

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

ANALÝZA D-OBLASTÍ POMOCÍ MODELŮ NÁHRADNÍ PŘÍHRADOVINY

D - AREAS ANALYSIS USING STRUT AND TIE MODELS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

LUKÁŠ KONÁREK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. ROSTISLAV ZÍDEK, Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3608R001 Pozemní stavby
Pracoviště	Ústav stavební mechaniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student Lukáš Konárek

Název Analýza D-oblastí pomocí modelů náhradní příhradoviny

Vedoucí bakalářské práce Ing. Rostislav Zídek, Ph.D.

**Datum zadání
bakalářské práce** 30. 11. 2014

**Datum odevzdání
bakalářské práce** 29. 5. 2015

V Brně dne 30. 11. 2014

.....
prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc.
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

- [1] ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. Český normalizační institut, 2006.
[2] Šmejkal, J., Procházka, J.: Navrhování s použitím modelů náhradní příhradoviny. Beton TKS 5/2009.

Zásady pro vypracování

Cílem práce je analýza několika typických D-oblastí železobetonových konstrukcí. Sestaví se modely ve variantách podle normových zásad a provede se jejich vyhodnocení.

Předepsané přílohy

Licenční smlouva o zveřejňování vysokoškolských kvalifikačních prací

.....
Ing. Rostislav Zídek, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

Cílem bakalářské práce je analýza několika typických D-oblastí železobetonových konstrukcí. Analýza je provedena pomocí metody náhradní příhradoviny.

Jako první jsou modely náhradní příhradoviny využity při analýze smyku ohýbaného nosníku. Dále je v jednotlivých kapitolách ukázáno řešení konkrétních D-oblastí metodou náhradní příhradoviny. Tyto konkrétní příhradové modely jsou řešeny programem RFEM pracujícím na principu metody konečných prvků.

Klíčová slova

D-oblast, náhradní příhradovina, vzpěra, táhlo, uzel, smyk, příčný tah, hlavní napětí, trajektorie hlavních napětí

Abstract

The objective of bachelor thesis is the analysis of typical D-areas of reinforced concrete structures. The analysis is performed using methods replacement truss.

In the beginning models replacement truss are used for analysis shear bending girder. It is also shown in the individual chapters specific D-areas using spare truss method. These particular truss models are solved by RFEM program operating on the principle of Finite Element Method.

Keywords

D-area, spare truss, brace, rod, node, shear, lateral thrust, principle stresses, trajectories of principle stresses

Bibliografická citace VŠKP

Lukáš Konárek *Analýza D-oblastí pomocí modelů náhradní příhradoviny*. Brno, 2015. 72s., 0 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky. Vedoucí práce Ing. Rostislav Zídek, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 30.3.2015

.....
Lukáš Konárek

Poděkování:

Rád bych tímto prostřednictvím poděkoval vedoucímu práce panu Ing. Rostislavovi Zídkovi, Ph.D. za cenné rady a podněty, které mi dával v průběhu práce a také za čas který mi věnoval při konzultacích. Dík patří také mé rodině za mentální a finanční podporu během celého studia.

Obsah

1	Úvod.....	2
1.1	Co jsou to D-oblasti.....	2
1.2	Metoda náhradní příhradoviny	2
2	Smyk v ohýbaných nosnících	4
2.1	Využití modelů náhradní příhradoviny u analýzy smyku v ohýbaném nosníku ...	4
3	Ozub na nosníku.....	11
3.1	Řešení ozubu na nosníku metodou náhradní příhradoviny	12
3.1.1	Schéma vyztužení ozubu nosníku	21
3.2	Výsledky ozubu na nosníku metodou konečných prvků.....	21
4	Stěnové nosníky	27
4.1	Řešení stěnového nosníku zatíženého osamělým břemenem metodou náhradní příhradoviny	28
4.1.1	Schéma vyztužení stěnového nosníku zatíženého osamělým břemenem	37
4.2	Výsledky stěnového nosníku zatíženého jedním osamělým břemenem metodou konečných prvků	38
4.3	Řešení stěnového nosníku zatíženého dvěma osamělými břemeny metodou příhradové analogie	40
4.3.1	Schéma vyztužení stěnového nosníku zatíženého dvěma břemeny	53
4.4	Výsledky stěnového nosníku zatíženého dvěma silami metodou konečných prvků.....	53
5	Otvory ve stěnách	56
5.1	Řešení stěny s otvory metodou náhradní příhradoviny	56
5.1.1	Tvorba modelu náhradní příhradoviny	60
5.1.2	Dimenzování stěny s otvory	64
5.1.3	Posouzení uzlových oblastí	68
6	Závěr.....	72

1 Úvod

V betonových konstrukcích, jsou rozlišovány dvě oblasti konstrukcí. Jsou to B-oblasti, oblasti s běžným chováním, ve kterých platí předpoklad lineárního rozdělení poměrného přetvoření po průřezu. Při řešení těchto oblastí, se vychází ze standartních návrhových postupů, uvedených v normě. Druhou oblastí jsou D-oblasti.

1.1 Co jsou to D-oblasti

D-oblasti, jsou oblasti s nespojitostí v geometrii nebo zatížení. V těchto oblastech je porušen ustálený tok průběhu napětí. Na rozdíl od oblastí s běžným chováním, zde neplatí předpoklad lineárního rozložení poměrných přetvoření. Proto k návrhu těchto oblastí musíme přistoupit odlišně a doplnit lokální výpočet. Pokud by tak nebylo učiněno mohlo by to vést k poruchám.

Metod řešení poruchových oblastí je několik. V této práci, bude ukázáno řešení D- oblastí pomocí modelů náhradní příhradoviny.

1.2 Metoda náhradní příhradoviny

Příhradové modely se skládají z betonových vzpěr (reprezentující výslednici pole tlakového napětí) a táhel (výslednice soustavy výztužných prutů). Nejmenší možný úhel mezi vzpěrou a táhlem je přibližně 25° . Vzpěry a táhla jsou spojeny v uzlech, které zprostředkovávají přenos sil mezi nimi. Uzly jsou umístěny také v místech, kde je zakřivena výztuž, nebo kde je výztuž stykována. Uzly musejí být dostatečně velké, aby napětí, které v nich působí, nepřekročilo pevnost betonu v tlaku. Při tvorbě modelu náhradní příhradoviny, je vzpěra umísťována rovnoběžně s předpokládaným směrem trhlin, které vznikají v důsledku příčných tahů. Vzpěry nesmějí být v žádném případě v kolmé poloze na směr hlavních trhlin a nesmí se křížit. Táhla se mezi sebou a vzpěrou křížit mohou, při zohlednění změny napětí, které převezme táhlo. Pokud je volen sklon mezi tlačnou diagonálou a táhlem, je vhodné volit ho blízký úhlu 45° . Takto sestavený model, by měl minimalizovat vznik trhlin. Podle sil ve vzpěrách je posuzováno napětí v betonu a je ověřována šířka vzpěry. Na velikosti sil v táhlech je dimenzována výztuž, která musí být v uzlu řádně zakotvena. Schopnost konstrukce odolat zatížení vychází z návrhových hodnot charakteristik materiálů a rozměrů.

Při výpočtu se vychází z předpokladů:

- síly v prutech jsou v rovnováze a jednoosé,
- konstrukce se chová dle teorie plasticity,
- zanedbání působení betonu v tahu,
- zatížení je vnášeno do modelů přes uzly.

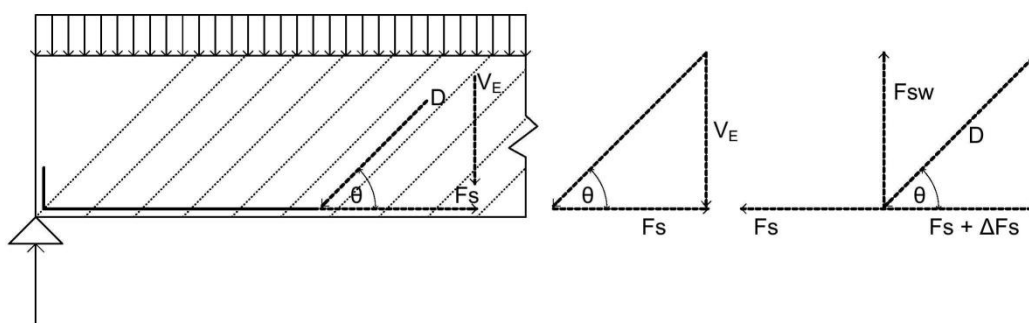
Modelů, splňujících podmínky rovnováhy, může být několik. Vhodný model je sestaven tak, aby vnější zatížení bylo přenášeno do podpor co nejkratší a nejjednodušší cestou. Takže množství energie, které by vedlo k trhlinám v konstrukci je co nejmenší. V této práci se bude vycházet z osvědčených modelů, z důvodu vyvarování se zásadních chyb. Podobně též [5, s. 4-9]

2 Smyk v ohýbaných nosnících

Jedna z prvních problematik, při jejichž řešení byla použita metoda příhradové analogie, je definování únosnosti třmínků. Při působení např. rovnoměrného spojitého zatížení na nosník tak, jak lze vidět na obrázku 1, jsou horní vlákna nosníku tlačena a spodní tažena. Jelikož únosnost betonu v tahu je malá, vznikne i při relativně malém zatížení v dolní části průřezu trhlinka, kolmá ke směru působení hlavního tahu. Následkem toho přestává fungovat teorie pružnosti pro rozdělení smykových a hlavních napětí. *Únosnost průřezu namáhaného posouvající silou musí být stanovena s ohledem na porušení trhlinami.* [3, s.128]

2.1 Využití modelů náhradní příhradoviny u analýzy smyku v ohýbaném nosníku

Šikmé trhliny vznikají pod úhlem θ . Tento úhel svírá tlačená diagonála s dolní, taženou výztuží. Kolmá vzdálenost mezi trhlinami, představuje šířku diagonály, která bude použita pro vyjádření napětí v diagonále. Diagonály příhradového modelu jsou souvislá tlaková pole, spojující horní a dolní oblast třmínků. Síla v těchto diagonálách, bude označována D , napětí v diagonále σ_D . Výslednice sil z výztuže navržené na přenesení ohybového momentu vytváří táhla modelu označovaná F_s . Výslednice tlakové síly v horní části bude označována F_c . Po délce nosníku, působí posouvající síla V_E . Tato síla, musí být přenesena tlačенou diagonálou a navrženými třmínky. Síla představující působení třmínků v konstrukci bude označována F_{sw} .



Obrázek 1 – Vnitřní síly na ohýbaném nosníku [3]

K bližšímu popsání situace, by měl pomoci obrázek 1. Síla v tlačенé diagonále D , která působí pod úhlem θ bude rozdělena na vodorovnou složku: $D \cdot \cos\theta$, a na složku svislou: $D \cdot \sin\theta$.

Z rovnováhy sil potom vychází:

$$\sum F_{ix} = 0: \Delta F_s - D \cdot \cos\theta = 0 \quad (1)$$

$$\sum F_{iy} = 0: V_e + D \cdot \sin\theta = 0 \quad (2)$$

Pro schéma v pravé části obrázku 1:

$$\sum F_{iy} = 0: -D \cdot \sin\theta + F_{sw} = 0 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \sum F_{ix} = 0: F_s + \Delta F_s - F_s - D \cdot \cos\theta &= 0 \\ \Delta F_s - D \cdot \cos\theta &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Rovnice (1) a (4) jsou stejné. Máme tedy 3 rovnice (1), (2) a (3) o 4 neznámých složkách ΔF_s , D , F_{sw} a úhel θ . Jednou z možností jak danou situaci řešit je volit úhel θ a dopočítat zbylé neznámé. Úhel θ je vhodný volit mezi hodnotami 22° až 45° , jak uvádí [7]. Hodnoty sil pro úhel $\theta = 22^\circ$ a úhel $\theta = 45^\circ$ budou vyjádřeny ručním výpočtem. Mezilehlé hodnoty $22^\circ < \theta < 45^\circ$ budou spočteny programem Microsoft Excel a vyjádřeny graficky.

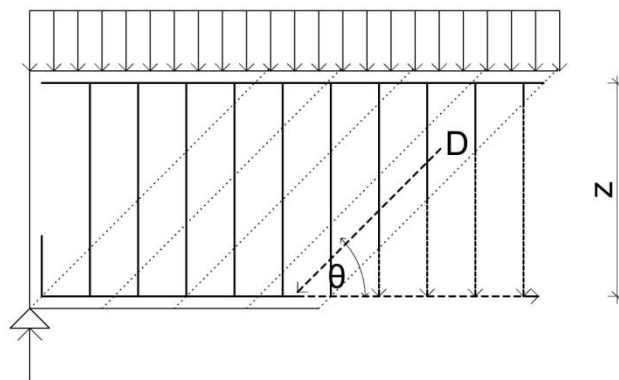
Uvažujme rovnoměrné spojitě zatížení na prostém nosníku o rozpětí 8m. Průřezové rozměry nosníku, jsou: $b=350$ mm; $h=700$ mm. Materiálové charakteristiky: Beton C30/37 a ocel B500B. Velikost spojitěho zatížení bude uvažována o velikosti 60 kN/m. Velikost posouvající síly V_E :

$$V_E = \frac{1}{2} * 60 * 8 = 240 \text{ kN}.$$

$$\text{Pro úhel } \theta=22^\circ: D = -\frac{V_E}{\sin\theta} \rightarrow D = -\frac{240}{\sin 22^\circ} = 640 \text{ kN}$$

$$\Delta F_s = D \cdot \cos\theta \rightarrow \Delta F_s = 640 \cdot \cos 22^\circ = 594,02 \text{ kN}$$

$$F_{sw} = D \cdot \sin 22^\circ = 640 \cdot \sin 22^\circ = 240 \text{ kN}$$



Obrázek 2 – Rozložení výslednice síly F_{sw} do několika třmínků [3]

Jak lze vidět na obrázku 2, síla v třmínku musí být přepočítána na jednotku délky [kN/m] neboť na přenesení posouvající síly se podílí v tomto řezu třmínků několik. Délka, na kterou bude síla v třmínku přepočítána, je tedy rovna z/tg , kde z vyjadřuje rameno vnitřních sil. Při dimenzování průřezu na ohyb, bylo stanoveno vyztužení v dolní části průřezu nosníku 6 pruty výztuže o $\varnothing 20$ mm. Při následném posouzení bylo určeno rameno vnitřních sil z :

$$z = h - d_1 - \left(0,5 * \lambda * \frac{A_s * f_{yd}}{b * \lambda * f_{cd}} \right) = 0,598 \text{ m} \quad (5)$$

Ve vzorci (5) označuje h výšku průřezu, d_1 vzdálenost mezi spodním lícem průřezu a osou výztuže, A_s je plocha navržené výztuže, f_{yd} mez kluzu použité oceli, b šířka posuzovaného průřezu, $\lambda = 0,8$, za hodnotu f_{cd} byla dosazena hodnota návrhové pevnosti použité třídy betonu.

Síla v třmínku pro úhel $\theta = 22^\circ$ tedy bude:

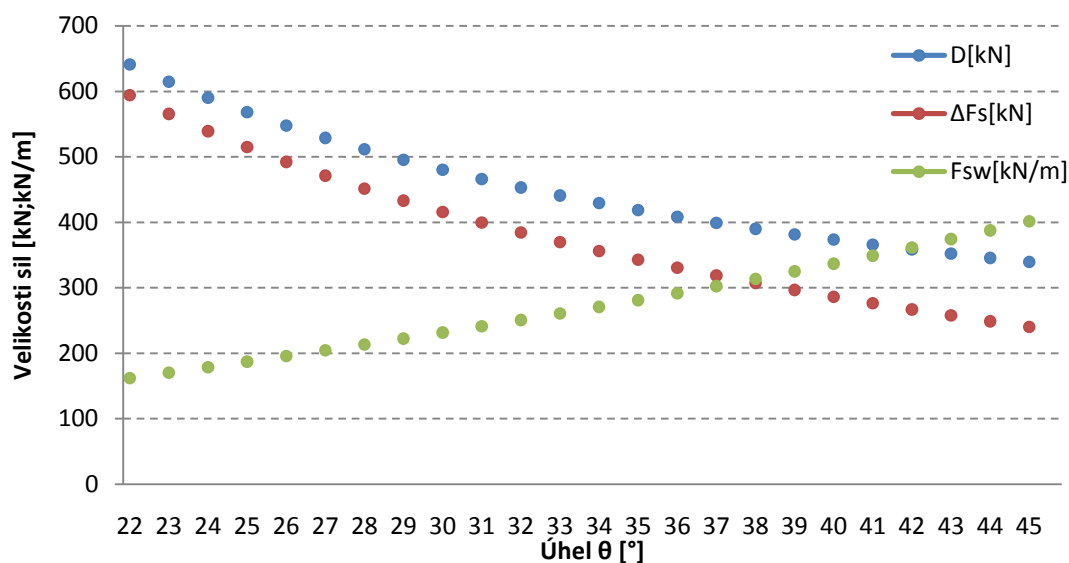
$$F_{sw} = \frac{240 * \text{tg} 22^\circ}{0,598} = 162,15 \text{ kN/m}$$

To samé provedeme pro úhel $\theta = 45^\circ$:

$$D = \frac{240}{\sin 45^\circ} = 339,4 \text{ kN}$$

$$\Delta F_s = 339,4 * \cos 45^\circ = 240 \text{ kN}$$

$$F_{sw} = \frac{(339,4 * \sin 45^\circ * \text{tg} 45^\circ)}{0,598} = 401,34 \text{ kN/m}$$

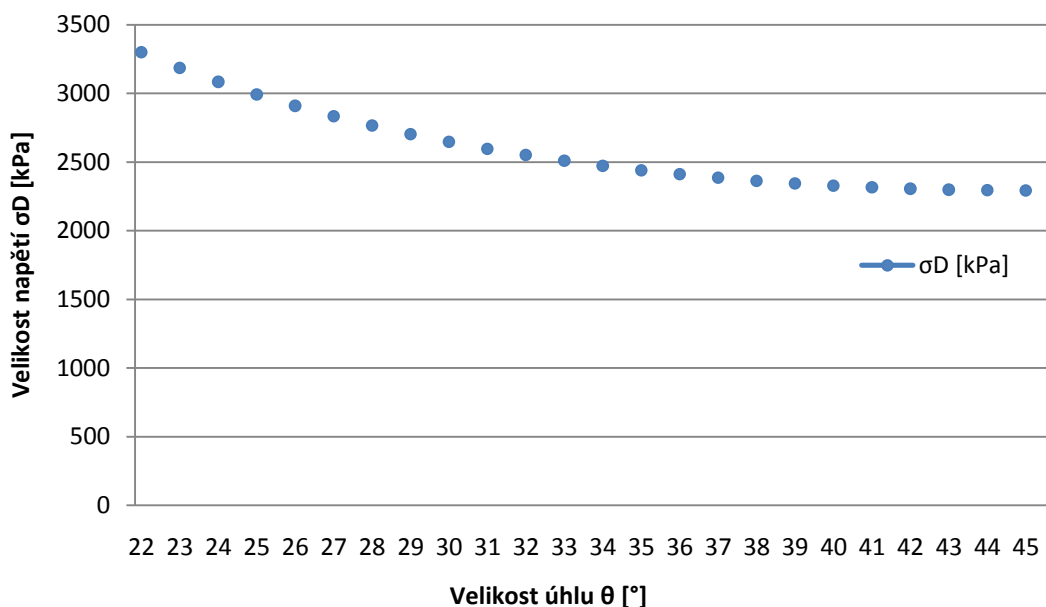


Obrázek 3 – Vliv volby velikosti úhlu θ na velikosti vnitřních sil na ohýbaném nosníku

Z obrázku 3 je patrné, že se zvyšujícím se úhlem θ , klesá síla v tažené výztuži ΔF_s a síla D v tlačené diagonále. Naopak síla v třmínku F_{sw} přepočítaná na jednotku délky, s rostoucím úhlem θ roste.

Na grafu níže, je zobrazeno napětí σ_D v tlačené diagonále, které je spočteno jako:

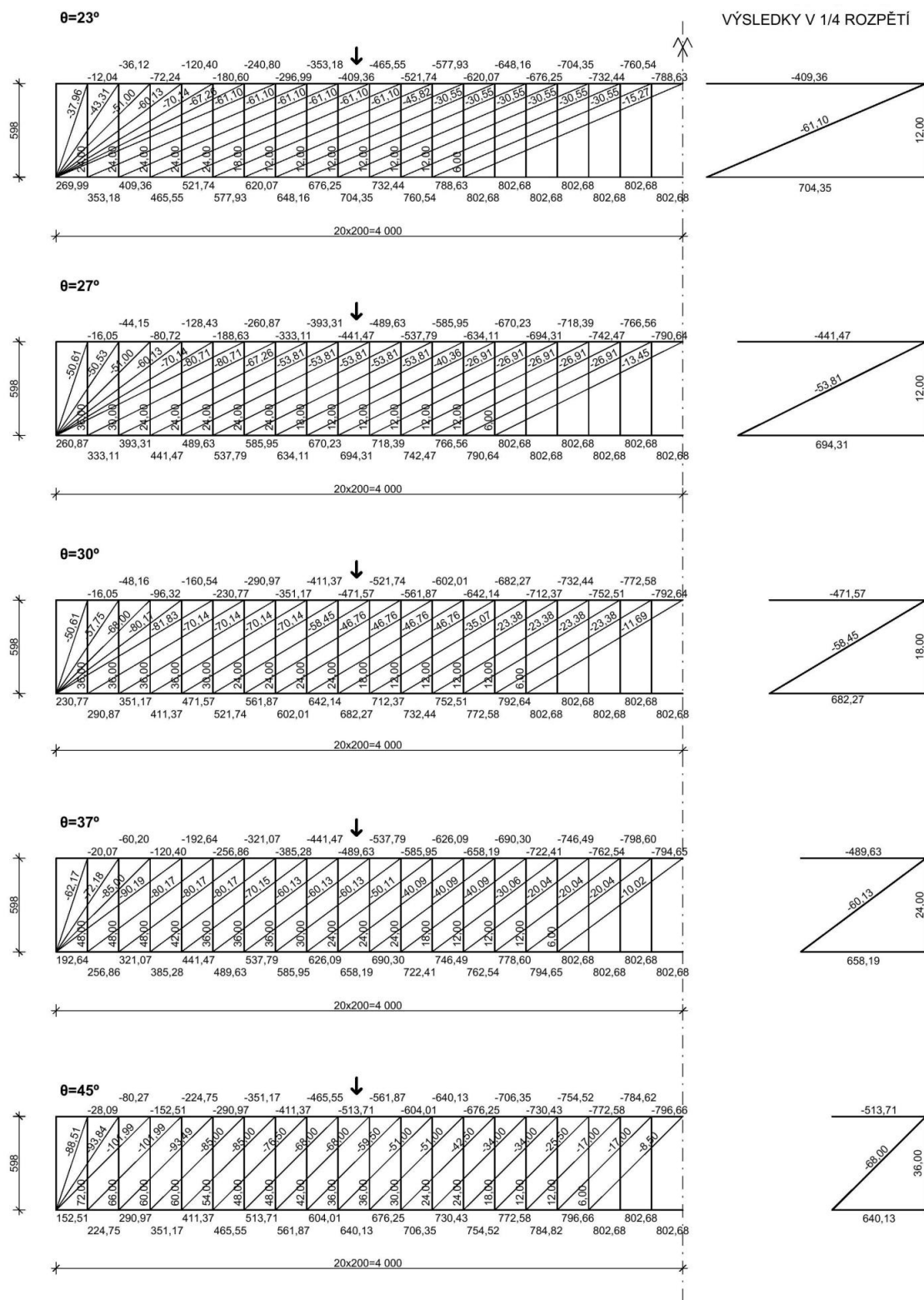
$$\sigma_D = \frac{D}{z \cdot \cos \theta \cdot bw} \quad (6)$$



Obrázek 4 – Napětí v tlačené diagonále

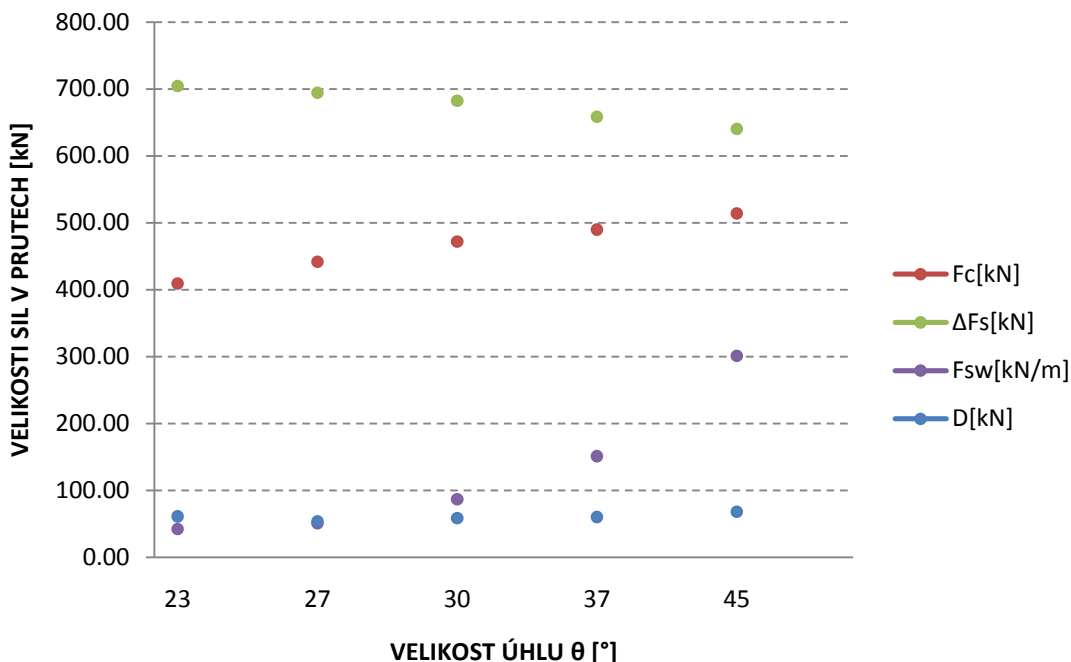
Na obrázku 4 je vidět, že napětí v diagonále σ_D spočteno dle vzorce (6) s rostoucím úhlem θ klesá. Je to zapříčiněno tím, že se zvyšujícím se úhlem θ , roste šířka diagonály a klesá síla v diagonále D , jak již bylo znázorněno na obrázku 3.

Pro ověření správnosti výpočtu, bylo vytvořeno ve výpočetním softwaru RFEM, pracujícím na principu metody konečných prvků několik modelů, kopírujících chování takto zatížené konstrukce. Vzdálenost mezi jednotlivými třmínky je 0,2 m. Vzdálenost mezi výslednicí sil tažené výztuže F_s a výslednicí síly v tlačené části průřezu F_c je 0,598 m. Bylo vytvořeno pět modelů s měnícím se úhlem θ . Na obrázku 5 jsou vyobrazeny tyto modely i s výsledky vnitřních sil. Modely jsou seřazeny sestupně podle rostoucího úhlu θ . Tyto modely musely být doplněny v místech nad podporami „vějířovitými pruty“, aby se zamezilo vzniku mechanismu.



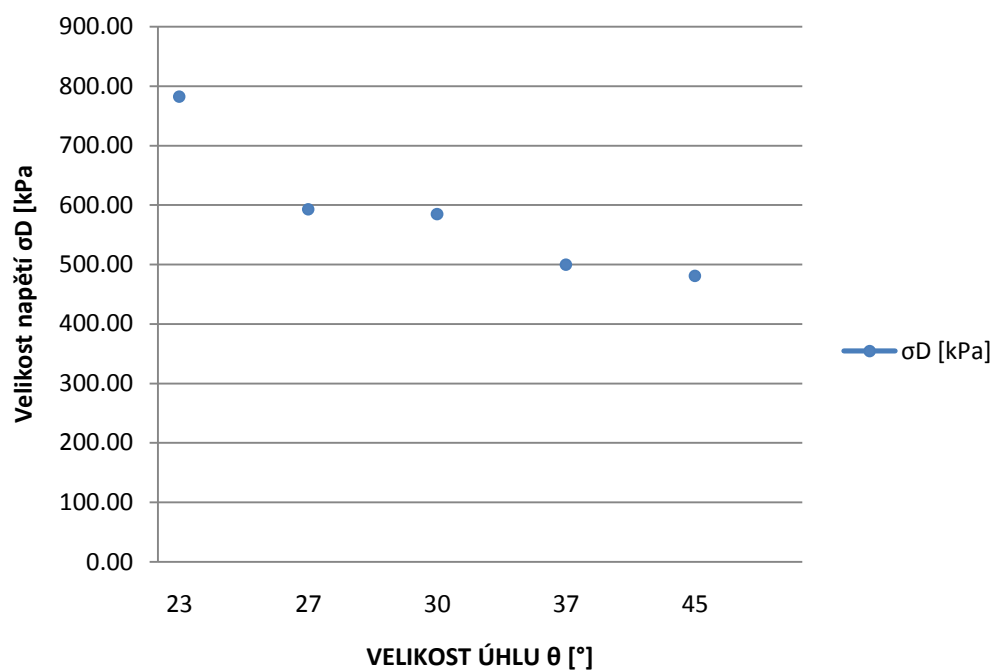
Obrázek 5 – Modely náhradní příhradoviny ohýbaného nosníku

V levé části obrázku 5, lze vidět doplnění modelu o „vějířovité pruty“. Již na těchto prutech je potvrzen ruční výpočet. Se zvyšujícím se sklonem diagonály, tedy se zvyšujícím se úhlem θ , klesá síla D v diagonále.



Obrázek 6 – Vnitřní síly na prutech modelu náhradní příhradoviny spočtených programem RFEM

Obrázek 6 popisuje výsledky získané z programu RFEM hodnocené v $\frac{1}{4}$ rozpětí. Jak je vidět z tohoto grafu, s rostoucím úhlem θ klesá síla ΔF_s . Naopak roste síla v třmínkách F_{sw} , opět přepočítána na jednotku délky kN/m a síla v tlačené části průřezu F_c . „Vějířovité pruty“ na krajích modelu ovlivňují průběh síly D v diagonále. Proto se zvyšujícím se úhlem θ neklesá síla D v diagonále tak jako u ručního výpočtu. S rostoucím úhlem θ , roste šířka diagonály. Po přepočítání síly D v diagonále na napětí σ_D dle vzorce (6) je jasné, že napětí v diagonále klesá. Průběh napětí σ_D v diagonále popisuje obrázek 7.



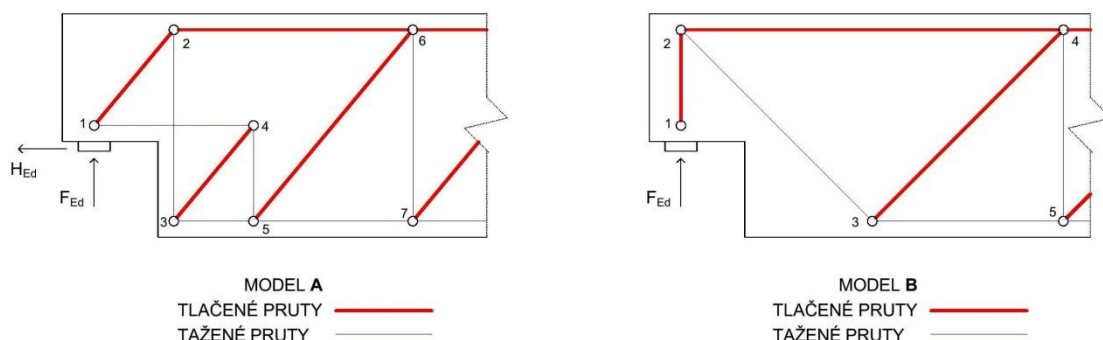
Obrázek 7 – Napětí v diagonále modelu náhradní příhradoviny

Průběhy vnitřních sil v prutech modelu náhradní příhradoviny získané z programu RFEM a napětí σ_D , potvrzují správnost ručního výpočtu.

3 Ozub na nosníku

Mezi poruchové D- oblasti se řadí oblasti s náhlou změnou průřezu. S náhlou změnou průřezu se setkáváme např. v montovaných konstrukcích, kde se pro uložení průvlaku na sloup provede ozub.

Modely náhradní příhradoviny ozubů, vycházejí nejen z trajektorií hlavních tlakových a tahových napětí, ale také z geometrie vyztužení ozubu. Dnes se na základě zkušeností využívají dva základní typy modelů, z jejichž kombinace vzejde model optimální.

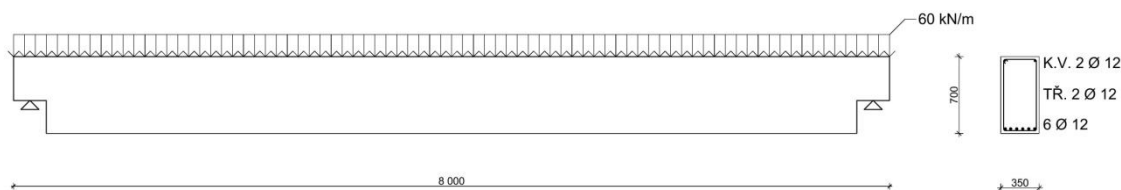


Obrázek 8 – Modely náhradní příhradoviny ozubů [1]

Oba tyto modely mají výhody a nevýhody. V místě uložení, je doporučeno uvažovat minimální horizontální sílu H_{Ed} . Na rozdíl od modelu B, model A umožňuje přenos vodorovné síly H_{Ed} . Což ukazuje na skutečnost, že model B, nemůže být použit samostatně. Ovšem velké množství třmínků hned za lícem ozubu u modelu A, přesouvá styčník dva, dále od podpory a tím prodlužuje rameno vnější síly. Další nevýhodou tohoto modelu je sklon svislé výztuže ke vznikající trhlině. Naproti tomu model B má umístění šikmé výztuže vzhledem k rozvoji trhlin optimální. Dá se předpokládat, že trhlina vznikne kolmo na umístění šikmého prutu. Šikmá výztuž je nejúčinnější pro přenos zatížení z průvlaku do ozubu. Další nevýhodou modelu je malý prostor k zakotvení šikmé tahové výztuže.

Při navrhování ozubu nosníku je vycházeno z rozdělení zatížení ozubu do dvou soustav náhradní příhradoviny pomocí poměru jejich tuhostí. Tuhosti jednotlivých modelů nejsou dopředu známy, protože potřebná plocha výztuže ozubu, se zjistí až v průběhu výpočtu. Z tohoto důvodu, jsou oba modely navrhovány na 60% z celkového zatížení. Vodorovné zatížení je přisouzeno modelu A. Vzniklá rezerva je využita na pokrytí rozdílných tuhostí modelu A a modelu B. Tento přístup bude uplatněn při návrhu ozubu na nosníku, který byl řešen při analýze smyku na ohýbaných nosnících. Podobně též [1, s.102]

3.1 Řešení ozubu na nosníku metodou náhradní příhradoviny



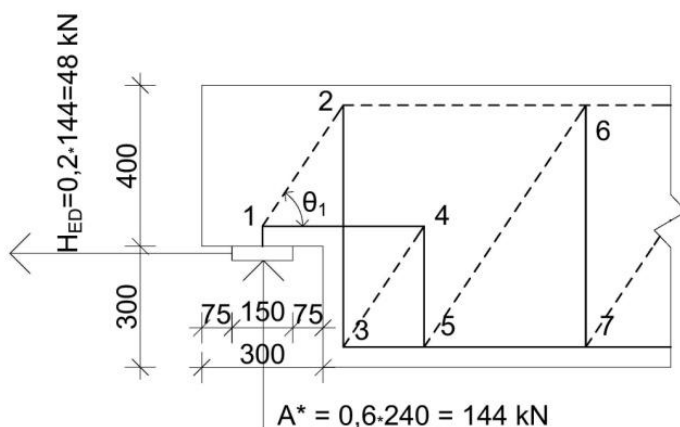
Obrázek 9 – Geometrie řešeného nosníku

Postup výpočtu i vzorce převzaty z [1] a [5]

Materiálové charakteristiky:

- Výztuž B500B: $f_{yd}=434,8$ MPa
- Beton C30/37: $f_{cd}=20$ MPa

Umístění nosníku je uvažováno v prostředí XC1. Na základě toho, bylo stanoveno krytí výztuže 25mm. Ohybový moment v poli, je přenášen 6 pruty výztuže $\varnothing 20$ mm. Třmínková výztuž je uvažována $\varnothing 8$ mm. Při horním povrchu je průřez vyztužen 2 pruty konstrukční výztuže $\varnothing 12$ mm. Rozměr ozubu nad podporou je 300x300 mm. Roznášecí deska má rozměry 350x150 mm. Reakce nosníku je $0,5 \cdot 60 \cdot 8 = 240$ kN.



Obrázek 10 – Model náhradní příhradoviny A

- Kontrola napětí v betonu pod styčnou deskou: styčník typu C-C-T $\rightarrow k_2=0,85$

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

$$\sigma_{RD,max} = k_2 * v * f_{cd} = 0,85 * 0,88 * 20 = 14,96 \text{ MPa}$$

- Tlak pod styčnou deskou

$$\sigma_{max} = \frac{\sqrt{0,24^2 + 0,048^2}}{0,35 * 0,15} = 4,66 \text{ MPa} < 14,96 \text{ MPa} \dots \text{VYHOVUJE}$$

- Výztuž táhla T_{23} :

$$A_{s,req} = \frac{1,2 * T_{23}}{f_{yd}} = \frac{1,2 * 144 * 10^3}{434,8} = 397,4 \text{ mm}^2$$

Je navržen dvoustřížný třmínek $4\phi 8\text{mm}/50\text{mm} \rightarrow A_{s,prov}=402 \text{ mm}^2$

$$402 * 434,8 = 174,78 \text{ kN} > 1,2 * 144 * 103 = 172,8 \text{ kN} \dots \text{VYHOVUJE}$$

Svislé třmínky se obvykle navrhuji z průřezů max. $\phi 12 \text{ mm}$ v osových vzdálenostech max. 50 mm . Jak uvádí [1, s.103]

- Těžiště táhla od líce ozubu:

$$\Delta a = 25 + 4 + 50 + 25 = 104 \text{ mm}$$

- Rameno a reakce A^*

$$a = a_c + \Delta a + \frac{H_{ED}}{A^*} * dk' = 150 + 104 + \frac{48}{144} * \left(25 + 8 + \frac{20}{2}\right) = 268 \text{ mm}$$

- Odhad ramene vnitřních sil ozubu z_k :

$$z_k = hk - dk' - ad$$

výšku tlačené oblasti a_d odhaduji na 30 mm

$$z_k = 400 - 43 - 30 = 327 \text{ mm}$$

- Sklon tlačené diagonály C_{12} :

$$\theta_1 = \arctg \frac{z_k}{a} = \arctg \frac{327}{268} = 50,66^\circ$$

- Tlaková síla v betonové vzpěře C_{12} :

$$C_{12} = \frac{144}{\sin 50,66^\circ} = 186,19 \text{ kN}$$

- Tlaková síla při horním líci ozubu $C^{(A)+(B)}$:

$$\begin{aligned} C^{(A)+(B)} &= C_{12}^{(A)} * \cos \theta_1 + \frac{(A - A^*)}{tg \theta_2} = 186,19 * \cos 50,66^\circ + \frac{240 - 144}{tg 45^\circ} \\ &= 214 \text{ kN} \end{aligned}$$

- Skutečná výška tlačené oblasti x :

$$x = \frac{214}{14,96 * 0,35} = 41 \text{ mm}$$

- Přepočet ramene vnitřních sil z_k :

$$z_k = 400 - 43 - \frac{41}{2} = 337 \text{ mm}$$

- Síla v táhle T_{14} :

$$T_{14} = \frac{(A^* * a) + (H_{ED} * z_k)}{z_k} = \frac{(144 * 268) + (48 * 337)}{337} = 162,52 \text{ kN}$$

- Potřebná plocha výztuže $A_{s,req}$:

$$A_{s,req} = \frac{162,52 * 10^3}{434,8} = 374 \text{ mm}^2$$

$$\text{Jsou navrženy } 2\phi 20 \text{ mm} \rightarrow A_{s,prov} = 628 \text{ mm}^2$$

$$628 * 434,8 = 273 \text{ kN} > 162,52 \text{ kN} \dots \text{VYHOVUJE}$$

- Využití výztuže:

$$\frac{162,52}{273} = 0,60 \rightarrow \text{výztuž je využita z 60 \%}$$

- Základní kotevní délka výztužného prutu:

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

$$\sigma_{sd} = 0,60 * \frac{500}{1,15} = 252,17 \text{ MPa}$$

$$l_{b,rqd} = \frac{20}{4} * \frac{252,17}{3} = 420 \text{ mm}$$

Výztuž v táhle T_{14} bude kotvena pomocí ohybů $\rightarrow$ může být použit redukční součinitel zakotvení $\alpha_1 = 0,7$

- Návrhová kotevní délka l_{bd} :

$$l_{bd} = l_{b,rqd} * \alpha_1 = 420 * 0,7 = 294 \text{ mm}$$

- Kontrola zakřivení prutu $\phi_{m,min}$:

$$\phi_{m,min} \geq \frac{F_{bt} \left(\frac{1}{a_b} + \frac{1}{2\phi} \right)}{f_{cd}} \geq \frac{79,23 * 10^3 \left(\frac{1}{43} + \frac{1}{2 * 20} \right)}{20} = 191 \text{ mm}$$

$$a_b = c + \phi t_{\check{r}} + \frac{\phi}{2} = 25 + 8 + \frac{20}{2} = 43 \text{ mm}$$

$$F_{bt} = 252,17 * 314 = 79,23 \text{ kN}$$

Minimální průměr zakřivení je příliš velký. Z hlediska omezeného prostoru nad ozubem bude lepší, vyztužit tuto oblast více pruty menšího průřezu. Tím bude docíleno menšího minimálního průměru zakřivení jednotlivých prutů. Výpočet bude přepočítán.

- Odhad: $\phi 12 \text{ mm}$

$$d_{k'} = 25 + 8 + \frac{12}{2} = 39 \text{ mm}$$

- Rameno a reakce A^*

$$a = a_c + \Delta a + \frac{H_{ED}}{A^*} * dk' = 150 + 104 + \frac{48}{144} * 39 = 267 \text{ mm}$$

- Odhad ramene vnitřních sil ozubu z_k :

$$z_k = 400 - 39 - 40 = 321 \text{ mm}$$

- Sklon tlačené diagonály C_{12} :

$$\theta_1 = \arctg \frac{z_k}{a} = \arctg \frac{321}{267} = 50,14^\circ$$

- Tlaková síla v betonové vzpěře C_{12} :

$$C_{12} = \frac{144}{\sin 50,14^\circ} = 187,30 \text{ kN}$$

- Tlaková síla při horním líci ozubu $C^{(A)+(B)}$:

$$\begin{aligned} C^{(A)+(B)} &= C_{12}^{(A)} * \cos \theta_1 + \frac{(A - A^*)}{\tg \theta_2} = 187,30 * \cos 50,14^\circ + \frac{240 - 144}{\tg 45^\circ} \\ &= 216,04 \text{ kN} \end{aligned}$$

- Skutečná výška tlačené oblasti x :

$$x = \frac{216,04}{14,96 * 0,35} = 42 \text{ mm}$$

- Přepočet ramene vnitřních sil z_k :

$$z_k = 400 - 39 - \frac{42}{2} = 340 \text{ mm}$$

- Síla v táhle T_{14} :

$$T_{14} = \frac{(A^* * a) + (H_{ED} * z_k)}{z_k} = \frac{(144 * 267) + (48 * 340)}{340} = 161,08 \text{ kN}$$

- Potřebná plocha výztuže $A_{s,req}$:

$$A_{s,req} = \frac{161,08 * 10^3}{434,8} = 370 \text{ mm}^2$$

Jsou navrženy 4Ø12 mm $\rightarrow A_{s,prov} = 452 \text{ mm}^2$

$$452 * 434,8 = 196,53 \text{ kN} > 161,08 \text{ kN} \dots \text{VYHOVUJE}$$

- Využití výztuže:

$$\frac{161,08}{196,53} = 0,82 \rightarrow \text{výztuž je využita z 82 \%}$$

- Základní kotevní délka výztužného prutu:

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

$$\sigma_{sd} = 0,82 * \frac{500}{1,15} = 356,35 \text{ MPa}$$

$$l_{b,rqd} = \frac{12}{4} * \frac{356,35}{3} = 357 \text{ mm}$$

- Návrhová kotevní délka l_{bd} :

$$l_{bd} = l_{b,rqd} * \alpha_1 = 357 * 0,7 = 250 \text{ mm}$$

- Kontrola zakřivení prutu $\phi_{m,min}$:

$$\phi_{m,min} \geq \frac{F_{bt} \left(\frac{1}{a_b} + \frac{1}{2\phi} \right)}{f_{cd}} \geq \frac{40,27 * 10^3 \left(\frac{1}{39} + \frac{1}{2 * 12} \right)}{20} = 135 \text{ mm}$$

$$a_b = c + \phi t_{\check{r}} + \frac{\phi}{2} = 25 + 8 + \frac{12}{2} = 39 \text{ mm}$$

$$F_{bt} = 356,35 * 113 = 40,27 \text{ kN}$$

Výztuž táhla T_{14} bude ohnuta a ukotvena u horního líce nosníku. Průměr trnu, kolem něhož, bude výztuž ohnuta, byl stanoven na 135 mm.

- Síla v táhle T_{45} a $T_{67} = 144 \text{ kN}$
- Staticky nutná plocha třmínků A_s :

$$A_s = \frac{1,2 * 144 * 10^3}{434,8} = 397,4 \text{ mm}^2$$

Jsou navrženy 4 dvoustřížné třmínky $\phi 8\text{mm}/50\text{mm} \rightarrow A_{s,prov} = 402 \text{ mm}^2$

$$402 * 434,8 = 174,79 \text{ kN} > 1,2 * 144 = 172,8 \text{ kN} \dots \text{VYHOVUJE}$$

- Svislá výztuž ozubu
 - Na redukovanou posouvající sílu $\beta \cdot A^*$:

$$\beta = \frac{a_c + \Delta a - 0,5 * a_3}{2dk} = \frac{150 + 104 - 0,5 * 150}{2 * (400 - 39)} = 0,248$$

$$\beta * A^* = 0,248 * 144 = 35,7 \text{ kN}$$

Posouzení na příčné tahy bude provedeno po návrhu výztuže v modelu B.

- Kotvení dolní tahové výztuže $6\phi 20 \text{ mm}$:

- Tahová síla ve výztuži: 144 kN

$$A_s = \frac{144 * 10^3}{434,8} = 331 \text{ mm}^2$$

$4\phi 20 \text{ mm}$ budou dovedeny do konce

$2\phi 20 \text{ mm}$ budou ukotveny ohybem u líce ozubu $\rightarrow A_{s,prov} = 628 \text{ mm}^2$

$$628 * 434,8 = 273,05 \text{ kN} > 144 \text{ kN} \dots \text{VYHOVUJE}$$

- Základní kotevní délka $l_{b,rqd}$:

$$\sigma_{sd} = \frac{331}{628} * \frac{500}{1,15} = 229,16 \text{ MPa}$$

$$l_{b,rqd} = \frac{20}{4} \frac{229,16}{3} = 382 \text{ mm}$$

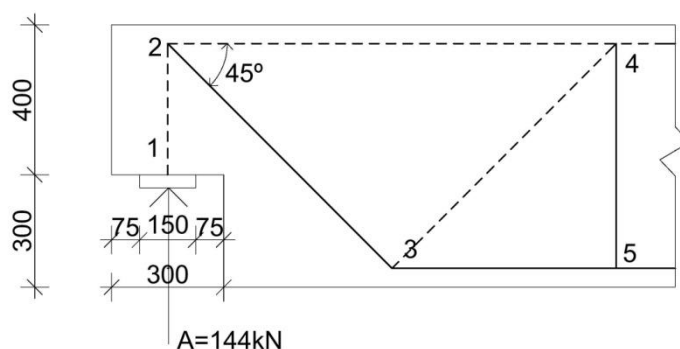
- Kontrola zakřivení prutu:

$$F_{bt} = 314 * 229,16 = 71,96 \text{ kN}$$

$$a_b = 43 \text{ mm}$$

$$\sigma_{m,min} \geq \frac{F_{bt} \left(\frac{1}{a_b} + \frac{1}{2\phi} \right)}{f_{cd}} \geq \frac{71,96 * 10^3 \left(\frac{1}{43} + \frac{1}{2 * 20} \right)}{20} = 174 \text{ mm}$$

2ø20 kotveny ohyby o průměru 175 mm.



Obrázek 11 – Model náhradní příhradoviny B

- Úhel šikmého prutu byl zvolen $\theta = 45^\circ$
- Síla v táhle T_{23} :

$$T_{23} = \frac{144}{\sin 45^\circ} = 203,65 \text{ kN}$$

- Potřebná plocha výztuže:

$$A_{s,req} = \frac{203,65 * 10^3}{434,8} = 468 \text{ mm}^2$$

Jsou navrženy 2ø18 mm $\rightarrow A_{s,prov}=509 \text{ mm}^2$

$$509 * 434,8 = 221,31 \text{ kN} > 203,65 \text{ kN} \dots \text{VYHOVUJE}$$

- Šikmé pruty kotveny pomocí kotevní desky

- Minimální rozměr kotevní desky:

$$\left(\frac{468}{509}\right) \frac{254 * 434,8}{14,96} = 6\,788 \text{ mm}^2 \rightarrow 85 * 85 \text{ mm}$$

- Návrh konstrukční svislé a vodorovné výztuže ozubu:

- Tlaková síla $C_{12}^{(A)} = 187,30 \text{ kN}$

- Délka vzpěry l:

$$l = \frac{267}{\cos 52,34^\circ} = 437 \text{ mm}$$

- Šířka vzpěry ve styčnicku 1:

$$a = \frac{150}{\sin 52,34^\circ} = 190 \text{ mm}$$

- Příčná tahová síla:

$$2F_t = 0,5 * \left(1 - \frac{0,7 * a}{h}\right) * F = 0,5 \left(1 - \frac{0,7 * 190}{437}\right) 187,30 \\ = 65,99 \text{ kN}$$

$$\uparrow F = 1,2 * 65,99 * \cos 52,34^\circ = 48,38 \text{ kN}$$

$$\rightarrow F = 1,2 * 65,99 \sin 52,34^\circ = 62,69 \text{ kN}$$

- Tlaková síla ve styčnicku $C_{12}^{(B)} = 144 \text{ kN}$

- Délka vzpěry:

$$400 - \frac{13,85}{2} = 393 \text{ mm}$$

- Šířka vzpěry ve styčnicku 1: $a = 150 \text{ mm}$

- Příčná tahová síla:

$$2F_t = 0,5 \left(1 - \frac{0,7 * 150}{393}\right) 144 = 52,76 \text{ kN}$$

- Celková plocha vodorovné výztuže ozubu: $62,69 + 52,76 = 115,45 \text{ kN}$

- Celková plocha svislé výztuže ozubu: $48,38 + 35,7 = 84,08 \text{ kN}$

- Potřebná plocha vodorovné výztuže ozubu $A_{s,req}$:

$$A_{s,req} = \frac{115,45 * 10^3}{434,8} = 266 \text{ mm}^2$$

Vodorovnou výztuž ozubu budou tvořit 4ø10 mm $\rightarrow A_{s,prov}=314 \text{ mm}^2$

$$314 * 434,8 = 136,53 \text{ kN} > 115,45 \text{ kN} \dots \text{VYHOVUJE}$$

- Potřebná plocha svislé výztuže ozubu $A_{s,req}$:

$$A_{s,req} = \frac{84,08 * 10^3}{434,8} = 194 \text{ mm}^2$$

Svislou výztuž ozubu budou tvořit 2 dvoustřížné třmínkyø8 mm $\rightarrow A_{s,prov}=201 \text{ mm}^2$

$$201 * 434,8 = 87,397 \text{ kN} > 84,08 \text{ kN} \dots \text{VYHOVUJE}$$

- Minimální plocha výztuže pro zachycení příčných tahů A_s :

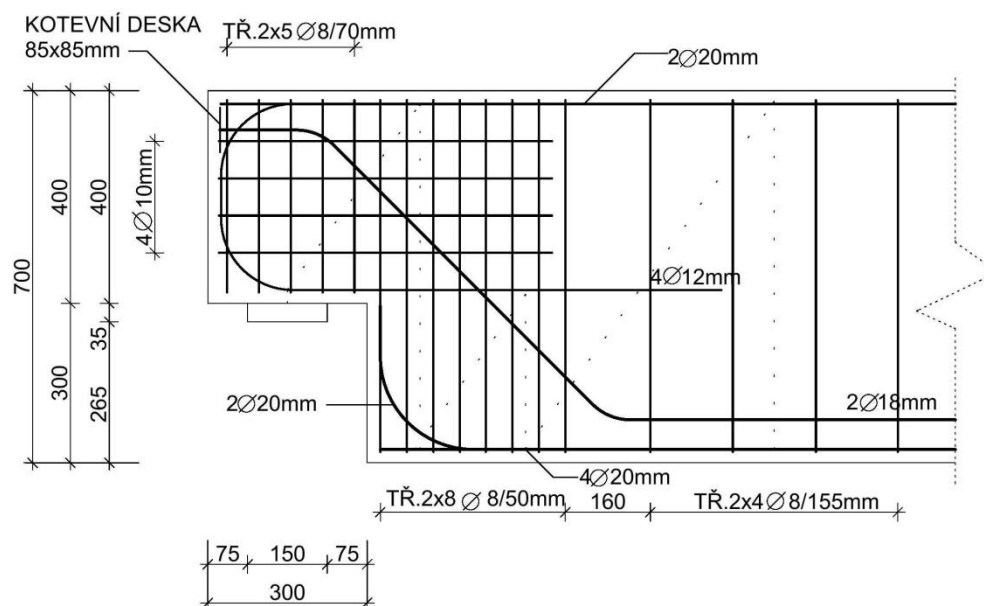
$$A_s \geq 0,003 * A_c$$

$$A_s \geq 0,003 * 0,35 * 0,4$$

$$A_s \geq 4,2 * 10^{-4} \text{ mm}^2$$

Je navržen 5x dvoustřížný třmínek ø8 mm $\rightarrow A_{s,prov} = 5,02 * 10^{-4} \text{ mm}^2$

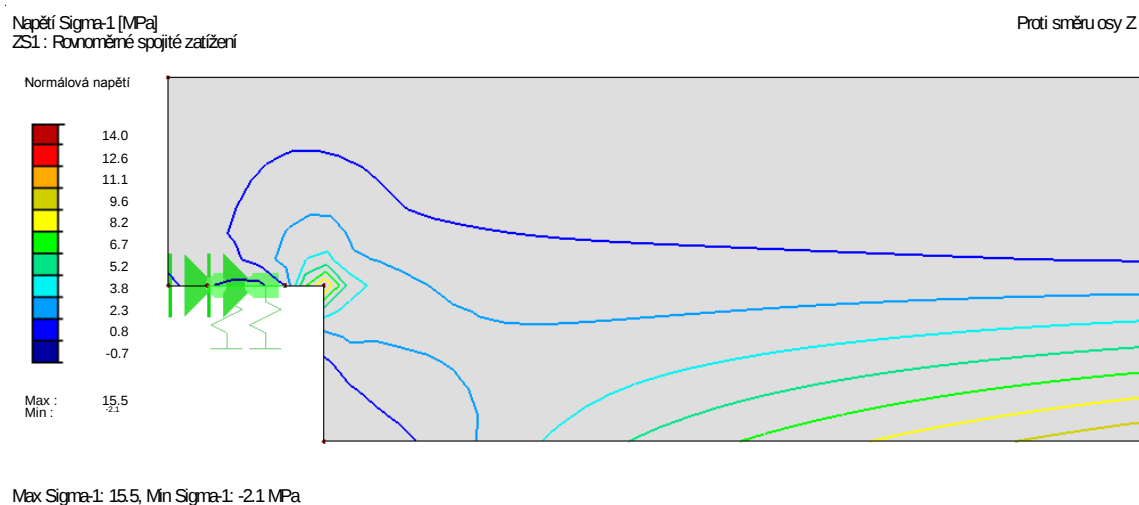
3.1.1 Schéma vyztužení ozubu nosníku



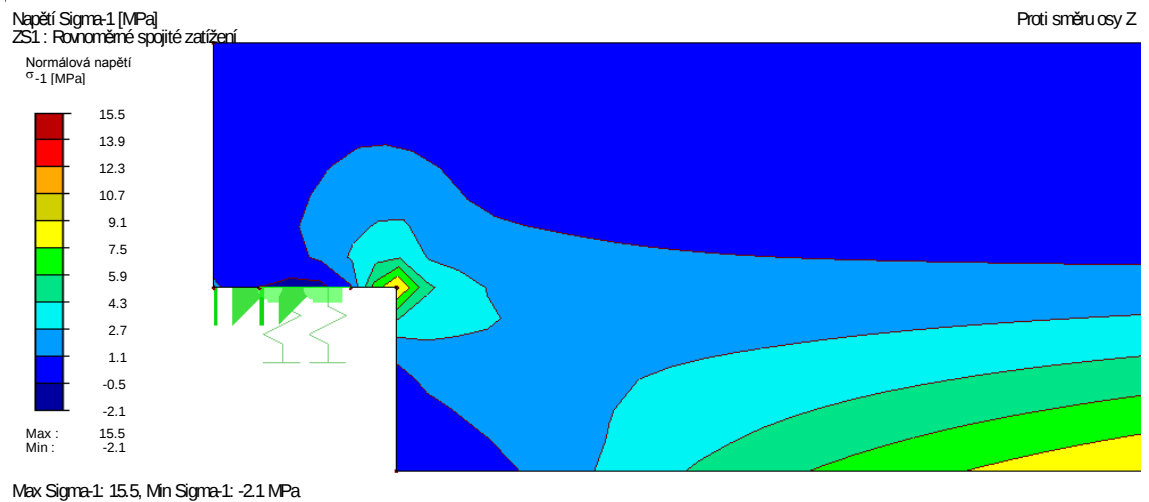
Obrázek 12 – Schéma vyztužení ozubu nosníku

3.2 Výsledky ozubu na nosníku metodou konečných prvků

Jako podklad pro tvorbu modelů náhradní příhradoviny slouží trajektorie hlavních napětí. Aby byly směry hlavních napětí zjištěny, byly jednotlivé modely vymodelovány v programu. V této práci byl použit software RFEM pracující na principu metody konečných prvků.

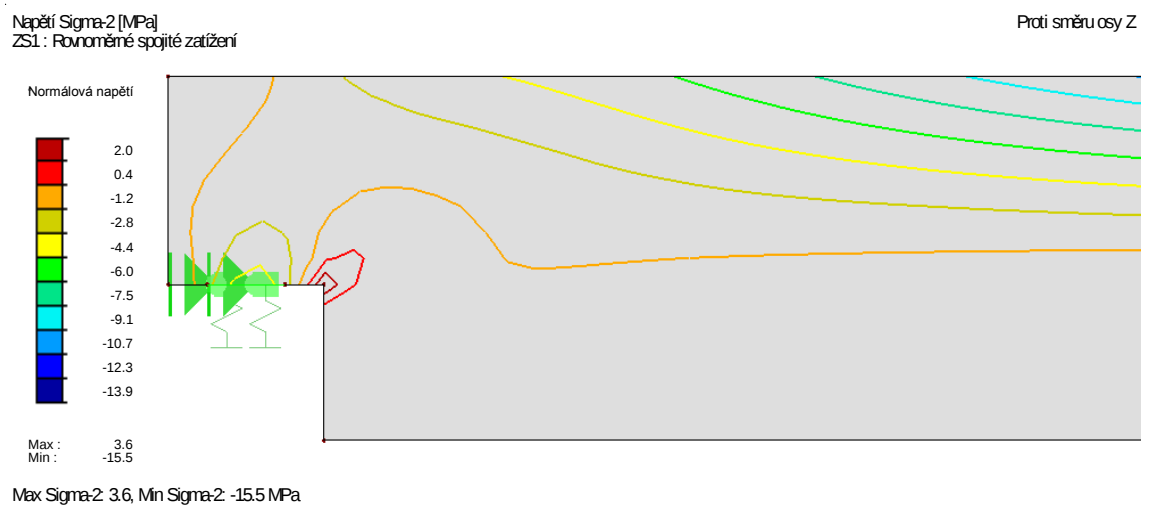


Obrázek 13 – Izolinie hlavního napětí σ_1 před zahuštěním sítě konečných prvků

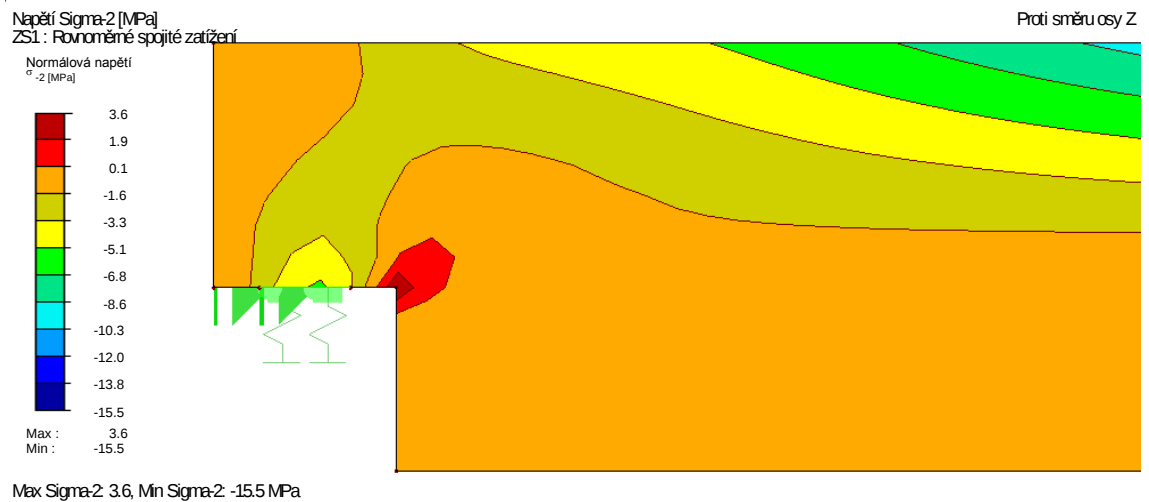


Obrázek 14 – Izoplochy hlavního napětí σ_1 před zahuštěním sítě konečných prvků

Největší tahové napětí vzniká uprostřed nosníku. Při horním povrchu vzniká tlačný pás, který vede po celé délce až do podpory. To je běžné chování nosníků. Na tomto nosníku byl vytvořen ozub, čímž byla narušena jeho geometrická spojitost a vytvořila se D-oblast. Na obrázku 14 lze vidět detail ozubu nosníku zatíženého rovnoměrným spojitým zatížením. Vysoké tahové napětí se koncentruje do koutu ozubu.

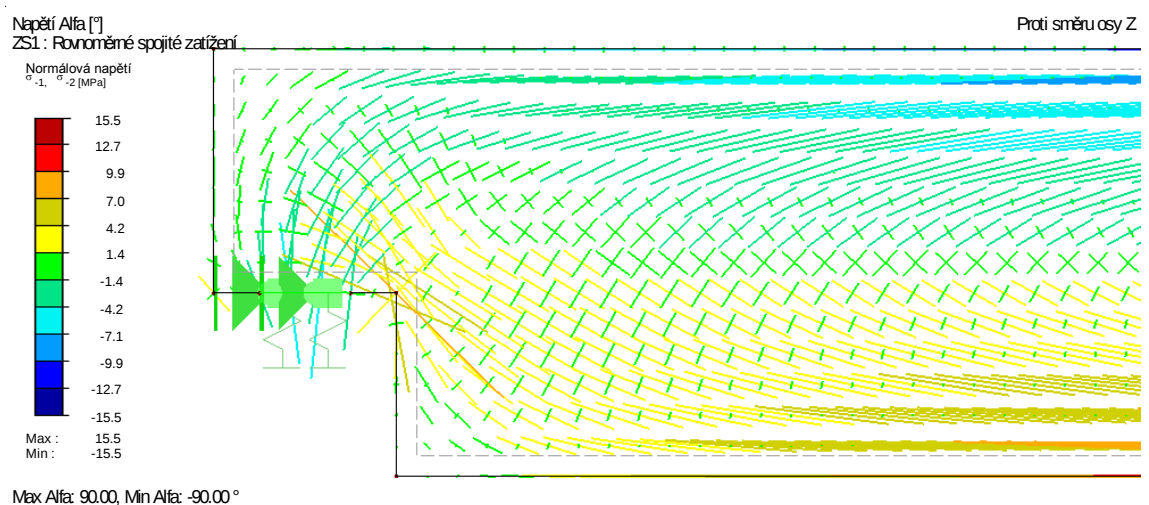


Obrázek 15 – Izolinie hlavního napětí σ_2 před zahuštěním sítě konečných prvků



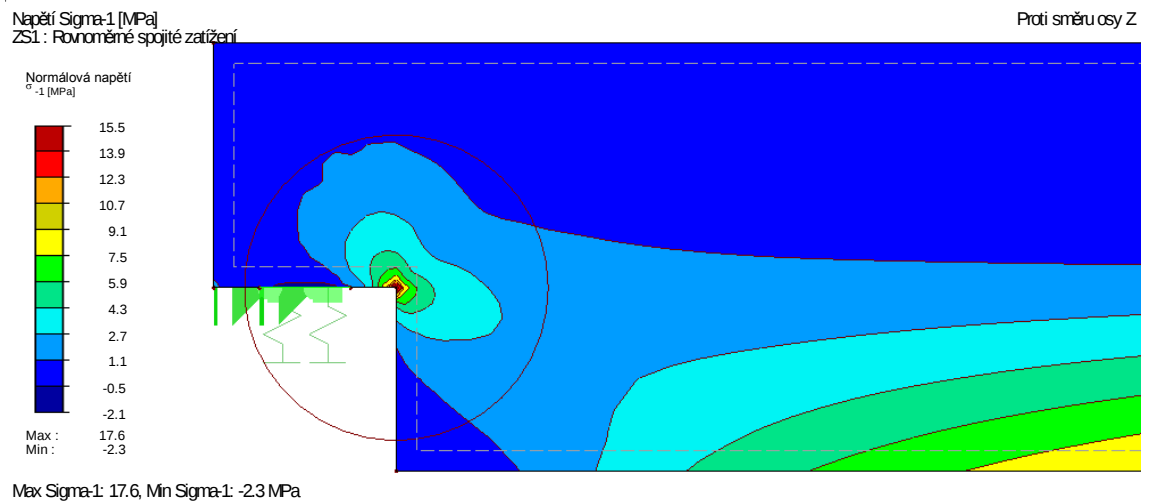
Obrázek 16 – Izoplochy hlavního napětí σ_2 před zahuštěním sítě konečných prvků

Na obrázku 16 je zobrazeno hlavní napětí σ_2 . Je na něm ještě zřetelněji vidět jak se napětí koncentruje do koutu ozubu. Tahové napětí v této oblasti dosahuje hodnoty až 3,6 MPa. V této oblasti vznikají poruchové trhliny. Nejúčinnější umístění výztuže k těmto trhlinám je kolmé, jak tomu bylo učiněno v řešeném příkladu.

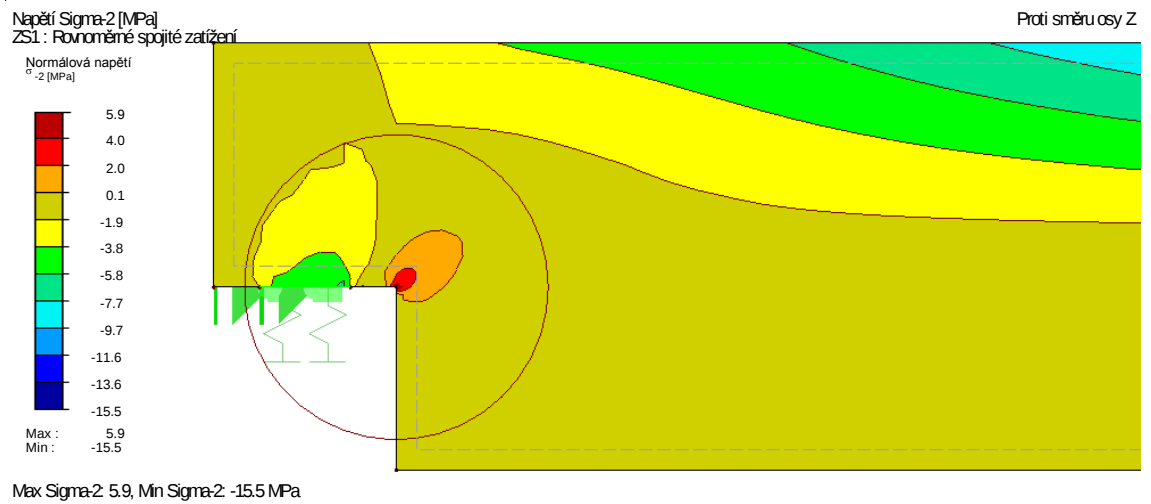


Obrázek 17 – Trajektorie hlavních napětí před zahuštěním sítě prvků

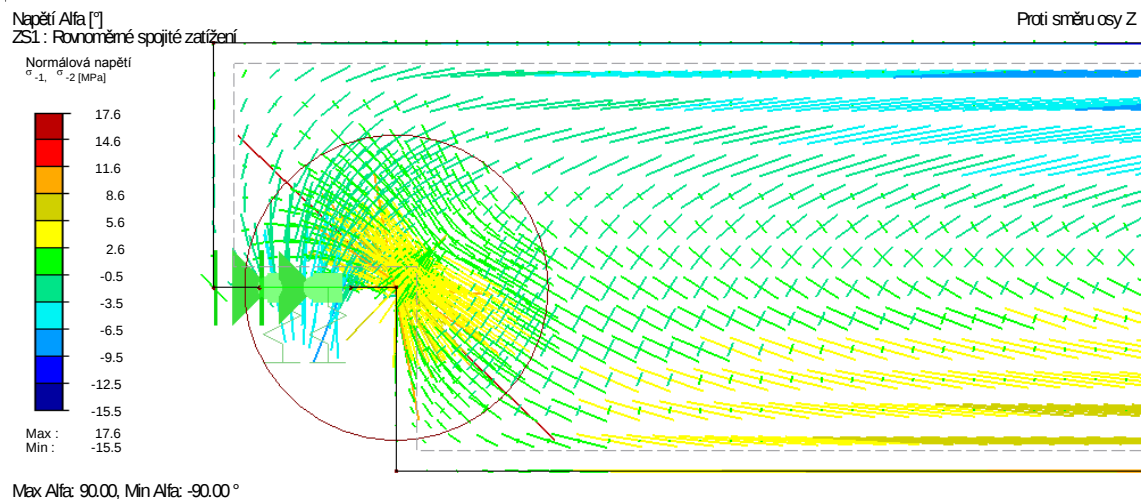
Na obrázku 17 jsou zobrazeny trajektorie hlavních napětí. Jak lze vidět, dochází k zakřivení trajektorií hlavních tlakových napětí. V oblasti nad podporou, se musí počítat s příčnými tahy, k čemuž musí být přizpůsobeno vyztužení oblasti.



Obrázek 18 – Izoplochy hlavního napětí σ_1 po zahuštění sítě konečných prvků

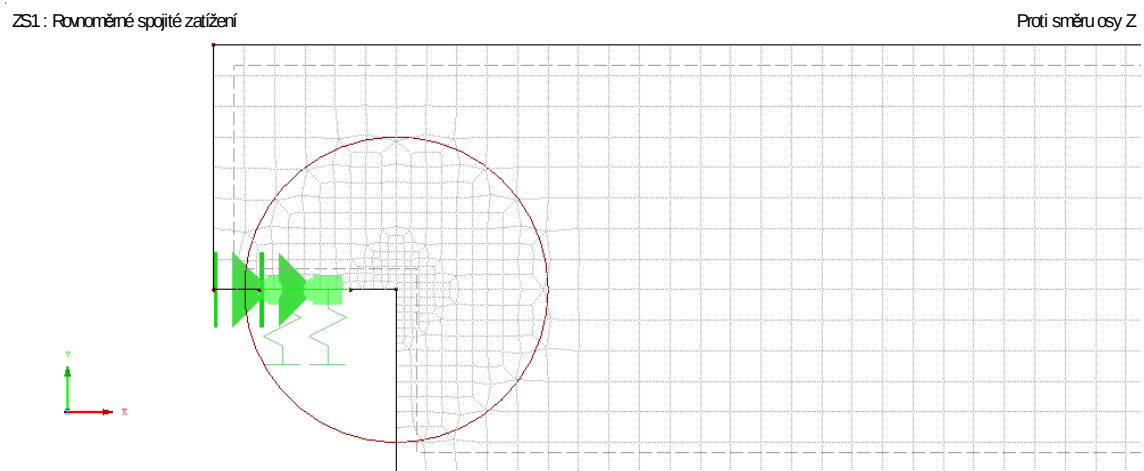


Obrázek 19 – Izoplochy hlavního napětí σ_2 po zahuštění sítě konečných prvků

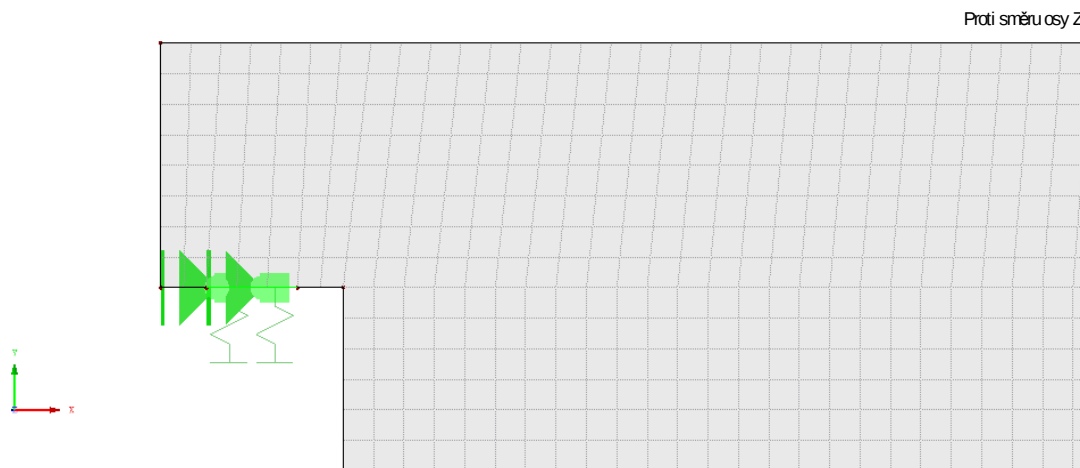


Obrázek 20 – Trajektorie hlavních napětí po zahuštění sítě prvků

Jak již bylo ukázáno výše, tahové napětí se koncentruje do koutu ozubu. Proto byla kolem uzlu umístěného v koutu ozubu zahuštěna síť konečných prvků. Oblast zahuštění, zobrazuje kružnice, která je vidět na obrázku 20. Ze škály umístěné v levé části obrázku je patrné, že tahové napětí po zahuštění sítě kolem tohoto uzlu, vychází o 2,2 MPa větší. To poukazuje na skutečnost, že výsledky napětí z programu pracujícím na principu metody konečných prvků, jsou do značné míry ovlivněny hustotou sítě prvků.



Obrázek 21 – Síť konečných prvků po zahuštění



Obrázek 22 – Síť konečných prvků před zahuštěním

Obrázek 22 ukazuje, jak vypadá síť konečných prvků před zahuštěním. Na obrázku 21 je vidět kružnice. Uvnitř této kružnice bylo provedeno zahuštění sítě konečných prvků. Z porovnání těchto obrázků, je patrné, že přírůstek konečných prvků je značný.

4 Stěnové nosníky

Často se vyskytující konstrukcí v pozemních stavbách, jsou stěnové nosníky. Za stěnový nosník se označuje konstrukce, jejíž trojnásobek výšky je větší než délka. V těchto nosnících neplatí Bernoulliova hypotéza o zachování rovinnosti průřezu. Jedná se tedy o D – oblast.

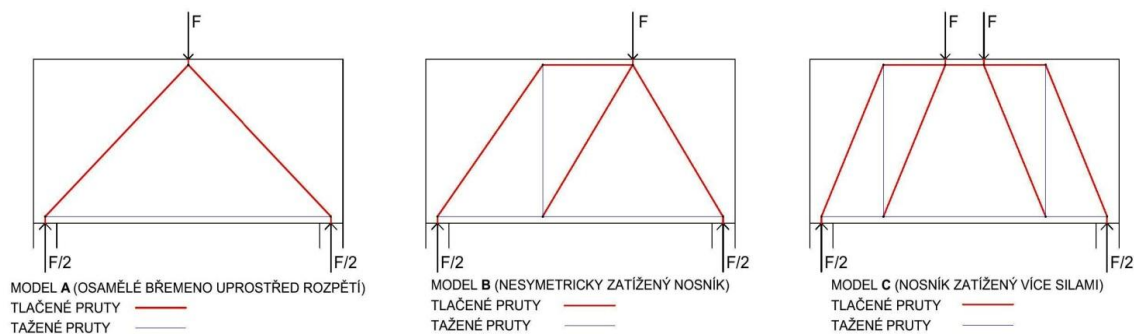
Charakteristické vlastnosti stěnových nosníků:

- průběh tahových napětí v poli, se příliš neliší od napětí v blízkosti podepření,
- nelze zanedbat smykové deformace
- celý stěnový nosník je D-oblast.

Modely náhradní příhradoviny pro řešení stěnových nosníků vycházejí z trajektorií hlavních napětí. Při modelování stěnových nosníků je doporučeno vycházet z lineárních modelů. Pokud by se vycházelo z modelu nelineárního, rameno mezi výslednicí tlačené a tažené oblasti by se zvětšilo. V důsledku toho by stačilo na přenesení ohybového momentu menší množství výztuže, ale šířka trhlin by rostla. U nelineárního modelu je nutné ověřit mezní stav použitelnosti. Podobně též [2, s.52].

Při neměnní se tloušťce stěnového nosníku je pro návrh nejdůležitější posoudit napětí ve styčnicích a táhlech. V této práci bude ukázáno řešení prostého stěnového nosníku zatíženého jednou nesymetricky umístěnou osamělou silou a dvěma osamělými silami každou o jiné velikosti. Při zatížení osamělým břemenem se na vysokém nosníku při horním povrchu koncentruje výrazné vodorovné tlakové napětí. Naopak při dolních vlákních napětí tahové. Při dolním povrchu se tedy nachází táhla a při horním vzpěra náhradního příhradového modelu. Trajektorie tlakových napětí směřují k podporám.

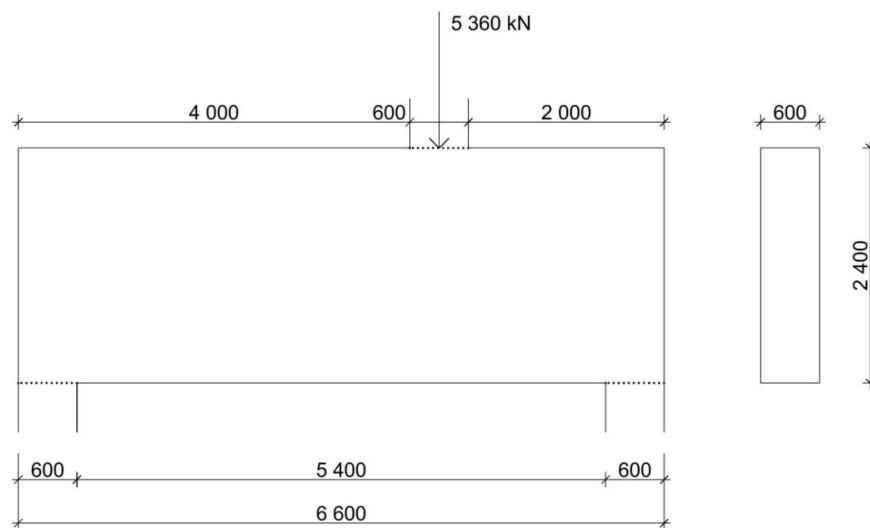
Na základě těchto znalostí, může být vytvořen model náhradní příhradoviny. Na začátku výpočtu se nejdříve musí odhadnout rameno vnitřních sil z. Porovnáním vypočtených napětí s napětím návrhovým bude zjištěna minimální šířka táhla a vzpěry. Pokud to geometrie modelu umožní, je lepší volit tloušťku vzpěry větší, aby vycházelo lépe napětí v uzlech. Když je známa šířka táhla a vzpěry, může se dopočítat skutečné rameno vnitřních sil z. Poté může být model upraven a na takto upraveném modelu může být prováděno řešení vyztužení stěnového nosníku.



Obrázek 23 – Ukázky některých modelů náhradní příhradoviny v závislosti na poloze zatížení [5]

Geometrie příhradového modelu je závislá na umístění zatížení. Situace na modelu A je jednoduchá. Předpokládá se přímý přenos sil ze zatížení do podpor. Model se skládá ze dvou vzpěr směřujících od zatížení směrem do podpor a v dolní části je umístěno táhlo. Model B byl doplněn o jednu vzpěru navíc, aby bylo dodrženo pravidlo o minimálním sklonu mezi vzpěrou a táhlem 25° . Model C je jeden z více modelů, které odpovídají tomuto zatížení. Tento model vede k návrhu třmínek u podpor. Model B a C bude použit při výpočtech.

4.1 Řešení stěnového nosníku zatíženého osamělým břemenem metodou náhradní příhradoviny



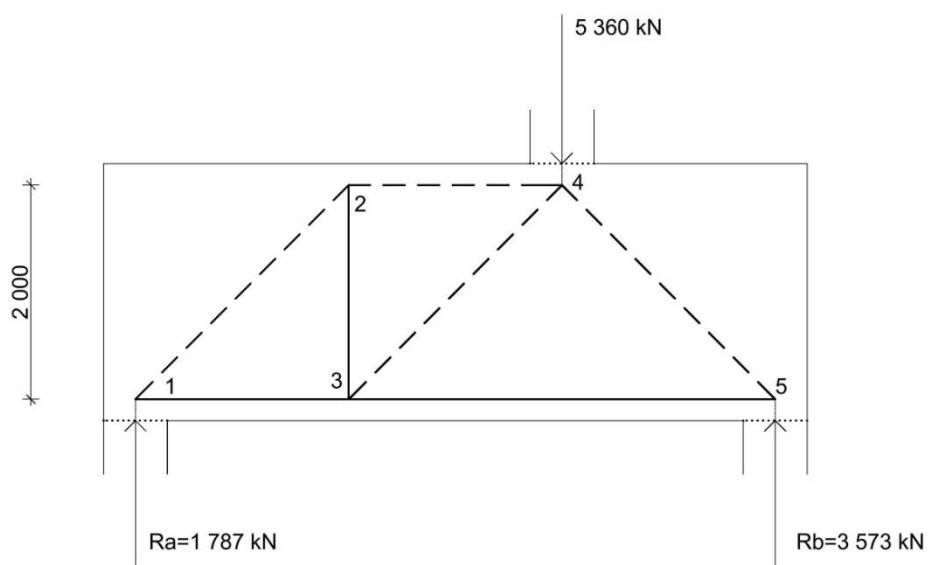
Obrázek 24 – Geometrie stěnového nosníku zatíženého osamělým břemenem

Postup výpočtu a použité vzorce převzaty z [5]

Materiálové charakteristiky:

- Beton C30/37: $f_{cd} = 20,00 \text{ MPa}$
- Ocel B500B: $f_{yd} = 434,8 \text{ MPa}$

Krytí výztuže: 25 mm



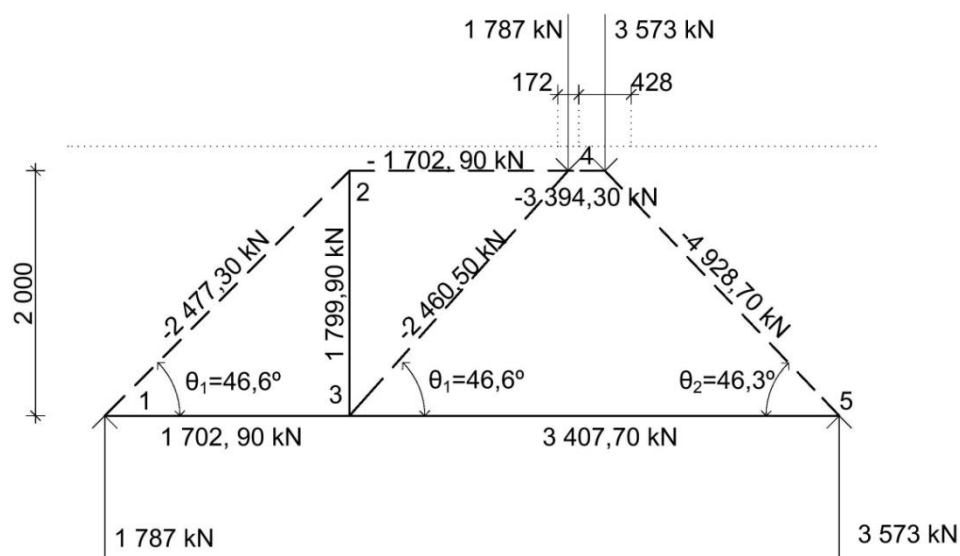
Obrázek 25 – Výchozí příhradový model

Reakce:

$$\sum M_{ia} = 0: 5360 \cdot 4,0 - R_b \cdot 6,0 = 0 \rightarrow R_b = 3573 \text{ kN}$$

$$\sum F_{iy} = 0: R_a = 5360 - 3573 = 1787 \text{ kN}$$

Pro analýzu uzlu 4 je vhodné rozdělit lokální zatížení a místo působení těchto sil na dvě části v poměru vzdáleností zatížení od podpor a rozpětí. Jak uvádí [5, s.41]



Obrázek 26 – Vnitřní síly na výchozím příhradovém modelu

V první fázi bylo odhadnuto rameno mezi výslednicí horního tlačného pásu a táhlem na 2 000 mm. Aby mohl být model upřesněn, bude určena výška táhla a vzpěry. Větší reakce je v uzlu 5, proto bude započato porovnání napětí v tomto uzlu. Z porovnání napětí v uzlu 5 s návrhovým napětím se dopočítají potřebné výšky, aby mohl být model upřesněn.

- Uzel 5: C-C-T $\rightarrow k_2 = 0,85$

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

$$\sigma_{max} = 0,88 * 0,85 * 20,00 = 14,96 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{sd5R} = \frac{3\,573 * 10^3}{600 * 600} = 9,93 \text{ MPa} < 14,96 \text{ MPa}$$

- Šířka táhla w_{t53} :

$$w_{t53} = \frac{3\,407,70 * 10^3}{745 * 600} = 445 \rightarrow \text{šířka táhla je zvolena } 450 \text{ mm}$$

- Šířka vzpěry w_{c54} :

$$\begin{aligned} w_{c54} &= w_{t53} * \cos\theta_2 + l_r * \sin\theta_2 \\ &= 450 * \cos 46,3^\circ + 600 * \sin 46,3^\circ = 745 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\sigma_{sd54} = \frac{4\,928,70 * 10^3}{745 * 600} = 11,03 < 14,96 \text{ MPa}$$

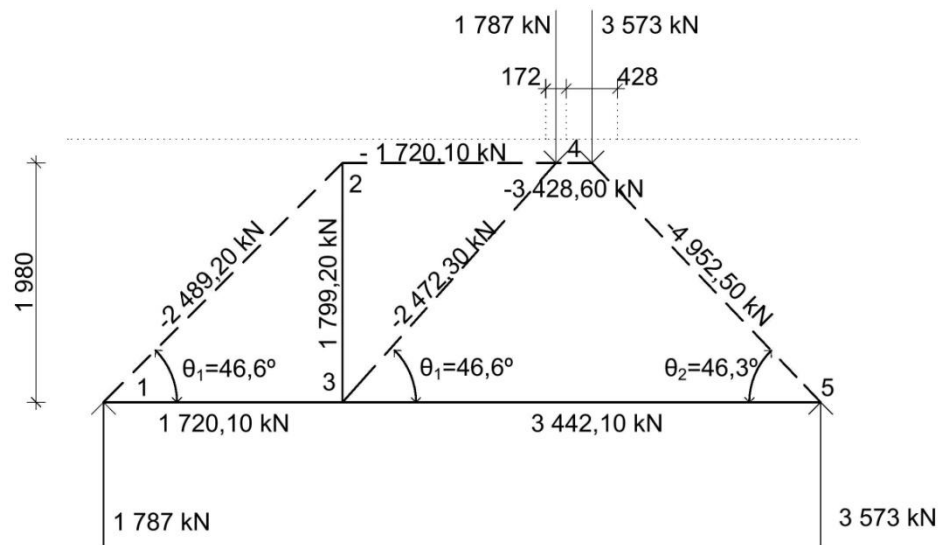
- Výška uzlové oblasti 4:

- Uzel 4 $\rightarrow$ C-C-C $\rightarrow k_1 = 1,0$

$$h_2 = \frac{450 * 0,85}{1,0} = 383 \text{ mm} \rightarrow \text{bude uvažováno } 390 \text{ mm}$$

- Upřesnění ramena z:

$$z = 2\,400 - \frac{450 + 390}{2} = 1\,980 \text{ mm}$$



Obrázek 27 – Vnitřní síly na upřesněném modelu

- Uzel 4: C-C-C-C $\rightarrow k_1 = 1,0$

$$\sigma_{RDmax} = 1,0 * 0,88 * 20,00 = 17,60 \text{ MPa}$$

- Výška uzlu: 390 mm
- Šířka uzlu: 600 mm
- Šířka vzpěry v místě uzlu w_{c42} : 390 mm

$$\sigma_{sd2R} = \frac{5\,360 * 10^3}{600 * 600} = 14,89 \text{ MPa} < 17,60 \text{ MPa}$$

- Šířka vzpěry w_{c45} :

$$w_{c45} = w_{c32} * \cos 46^\circ + l_r * \sin 46^\circ = 390 * \cos 46^\circ + 428 * \sin 46^\circ = 579 \text{ mm}$$

- Šířka vzpěry w_{c43} :

Síla v prutu 4-2 je přibližně o polovinu menší než v uzlové oblasti
 $\rightarrow w_{c42} = 195 \text{ mm}$

- Kontrola napětí:

$$\sigma_{SD45} = \frac{4\,952,50 * 10^3}{579 * 600} = 14,3 \text{ MPa} < 17,60 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{SD42} = \frac{1\,720,10 * 10^3}{195 * 600} = 14,3 \text{ MPa} < 17,60 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{SD43} = \frac{2\,472,30 \cdot 10^3}{259 \cdot 600} = 15,91 \text{ MPa} < 17,60 \text{ MPa}$$

- Uzel 1: C-C-T $\rightarrow k_2 = 0,85$

$$\sigma_{RDmax} = 0,88 \cdot 0,85 \cdot 20,00 = 14,96 \text{ MPa}$$

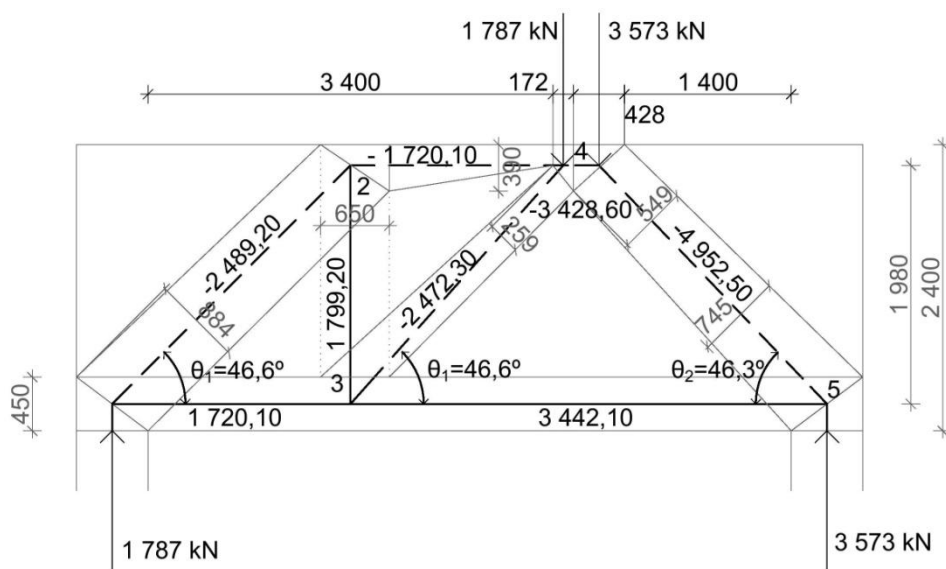
$$\sigma_{SD1R} = \frac{1\,787 \cdot 10^3}{600 \cdot 600} = 4,96 \text{ MPa} < 14,96 \text{ MPa}$$

- Šířka vzpěry w_{c12} :

$$w_{c12} = 450 \cdot \cos 46,3^\circ + 600 \cdot \sin 46,3^\circ = 884 \text{ mm}$$

$$\sigma_{SD12} = \frac{2\,849,20 \cdot 10^3}{884 \cdot 600} = 4,69 \text{ MPa} < 14,96 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{SD13} = \frac{1\,720,10 \cdot 10^3}{450 \cdot 600} = 6,37 \text{ MPa} < 14,96 \text{ MPa}$$



Obrázek 28 – Geometrie upřesněného modelu

- Výztuž táhla 5-3:

- Potřebná plocha výztuže $A_{s,req}$:

$$A_{s,req} = \frac{3\,442,10 \cdot 10^3}{434,8} = 7\,917 \text{ mm}^2$$

Je navrženo 18 $\emptyset$ 25 mm ve 3 vrstvách $\rightarrow A_{s,prov} = 8\,838 \text{ mm}^2$

$$8\,838 * 434,8 = 3\,843\,kN > 3\,442\,kN \dots VYHOVUJE$$

- Kotvení:

$$f_{bd} = 2,25 * \eta_1 * \eta_2 * f_{ctd} = 2,25 * 1,0 * 1,0 \frac{2}{1,5} = 3\,MPa$$

$$\sigma_{SD} = \frac{7\,917}{8\,838} * \frac{500}{1,15} = 389,47\,MPa$$

$$l_{b,rqd} = \frac{25}{4} * \frac{389,47}{3} = 811\,mm$$

Kotvení výztuže bude provedeno pomocí ohybů $\rightarrow \alpha_1 = 0,7$

$$l_{bd} = 0,7 * 811 = 568\,mm$$

- Kontrola zakřivení prutu:

$$F_{bt} = 491 * 389,47 = 191,23\,kN$$

$$a_b = 25 + 8 + \frac{25}{2} = 45,5\,mm$$

$$\varnothing m_{min} \geq \frac{F_{bt} \left(\frac{1}{a_b} + \frac{1}{2\varnothing} \right)}{f_{cd}} \geq \frac{191,23 * 10^3 \left(\frac{1}{45,5} + \frac{1}{2 * 25} \right)}{20} = 400\,mm$$

- Návrh svislé a vodorovné výztuže v pravé části nosníku

Do stávajícího modelu náhradní příhradoviny bude umístěna vzpěra spojující uzlové oblasti 1 a 4. Tato šikmá vzpěra povede k návrhu konstrukční ortogonální výztuže na vznikající příčné tahy. Nově vzniklý model lze vidět na obrázku 29.

- Ortogonální výztuž na příčné tahy:

- Délka vzpěry l :

$$\sin 46^\circ = \frac{1\,980}{h} \rightarrow l = 2\,723\text{ mm}$$

- Šířka vzpěry w_c :

$$w_c = 390 * \cos 46^\circ + 600 * \sin 46^\circ = 702\text{ mm}$$

- Síla ve vzpěře: 4 952,50 kN
- Příčný tah vzpěry:

$$2F_t = 0,5 \left(1 - 0,7 \frac{w}{h} \right) F = 0,5 \left(1 - 0,7 \frac{702}{2\,753} \right) 4\,952,50 \\ = 2\,034\text{ kN}$$

$$\uparrow F = 2\,036 * \cos 46^\circ = 1\,414\text{ kN}$$

$$\rightarrow F = 2\,036 * \sin 46^\circ = 1\,465\text{ kN}$$

- Celková svislá výztuž navržená na sílu:

$$1\,150 + 1\,414 = 2\,564\text{ kN}$$

$$A_{s,req} = \frac{2\,564 * 10^3}{434,8} = 5\,897\text{ mm}^2$$

Je navrženo 19 čtyřstržných třmínků $\emptyset 10/110\text{ mm} \rightarrow A_{s,prov} = 6\,004\text{ mm}^2$

$$6\,004 * 434,8 = 2\,610\text{ kN} > 2\,564\text{ kN} \dots \text{VYHOVUJE}$$

- Vodorovná konstrukční výztuž: $F = 1,2 * 1\,465 = 1\,758\text{ kN}$

$$A_{s,req} = \frac{1\,758 * 10^3}{434,8} = 4\,043\text{ mm}^2$$

Je navrženo 16 $\emptyset$ R18/283mm $\rightarrow A_{s,prov} = 4\,064\text{ mm}^2$

Stupeň vyztužení:

$$\rho = \frac{508}{600 * 283} = 0,29\% < 0,3\%$$

Nevyhovuje stupeň vyztužení. Bude navrženo 18 $\emptyset$ 18/250 mm $\rightarrow A_{s,prov} = 4\,572\text{ mm}^2$

$$4\,572 * 434,8 = 1\,989\,kN > 1\,758\,kN \dots VYHOVUJE$$

$$\rho = \frac{508 * 10^3}{600 * 250} = 0,34\% > 0,3\% \dots VYHOVUJE$$

- Návrh svislé a vodorovné výztuže v levé části nosníku:

$$\beta = \frac{3\,400}{2 * 2\,175} = 0,78$$

- Redukovaná posouvající síla: $1\,787 * 0,78 = 1\,397\,kN$

$$A_{s,req} = \frac{1\,397 * 10^3}{434,8} = 3\,212\,mm^2$$

V oblasti $0,75 * 3\,400 = 2\,550\,mm$ je navrženo 11 čtyřstřížných třmínků $\varnothing 10/255mm \rightarrow A_{s,prov} = 3\,476\,mm^2$

$$3\,476 * 434,8 = 1\,511\,kN \dots VYHOVUJE$$

- Délka lahvovité vzpěry l:

$$l = \sqrt{3\,782^2 + 1\,980^2} = 4\,272\,mm$$

- Úhel mezi vzpěrou a táhlem:

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{1\,980}{3\,786} \rightarrow \theta = 27,6^\circ$$

- Šířka vzpěry:

$$w_c = 390 * \cos 27,6^\circ + 172 * \sin 27,6^\circ = 425\,mm$$

- Síla ve vzpěře F:

$$F = \frac{-1\,787}{\sin 27,6^\circ} = -3\,857\,kN$$

- Příčný tah vzpěry:

$$2F_t = 0,5 \left(1 - 0,7 \frac{425}{4\,272} \right) 3\,857 = 1\,794\,kN$$

$$\uparrow F = 1\,794 * \cos 27,6^\circ = 1\,590\,kN$$

$$\rightarrow F = 1\,794 * \sin 27,6^\circ = 831,15\,kN$$

- Svislá výztuž navržená na sílu: $1\,397 + 1,2 * 1\,590 = 3\,305\,kN$

$$A_{s,req} = \frac{3\,305 \cdot 10^3}{434,8} = 7\,601 \text{ mm}^2$$

Je navrženo 25 čtyřtřížných třmínků $\varnothing 10/170\text{mm} \rightarrow A_{s,prov} = 7\,900 \text{ mm}^2$

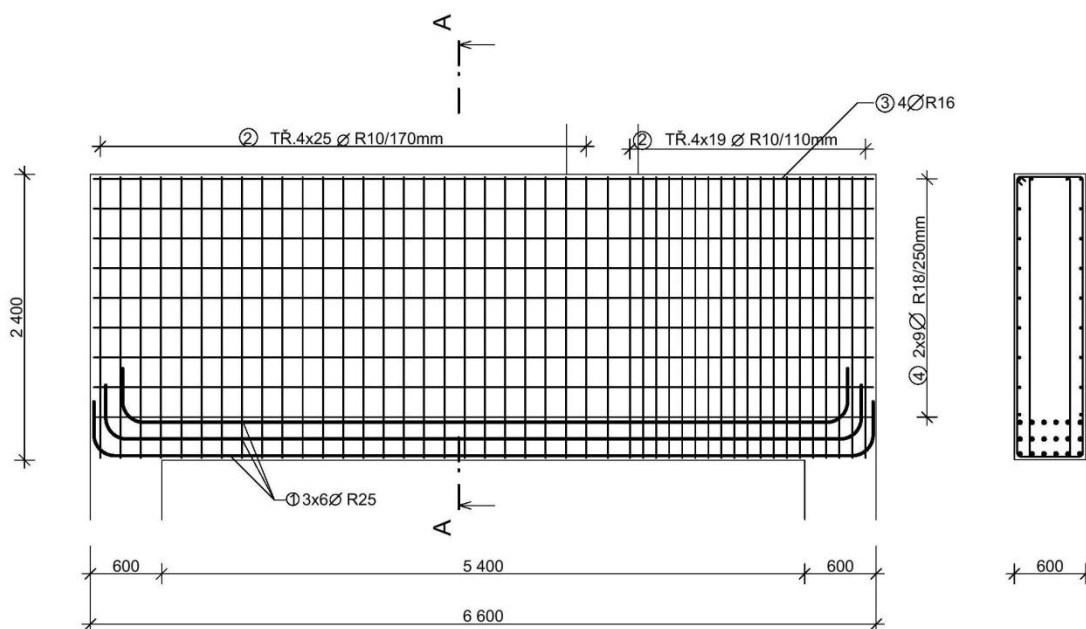
$$7\,900 \cdot 434,8 = 3\,435 \text{ kN} > 3\,305 \text{ kN} \dots \text{VYHOVUJE}$$

- Vodorovná výztuž pro zachycení příčných tahů $A_{s,req}$:

$$A_{s,req} = \frac{1,2 \cdot 831,15 \cdot 10^3}{434,8} = 2\,294 \text{ mm}^2 < 4\,064 \text{ mm}^2 \rightarrow \text{přeneseno}$$

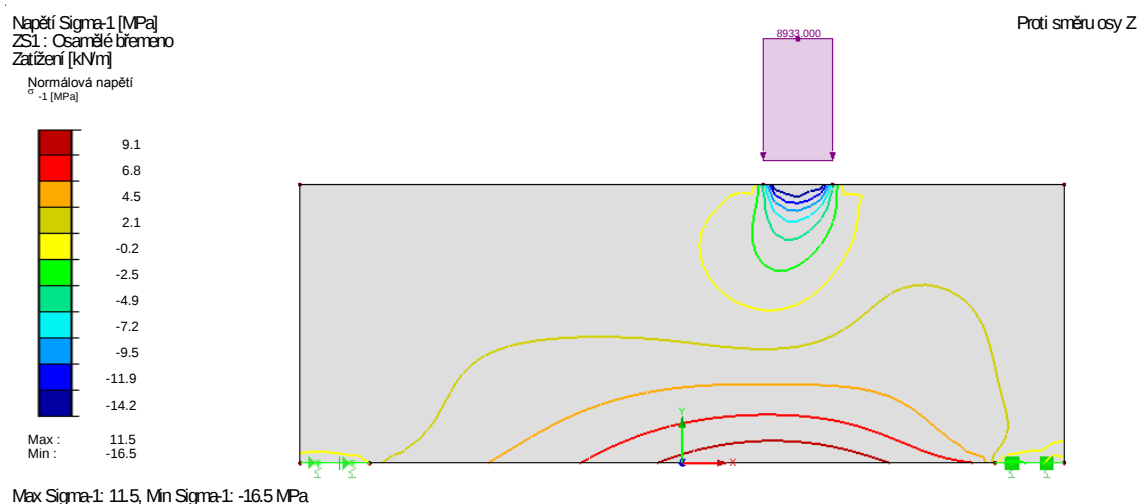
výztuží navrženou v pravé části nosníku.

4.1.1 Schéma vyztužení stěnového nosníku zatíženého osamělým břemenem

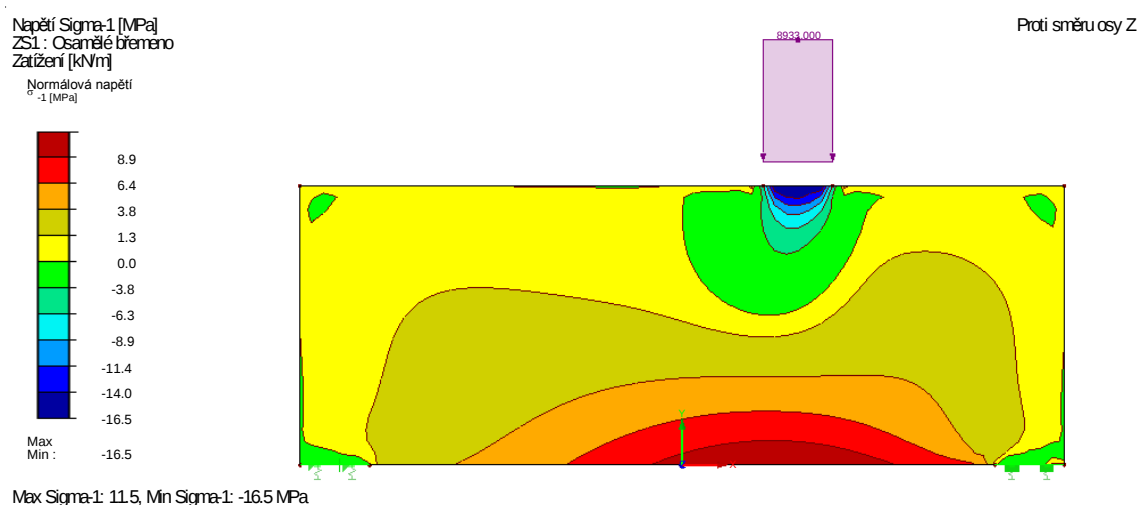


Obrázek 30 – Schéma vyztužení stěnového nosníku

4.2 Výsledky stěnového nosníku zatíženého jedním osamělým břemenem metodou konečných prvků

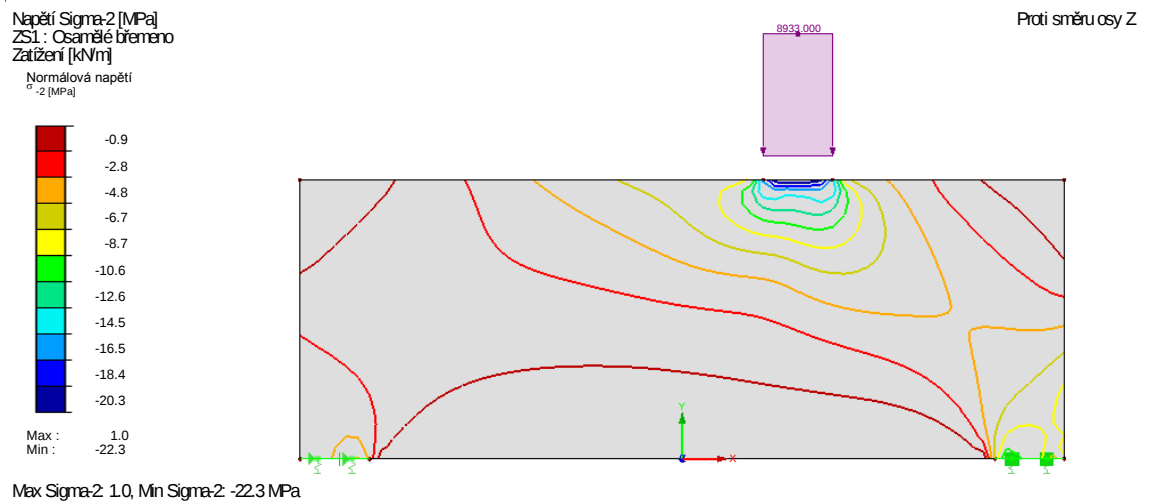


Obrázek 31 – Izolinie hlavního napětí σ_1 stěnového nosníku zatíženého jednou silou

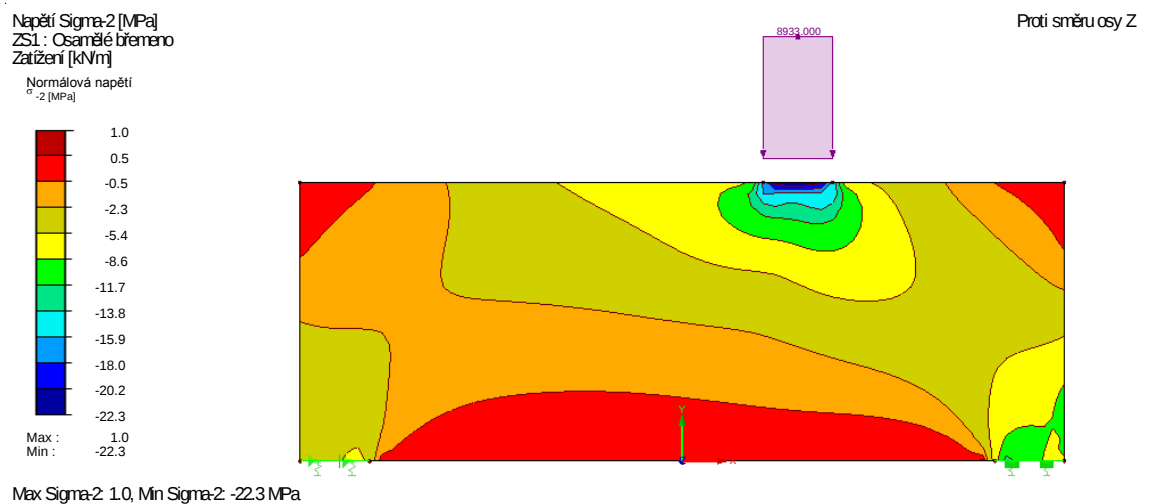


Obrázek 32 – Izoplochy hlavního napětí σ_1 stěnového nosníku zatíženého jednou silou

Na obrázku 31 a 32 je stěnový nosník zatížen osamělou silou blíže k pravé podpoře. Největší tlakové napětí je v místě vnesení zatížení do nosníku. Toto napětí dosahuje hodnoty -1,65 MPa. Při horním povrchu vzniká tlačaná oblast, která postupuje směrem po okraji nosníku do podpor. Největší tahové napětí je při dolním okraji nosníku blíže k pravé podpoře. Toto napětí dosahuje hodnoty 1,15 MPa.

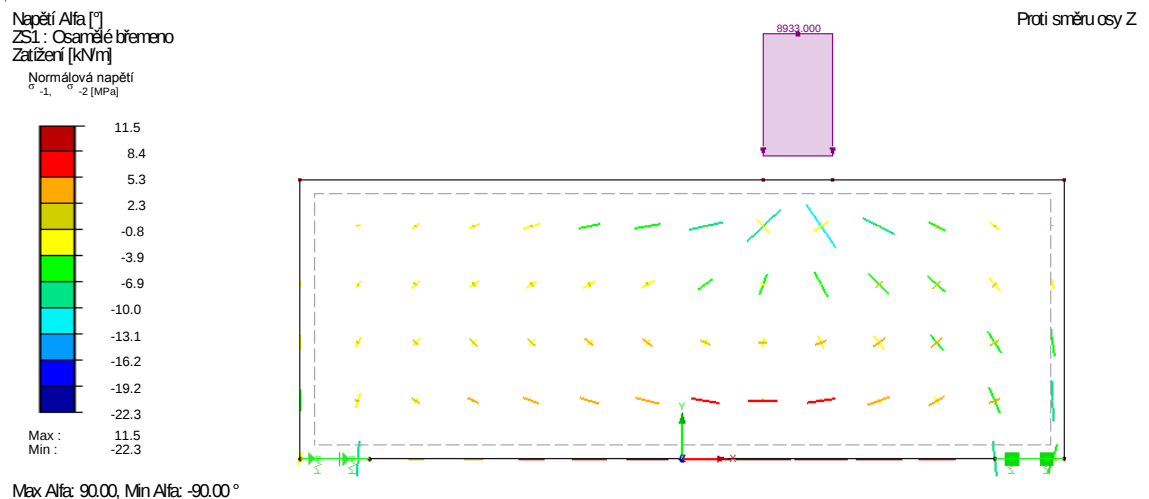


Obrázek 33 – Izolinie hlavního napětí σ_2 stěnového nosníku zatíženého jednou silou



Obrázek 34 – Izoplochy hlavního napětí σ_2 stěnového nosníku zatíženého jednou silou

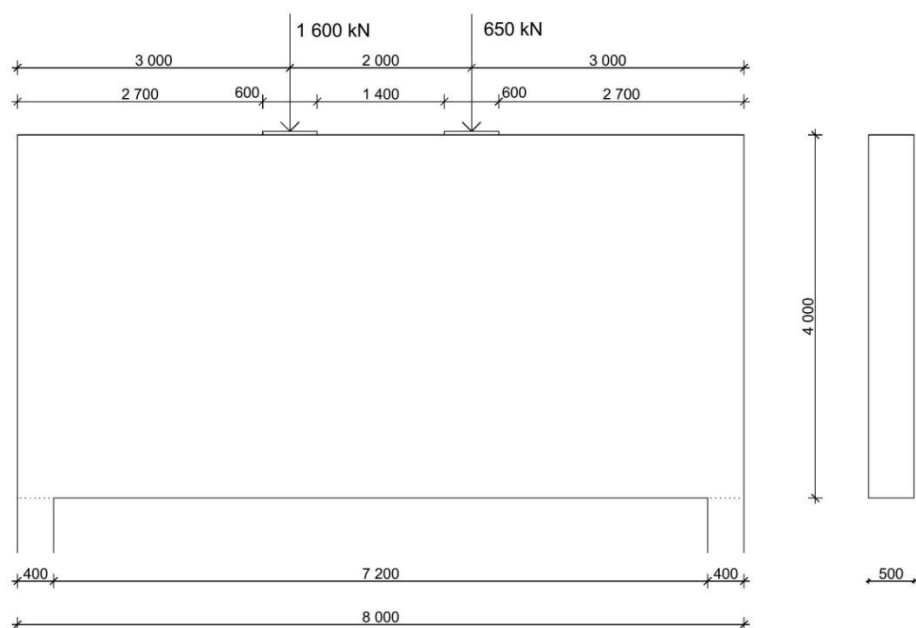
Obrázky 33 a 34 popisují hlavní napětí σ_2 . Tlakové plochy převládají nad taženými. Tažené oblasti vznikají pouze při dolním okraji a v rozích. Maximální hodnota tahového napětí je 1 MPa. Tlakové napětí je opět přenášeno do podpor, kde se koncentruje do menší plochy, takže se napětí zvyšuje. Větší napětí vzniká pod podporou pravou, protože reakce pravé podpory je větší, což je způsobeno tím, že zatížení je umístěno blíže k pravé podpoře. Největší tlakové napětí vzniká v místě vnesení zatížení. Toto napětí dosahuje hodnoty -22,3 MPa.



Obrázek 35 – Trajektorie hlavních napětí stěnového nosníku zatíženého jednou silou

Vliv na volbu modelu náhradní příhradoviny má také umístění zatížení. Ve výpočtu byl zvolen model se 3 šikmými vzpěrami. Mezi dvě vzpěry bylo umístěno táhlo, aby sklon mezi levou vzpěrou a táhlem nebyl příliš malý. Pokud by bylo zatížení umístěno uprostřed postačily by vzpěry dvě a u dolního okraje jedno táhlo. Jak lze vidět na obrázku 34, zatížení je přenášeno tlakovými vzpěrami do podpor. Levá vzpěra je širší než pravá, protože má více prostoru k rozložení napětí než vzpěra pravá. V pravé vzpěře je napětí větší.

4.3 Řešení stěnového nosníku zatíženého dvěma osamělými břemeny metodou příhradové analogie



Obrázek 36 – Geometrie stěnového nosníku zatíženého dvěma osamělými břemeny

Postup výpočtu a použité vzorce převzaty z [5]

Materiály:

- Beton C20/35: $f_{cd} = 16,67 \text{ MPa}$
- Výztuž B550B: $f_{yd} = 478,26 \text{ MPa}$

Krytí výztuže: 35 mm

Reakce:

$$\sum M_{ia} = 0: 1\,600 * 3,0 + 650 * 5 - R_b * 8,0 = 0 \rightarrow R_b = 1\,006,25 \text{ kN}$$

$$\sum F_{iy} = 0: R_a - 1\,600 - 650 + 1\,006,25 = 0 \rightarrow R_a = 1\,243 \text{ kN}$$

Sestavení modelu náhradní příhradoviny vyžaduje odhadnutí horního tlačného pásu a dolního táhla. Předpokládá se, že postačí umístění dolní tahové výztuže pouze v 1 vrstvě.

- Efektivní výška průřezu $d = 4\,000 - 35 - 10 - 22 = 3\,933 \text{ mm}$
- Odhad ramene vnitřních sil: $z = 0,9 * d = 0,9 * 3\,933 = 3\,540 \text{ mm}$
- Potřebná plocha výztuže spodního táhla $A_{s,req}$:

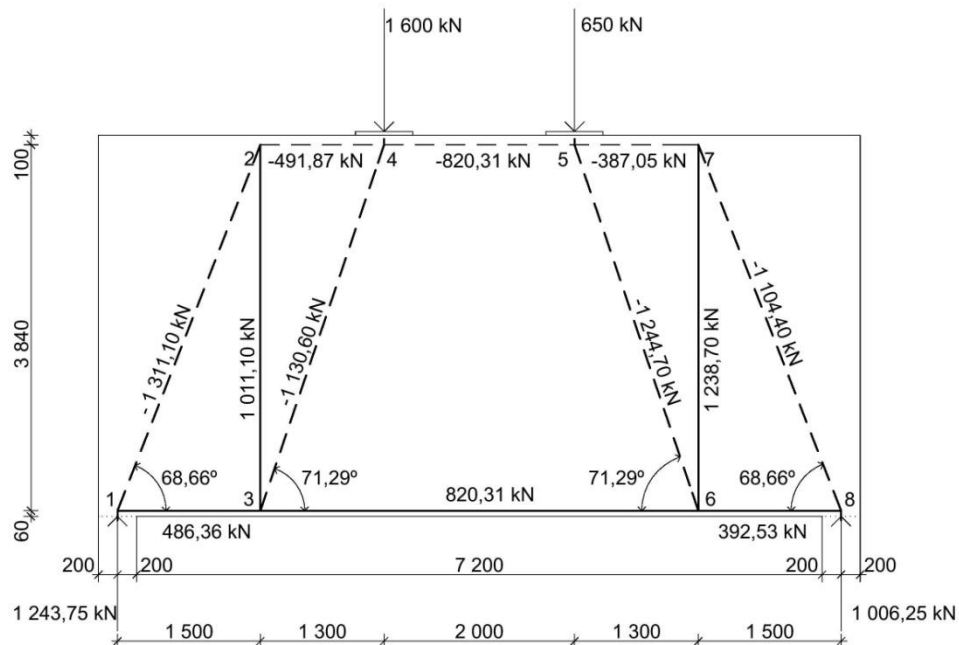
$$A_{s,req} = \frac{3\,731,25 * 10^3}{478,26 * 3\,540} = 2\,204 \text{ mm}^2$$

$$\text{Jsou navrženy } 6\phi 22 \rightarrow A_{s,prov} = 2\,281 \text{ mm}^2$$

- Výška spodního táhla: $t = 35 + 10 + 22 + 45 = 120 \text{ mm}$
- Vzdálenost horních vláken od neutrální osy:

$$x = \frac{A_s * f_{yd}}{0,8 * b * f_{cd}} = \frac{2\,281 * 478,26}{0,8 * 500 * 16,67} = 167 \text{ mm}$$

Výška horního tlačného pásu byla zvolena 200 mm. Nyní již je známa geometrie náhradního příhradového modelu. Pro takto zatížený stěnový nosník se hodí model, který lze vidět na obrázku 37. Nyní se může přistoupit k ověření napětí v uzlech a vzpěrách a poté k návrhu výztuže.



Obrázek 37 – Geometrie příhradového modelu pro stěnový nosník zatížený dvěma silami

- Ověření napětí v uzlech

- Uzel č. 4: C-C-C-C → $k_1 = 1,0$

$$v = 1 - \frac{f_{ck}}{250} = 1 - \frac{25}{250} = 0,9$$

$$\sigma_{RDmax} = k_1 * v * f_{cd} = 1,0 * 0,9 * 16,67 = 15 \text{ MPa}$$

Šířka tlačného pásu $w_{c45} = 200 \text{ mm}$

Šířka tlačné diagonály w_{43} :

$$w_{43} = w_c * \cos\theta + l_r * \sin\theta = 180 * \cos 71,29^\circ + 600 * \sin 71,29^\circ = 594 \text{ mm}$$

$$\sigma_{SD43} = \frac{1\,130,60 * 10^3}{500 * 594} = 3,81 \text{ MPa} < 15 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{SD45} = \frac{820,31 * 10^3}{500 * 200} = 8,20 \text{ MPa} < 15 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{SD42} = \frac{491,87 * 10^3}{500 * 120} = 8,20 \text{ MPa} < 15 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{SD42} = \frac{1\,600 * 10^3}{500 * 600} = 5,33 \text{ MPa} < 15 \text{ MPa}$$

- Uzel č. 2: C-C-T $\rightarrow k_2 = 0,85$

$$\sigma_{RDmax} = k_2 * v * f_{cd} = 0,85 * 0,9 * 16,67 = 12,75 \text{ MPa}$$

Šířka horního tlačného pásu: $w = 120 \text{ mm}$

Geometrie styčnicku $\rightarrow$ hydrostatický tyčník

$$\frac{491,87 * 10^3}{120} = \frac{1\,011,10 * 10}{a} \rightarrow a = 247 \text{ mm}$$

$$\frac{491,87 * 10^3}{120} = \frac{1\,311,10 * 10}{b} \rightarrow b = 320 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{SD12} = \sigma_{SD23} = \sigma_{SD24} &= \frac{1\,311 * 10^3}{500 * 320} = \frac{1\,011,10 * 10^3}{500 * 247} \\ &= \frac{491,87 * 10^3}{500 * 120} = 8,20 \text{ MPa} \end{aligned}$$

- Uzel č. 3: C-T-T-T $\rightarrow k_3 = 0,75$

$$\sigma_{RDmax} = k_3 * v * f_{cd} = 0,75 * 0,9 * 16,67 = 11,25 \text{ MPa}$$

Šířka táhla $w_t = 120 \text{ mm}$

Šířka tlačné diagonály $w_c = 594 \text{ mm}$

$$\sigma_{SD34} = \frac{1\,130,60 * 10^3}{500 * 594} = 3,76 \text{ MPa} < 11,25 \text{ MPa}$$

- Uzel č. 1: C-C-T $\rightarrow k_2 = 0,85$

$$\sigma_{RDmax} = k_2 * v * f_{cd} = 0,85 * 0,9 * 16,67 = 12,75 \text{ MPa}$$

$$w_c = 120 * \cos 68,66^\circ + 400 * \sin 68,66^\circ = 416 \text{ mm}$$

$$\sigma_{SD12} = \frac{1\,311,10 * 10^3}{500 * 416} = 6,30 \text{ MPa} < 12,75 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{SD1R} = \frac{1243,75 * 10^3}{500 * 400} = 6,22 \text{ MPa} < 12,75 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{SD13} = \frac{486,36 * 10^3}{500 * 120} = 8,11 \text{ MPa} < 12,75 \text{ MPa}$$

- Uzel č.5: C-C-C-C $\rightarrow k_1 = 1,0$

$$\sigma_{RDmax} = k_1 * v * f_{cd} = 1,0 * 0,9 * 16,67 = 15 \text{ MPa}$$

Šířka tlačného pásu $w_{c45} = 200 \text{ mm}$

Šířka tlačné diagonály w_{56} :

$$w_{56} = 105 \cos 71,26^\circ + 600 \sin 71,26^\circ = 602 \text{ mm}$$

$$\sigma_{SD56} = \frac{1\,244,70 * 10^3}{500 * 602} = 4,13 \text{ MPa} < 15 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{SD54} = \sigma_{SD45} = \frac{820,31 * 10^3}{500 * 200} = 8,20 \text{ MPa} < 15 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{SD57} = \frac{387,05 * 10^3}{500 * 95} = 8,20 \text{ MPa} < 15 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{SD42} = \frac{650 * 10^3}{500 * 600} = 2,17 \text{ MPa} < 15 \text{ MPa}$$

- Uzel č.7: C-C-T $\rightarrow k_2 = 0,85$

$$\sigma_{RDmax} = k_2 * v * f_{cd} = 0,85 * 0,9 * 16,67 = 12,75 \text{ MPa}$$

Šířka horního tlačného pásu = 95 mm

Geometrie styčnicku $\rightarrow$ hydrostatický styčník

$$\frac{387,05 * 10^3}{95} = \frac{1\,238,70 * 10}{a} \rightarrow a = 304 \text{ mm}$$

$$\frac{387,05 * 10^3}{95} = \frac{1\,104,40 * 10}{b} \rightarrow b = 271 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{SD12} = \sigma_{SD23} = \sigma_{SD24} &= \frac{387,05 * 10^3}{500 * 95} = \frac{1\,238,70 * 10^3}{500 * 304} \\ &= \frac{1\,104,40 * 10^3}{500 * 271} = 8,20 \text{ MPa} \end{aligned}$$

- Uzel č. 6: C-T-T-T $\rightarrow k_3 = 0,75$

$$\sigma_{RDmax} = k_3 * v * f_{cd} = 0,75 * 0,9 * 16,67 = 11,25 \text{ MPa}$$

Šířka táhla $w_t = 120 \text{ mm}$

Šířka tlačné diagonály $w_{56} = 602 \text{ mm}$

$$\sigma_{SD56} = \frac{1\,244,70 * 10^3}{500 * 602} = 4,14 \text{ MPa} < 11,25 \text{ MPa}$$

- Uzel č. 8: C-C-T $k_2 = 0,85$

$$\sigma_{RDmax} = k_2 * v * f_{cd} = 0,85 * 0,9 * 16,67 = 12,75 \text{ MPa}$$

Šířka vzpěry $w_{c87} = 416 \text{ mm}$

$$\sigma_{SD8R} = \frac{1\,006,25 * 10^3}{500 * 400} = 5,03 \text{ MPa} < 12,75 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{SD68} = \frac{392,53 * 10^3}{500 * 120} = 6,54 \text{ MPa} < 12,75 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{SD87} = \frac{1\,104,40 * 10^3}{500 * 416} = 5,31 \text{ MPa} < 12,75 \text{ MPa}$$

- Ověření napětí ve vzpěrách

- Vzpěra 1-2: přenos tlaku skrz trhliny: $v_2 = 0,6$

$$v = 1 - \frac{25}{250} = 0,9$$

$$\sigma_{RDmax} = v * v_2 * f_{cd} = 0,9 * 0,6 * 16,67 = 9 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{SD12} = \frac{1\,311,40 * 10^3}{500 * 418} = 6,27 \text{ MPa} < 9 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{SD21} = \frac{1\,311,40 * 10^3}{500 * 320} = 8,20 \text{ MPa} < 9 \text{ MPa}$$

- Vzpěry 3-4: $v_2 = 0,6$

$$\sigma_{SD34} = \frac{1\,130,60 * 10^3}{500 * 594} = 3,76 \text{ MPa} < 9 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{SD43} = \sigma_{SD34} = 3,76 \text{ MPa} < 9 \text{ MPa}$$

- Vzpěra 2-4: bez vzniku trhlin: $v_2 = 1,0$

$$\sigma_{RDmax} = v_2 * f_{cd} = 1,0 * 16,67 = 16,67 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{SD24} = \frac{491,87 * 10^3}{500 * 120} = 8,20 \text{ MPa} < 16,67 \text{ MPa}$$

- Vzpěra 4-5: bez vzniku trhlin: $v_2 = 1,0$

$$\sigma_{RDmax} = v_2 * f_{cd} = 1,0 * 16,67 = 16,67 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{SD45} = \frac{820,31 * 10^3}{500 * 200} = 8,20 \text{ MPa} < 16,67 \text{ MPa}$$

- Vzpěra 5-7: bez vzniku trhlin: $v_2 = 1,0$

$$\sigma_{RDmax} = v_2 * f_{cd} = 1,0 * 16,67 = 16,67 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{SD57} = \frac{387,05 * 10^3}{500 * 95} = 8,15 \text{ MPa} < 16,67 \text{ MPa}$$

- Vzpěry 5-6: přenos tlaku skrz trhliny: $v_2 = 0,6$

$$\sigma_{RDmax} = v * v_2 * f_{cd} = 0,9 * 0,6 * 16,67 = 9 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{SD56} = \frac{1\,244,70 * 10^3}{500 * 602} = 4,14 \text{ MPa} < 9 \text{ MPa}$$

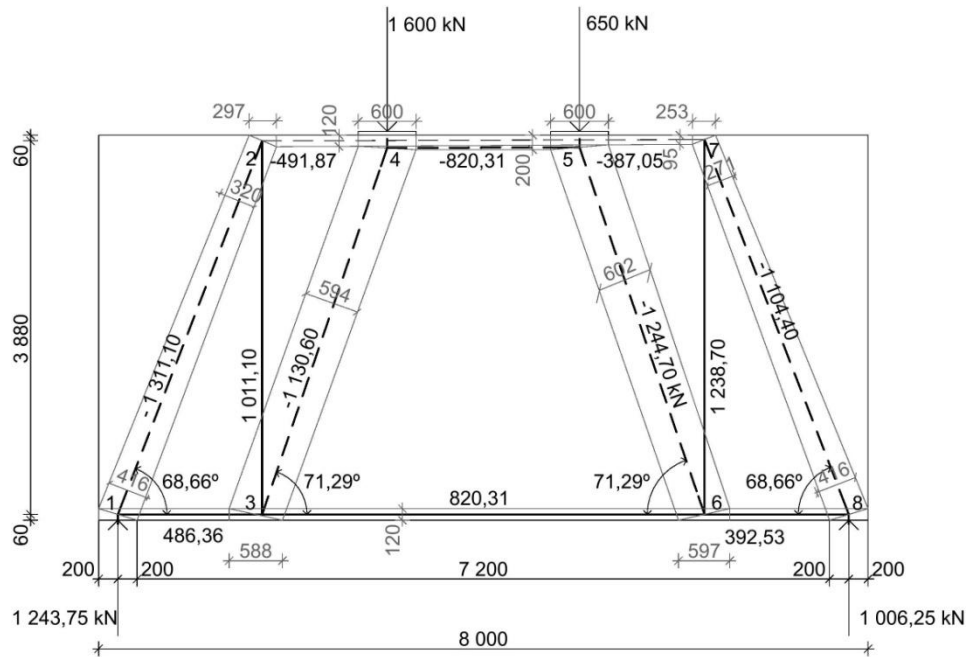
$$\sigma_{SD56} = \sigma_{SD65} = 4,14 \text{ MPa} < 9 \text{ MPa}$$

- Vzpěry 7-8: přenos tlaku skrz trhliny: $v_2 = 0,6$

$$\sigma_{RDmax} = v * v_2 * f_{cd} = 0,9 * 0,6 * 16,67 = 9 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{SD56} = \frac{1\,104,40 * 10^3}{500 * 271} = 8,15 \text{ MPa} < 9 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{SD87} = \frac{1\,104,40 * 10^3}{500 * 416} = 5,28 \text{ MPa} < 9 \text{ MPa}$$



Obrázek 38 – Geometrie upřesněného modelu náhradní příhradoviny pro stěnový nosník zatížený dvěma osamělými silami

- Návrh výztuže:

- Táhlo 3-6: $F_{t36} = 820,31 \text{ kN}$

$$A_{s,req} = \frac{820,31 \cdot 10^3}{478,26} = 1715 \text{ mm}^2$$

Je navrženo $5\phi 22 \text{ mm} \rightarrow A_{s,prov} = 1901 \text{ mm}^2$

$$1901 \cdot 478,26 = 909,17 \cdot 10^3 \text{ kN} > 820,31 \text{ kN} \dots \text{VYHOVUJE}$$

- Táhlo 1-3: $F_{t13} = 486,36 \text{ kN}$

$$A_{s,req} = \frac{486,36 \cdot 10^3}{478,26} = 1017 \text{ mm}^2 < 1901 \text{ mm}^2$$

Síla v táhle $F_{t13} = 486,36 \text{ kN}$ bude přenesena $5\phi 22 \text{ mm}$, navrženou v táhle 3-6 $\rightarrow 909,17 \cdot 10^3 \text{ kN} > 486,36 \cdot 10^3 \dots \text{VYHOVUJE}$

Kotvení:

$$f_{bd} = 2,25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd} = 2,25 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot \frac{1,8}{1,5} = 2,7 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{SD} = \frac{1\,017}{1\,901} 478,26 = 255\,kN$$

$$l_{b,rqd} = \frac{22}{4} \frac{255,86}{2,7} = 521\,mm$$

Kotveno ohybem $\rightarrow$ redukční součinitel $\alpha_1 = 0,7$

$$l_{bd} = 0,7 * 521 = 365\,mm$$

Kontrola zakřivení prutu:

$$F_{bt} = 380 * 255,86 = 97,23\,kN$$

$$a_b = 35 + 10 + \frac{22}{2} = 56\,mm$$

$$\varnothing m_{min} \geq \frac{F_{bt} \left(\frac{1}{a_b} + \frac{1}{2\varnothing} \right)}{f_{cd}} \geq \frac{97,23 * 10^3 \left(\frac{1}{56} + \frac{1}{2 * 22} \right)}{16,67} = 237\,mm$$

Poloměr zakřivení prutu byl stanoven na 120 mm.

- Táhlo 6-8: $F_{t68} = 392,53\,kN$

$$A_{s,req} = \frac{392,53 * 10^3}{478,26} = 821\,mm^2 < A_{s,prov} = 1\,901\,mm^2$$

Síla v táhle 6-8 přenesena 5 $\varnothing$ 2 mm navrženými v táhle 3-6.

$$909,17 * 103\,kN > 392,53 * 103\,kN \dots VYHOVUJE$$

Kotvení:

$$f_{bd} = 2,25 * \eta_1 * \eta_2 * f_{ctd} = 2,25 * 1,0 * 1,0 \frac{1,8}{1,5} = 2,7\,MPa$$

$$\sigma_{SD} = \frac{821}{1\,901} 478,26 = 206,55\,kN$$

$$l_{b,rqd} = \frac{22}{4} \frac{206,55}{2,7} = 421\,mm$$

Kotveno ohybem $\rightarrow$ redukční součinitel $\alpha_1 = 0,7$

$$l_{bd} = 0,7 * 421 = 295\,mm$$

Kontrola zakřivení prutu:

$$F_{bt} = 380 * 206,55 = 78,49 \text{ kN}$$

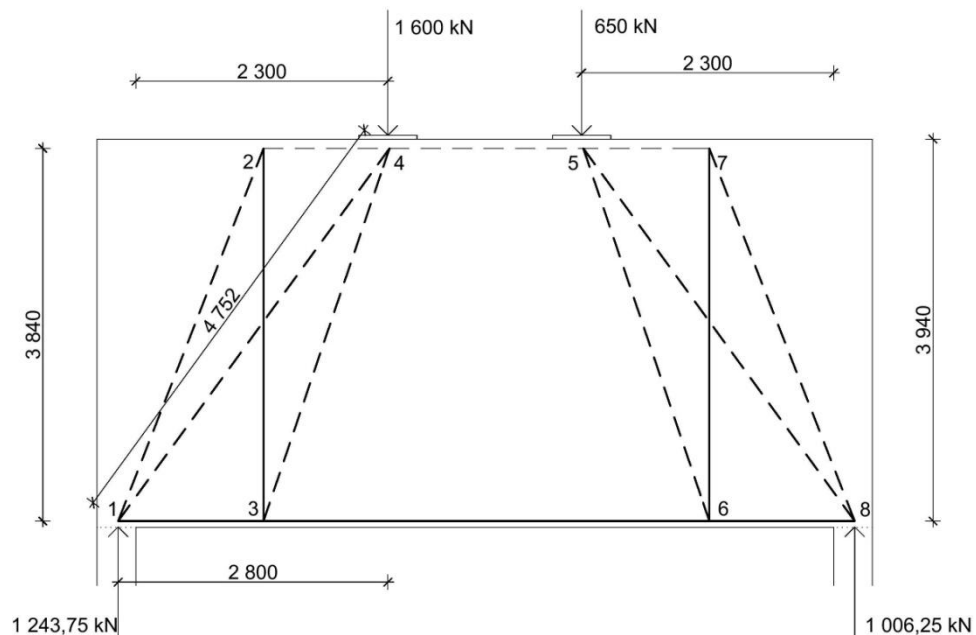
$$a_b = 35 + 10 + \frac{22}{2} = 56 \text{ mm}$$

$$\phi m_{min} \geq \frac{F_{bt} \left(\frac{1}{a_b} + \frac{1}{2\phi} \right)}{f_{cd}} \geq \frac{78,49 * 10^3 \left(\frac{1}{56} + \frac{1}{2 * 22} \right)}{16,67} = 191 \text{ mm}$$

Poloměr zakřivení prutu byl stanoven na 120 mm.

- Návrh svislé a vodorovné výztuže v levé části nosníku

Pro návrh výztuže na příčné tahy, bude stávající model doplněn o dvě šikmé vzpěry, jak lze vidět na obrázku 39.



Obrázek 39 – Doplnění modelu náhradní příhradoviny o šikmou vzpěru

- podmínka pro redukovanou posouvající sílu:

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

$$1\,243 < 0,5 * 500 * 3\,940 * 0,6 \left(1 - \frac{25}{250} \right) 16,67$$

$$1\,243 \text{ kN} < 8\,867 \text{ kN}$$

Podmínka je splněna. Výztuž bude navržena na redukovanou posouvající sílu $\beta * V_{ED}$

$$\beta * V_{ED} = \frac{2\,300}{2 * 3\,940} 1\,243,75 = 360,69 \text{ kN}$$

$$A_{s,req} = \frac{360,69 * 10^3}{478,26} = 754 \text{ mm}^2$$

Z hlediska staticky nutné plochy výztuže, by stačilo 5 dvoustřížných třmínků ø10/430 ($A_{s,prov} = 786 \text{ mm}^2$). Aby byla dodržena maximální osová vzdálenost mezi třmínky, bude navrženo 7 dvoustřížných třmínků ø10/290mm ($A_{s,prov}=1\,100\text{mm}^2$).

$$1\,100 * 478,26 = 526,09 \text{ kN} > 390,69 \text{ kN} \dots \text{VYHOVUJE}$$

- Návrh ortogonální výztuže:

Délka vzpěry $h = 4\,752 \text{ mm}$

Šířka vzpěry w_c :

$$w_c = 120 * \cos 53,9^\circ + 400 * \sin 53,9^\circ = 394 \text{ mm}$$

Síla F_{14} :

$$F_{14} = \frac{-1\,243,75}{\sin 53,9^\circ} = -1\,539 \text{ kN}$$

Příčný tah:

$$2F_t = 0,5 \left(1 - 0,7 \frac{394}{4\,752} \right) 1\,539 = 724,84 \text{ kN}$$

$$\uparrow F = 724,84 * \cos 53,9^\circ = 427,07 \text{ kN}$$

$$\rightarrow F = 724,84 * \sin 53,9^\circ = 585,66 \text{ kN}$$

$$\text{Celková svislá výztuž: } 360,69 + 1,2 * 427,07 = 873,17 \text{ kN}$$

$$A_{s,req} = \frac{873,17 * 10^3}{478,26} = 1\,826 \text{ mm}^2$$

Je navrženo 12 dvoustřížných třmínků ø10/245 mm $\rightarrow A_{s,prov} = 1\,896 \text{ mm}^2$

Vodorovná výztuž pro zachycení příčných tahů:

$$1,2 * 585,65 = 702,79 \text{ kN}$$

$$A_{s,req} = \frac{702,79 * 10^3}{478,26} = 1\,469\,mm^2$$

Z hlediska staticky nutné plochy výztuže by postačilo provést 14Ø12mm. Pro dodržení požadavku na minimální stupeň vyztužení bude navrženo 28Ø18/290mm. → $A_{s,prov} = 7\,112\,mm^2$

$$7\,112 * 478,26 = 3\,401 * 10^3\,kN > 702,29 * 10^3\,kN \dots VYHOVUJE$$

Stupeň vyztužení:

$$\rho = \frac{508}{500 * 290} = 0,35\% > 0,3\% \dots VYHOVUJE$$

- Návrh svislé a vodorovné výztuže v pravé části nosníku

- Podmínka pro redukovanou posouvající sílu

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

$$1\,006,25 < 0,5 * 500 * 3\,940 * 0,6 \left(1 - \frac{25}{250}\right) 16,67$$

$$1\,006\,kN < 8\,867\,kN$$

Podmínka je splněna. Výztuž bude navržena na redukovanou posouvající sílu $\beta * V_{ED}$

$$\beta * V_{ED} = \frac{2\,300}{2 * 3\,940} 1\,006,25 = 291,81\,kN$$

$$A_{s,req} = \frac{291,81 * 10^3}{478,26} = 610\,mm^2$$

Je navrženo 7 dvoustřížných třmínků Ø10/290 mm → $A_{s,prov} = 1\,100\,mm^2$

$$1\,100 * 478,26 = 526,09\,kN > 291,81\,kN \dots VYHOVUJE$$

- Návrh ortogonální výztuže

Délka vzpěry $h = 4\,752\,mm$

Šířka vzpěry w_c :

$$w_c = 120 * \cos 53,9^\circ + 400 * \sin 53,9^\circ = 394\,mm$$

Síla F_{85} :

$$F_{85} = \frac{-1\,006,25}{\sin 53,9^\circ} = -1\,245,37\,kN$$

Příčný tah:

$$2F_t = 0,5 \left(1 - 0,7 \frac{394}{4\,752} \right) 1\,245,37 = 586,55 \text{ kN}$$

$$\uparrow F = 586,55 * \cos 53,9^\circ = 345,59 \text{ kN}$$

$$\rightarrow F = 586,55 * \sin 53,9^\circ = 473,93 \text{ kN}$$

$$\text{Celková svislá výztuž: } 291,87 + 1,2 * 345,59 = 706,58 \text{ kN}$$

$$A_{s,req} = \frac{706,58 * 10^3}{478,26} = 1\,477 \text{ mm}^2$$

Je navrženo 10 dvoustřížných třmínků $\varnothing 10/300\text{mm} \rightarrow A_{s,prov} = 1\,580 \text{ mm}^2$

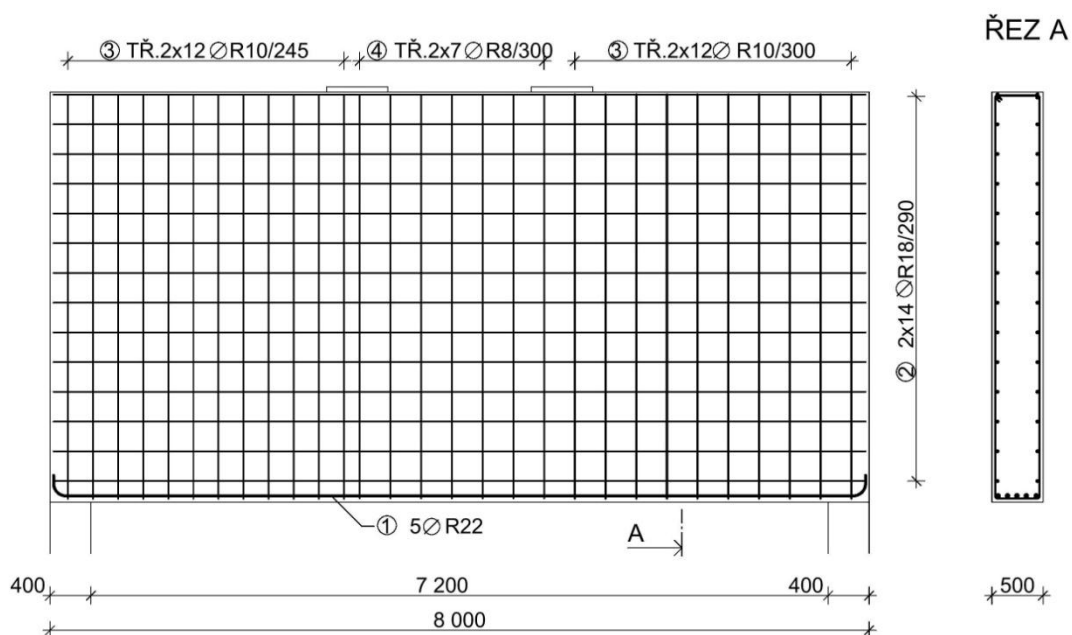
$$1\,580 * 478,26 = 755,65 \text{ kN} > 706,58 \text{ kN} \dots \text{VYHOVUJE}$$

$$\text{Vodorovná výztuž: } 1,2 * 473,93 = 568,72 \text{ kN}$$

$$A_{s,req} = \frac{568,72 * 10^3}{478,26} = 1\,189 \text{ mm}^2 < A_{s,prov}$$
$$= 7\,112 \text{ mm}^2 \dots \text{VYHOVUJE}$$

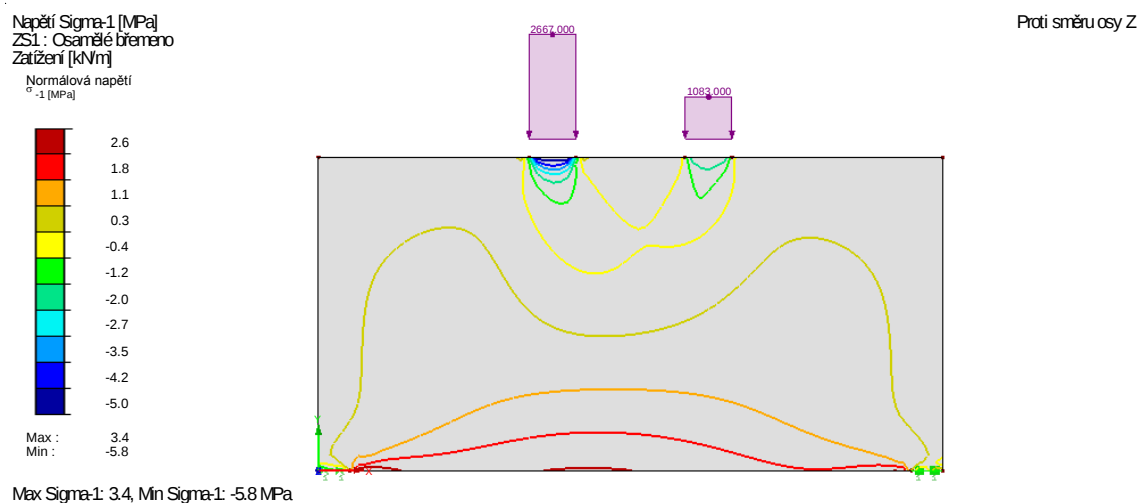
Pro zachycení příčných tahů, postačí výztuž navržená v levé části nosníku. Tato výztuž byla stanovena z konstrukčních důvodů 28 $\varnothing$ 18/290 mm.

4.3.1 Schéma výztuže stěnového nosníku zatíženého dvěma břemeny

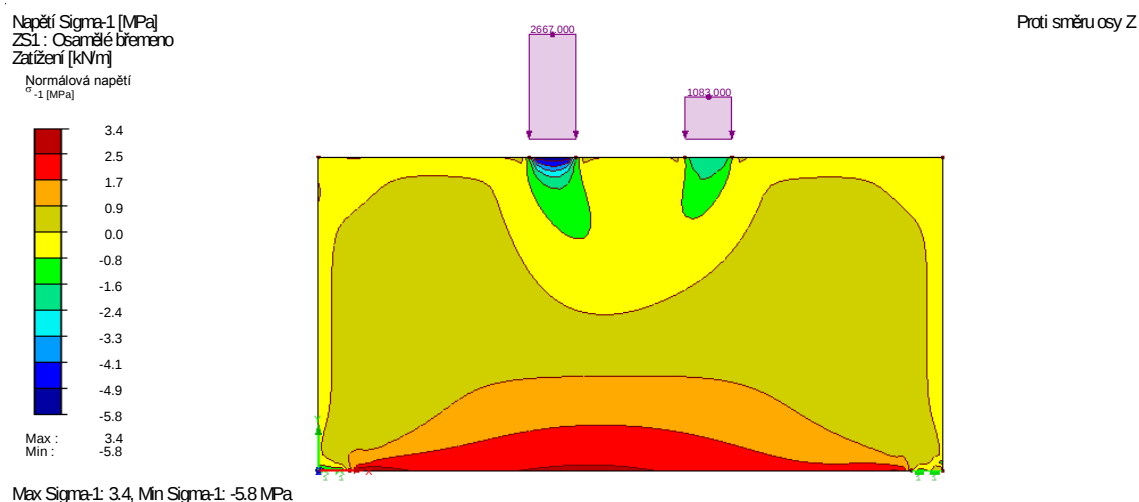


Obrázek 40 – Schéma vyztužení stěnového nosníku zatíženého dvěma břemeny

4.4 Výsledky stěnového nosníku zatíženého dvěma silami metodou konečných prvků

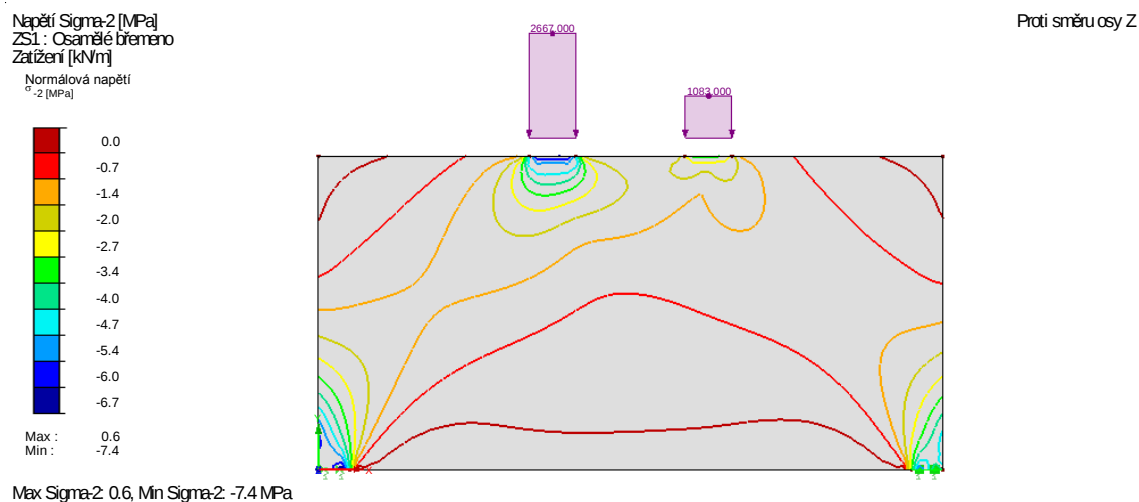


Obrázek 41 – Izolinie hlavního napětí σ_1 stěnového nosníku zatíženého dvěma silami

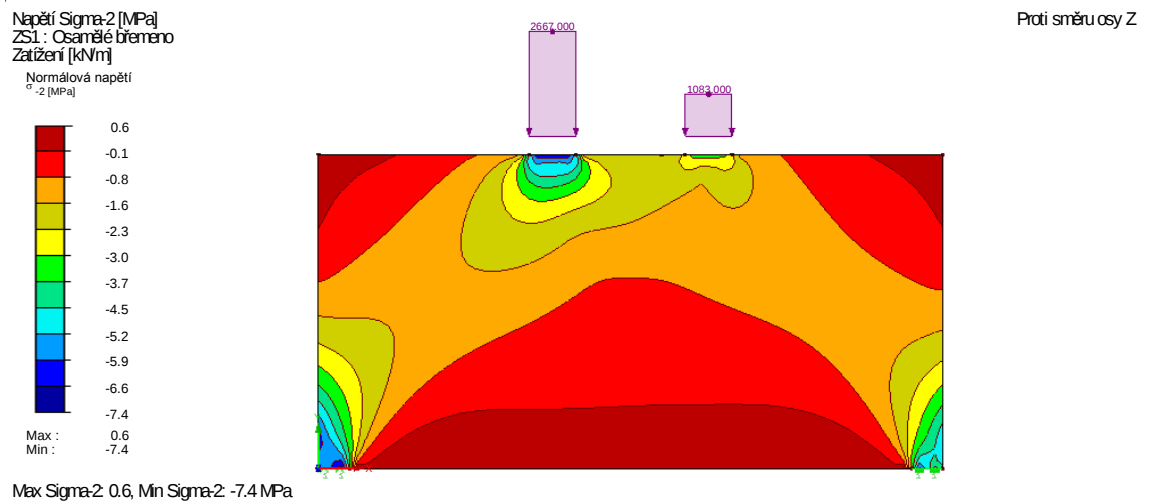


Obrázek 42 – Izoplochy hlavního napětí σ_1 stěnového nosníku zatíženého dvěma silami

Obrázky 41 a 42 popisují hlavní napětí σ_1 . Při stávající geometrii nosníku a umístění zatížení na něm vzniká při horním okraji tlačný pás. Tento pás prostupuje směrem od oblasti zatížení podél okrajů nosníku k podporám. Největší tlakové napětí dosahuje hodnoty -5,8 MPa a to v oblasti vnesení vnějšího zatížení do stěnového nosníku. Obě břemena jsou uložena na roznášecích deskách o stejné šířce. Protože je síla vlevo větší, vzniká největší tlakové napětí silou vlevo. Největší tahová napětí vznikají u dolního okraje nosníku. Maximální tahové napětí dosahuje hodnoty 3,4 MPa uprostřed dolního okraje.

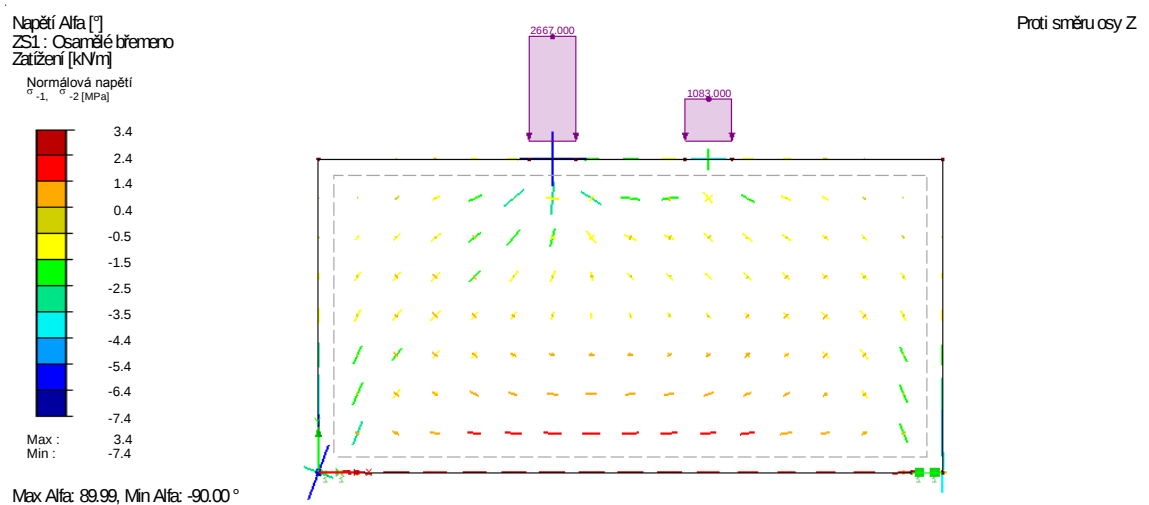


Obrázek 43 – Izolinie hlavního napětí σ_2 stěnového nosníku zatíženého dvěma silami



Obrázek 44 – Izoplochy hlavního napětí σ_2 stěnového nosníku zatíženého dvěma silami

Obrázky 43 a 44 popisují hlavní napětí σ_2 . Mimo dolního okraje, kde je umístěno v modelu náhradní příhradoviny táhlo a horních rohů stěnového nosníku, jsou zbylé části tlačené. Největší tlakové napětí se opět koncentruje v místě vnášení zatížení do nosníku. Tentokrát dosahuje nejvyšší hodnoty -7,4 MPa. Toto zatížení je přenášeno tlakovými vzpěrami do podepření, kde vznikají napětí, dosahující hodnot mezi -5,2 až 6,6 MPa.



Obrázek 45 – Trajektorie hlavních napětí stěnového nosníku zatíženého dvěma silami

Na obrázku 45 lze vidět, že model, který byl použit k řešení příkladu, odpovídá dění v konstrukci. Trajektorie tlakových napětí přecházejí od místa zatížení směrem k podporám. Největší napětí vznikají právě v místě vnesení zatížení a v místě umístění podpory, protože napětí se koncentruje do menší plochy. Naopak uprostřed vzpěry, umožňuje geometrie nosníku rozložit napětí do větší plochy. Vzpěra má tedy ve skutečnosti lahvovitý tvar. Vlivem tohoto zakřivení, vznikají příčné tahy se štěpným účinkem na konstrukci.

5 Otvory ve stěnách

Častou nosnou konstrukcí v pozemním stavitelství, bývají stěny. Z hlediska dispozičních požadavků se často provádějí ve stěnách otvory. Tyto otvory slouží nejčastěji k osazení oken a dveří. Variabilita umístění těchto otvorů je značná. Neexistují žádné obecné modely náhradní příhradoviny, které by vedly k návrhu výztuže těchto stěn. Proto je zapotřebí pro jednotlivé stěny, vytvořit vlastní model náhradní příhradoviny.

Pro tvorbu modelu náhradní příhradoviny může posloužit vymodelování stěny s otvory v programu pracujícím na principu metody konečných prvků. Po zobrazení hlavních napětí ve stěně, může být přistoupeno k tvorbě výchozího modelu. Při tvorbě modelu dochází k napřimění napětových toků do přímých prutů. Poloha těchto prutů by se neměla příliš lišit od trajektorií hlavních napětí získaných ze softwaru. Pokud by se jejich poloha výrazně lišila, docházelo by v reálné konstrukci k trhlinám. Po sestavení modelu se prostřednictvím uzlů vnese do modelu zatížení a zjistí se osově síly v prutech. Na tyto síly může být posléze dimenzována stěna s otvory. Podobně též [2, s.59]

5.1 Řešení stěny s otvory metodou náhradní příhradoviny

Ve stěně vysoké 33,6 m, bylo vytvořeno 7 okenních otvorů. Šířka i výška otvoru činí 2,5m. Viz obrázek 46. Na stěnu působí 3 zatěžovací stavy. Zatěžovací stav 1 je tvořen užitným zatížením na strop o velikosti 8 kN/m^2 . Zatěžovací šířka stropu je 2,5 m. Zatěžovací stav 2 a 3 je tvořen větrem zleva/zprava. Vítr na stěnu působí ze šířky 20 m. 0,250 m tlustá stěna je umístěna ve městě a větrové oblasti II.

Na rozdíl od předchozích případů, nyní neexistuje pro tento konkrétní případ žádný obecný model náhradní příhradoviny, který by mohl být použit pro vyztužení této stěny s otvory. Stěna bude nejdříve vymodelována v programu RFEM. Ze zjištěných hlavních napětí bude sestaven model náhradní příhradoviny, který bude odpovídat průběhu hlavních napětí ve stěně.

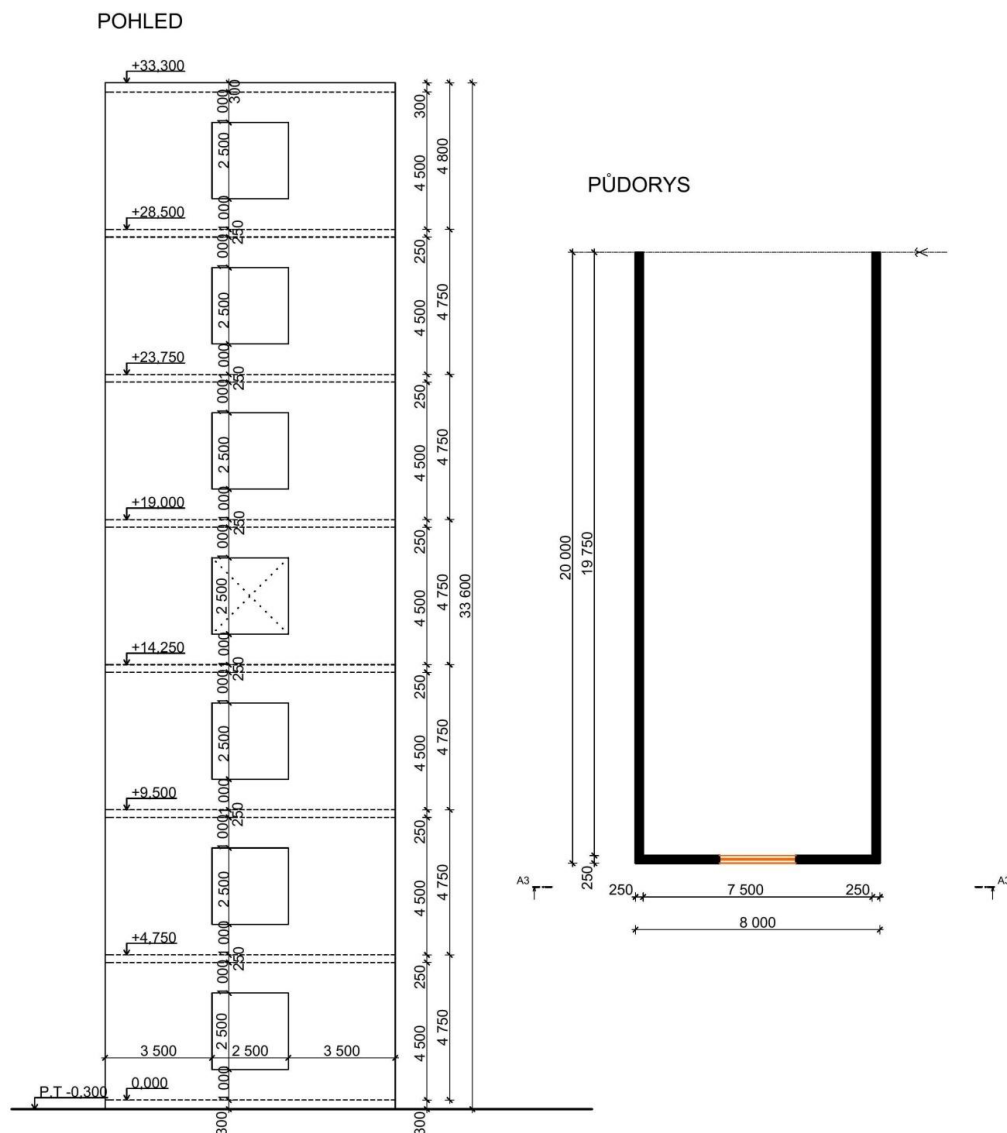
Při kombinaci zatížení na strop a od větru, je zatížení na strop příznivé. Proto pro stanovení návrhového zatížení na strop bude brán součinitel 1,00. Návrhová hodnota zatížení na strop tedy činí:

$$8 * 2,5 * 1,00 = 20 \text{ kN/m}$$

Nyní bude stanoveno zatížení větrem. Výpočet bude proveden dle [6]. Dynamický tlak, je závislý na výšce stěny. Šířka, na kterou vítr působí a kterou musí přenést stěna je 20 m. Výška stěny je 33,6 m. Dvojnásobek šířky je tedy větší než výška stěny, ale šířka samotná je menší než výška stěny.

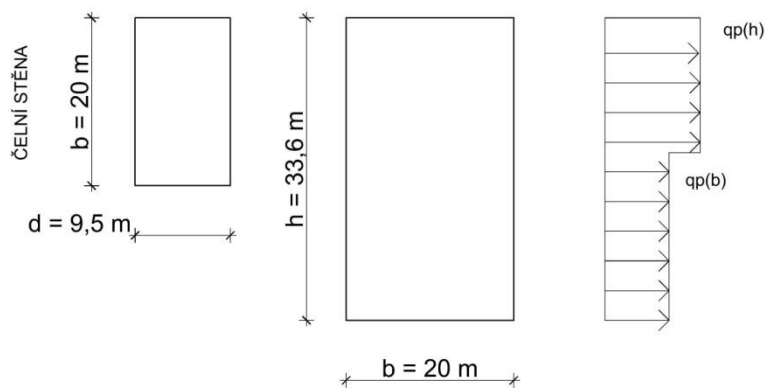
$$20\text{m} < 33,6\text{m} < 2 * 20\text{m}$$

Tomuto stavu odpovídá zatěžovací schéma zobrazené na obrázku 47.



Obrázek 46 – Pohled a půdorys na řešenou stěnu s otvory

$$20\text{ m} < 33,6\text{ m} < 2 \cdot 20\text{ m}$$



Obrázek 47 – Závislost dynamického tlaku na výšce

Na stěnu bude od dolního okraje do výšky 20 metrů působit dynamický tlak $q_p(b)$ s referenční výškou $z = 20$ m. Na zbylou výšku stěny 13,6 m bude působit dynamický tlak $q_p(h)$ s referenční výškou $z = 33,6$ m.

Stanovení maximálního dynamického tlaku větru $q_p(h)$:

Větrová oblast					II	
Kategorie terénu	město				III	
Normová základní rychlost vět	$v_{b,0}$				25	m/s
Měrná hmotnost vzduchu	ρ				1,25	kg/m ³
Součinitel směru	c_{dir}				1,00	(pro ČR)
Součinitel orografie	c_o				1,00	(pro norm. terén)
Součinitel ročního období	c_{season}				1,00	(pro ČR)
Referenční výška	z				33,60	m
Součinitel turbulence	k_I				1,00	(pro ČR)
Parametr drsnosti terénu	z_0				0,30	m
Parametr drsnosti terénu	z_{min}				5,00	m
Parametr drsnosti terénu	$z_{0,II}$				0,05	m
Rychlost větru	v_b	$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0}$			25,00	m/s
Základní dynamický tlak větru	q_b	$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2$			391	N/m ²
Součinitel terénu	k_r	$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07}$			0,215	
Směrod. odchylka rychlosti vě	s_v	$\sigma_v = k_r \cdot v_b \cdot k_I$			5,385	m/s
Součinitel drsnosti terénu	c_r	$c_r(z) = k_r \cdot \ln \left(\frac{z}{z_0} \right)$			1,016	
Střední rychlost větru	v_m	$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b$			25,41	m/s
Intenzita turbulence	$I_v(z)$	$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)}$			0,212	
Maximální dyn. tlak větru	$q_p(h)$	$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z)$			1002	N/m ²

Zatěžovací šířka, na kterou působí vítr a musí být přenesena stěnou je 20 m:

$$q_p(h) = 1002 \cdot 20 = 20,04 \text{ kN/m}$$

Součinitel vnějšího tlaku $C_{pe,10}$:

$$C_{pe,10} \rightarrow E: -0,7$$

$$D: +0,8$$

Síla od větru F_w :

$$20,04 * (-0,7) = -14,028 \text{ kN/m}$$

$$20,04 * 0,8 = 16,032 \text{ kN/m}$$

Stanovení maximálního dynamického tlaku větru $q_p(b)$:

Větrová oblast						II	
Kategorie terénu	město					III	
Normová základní rychlost v	$v_{b,0}$					25	m/s
Měrná hmotnost vzduchu	ρ					1,25	kg/m ³
Součinitel směru	C_{dir}					1,00	(pro ČR)
Součinitel orografie	C_o					1,00	(pro norm. terén)
Součinitel ročního období	C_{season}					1,00	(pro ČR)
Referenční výška	z					20,00	m
Součinitel turbulence	k_I					1,00	(pro ČR)
Parametr drsnosti terénu	z_0					0,30	m
Parametr drsnosti terénu	z_{min}					5,00	m
Parametr drsnosti terénu	$z_{0,II}$					0,05	m
Rychlost větru	v_b	$v_b = C_{dir} \cdot C_{season} \cdot v_{b,0}$				25,00	m/s
Základní dynamický tlak větru	q_b	$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2$				391	N/m ²
Součinitel terénu	k_r	$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07}$				0,215	
Směrod. odchylka rychlosti	σ_v	$\sigma_v = k_r \cdot v_b \cdot k_I$				5,385	m/s
Součinitel drsnosti terénu	c_r	$c_r(z) = k_r \cdot \ln \left(\frac{z}{z_0} \right)$				0,905	
Střední rychlost větru	v_m	$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b$				22,61	m/s
Intenzita turbulence	$I_v(z)$	$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)}$				0,238	
Maximální dyn. tlak větru	$q_p(b)$	$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z)$				852	N/m ²

Zatěžovací šířka, na kterou působí vítr a musí být přenesena stěnou je 20 m:

$$q_p(h) = 852 * 20 = 17,04 \text{ kN/m}$$

Součinitel vnějšího tlaku $C_{pe,10}$:

$$C_{pe,10} \rightarrow E: -0,7$$

$$D: +0,8$$

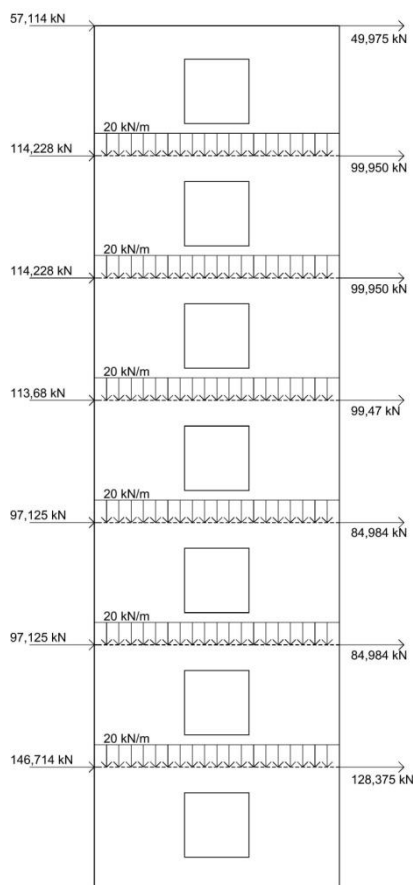
Síla od větru F_w :

$$17,04 * (-0,7) = -11,928 \text{ kN/m}$$

$$17,04 * 0,8 = 13,632 \text{ kN/m}$$

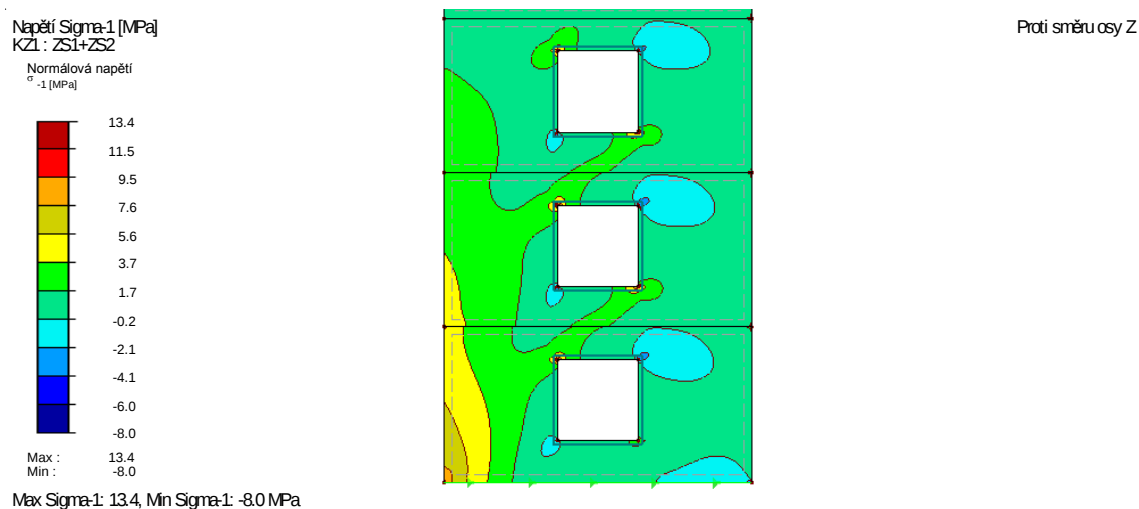
5.1.1 Tvorba modelu náhradní příhradoviny

Jedná se o symetrickou stěnu. Účinek zatížení na stěnu od větru zleva bude stejný jako účinek větru zprava. Proto bude v programu stěna zatížena kombinací zatížení na strop plus vítr zleva. Z trajektorií hlavních napětí, bude sestaven výchozí model náhradní příhradoviny a na síly v tomto modelu bude navržena výztuž. Tato výztuž bude provedena v zrcadlovém provedení, aby stěna odolala i zatížení větrem zprava. Zatížení od větru bude do modelu vnášeno v místě uložení stropu. Spojité zatížení je třeba přepočítat do osamělých sil. Zatěžovací schéma je k vidění na obrázku 48. Hodnoty zatížení na obrázku, jsou již uvedeny v návrhových hodnotách.



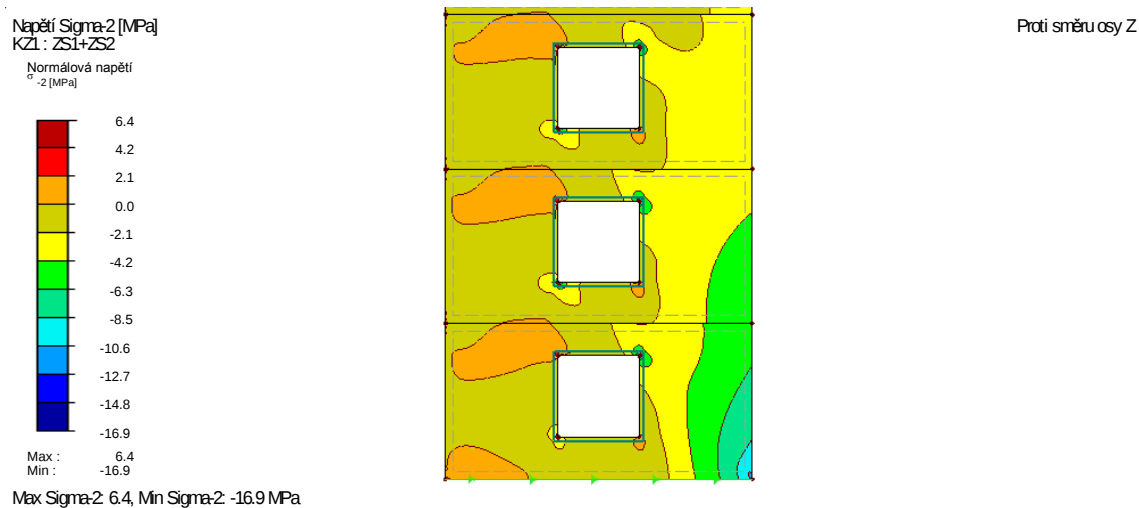
Obrázek 48 – Schéma zatížení stěny s otvory od kombinace zatížení na strop a větru zleva

Na obrázcích níže jsou již vidět výsledky z programu RFEM. Byly zobrazeny pouze první tři podlaží, kde jsou napětí největší. V této oblasti bude také řešeno vyztužení. Vyšší podlaží by se vyztužovala stejně, pouze menšími profily.



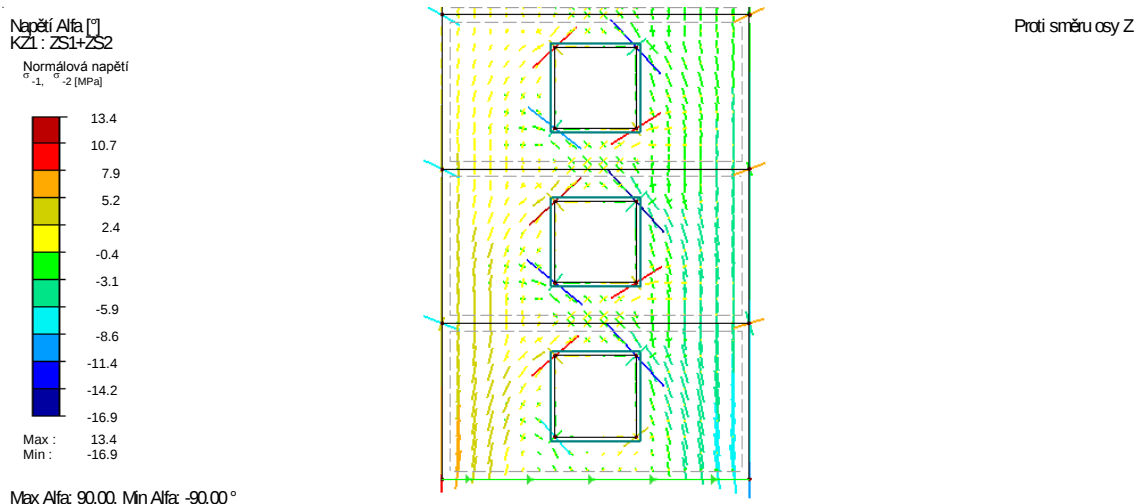
Obrázek 49 – Hlavní napětí σ_1 pro kombinaci zatížení ZS1 a ZS2

Jak lze vidět z obrázku 49. V levé části stěny vznikají tahová napětí. V této oblasti bude umístěna výztuž. Pro vítr zprava by situace vypadala obráceně. Proto výztuž bude provedena zrcadlově i na druhé straně.



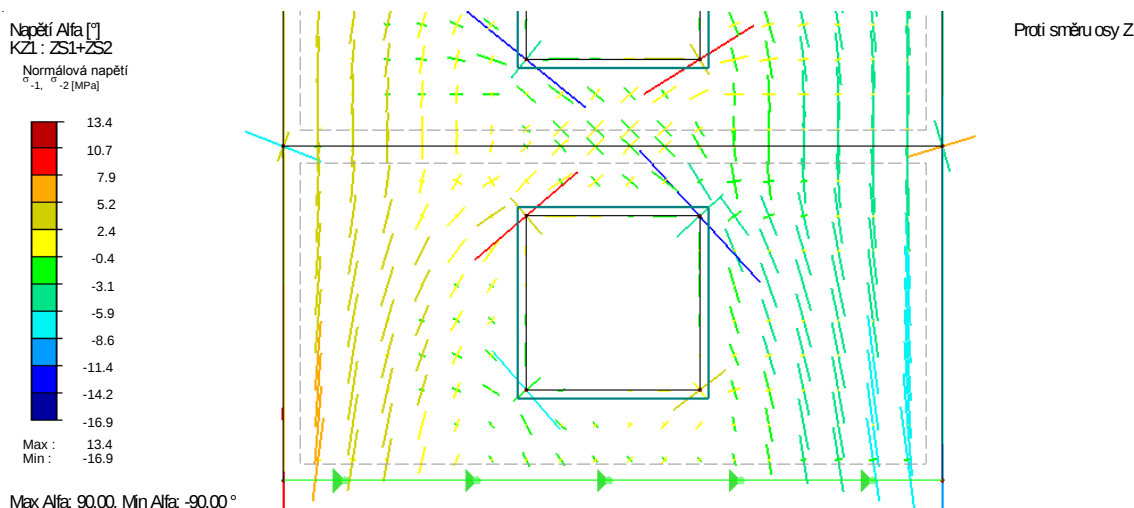
Obrázek 50 – Hlavní napětí σ_2 pro kombinaci zatížení ZS1 a ZS2

Tahová napětí, se podobně jako u ozubu na nosníku koncentrují do koutů otvorů. Ještě lépe to lze vidět na obrázku 51.



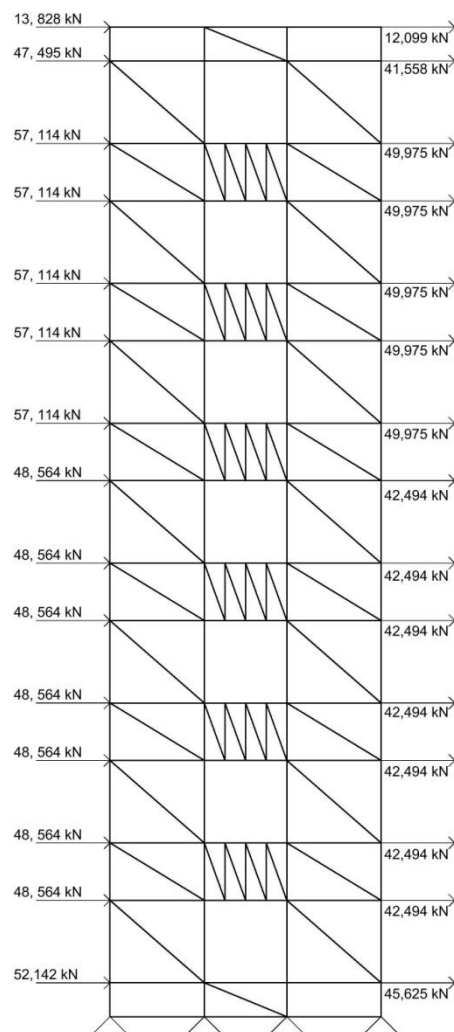
Obrázek 51 – Trajektorie hlavních napětí pro kombinaci zatížení ZS1 a ZS2

Jak lze vidět na obrázku 51. Velké tahové napětí, které vzniká u koutů otvorů (červená čára) svírá s okenním otvorem úhel přibližně 45°. Pod tímto úhlem bude v rohu oken umístěna konstrukční výztuž.



Obrázek 52 – Detail trajektorií hlavních napětí pro kombinaci zatížení ZS1 a ZS2

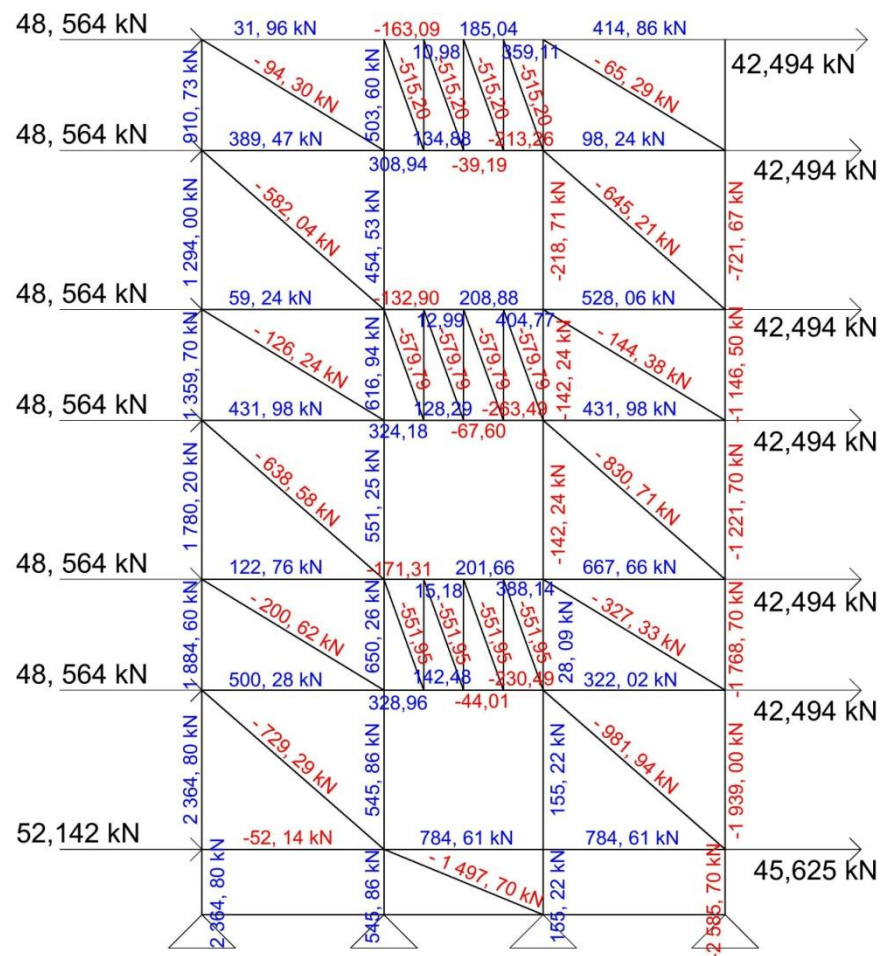
Detailnější zobrazení situace poskytuje obrázek 52. Z tohoto obrázku se bude vycházet při tvorbě modelu náhradní příhradoviny. Z trajektorií napětí vidíme, že směry hlavních tahových (v levé části stěny) a hlavních tlakových (v pravé části stěny) vznikají pod úhlem přibližně 90°. Tomu bude odpovídat umístění vzpěr/táhel modelu náhradní příhradoviny. V levé části stěny jde vidět, že tahové trajektorie kříží trajektorie tlakové (zelené čáry). Mezi dvěma táhly v levé části stěny, bude umístěna vzpěra. Vzpěry budou také umístěny v pravé části stěny, dle sklonu tlakových trajektorií. Tyto trajektorie se sklánějí směrem k oknu. I vzpěry v této oblasti budou skloněné směrem k oknu. Nad okny budou umístěny vzpěry, které odpovídají sklonu zelených čar na obrázku 52.



Obrázek 53 – Model náhradní příhradoviny pro řešení stěny s otvory

Na obrázku 53 je zobrazen model náhradní příhradoviny pro řešení vyztužení stěny s otvory. Základním předpokladem pro řešení D-oblastí metodou příhradové analogie je vnášení vnějšího zatížení do modelu uzly. Opět tedy bylo přepočítáno zatížení od větru do osamělých sil působících v uzlových oblastech modelu. Pro návrh výztuže je stěžejní zatížení větrem, neboť zatížení od stropu vyvolá v modelu náhradní příhradoviny hlavně tlaková napětí, s kterými si beton poradí. Posouzení únosnosti vzpěr není potřeba. Vzpěry mají kolem sebe dostatek prostoru pro roznesení napětí do větší šířky. Tím pádem vyjde napětí ve vzpěře menší než je návrhová pevnost vzpěry daná jednoosou pevností v tlaku f_{cd} upravenou v závislosti na výskytu trhlin a druhu vzpěry.

Na obrázku 54 jsou zobrazeny vnitřní síly na modelu náhradní příhradoviny. Jsou zobrazena pouze první tři podlaží. Tato podlaží se budou dimenzovat. Pro lepší názornost obrázku jsou vnitřní síly se záporným znaménkem červeně a se znaménkem kladným modře. Na hodnoty vnitřních sil v táhlech, bude navržena výztuž. Také lze na obrázku vidět, že s narůstající výškou klesají síly v prutech modelu náhradní příhradoviny.



Obrázek 54 – Vnitřní síly na modelu náhradní příhradoviny pro stěnu s otvory

5.1.2 Dimenzování stěny s otvory

Postup výpočtu a vzorce převzaty z [5]

Materiálové charakteristiky stěny:

- Beton C30/37 $\rightarrow f_{cd} = \frac{30}{1,5} = 20 \text{ MPa}$
- Ocel B550B $\rightarrow f_{yd} = \frac{550}{1,15} = 478,26 \text{ MPa}$
- Krytí výztuže: 25 mm

Pro přenesení příčných tahů, bude ve stěně navržena dle konstrukčních zásad minimální ortogonální výztuž. Vytvoří se tak při obou površích základní rastr stěny, který bude doplněn výztuží na přenesení sil v táhlech.

$$A_s > 0,003 \cdot A_c$$

$$A_s = 0,003 \cdot 1000 \cdot 250 = 750 \text{ mm}^2/\text{m}$$

Je navrženo $2 \times \phi 10/200 \text{ mm} \rightarrow A_s = 942 \text{ mm}^2$

Dle obrázku 54 budou navrženy výztuže na sílu v táhlech. Návrh je prováděn do prvních třech nadzemních podlaží.

- 1. Nadzemní podlaží:

OZ	F _t [kN]	A _{s,req} mm ²	ø	KUSŮ	A _{s,prov} mm ²	σ _{SD}	l _{b,rqd}	l _{bd}	F _t		F _s	POSOUZENÍ
2	2365,80	4946	20	16	5024	471	872	872	2365,80	<	2402,98	VYHOVUJE
3	650,26	1360	18	6	1526	426	710	710	650,26	<	729,90	VYHOVUJE
4	784,61	1640	20	6	1884	416	771	771	784,61	<	901,12	VYHOVUJE
5	500,28	1046	20	4	1256	398	738	738	500,28	<	600,74	VYHOVUJE

Tabulka 1 – Návrh výztuže v 1. nadzemní podlaží stěny s otvory

V tabulce 1 je návrh a posouzení výztuže pro 1. nadzemní podlaží. Svislá výztuž navržená v tomto podlaží povede od spodní hrany stěny po dolní líc okna v 2. nadzemním podlaží. Největší síla v levém táhlu je 2 365,80 kN. Na tuto sílu byla navržena výztuž (viz. tabulka 1) která zároveň přenesení sílu 1 884,60 kN (viz obrázek 54). Tato výztuž bude mít na schéma vyztužení označení 2 (viz první sloupec tabulky 1). Výztuž je navržena ve 4 vrstvách. V každé vrstvě budou 4 pruty. Při tvorbě modelu náhradní příhradoviny byla odhadnuta šířka táhla na 300 mm. Aby byla dodržena výslednice síly v táhlu, musí být osová vzdálenost mezi vrstvami 85 mm. Tloušťka stěny je 250 mm. Osová vzdálenost mezi jednotlivými pruty v jedné vrstvě je 65 mm. V táhle u okna je největší síla 650 kN. V tomto místě je navržena výztuž ve 2 vrstvách. V každé vrstvě budou 3 pruty. Osová vzdálenost mezi pruty se odvodí stejně jako u předchozího případu. Osová vzdálenost mezi vrstvami bude 250 mm a mezi pruty v jedné vrstvě 100 mm. V 1. podlaží vycházejí kladné síly i vpravo od okna. Na tyto síly není potřeba dimenzovat výztuž, protože jsou menší než síly vlevo od okna. Vzhledem k návrhu stěny na působení větru zprava bude výztuž umístěna i v oblasti vpravo od okna. V oblasti pod oknem je navrženo 6 prutů ve dvou vrstvách. Osová vzdálenost mezi vrstvami je 250 mm. Mezi pruty v jedné vrstvě je osová vzdálenost 100 mm. Nad oknem jsou 4 pruty umístěné v jedné vrstvě. Osová vzdálenost mezi pruty je 65 mm.

- 2. Nadzemní podlaží

OZN	F _t [kN]	A _{s,req} mm ²	ø	KUSŮ	A _{s,prov} mm ²	σ _{SD}	l _{b,rqd}	l _{bd}	F _t		F _s	POSOUZENÍ
6	1780,20	3722	18	16	4069	437	729	729	1780,20	<	1946,41	VYHOVUJE
3	616,94	1290	18	6	1526	404	674	674	616,94	<	729,90	VYHOVUJE
7	667,66	1396	18	6	1526	438	729	729	667,66	<	729,90	VYHOVUJE
8	431,98	903	18	4	1017	425	708	708	431,98	<	486,60	VYHOVUJE

Tabulka 2 – Návrh a posouzení výztuže pro 2. nadzemní podlaží

Svislá výztuž v 2. nadzemní podlaží povede od dolního líc okna v 2. nadzemní podlaží po spodní líc okna v 3. nadzemní podlaží. Musí být uváženo stykování s výztuží navrženou pro 1. podlaží. Stykování by mělo být provedeno v místě, kde je v modelu náhradní příhradoviny umístěn uzel.

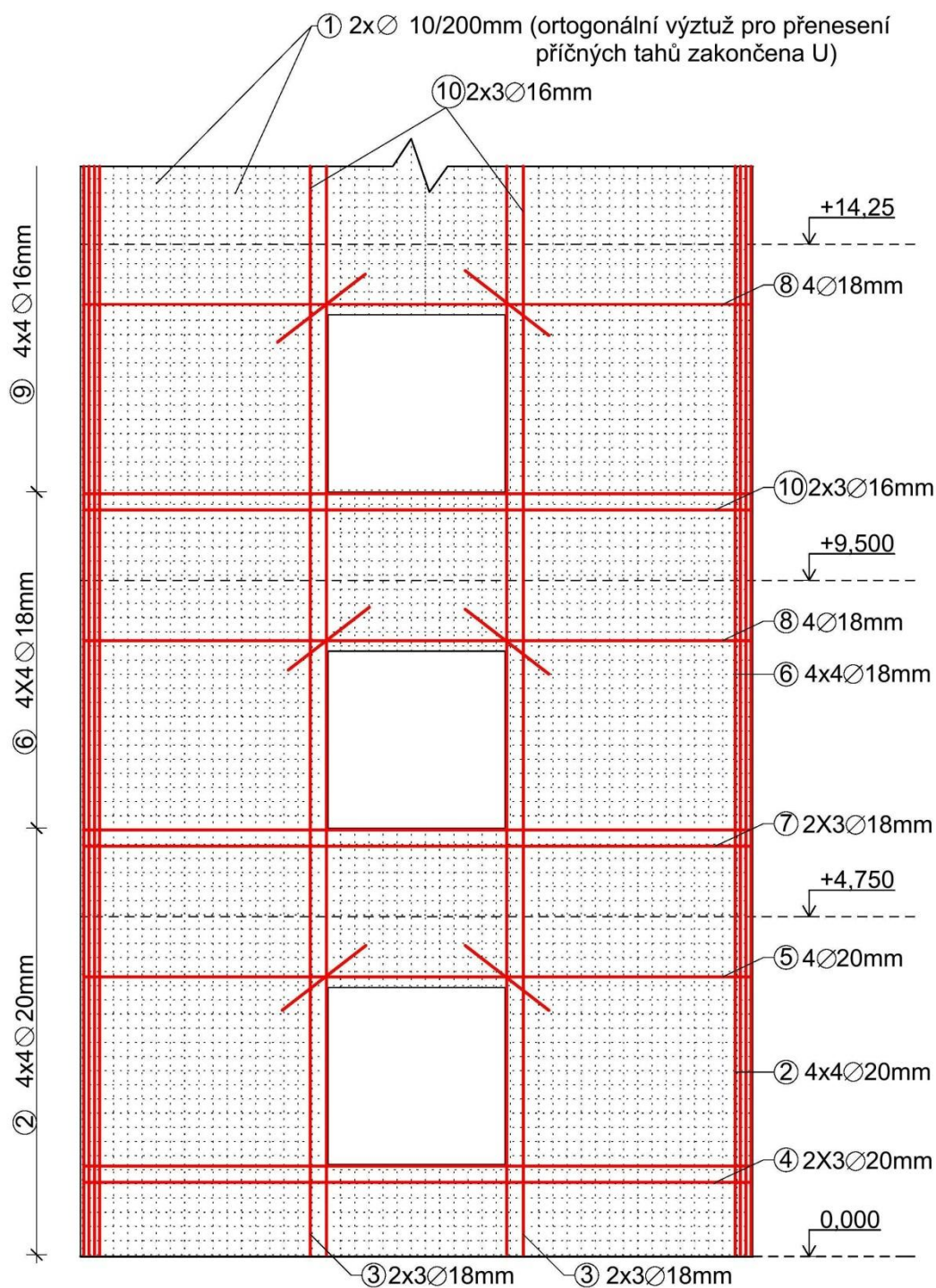
- 3. Nadzemní podlaží

OZN	F _t [kN]	A _{s,req} mm ²	ø	KUSŮ	A _{s,prov} mm ²	σ _{SD}	l _{b,rqd}	l _{bd}	F _t		F _s	POSOUZENÍ
9	1294,00	2705	16	16	3215	402	596	596	1294,00	<	1537,91	VYHOVUJE
10	503,60	1053	16	6	1206	418	619	619	503,60	<	576,72	VYHOVUJE
10	528,06	1104	16	6	1206	438	649	649	528,06	<	576,72	VYHOVUJE
8	389,47	814	18	4	1017	383	638	638	389,47	<	486,60	VYHOVUJE

Tabulka 3 - Návrh a posouzení výztuže pro 2. nadzemní podlaží

Jak lze vidět v tabulce 3, počet kusů výztuže i jejich rozvržení se po výšce nemění. Pouze dochází k redukci ø prutů. Z toho vyplývá, že osově vzdálenosti mezi pruty budou po celé výšce stejné, jako jsou v 1. nadzemní podlaží. Opět je třeba uvážít stykování výztuží z 2. a 3. podlaží. Pro stykování bude platit stejné pravidlo, jaké bylo popsáno v odstavci výše.

Rozvržení výztuže ve stěně s otvory bude jasnější po nahlédnutí do obrázku 55, kde je zobrazeno schéma vyztužení pro stěnu s otvory. Schéma popisuje pouze první tři nadzemní podlaží, která byla dimenzována.



Obrázek 55 – Schéma výztuže pro stěnu s otvory

Výztuž na obrázku 55 byla pro vyniknutí zobrazena červeně, aby nezanikla v rastru, který schématicky zobrazuje ortogonální výztuž pro přenesení příčných tahů. Pruty navržené pro přenesení tahů vzniklých větrem zleva, jsou zrcadlově otočeny pro přenesení větru působícího zprava. Rohy otvorů byly doplněny o konstrukční výztuž pro omezení vzniku poruchových trhlin.

5.1.3 Posouzení uzlových oblastí

Z obrázku 54 vyplývá, že při zatížení větrem zleva, budou nejvíce namáhané styčníky pravé dolní části stěny. Proto budou posouzeny právě tyto styčníky. Styčníky jsou typu C-C-C-T, z toho plyne součinitel $k_2 = 0,85$. $\sigma_{RD,max}$ tedy bude:

$$\sigma_{RD,max} = 0,85 * \left(1 - \frac{30}{250}\right) * 20 = 14,96 \text{ MPa}$$

V oblasti těchto dvou styčnicků, má beton dostatek prostoru pro přenesení tlakových napětí. Šířka stěny v oblasti od pravého líce otvoru k pravému líci stěny je 3,5 m. Předpokládá se, že šířka vzpěry bude 900 mm.



Obrázek 56 – Nejvíce namáhané styčníky

Na obrázku 56 jsou zobrazeny posuzované styčníky. Do těchto styčnicků působí tři tlakové síly a je v nich ukotveno táhlo.

- Posouzení styčníku 1:

$$\frac{2\,585,70 * 10^3}{900 * 250} = 11,49 < 14,96 \text{ MPa} \dots \text{VYHOVUJE}$$

$$\frac{1\,939,00 * 10^3}{900 * 250} = 8,62 < 14,96 \text{ MPa} \dots \text{VYHOVUJE}$$

- Šířka šikmé vzpěry w_c :

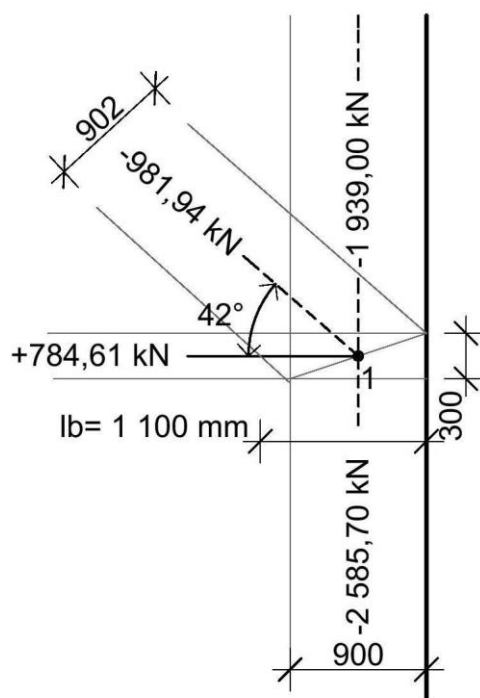
$$w_c = 300 * \cos 42^\circ + 900 * \sin 42^\circ = 902 \text{ mm}$$

$$\frac{981,94 * 10^3}{900 * 250} = 4,35 < 14,96 \text{ MPa} \dots \text{VYHOVUJE}$$

- Síla v táhle $F_t = 784,61 \text{ kN}$

$$\frac{784,61 * 10^3}{300 * 250} = 10,46 < 14,96 \text{ MPa} \dots \text{VYHOVUJE}$$

Návrhová pevnost betonu v uzlu 1, jejíž hodnota byla snížena v závislosti na uspořádání vzpěr a táhel, nebyla překročena.



Obrázek 57 – Geometrie uzlové oblasti č. 1

Ve styčnicku jedna je kotveno táhlo. V tomto táhle působí síla 784, 61 kN. Tuto sílu přenáší 6ø20 mm umístěných ve dvou vrstvách. Požadovaná kotevní délka výztuže je (dle tabulky 1) 771 mm. Z obrázku 57 je jasné, že v uzlové oblasti 1 je dostatek prostoru pro ukotvení výztuže.

- Posouzení styčnicku 2:

$$\frac{1\,939,00 \cdot 10^3}{900 \cdot 250} = 8,62 < 14,96 \text{ MPa} \dots \text{VYHOVUJE}$$

$$\frac{1\,768,70 \cdot 10^3}{900 \cdot 250} = 7,86 < 14,96 \text{ MPa} \dots \text{VYHOVUJE}$$

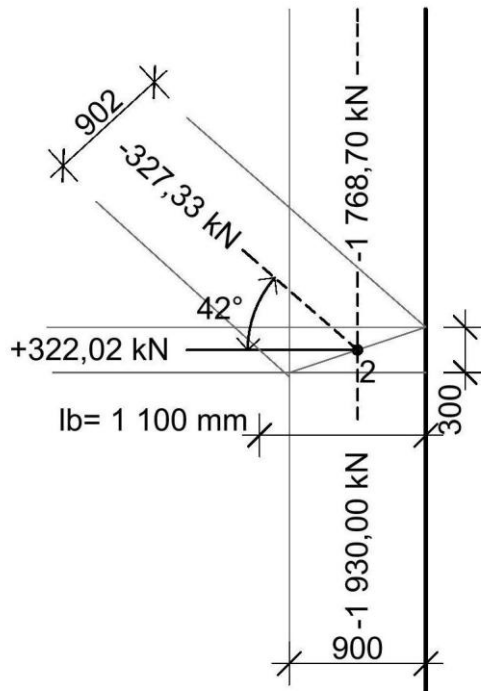
- Geometrie styčnicku 2 je stejná jako styčnicku 1. šířka šikmé vzpěry tedy bude 902 mm.

$$\frac{327,33 \cdot 10^3}{900 \cdot 250} = 1,45 < 14,96 \text{ MPa} \dots \text{VYHOVUJE}$$

- Síla v táhle $F_t = 322,02 \text{ kN}$

$$\frac{322,02 \cdot 10^3}{300 \cdot 250} = 4,29 < 14,96 \text{ MPa} \dots \text{VYHOVUJE}$$

Podobně jako v uzlové oblasti č. 1 ani zde nebyla překročena hodnota návrhové pevnosti betonu.



Obrázek 58 – Geometrie uzlové oblasti č. 2

Protože geometrie uzlové oblasti č. 2 je stejná jako u oblasti č. 1. i zde je pro ukotvení k dispozici délka 1 100 mm. V této oblasti je kotvena výztuž

s požadovanou minimální kotevní délkou 738 mm. V uzlové oblasti č. 2 je dostatek prostoru pro ukotvení výztuže.

Požadované kotevní délky jsou uvedeny v tabulkách 1,2 a 3. Šířka tlačných oblastí je dostatečná pro zakotvení výztuže bez provedení ohybů. Pouze výztuž pro přenesení příčných tahů bude u okrajů zakončena U profily.

6 Závěr

Práce se zabývala analýzou D-oblastí pomocí metody náhradní příhradoviny. Jako první byly modely využity pro ověření ručního výpočtu vnitřních sil na nosníku potřhaného vlivem ohybového momentu. Modely byly vytvořeny v programu RFEM a sledovaly se na nich změny vnitřních sil při změně úhlu θ , který svírala diagonála s táhlem. Komplikace nastala, když se první uvažovaný model choval jako mechanismus. Proto musel být model upraven. Výsledky z programu potvrdily správnost ručního výpočtu, založeného na rovnováze sil v nosníku.

Stejný nosník, který byl vyšetřován u smyku, byl použit pro řešení ozubu. Vlivem vyříznutí části průřezu v oblasti uložení nosníku na sloup, je narušena geometrická spojitost nosníku. Při řešení metodou náhradní příhradoviny byla použita kombinace dvou modelů, které vedly k detailnímu návrhu výztuže v této oblasti. Jak bylo vidět z výsledků získaných z programu RFEM, tahové napětí se koncentrovalo do koutu ozubu. Model B vedl k účinnému umístění výztuže vzhledem k tomuto tahovému napětí a omezuje tak tvorbu trhlin tvořících se v oblasti špičky ozubu.

Následující kapitola se zabývala stěnovým nosníkem. Na rozdíl od ozubu na nosníku, stěnový nosník je jako celek poruchová oblast. Pro řešení stěnového nosníku byly použity ověřené modely, které vedly k návrhu výztuže. Stejně jako jiné návrhové postupy železobetonových konstrukcí i metoda náhradní příhradoviny je založená na iteraci. V první fázi je důležité odhadnout výztuž na přenesení síly, která vzniká v táhle spojující dolní podpory. Postupně se model náhradní příhradoviny zpřesňuje a na síly v prutech je dimenzována konstrukce. Pokud se na začátku učiní špatný odhad, musí se odhad upravit a příklad přepočítat.

V závěru práce byla řešena zavětrovací stěna. Na rozdíl od předchozích příkladů se tentokrát nedal použít žádný ověřený model. Model náhradní příhradoviny musel být vytvořen na základě průběhu trajektorií hlavních napětí. Po sestavení modelu se na síly v táhlech nadimenzovala výztuž pro přenesení tahových účinků. Model byl vytvořen pro kombinaci, která uvažovala se zatížením větrem zleva. Proto byla výztuž provedena zrcadlově i na druhé straně. Modelů, které by vedly k návrhu výztuže v této stěně by mohlo být více. Dalo by se pouvažovat nad modelem, který by vedl přímo k návrhu šikmé výztuže v blízkosti rohu otvorů. Celkově byl poslední příklad nejnáročnější. Jak z hlediska vytvoření si vlastního modelu náhradní příhradoviny, tak z hlediska zamyšlení se nad prováděním stykování výztuží.

Literatura

- [1] Šmejkal, J., Procházka, J.: Navrhování s použitím modelů náhradní příhradoviny *Beton TKS*. Praha: BETON TKS, S. R. O., 2/2010. ISSN 1213-3116.
- [2] Šmejkal, J., Procházka, J.: Navrhování s použitím modelů náhradní příhradoviny *Beton TKS*. Praha: BETON TKS, S. R. O., 6/2010. ISSN 1213-3116.
- [3] Doc. Ing. Jaroslav Navrátil, CSc.. *Předpjaté betonové konstrukce*. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM,s.r.o. Brno, 2004. ISBN 80-214-2649-7.
- [4] ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2. *Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [5] Karel Semrád. ŘEŠENÉ PŘÍKLADY BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ POMOCÍ PŘÍHRADOVÉ ANALOGIE . *concrete.fsv.cvut*. [online]. [cit. 1970-01-01]. Dostupné z: http://concrete.fsv.cvut.cz/pomucky/down/Resene_priklady_BK_pomoci_prihradove_analogie.pdf
- [6] ČSN EN 1991-1-4. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí. Část 1-4: Obecná zatížení- Zatížení větrem*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [7] ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2. *Navrhování betonových konstrukcí Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [8] Doc. Ing. Svatopluk Šmírák, CSc.. *PRUŽNOST A PLASTICITA I*. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM,s.r.o. Brno, 2006. ISBN 80-7204-468-0.

Seznam obrázků

- Obrázek č. 1 Vnitřní síly na ohýbaném nosníku [3]
Obrázek č. 2 Rozložení výslednice síly F_{sw} do několika třmínků [3]
Obrázek č. 3 Vliv volby velikosti úhlu θ na velikosti vnitřních sil na ohýbaném nosníku
Obrázek č. 4 Napětí v tlačené diagonále
Obrázek č. 5 Modely náhradní příhradoviny ohýbaného nosníku
Obrázek č. 6 Vnitřní síly na prutech modelu náhradní příhradoviny spočtených programem RFEM
Obrázek č. 7 Napětí v diagonále modelu náhradní příhradoviny
Obrázek č. 8 Modely náhradní příhradoviny ozubů [1]
Obrázek č. 9 Geometrie řešeného nosníku
Obrázek č. 10 Model náhradní příhradoviny A
Obrázek č. 11 Model náhradní příhradoviny B
Obrázek č. 12 Schéma vyztužení ozubu nosníku
Obrázek č. 13 Izolinie hlavního napětí σ_1 před zahuštěním sítě konečných prvků
Obrázek č. 14 Izoplochy hlavního napětí σ_1 před zahuštěním sítě konečných prvků
Obrázek č. 15 Izolinie hlavního napětí σ_2 před zahuštěním sítě konečných prvků
Obrázek č. 16 Izoplochy hlavního napětí σ_2 před zahuštěním sítě konečných prvků
Obrázek č. 17 Trajektorie hlavních napětí před zahuštěním sítě prvků
Obrázek č. 18 Izoplochy hlavního napětí σ_1 po zahuštění sítě konečných prvků
Obrázek č. 19 Izoplochy hlavního napětí σ_2 po zahuštění sítě konečných prvků
Obrázek č. 20 Trajektorie hlavních napětí po zahuštění sítě prvků
Obrázek č. 21 Síť konečných prvků po zahuštění
Obrázek č. 22 Síť konečných prvků před zahuštěním
Obrázek č. 23 Ukázky některých modelů náhradní příhradoviny v závislosti na poloze zatížení [5]
Obrázek č. 24 Geometrie stěnového nosníku zatíženého osamělým břemenem
Obrázek č. 25 Výchozí příhradový model
Obrázek č. 26 Vnitřní síly na výchozím příhradovém modelu
Obrázek č. 27 Vnitřní síly na upřesněném modelu
Obrázek č. 28 Geometrie upřesněného modelu
Obrázek č. 29 Model náhradní příhradoviny doplněný o šikmou vzpěru
Obrázek č. 30 Schéma vyztužení stěnového nosníku
Obrázek č. 31 Izolinie hlavního napětí σ_1 stěnového nosníku zatíženého jednou silou
Obrázek č. 32 Izoplochy hlavního napětí σ_1 stěnového nosníku zatíženého jednou silou
Obrázek č. 33 Izolinie hlavního napětí σ_2 stěnového nosníku zatíženého jednou silou
Obrázek č. 34 Izoplochy hlavního napětí σ_2 stěnového nosníku zatíženého jednou silou
Obrázek č. 35 Trajektorie hlavních napětí stěnového nosníku zatíženého jednou silou
Obrázek č. 36 Geometrie stěnového nosníku zatíženého dvěma osamělými břemeny

- Obrázek č. 37 Geometrie příhradového modelu pro stěnový nosník zatížený dvěma silami
- Obrázek č. 38 Geometrie upřesněného modelu náhradní příhradoviny pro stěnový nosník zatížený dvěma osamělými silami
- Obrázek č. 39 Doplnění modelu náhradní příhradoviny o šikmou vzpěru
- Obrázek č. 40 Schéma vyztužení stěnového nosníku zatíženého dvěma břemeny
- Obrázek č. 41 Izolinie hlavního napětí σ_1 stěnového nosníku zatíženého dvěma silami
- Obrázek č. 42 Izoplochy hlavního napětí σ_1 stěnového nosníku zatíženého dvěma silami
- Obrázek č. 43 Izolinie hlavního napětí σ_2 stěnového nosníku zatíženého dvěma silami
- Obrázek č. 44 Izoplochy hlavního napětí σ_2 stěnového nosníku zatíženého dvěma silami
- Obrázek č. 45 Trajektorie hlavních napětí stěnového nosníku zatíženého dvěma silami
- Obrázek č. 46 Pohled a půdorys na řešenou stěnu s otvory
- Obrázek č. 47 Závislost dynamického tlaku na výšce
- Obrázek č. 48 Schéma zatížení stěny s otvory od kombinace zatížení na strop a větru zleva
- Obrázek č. 49 Hlavní napětí σ_1 pro kombinaci zatížení ZS1 a ZS2
- Obrázek č. 50 Hlavní napětí σ_2 pro kombinaci zatížení ZS1 a ZS2
- Obrázek č. 51 Trajektorie hlavních napětí pro kombinaci zatížení ZS1 a ZS2
- Obrázek č. 52 Detail trajektorií hlavních napětí pro kombinaci zatížení ZS1 a ZS2
- Obrázek č. 53 Model náhradní příhradoviny pro řešení stěny s otvory
- Obrázek č. 54 Vnitřní síly na modelu náhradní příhradoviny pro stěnu s otvory
- Obrázek č. 55 Schéma vyztuže pro stěnu s otvory
- Obrázek č. 56 Nejvíce namáhané styčníky
- Obrázek č. 57 Geometrie uzlové oblasti č. 1
- Obrázek č. 58 Geometrie uzlové oblasti č. 2

Seznam tabulek

Tabulka č. 1 Návrh výztuže v 1. nadzemní podlaží stěny s otvory

Tabulka č. 2 Návrh a posouzení výztuže pro 2. nadzemní podlaží

Tabulka č. 3 Návrh a posouzení výztuže pro 2. nadzemní podlaží

Seznam použitých zkratk a symbolů

θ – sklon diagonály [°]

D – síla v diagonále [kN]

σ_D – napětí v diagonále [kPa]

F_s – výslednice síly ve výztuži [kN]

F_c – výslednice síly tlačené oblasti [kN]

F_{sw} – síla v třmínku [kN]

V_E – posouvající síla [kN]

z – rameno vnitřních sil [m]

h – výška průřezu [m]

d_1 – vzdálenost mezi spodním lícem průřezu a osou výztuže [m]

A_s – plocha výztuže [mm²]

f_{yd} – mez kluzu použité oceli [MPa]

f_{cd} – návrhová pevnost použité třídy betonu [MPa]

$\sigma_{rd,max}$ – maximální hodnota napětí, která může působit na hranách styčnicku [MPa]

$\emptyset_{m,min}$ – nejmenší průměr trnu pro ohyb výztuže [mm]

F_{bt} – tahová síla na začátku ohybu při mezním zatížení prutu [kN]

a_b – polovina osově vzdálenosti mezi pruty kolmo na rovinu vyztužení [mm]

β – redukční součinitel posouvající síly [-]

k_1, k_2, k_3 – součinitele redukující jednoosou pevnost betonu v tlaku v závislosti na uspořádání vzpěr a táhel v uzlu [-]

b_w – nejmenší šířka průřezu mezi tlačným a taženým pásem [mm]

v – redukční součinitel pevnosti betonu při porušení smykem [-]