$$F_2 = (2,6 - 1,596) \cdot 3890,9 + (2,6 - 1,596) \cdot (6007 - 3890,9)/2 = 4965 \quad \text{OK}$$

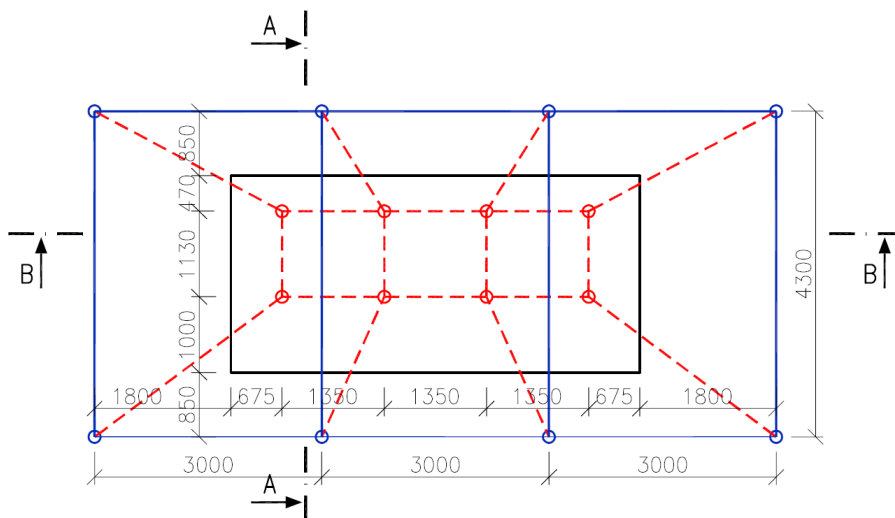
Síly působí v těžišti napěťových ploch

$$r_1 = (1,596^2 \cdot 527/2 + 3364 \cdot 1,596^2/3) / (1,596 \cdot 527 + 3364 \cdot 1,596/2) = 1,0\text{m}$$

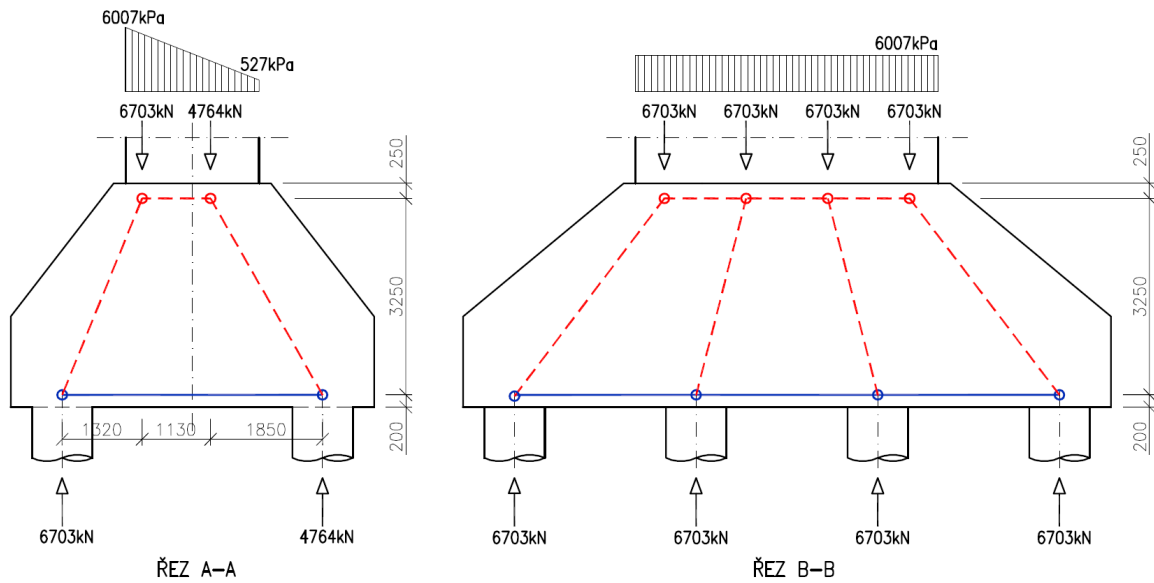
$$r_2 = (1,004^2 \cdot 3891/2 + 2116 \cdot 1,004^2/6) / (1,004 \cdot 3891 + 2116 \cdot 1,004/2) = 0,47\text{m}$$



Přhradový model - 3D pohled

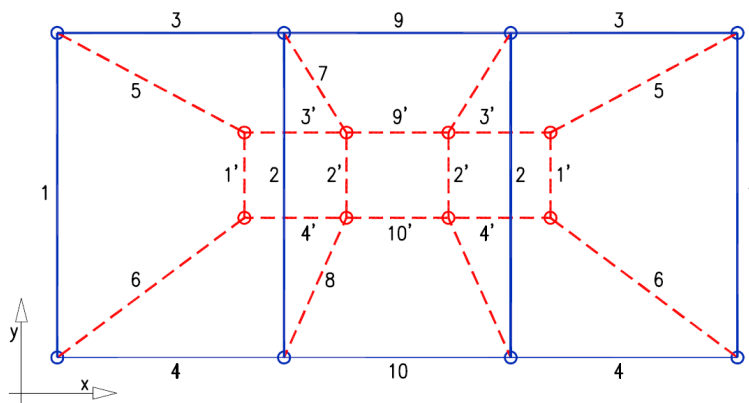


Rozměry přhradového modelu – pohled shora



### Výpočet vnitřních sil příhradového modelu

$$\begin{aligned}
 F_{6z} &= 4764 \text{ kN} & F_{6x} &= F_4 = 4764 \cdot (1800 + 675) / 3250 = 3628 \text{ kN} \\
 & & F_{6y} &= F_1 = 4764 \cdot (1000 + 850) / 3250 = 2712 \text{ kN} \\
 & & F_6 &= (F_{6x}^2 + F_{6y}^2 + F_{6z}^2)^{0,5} = 6574 \text{ kN} \\
 F_{5z} &= 6703 \text{ kN} & F_{5x} &= F_3 = 6703 \cdot (1800 + 675) / 3250 = 5104 \text{ kN} \\
 & & F_{5y} &= F_1 = 6703 \cdot (470 + 850) / 3250 = 2722 \text{ kN} & \pm \text{OK} \\
 & & F_5 &= (F_{5x}^2 + F_{5y}^2 + F_{5z}^2)^{0,5} = 8854 \text{ kN} \\
 F_{8z} &= 4764 \text{ kN} & F_{8x} &= F_8 = 4764 \cdot 825 / 3250 = 1209 \text{ kN} \\
 & & F_{10} &= F_4 + F_{8x} = 3628 + 1209 = 4837 \text{ kN} \\
 & & F_{8y} &= F_2 = 4764 \cdot (1000 + 850) / 3250 = 2712 \text{ kN} \\
 & & F_8 &= (F_{8x}^2 + F_{8y}^2 + F_{8z}^2)^{0,5} = 5614 \text{ kN} \\
 F_{7z} &= 6703 \text{ kN} & F_{7x} &= F_3 = 6703 \cdot 825 / 3250 = 1702 \text{ kN} \\
 & & F_9 &= F_3 + F_{7x} = 5104 + 1702 = 6806 \text{ kN} \\
 & & F_{7y} &= F_2 = 6703 \cdot (470 + 850) / 3250 = 2722 \text{ kN} & \pm \text{OK} \\
 & & F_7 &= (F_{7x}^2 + F_{7y}^2 + F_{7z}^2)^{0,5} = 7432 \text{ kN}
 \end{aligned}$$



Prut	Síla [kN]
1 / 1'	2712 / - 2712
2 / 2'	2712 / - 2712
3 / 3'	5104 / - 5104
4 / 4'	4837 / - 4837
5	- 8854
6	- 6574
7	- 7432
8	- 5614
9 / 9'	6806 / - 6806
10 / 10'	4837 / - 4837

## Materiály

Beton C30/37	$f_{cd} = 1.30/1.5 = 20\text{MPa}$
	$v = 1 - f_{ck} / 250 = 1 - 30/250 = 0.88$
Uzel typu C-C-C	$k_1 = 1.0, \sigma_{Rd,max} = 1.0 \cdot 0.88 \cdot 20.0 = 17.60\text{MPa}$
Uzel typu C-C-T	$k_2 = 0.85, \sigma_{Rd,max} = 0.85 \cdot 0.88 \cdot 20.0 = 14.96\text{MPa}$
Výztuž B500B	$f_{yd} = 500/1.15 = 434.8\text{MPa}$

## Návrh výztuže

### Podélná výztuž

$$F_{s,max}^9 = 6806 \text{ kN}$$

$$A_{s,req} = 6806 \cdot 10^3 / 434.8 = 15653 \text{mm}^2 - \text{navrhne } 3 \times 8 \text{ } \phi 32 \text{ á } 120 \text{mm} - A_{s,prov} = 19302 \text{mm}^2$$

Základní kotevní délka

$$\sigma_{sd} = \frac{A_{s,req}}{A_{s,prov}} \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_M} \quad l_{b,rqd} = \frac{\phi}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}$$

$$f_{bd} = 2.25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ct0,05d} = 2.25 \cdot 1.1 \cdot 2.0 / 1.5 = 3.0 \text{MPa}$$

$$\sigma_{sd} = 15653 / 19302 \cdot (500 / 1.15) = 352.6 \text{MPa}$$

$$\phi 32 - l_{b,rqd} = 32 / 4 \cdot (352.6 / 3.0) = 940 \text{mm}$$

$$\text{Návrhová kotevní délka je } l_{b,d} = 940 \cdot 1.0 = 940 \text{mm}$$

### Příčná výztuž

$$F_{s,max}^1 = 2712 \text{ kN}$$

$$A_{s,req} = 2712 \cdot 10^3 / 434.8 = 6237 \text{mm}^2 - \text{navrhne } 2 \times 8 \text{ } \phi 25 \text{ á } 120 \text{mm} - A_{s,prov} = 7854 \text{mm}^2$$

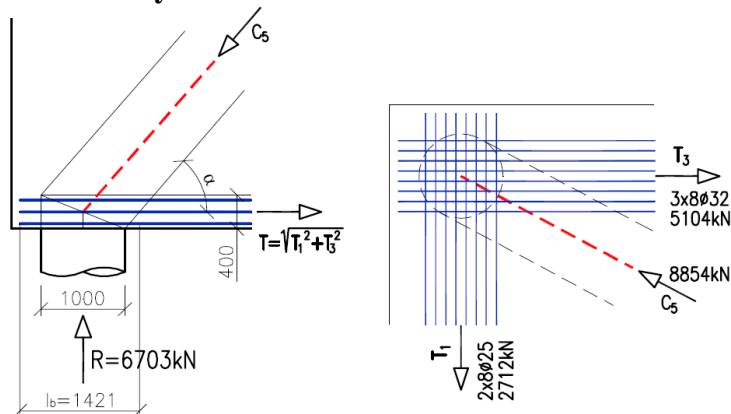
Základní kotevní délka

$$\sigma_{sd} = 6237 / 7854 \cdot (500 / 1.15) = 345.3 \text{MPa}, f_{bd} = 3.0 \text{MPa}$$

$$\phi 32 - l_{b,rqd} = 25 / 4 \cdot (345.3 / 3.0) = 719 \text{mm}$$

$$\text{Návrhová kotevní délka je } l_{b,d} = 719 \cdot 1.0 = 720 \text{mm}$$

## Posouzení styčnicků



### Styčnick 1- C-C-T uzel (nejvíce zatížený)

$$\text{Uzel typu C-C-T} \quad k_2 = 0.85, \quad \sigma_{Rd,max} = 0.85 \cdot 0.88 \cdot 20.0 = 14.96 \text{MPa}$$

$$T = (T_1^2 + T_3^2)^{0.5} = 5780 \text{kN}$$

$$\arcsin \alpha = T / C_5 = 6703 / 8854 = 49.2^\circ$$

$$\text{šířka tlacené diagonály } w_{c12} = w_t \cos \alpha + l_r \sin \alpha = 400 \cdot \cos 49.2 + 1000 \cdot \sin 49.2 = 1018 \text{mm}$$

$$\sigma_{SdR} = 6703 \cdot 10^3 / (\text{PI} \cdot 0.5^2) = 8.53 \text{MPa}$$

$$\sigma_{SdR} < \sigma_{Rd,max}$$

$$\sigma_{Sd5} = 8854 \cdot 10^3 / (\text{PI} \cdot 0.5^2) = 11.27 \text{MPa} \text{ (pro zjednodušení jsme eliptickou plochu vzpěry uvažovali jako kruhovou)}$$

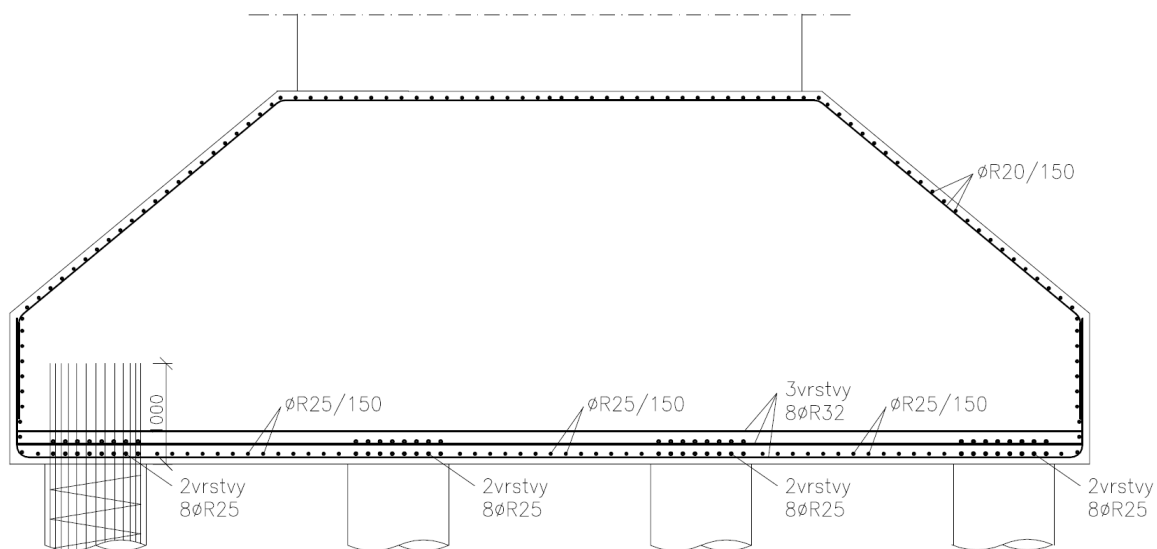
$$\sigma_{Sd5} < \sigma_{Rd,max}$$

$$\sigma_{SdT} = 5780 \cdot 10^3 / (1.0 \cdot 4) = 14,45 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{SdT} < \sigma_{Rd,max}$$

Pro zakotvení tahové výztuže bude výztuž dovedena rovně za uzlovou oblast. Pro zakotvení výztuže je k dispozici délka  $1421 \text{ mm} > l_{b,d} = 940 \text{ mm}$

Styčnick 1 vyhovuje.



Spodní výztuž

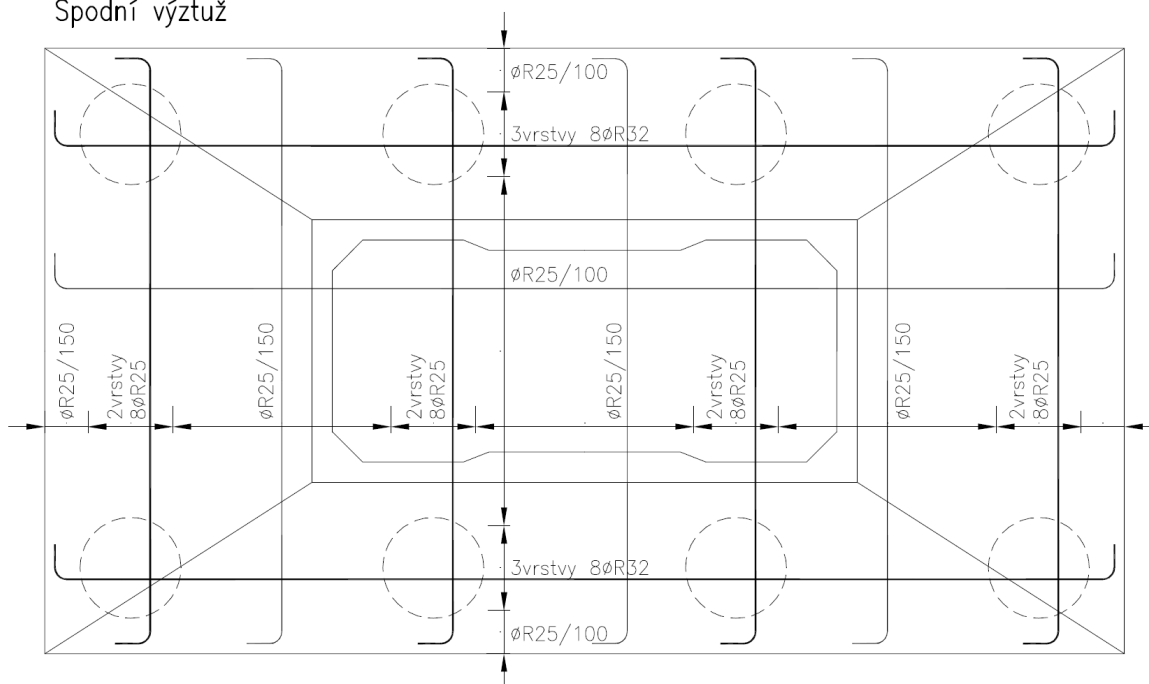
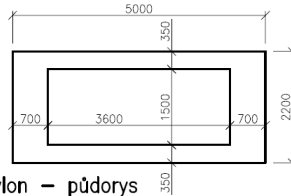


Schéma výztuže

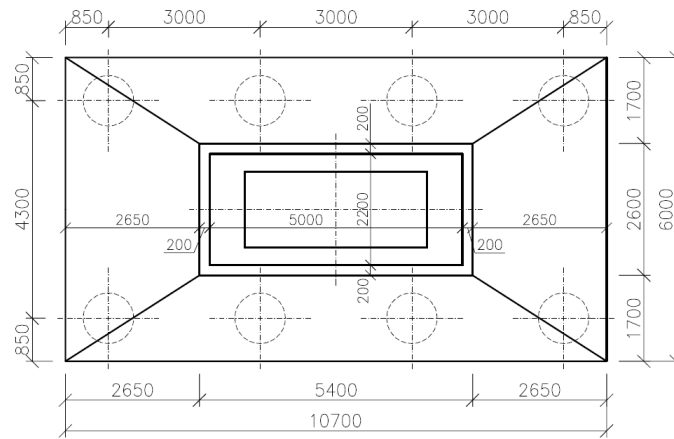
## Zpřesnění modelu

Nyní budeme uvažovat průřez pylonu jako obdélníkový průřez s otvorem uprostřed, tak jak tomu je ve skutečnosti. Výsledný příhradový model je trochu více komplikovaný kvůli poloze výslednicových sil na hranici pylonu a základového prahu. Pro zajištění rovnováhy přibudou dvě vzpěry na horním i spodním líci základového prahu.

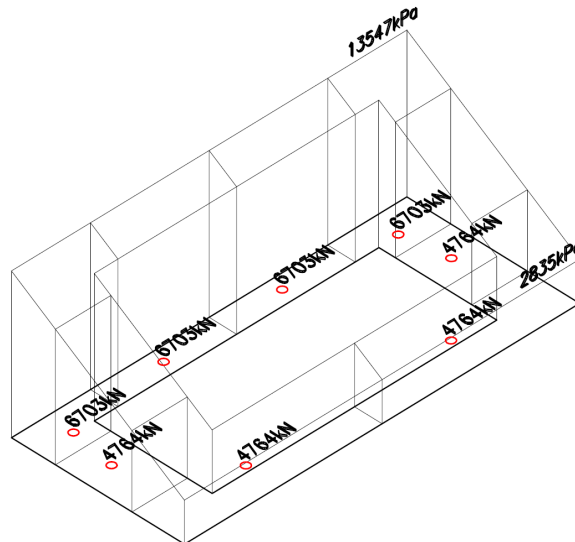
Stěny pylonu budeme uvažovat konstantní tloušťky 0,35m a 0,7m.



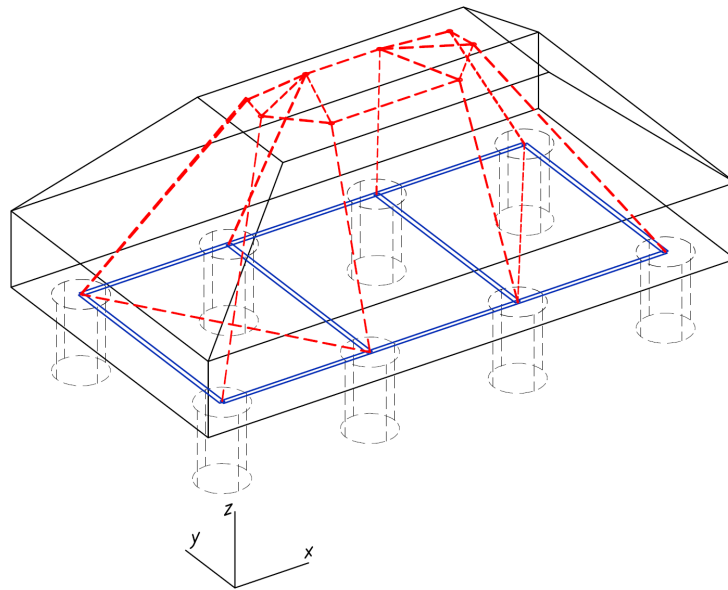
Pylon - půdorys



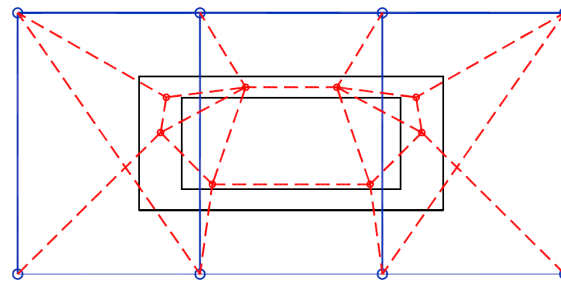
Základový práh nad skupinou pilot - půdorys



Průběh normálového napětí na hranici základového prahu a pylonu



Příhradový model - 3D pohled



Příhradový model – pohled shora

Pokud bychom vyčíslili vnitřní síly upraveného příhradového modelu, zjistili bychom, že se síly příliš neliší od sil vypočtených předešlým postupem.



### 3.10. Kotevní oblasti

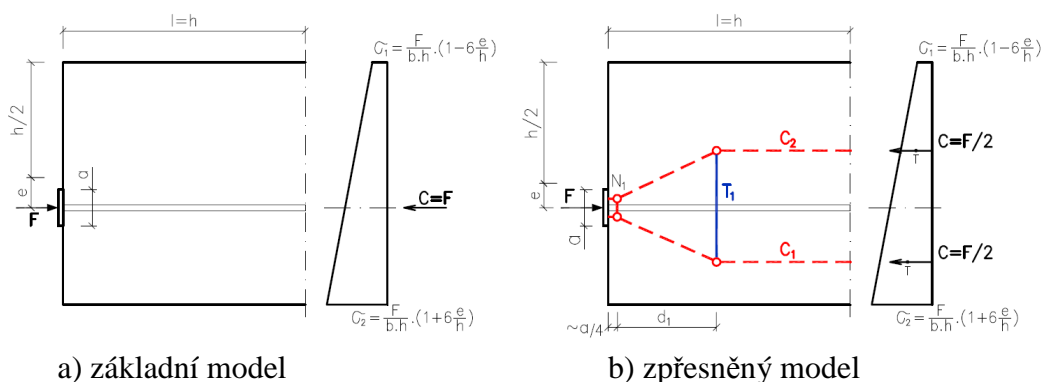
Sestavení příhradového modelu pro danou geometrii konstrukce a její zatížení je prvním a zároveň nejdůležitějším krokem při návrhu a posouzení konstrukce. Následný výpočet vnitřních sil a posouzení napětí je relativně jednoduché a jasné. Pro sestavení vhodného výpočetního modelu je známo několik metod:

- Převzetí osvědčeného výpočetního modelu a přizpůsobení modelu konkrétním rozměrům konstrukce – např. konzola, stěnový nosník
- Lineární výpočet napětí metodou konečných prvků pro určení polohy hlavních tlačných a tažených prvků – tento postup se použije především pro velké konstrukce, které se často skládají z několika kombinovaných D-oblastí.
- Metoda stanovení průběhu zatížení na hranici D-oblasti

První dvě metody byly použity při řešení předešlých příkladů. V následujících příkladech bude použita pro sestavení příhradového modelu metoda stanovení průběhu zatížení na hranici B- a D- oblasti.

D-oblast na obrázku 1 s bodovou silou orientovanou ve směru podélné osy prvku může představovat konec nosníku s kotvou podélné předpínací výztuže a nebo také sloup zatížený excentrickou bodovou silou. D-oblast vyjmeme jako část konstrukce délky rovnající se výšce prvku. Na hranici B- a D-oblasti je znám průběh napětí po výšce průřezu. Toto napětí z přilehlé B-oblasti spočteme pomocí lineární pružnosti (pokud je prvek neporušený trhlinami).

Základní model na obrázku 1a znázorňuje celkovou rovnováhu pro sílu umístěnou na konci nosníku s malou excentricitou  $e$ . Tento model nám však nic neříká o toku vnitřních sil v oblasti. Na obrázku 1b je zpřesněný model, který uvažuje rozdělení napěťového toku do dvou prvků s tlakovou silou rovnou  $F/2$ . Polohu vzpěr a táhel lze poměrně přesně určit z podmínky rovnováhy sil na hranici B- a D-oblasti. Osy jednotlivých prutů umístíme do těžišť pomyslných částečných obrazců průběhu napětí a velikosti sil na hranici B- a D-oblasti obdržíme integrací napětí po jednotlivých částech průřezu. Pro určení geometrie modelu je potřeba zvolit polohu uzlu  $N_1$  a vzdálenost  $d_1$ . Volba vzdálenosti  $d_1$  bude rozhodující pro velikost tahové síly  $T_1$ . Na tuto sílu navrheme výztuž. Pro správné fungování návrhu musí poloha výztuže ve skutečné konstrukci odpovídat poloze táhla ve výpočetním modelu.



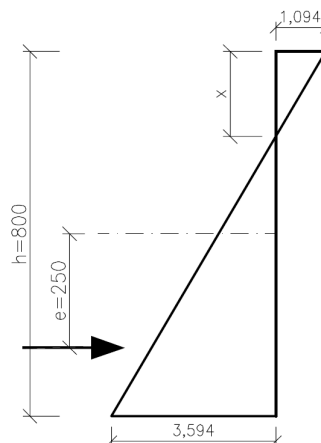
Obr.1 – Sestavení příhradového modelu D-oblasti s bodovou silou působící ve směru prvku s malou excentricitou

Příklad: Sestavte geometrii příhradového modelu konce nosníku výšky 800mm, který je předepnut silou na excentricitě 250mm orientovanou ve směru podélné osy prvku. Kotevní oblast je velikosti 160x160mm.

Výpočet začneme určením hraničních sil na konci D-oblasti. Vyříznutá D-oblast bude mít délku rovnou výšce průřezu, tedy 800mm. Jelikož chceme sestavit výpočetní model, zvolíme si pro usnadnění výpočtu hodnotu předpínací síly 1(MN) a šířku konce nosníku také 1(m). Napětí na hranici D-oblasti bude nabývat hodnot:

$$\sigma_{1,2} = \frac{F}{b \cdot h} \left( 1 - 6 \frac{e}{h} \right)$$

$$\sigma_{1,2} = \frac{1}{1,0,8} \left( 1 - 6 \frac{0,25}{0,8} \right) = \begin{matrix} - 3,594(\text{MPa}) \\ + 1,094(\text{MPa}) \end{matrix}$$

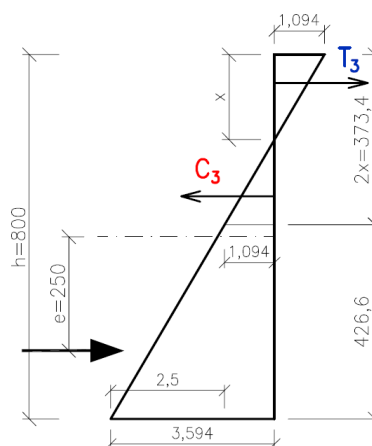


Vzdálenost neutrálné osy:  $x = 1,094 \cdot h / (3,594 + 1,094) = 186,7 \text{ mm}$

Nyní určíme vnitřní síly na hranici B- a D-oblasti pomocí 4 sil, které získáme integrací napěťových ploch.

$$T_1 = 1,094 \cdot 0,1867 / 2 = 0,1021(\text{MN})$$

$$C_3 = T_1 = 0,1021(\text{MN})$$



Zbylé dvě tlakové síly se budou rovnat polovině ploše zbylého obrazce – z podmínky rovnováhy je zřejmé, že musejí být rovno  $F/2 = 1/2(\text{MPa})$ .

$$C_1 = C_2 = (1,094 \cdot 0,4266 + 2,5 \cdot 0,4266 / 2) / 2 = 0,5(\text{MPa})$$

OK

Dále určíme polohu tlakových sil  $C_1$  a  $C_2$ .

Zbylou plochu napěťového obrazce rozdělíme na poloviny.

$$(2,5 / 0,4266) \cdot y^2 / 2 + 1,094 \cdot y = 0,5$$

$$2,930 \cdot y^2 + 1,094 \cdot y - 0,5 = 0$$

$$y = 0,267$$

