



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ

INSTITUTE OF CONCRETE AND MASONRY STRUCTURES

NÁVRH BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ VYZTUŽENÝCH NEKOVOVOU FRP VÝZTUŽÍ

DESIGN OF CONCRETE STRUCTURES REINFORCED WITH NON-METALLIC FRP
REINFORCEMENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Michaela Golisová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. VOJTĚCH KOSTIHA, Ph.D.

BRNO 2021



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3608T001 Pozemní stavby
Pracoviště	Ústav betonových a zděných konstrukcí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Michaela Golisová
Název	Návrh betonových konstrukcí vyztužených nekovovou FRP výztuží
Vedoucí práce	Ing. Vojtěch Kostiha, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2020
Datum odevzdání	15. 1. 2021

V Brně dne 31. 3. 2020

prof. RNDr. Ing. Petr Štěpánek, CSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Platné předpisy a normy (včetně změn a oprav):

ČSN EN 1990: Zásady navrhování konstrukcí;

ČSN EN 1992-1-1: Navrhování betonových konstrukcí. Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby;

fib Bulletin no. 40: FRP reinforcement in RC structures;

ACI 440.1R-15: Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars;

ISIS Design Manual No. 3 – Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers (FRPs), ISIS Canada.

Další literatura dle doporučení vedoucího diplomové práce.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Diplomová práce bude rozdělena do dvou částí - teoretické (rešeršní) a praktické. V teoretické části bude zpracována rešerše použití a návrhu FRP výztuží, v praktické části bude na jednoduchém konstrukčním prvku proveden návrh vyztužení pomocí nekovové kompozitní výztuže.

Ostatní činnosti a případná zjednodušení zadaného konstrukčního prvku provádějte v souladu s pokyny vedoucího diplomové práce. Práce bude zpracována v rozsahu znalostí posluchače magisterského studijního programu.

Požadované výstupy:

Textová část (obsahuje rešerši použití a návrhu FRP výztuží)

Praktická část (P1. Statický výpočet)

Prohlášení o shodě listinné a elektronické VŠKP (1x)

Popisný soubor závěrečné práce (1x)

Diplomová práce bude odevzdána v listinné a elektronické formě a pro ÚBZK 1x na CD nosiči.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).

2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

Ing. Vojtěch Kostih, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem betonových konstrukcí vyztužených nekovovou FRP výztuží se zaměřením na řešení únosnosti v protlačení. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. Teoretická část začíná s obeznámením FRP výztuží a popisem smykového namáhání. Následuje představení současných přístupů zabývajících se touto problematikou. V praktické části jsou v návaznosti na tyto předpisy vypracovány parametrické studie pro porovnání vlivu jednotlivých vstupních parametrů a vybraných předpisů. Poslední část je věnována návrhu a nelineární analýze provedené v programu ATENA.

KLÍČOVÁ SLOVA

FRP, nekovová výztuž, smyk, protlačení, mezní napětí, nelineární analýza, křížem vyztužená deska, parametrická studie, posouvající síla

ABSTRACT

This diploma thesis investigates the design of concrete structures reinforced with non-metallic FRP reinforcement with a focus on solving the bearing capacity in extrusion. The work is divided into a theoretical and a practical part. The theoretical part begins with an introduction to FRP reinforcement and a description of shear stress. The following is an introduction to current approaches dealing with this issue. In the practical part, in connection with these regulations, parametric studies are developed to compare the influence of individual input parameters and selected regulations. The last part is dedicated to the design and nonlinear analysis performed in the ATENA software.

KEYWORDS

FRP, non-metallic Reinforcement, shear, punching shear, shear stress, non-linear analysis, two way slab, parametric study, shear force

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Michaela Golisová *Návrh betonových konstrukcí vyztužených nekovovou FRP výztuží*. Brno, 2020. 60 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav betonových a zděných konstrukcí. Vedoucí práce Ing. Vojtěch Kostihá, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Návrh betonových konstrukcí vyztužených nekovovou FRP výztuží* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 15. 1. 2021

Bc. Michaela Golisová
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Návrh betonových konstrukcí vyztužených nekovovou FRP výztuží* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 15. 1. 2021

Bc. Michaela Golisová
autor práce

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Vojtěchovi Kostihovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: 15. ledna 2021

podpis autora

Obsah

Úvod	10
1. Kompozitní FRP výztuž a její vlastnosti	11
1.1. Složení	11
1.2. Mechanické a fyzikální vlastnosti FRP výztuže.....	13
1.3. Postup výroby	15
2. Smykové namáhání prvku	16
2.1. Přístup ČSN EN 1992-1-1 k návrhu únosnosti v protlačení [8]	18
2.1.1. Posouzení kontrolního obvodu u_0	18
2.1.2. Posouzení základního kontrolního obvodu u_l	19
2.1.3. Posouzení kontrolního obvodu u_{out}	21
3. Přístupy zahraničních norem k návrhu únosnosti v protlačení	22
3.1. ACI 440.1R-15: Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fiber-reinforced polymer (FRP) bars [A]	22
3.2. CSA-S806-12: Design and Construction of Building Structures With Fibre-Reinforced Polymers [C]	24
3.3. Fib Bulletin No. 40: FRP Reinforcement in RC Structures [F]	25
3.3.1. Modifikace JSCE standardu	25
4. Parametrické studie	27
4.1. Studie vlivu změny parametrů na mezní napětí v protlačení.....	28
4.1.1. Vstupní parametry	28
4.1.2. Vliv pevnosti betonu	29
4.1.3. Vliv účinné výšky.....	31
4.1.4. Vliv modulu pružnosti FRP výztuže	33
4.1.5. Vliv stupně vyztužení.....	35
4.2. Studie srovnání předpisů	37
4.2.1. Porovnání výsledků mezního napětí v protlačení bez smykové výztuže.....	38
4.2.2. Porovnání výsledků mezního napětí v protlačení se smykovou výztuží.....	39
5. Nelineární analýza v programu ATENA.....	41
5.1. Konstrukční model	41
5.2. Okrajové podmínky	43
5.3. Materiálové charakteristiky	43
5.4. Newton-Raphsonova výpočtová metoda.....	44
5.5. Výsledky nelineární analýzy	44
5.6. Ruční výpočet.....	46

5.7. Napětí při dosažení mezní únosnosti	48
Závěr	53
Seznam použité literatury	54
Seznam použitých symbolů a veličin	56
Seznam obrázků a tabulek	59

Úvod

Tato diplomová práce se zaměřuje na problematiku návrhu betonových konstrukcí vyztužených nekovovou FRP výztuží. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část.

Teoretická část je zaměřena na seznámení se s kompozitní FRP výztuží, jejími vlastnostmi, klady a zápory a také výrobou. V další části je rozebrán popis smykového namáhání prvku a přístup normy ČSN EN 1992-1-1 k řešení návrhu únosnosti v protlačení bez a se smykovou výztuží. Protože současná forma normy neumožňuje návrh s pomocí kompozitní výztuže, bude proveden také modifikovaný výpočet.

Následně budou představeny současné přístupy zahraničních norem a standardů, které se touto problematikou zabývají. Jedná se o návrhové přístupy:

CSA-S806-12: Design and Construction of Building Structures With Fibre-Reinforced Polymers

ACI 440.1R-15: Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fiber-reinforced polymer (FRP) bars

Fib Bulletin No. 40: FRP Reinforcement in RC Structures

V praktické části se v návaznosti na tyto předpisy se vypracovaly parametrické studie. V první části studie se porovnávají vlivy jednotlivých vstupních parametrů. Druhá část je zaměřená na vzájemné porovnání vybraných předpisů na konkrétním příkladu.

Poslední část se zabývá návrhem dvou modelů, bez a se smykovou výztuží, a následně nelineární analýzou v programu ATENA. Výsledné mezní napětí je použito pro porovnání s předpisy a zjištění procentuálního rozdílu.

1. Kompozitní FRP výztuž a její vlastnosti

FRP výztuž je známa jako kompozitní materiál, který je složený z nosných vláken, jejichž spojení zajišťuje polymerní matrice. Vlastnosti kompozitu jsou určeny konkrétním typem a poměrem obou materiálů. Při různých kombinacích těchto dvou složek je tedy možné pokrýt velké množství požadovaných fyzikálně-mechanických vlastností.

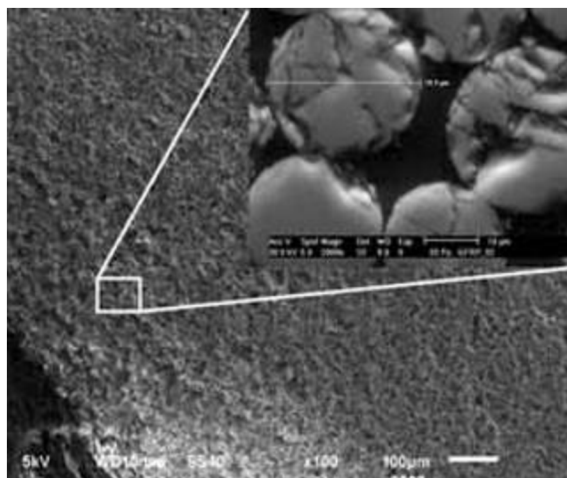
Její výhodné chemické a fyzikálně-mechanické vlastnosti se využívají při návrhu betonových prvků, které jsou vystaveny vysokému zatížení prostředí, případně tam, kde jsou na konstrukci kladeny speciální požadavky. Oproti běžné betonářské oceli má výhodu ve své odolnosti vůči degradačním účinkům prostředí, a tak se nabízí jako alternativa k drahým korozivzdorným ocelím. [1]

Ve stavebnictví se využívá především jako materiál pro zesilování (vnější výztuž), ale taktéž pro vyztužování nových betonových prvků (vnitřní výztuž). V současné době je její použití v praxi velmi ztížené z důvodu absence spolehlivých metod navrhování pro určení konečné pevnosti konstrukčních prvků, zejména plochých desek. Například, ačkoli existuje několik návrhových metod pro predikci konečné meze smykové pevnosti spojů desek a sloupů vyztužených vnitřní FRP výztuží, většina z nich je buď empiricky založená na dostupných datech z experimentů nebo na základě norem pro oceli vyztužené desky z důvodu nižšího modulu pružnosti FRP prutů.

Tato práce je zaměřena především na přímou FRP výztuž namáhanou tahem s orientací na využití v oblastech smykového namáhání u plošných deskových konstrukcí neboli únosnost v protlačení.

1.1. Složení

Základem kompozitní výztuže je spojení nosné a pojivové složky. Existuje několik typů nosných vláken a polymerních matric. Nejpoužívanější typy nosných vláken jsou skelná a uhlíková, můžeme se setkat také s čedičovou, aramidovou nebo kevlarovou. Všechny typy jsou lineárně elastické, ale i křehké a lámavé. Obsah vláken je 75–80 % hmotnosti [2].



Obrázek 1: Řez FRP výztuží s viditelnou strukturou [2]

Jednotlivé skupiny vláken je možné rozdělit do dílčích podskupin dle jejich charakteristických vlastností. V Tab. 1 jsou uvedeny nejrozšířenější skupiny ve stavebnictví – skleněná a uhlíková vlákna; a méně používaná – aramidová a čedičová vlákna. Všechny jmenované skupiny se při tahovém namáhání chovají lineárně pružně až do porušení.

Tabulka 1: Mechanické vlastnosti jednotlivých vláken [3]

Vlákna	Typ	Hustota [kg/m ³]	Modul pružnosti [GPa]	Tahová pevnost [MPa]	Max. přetvoření [%]	Teplota tavení [°C]
Skleněná	E	2570	72,5	3400	2,5	1100-1550
	A	2460	73	2760	2,5	
	C	2460	74	2350	2,5	
	S	2470	88	4600	3	
Uhlíková	SM	1700	250	3700	1,4	1200-2400
	HS	1800	250	4800	1,9	
	HM	1900	500	3000	0,6	
	UHM	2100	800	2400	0,3	
Aramidová	-	1440	70-125	3400-4100	-	~425
Čedičová	-	2700	93-110	3000-4800	-	1450

Z Tab. 1 vyplývá, že uhlíková vlákna mají proti skleněným vláknům vyšší modul pružnosti a také tahovou pevnost. Avšak méně používaná aramidová a čedičová vlákna se vyznačují značně vyšší pevností v tahu.

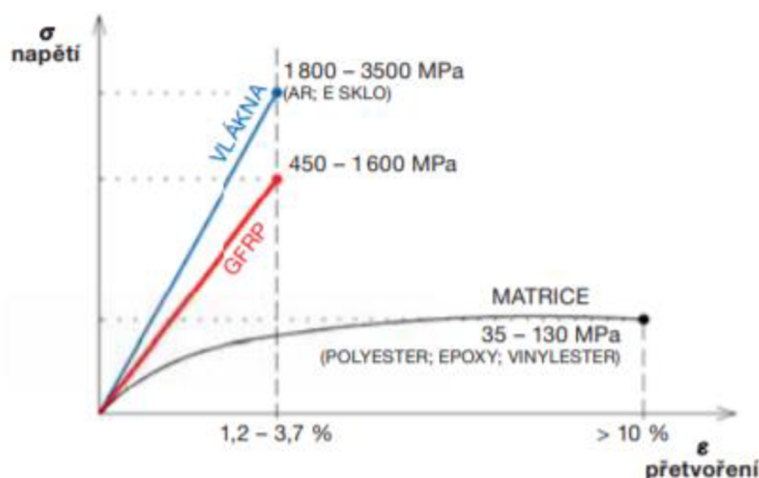
Pojivová složka je tvořena polymerní maticí. Svým složením určuje výsledné vlastnosti materiálu v příčném směru. Její úlohou je zabezpečit celistvost materiálu, spojení jednotlivých nosných vláken a ochranu před vnějšími vlivy. V porovnání s vlákny je polymerní matrice zřetelně poddajnější. Matrice mají dobré izolační vlastnosti, avšak při působení dlouhodobého konstantního napětí začne docházet k dotvarování. Na výrobu se používají organické nebo anorganické polymery, nejčastěji vinylesterová, epoxidová nebo polyesterová pryskyřice. [2]

Tabulka 2: Mechanické vlastnosti jednotlivých polymerních matic [F]

Vlastnosti	Polymerní matrice		
	Polyesterová	Epoxidová	Vinylesterová
Hustota [kg/m ³]	1200-1400	1200-1400	1150-1350
Tahová pevnost [MPa]	34,5-104	55-130	73-81
Modul pružnosti [GPa]	2,1-3,45	2,75-4,10	3,0-3,5
Poissonovo číslo [-]	0,35-0,39	0,38-0,4	0,36-0,39
Součinitel tepelné roztažnosti [10 ⁻⁶ /°C]	55-100	45-65	50-75

Vhodným složením těchto materiálových složek vznikají různé typy materiálů s jedinečnými vlastnostmi. Ty jsou dané vhodným poměrem složek a jejich typem. Podstatnou fyzikální vlastností materiálu je její ortotropní chování, které způsobuje rozdílné hodnoty v směrech působení. Vlastnosti vláken v podélném směru vykazují konečné hodnoty mechanických parametrů násobně lepší než hodnoty ve směru kolmých na vlákna. Při kombinaci typu vláken vznikají tzv. hybridní typy FRP výztuží.

Z grafu na Obr. 2 je zřejmé, že matrice vykazuje nelineární chování, zatímco nosná vlákna vykazují lineárně elastické chování v takové míře, že tím určují výsledné chování materiálu.



Obrázek 2: Idealizované závislosti napětí na přetvoření GFRP výztuže [2]

1.2. Mechanické a fyzikální vlastnosti FRP výztuže

Při návrhu betonové konstrukce vystavené agresivnímu prostředí, je v případě použití nekovové FRP výztuže možné snížit staticky neúčinnou krycí vrstvu a navrhnout ji pouze na zajištění dostatečné soudržnosti z hlediska trvanlivosti. Tím by došlo také k úspoře materiálu. Její další výhodou je velmi dobrý poměr únosnosti vůči své váze. Jsou také nevodivé, netečné k působení magnetického pole a bludným proudům a odolné vůči agresivním chemikáliím. Při určitém složení mají výrazně vyšší pevnosti v tahu než běžná betonářská ocel. [1]

Mezi nevýhody využití kompozitní výztuže patří především pokles mechanických charakteristik, které jsou v průběhu životnosti konstrukce negativně ovlivněny působením zásaditosti betonu, která se pohybuje u nových betonů v rozsahu pH 12,4 až 13,7. Matrice je navržena tak, aby chránila vlákna před působením těchto látek, ale hydrolyzou, plastifikací a bobtnáním může dojít k degradaci samotné matrice. Další nevýhodou výztuže je její nízký modul pružnosti (v porovnání s ocelí), který snižuje výslednou tuhost konstrukce. FRP výztuže mají také nižší odolnost vůči působení vysokých teplot. Velkým problémem je taktéž nedostatek podkladů pro návrh, a tak se využívají zahraniční normy a standardy jako například ACI 440.1-15, CSA S806-12 nebo Fib Bulletin 40. [1][4]

Pro návrh jsou důležité tyto fyzikální vlastnosti: hmotnost, teplotní roztažnost a reakce výztuže na působení zvýšených teplot. Objemová hmotnost je v porovnání s ocelí zhruba čtvrtinová až pětinnová, což ve srovnání s běžnou výztuží usnadňuje manipulaci na stavbě, ale je nutné pamatovat na fixování výztuže proti nežádoucímu vyplavání. Oproti běžné betonářské oceli, která má teplotní součinitel roztažnosti při běžných teplotách přibližně shodný s betonem, je teplotní roztažnost FRP výztuže rozdílná v příčném a podélném směru a její hodnota závisí na objemovém podílu vláken a typu použité matrice. Z tohoto důvodu vznikají v konstrukci v podélném směru přídavné síly, jejichž velikost je závislá na vlastnostech výztuže. [2]

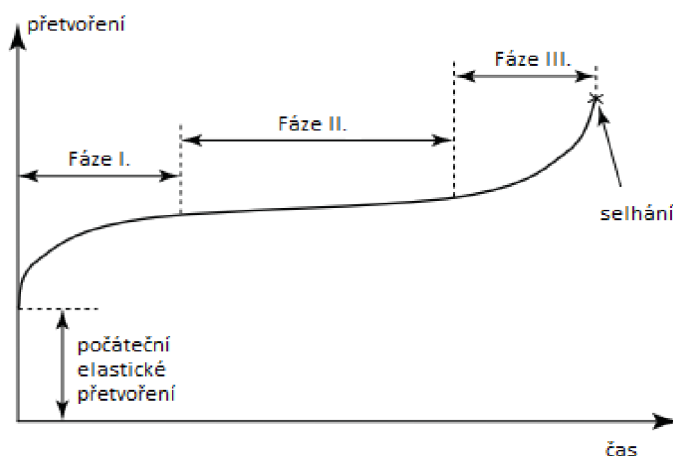
Z hlediska krátkodobých vlastností se zaměřujeme na charakteristiky popsané v Tab 3.

Tabulka 3: Krátkodobé mechanické vlastnosti FRP výztuže v porovnání s ocelí [2]

Vlastnosti	Materiál			
	Ocel	GFRP	CFRP	AFRP
Modul v podélném směru (GPa)	200	35-60	100-580	40-125
Modul v příčném směru (GPa)	200	Cca 8-9	Cca10-12	Cca 5-6
Tahová pevnost v směru vláken (MPa)	300-600	450-1600	600-3500	1000-2500
Tlaková pevnost v směru vláken (MPa)	300-600	Cca ½ z tahové pevnosti	Cca ½ z tahové pevnosti	Cca ¼ z tahové pevnosti
Příčná tahová pevnost (Mpa)	300-600	30-40	30-40	30-40
Objemová hmotnost (kg/m ³)	7850	Cca 2100	Cca 1600	Cca 1400

Z Tab. 3 je zřejmé, že uhlíková výztuž dosahuje nejvyšší hodnoty tahové pevnosti a modulu pružnosti v podélném směru vláken. Z toho důvodu je výhodnější namáhat výztuž v podélném směru pouze centrickým tahem bez účinků příčných sil. V tlaku, na rozdíl od tahu, je dosahováno výrazně nižších hodnot modulů pružnosti a mezních pevností.

Z hlediska dlouhodobých vlastností se zaměřujeme na deformaci v závislosti na čase. Při dlouhodobém konstantním napětí dochází k nárůstu přetvoření, tedy k dotvarování (creep). Průběh lze rozdělit do tří fází (Obr. 3).



Obrázek 3: Idealizovaný nárůst deformace v závislosti na čase

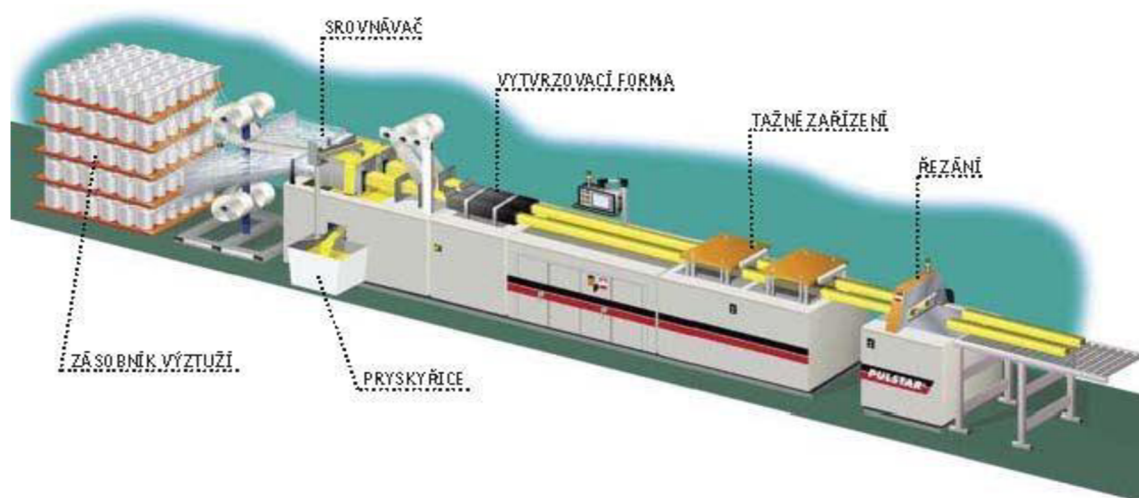
Na Obr. 3 je znázorněno rozdělení průběhu na 3 části: primární, sekundární a terciální.

V primární fázi proběhne v poměrně krátkém časovém úseku nevratná deformace. Působením přerozdělením zatížení z matice na nosná vlákna, začne pozvolné zpomalení intenzity deformace. Průběh v sekundární fázi je téměř konstantní s velmi malým nárůstem

přetvoření. V této fázi nastává strmý nárůst deformace, při kterém dojde k porušení v důsledku nečekaného křehkého selhání vláken. Je tedy zřejmé, že pokud poměr mezi dlouhodobým zatížením a jednorázovou odolností má klesavou tendenci, životnost výztuže se navyšuje. Proto jsou z tohoto hlediska nevyužívanější uhlíková vlákna.

1.3. Postup výroby

Prutové FRP výztuže jsou vyráběny pultruzí, příp. kombinací pultruze a ovíjení. Pultruze je proces kontinuální výroby vyztužených pryskyřic různých tvarů a délky tažením, při kterém musí dojít ke spojení nosných vláken a polymerní matrice.



Obrázek 4: Vyobrazení procesu výroby pomocí pultruze [3]

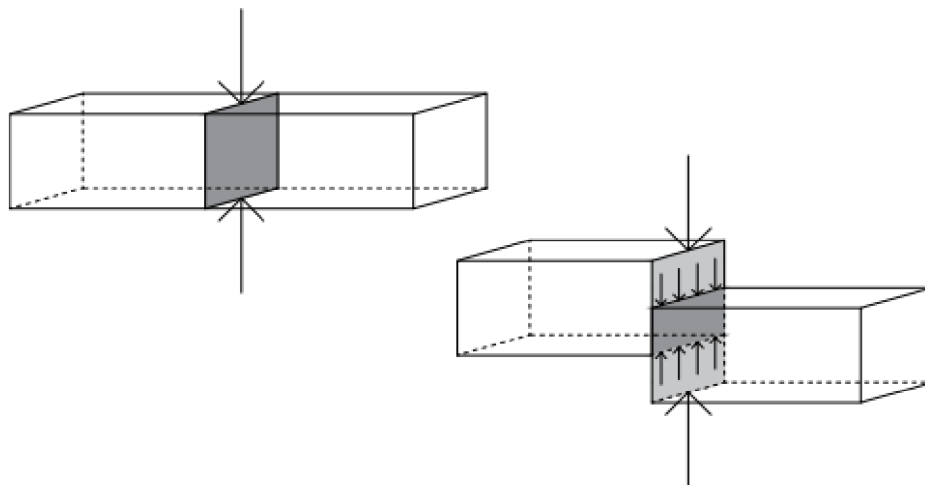
Vstupní materiál je směs tekuté pryskyřice a vláknové výztuže. Proces začíná srovnáním nosných vláken pro zajištění rovnoměrného rozložení vláken do průřezu. Poté se vlákna smáčí ve směsi pryskyřice, plniva, barviva a katalýzou, popř. dalších přísad pro zlepšení materiálových vlastností výsledného profilu.

Po výstupu z lázně má polotovar téměř stejný tvar jako výsledný profil. V před tvarovací formě se vytlačí přebytečné pojivo a profil se před vstupem do vytvrzovací formy vytvaruje do požadovaného tvaru. Ve vyhřívané formě se díky termostatické reakci profil vytvrdí. Po výstupu z formy se profil tahá podávacím zařízením a je dělen na požadované délky, Obr. 4.

Poslední fáze výroby souvisí s povrchovou úpravou pro zlepšení soudržnosti mezi výztuží a betonem. Dochází tedy k doplnění technologické jednotky pro aplikaci požadované povrchové úpravy (např. opískování, ovíjení apod). Povrch je běžně opatřený vrstvou křemičitého písku zalitého v pryskyřici. [2] [3]

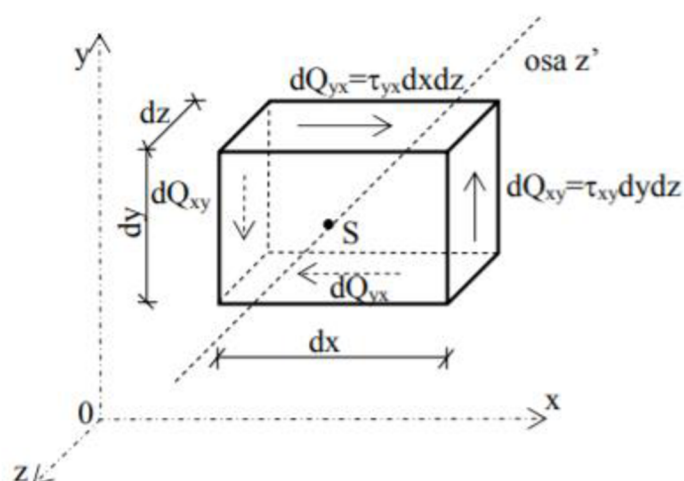
2. Smykové namáhání prvku

Smykové namáhání vzniká při působení dvou stejně velkých sil opačného smyslu na společné nositelce procházející těžištěm průřezu. Pokud v prutu vznikají jenom smyková napětí, jde o prostý smyk. Tento druh namáhání vzniká jenom zřídka, ve většině případů je posouvající síla doprovázena ohybovým momentem. Za čistý smyk lze považovat případ, kdy převládá zatížení posouvající silou tak, že může dojít k usmýknutí.



Obrázek 5: Znárodnění smykového namáhání

Síly zatěžující prut usilují o posuv částic hmoty proti sobě, a tak vznikají smyková napětí ve vybrané rovině. Tato smyková napětí se rovnoměrně rozkládají po ploše průřezu. Napětí nevznikají jenom v rovinách kolmých k ose nosníku, které odpovídají směru posouvající síly, ale také ve vodorovných rovinách s osou nosníku. Takový stav popisuje zákon o vzájemnosti smykových napětí – smyková napětí působící ve vzájemně kolmých elementárních řezech kolmo k jejich průsečnici jsou stejně velká a orientovaná buď k průsečnici, nebo od ní (Obr. 6). [5]



Obrázek 6: Vzájemnost smykových napětí [6]

Pokud vyjmemme diferenciální element o hranách dx, dy, dz , který je v rovnováze, můžeme definovat na hranách elementu smyková napětí a příslušné elementární síly dQ , které vzniknou vynásobením smykových napětí plochou, na kterou působí. Za tohoto předpokladu, můžeme sestavit momentovou podmínku (2.1) rovnováhy k ose rovnoběžné s osou z . Po vydělení součinem dx, dy, dz , dostáváme podmínku vzájemnosti smykových napětí (2.2–2.4). [6]

$$\sum M_z = 0 \quad dQ_{xy}dx - dQ_{yx}dy = \tau_{xz}dydzdx - \tau_{yx}dxdzdy = 0 \quad (2.1)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} \quad (2.2)$$

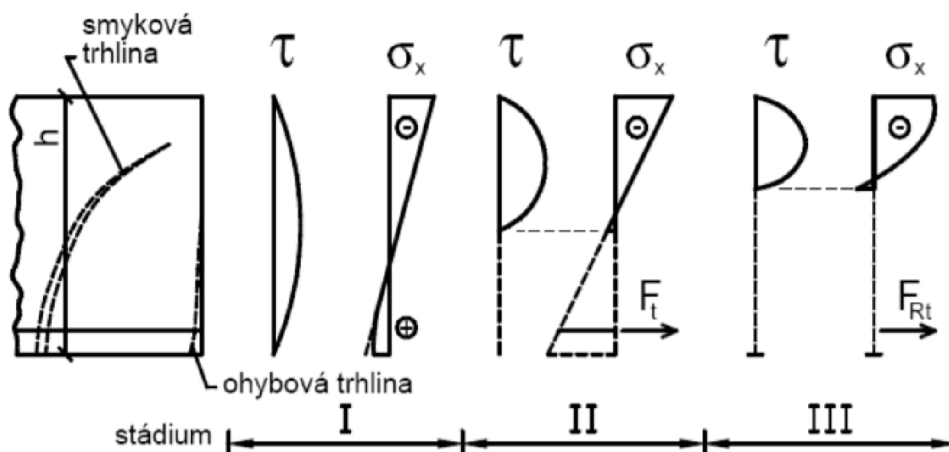
$$\tau_{yz} = \tau_{zy} \quad (2.3)$$

$$\tau_{zx} = \tau_{xz} \quad (2.4)$$

Při zatížení nosníku rovnoměrným spojitým zatížením vyplýne z analýzy vnitřních sil, že největší posouvající síla je v místě podpory. Nulovou hodnotu nabývá v místě maximální hodnoty momentu. Z toho vyplývá, že největší smykové napětí bude taktéž v místě podpory a nulové na nezatížených koncích. Po stanovení podmínky rovnováhy pro vyňatý element z nosníku a její následné postupné úpravě dosáhneme finálního vztahu pro výpočet smykového napětí v libovolné části nosníku (2.5). [5]

$$\tau = \frac{S \cdot V}{I \cdot b} \quad (2.5)$$

- kde
- S statický moment vyňaté části k neutrální ose [mm^3]
 - V posouvající síla [N]
 - I moment setrvačnosti celého průřezu k neutrální ose [mm^4]
 - b šířka průřezu [mm]



Obrázek 7: Napjatost prvku při postupném zatěžování [7]

Ve většině případů je posouvající síla doprovázena ohybovým momentem. Dle velikosti zatížení působícího na prvek dělíme do tří fáze. První fáze je před vznikem trhlin.

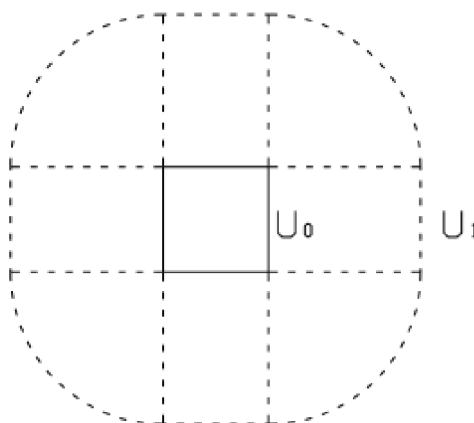
Prvek má chování odpovídající teorii pružnosti a je možné smykové napětí vypočítat dle vzorce (2.5). V momentu, kdy dojde k vyčerpání pevnosti v betonu v tahu nastává druhá situace, a to vznik trhlin. Jako první se projeví ohybové trhliny a ty následují smykové trhliny. V této fázi přenáší tahové namáhání pouze výztuž. V třetí fázi narůstá délka již vzniklých trhlin a může dojít k drcení betonu (Obr. 7). [7]

2.1. Přístup ČSN EN 1992-1-1 k návrhu únosnosti v protlačení [8]

V případě lokálně podepřených desek se zabýváme problematikou protlačení v oblasti podpor. Při navrhování a posouzení desek namáhaných na protlačení se řídíme koncepcí založené na řešení napětí vznikajících v určených oblastech tzv. kontrolních obvodech. Metoda je zaměřena na určení únosnosti v betonové části průřezu v každém kontrolním obvodu. Po překročení této únosnosti je nutné navrhnout výztuž k zabránění v protlačení.

2.1.1. Posouzení kontrolního obvodu u_0

Kontrolní obvod popisuje tvar oblasti porušení, kde působí smyková síla, která ovlivňuje napjatost v trhlině. První obvod, kterým je potřeba se zabývat, je kontrolní obvod u_0 . Jak lze vidět na Obr. 8, délka obvodu u_0 je rovná délce obvodu sloupu.



Obrázek 8: Půdorysné zobrazení kontrolních obvodů

Kontrolní obvod u_0 posuzujeme na smykovou odolnost těsně kolem sloupu dle rovnice (2.6)

$$V_{Ed,0} \leq V_{Rd,max} \quad (2.6)$$

$$\beta \frac{V_{Ed}}{u_0 d} \leq 0,4 v f_{cd} \quad (2.7)$$

kde	$V_{Ed,0}$	smykové napětí v kontrolním obvodu u_0 [N]
	$V_{Rd,max}$	návrhová smyková únosnost tlakové diagonály [N]
	V_{Ed}	návrhová hodnota působící posouvající síly [N]

V redukční součinitel pevnosti betonu při porušení smykem [-]

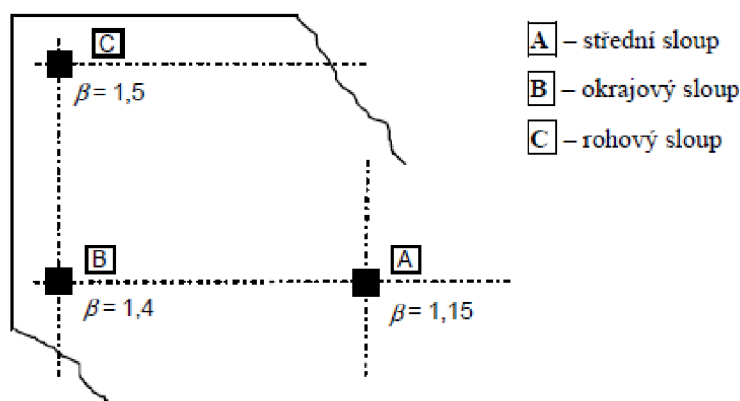
$$v = 0,6 \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] \quad (2.8)$$

β součinitel zahrnující vliv momentů [-]

$$\beta = 1 + k \frac{M_{Ed}}{V_{Ed}} \frac{u_0}{W_0} \quad (2.9)$$

W_0 modul odpovídající rozdělení smyku [mm²]

k součinitel závislý na poměru délek stran sloupu [-]



Obrázek 9: Doporučené hodnoty β

Pro desková pole, která mají přibližně stejné rozpětí, rozdílná ne více než 25 %, lze přibližné hodnoty součinitele β určit podle polohy sloupu (Obr. 9).

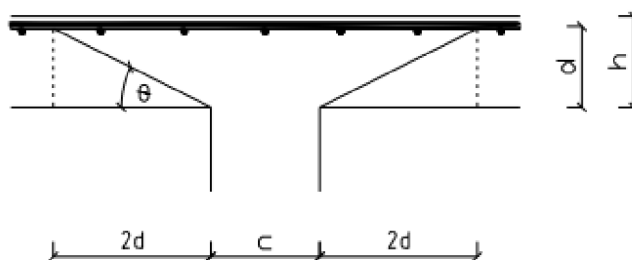
2.1.2. Posouzení základního kontrolního obvodu u_1

Dalším kontrolním obvodem je základní kontrolní obvod u_1 . Velikost kontrolního obvodu se standardně určuje ve vzdálenosti $2d$ od líce sloupu a velikosti úhlu θ mezi tlakovou diagonálou a osou nosníku. Vliv na obvod má také tvar a umístění sloupu.

$$u_1 = u_0 + 2\pi(2d) \quad (2.10)$$

kde d průměr účinných výšek v obou směrech závislých na průměru výztuže

$$d = \frac{d_x + d_y}{2} \quad (2.11)$$



Obrázek 10: Řez základním kontrolním obvodem

Při řešení smykového namáhání vycházíme z modelu příhradové analogie, který je tvořen z tlakového, tahového pásu a tlakových diagonál. Při řešení mohou nastat dvě situace. V první situaci se ověří, zda je prvek schopen přenést smykové namáhání sám, bez nutnosti navrhovat smykovou výztuž. Pokud platí podmínka (2.12), návrh smykové výztuže se nevyžaduje a smykovou výztuž navrhne pouze dle konstrukčních zásad. V případě, že podmínka (2.12) neplatí, je nutno navrhnout výztuž.

$$V_{Ed,1} > V_{Rd,c} \quad (2.12)$$

Abychom mohli přejít k řešení nerovnosti (2.12) je zapotřebí, aby byla splněna podmínka, že hodnota návrhové únosnosti ve smyku $V_{Rd,c}$ nesmí klesnout pod minimální hodnotu v_{min} .

$$V_{Rd,c} \geq v_{min} \quad (2.13)$$

přičemž
$$V_{Rd,c} = C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{\frac{1}{3}} \quad (2.14)$$

$$v_{min} = 0,035 k^{\frac{3}{2}} f_{ck}^{\frac{1}{2}} \quad (2.15)$$

kde $C_{Rd,c}$ součinitel [-]

$$C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} \quad (2.16)$$

k součinitel výšky

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \quad (2.17)$$

ρ_l stupeň vyztužení [-]

$$\rho_{ly} = \frac{A_{sy}}{b_y \cdot d} \quad \rho_{lx} = \frac{A_{sx}}{b_x \cdot d} \quad (2.18)$$

$$\rho_l = \sqrt{\rho_{ly} \cdot \rho_{lx}} \leq 0,02 \quad (2.19)$$

A_s plocha tahové výztuže zakotvena na kotevní délku v daném směru [mm²]

b nejmenší šířka průřezu v tažené oblasti pro daný směr [mm]

f_{ck} charakteristická válcová pevnost betonu v tlaku [MPa]

V případě, že únosnost prvku bez smykové výztuže $V_{Rd,c}$ je nedostačující, je nutné navrhnout smykovou výztuž. Potom se bude celková únosnost desky se smykovou výztuží rovnat:

$$V_{Rd,cs} = 0,75 V_{Rd,c} + 1,5 \frac{d}{S_r} A_{sw} f_{ywd,eff} \frac{1}{u_1 d} \sin \alpha \leq k_{max} V_{Rd,c} \quad (2.20)$$

kde S_r radiální vzdálenost obvodů smykové výztuže [mm]

$$S_r \leq 0,75d \quad (2.21)$$

A_{sw} plocha smykové výztuže na jednom obvodu kolem sloupu [mm^2]

α úhel mezi rovinou desky a smykovou výztuží [$^\circ$]

$f_{ywd,eff}$ účinná návrhová pevnost smykové výztuže v protlačení [MPa]

$$f_{ywd,eff} = 250 + 0,25d \leq f_{ywd} \quad (2.22)$$

f_{ywd} návrhová mez kluzu smykové výztuže [MPa]

k_{max} součinitel omezení; hodnota je závislá na výšce desky a druhu výztuže
 $k_{max} = 1,45; h = 200 \text{ mm};$

$k_{max} = 1,7; h \geq 700 \text{ mm};$

2.1.3. Posouzení kontrolního obvodu u_{out}

Posledním kontrolním obvodem je u_{out} . Délka obvodu se určí dle vztahu (2.23) tak, aby na jeho kraji celý účinek od zatížení přenesla betonová část průřezu, tj. plocha, kde není nutná smyková výztuž.

$$u_{out} = \frac{\beta V_{Ed}}{V_{Rd,c} d} \quad (2.23)$$

3. Přístupy zahraničních norem k návrhu únosnosti v protlačení

V posledních desítkách let bylo navrženo několik objasňujících teorií a kontrastních předpokladů týkajících se odporu a přenosu smykových sil v konkrétním prvku. I když došlo k výraznému zlepšení pochopení smykového chování, složitost různých prediktivních modelů komplikuje jejich přímé začlenění do návrhových rovnic. Z tohoto důvodu je mnoho současných národních i mezinárodních norem založeno na empirickém přístupu, který vychází ze základního předpokladu, že různé mechanismy jsou plastické. Na základě tohoto přístupu lze smykovou kapacitu vyjádřit jako konkrétní příspěvek k pevnosti betonu, který poskytuje přidaná smyková výztuž.

Z experimentálních testů, které uskutečnili výzkumníci z různých koutů světa je zřejmé, že na základě přijetí klasické formulace odvozené pro ocelovou výztuž a po přihlídnutí ke snížení tuhosti pro jiný typ výztuže jako je ocelová, je možné s jistou mírou bezpečnosti předpovědět smykovou kapacitu prvků vyztužených FRP výztuží.

V následujících kapitolách budou představeny přístupy vybraných zahraničních norem, včetně popisu řešení návrhu únosnosti betonových prvků s FRP výztuží bez nutnosti návrhu smykové výztuže a také v případě nutnosti smykové výztuže.

3.1. ACI 440.1R-15: Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fiber-reinforced polymer (FRP) bars [10]

Dle ACI (American Concrete Institute) je návrh prvků vyztužených FRP výztuží podobný jako u železobetonových prvků. Filozofie návrhu smykové výztuže je založená na metodě pevnostního návrhu. Různé mechanické vlastnosti FRP výztuže ovlivňují pevnost ve smyku, a to je nutné zohlednit při výpočtu.

Pro návrh smyku FRP vyztužených prvků je třeba vzít v úvahu několik činitelů. Polymer vyztužený vlákny má:

1. Relativně nízký modul pružnosti
2. Nízkou příčnou smykovou odolnost
3. Vysokou pevnost v tahu a žádnou mez kluzu
4. Pevnost v tahu ohnuté části je výrazně nižší než pevnost v přímé části

Axiální tuhost FRP výztuže (stejně jako pevnost betonu) významně ovlivňuje vnitřní příčnou smykovou odezvu křížem vyztužených desek. Výsledky zkoušek obousměrně vyztužených desek vykazují, že zvýšená tuhost horní FRP výztuže zvyšuje únosnost v protlačení a snižuje maximální průhyb desky. Také se prokázalo, že selhání desek v protlačení je náhlé a velmi křehké.

U dalších testů na protlačení bylo dokázáno, že desky vyztužené FRP mřížkami naopak nevykazují prudký pokles zatížení, místo toho po počátečním selhání pokračují ve stabilním pohlcování energie.

Využitím vysokopevnostního betonu a zvýšením poměru výztuže dochází k navýšení únosnosti v protlačení, což způsobuje významně nižší namáhání betonu a také napětí ve výztuži.

Rovnici pro výpočet únosnosti prvku bez smykové výztuže lze modifikovat součinitelem $\left(\frac{5}{2}k\right)$, a dostaneme tedy rovnici (3.1)

$$V_c = \left(\frac{5}{2}k\right) \sqrt{f_c} b_0 d \quad (3.1)$$

kde f_c' válcová pevnost betonu v tlaku [MPa]
 b_0 obvod kritického řezu (kontrolní obvod); počítaný ve vzdálenosti 0,5d od povrchu od vnějšího líce sloupu; tvar obvodu se shoduje s tvarem sloupu [mm]
 d účinná výška prvku [mm]
 k součinitel pro výpočet výšky tlačené oblasti průřezu [-]

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f \quad (3.2)$$

kde n_f součinitel daný poměrem modulu pružnosti FRP výztuže k modulu pružnosti betonu

$$n_f = \frac{E_f}{E_c} \quad (3.3)$$

ρ_f poměrné vyztužení pro podélnou FRP výztuž

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} \quad (3.4)$$

A_f plocha podélné výztuže [mm²]

b šířka obdélníkového průřezu sloupu [mm]

Pokud je únosnost betonového prvku nedostačující, je zapotřebí využití smykové výztuže. V případě využití FRP výztuže lze použít vzorec (3.5)

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fv} d}{s} \quad (3.5)$$

kde A_{fv} plocha smykové výztuže [mm²]
 f_{fv} pevnost v tahu pro návrh ve smyku; nejmenší návrhová hodnota pevnosti v tahu [MPa]
 s rozteč smykové výztuže [mm]

Celková únosnost betonového prvku je součet návrhové pevnosti betonu a smykové výztuže (3.6)

$$V_n = V_c + V_f \quad (3.6)$$

3.2. CSA-S806-12: Design and Construction of Building Structures With Fibre-Reinforced Polymers [11]

CSA (Canadian Standards Association) určuje celkovou únosnost prvku V_r jako součet návrhové únosnosti podélné FRP výztuže V_c a smykové FRP výztuže V_{sF} (3.7)

$$V_r = V_c + V_{sF} \quad (3.7)$$

Při výpočtu návrhové únosnosti bez smykové výztuže vycházíme ze třech limitních stavů, přičemž nejnižší limitní hodnota je rozhodující. (3.8–3.10)

U všech třech vztahů se doporučuje dodržet dvě následující podmínky:

1. Při výpočtu návrhové únosnosti z rovnic (3.8–3.10) by hodnota pevnosti betonu v tlaku f_c' neměla přesahovat 60 MPa.
2. Jestli efektivní výška d přesáhne 300 mm, hodnota V_c by se měla vynásobit $(300/d)^{0,25}$

$$V_r = V_c = \left(1 + \frac{2}{\beta_c}\right) \left[0,028\lambda\phi_c(E_F\rho_F f_c')^{\frac{1}{3}}\right] \quad (3.8)$$

$$V_r = V_c = \left[\left(\frac{\alpha_s d}{b_0}\right) + 0,19\right] 0,147\lambda\phi_c(E_F\rho_F f_c')^{\frac{1}{3}} \quad (3.9)$$

$$V_r = V_c = 0,056\lambda\phi_c(E_F\rho_F f_c')^{\frac{1}{3}} \quad (3.10)$$

kde	f_c'	válcová pevnost betonu v tlaku [MPa]
	ρ_f	poměrné vyztužení pro podélnou FRP výztuž [-]
	E_f	modul pružnosti FRP výztuže [GPa]
	ϕ_c	součinitel odporu pro beton [-]
	λ	součinitel zohledňující hustotu betonu [-]
	β_c	poměr dlouhé strany ke krátké straně sloupu; zatěžovací oblast [-]
	α_s	pro vnitřní sloup 4; pro okrajový sloup 3; pro rohový sloup 2 [-]
	d	účinná výška prvku [mm]
	b_0	délka kontrolního obvodu ve vzdálenosti $1,5d$ od povrchu sloupu; tvar obvodu je vždy obdélníkový a nezávislý na tvaru sloupu [mm]

Výpočet návrhové smykové únosnosti V_{sF} pro prvky s příčnou výztuží kolmou k podélné ose popisuje rovnice (3.11)

$$V_{sF} = \frac{0,4\phi_F A_{Fv} f_{fu} d_v}{s} \cot\theta \quad (3.11)$$

kde	ϕ_F	součinitel odporu pro FRP výztuž [-]
	A_{fv}	plocha smykové výztuže [mm ²]
	f_{fu}	maximální pevnost FRP výztuže; nesmí být větší než $0,005E_f$ [MPa]
	s	rozteč smykové výztuže [mm]

3.3. Fib Bulletin No. 40: FRP Reinforcement in RC Structures [9]

Na základě úvah s cílem ulehčit rychlé zavedení nekovové FRP výztuže v konkrétních konstrukcích, se návrháři pracující v této oblasti snažili poskytnout jednoduchá pravidla pro návrh únosnosti s pomocí upravených verzí existujících prediktivních rovnic vycházejících z osvědčené filozofie pro ocelovou výztuž v konstrukcích. Fib Bulletin tedy poskytuje modifikované postupy pro návrh FRP výztuže v protlačení, které jsou převzaté z jiných norem nebo zveřejněných prací. [9]

3.3.1. Modifikace JSCE standardu

První soubor návrhových doporučení pro návrh betonových konstrukcí vyztužených kompozitní výztuží vydala japonská společnost stavebních inženýrů v roce 1997. Dle těchto doporučení je možné smykovou únosnost prvků s FRP výztuží odhadnout na základě zásad jako při návrhu železobetonových konstrukcí. Smyková únosnost je určena pomocí empirické rovnice (3.12), která zohledňuje rozdílné tuhosti.

$$V_{cf} = 0,2 \sqrt[4]{1/d}^3 \sqrt{100 \frac{A_f E_f}{b_w d E_s} \sqrt{f_c} b_w d} \quad (3.12)$$

kde	d	účinná výška prvku [mm]
	b_w	šířka pásu [mm]
	A_f	plocha podélné výztuže [mm ²]
	E_f	modul pružnosti FRP výztuže [GPa]
	E_s	modul pružnosti pro ocel [GPa]
	f_c'	válcová pevnost betonu v tlaku [MPa]

Návrhovou únosnost smykové výztuže FRP (3.14) lze vypočítat dle klasické formulace pro ocel, při které se zohledňuje odlišná povaha smykové výztuže dosazením meze kluzu dané výztuže ε_{fwd} (3.13)

$$\varepsilon_{fwd} = \sqrt{\left(\frac{h}{0,3}\right)^{-\frac{1}{10}} f_c \frac{\rho_f E_f}{\rho_{fw} E_{fw}} 10^{-4}} \quad (3.13)$$

kde	h	výška prvku [mm]
-----	-----	------------------

ρ_f	poměrné vyztužení pro podélnou FRP výztuž [-]
ρ_{fw}	poměrné vyztužení pro smykovou FRP výztuž [-]
E_{fw}	modul pružnosti pro smykovou FRP výztuž [GPa]

$$V_{sf} = \frac{A_{fw} E_{fw} \varepsilon_{fwd}}{s} z \quad (3.14)$$

kde	A_{fw}	plocha smykové výztuže [mm ²]
	s	rozteč smykové výztuže [mm]
	z	rameno vnitřních sil [mm]

4. Parametrické studie

Cílem této studie je porovnání výsledných mezních napětí v protlačení, s ohledem na různé přístupy norem a směrnic. Pro porovnání budou použity již výše zmíněné přístupy, tedy ČSN EN 1992-1-1, ACI 440.1R-15, CSA-S8206-12 a Fib Bulletin No. 40. ČSN EN 1992-1-1 jediná z vybraných norem není přizpůsobena na použití nekovové FRP výztuže v praxi, bude tedy použita jako referenční podklad pro modifikaci normy. I když většina norem je přizpůsobena pro využití FRP výztuže, k svému datování nebyla připravena pro návrh FRP výztuže v protlačení, a tak budou parametrické studie vycházet z návrhu FRP výztuže na smyk.

Studie je rozdělena do dvou částí. První část studie je zaměřena na porovnání vlivů jednotlivých parametrů, které vstupují do výpočtu. Parametry byly vybrány na základě předpokladu významného vlivu na smykovou únosnost. V druhé části budou vybrané předpisy porovnávány navzájem na konkrétním příkladu.

Výpočty budou provedeny na konstrukčním prvku bez a se smykovou výztuží. Podélná i smyková výztuž bude z kompozitního materiálu FRP. Hodnoty pro tuto výztuž byly převzaty z výsledků experimentů (Tab. 4 a Tab. 5). Pro lepší srovnání výsledků z různých norem byly ve výpočtu použity střední hodnoty a vliv součinitelů byl zanedbán.

Tabulka 4: Experimentálně získané hodnoty přímé FRP výztuže

Přímá FRP výztuž	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3	Vzorek 4	Vzorek 5
Maximální dosažená síla [kN]	110,16	107,83	105,35	108,05	105,72
Maximální tahová pevnost [MPa]	1402,6	1372,93	1341,36	1375,74	1346,07
Střední tahová pevnost [MPa]	1367,74				
Modul pružnosti [GPa]	52,68	52,7	52,8	53,06	52,05
Střední hodnota modulu pružnosti [GPa]	52,66				

Tabulka 5: Experimentálně získané hodnoty ohýbané FRP výztuže

Ohýbaná FRP výztuž	U_FRP-I	U_FRP-II	U_FRP-III	U_FRP-IV	L_FRP-I	L_FRP-II	L_FRP-III
Maximální dosažená síla [kN]	96,02	94,12	85,42	94,86	57,95	64,44	52,77
Maximální tahová pevnost [MPa]	611,28	599,19	543,8	603,9	737,84	820,48	671,89
Střední tahová pevnost [MPa]	589,54				743,40		
Podíl tahové pevnosti ohýbaného a přímého prutu	44,69 %	43,81 %	39,76 %	44,15 %	53,95 %	59,99 %	49,12 %

Pro vzorovou ukázkou byly do výpočtů zahrnuty také dvě úpravy předpisů. První se týká ČSN EN 1992-1-1, u které byl výpočet modifikován součinitelem k_{FRP} . Tento součinitel byl zaveden z důvodu několikanásobného rozdílu mezi modulem pružnosti oceli a FRP výztuže. Součinitel k_{FRP} se zavádí do výpočtu stupně vyztužení dle (4.2).

$$k_{FRP} = \frac{E_f}{E_s} \quad (4.1)$$

$$\rho_s = k_{FRP} \cdot \rho_f \quad (4.2)$$

Druhá úprava se týká směrnice CSA-S806-12, která je v grafech znázorněna zelenou tečkovanou barvou. Tato úprava má poukázat na velký vliv, který směrnice klade na hodnotu součinitelů.

4.1. Studie vlivu změny parametrů na mezní napětí v protlačení

Tato část studie je zaměřena na porovnání mezního napětí v protlačení s ohledem na vliv změny vybraných parametrů. Na posouzení byly vybrány čtyři parametry:

- Střední hodnota pevnosti betonu v tlaku f_{cm}

Třída betonu	C 16/20	C 20/25	C 25/30	C 30/37	C 35/45	C 40/50	C 45/55	C 50/60
f_{cm} [MPa]	24	28	33	38	43	48	53	58

- Účinná výška desky d

d [mm]	0,15	0,175	0,2	0,225	0,25	0,275	0,3	0,325	0,35	0,375	0,4
----------	------	-------	-----	-------	------	-------	-----	-------	------	-------	-----

- Modul pružnosti FRP výztuže E_f

Modul pružnosti FRP výztuže	GFRP	C-GFRP	CFRP	CFRP
E_f [GPa]	60	80	100	120

- Stupeň vyztužení ρ

ρ [-]	0,005	0,0075	0,01	0,0125	0,15	0,0175	0,02	0,0225	0,025
------------	-------	--------	------	--------	------	--------	------	--------	-------

4.1.1. Vstupní parametry

Tloušťka desky

$h = 250$ mm

Rozměry sloupu

$c_1 = c_2 = 400$ mm

Účinná výška desky

$d = 209$ mm

Beton

Třída betonu

C 30/37

Střední hodnota pevnosti betonu v tlaku

$f_{cm} = 38$ MPa

Modul pružnosti betonu

$E_{cm} = 32$ Gpa

Podélná výztuž GFRP Ø16/150

Plocha výztuže

$A_f = 13,4 * 10^{-4}$ m²

Modul pružnosti výztuže

$E_f = 52,66$ GPa

Krytí výztuže

$c = 25$ mm

Smyková FRP výztuž Ø 8

Plocha výztuže

$A_{fw} = 50,27 * 10^{-4}$ m²

Modul pružnosti výztuže

$E_{fw} = 52,66$ GPa

Modul pružnosti výztuže

$E_{fw} = 28,96$ GPa

Ocel B500B (pro poměr mezi moduly pružnosti)

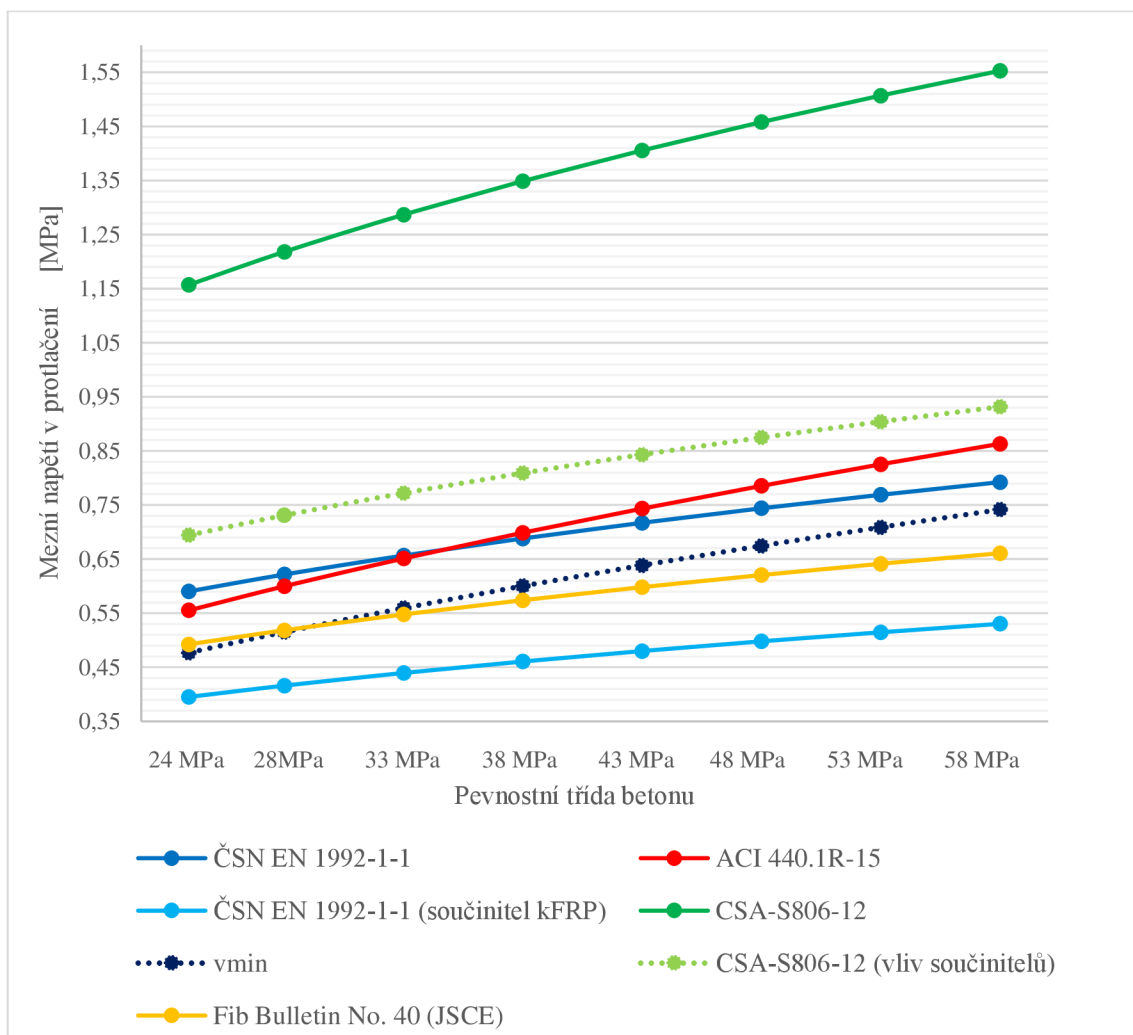
Modul pružnosti oceli

$E_s = 200$ GPa

V případě, že se nejedná o zkoumaný parametr, využíváme k výpočtu výše uvedené hodnoty.

4.1.2. Vliv pevnosti betonu

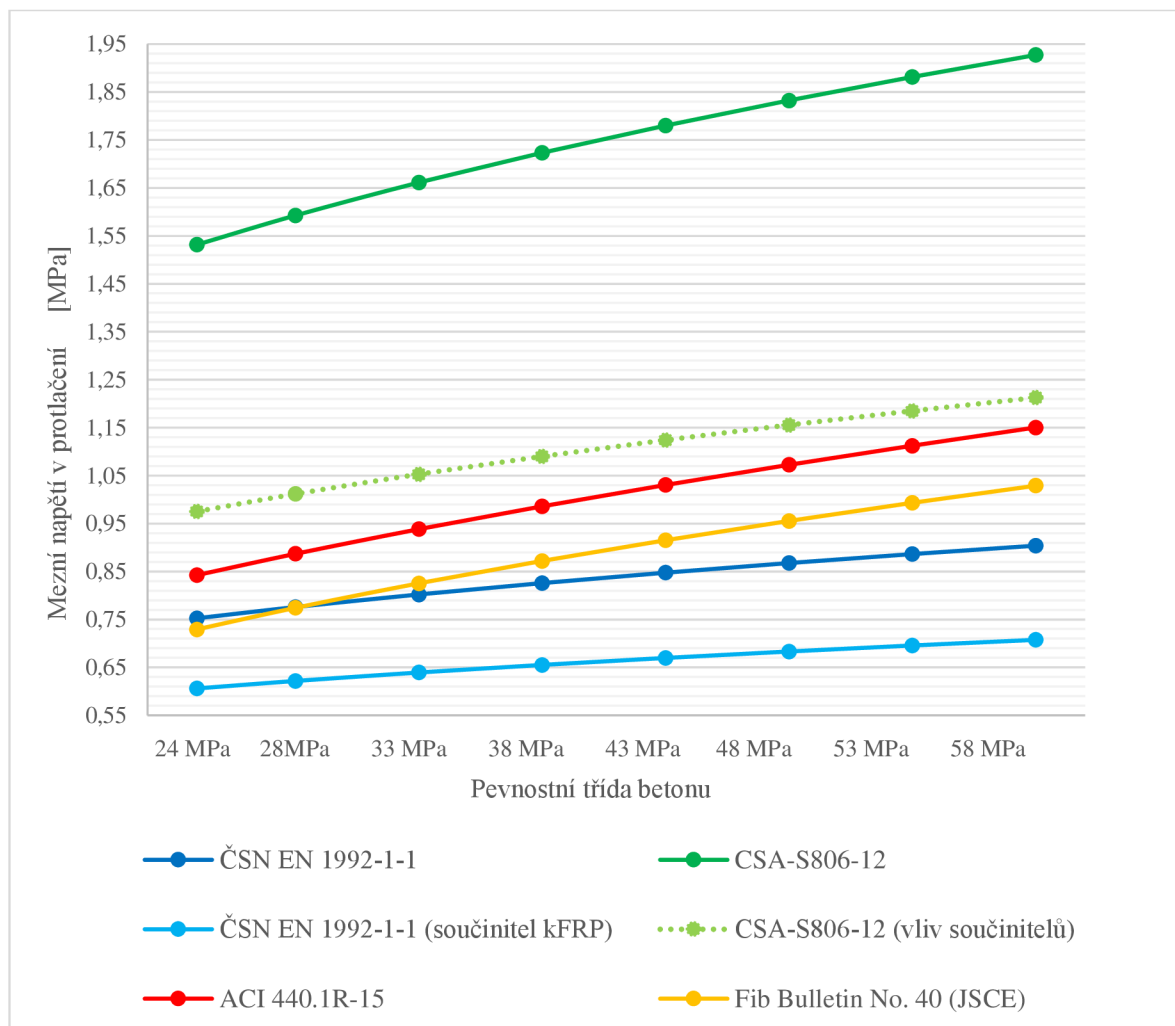
Prvním zkoumaným parametrem je vliv pevnosti betonu. Hodnoty byly zvoleny s ohledem na běžně používané pevnosti. Jak bylo předpokládáno, vyšší pevnost betonu pozitivně ovlivňuje navýšení mezního napětí v protlačení.



Obrázek 11: Vliv pevnosti betonu na mezní napětí v protlačení – bez smykové výztuže

Na Obr. 11 je vyobrazen vliv pevnosti betonu na mezní napětí v protlačení bez smykové výztuže. Je vidět, že směrnice CSA-S806-12 (bez vlivu součinitelů) vykazuje nejvyšší nárůst mezního napětí v protlačení. Naopak výpočet dle ČSN EN 1992-1-1 (součinitel k_{FRP}) vykazuje hodnotově nejmenší nárůst mezního napětí (Tab. 6).

Na Obr. 12 je zobrazení výsledného mezního napětí v protlačení se smykovou výztuží. Tak jako v předchozím grafu, směrnice CSA-S806-12 (bez vlivu součinitelů) vykazuje nejvyšší nárůst mezního napětí a ČSN EN 1992-1-1 (součinitel k_{FRP}) nejmenší.



Obrázek 12: Vliv pevnosti betonu na mezní napětí v protlačení – se smykovou výztuží

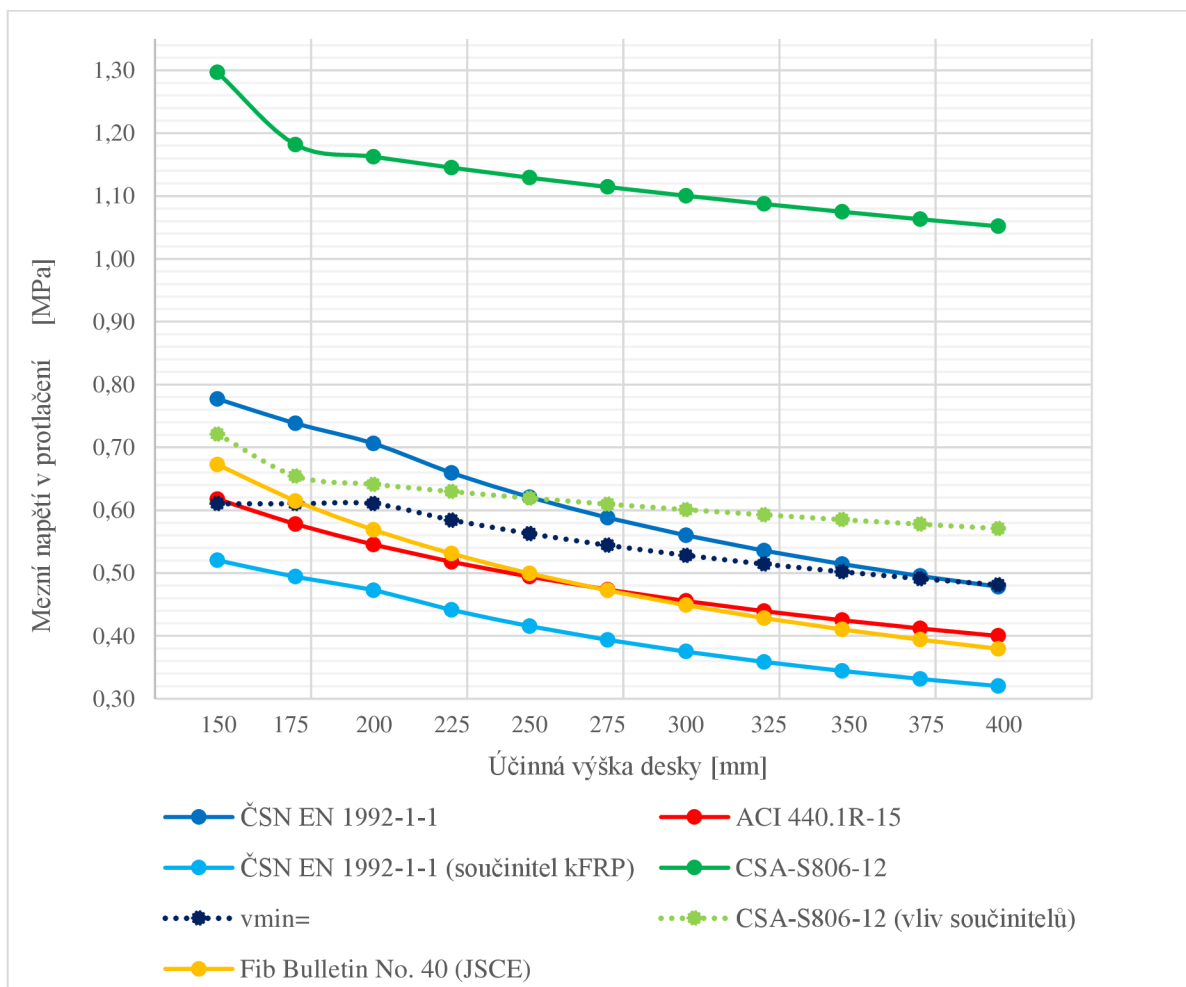
Tabulka 6: Nárůst mezního napětí vlivem změny pevnosti betonu

	ČSN EN 1992-1-1 [8] [MPa]	ACI 440.1R-15 [10] [MPa]	CSA-S806-12 [11] [MPa]	CSA-S806-12 (vliv součinitelů) [MPa]	Fib Bulletin No. 40 (JSCE) [9] [MPa]	ČSN EN 1992-1-1 (součinitel k_{FRP}) [MPa]
$V_c =$	0,202	0,308	0,396	0,237	0,168	0,135
$V_{cs} =$	0,151	0,308	0,396	0,237	0,300	0,101

Při pohledu na Tab. 6 lze říct, že předpisy [10] a [11] mají stejnou hodnotu nárůstu při výpočtu bez i se smykovou výztuží. Důvodem je, že pevnost betonu nemá vliv na výpočet mezního napětí smykové výztuže, tedy tato hodnota je konstantní.

4.1.3. Vliv účinné výšky

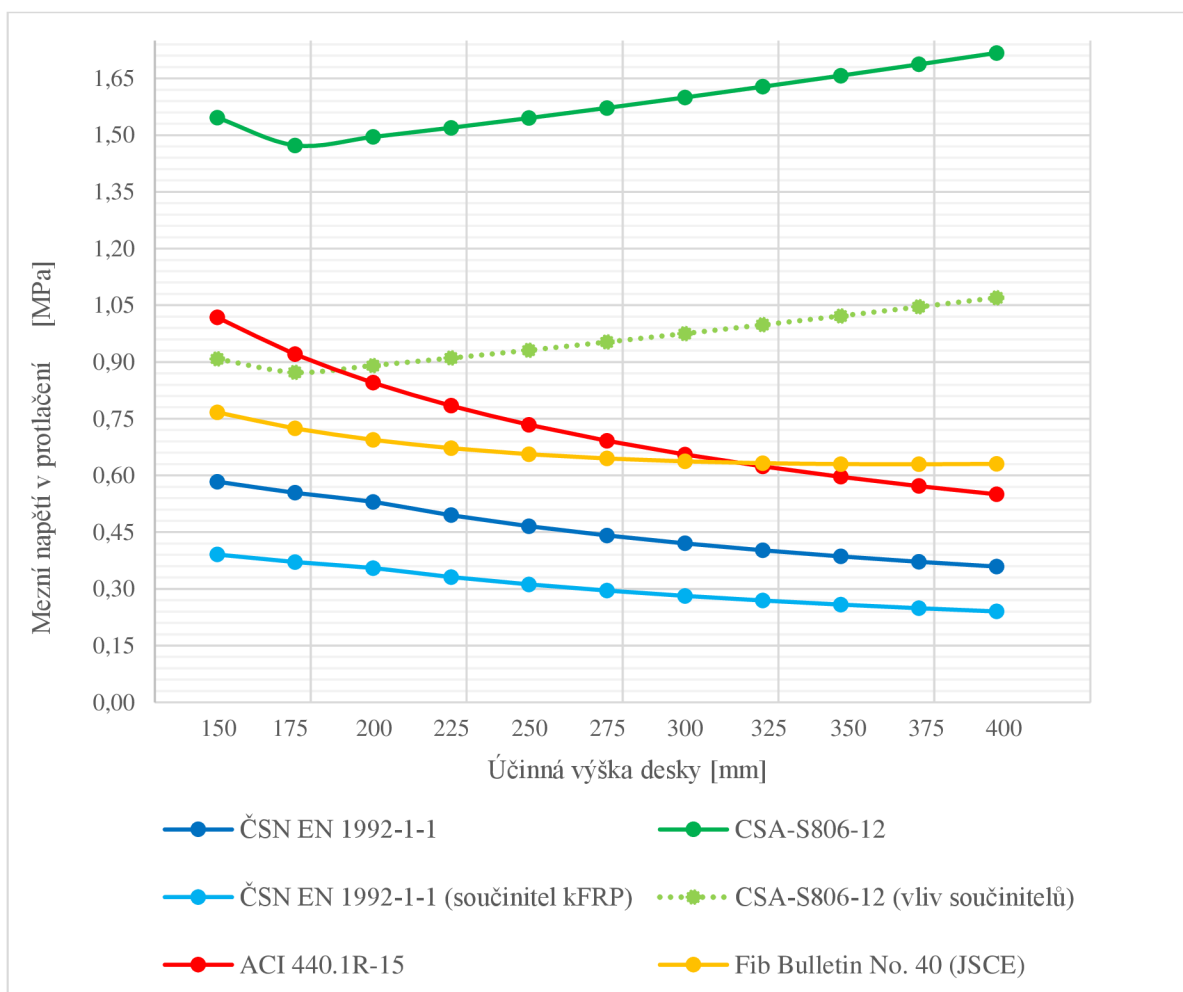
Dalším zkoumaným parametrem je účinná výška desky. Jak je vidět na Obr. 13, u všech předpisů dochází k snížení mezního napětí se zvyšující se účinnou výškou desky. Děje se tak z důvodu přepočtu na napětí. Z důsledku zvýšení účinné výšky, dochází k zvětšení kontrolního obvodu a rozložení síly na větší plochu, což způsobuje snížení napětí.



Obrázek 13: Vliv účinné výšky desky na mezní napětí v protlačení – bez smykové výztuže

Z grafu Obr.13 lze vyčíst, že i když směrnice CSA-S806-12 (bez vlivu součinitelů) vykazuje nejvyšší hodnotu mezního napětí v protlačení, norma ČSN EN 1992-1-1 vykazuje nejvyšší hodnotu poklesu mezního napětí (Tab. 8).

Na Obr. 14 je možné vidět u většiny norem podobné klesavé chování jako u předchozího grafu. U předpisu [11] je naopak při připočítání napětí od smykové výztuže možné pozorovat nárůst mezního napětí.



Obrázek 14: Vliv účinné výšky desky na mezní napětí v protlačení – se smykovou výztuží

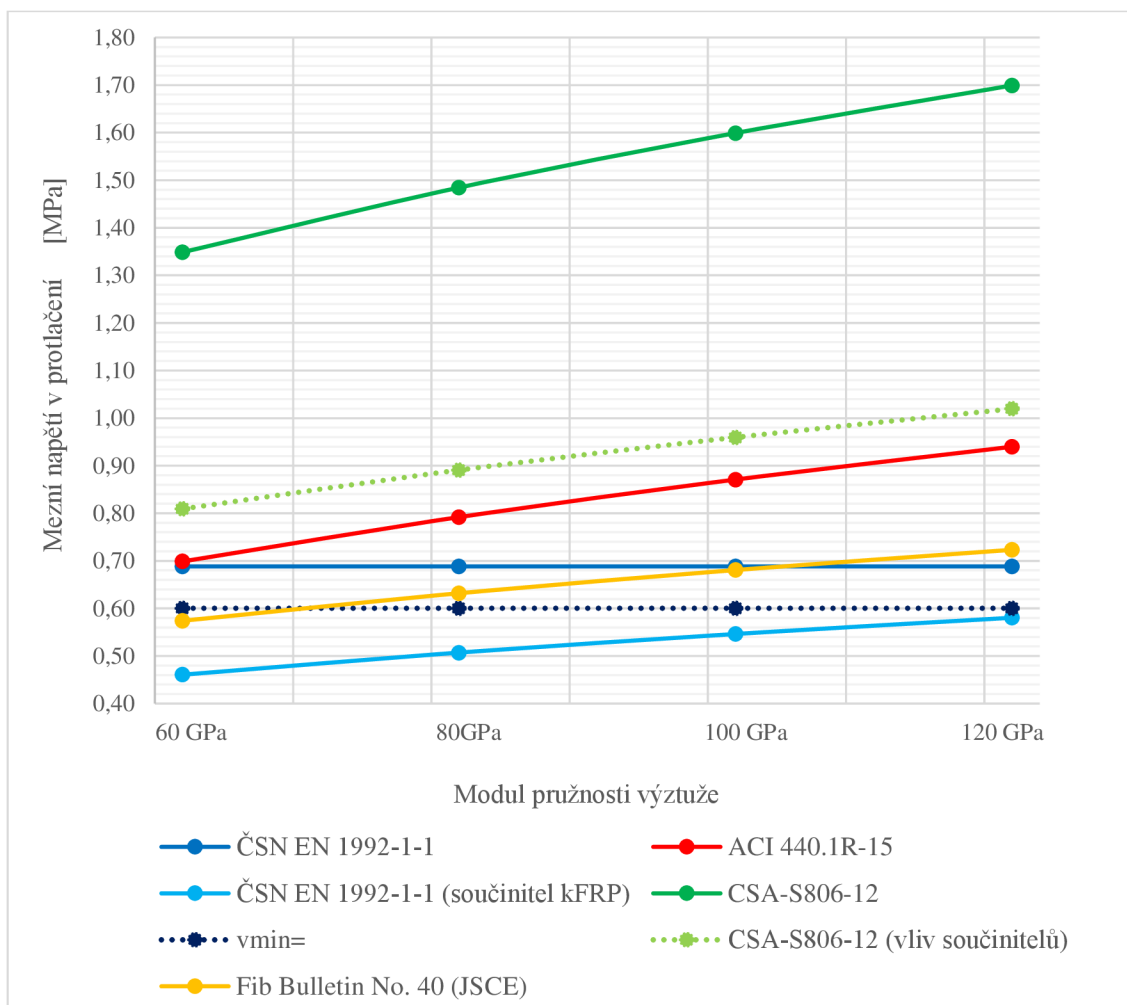
Tabulka 7: Nárůst mezního napětí vlivem změny účinné výšky desky

	ČSN EN 1992-1-1 [8] [MPa]	ACI 440.1R-15 [10] [MPa]	CSA-S806-12 [11] [MPa]	CSA-S806-12 (vliv součinitelů) [MPa]	Fib Bulletin No. 40 (JSCE) [9] [MPa]	ČSN EN 1992-1-1 (součinitel k_{FRP}) [MPa]
$V_c =$	0,299	0,218	0,245	0,150	0,293	0,200
$V_{cs} =$	0,225	0,470	V průměru - 0,171	V průměru -0,162	0,136	0,151

Z Tab. 7 vychází, že předpisy CSA-S806-12 bez i s vlivem součinitelů vykazují nárůst výsledného mezního napětí. Při CSA-S806-12 (bez vlivu součinitelů) byl zaznamenán pokles o 0,036 MPa a následný nárůst o 0,197 MPa. U CSA-S806-12 (s vlivem součinitelů) byl zaznamenán pokles 0,073 MPa a následný nárůst o 0,244 MPa.

4.1.4. Vliv modulu pružnosti FRP výztuže

Třetím zkoumaným parametrem je modul pružnosti. Vzhledem k použití FRP výztuže, byly vybrány čtyři typy a jim příslouchající hodnoty. Jedná se o GFRP (60 GPa), C-GFRP (80 GPa) a CFRP (100 a 120 GPa).

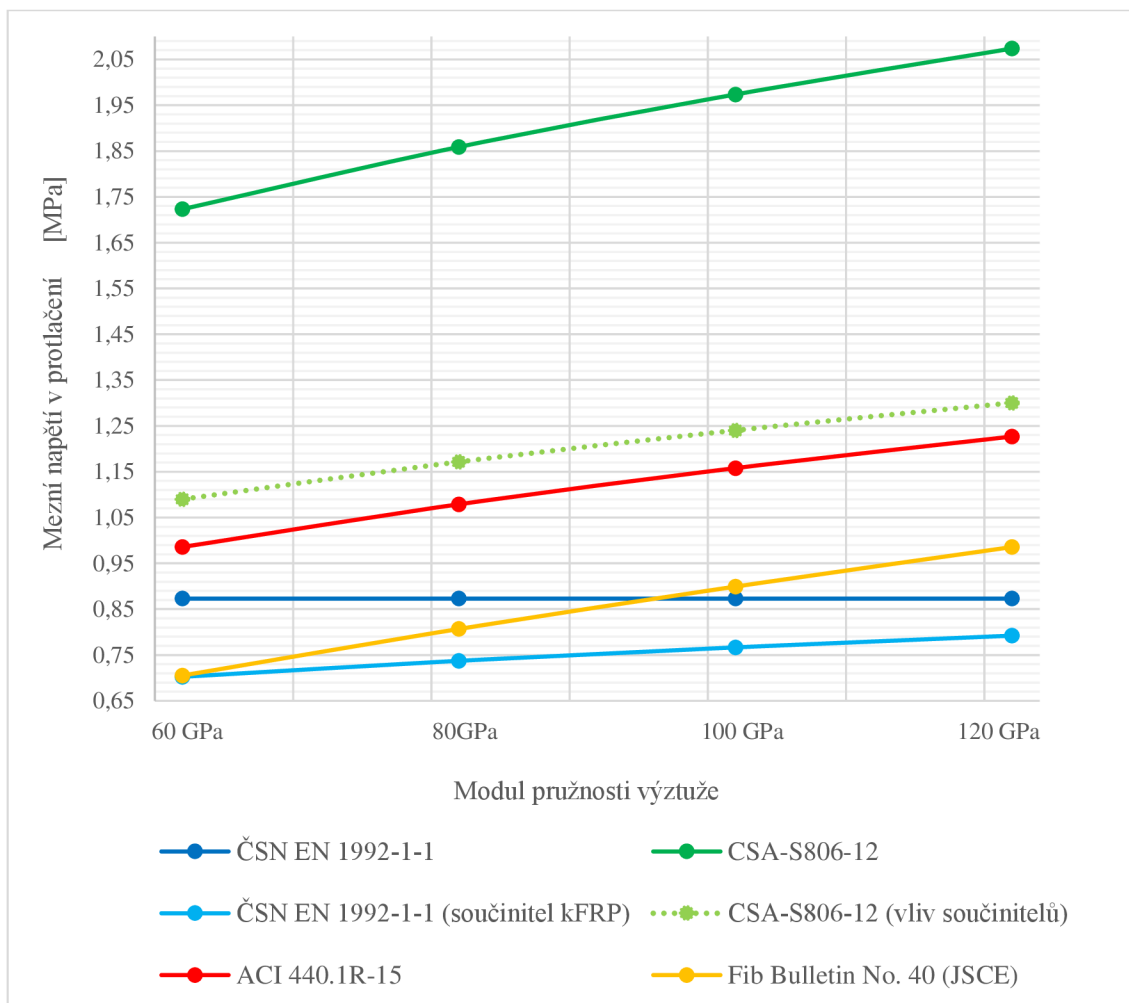


Obrázek 15: Vliv modulu pružnosti na mezní napětí v protlačení – bez smykové výztuže

Z grafu na Obr. 15, je vidět, že křivka dle ČSN EN 1992-1-1 vykazuje lineární konstantní chování, a to z důvodu, že modul pružnosti není zahrnutý do výpočtu dle normy. Ostatní předpisy s tímto parametrem počítají, a tedy jejich chování má stoupavou tendenci, nikoliv však lineární. Nejvyšší hodnoty opětovně dosahuje výpočet dle [10] bez i s vlivem součinitelů.

V případě zavedení součinitele k_{FRP} do výpočtu dle [8] se průběh změní.

Obr. 16 vykresluje výpočet dle normy [8], u které se nepočítá s modulem pružnosti ani při výpočtu mezního napětí se smykovou výztuží, a tedy vykazuje stejný způsob chování jako na předchozím grafu.



Obrázek 16: Vliv modulu pružnosti na mezní napětí v protlačení – se smykovou výztuží

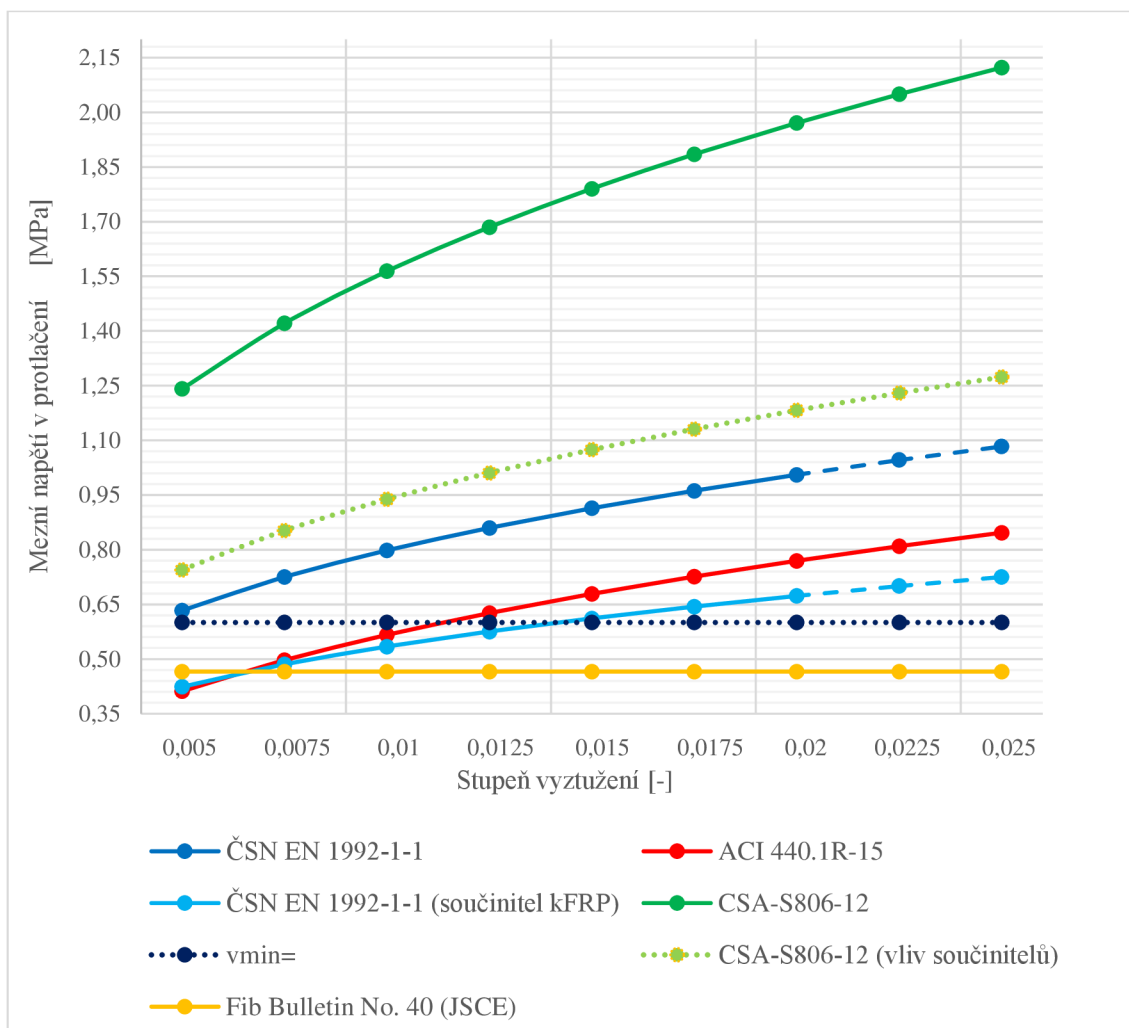
Tabulka 8: Nárůst mezního napětí vlivem změny modulu pružnosti

	ČSN EN 1992-1-1 [8] [MPa]	ACI 440.1R-15 [10] [MPa]	CSA-S806-12 [11] [MPa]	CSA-S806-12 (vliv součinitelů) [MPa]	Fib Bulletin No. 40 (JSCE) [9] [MPa]	ČSN EN 1992-1-1 (součinitel k_{FRP}) [MPa]
$V_c =$	0,00	0,241	0,350	0,211	0,149	0,119
$V_{cs} =$	0,00	0,241	0,350	0,211	0,281	0,090

Z Tab. 8 je zřejmé, že u směrnice [10] a [11] dochází k stejnému nárůstu mezního napětí při výpočtu bez i se smykovou výztuží. U předpisu [9] tomu tak není, z důvodu zahrnutí modulu pružnosti do výpočtu se smykovou výztuží.

4.1.5. Vliv stupně vyztužení

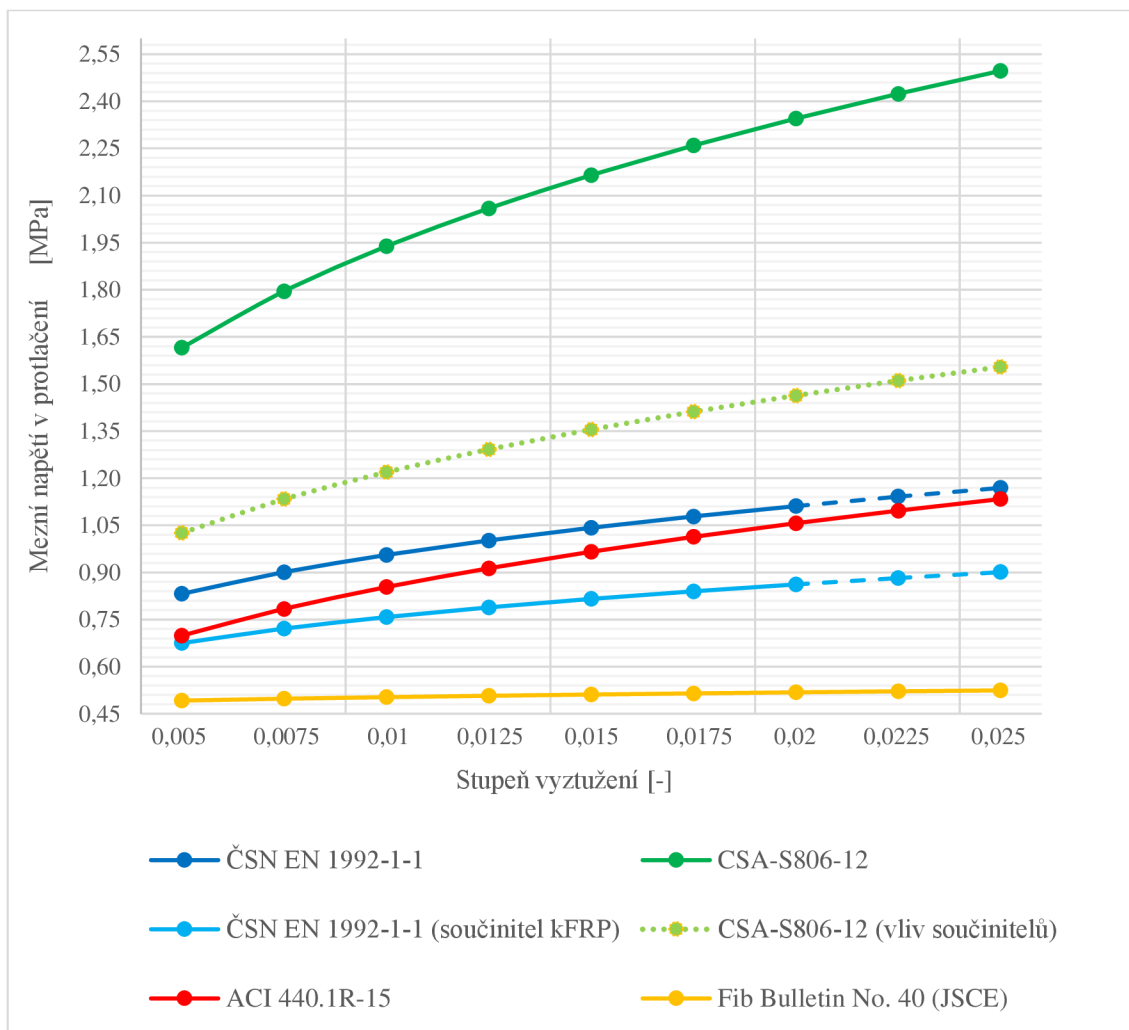
Posledním zkoumaným parametrem je stupeň vyztužení. Z důvodu omezení stupně vyztužení normou ČSN EN 1992-1-1 lze počítat jenom do hodnoty $\rho_s = 0,02$. Další znázornění pro tuto normu je pouze informativní.



Obrázek 17: Vliv stupně vyztužení na mezní napětí v protlačení – bez smykové výztuže

Jak je na grafu z Obr. 17 vidět, stupeň vyztužení má velký vliv na mezní napětí téměř u všech norem. Fib Bulletin No. 40 ve výpočtu nijak nezahrnuje stupeň vyztužení, a tedy je jeho průběh konstantní.

Při výpočtu mezního napětí se smykovou výztuží má stupeň vyztužení velký vliv taktéž u všech norem kromě Fib Bulletin No. 40. Avšak v tomto případě již norma zahrnuje vliv stupně vyztužení, ale navýšení napětí je nepatrné (Tab. 9).



Obrázek 18: Vliv stupně vyztužení na mezní napětí v protlačení – se smykovou výztuží

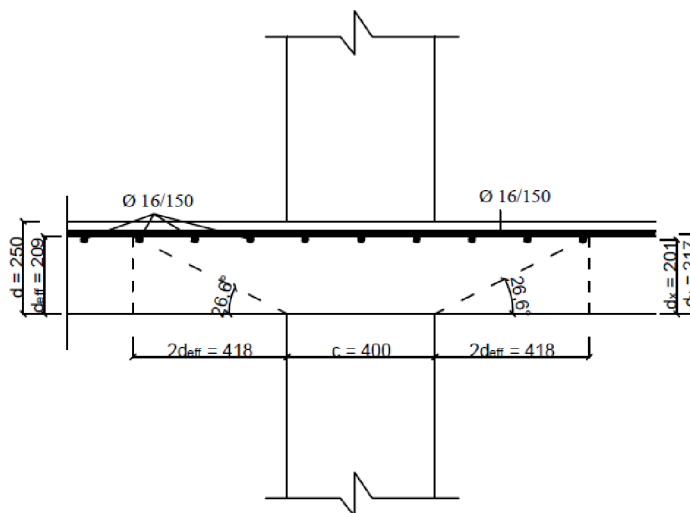
Tabulka 9: Nárůst mezního napětí vlivem změny stupně vyztužení

	ČSN EN 1992-1-1 [8] [MPa]	ACI 440.1R-15 [10] [MPa]	CSA-S806-12 [11] [MPa]	CSA-S806-12 (vliv součinitelů) [MPa]	Fib Bulletin No. 40 (JSCE) [9] [MPa]	ČSN EN 1992-1-1 (součinitel k_{FRP}) [MPa]
$V_c =$	0,450	0,435	0,882	0,529	0	0,301
$V_{cs} =$	0,337	0,435	0,881	0,529	0,033	0,226

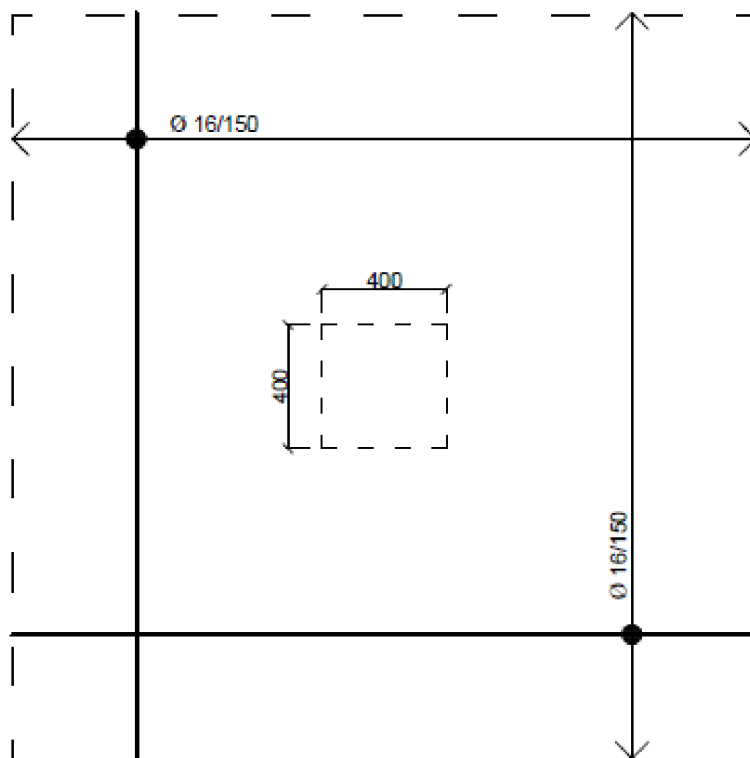
4.2. Studie srovnání předpisů

V druhé části studie bude vypočten konkrétní příklad dle všech předpisů zmíněných v teoretické části práce. Půjde tedy o výpočet mezního napětí v protlačení bez a se smykovou výztuží. Následně se tyto výpočty porovnají s normou ČSN EN 1992-1-1 a vyhodnotí se rozdílnost výsledků vůči této normě.

Všechny použité parametry byly převzaty z podkapitoly 4.1.1. Tedy konstrukci bude tvořit deska o tloušťce 250 mm a čtvercový sloup o rozměrech 400x400mm (Obr. 19 a Obr. 20).



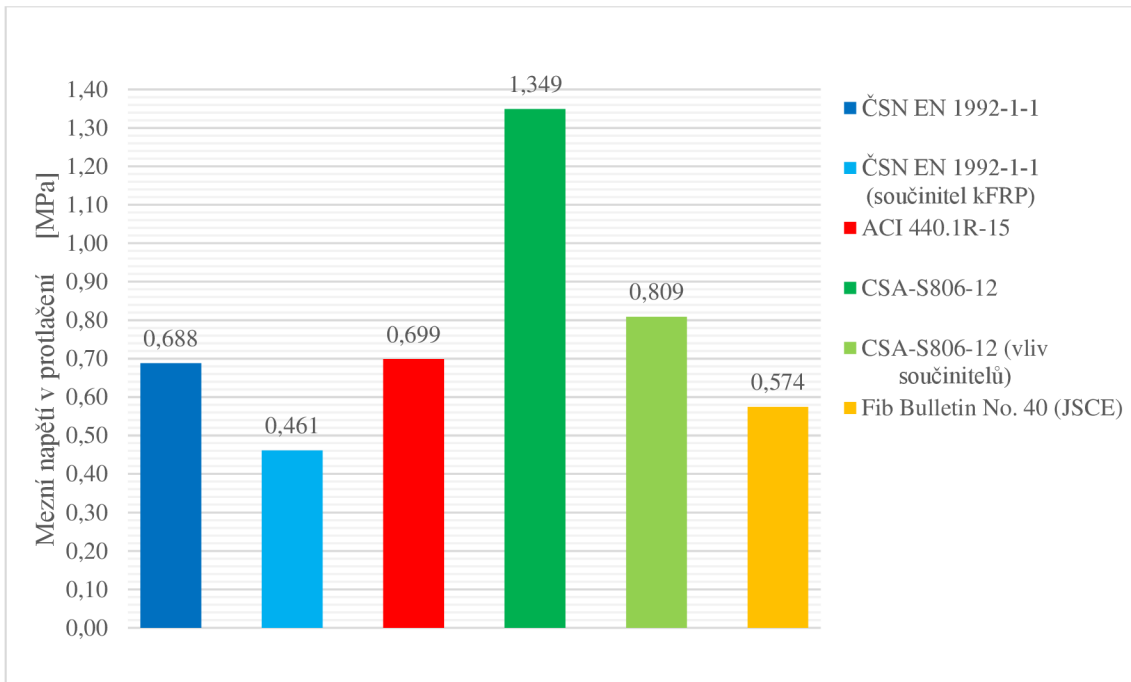
Obrázek 19: Schéma řezu konstrukce



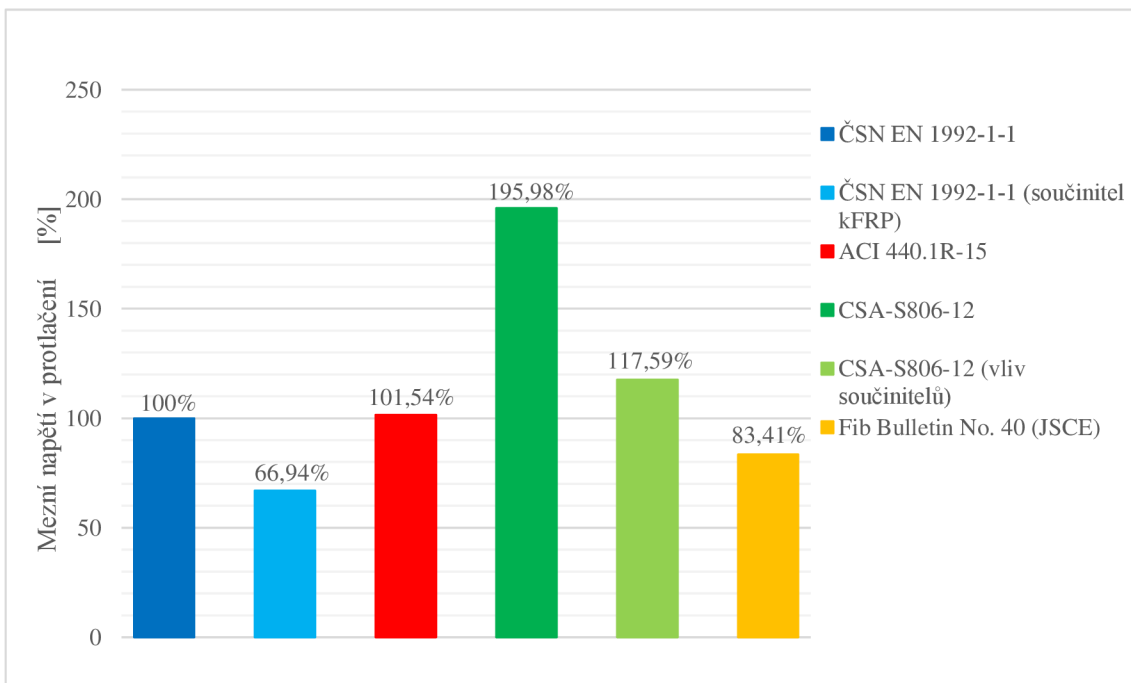
Obrázek 20: Schéma půdorysu konstrukce

4.2.1. Porovnání výsledků mezního napětí v protlačení bez smykové výztuže

Tato podkapitola je věnována porovnání výsledků mezi jednotlivými normami pro výpočet bez smykové výztuže. Z grafu na Obr. 21 lze vyčíst, že i když norma ČSN EN 1992-1-1 jako jediná není uzpůsobená k práci s FRP výztuží, vykazuje srovnatelné výsledky v porovnání s ostatními normami. Zavedením součinitele k_{FRP} do výpočtu se hodnota mezního napětí v protlačení sníží téměř o třetinu původní hodnoty.



Obrázek 21: Mezní napětí v protlačení bez smykové výztuže

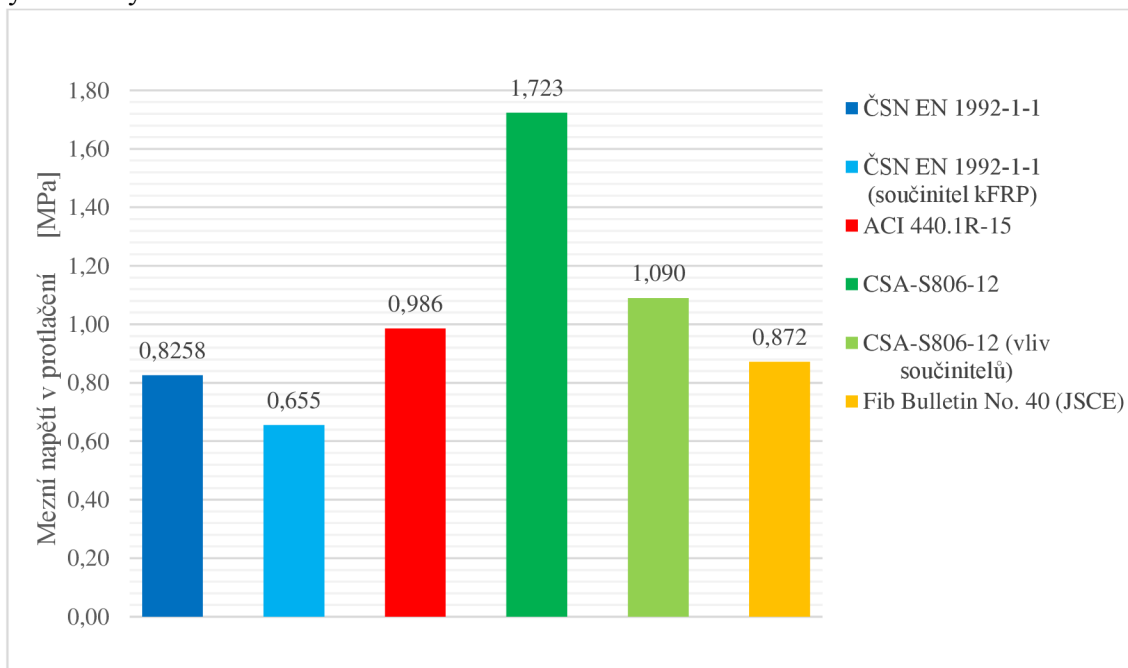


Obrázek 22: Procentuální rozdělení mezního napětí v protlačení bez smykové výztuže

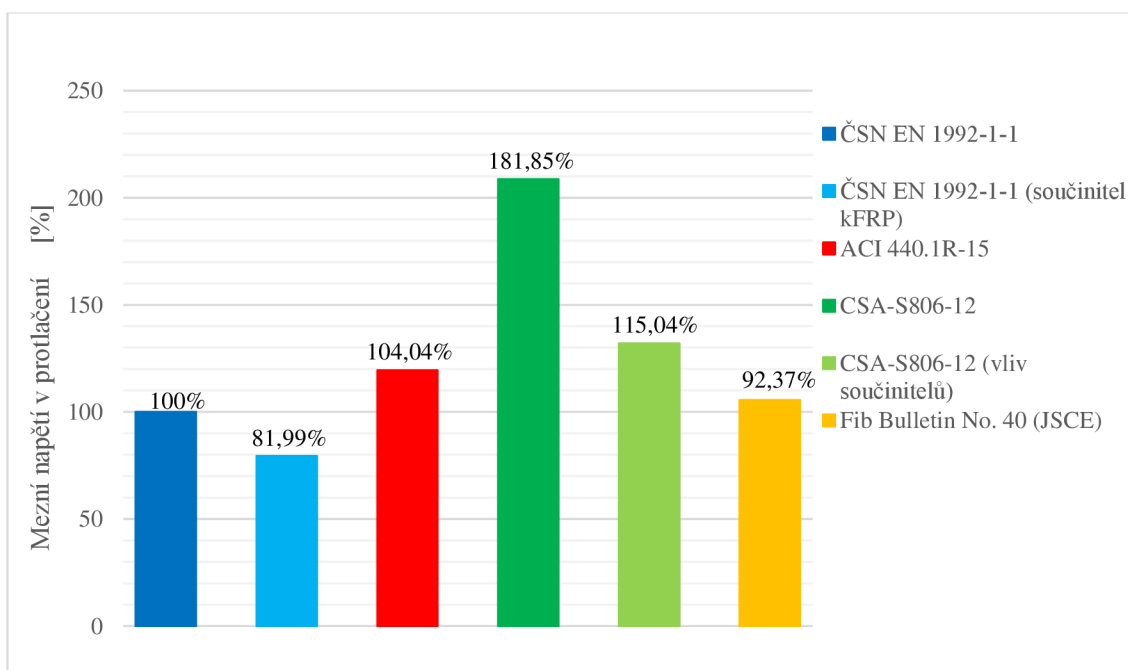
Na dalším grafu na Obr. 22 je vykresleno procentuální porovnání mezního napětí jednotlivých norem. Jako referenční norma byla použita [8]. Dle procentuálního rozdělení je vidět, že předpis [10] má téměř shodné výsledky s referenční hodnotou. Naopak předpis CSA-S806-12 (bez vlivu součinitelů) téměř dvojnásobně převyšuje tuto hodnotu. Lze z toho usoudit, že součinitelé mají důležité postavení ve výpočtech.

4.2.2. Porovnání výsledků mezního napětí v protlačení se smykovou výztuží

Následující grafy na Obr. 23 a Obr. 24 zobrazují mezní napětí v protlačení se smykovou výztuží.



Obrázek 23: Mezní napětí v protlačení se smykovou výztuží



Obrázek 24: Procentuální rozdělení mezního napětí v protlačení se smykovou výztuží

Po započítání napětí, které poskytuje smyková výztuž, se interval rozdílů výsledných mezích napětí vycházející z jednotlivých předpisů zmenšuje. Modifikace ČSN EN 1992-1-1 se součinitelem k FRP se přiblížila k referenční hodnotě o 15 %.

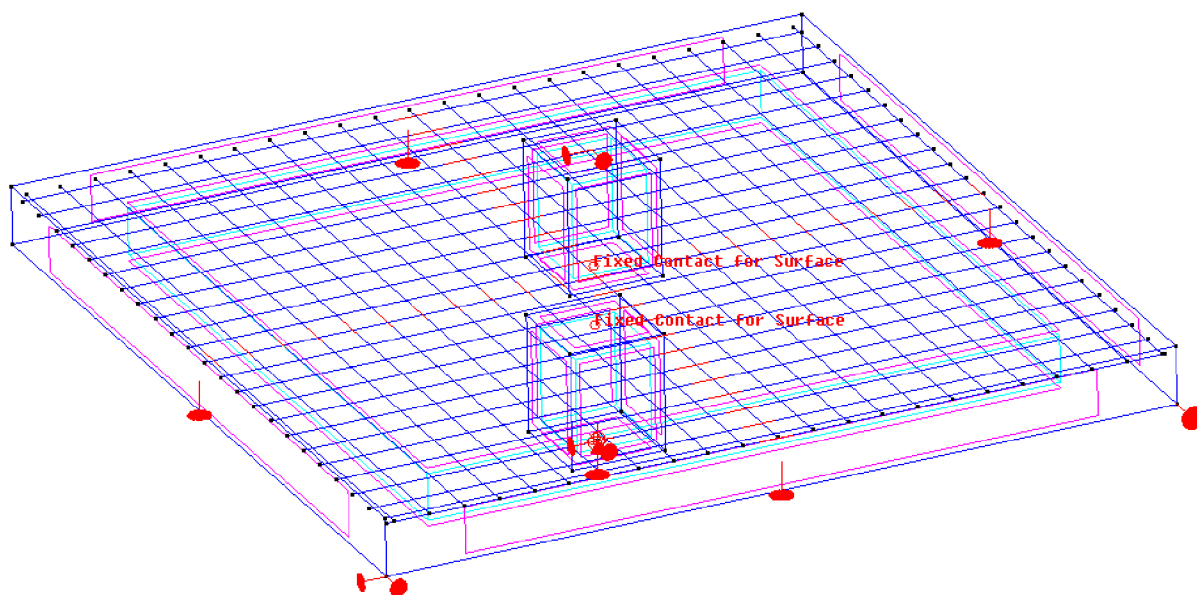
5. Nelineární analýza v programu ATENA

Předmětem této praktické části práce je vytvoření dvou modelů stropní desky bez a se smykovou výztuží. Obě stropní konstrukce budou vyztuženy pouze nekovovou FRP výztuží. Nelineární analýzy obou modelů byly provedeny v systému programů ATENA-GID.

Pro možnost porovnat numerický výpočet s výsledným mezním napětím v protlačení, které byly zjištěny v parametrických studiích, bylo zapotřebí vytvořit dva modely. První model byl vyztužen pouze podélnou FRP výztuží, zatímco ve druhém modelu se uvažovalo i se smykovou FRP výztuží.

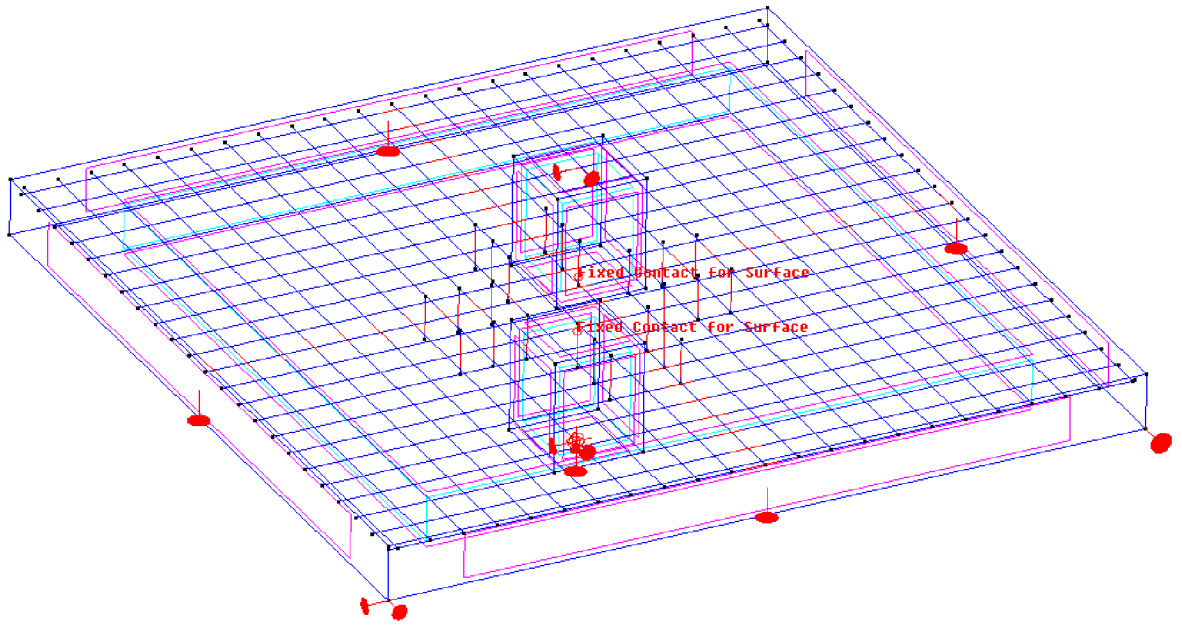
5.1. Konstrukční model

Konstrukční model je složen z části desky vyztužené podélnou FRP výztuží a sloupem. Rozměr sloupu a další parametry jsou shodné s těmi v parametrických studiích. Rozměry desky byly zvoleny s ohledem na zkrácení času a náročnosti výpočtu na 3,3 x 3,3 x 0,25 m (Obr. 19 a Obr. 20). Síť pro MKP byla rozdělena na čtvercové prvky o velikosti 0,05 m. Deska byla deformačně zatěžována zdola, v místě působení sloupu, který na desku působí předem nadefinovaným posunutím ve směru Z. Do prvního modelu byla vymodelována horní tažená FRP výztuž $\text{Ø}16/150$ mm.

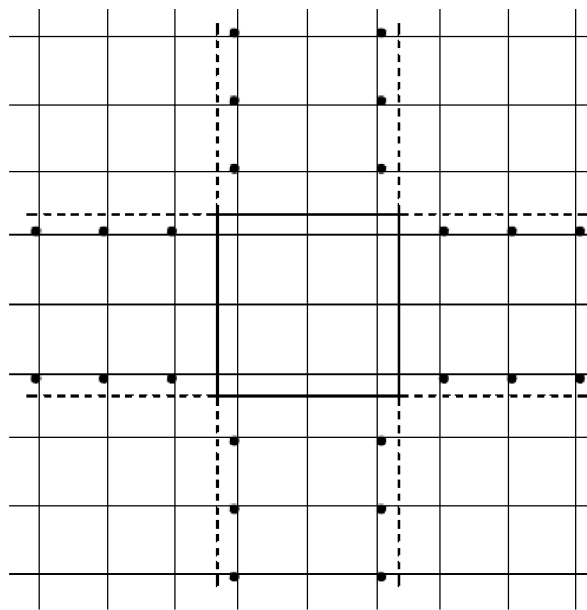


Obrázek 25: Model bez smykové výztuže v programu ATENA

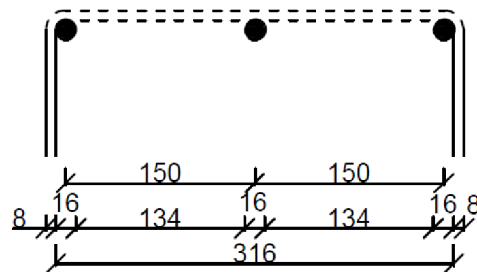
Do druhého modelu byly přidány třmínky z FRP materiálu $\text{Ø}8$ mm. Jak je vidět na Obr. 26, třmínky byly pro zjednodušení výpočtu vymodelovány jako přímé prutové prvky. Ve výpočtech je počítáno s únosností ohýbaného prvku.



Obrázek 26: Model se smykovou výztuží v programu ATENA



Obrázek 27: Schématické zakreslení výztuže – půdorys



Obrázek 28: Schématické zakreslení výztuže – řez

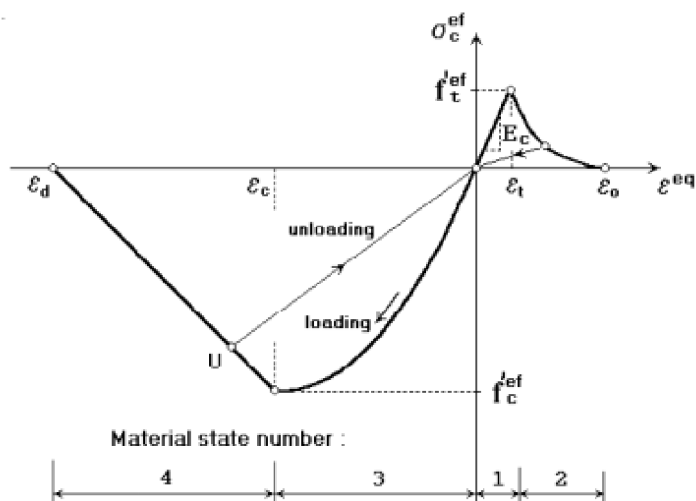
5.2. Okrajové podmínky

Okrajové podmínky byly zadané tak, aby co nejpřesněji simulovaly skutečnost.

Sloupu bylo v spodní části zabráněno posunu ve všech směrech (X, Y a Z) a v horní části vodorovného směru posunu (X a Y). Desce bylo zabráněno posunům a pootočením v příslušných směrech.

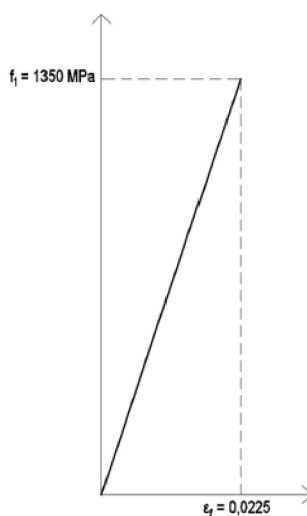
5.3. Materiálové charakteristiky

Pro chování betonových částí konstruovaného modelu byl využitý diagram pro materiálový model CC3DNonLinCementitious2 (Obr. 29). Diagram kombinuje Rankinova kritéria porušení v tahu a Menétrey-Willamové povrchové porušení v tlaku. Pro lepší porovnání s předešlými výpočty byly materiálové charakteristiky betonu zachovány.



Obrázek 29: Pracovní diagram betonu využívaný v programu ATENA [12]

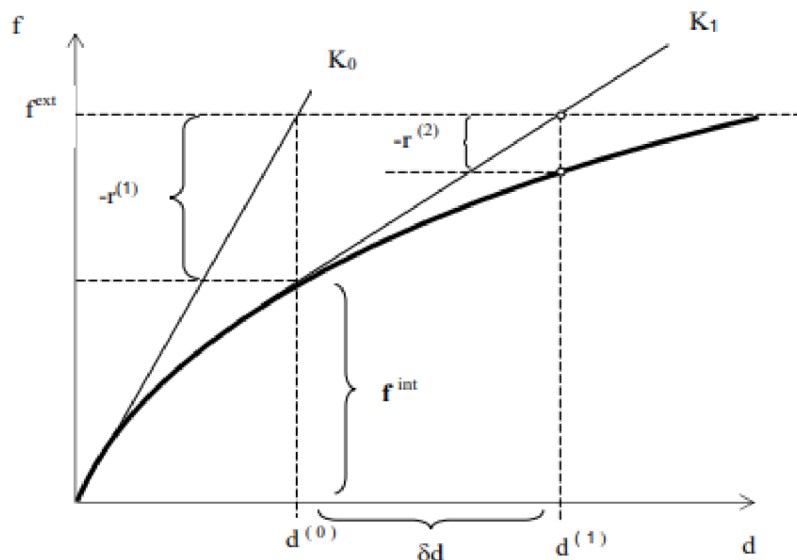
Z důvodu použití pro program neznáme FRP výztuže bylo nutné materiálové charakteristiky a pracovní diagram výztuže (Obr. 30) zadat do programu ručně. Po vymodelování jednotlivých prvků výztuže jim byl přiřazen materiál na základě materiálového modelu 1D Reinforcement.



Obrázek 30: Pracovní diagram FRP výztuže

5.4. Newton-Raphsonova výpočtová metoda

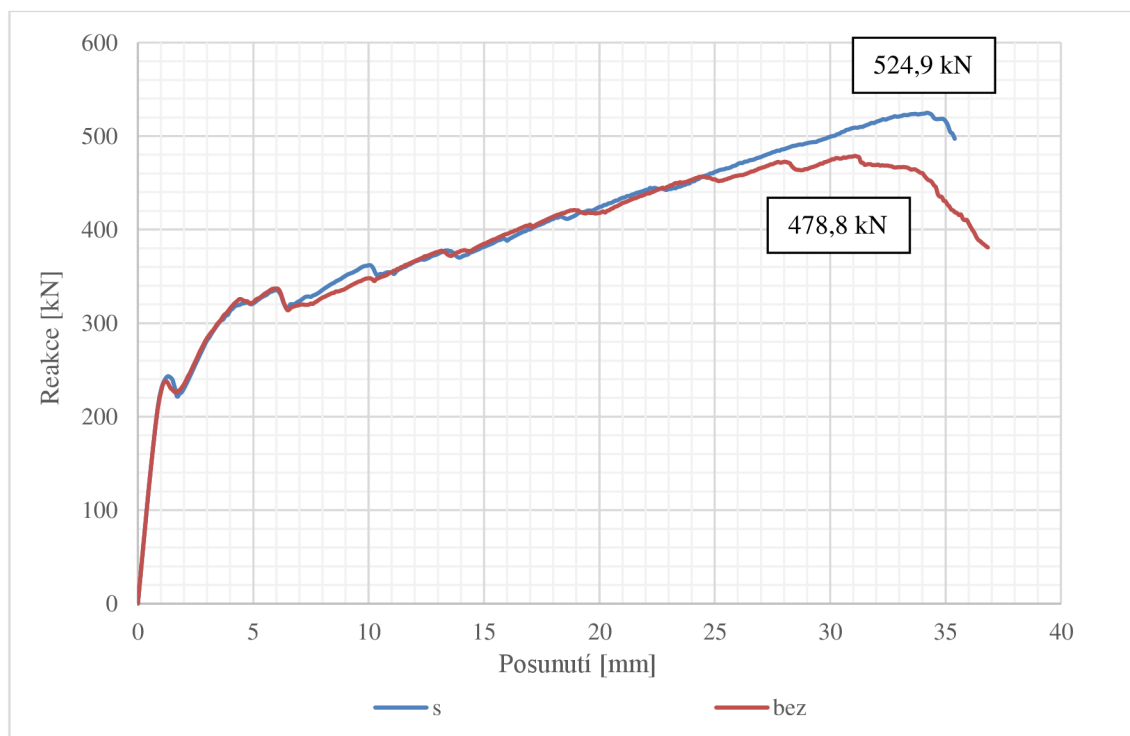
Tato výpočtová metoda patří k iteračním technikám sloužícím k numerickému řešení soustav nelineárních rovnic se stejným počtem neznámých. Newton-Raphsonova metoda neboli metoda tečen byla zvolena jako výpočtová metoda pro analýzu. Princip této metody spočívá v hledání průsečíku funkce ve směru tečny této funkce.



Obrázek 31: Grafické znázornění metody [13]

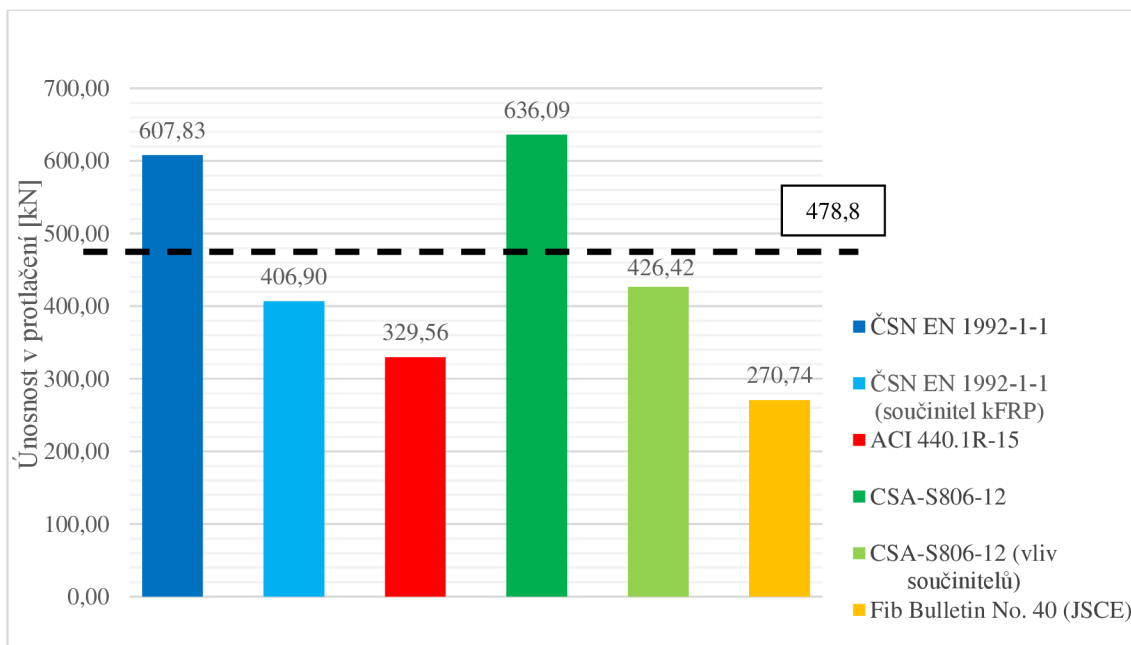
5.5. Výsledky nelineární analýzy

Graf z Obr. 32 zobrazuje únosnost při protlačení v případech bez a s využitím smykové výztuže.

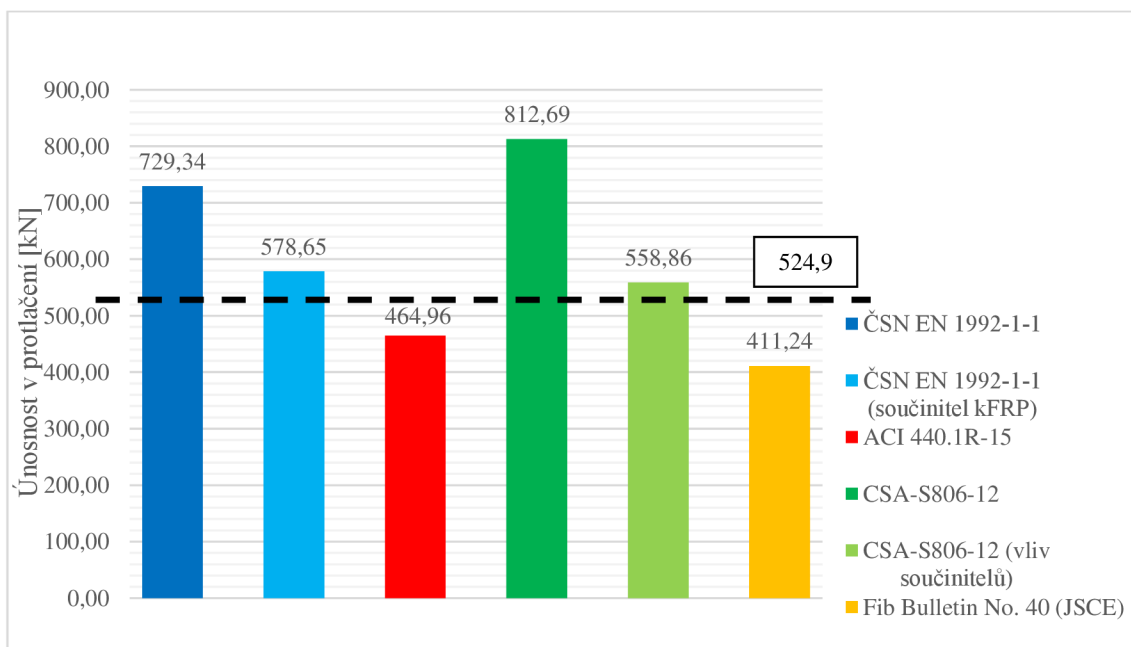


Obrázek 32: Únosnost v protlačení

Na následujících grafech jsou zobrazeny porovnání únosností dle jednotlivých předpisů s výslednou únosností z výpočtových modelů. Nejmenší procentuální odchylku (12,28 %) od únosnosti získané nelineární analýzou dosahuje výpočet dle předpisu CSA-S806-12, pokud se uvažuje s vlivem součinitelů. V opačném případě, kdy se tento vliv zanedbává, výsledná hodnota téhož předpisu dosahuje téměř největší procentuální odchylky.



Obrázek 33: Únosnosti v protlačení bez smykové výztuže



Obrázek 34: Únosnosti v protlačení se smykovou výztuží

Při pohledu na výsledné únosnosti dle ČSN EN 1992-1-1 je vidět, že při modifikaci normy součinitelem k_{FRP} , je dosaženo menšího rozdílu od únosnosti získané z nelineární analýzy. Tento rozdíl je v porovnání s ostatními předpisy srovnatelný.

Vzniklá odchylka může být také způsobena jak nepřesností výsledku samotné nelineární analýzy, protože není možnost porovnání s reálním stavem, tak řadou zjednodušení při samotném modelování konstrukce. Lze ale zhodnotit, že pro teoretické porovnání je výsledný stav modelu dostačující.

5.6. Ruční výpočet

Pro porovnání výsledné únosnosti z nelineární analýzy a výsledných únosností dle ČSN EN 1992-1-1 byly zpracovány dva ruční výpočty. První výpočet je dle klasické formulace uvedené v ČSN EN 1992-1-1 a druhý s použitím součinitele k_{FRP} .

Účinná výška desky

$$d_x = h_s - c - \frac{\phi_x}{2} = 0,250 - 0,025 - \frac{0,016}{2} = 0,217 \text{ m}$$

$$d_y = h_s - c - \phi_x - \frac{\phi_y}{2} = 0,250 - 0,025 - 0,016 - \frac{0,016}{2} = 0,201 \text{ m}$$

$$d_{eff} = \frac{d_x + d_y}{2} = \frac{0,217 + 0,201}{2} = 0,209 \text{ m}$$

Délka kontrolovaného obvodu

$$u_0 = 2(c_1 + c_2) = 2(0,4 + 0,4) = 1,6 \text{ m}$$

$$u_1 = u_0 + 2\pi \times 2d = 1,6 + 2\pi \times 2 \times 0,209 = 4,226 \text{ m}$$

POSOUZENÍ DLE ČSN EN 1992-1-1

Posouzení napětí na 1. kontrolním obvodu

$$C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} = \frac{0,18}{1,5} = 0,12$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d_{eff}}} = 1 + \sqrt{\frac{200}{209}} = 1,978 \leq 2,0 \quad \checkmark$$

$$A_{sx} = A_{sy} = \phi 16/150 \rightarrow 13,4 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\rho_x = \rho_y = \frac{A_{sx}}{b d_{eff}} = \frac{13,4 \times 10^{-4}}{1 \times 0,209} = 6,411 \times 10^{-3}$$

$$\rho_l = \sqrt{6,411 \times 10^{-3} \times 6,411 \times 10^{-3}} = 6,411 \times 10^{-3} \leq 0,02 \quad \checkmark$$

$$V_{Rd,c} = C_{Rd,c} \times k(100 \times \rho_l \times f_{ck})^{\frac{1}{3}}$$

$$V_{Rd,c} = 0,12 \times 1,978(100 \times 6,411 \times 10^{-3} \times 38)^{\frac{1}{3}} = 0,688 \text{ MPa}$$

$$V_{Rd,c} \Rightarrow 688 \times u_1 \times d_{eff} = 688 \times 4,226 \times 0,209 = 607,75 \text{ kN}$$

$$A_{sw} = \phi 8 \rightarrow 50,27 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Posouzení únosnosti desky se smykovou výztuží

$$V_{Rd,cs} = 0,75 \times V_{Rd,c} + 1,5 \times A_{sw} \times n_w \times f_{ydw,eff} \frac{1}{u_1 \times d_{eff}} \sin \alpha$$

$$V_{Rd,cs} = 0,75 \times 688,1 + 1,5 \times 50,27 \times 10^{-6} \times 24 \times 151,125 \times 10^3 \frac{1}{4,226 \times 0,209} \sin 90$$

$$V_{Rd,cs} = \mathbf{825,8 \text{ kPa}}$$

$$V_{Rd,cs} \Rightarrow \mathbf{729,34 \text{ kN}}$$

Procentuální odchylka od výsledku z nelineární analýzy pro únosnost bez smykové výztuže je 21,23 % a se smykovou výztuží je 28,03 %.

POSOUZENÍ DLE ČSN EN 1992-1-1 – součinitel k_{FRP}

Posouzení napětí na 1. kontrolním obvodu

$$C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} = \frac{0,18}{1,5} = 0,12$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d_{eff}}} = 1 + \sqrt{\frac{200}{209}} = 1,978 \leq 2,0 \quad \checkmark$$

$$A_{sx} = A_{sy} = \emptyset 16/150 \rightarrow \mathbf{13,4 \times 10^{-4} \text{ m}^2}$$

$$\rho_x = \rho_y = \frac{A_{sx}}{bd_{eff}} = \frac{13,4 \times 10^{-4}}{1 \times 0,209} = 6,411 \times 10^{-3}$$

$$\rho_l = \sqrt{6,411 \times 10^{-3} \times 6,411 \times 10^{-3}} = 6,411 \times 10^{-3} \leq 0,02 \quad \checkmark$$

$$k_{FRP} = \frac{E_f}{E_s} = \frac{60000}{200000} = 0,3$$

$$\rho_s = k_{FRP} \times \rho_l = 0,3 \times 6,411 \times 10^{-3} = 0,00192 \leq 0,02 \quad \checkmark$$

$$V_{Rd,c} = C_{Rd,c} \times k(100 \times \rho_s \times f_{ck})^{\frac{1}{3}}$$

$$V_{Rd,c} = 0,12 \times 1,978(100 \times 1,923 \times 10^{-3} \times 38)^{\frac{1}{3}} = \mathbf{0,461 \text{ MPa}}$$

$$V_{Rd,c} \Rightarrow 460,6 \times u_1 \times d_{eff} = 460,6 \times 4,226 \times 0,209 = \mathbf{406,9 \text{ kN}}$$

$$A_{sw} = \emptyset 8 \rightarrow \mathbf{50,27 \times 10^{-4} \text{ m}^2}$$

Posouzení únosnosti desky se smykovou výztuží

$$V_{Rd,cs} = 0,75 \times V_{Rd,c} + 1,5 \times A_{sw} \times n_w \times f_{ydw,eff} \frac{1}{u_1 \times d_{eff}} \sin \alpha$$

$$V_{Rd,cs} = 0,75 \times 460,6 + 1,5 \times 50,27 \times 10^{-6} \times 24 \times 151,125 \times 10^3 \frac{1}{4,226 \times 0,209} \sin 90$$

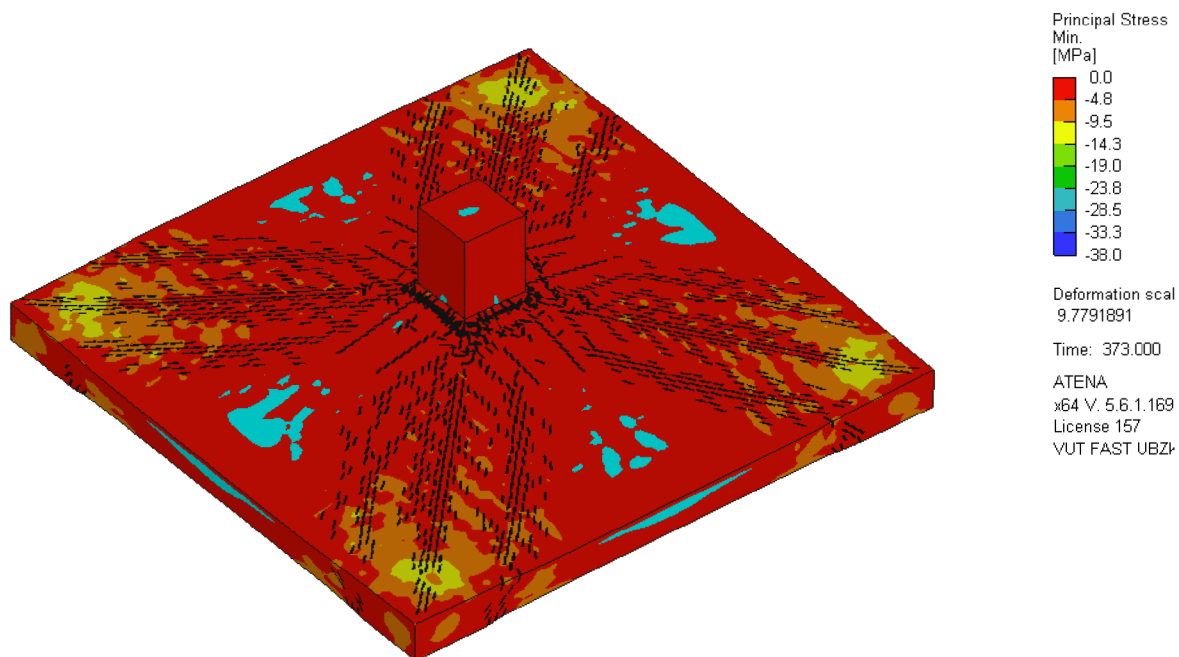
$$V_{Rd,cs} = \mathbf{655,1 \text{ kPa}}$$

$$V_{Rd,cs} \Rightarrow \mathbf{578,6 \text{ kN}}$$

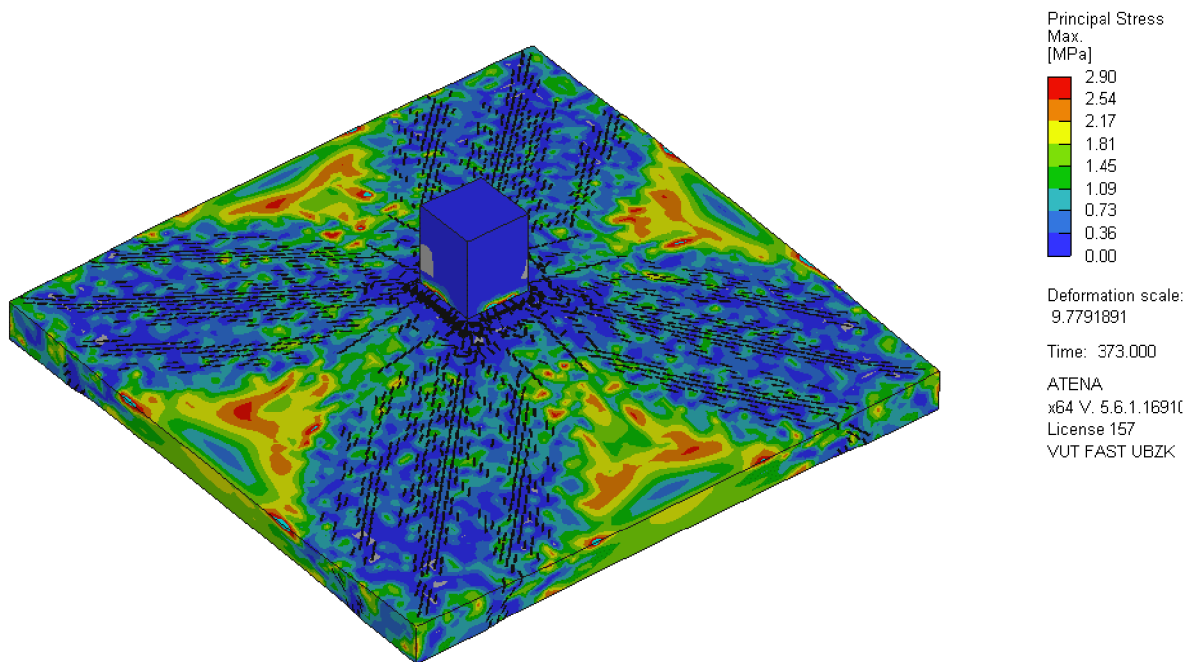
Procentuální odchylka od výsledku z nelineární analýzy pro únosnost bez smykové výztuže je 17,67 % a se smykovou výztuží je 9,28 %.

5.7. Napětí při dosažení mezní únosnosti

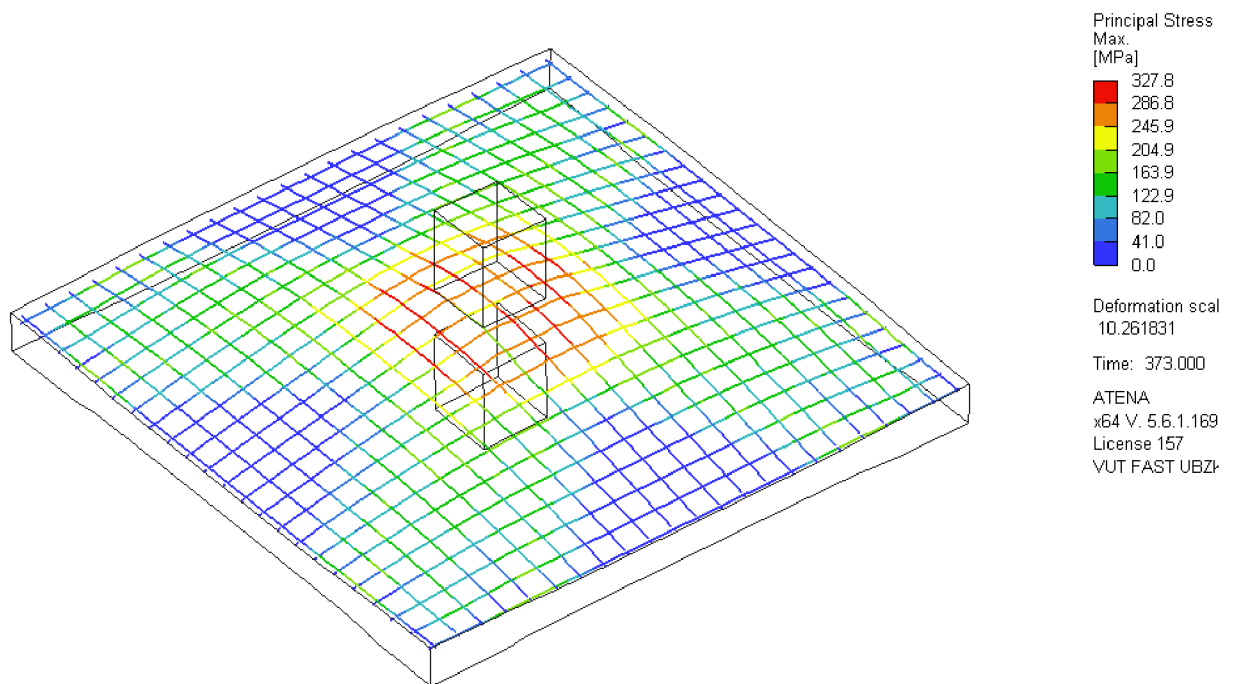
Na Obr. 35 – Obr. 37 jsou zobrazeny průběhy napětí na desce bez smykového vyztužení a na Obr. 39 – Obr. 41 jsou zobrazeny průběhy napětí na desce už se smykovou vyztuží. Obr. 38 a Obr. 42 znázorňují průběh deformací.



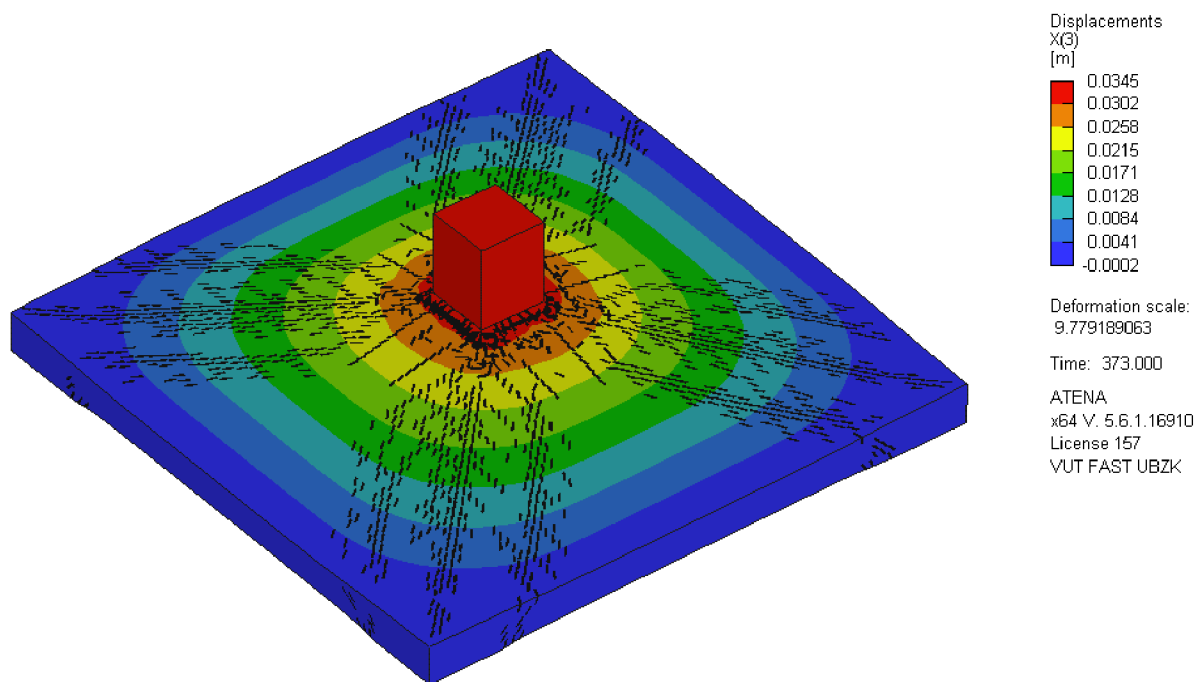
Obrázek 35: Průběh tlakového napětí v betonu bez smykové výztuže



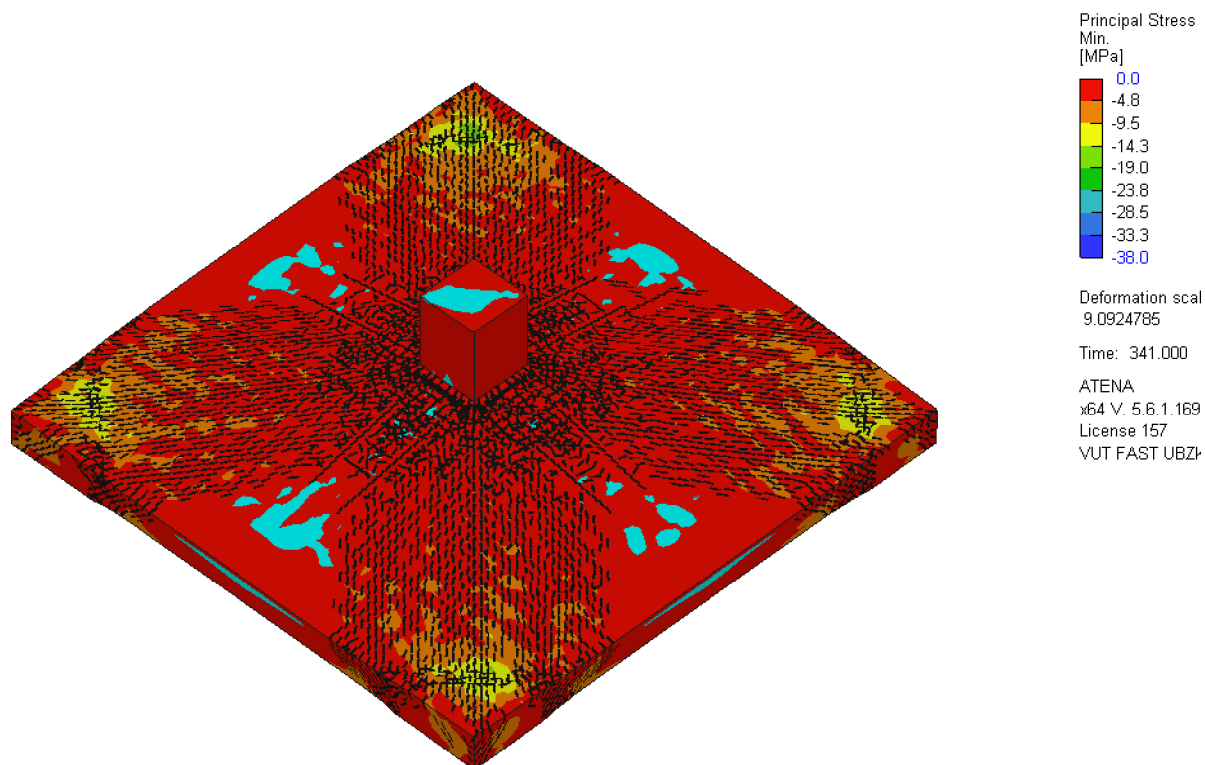
Obrázek 36: Průběh tahového napětí v betonu bez smykové výztuže



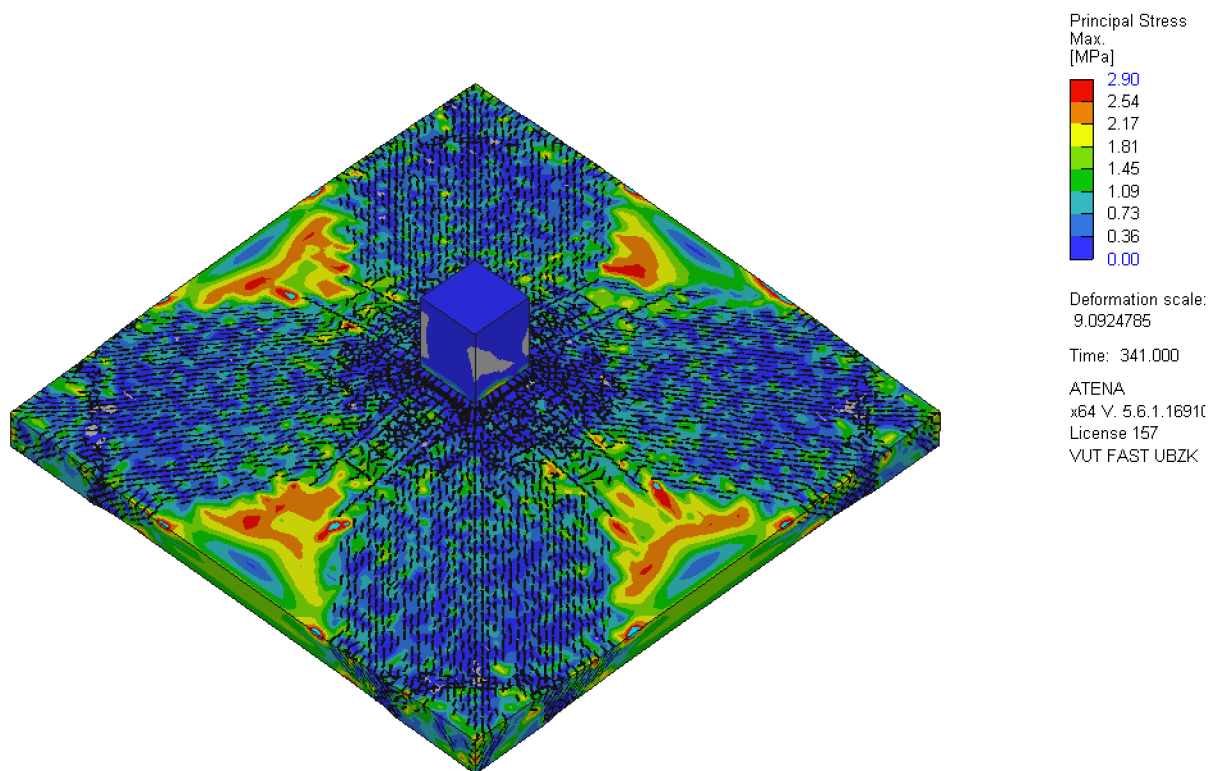
Obrázek 37: Průběh tahového napětí v podélné výztuži



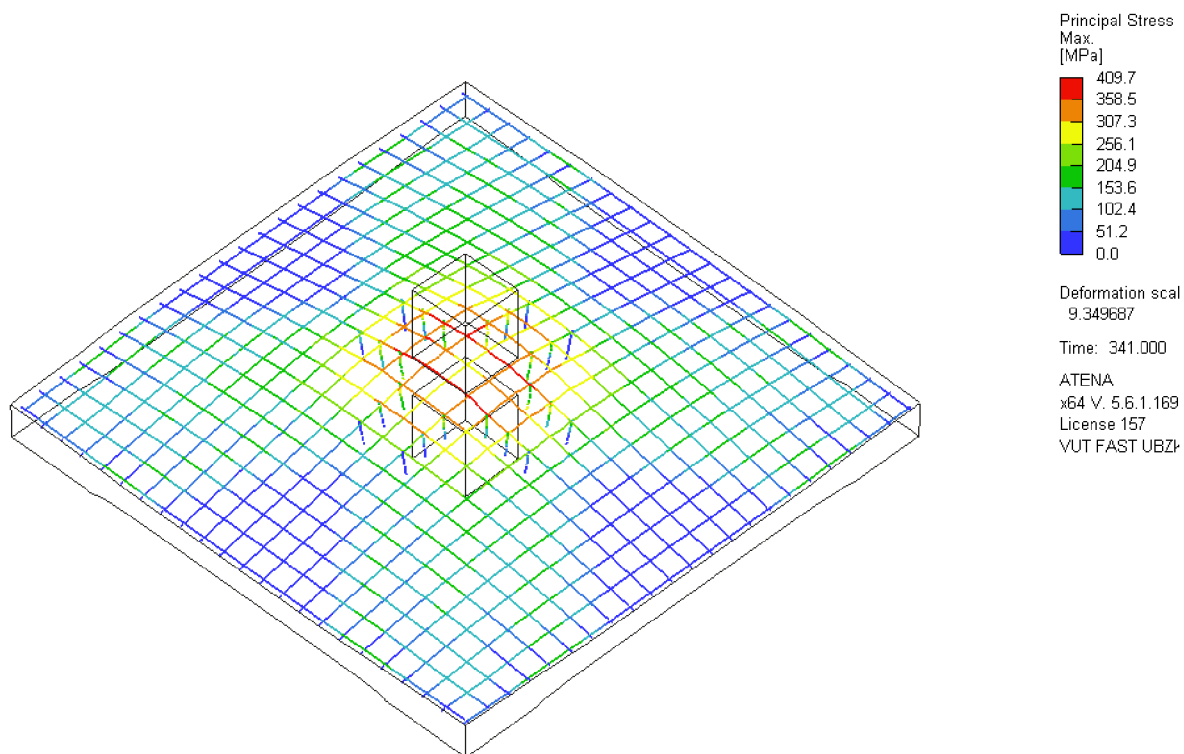
Obrázek 38: Průběh deformací na modelu bez smykové výztuže



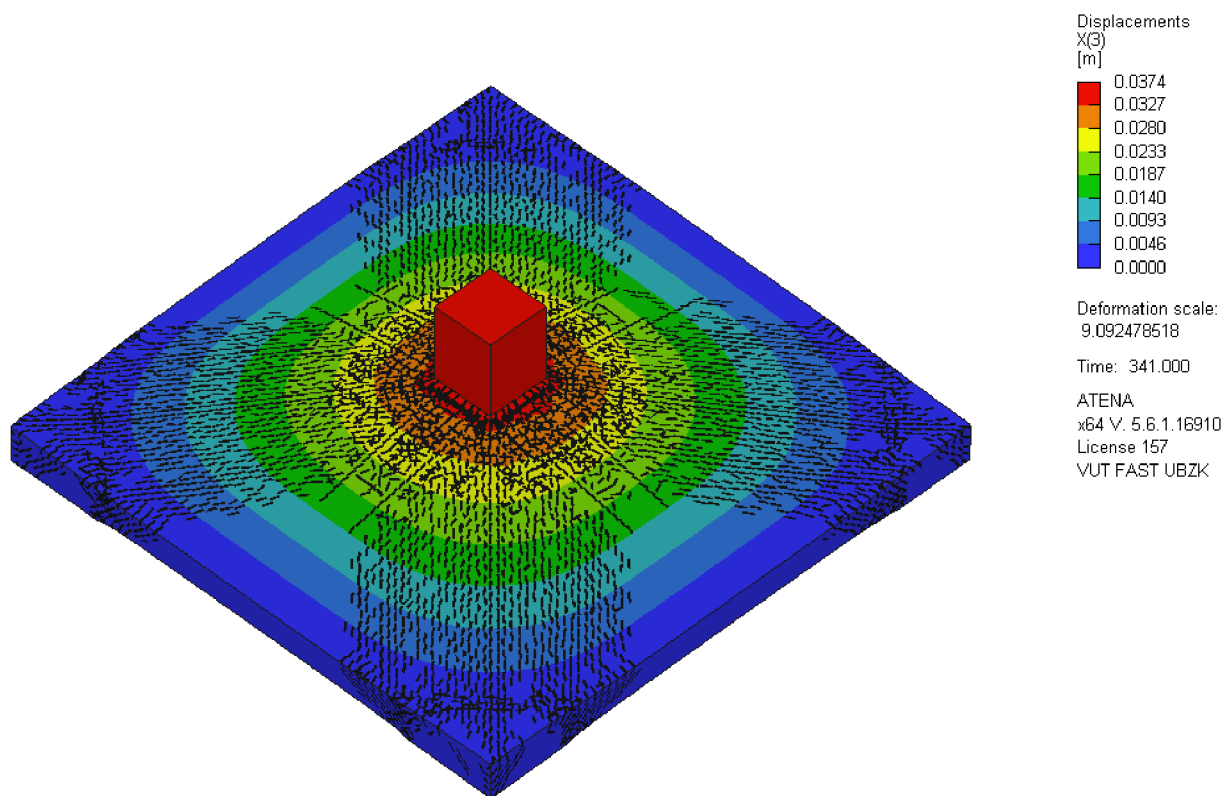
Obrázek 39 Průběh tlakového napětí v betonu se smykovou výztuží



Obrázek 40: Průběh tahového napětí v betonu se smykovou výztuží



Obrázek 41: Průběh tahového napětí ve výztuži



Obrázek 42: Průběh deformací na modelu se smykovou výztuží

Závěr

V úvodu práce byla představena nekovová kompozitní FRP výztuž, včetně jejího složení, mechanických a fyzikálních vlastností, které z ní vyplývají. Následně byly popsány jak výhody, tak i nevýhody při využití této výztuže.

Další kapitola byla věnována vzniku smykovému namáhání v prvku a dále byl popsán přístup normy ČSN EN 1992-1-1 k návrhu únosnosti v protlačení bez a se smykovou výztuží. Jelikož se norma orientuje pouze na využití ocelové výztuže v návrhu, bylo nutné také provést modifikaci normy součinitelem k_{FRP} .

Následně byly představené zahraniční normy, které jsou již přizpůsobeny na práci s FRP výztuží. Jednalo se o předpisy a standardy CSA-S806-12, ACI 440.1R-15 a Fib Bulletin No. 40, z které byl vybrán návrhový přístup modifikace JSCE standardu.

Druhá část práce se věnovala vytvoření parametrických studií. Cílem studií bylo porovnání výsledných mezních napětí v protlačení. Nejdříve se stanovili parametry, u kterých byl předpoklad, že jejich změna bude mít velký vliv na výsledné napětí. Byly vybrány parametry třída betonu, účinná výška desky, modul pružnosti a stupeň vyztužení. Následně byly vytvořeny výpočty a výsledky zpracovány do grafu pro jednodušší porovnání předpisů. Každý graf byl posouzen a vliv zkoumaného parametru byl vyhodnocen.

Další kapitola byla zaměřena na vzájemné porovnání jednotlivých předpisů a standardů. Pro možnost porovnání byl vybrán konkrétní příklad a výsledná mezní únosnost v protlačení byla procentuálně porovnána s vybranou referenční normou. Byla zvolena norma ČSN EN 1992-1-1 z důvodu toho, že jako jediná z norem není uzpůsobena pro návrh s využitím FRP výztuže, a tak bylo umožněno zkoumat chování návrhu této normy v porovnání se zahraničními předpisy.

Poslední část této práce byla věnovaná nelineární analýze v programu ATENA, kde byly vytvořeny dva modely lokálně podepřené desky. První model obsahoval pouze horní taženou FRP výztuž. Do druhého modelu byla již přidána smyková FRP výztuž. Následně proběhla nelineární analýza obou modelů. Z analýzy byly zpracovány výsledky pro mezní únosnost v protlačení a ty byly porovnány s výsledky vycházející z parametrické studie. Následně byl vytvořen ruční výpočet dle ČSN EN 1992-1-1 bez i s vlivem součinitele k_{FRP} a ten byl porovnán s výsledky z analýzy.

Z vyhodnocení vyplývá, že i když norma není pro použití FRP výztuže připravena, zahrnutím součinitele se její výsledky značně přiblížily jak k výsledkům z analýzy, tak k výsledkům jiných předpisů, které s touto výztuží pracují.

Seznam použité literatury

- [1] GIRGLE, F.; HORÁK, D.; KOSTIHA, V.; PROKEŠ, J.; ŠTĚPÁNEK, P. *Moderní kompozitní materiály jako náhrada klasické výztuže do betonu*. *Materiály pro stavbu*, 2015, roč. 20, č. 2, s. 30-33. ISSN: 1213-0311
- [2] GIRGLE, F.; PROKEŠ, J.; JANUŠ, O.; KOSTIHA, V.; ŠTĚPÁNEK, P. *Kompozitní výztuž do betonu – perspektivní materiál pro odolné a trvanlivé betonové konstrukce*. [online]. 2017, [cit. 2020-12-27]. Dostupné z: https://www.betontks.cz/sites/default/files/2017-2-50_0.pdf
- [3] ŠTĚPÁNEK, Petr, František GIRGLE, Mohamad MANSOUR, et al. *Seminář FRP výztuže, Sborník*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2014. ISBN 978-80-214-4925-1.
- [4] Kompozitní výztuže: *PREFA Rebar, PREFA Carb* [online]. Brno: Prefa kompozity, 2015 [cit. 2021-1-1]. Dostupné z: https://www.prefa-kompozity.cz/wp-content/uploads/2015/09/katalog_kompozitni_vyztuze_cze_m.pdf
- [5] PETŘÍČKOVÁ, Monika. *Konstrukce a architektura*. Brno: VUTIUM, 2012, 298 s.: il. (převážně barev.), mapy, 1 portrét, faksim.; 25 cm. ISBN 978-80-214-4422-5
- [6] Novák D., Brdečko L.: *Pružnost a pevnost modul BD02 – MO1 Základní pojmy a předpoklady*. Skripta. VUT BRNO 2004
- [7] PANÁČEK, Josef. *Prvky betonových konstrukcí: Dimenzování betonových prvků část1*. Modul M02. Brno, 2005.
- [8] ČSN EN 1992-1-1 ed. 2. *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. Třídící znak 73 1201.
- [9] Fib Bulletin No. 40: *FRP reinforcement in RC structures: technical report prepared by a working party of Task Group 9.3, FRP (Fibre Reinforced Polymer) reinforcement for concrete structures*. Lausanne: International Federation for Structural Concrete, 2007. Bulletin Fédération internationale du béton. ISBN 978-2-88394-080-2.
- [10] ACI 318-11: *Building Code Requirements for Structural Concrete*, Farmington Hills: American Concrete Institute, 2011. ISBN 978-0-87031-744-6.
- [11] CAN/CSA-S806-12: *Design and construction of building structures with fibrerreinforced polymers*. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2015. ISBN 978-1-55491-931-4.

[12] ČERVENKA, Vladimír, Libor JENDELE a Jan ČERVENKA, *ATENA Program Documentation Part 1: Theory* [online]. 26. 1. 2018 [cit. 2021-1-10]. Dostupné z: https://www.cervenka.cz/assets/files/atena-pdf/ATENA_Theory.pdf

[13] NĚMEC, Ivan, *Nelineární mechanika*, Modul 0D7-M01, *Základy nelineární mechaniky*. Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2006.

Seznam použitých symbolů a veličin

A_c	plocha betonu
A_f	plocha podélné FRP výztuže
A_{fv}	plocha smykové FRP výztuže
A_s	plocha tahové výztuže zakotvena na kotevní délku v daném směru
A_{sw}	plocha smykové výztuže na jednom obvodu kolem sloupu
b	šířka průřezu
b_0	obvod kritického řezu (kontrolní obvod)
b_w	šířka pásu
d	průměr účinných výšek v obou směrech závislých na průměru výztuže
d_x	účinná výška ve směru x
d_y	účinná výška ve směru y
E_c	modul pružnosti betonu
E_f	modul pružnosti FRP výztuže
E_{fv}	modul pružnosti pro smykovou FRP výztuž
E_s	modul pružnosti pro ocel
f_{cd}	návrhová válcová pevnost betonu v tlaku
f_{cm}	střední hodnota pevnosti betonu v tlaku
f_{ck}	charakteristická válcová pevnost betonu v tlaku
f_c'	válcová pevnost betonu v tlaku (ACI 440.1R-15)
f_{fu}	maximální pevnost FRP výztuže
f_{fv}	pevnost v tahu pro návrh ve smyku
f_{ywd}	návrhová mez kluzu smykové výztuže
$f_{ywd,eff}$	účinná návrhová pevnost smykové výztuže v protlačení
h	výška prvku
I	moment setrvačnosti celého průřezu k neutrální ose
k	součinitel výšky
k_{max}	součinitel omezení
M_{Ed}	návrhová hodnota působícího ohybového momentu
M_z	moment kolem osy z

n_f	součinitel daný poměrem modulu pružnosti FRP výztuže k modulu pružnosti betonu
S	statický moment vyňaté části k neutrální ose
s	rozteč smykové výztuže
S_r	radiální vzdálenost obvodů smykové výztuže
u_{out}	poslední kontrolní obvod
u_1	základní kontrolní obvod
u_0	kontrolní obvod kolem sloupu
V	posouvající síla
v	redukční součinitel pevnosti betonu při porušení smykem
V_c	návrhová únosnost betonu s podélnou výztuží
V_{cf}	návrhová únosnost betonu s podélnou FRP výztuží
V_{Ed}	návrhová hodnota působící posouvající síly
$V_{Ed,1}$	smykové napětí v kontrolním obvodu u_1
$V_{Ed,0}$	smykové napětí v kontrolním obvodu u_0
V_f	návrhová smyková únosnost prvku (ACI 440.1R-15)
V_n	celková únosnost prvku se smykovou výztuží (ACI 440.1R-15)
V_r	celková únosnost prvku se smykovou výztuží (CSA-S806-12)
$V_{Rd,c}$	návrhová hodnota odolnosti v protlačení desky bez smykové výztuže
$V_{Rd,cs}$	návrhová hodnota odolnosti v protlačení desky se smykovou výztuží
$V_{Rd,max}$	návrhová smyková únosnost tlakové diagonály
v_{min}	minimální hodnota únosnosti
W_0	modul odpovídající rozdělení smyku
z	rameno vnitřních sil
α	úhel mezi rovinou desky a smykovou výztuží
α_s	součinitel umístění sloupu
β	součinitel zahrnující vliv momentů
β_c	poměr dlouhé strany ke krátké straně sloupu
γ_c	dílčí součinitel spolehlivosti betonu
ε_{fwd}	mezní přetvoření FRP výztuže

ρ_f	poměrné vyztužení pro podélnou FRP výztuž
ρ_{fw}	poměrné vyztužení pro smykovou FRP výztuž
ρ_l	stupeň vyztužení
ρ_{lx}	stupeň vyztužení v směru x
ρ_{ly}	stupeň vyztužení v směru y
ϕ_c	součinitel odporu pro beton
ϕ_F	součinitel odporu pro FRP výztuž
λ	součinitel zohledňující hustotu betonu
τ	smykové napětí
τ_{xy}	smykové napětí v rovině xy
τ_{yz}	smykové napětí v rovině yz
τ_{zx}	smykové napětí v rovině zx

Seznam obrázků a tabulek

<i>Obrázek 1: Řez FRP výztuží s viditelnou strukturou [2]</i>	11
<i>Obrázek 2: Idealizované závislosti napětí na přetvoření GFRP výztuže [2]</i>	13
<i>Obrázek 3: Idealizovaný nárůst deformace v závislosti na čase</i>	14
<i>Obrázek 4: Vyobrazení procesu výroby pomocí pultruze [3]</i>	15
<i>Obrázek 5: Znázornění smykového namáhání</i>	16
<i>Obrázek 6: Vzájemnost smykových napětí [6]</i>	16
<i>Obrázek 7: Napjatost prvku při postupném zatěžování [7]</i>	17
<i>Obrázek 8: Půdorysné zobrazení kontrolních obvodů</i>	18
<i>Obrázek 9: Doporučené hodnoty β</i>	19
<i>Obrázek 10: Řez základním kontrolním obvodem</i>	19
<i>Obrázek 11: Vliv pevnosti betonu na mezní napětí v protlačení – bez smykové výztuže</i>	29
<i>Obrázek 12: Vliv pevnosti betonu na mezní napětí v protlačení – se smykovou výztuží</i>	30
<i>Obrázek 13: Vliv účinné výšky desky na mezní napětí v protlačení – bez smykové výztuže</i>	31
<i>Obrázek 14: Vliv účinné výšky desky na mezní napětí v protlačení – se smykovou výztuží</i>	32
<i>Obrázek 15: Vliv modulu pružnosti na mezní napětí v protlačení – bez smykové výztuže</i>	33
<i>Obrázek 16: Vliv modulu pružnosti na mezní napětí v protlačení – se smykovou výztuží</i>	34
<i>Obrázek 17: Vliv stupně vyztužení na mezní napětí v protlačení – bez smykové výztuže</i>	35
<i>Obrázek 18: Vliv stupně vyztužení na mezní napětí v protlačení – se smykovou výztuží</i>	36
<i>Obrázek 19: Schéma řezu konstrukce</i>	37
<i>Obrázek 20: Schéma půdorysu konstrukce</i>	37
<i>Obrázek 21: Mezní napětí v protlačení bez smykové výztuže</i>	38
<i>Obrázek 22: Procentuální rozdělení mezního napětí v protlačení bez smykové výztuže</i>	38
<i>Obrázek 23: Mezní napětí v protlačení se smykovou výztuží</i>	39
<i>Obrázek 24: Procentuální rozdělení mezního napětí v protlačení se smykovou výztuží</i>	39
<i>Obrázek 25: Model bez smykové výztuže v programu ATENA</i>	41
<i>Obrázek 26: Model se smykovou výztuží v programu ATENA</i>	42
<i>Obrázek 27: Schématické zakreslení výztuže – půdorys</i>	42
<i>Obrázek 28: Schématické zakreslení výztuže – řez</i>	42

<i>Obrázek 29: Pracovní diagram betonu využívaný v programu ATENA [12]</i>	43
<i>Obrázek 30: Pracovní diagram FRP výztuže</i>	43
<i>Obrázek 31: Grafické znázornění metody [13]</i>	44
<i>Obrázek 32: Únosnost v protlačení</i>	44
<i>Obrázek 33: Únosnosti v protlačení bez smykové výztuže</i>	45
<i>Obrázek 34: Únosnosti v protlačení se smykovou výztuží</i>	45
<i>Obrázek 35: Průběh tlakového napětí v betonu bez smykové výztuže</i>	48
<i>Obrázek 36: Průběh tahového napětí v betonu bez smykové výztuže</i>	49
<i>Obrázek 37: Průběh tahového napětí v podélné výztuži</i>	49
<i>Obrázek 38: Průběh deformací na modelu bez smykové výztuže</i>	50
<i>Obrázek 39 Průběh tlakového napětí v betonu se smykovou výztuží</i>	50
<i>Obrázek 40: Průběh tahového napětí v betonu se smykovou výztuží</i>	51
<i>Obrázek 41: Průběh tahového napětí ve výztuži</i>	51
<i>Obrázek 42: Průběh deformací na modelu se smykovou výztuží</i>	52
<i>Tabulka 1: Mechanické vlastnosti jednotlivých vláken [3]</i>	12
<i>Tabulka 2: Mechanické vlastnosti jednotlivých polymerních matric [F]</i>	12
<i>Tabulka 3: Krátkodobé mechanické vlastnosti FRP výztuže v porovnání s ocelí [2]</i>	14
<i>Tabulka 4: Experimentálně získané hodnoty přímé FRP výztuže</i>	27
<i>Tabulka 5: Experimentálně získané hodnoty ohýbané FRP výztuže</i>	27
<i>Tabulka 6: Nárůst mezního napětí vlivem změny pevnosti betonu</i>	30
<i>Tabulka 7: Nárůst mezního napětí vlivem změny účinné výšky desky</i>	32
<i>Tabulka 8: Nárůst mezního napětí vlivem změny modulu pružnosti</i>	34
<i>Tabulka 9: Nárůst mezního napětí vlivem změny stupně vyztužení</i>	36