



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

**ŘEŠENÍ VYBRANÝCH DETAILŮ BETONOVÝCH
KONSTRUKCÍ VYZTUŽENÝCH KOMPOZITNÍ
VÝZTUŽÍ**

DESIGN OF SELECTED DETAILS OF CONCRETE STRUCTURES REINFORCED WITH
COMPOSITE REINFORCEMENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. David Vašátko

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. FRANTIŠEK GIRGLE, Ph.D.

BRNO 2022



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	NPC-SIK Stavební inženýrství – konstrukce a dopravní stavby
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Specializace	bez specializace
Pracoviště	Ústav betonových a zděných konstrukcí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. David Vašátko
Název	Řešení vybraných detailů betonových konstrukcí vyztužených kompozitní výztuží
Vedoucí práce	Ing. František Girgle, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2021
Datum odevzdání	14. 1. 2022

V Brně dne 31. 3. 2021

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

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

PODKLADY A LITERATURA

Při vypracování práce využijte následující 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;

CSA S806-12: Design and Construction of Building Structures with Fibre-reinforced Polymers.

Další literatura dle doporučení vedoucího diplomové práce.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

V rámci diplomové práce zpracujte:

1) přehled teorie a porovnání návrhu vybraného detailu betonové konstrukce vyztužené FRP výztuží (např. dle ACI, fib a CSA) a to v rozsahu dle zadání vedoucího práce;

2) podrobně řešte problematiku návrhu detailu připoje sloup/deska s využitím kompozitní výztuže;

3) pro dílčí část konstrukce (v rozsahu dle zadání vedoucího práce) proveďte návrh vyztužení FRP výztuží, zpracujte statický výpočet a výkresovou dokumentaci.

Požadované výstupy:

Textová část (obsahuje zprávu a ostatní náležitosti dle níže uvedených směrnic)

Přílohy textové části:

P1. Použité podklady

P2. Výkresy tvaru a vyztužení dílčí části řešené konstrukce (v rozsahu určeném vedoucím diplomové práce)

P3. Statický výpočet (v rozsahu určeném vedoucím diplomové práce)

Diplomová práce bude odevzdána pro ÚBZK 1x na CD.

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. František Girgle, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

V této diplomové práci bylo cílem experimentálně zjistit a popsat chování betonových desek při protlačení. Experimentálně byly zkoušeny celkem čtyři betonové desky s různým způsobem vyztužení. Díky reálným zkouškám bylo možné pozorovat rozdílné chování mezi ocelovou a FRP výztuží, případně vliv přidání FRP smykových třmínků na celkovou únosnost.

Pro návrh experimentu byly provedeny úpravy stávajících vztahů pro stanovení únosnosti v protlačení tak, aby mohly být aplikovány pro podélnou a smykovou FRP výztuž. V předběžném návrhu byly také použity stávající návrhové přístupy pro stanovení únosnosti v protlačení s FRP výztuží. Pro odhad chování zkušebních vzorků byla pro jednotlivé vzorky provedena nelineární analýza v softwaru Aténa. Po zatěžovacích zkouškách bylo provedeno srovnání jednotlivých návrhových přístupů a chování nelineárního modelu se skutečným vzorkem.

V praktické části této diplomové práce byl proveden návrh a posouzení lokálně podepřené stropní desky s požadavkem na nemagnetickou výztuž.

KLÍČOVÁ SLOVA

výzkum, experimentální měření, zatěžovací zkouška, lokálně podepřená deska, protlačení, nelineární analýza, FRP (Fiber Reinforced Polymer) výztuž, FRP třmínky

ABSTRACT

The aim of this master thesis is to explore and describe behavior of slab in punching shear. In total four concrete slabs were experimentally tested; each being reinforced differently. Using real experiments, there was a possibility to observe different behavior of steel and FRP reinforcement, eventually even the effect of adding FRP stirrups on load-bearing capacity.

For the purpose of experimental testing design, currently placed formulas used to determine punching shear capacity were adjusted for application on longitudinal and shear FRP reinforcement. Atena software was used to approximate behavior of specimens by performing a nonlinear analysis. After the results of loading tests were obtained, next step was the comparison of design approaches and comparison of behavior of nonlinear model to a real specimen.

In practical part, design of locally supported slab with requirement of non-magnetic reinforcement took place.

KEYWORDS

research, experimental measurements, load test, locally supported slab, punching shear, nonlinear analysis, Fiber Reinforced Polymer reinforcement, FRP stirrups

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. David Vašátko *Řešení vybraných detailů betonových konstrukcí vyztužených kompozitní výztuží*. Brno, 2022. 177 s., 127 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav betonových a zděných konstrukcí. Vedoucí práce Ing. František Girgle, Ph.D.

BIBLIOGRAPHIC CITATION

Bc. David Vašátko *Řešení vybraných detailů betonových konstrukcí vyztužených kompozitní výztuží*. Brno, 2022. 177 pp., 127 pp. of appendices Master's Thesis. Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Institute of Concrete and Masonry Structures. Supervisor Ing. František Girgle, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Řešení vybraných detailů betonových konstrukcí vyztužených kompozitní výztuží* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Já, Bc. David Vašátko prohlašuji, že diplomovou práci s názvem *Řešení vybraných detailů betonových konstrukcí vyztužených kompozitní výztuží* je moje vlastní práce a výsledek mého vlastního zkoumání. Jasně jsem uvedl všechny citované, nebo parafrázované materiály a poskytl reference všech zdrojů.

DECLARATION OF CONFORMITY OF THE PRINTED AND ELECTRONIC FORM OF THE FINAL THESIS

I declare that the electronic form of the submitted master's thesis titled *Řešení vybraných detailů betonových konstrukcí vyztužených kompozitní výztuží* is identical to the submitted printed form.

DECLARATION OF AUTHORSHIP OF THE FINAL THESIS

I, Bc. David Vašátko declare that this master's thesis titled *Řešení vybraných detailů betonových konstrukcí vyztužených kompozitní výztuží* is my own work and the result of my own original research. I have clearly indicated the presence of quoted or paraphrased material and provided references for all sources.

V Brně dne 11. 1. 2022

Bc. David Vašátko
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Zde bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Františku Girglemu, Ph.D. za čas, přátelský přístup a pomoc, kterou mi poskytl během celého studia a při zpracování této diplomové práce.

Zároveň děkuji Ing. Vojtěchu Kostihovi, Ph.D., Ing. Ondřeji Janušovi a Ing. Juraji Lagiňovi za pomoc při výrobě zkušebních vzorků a následném experimentálním zkoušení. V neposlední řadě také děkuji doc. Ing. Petru Daňkovi, Ph.D. a Ing. Ivě Rozsypalové z Ústavu stavebního zkušebnictví za pomoc, poskytnutí prostor a mechanizace při výrobě a zkoušení.

Velmi rád bych také poděkoval celé rodině za možnost studia a neustálou podporu. Závěrem patří poděkování přítelkyni Anetě a blízkým přátelům za oporu a trpělivost během celého studia.

Obsah

1	Úvod.....	11
2	Kompozitní výztuž do betonu	12
2.1	Krátkodobé vlastnosti	12
2.2	Dlouhodobé vlastnosti	13
3	Mezní stav únosnosti pro kompozitní výztuž	14
3.1	Návrh na ohyb	14
3.2	Návrh na smyk.....	14
3.3	Protlačení desek vyztužených FRP výztuží bez smykové výztuže	15
3.3.1	Přístup dle ACI 440.1R-15 [3].....	17
3.3.2	Přístup dle CSA 806-12 [4].....	17
3.3.3	Přístup dle fib Bulletin No. 40 [5]	18
3.4	Protlačení desek vyztužených FRP se smykovou FRP výztuží.....	19
4	Protlačení dle ČSN EN 1992-1-1 [7]	24
4.1	Základní kontrolní obvod u_1	24
4.2	Výpočet smyku při protlačení.....	27
4.3	Návrh úpravy ČSN EN 1992-1-1 [7] pro použití FRP výztuže.....	29
5	Protlačení dle fib Model Code for Concrete Structures 2010 [10].	31
5.1	Základní kontrolovaný obvod b_1	31
5.2	Smyková síla při protlačení	31
5.3	Stanovení pootočení desky v oblasti podpory	33
5.3.1	Úroveň I	33
5.3.2	Úroveň II.....	34
5.3.3	Úroveň III.....	34
5.3.4	Úroveň IV	35

5.4	Návrh úpravy fib Model Code for Concrete Structures 2010 [10] pro použití FRP výztuže	35
6	Experimentální ověření únosnosti desek v protlačení	37
6.1	Vstupní předpoklady	37
6.2	Teoretický návrh zkušebních vzorků dle dostupných návrhových podkladů/norem	37
6.2.1	Vzorek č. 1. OCEL	40
6.2.2	Vzorek č. 2. FRP	45
6.2.3	Vzorek č. 3. FRP-UTŘ	52
6.2.4	Vzorek č. 4. FRP-45TŘ	63
6.2.5	Srovnání předběžného návrhu	73
6.2.6	Návrh manipulačních úchytů	78
6.3	Nelineární analýza	80
6.3.1	Modelování vzorků	82
6.3.2	Model č. 1. OCEL	86
6.3.3	Model č. 2. FRP	92
6.3.4	Model č. 3. FRP-UTŘ	97
6.3.5	Model č. 4. FRP-45TŘ	103
6.3.6	Srovnání výsledků modelů	108
6.4	Výroba zkušebních vzorků	109
6.5	Provádění experimentu	115
6.5.1	Měřicí zařízení pro vyhodnocení vzorků	116
6.5.2	Vzorek č. 1. OCEL	119
6.5.3	Vzorek č. 2. FRP	129
6.5.4	Vzorek č. 3. FRP-UTŘ	136
6.5.5	Vzorek č. 4. FRP-45TŘ	144

6.5.6	Srovnání výsledků experimentu.....	151
6.5.7	Materiálové charakteristiky betonu a FRP výztuže	154
6.6	Vyhodnocení výsledků	155
6.6.1	Vzorek č. 1. OCEL.....	155
6.6.2	Vzorek č. 2. FRP	159
6.6.3	Vzorek č. 3. FRP-UTŘ.....	162
6.6.4	Vzorek č. 4. FRP-45TŘ	166
7	Závěr.....	171
8	Seznam použitých zdrojů	175
9	Seznam příloh	177

1 Úvod

V této diplomové práci je zkoumán detail bodově podepřených betonových desek, které se s výhodou využívají pro uvolnění dispozice v objektu. Největším problémem je křehké porušení protlačením, kdy dojde bez varování vlivem posouvající síly k selhání desky v oblasti bodového podepření. Na horním taženém povrchu se vytvoří porušený obvod, který je závislý na sklonu smykové trhliny uvnitř průřezu. Trhliny se tedy objevují na taženém horním povrchu desky, většinou pod skladbou podlahy a nejsou tak vidět. Je snaha, aby před porušením vznikaly trhliny na tlačené straně (v blízkosti bodového podepření) a byly viditelné deformace. Po porušení je možné vidět „protlačený kužel“. Pro zvýšení únosnosti v protlačení a odsunutí kontrolovaného obvodu se navrhuje smyková výztuž v podobě trnu, žebříků případně třmínků. Tato problematika je řešena pro tradiční betonářskou výztuž, existují tak vztahy pro stanovení únosnosti v protlačení bez, ale i se smykovou výztuží.

Kompozitní výztuž do betonu (angl. Fibre reinforced polymers = FRP) je nekovová výztuž, která je oproti klasické betonářské výztuži odolná vůči enviromentálnímu namáhání nebo namáhání fyzikálními jevy. FRP výztuž lze tedy bez dalších korozních opatření umístit do konstrukcí s vysokým stupněm vlivu prostředí, jako jsou například konstrukce v blízkosti silnic, patrové garáže. Tuto výztuž je vhodné navrhovat do konstrukcí, kde je potřeba zabezpečit průchod elektromagnetických vln, nebo minimalizovat elektrickou vodivost.

Chování desek při protlačení s kompozitní výztuží je stále předmětem výzkumu. Především využití FRP třmínků nebylo příliš prozkoumáno. Je tedy snaha upravit stávající vztahy pro ocelovou výztuž tak, aby bylo možné stanovovat únosnost desek při protlačení s podélnou i smykovou FRP výztuží. Přesnost upravených a existujících bude porovnána s reálným experimentem na protlačení. Pomocí reálného experimentu bude možné sledovat rozdílné chování desek vyztužených ocelovou a FRP výztuží, vliv vložení FRP třmínků.

2 Kompozitní výztuž do betonu

Vnitřní kompozitní výztuží jsem se zabýval v bakalářské práci [1] a zde jsou proto základní témata pouze stručně shrnuta. Tato diplomová práce je zaměřena na problematiku návrhu detailu bodově podepřené betonové desky vyztužené kompozitní výztuží a bude rozšiřovat znalosti z bakalářské práce [1].

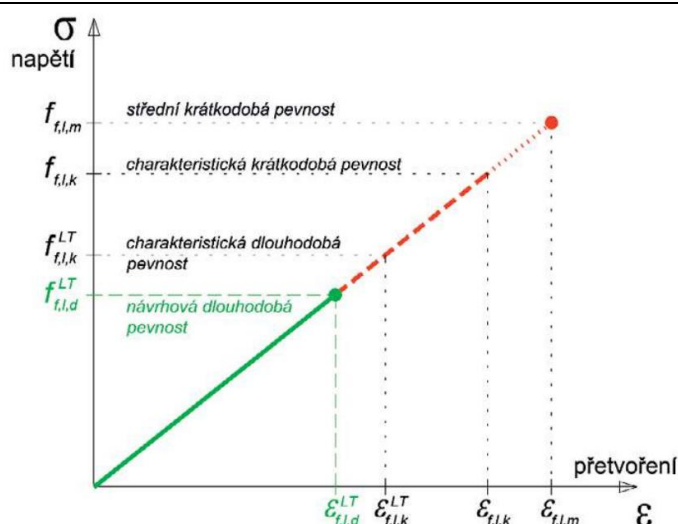
Nekovová výztuž se skládá z nosných vláken (čedičová, skleněná, uhlíková apod.) a polymerní matrice (polyesterové, epoxidové, vinylesterové pryskyřice apod.). Spolupůsobením těchto složek získáme materiálové a mechanické vlastnosti výsledné kompozitní výztuže. Vláknům mají nosnou funkci, určují vlastnosti v podélném směru. Ve směru kolmém na podélnou osu určuje vlastnosti polymerní matrice. Hlavní funkcí matrice je přenos napětí z betonu na vlákna a jejich ochrana před nepříznivými vlivy.

Z důvodů různého způsobu a přesnosti výroby, možností kombinace vláken s matricí, je na trhu široké množství FRP výztuží. U výsledného produktu je výrobce povinen specifikovat vlastnosti v technickém listu. Nejběžnější výrobní postup pro výrobu vnitřní kompozitní výztuže je pultruze. Schéma pultruzní linky a proces výroby je popsán v bakalářské práci [1].

Vnitřní kompozitní výztuž ve stavebnictví není zcela prozkoumaný materiál. Přístupy v normách a předpisech jsou většinou konzervativní a pro některá namáhání s FRP výztuží ani neuvažují. Je nutné rozlišovat krátkodobé a dlouhodobé mechanické vlastnosti.

2.1 Krátkodobé vlastnosti

FRP výztuž má anizotropní chování v důsledku rozdílných vlastností ve směru podélné a příčné osy. Vnitřní kompozitní výztuže mají lineární pracovní diagram až do porušení, po celou dobu platí Hookův zákon Obrázek 1. Výsledné tahové vlastnosti ovlivňuje způsob výroby, typ vláken a matrice. Tahovou pevnost ovlivňují především vlákna, jejich typ, orientace, kombinace typu vláken. S tlakovou pevností FRP výztuže se nedoporučuje uvažovat. Smykové namáhání ovlivňují především vlastnosti matrice. V případě čistého stříhu určují vlastnosti vlákna a jejich orientace. Soudržnost mezi betonem a kompozitní výztuží je ovlivněna okolními podmínkami, typem a tvarem výztuže. Matrice přenáší napětí z betonu do vláken [1].



Obrázek 1: idealizovaný pracovní diagram kompozitní výztuže [2]

2.2 Dlouhodobé vlastnosti

Kompozitní výztuž má v čase proměnné vlastnosti, které se musí zohlednit při návrhu. Dlouhodobé konstantní zatížení způsobuje postupný nárůst deformací. Při působení tohoto zatížení může konstrukce náhle selhat i přesto, že hodnota zatížení je nižší než krátkodobá pevnost výztuže. Při návrhu je nutné zajistit, aby nedošlo k selhání výztuže dříve, než je dosaženo konce životnosti. Prostředí působící na výztuž a vliv zatížení ovlivňuje dlouhodobou únosnost. Návrhové přístupy ACI 440.1R-15 [3], CSA 806-12 [4] obdobně přistupují k návrhu dlouhodobé únosnosti FRP výztuže. Krátkodobou únosnost zredukovat pomocí součinitelů zohledňujících vliv prostředí, typ použité kompozitní výztuže. Publikace fib. Bulletin No. 40 [5] zohledňuje všechny vlivy, které mohou ovlivňovat dlouhodobou únosnost. Stanovení dlouhodobé únosnosti je tedy komplexnější a přesnější na rozdíl od předchozích dvou případů. [1].

3 Mezní stav únosnosti pro kompozitní výztuž

3.1 Návrh na ohyb

Kompozitní výztuž má odlišné vlastnosti oproti tradiční betonářské výztuži. Rozdíl je nutno zohlednit při návrhu prvků vyztužených FRP výztuží. Kompozitní výztuž má lineární pracovní diagram a je potřeba rozlišovat krátkodobé a dlouhodobé vlastnosti.

Mezní stav nastává, když v jednom z materiálů je dosaženo mezního poměrného přetvoření (mezní přetvoření v tlačeném betonu $\varepsilon_{c,u}$ nebo mezní tahové přetvoření ve výztuži $\varepsilon_{fu,d}$). Teoreticky je možné balanční porušení, kdy se současně poruší výztuž i beton. Z důvodů křehkého porušení FRP výztuže je doporučeno, aby došlo k porušení drcením betonu. Navrhování na ohyb, stanovení dlouhodobých a krátkodobých pevností dle návrhových přístupů (ACI 440.1R-15 [3], CSA 806-12 [4], fib Bulletin No. 40 [5]) je podrobněji rozebráno v mé bakalářské práci [1].

3.2 Návrh na smyk

Chování vyztužených prvků při působení smykové síly je závislé na tlačené výšce betonu, hmoždinkovém účinku kameniva, hmoždinkovém účinku výztuže, smykové výztuži. Výška tlačené části betonu je závislá na vlastnostech podélné výztuže. Lze tedy konstatovat, že bude rozdílné smykové chování prvků s ocelovou podélnou výztuží oproti prvkům s FRP výztuží při stejné ploše vyztužení. Kompozitní výztuž má poměrně nízký modul pružnosti, nízkou smykovou odolnost v příčném směru, lineární chování vedoucí na křehké selhání. Tento typ selhání vylučuje přerozdělení napětí v průřezu. Z důvodu větších přetvoření v kompozitní výztuži lze očekávat větších průhybů a trhlin.

V případě překročení smykové pevnosti betonu je nutné navrhnout přídatnou smykovou výztuž. Tato výztuž umožní přenos tahových sil přes smykové trhliny. Únosnost smykové výztuže je závislá na maximálním napětí. Pro třmínky z betonářské oceli se toto napětí rovná mezi kluzu. U kompozitní výztuže závisí únosnost na maximálním dovoleném přetvoření ve výztuži. U tohoto typu výztuže se předpokládá že dojde k porušení v místě ohybů, kde jsou nerovnoměrně natažená vlákna. Redukce pevnosti závisí na poměru průměru výztuže ku poloměru ohybu, soudržností mezi

výztuží a betonem, typu smykové FRP výztuže, způsobu kotvení. Fib Bulletin No. 40 [5] uvádí, že pevnost třmínků by měla být 40 – 50 % pevnosti přímých prutů.

Předpis ACI 440.1R-15 [3] stanovuje únosnost průřezu s kompozitní smykovou výztuží v prutových dílcích

$$v_f = \frac{\phi A_{fv} f_{fv} d}{s}, \quad (1)$$

kde A_{fv} je plocha smykové výztuže, d je účinná výška, s je vzdálenost mezi třmínky, ϕ je redukční součinitel, f_{fv} je napětí v třmíncích. Toto napětí je omezeno dovoleným přetvořením ve smykové výztuži

$$f_{fv} = 0,004 E_f \leq f_{fb}, \quad (2)$$

kde E_f je modul pružnosti FRP výztuže, f_{fb} je pevnost ohybů smykové výztuže. Kanadská norma CSA 806-12 [4] uvádí stejný vztah jako [3], ale dovolené přetvoření je rovno 0,005.

3.3 Protlačení desek vyztužených FRP výztuží bez smykové výztuže

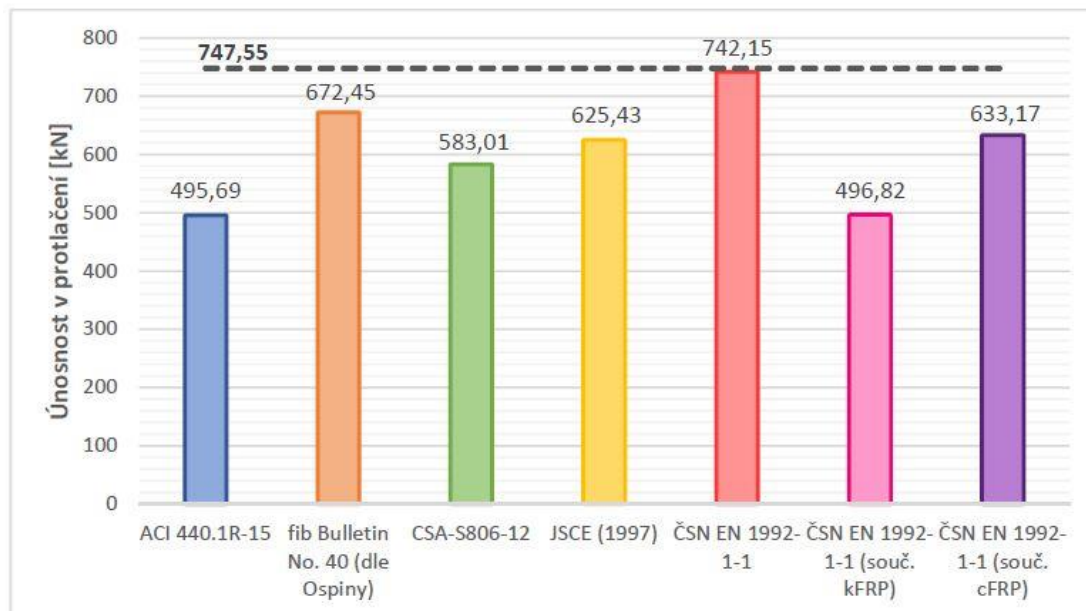
Protlačení je křehké smykové porušení betonových desek. K takovému porušení dochází v místě lokálních podpor, případně lokálních zatížení. Vlivem koncentrace smykového napětí na malé ploše se začnou tvořit smykové trhliny. V případě malé smykové únosnosti betonového průřezu a případné absence smykové výztuže dochází k rozšíření trhlin po celé výšce průřezu a následnému kolapsu desky označovanému jako protlačení.

Zvýšení odolnosti proti protlačení lze dosáhnout zvětšením tloušťky desky, zvětšením rozměrů sloupů, použitím betonu s vyšší třídou pevnosti, vytvoření náběhů a hlavic sloupů, vložením smykové výztuže.

Protlačení desek vyztužených FRP výztuží zatím není zcela prozkoumaná oblast. Tato problematika se stále zkoumá a zjišťují se nové poznatky. K deskám vyztužených FRP výztuží je potřeba mít odlišný přístup než k deskám vyztužených betonářskou výztuží.

Problematickou protlačení desek vyztužených FRP výztuží bez smykové výztuže se zabývala ve své diplomové práci Ing. Denisa Bártová [6]. Ve své práci provedla parametrickou studii, kde porovnávala existující přístupy pro řešení problematiky

protlačení desek vyztužených FRP výztuží bez smykové výztuže. Porovnání výsledku je zobrazeno na Obrázek 2. Pevnosti v protlačení dle uvažovaných přístupů jsou porovnány s nelineární analýzou. Hodnota získaná pomocí nelineární analýzy je v grafu zakreslena čárkovanou čarou.



Obrázek 2: srovnání jednotlivých předpisů s nelineární analýzou, počítáno se středními hodnotami, převzato z [6]

Z porovnání vyplývá, že výsledkům nelineární analýzy je nejbližší pevnost vypočítaná dle ČSN EN 1992-1-1 [7]. Vztahy v dané normě jsou uvedeny pro tradiční betonářskou výztuž. Ing. Bártová navrhla úpravy vztahů pro určení únosnosti v protlačení, které zohledňovaly použití FRP výztuže. Do vztahu vstupuje přetvoření FRP výztuže určené z dlouhodobé únosnosti $\varepsilon_{f,LT}$. Následně je stanoven součinitel c_{FRP} zohledňující rozdíl mezi tradiční betonářskou a FRP výztuží

$$\varepsilon_{f,LT} = \frac{f_{fd,LT}}{E_f}, \quad (3)$$

$$c_{FRP} = \frac{E_f}{E_s} \cdot \frac{\varepsilon_{f,LT}}{\varepsilon_y} \leq 1,0, \quad (4)$$

kde $f_{fd,LT}$ je dlouhodobá návrhová únosnost FRP výztuže, E_f je modul pružnosti FRP výztuže, ε_y je přetvoření na mezi kluzu v ocelové výztuži, E_s je modul pružnosti ocelové výztuže. Zjištěné výsledky pomocí parametrické studie a nelineární analýzy nebylo možné ověřit pomocí laboratorní zkoušky [6].

3.3.1 Přístup dle ACI 440.1R-15 [3]

V předpisu ACI 440.1R-15 [3] vycházejí z dřívějších studií, kde se zjišťoval vliv podélné výztuže na odolnost proti protlačení. FRP výztuž společně s betonem přispívají k odolnosti proti protlačení. Selhání v protlačení u desek vyztužených FRP výztuží je křehké a náhlé. Při vyztužení FRP sítěmi na místo pouze pruty nedošlo k náhlému poklesu posouvající síly, naopak po prvotním selhání desky se stále absorbovalo zatížení. Zvýšení procenta vyztužení mělo za následek zvýšení odolnosti proti protlačení, nižšímu napětí v betonu a výztuži, nižším průhybům. Vysokopevnostní beton má příznivý vliv na únosnost v protlačení a snížení namáhání betonu [3].

ACI 440.1R-15 [3] představuje vztah, který modifikuje tuhost výztuže podélné výztuže tak aby byl zohledněn přenos smykového napětí na protlačení v oboustranně vyztužených deskách

$$V_c = \frac{4}{5} \sqrt{f_c'} b_0 (kd), \quad (5)$$

kde V_c je smyková únosnost betonu, f_c' je pevnost betonu v tlaku, d je účinná výška betonu, b_0 je vzdálenost kritického obvodu, která by se měla počítat ve vzdálenosti $d/2$ od líce sloupu. Tento kritický obvod by měl mít stejný tvar jako sloup, k je součinitel pro výpočet výšky v tlačené části betonu

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f, \quad (6)$$

kde n_f je poměr modulu pružnosti FRP výztuže a modulu pružnosti betonu, ρ_f je stupeň vyztužení [3].

Pro angloamerické jednotky se únosnost v protlačení stanoví

$$V_c = \left(\frac{5}{2}k\right) 4 \sqrt{f_c'} b_0 d, \quad (7)$$

kde $(5/2)*k$ je upravený součinitel, který zohledňuje rozdílnou osovou tuhost FRP výztuže [3].

3.3.2 Přístup dle CSA 806-12 [4]

Kanadský předpis [4] uvádí tři vztahy pro stanovení únosnosti při protlačení bez smykové výztuže. Jako výsledná hodnota se uvažuje nejmenší z nich.

$$v_r=v_c=\left(1+\frac{2}{\beta_c}\right)\left[0,028\lambda\phi_c(E_F\rho_Ff_c')^{\frac{1}{3}}\right], \quad (8)$$

kde β_c je poměr dlouhé ku krátké straně sloupu, λ je součinitel závisející na objemové hmotnosti betonu (pro obyčejný beton $\lambda = 1,0$), $\Phi_c = 0,65$, E_F je modul pružnosti FRP výztuže, ρ_F je stupeň vyztužení FRP výztuže, f_c' je tlaková pevnost betonu

$$v_r=v_c=\left[\left(\frac{\alpha_s d}{b_0}\right)+0,19\right]0,147\lambda\phi_c(E_F\rho_Ff_c')^{\frac{1}{3}}, \quad (9)$$

kde α_s se uvažuje rovna 4 pro vnitřní sloupy, 3 pro sloupy v blízkosti hrany desky, 2 pro rohové sloupy, b_0 je kontrolovaný obvod ve vzdálenosti $d/2$ od líce sloupu.

$$v_r=v_c=0,056\lambda\phi_c(E_F\rho_Ff_c')^{\frac{1}{3}}. \quad (10)$$

Pro všechny tři rovnice platí omezení, že hodnota f_c' nesmí být větší jak 60MPa. V případě, je-li účinná výška desky větší jak 300 mm, je nutné vynásobit smykovou odolnost součinitelem $(300/d)^{0,25}$ [4].

3.3.3 Přístup dle fib Bulletin No. 40 [5]

V publikaci fib Bulletin No. 40 [5] jsou shrnuty přístupy řešící protlačení desek vyztužených FRP výztuží. Na základě zjištění Ing. Bártové v její práci [6] je zde uveden pouze návrhový přístup dle Ospiny. Ing. Bártová provedla porovnání přístupů pro stanovení únosnosti betonových desek vyztužených FRP výztuží proti protlačení. Jednotlivé přístupy porovnála s nelineárním modelem viz. Obrázek 2. Na srovnávacím grafu je možné vidět, že přístup dle Ospiny vykazoval nejbližší hodnotu k nelineární analýze.

Matthys a Taerwe zjistili, že návrhové přístupy v CEB/FIP MC90 a Eurokódu 2 nadhodnocují smykovou únosnost desek vyztužených FRP výztuží. Následně navrhli vztah pro stanovení únosnosti betonové desky obousměrně vyztužené kompozitní výztuží

$$V_c=1,36\frac{\left(100\rho_{tEs}\frac{E_f f_{cm}}{E_s}\right)^{\frac{1}{3}}}{d^4}b_0d, \quad (11)$$

kde f_{cm} je tlaková pevnost betonu, b_0 je délka kontrolované obvodu ve vzdálenosti $1,5d$ od povrchu sloupu, kdy tvar je vždy obdélníkový bez závislosti na tvaru sloupu.

Ospina navrhnul úpravy pro existující vztah (11), které zahrnovaly vliv tuhosti a velikosti výztuže. Při použití $(E_f/E_s)^{1/2}$ jsou získány přesnější hodnoty vlivu tuhosti výztuže, než v případě vztahu $(E_f/E_s)^{1/3}$, kdy jsou výsledky nadhodnocovány. Pomocí zkoušek bylo zjištěno, že vliv velikosti průměru FRP výztuže není tak významný, jak se předpokládalo. Na základě těchto poznatků byl navržen následující vztah určující pevnosti proti protlačení desek vyztužených FRP výztuží

$$V_c = 2,77(\rho_f f_c)^{1/3} \sqrt{\frac{E_f}{E_s}} b_0 d, \quad (12)$$

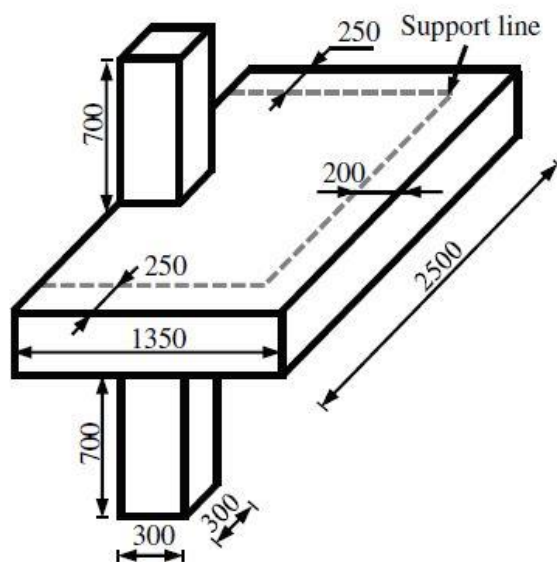
kde ρ_f je stupeň vyztužení, b_0 je délka kontrolovaného obvodu ve vzdálenosti $1,5d$ od líce sloupu. Tento obvod je vždy obdélníkového tvaru bez závislosti na tvaru sloupu [5].

3.4 Protlačení desek vyztužených FRP se smykovou FRP výztuží

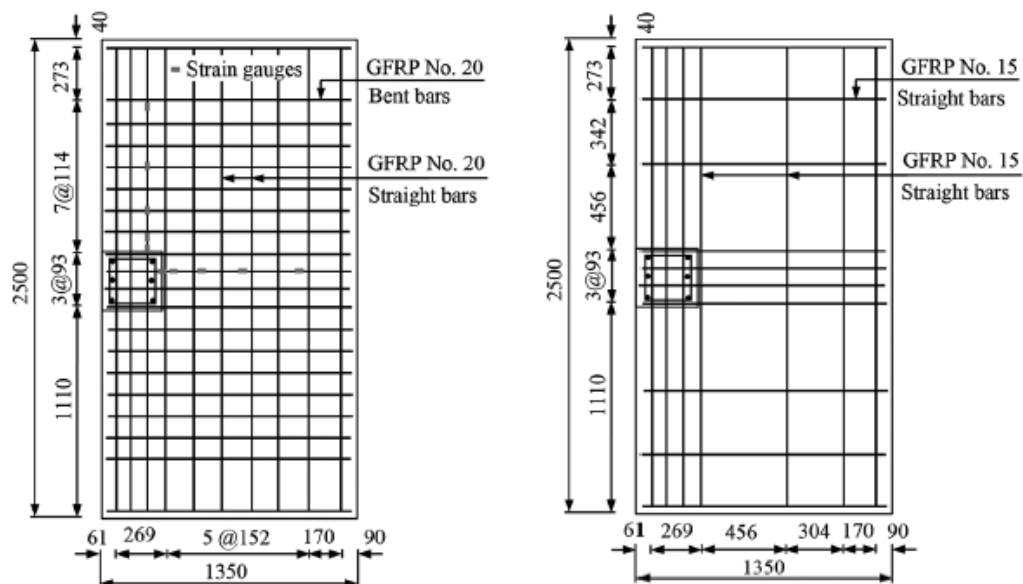
Tento způsob porušení zatím neuvažuje žádný z předpisů, či norem. Na toto téma se začínají provádět zkoušky a výzkumné práce. Není zatím zcela jasné chování desek a především smykové výztuže při tomto porušení. Při vyztužení bez smykové výztuže dochází u desek vyztužených FRP výztuží ke křehkému porušení, kterému je potřeba zabránit. Je tedy požadavek, aby před porušením vznikly v daném místě potřebné deformace. V případě provedení smykové výztuže proti protlačení je potřeba bezpečně stanovit chování FRP třmínků. U smykové kompozitní výztuže je potřeba omezit pevnost z důvodu ohybů. V místě ohybů se z důvodu nerovnoměrného natažení vláken předpokládá porušení FRP třmínků. Z tohoto důvodu je nutné redukovat únosnost. Snížení únosnosti závisí na poměru průměru výztuže ku poloměru ohybu, typu FRP výztuže, soudržnosti mezi výztuží a betonem. V rámci této problematiky je tedy potřeba provést zkoušky. Na základě výsledků zkoušek by bylo možné upravit vztahy, které by určovaly pevnost v protlačení desek vyztužených FRP se smykovou výztuží.

Touto problematikou se v posledních letech zabývali v Kanadě [8], [9]. V této práci se bude vycházet z jejich posledních vědeckých prací. Je zde snaha navázat na jejich zjištěné skutečnosti a navrhnout úpravy pro ČSN 1992-1-1 [7] a fib Model Code for Concrete Structures 2010 [10] tak, aby byl zohledněn vliv FRP výztuže.

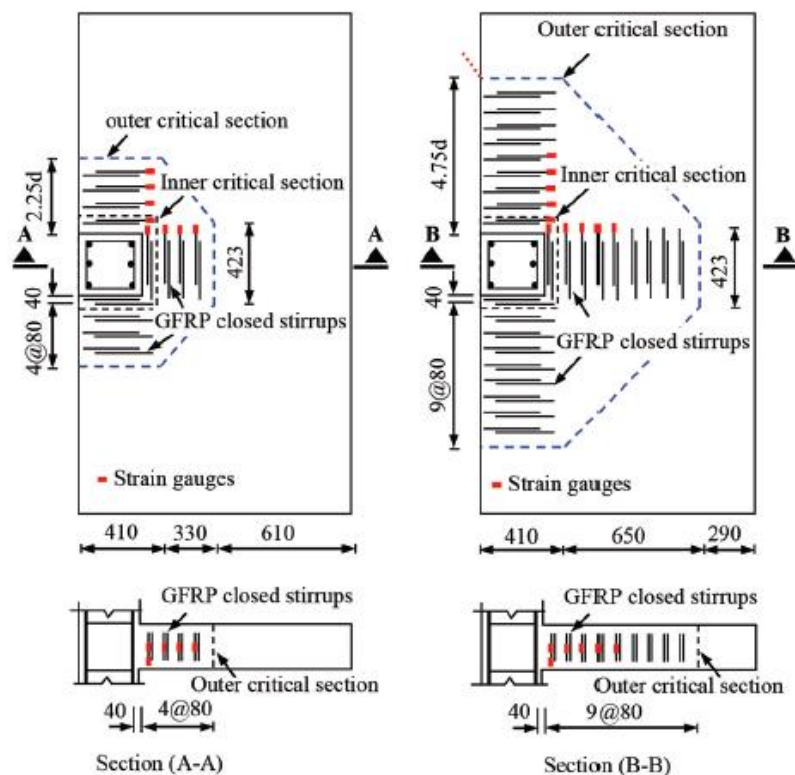
Hassan a kolektiv [8], [9] provedli zkoušky na betonových deskách vyztužených FRP výztuží. Na deskách o reálných rozměrech viz. Obrázek 3 byly provedeny zkoušky za účelem zjištění chování desek při protlačení. Desky byly provedeny v různých konfiguracích (Obrázek 4, Obrázek 5), které zohledňovaly smykovou výztuž, případně vzdálenost smykové výztuže od líce sloupu. Všechny desky byly shodně namáhány vertikální a horizontální silou v určitém poměru až do porušení [8], [9].



Obrázek 3: schéma rozměrů desky a sloupu, k zatěžovací zkoušce [8]

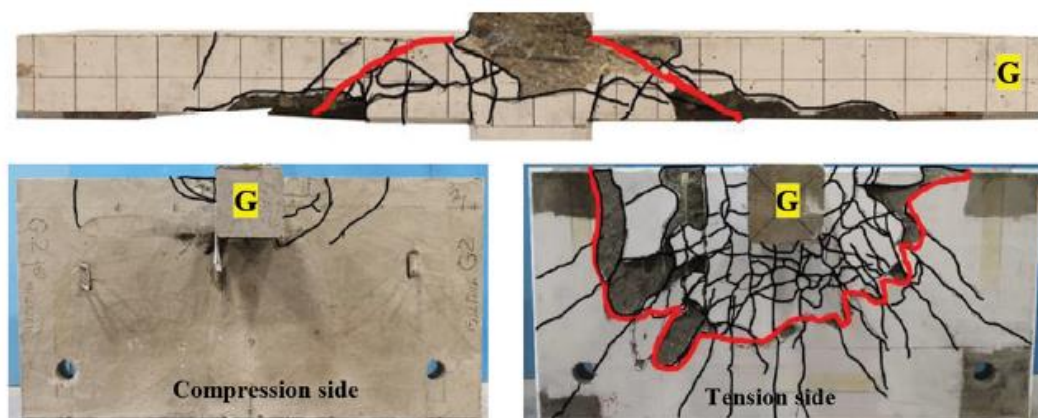


Obrázek 4: základní rastr FRP výztuže pro desky: vlevo spodní vyztužení; vpravo horní vyztužení [8]

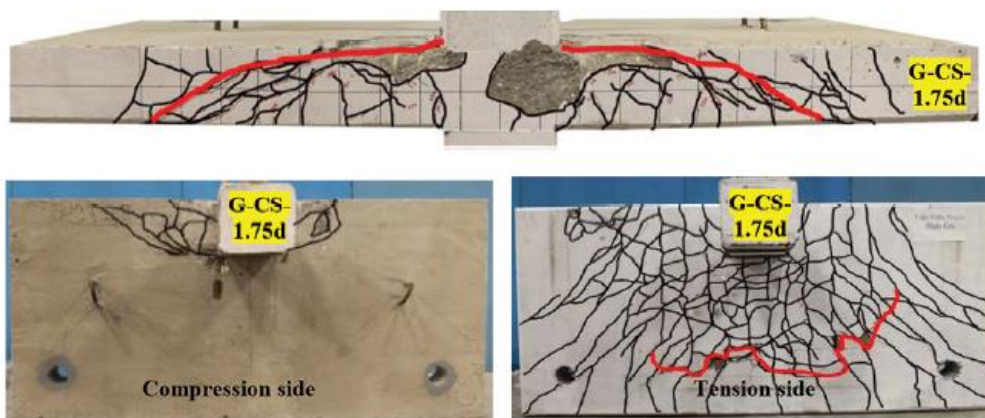


Obrázek 5: polohy třmínků z FRP výztuže: vlevo do vzdálenosti $1,75d$ od líce sloupu; vpravo do vzdálenosti $4,25d$ od líce sloupu [8]

Při rostoucím zatěžování se prvně objevovaly ohybové trhliny rozvíjející se od sloupu směrem k podpěrám rámu. Následně se objevovaly šikmé torzní trhliny u vnitřních rohů sloupu. Tyto trhliny se šířily k horní polovině desky. Na konec se rozšířily obvodové (tangenciální) trhliny v okolí sloupu, procházející přes radiální trhliny. Šířka a počet trhliny se zvětšoval až do porušení [8], [9].



Obrázek 6: trhliny na desce porušené protlačení, vyztužení bez smykové výztuže [8]



Obrázek 7: trhliny na desce porušené protlačením, vyztužení se smykovou FRP výztuží do vzdálenosti 1,75d od líce sloupu [8]



Obrázek 8: zhrhliny na desce porušené protlačením, vyztužení se smykovou FRP výztuží do vzdálenosti 4,25d od líce sloupu [8]

U desky bez smykové výztuže došlo k porušení typickým křehkým způsobem při protlačení desek. V případě použití třmínků z FRP výztuže kladených do vzdálenosti 1,75d od líce sloupu došlo k porušení protlačením za vyztuženým obvodem. Při prodloužení vyztuženého obvodu nastala kombinace porušení protlačení s ohybem. V [8] byly navrženy doporučené vzorce v souladu s ACI 440.1R-15 [3] a CSA 806-12 [4]. Výsledná výpočtová únosnost se uvažuje jako součet únosnosti betonu bez smykové výztuže a únosnost smykové FRP výztuže [8].

Doporučené vzorce vycházející z CSA 806-12 [4] po úpravě Hassana a kol. [8].

$$V_{c,inside}=V_{c,outside}=0,028\lambda\phi_c(E_f\rho_f f'_c)^{\frac{1}{3}}, \quad (13)$$

$$v_{fv} = \frac{\phi_{fv} A_{fv} (0,005 E_{fv})}{b_0 s_{fv}}. \quad (14)$$

Doporučené vzorce vycházející z ACI 440.1R-15 [3] po úpravě Hassana a kol. [8].

$$v_{c,inside} = v_{c,outside} = \frac{2}{5} k \sqrt{f_c}, \quad (15)$$

$$v_{fv} = \frac{\phi_f A_{fv} (0,004 E_{fv})}{b_0 s_{fv}}. \quad (16)$$

Následně byl stanoven poměr mezi vypočtenou únosností a hodnotou získanou ze zkoušky. Tento poměr získaný v [8] poukázal na zbytečně konzervativní přístup. V článku [9] se snaží pomocí nelineární analýzy upravit přístupy uvažované v [8]. Na základě výsledků ze zkoušky byl optimalizován model pro nelineární analýzu tak aby byla shoda mezi zkouškou a modelem. Ze zkoušek se ukázalo, že napětí v třmíncích odpovídá napětí uvažovanému ve vzorci (16) a lze ho uvažovat jako správný. Hassan a kol. v [9] následně stanovili součinitel β redukující pevnost betonu v protlačení bez smykové výztuže, následný vztah má tedy tvar:

$$v_{c,inside} = \beta \cdot 0,056 \lambda \phi_c (E_f \rho_f f_c')^{\frac{1}{3}}, \quad (17)$$

kde β je rovna 0,64.

$$v_{fv} = \frac{\phi_f A_{fv} f_{fv}}{b_0 s_{fv}}, \quad (18)$$

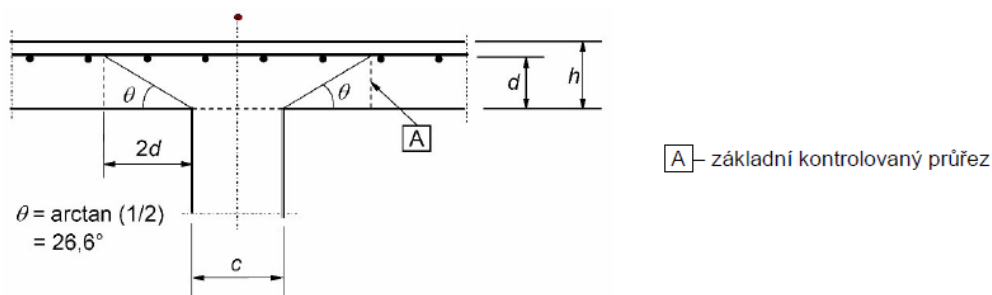
$$f_{fv} = 0,004 E_{fv}. \quad (19)$$

Z článků [8], [9] lze konstatovat, že FRP třmínky mají příznivý vliv na únosnost v protlačení desek vyztužených FRP výztuží. Na výslednou pevnost má vliv tvar smykové výztuže. Vzdálenost mezi třmínky by neměla přesahovat 0,5d, menší vzdálenost mezi třmínky zvyšuje únosnost. S vyšším průměrem výztuže roste únosnost. Poměr poloměru ohybu třmínku ku průměru by neměl být menší než 4. Větší vzdálenost třmínků od líce sloupu významně ovlivňuje únosnost, přetvoření a výsledné porušení [8], [9].

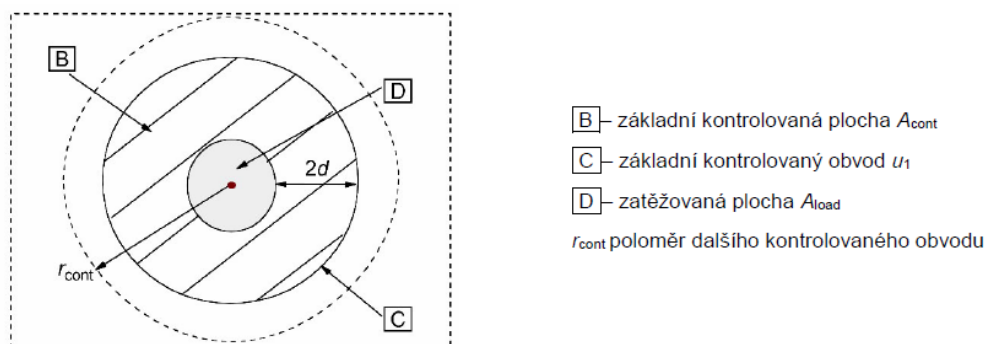
4 Protlačení dle ČSN EN 1992-1-1 [7]

4.1 Základní kontrolní obvod u_1

Smyk při protlačení plných i žebrových desek dle ČSN EN 1992-1-1 je nutné posuzovat v základním kontrolovaném obvodu u_1 a tomu odpovídající kontrolované ploše viz. Obrázek 9, Obrázek 10. V případě nutnosti smykové výztuže je třeba nalézt další kontrolovaný obvod $u_{out,el}$, kde již není nutná smyková výztuž [7].



Obrázek 9: základní kontrolovaný obvod – řez [7]



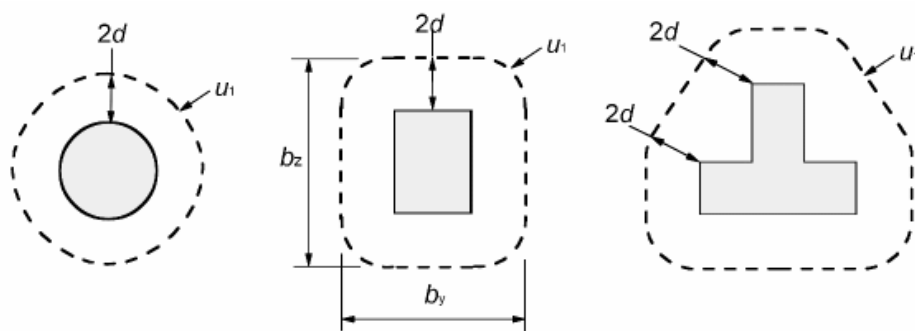
Obrázek 10: základní kontrolovaný obvod – půdorys [7]

Základní kontrolovaný obvod má být vždy nejkratší od zatěžované plochy. Lze ho uvažovat ve vzdálenosti $2d$ od líce sloupu, kde d je účinná výška desky. Tuto výšku lze dopočítat pomocí následujícího vzorce

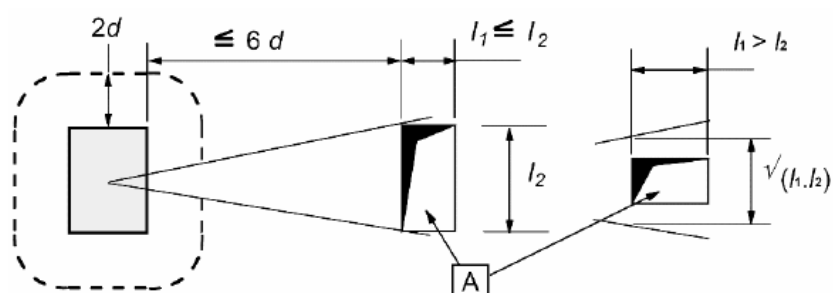
$$d_{eff} = \frac{(d_y + d_z)}{2}, \quad (20)$$

kde d_y a d_z jsou účinné výšky výztuží v na sebe kolmých směrech. Kontrolovaný obvod ovlivňuje blízkost otvorů, kdy v případě blízkosti otvoru menší než $6d$ nelze část kontrolovaného obvodu uvažovat viz. Obrázek 12. Na kontrolovaný obvod má také vliv

vzdálenost zatěžované plochy od okraje nebo rohu desky, délky kontrolovaných obvodů jsou znázorněny na Obrázek 11-13 [7].

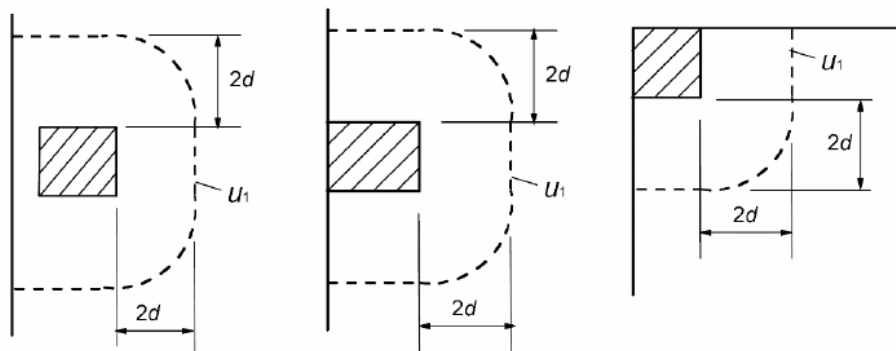


Obrázek 11: typické základní kontrolované obvody [7]



[A] – otvor

Obrázek 12: vliv blízkosti otvorů na kontrolovaný obvod [7]



Obrázek 13: základní kontrolované obvody pro zatěžovanou plochu v blízkosti okraje nebo rohu desky [7]

Vzdálenost kontrolovaného obvodu od líce zatěžovací plochy je ovlivněna rozměry a tvarem hlavice. Pro desky s kruhovými hlavicemi, kde $l_H < 2h_H$ viz. Obrázek 14, je vzdálenost kontrolovaného obvodu r_{cont} vypočtena ze vztahu

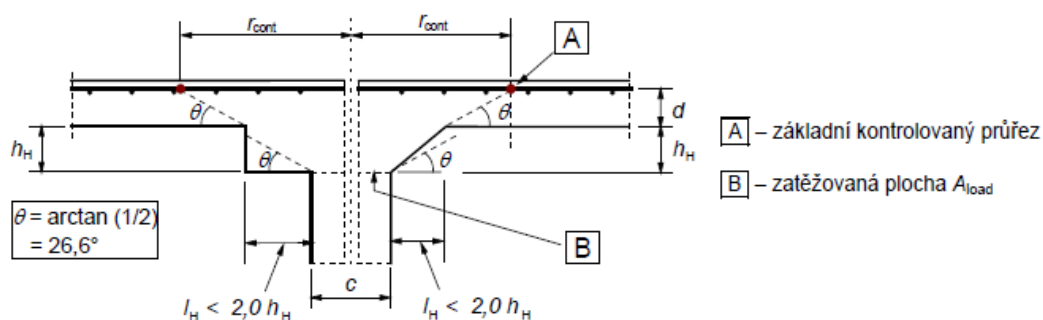
$$r_{\text{cont}} = 2d + l_H + 0,5c, \quad (21)$$

kde d je účinná výška desky, l_H vzdálenost okraje sloupové hlavice od líce sloupu, c je průměr kruhového sloupu [7].

Pro obdélníkové sloupy s deskovou hlavicí, kde $l_H < 2,0h_H$ viz. Obrázek 14 s celkovými rozměry $l_1 = c_1 + 2,0l_{H1}$ a $l_2 = c_2 + 2,0l_{H2}$ (kdy platí $l_1 \leq l_2$) lze uvažovat vzdálenost kontrolovaného obvodu r_{cont} jako menší z následujících hodnot

$$r_{cont} = 2d + 0,56\sqrt{l_1 l_2}, \quad (22)$$

$$r_{cont} = 2d + 0,69l_1. \quad (23)$$

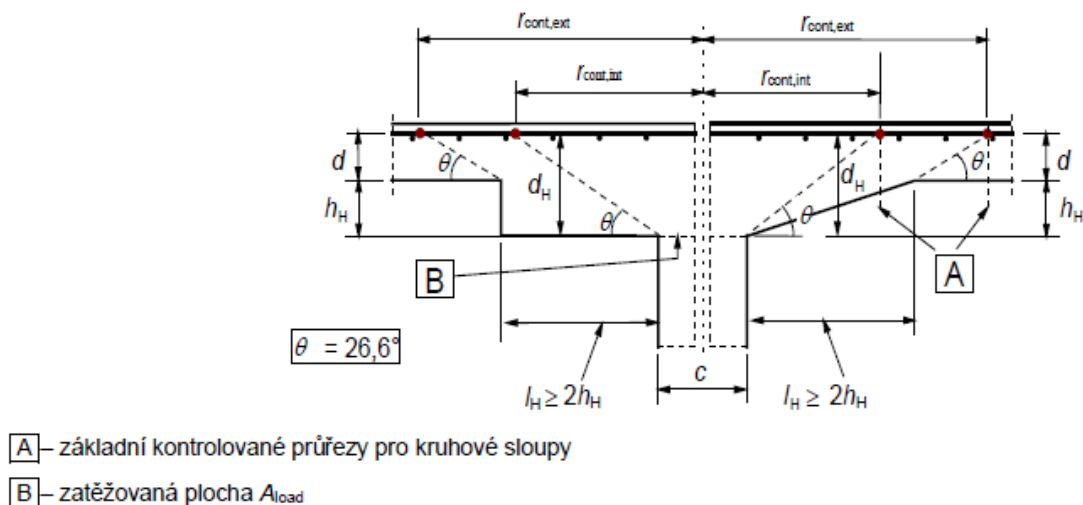


Obrázek 14: deska s rozšířenou sloupovou hlavicí, kde $l_H < 2,0 h_H$ [7]

U desek s rozšířenými hlavicemi, kde platí $l_H > 2h_H$ je třeba posoudit kontrolovaný obvod uvnitř hlavice, tak i v desce za hlavicí viz. Obrázek 15. Pro kruhové sloupy lze vzdálenost od těžiště uvažovat

$$r_{cont,ext} = l_H + 2d + 0,5c, \quad (24)$$

$$r_{cont,int} = 2(d + h_H) + 0,5c. \quad (25)$$



Obrázek 15: deska s rozšířenou sloupovou hlavicí, kde $l_H > 2,0 h_H$ [7]

4.2 Výpočet smyku při protlačení

Výpočet návrhové odolnosti při protlačení je založen na posouzení v různých kontrolovaných obvodech. V kontrolovaných obvodech jsou definována následující smyková napětí:

- $v_{Rd,c}$ je návrhová únosnost ve smyku při protlačení desky bez smykové výztuže,
- $v_{Rd,cs}$ je návrhová únosnost ve smyku při protlačení desky se smykovou výztuží,
- $v_{Rd,max}$ je návrhová hodnota maximální únosnosti ve smyku při protlačení [7].

Na obvodu sloupu (zatěžované plochy) se provede posouzení, zdali není překročena maximální únosnost ve smyku při protlačení

$$v_{Ed} \leq v_{Rd,max}, \quad (26)$$

$$v_{Rd,max} = 0,4v_{fcd} \quad (27)$$

$$v = 0,6 \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] \quad (28)$$

kde v_{Ed} je návrhové smykové napětí od zatížení. Toto napětí je v případě excentrické polohy vůči kontrolovanému obvodu nutno uvažovat následovně

$$v_{Ed} = \beta \frac{V_{Ed}}{u_i d}, \quad (29)$$

kde d je účinná výška ze vztahu (20), u_i je délka kontrolované obvodu, β je součinitel vlivu ohybového momentu [7].

Ve vzdálenosti kontrolovaného obvodu u_i je nutno provést posudek, zdali deska vyhoví na smyk při protlačení bez smykové výztuže

$$v_{Ed} \leq v_{Rd,c}, \quad (30)$$

kde únosnost bez smykové výztuže $v_{Rd,c}$ je stanovena

$$v_{Rd,c} = c_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{\frac{1}{3}} \geq v_{min}, \quad (31)$$

kde

$$c_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c}, \quad (32)$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0; d \text{ uvažováno v mm} \quad (33)$$

$$\rho_1 = \sqrt{\rho_{ly} \cdot \rho_{lx}} \leq 0,02, \quad (34)$$

$$v_{min} = 0,035 k^{\frac{3}{2}} f_{ck}^{\frac{1}{2}}. \quad (35)$$

V případě, je-li únosnost proti protlačení $v_{Rd,c}$ menší než smykové napětí od zatížení, je nutný návrh smykové výztuže. Únosnost ve smyku proti protlačení se smykovou výztuží lze vypočítat pomocí následujícího vztahu

$$v_{Rd,cs} = 0,75 v_{Rd,c} + 1,5 \left(\frac{d}{s_r} \right) A_{sw} f_{ywd,eff} \left(\frac{1}{u_1 d} \right) \sin \alpha, \quad (36)$$

kde $v_{Rd,c}$ viz. (31), d viz. (20), s_r je radiální vzdálenost obvodů smykové výztuže, A_{sw} je plocha smykové výztuže na jednom obvodu okolo sloupu, $f_{ywd,eff}$ je účinná návrhová pevnost smykové výztuže, α je úhel, který svírá smyková výztuže s rovinou desky. Zároveň musí platit:

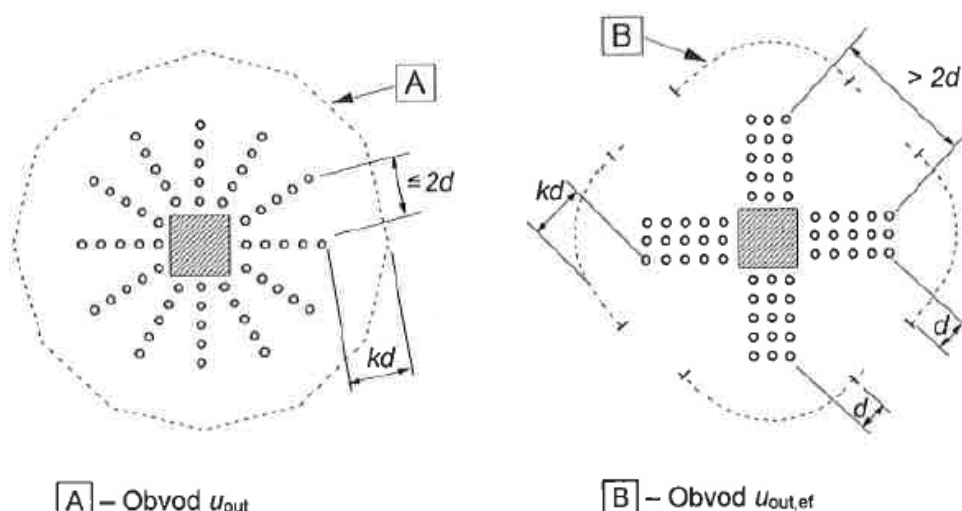
$$v_{Rd,cs} \leq k_{max} v_{Rd,c}, \quad (37)$$

kde k_{max} je součinitel omezující maximální únosnost, která může být dosažena při použití smykové výztuže. Tuto hodnotu lze při spolehlivém zakotvení smykové výztuže uvažovat $k_{max}=1,45$ při $h=200$ mm, $k_{max}=1,70$ při $h \geq 700$ mm [7].

V případě použití smykové výztuže je nutné určit kontrolovaný obvod, kde není nutná smyková výztuž u_{out}

$$u_{out} = \beta \frac{V_{Ed}}{v_{Rd,c} d}, \quad (38)$$

od toho obvodu nemůže být smyková výztuž ve větší vzdálenosti než k_d viz. Obrázek 16. Hodnota k je doporučena $k=1,5$ [7].



Obrázek 16: kontrolované obvody u vnitřních sloupů [7]

4.3 Návrh úpravy ČSN EN 1992-1-1 [7] pro použití FRP výztuže

Stávající norma [7] uvažuje s tradiční betonářskou ocelí. V rámci této diplomové práce je snaha upravit stávající vztahy pro použití FRP výztuže. Návrh úpravy vztahu na protlačení bez smykové výztuže představila ve své diplomové práci Ing. Bártová [6]. Zde bude použit součinitel c_{FRP} zohledňující rozdíly mezi danými typy výztuže. Navrhovaný vztah pro stanovení smykové únosnosti při protlačení bez smykové výztuže

$$v_{Rd,c,FRP} = c_{Rd,c} k (100 \rho_l c_{FRP} f_{ck})^{\frac{1}{3}} \geq v_{min}, \quad (39)$$

$$\varepsilon_{f,LT} = \frac{f_{fd,LT}}{E_f}, \quad (40)$$

$$c_{FRP} = \frac{E_f}{E_s} \cdot \frac{\varepsilon_{f,LT}}{\varepsilon_y} \leq 1,0, \quad (41)$$

kde $\varepsilon_{f,LT}$ je dlouhodobé poměrné přetvoření v FRP výztuži.

V rámci této práce je snaha zjistit, zdali tento přístup je odpovídající. Především hodnota přetvoření v podélné výztuži je při využití tohoto vztahu důležitá a je tedy snaha tuto hodnotu ověřit. V případě použití smykové FRP výztuže je nutné upravit vztahy zohledňující rozdíl mezi FRP a betonářskou výztuží. Do vztahu je vložena pevnost FRP třmínků. Tato pevnost vychází z výsledků zjištěných Hassanem a kol. v [9]. Výsledná pevnost ve smyku při protlačení se smykovou výztuží je navržena

$$V_{Rd,cs, FRP} = 0,75 V_{Rd,c,FRP} + 1,5 \left(\frac{d}{s_r} \right) A_{FRPw} f_{fw} \left(\frac{1}{u_1 d} \right) \sin \alpha, \quad (42)$$

kde $V_{Rd,c,FRP}$ je pevnost v protlačení bez smykové výztuže (s podélnou FRP výztuží), d je účinná výška, s_r je vzdálenost třmínků, A_{FRPw} je plocha smykové výztuže na jednom obvodu sloupu, α je úhel, který svírá smyková výztuže s rovinou desky, f_{fw} je pevnost třmínků. Pevnost třmínků se stanovuje

$$f_{fw} = 0,004 E_f, \quad (43)$$

kde se využívá vztahu, ke kterému došel Hassan a kol. v pracích [8], [9]. V této práci je snahou i tento vztah ověřit a případně navrhnout úpravu vztahu pro stanovení únosnosti desek v protlačení se smykovou FRP výztuží.

Maximální únosnost v protlačení se smykovou výztuží je ovlivněna součinitelem k_{max} , a musí tedy platit:

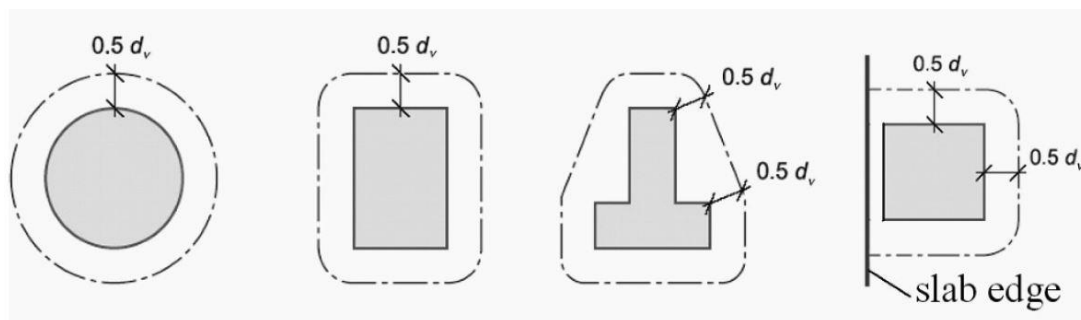
$$V_{Rd,cs} \leq k_{max} V_{Rd,c}, \quad (44)$$

kde k_{max} je součinitel omezující maximální únosnost, která může být dosažena při použití smykové výztuže. Tuto hodnotu lze při spolehlivém zakotvení smykové výztuže uvažovat $k_{max}=1,45$ při $h=200$ mm, $k_{max}=1,70$ při $h \geq 700$ mm.

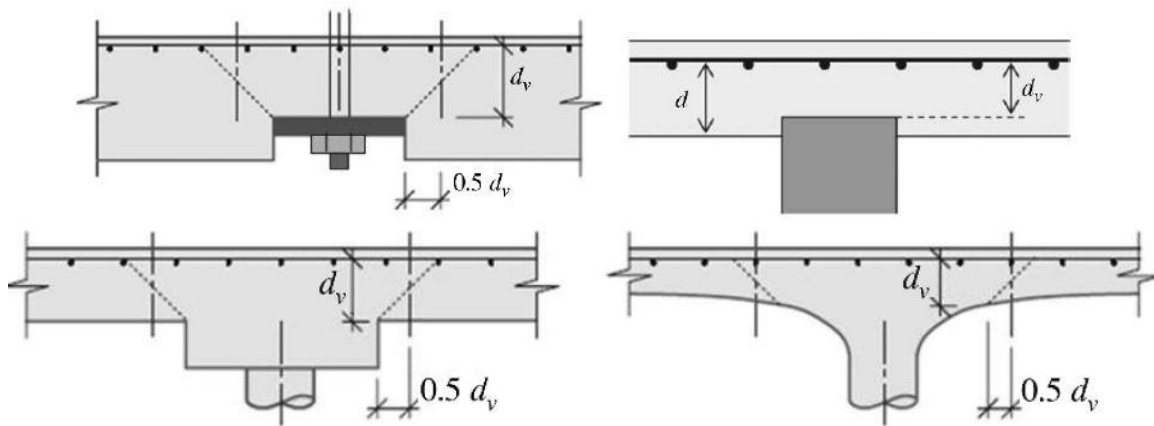
5 Protlačení dle fib Model Code for Concrete Structures 2010 [10]

5.1 Základní kontrolovaný obvod b_1

Návrhová smyková síla při protlačení se počítá jako suma všech sil působících na základním kontrolovaném obvodu b_1 . Základní kontrolovaný obvod má mít stejný tvar jako je tvar sloupu, musí respektovat hrany desky, viz. Obrázek 17. Vzdálenost od líce sloupu má být co nejmenší, uvažuje se ve vzdálenosti $0,5d_v$, kde d_v je účinná výška. Obrázek 18. Účinná výška je vzdálenost těžiště výztuží k podporované hraně desky. Kontrolní obvod smykové odolnosti proti protlačení b_0 odpovídá nerovnoměrnému rozložení smykových sil podél základního kontrolovaného obvodu. Lze ho získat z podrobné analýzy smykového pole [10].



Obrázek 17: tvar a vzdálenost od líce sloupu kontrolovaného obvodu b_1 [10]



Obrázek 18: stanovení účinné výšky d_v [10]

5.2 Smyková síla při protlačení

Celková únosnost v protlačení se stanoví

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,s} \geq V_{Ed}, \quad (45)$$

kde $V_{Rd,c}$ je pevnost v protlačení bez smykové výztuže a $V_{Rd,s}$ je pevnost v protlačení se smykovou výztuží. Únosnost v protlačení bez smykové výztuže se stanoví

$$V_{Rd,c} = k_{\psi} \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} b_0 d_v, \quad (46)$$

kde f_{ck} je charakteristická pevnost v betonu, γ_c je materiálový součinitel betonu, b_0 je základní kontrolovaný obvod, d_v je účinná výška výztuže k podporové hraně, k_{ψ} je parametr deformace (rotace) desky, který lze stanovit dle následujícího vztahu

$$k_{\psi} = \frac{1}{1,5 + 0,9 k_{dg} \psi d} \leq 0,6, \quad (47)$$

kde d je střední hodnota účinné výšky pro směr x a y , ψ je parametr rotace desky, k_{dg} je součinitel velikosti zrna kameniva. Odolnost proti protlačení závisí na velikosti zrn použitého kameniva. Při použití zrn větších a rovno 16 mm je $k_{dg} = 1,0$. V ostatních případech je nutno stanovit hodnotu k_{dg} jako

$$k_{dg} = \frac{32}{16 + d_g} \geq 0,75, \quad (48)$$

kde d_g je velikost zrna v mm [10].

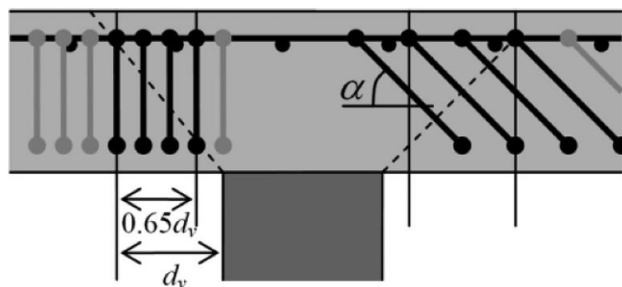
Návrhová odolnost při protlačení se smykovou výztuží v podobě třmínků je stanovena

$$V_{Rd,s} = \sum A_{sw} k_e \sigma_{swd} \sin \alpha, \quad (49)$$

kde $\sum A_{sw}$ je součet ploch veškeré vhodně ukotvené výztuže v teoretickém kuželovitém porušení při protlačení pod úhlem 45° Obrázek 19, α je úhel mezi smykovou výztuží a hranou desky, k_e je koeficient excentricity, který v případě menšího rozdílu sousedních polí jak 25 % lze uvažovat 0,90 pro vnitřní sloupy, 0,70 pro krajní sloupy, 0,65 pro rohové sloupy, σ_{swd} je napětí v působící výztuže, které je stanoveno

$$\sigma_{swd} = \frac{E_s \psi}{6} (\sin \alpha + \cos \alpha) \left(\sin \alpha + \frac{f_{bd}}{f_{ywd}} \cdot \frac{d}{\Phi_w} \right) \leq f_{ywd}, \quad (50)$$

kde Φ_w je průměr smykové výztuže, f_{ywd} je mez kluzu smykové výztuže, f_{bd} je napětí v soudržnosti [10].



Obrázek 19: působící výztuž při teoretickém porušení [10]

Pro zajištění dostatečné deformační kapacity je u desek vyztužených smykovou výztuží na protlačení stanoveno minimální množství smykové výztuže jako

$$\sum A_{sw} k_e f_{ywd} \geq 0,5 V_{ed}, \quad (51)$$

Maximální odolnost při protlačení je omezeno drcením tlačené betonové vzpěry v oblasti podpory. Maximální odolnost lze určit

$$V_{Rd,max} = k_{sys} k_{\psi} \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} b_0 d_v \leq \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} b_0 d_v, \quad (52)$$

kde k_{sys} zohledňuje provedení smykové výztuže, kontrolování smykových trhlin, omezení tlačných vzpěr na spodním okraji desky. V případě absence těchto údajů lze uvažovat $k_{sys} = 2,0$ [10].

5.3 Stanovení pootočení desky v oblasti podpory

5.3.1 Úroveň I

Pro běžné ploché desky, navržené dle pružné analýzy bez významného přerozdělení vnitřních sil lze stanovit pootočení jako

$$\psi = 1,5 \cdot \frac{r_s f_{yd}}{d E_s}, \quad (53)$$

kde r_s je poloha, kde je nulový radiální ohybový moment. U pravidelných plochých desek, kde je poměr stran (L_x/L_y) mezi 0,5 až 2,0 lze hodnotu r_s odhadnout na $0,22L_x$, případně $0,22L_y$. Do vzorce (53) vstupuje maximální hodnota [10].

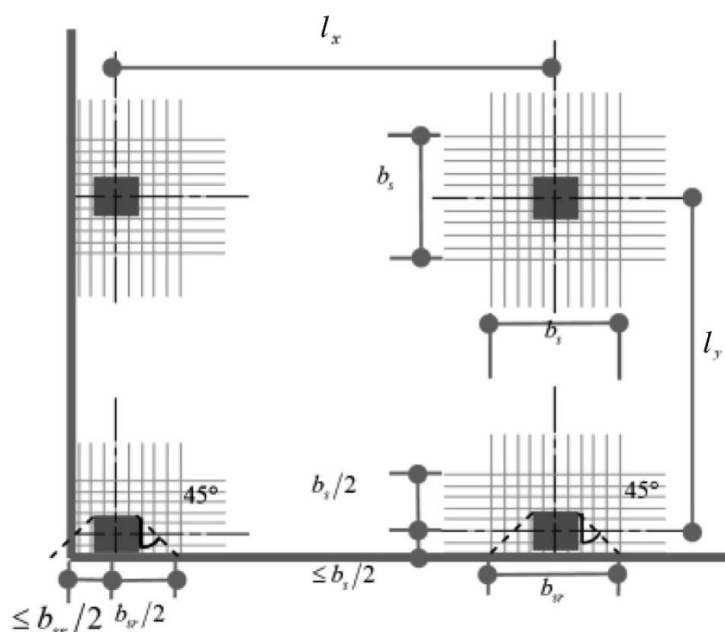
5.3.2 Úroveň II

V případě, kdy je v návrhu uvažováno významné přerozdělení ohybových momentu, lze pootočení stanovit

$$\psi = 1,5 \cdot \frac{r_s f_{yd}}{d E_s} \cdot \left(\frac{m_{Ed}}{m_{Rd}} \right)^{1,5}, \quad (54)$$

kde m_{Ed} je průměrný ohybový moment na jednotku délky pro stanovení ohybové výztuže v podporovém pruhu, m_{Rd} je návrhová průměrná pevnost v ohybu na jednotku délky v podporovém pruhu. Rotace musí být vypočtena v hlavních dvou směrech výztuže. Šířka podporového pruhu se vypočte

$$b_s = 1,5 \cdot \sqrt{r_{s,x} \cdot r_{s,y}} \leq L_{min}. \quad (55)$$



Obrázek 20: polohy a šířky podporových pruhů [10]

5.3.3 Úroveň III

Stanovení pootočení dle třetí úrovně se používá pro nepravidelné desky, nebo desky kde poměr délek rozpětí (L_x/L_y) není v mezi 0,5-2,0. Pro výpočet se používá vzorec (54), kde je hodnota 1,5 nahrazena 1,2. Hodnoty r_s a m_{Ed} se vypočítají pomocí lineárně pružného výpočtu bez trhlin [10].

5.3.4 Úroveň IV

Pootočení Ψ se stanoví z podrobné nelineární analýzy [10].

5.4 Návrh úpravy fib Model Code for Concrete Structures 2010 [10] pro použití FRP výztuže

Navrhované úpravy vychází z principu výpočtu dle fib Model Code for Concrete Structures 2010 [10] viz. kapitola 5. V této části dané kapitoly se budou úpravy týkat pouze změny materiálu, který vstupuje do stanovení únosnosti. Ve vzorcích budou vlastnosti tradiční ocelové výztuže nahrazeny vlastnostmi FRP výztuže.

Celková únosnost $V_{Rd,FRP}$ bude stanovena jako součet únosnosti v protlačení bez smykové $V_{Rd,c,FRP}$ výztuže a únosnosti smykové FRP výztuže $V_{Rd,s,FRP}$.

$$V_{Rd,FRP} = V_{Rd,c,FRP} + V_{Rd,s,FRP} \geq V_{Ed}, \quad (56)$$

Únosnost v protlačení betonové desky vyztužené podélnou FRP výztuží bez smykové výztuže se stanoví

$$V_{Rd,c,FRP} = k_{\psi} \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} b_0 d_v. \quad (57)$$

Parametr deformace (rotace) desky se stanoví shodně jako ve vztahu (47) a tedy jako:

$$k_{\psi} = \frac{1}{1,5 + 0,9 k_{dg} \psi d} \leq 0,6. \quad (58)$$

I v případě změny výztuže za FRP bude protlačení záviset na velikosti zrna kameniva. Pro použití zrna větší a rovno 16 mm je $k_{dg} = 1,0$. V ostatních případech je nutno stanovit hodnotu k_{dg} jako

$$k_{dg} = \frac{32}{16 + d_g} \geq 0,75. \quad (59)$$

Návrhová únosnost při protlačení se smykovou FRP výztuží v podobě třmínků je stanovena

$$V_{Rd,s,FRP} = \sum A_{fw} k_e \sigma_{fwd} \sin \alpha, \quad (60)$$

kde $\sum A_{fw}$ je součet ploch veškeré vhodně ukotvené výztuže v teoretickém kuželovitém porušení při protlačení pod úhlem 45° Obrázek 19, α je úhel mezi smykovou výztuží a

hranou desky, k_e je koeficient excentricity, který v případě menšího rozdílu sousedních polí jak 25 % lze uvažovat 0,90 pro vnitřní sloupy, 0,70 pro krajní sloupy, 0,65 pro rohové sloupy, σ_{fwd} je napětí v působící FRP výztuži, které je stanoveno

$$\sigma_{fwd} = \frac{E_f \psi}{6} (\sin \alpha + \cos \alpha) \left(\sin \alpha + \frac{f_{bd}}{f_{fwd}} \cdot \frac{d}{\Phi_w} \right) \leq f_{fwd}, \quad (61)$$

kde Φ_w je průměr smykové FRP výztuže, f_{fwd} je pevnost smykové výztuže, f_{bd} je napětí v soudržnosti [10].

Maximální odolnost při protlačení je omezeno drcením tlačené betonové vzpěry v oblasti podpory. Maximální odolnost lze určit

$$V_{Rd,max} = k_{sys} k_{\psi} \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} b_0 d_v \leq \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} b_0 d_v, \quad (62)$$

kde k_{sys} zohledňuje provedení smykové výztuže, kontrolování smykových trhlin, omezení tlačných vzpěr na spodním okraji desky. V případě absence těchto údajů lze uvažovat $k_{sys} = 2,0$ [10].

Stanovení pootočení bude vycházet z kapitoly 5.3. Pro tuto diplomovou práci se bude uvažovat pouze s pootočením dle úrovně I. Pootočení pro použití podélné výztuže bude stanoveno jako

$$\psi = 1,5 \cdot \frac{r_s}{d} \cdot \varepsilon_{f,LT}, \quad (63)$$

kde $\varepsilon_{f,LT}$ je dlouhodobé přetvoření podélné FRP výztuže. Pro případné zpřesnění výsledků by bylo nutné stanovit pootočení dle vyšších úrovní.

6 Experimentální ověření únosnosti desek v protlačení

Tato diplomová práce je zpracována v návaznosti na řešení projektu FAST-S-21-7503, kdy cílem je návrh a realizace experimentu na protlačení desek vyztužených FRP výztuží. Cílem je porovnat upravené vztahy na protlačení desek, které zohledňují specifické vlastnosti FRP výztuže s reálnými výsledky zkoušek.

6.1 Vstupní předpoklady

Následné vstupní předpoklady limitovaly návrh provedeného experimentu:

- deska čtvercového půdorysu o délce hrany max. 2,5 m, zatěžováno centricky „sloupem“
- výška desky v rozmezí 180 – 220 mm
- beton třídy C30/37 (z experimentu: střední krychelná pevnost betonu v tlaku $f_{c,cube} = 58,9$ MPa; pevnost v příčném tahu $f_{ct} = 3,8$ MPa; modul pružnosti $E_{cm} = 34,2$ GPa)
- průřez sloupu (plocha na protlačení) – čtvercový průřez o délce hrany v rozmezí 200 – 300 mm
- maximální teoretická únosnost vzorku se smykovou výztuží cca 700 kN (bodová síla v místě sloupu)
- podélná výztuž: GFRP průměr 10 mm, dovyztužení podélnou výztuží 14 mm, případně 18 mm
- střední krátkodobá pevnost v tahu podélné výztuže $f_{FRP} =$ cca 1350 MPa (platí pro průměr 10 mm), modul pružnosti $E_f = 52,5$ GPa
- smyková výztuž: GFRP třmínky čtvercového tvaru o délce hrany cca 170 mm o průměru 10 mm), ($f_{FRP} = 700$ MPa; již zohledněn vliv ohybu).

6.2 Teoretický návrh zkušebních vzorků dle dostupných návrhových podkladů/norem

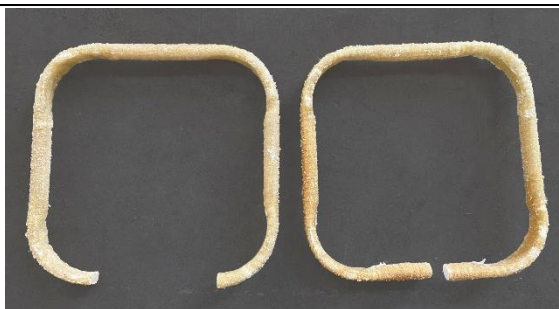
Z výše uvedených předpokladů se v prvním kroku provedl předběžný návrh pro zkušební vzorky. V předběžném návrhu se porovnávaly výsledky návrhových vztahů pro jednotlivé vzorky. Po předběžném návrhu byla provedena nelineární analýza, která určovala pravděpodobné chování a porušení jednotlivých vzorků. Nakonec byla provedena samotná realizace čtyř betonových desek s různými typy vyztužení, které

byly vyzkoušeny na protlačení. Jedna z desek byla provedena s ocelovou hlavní výztuží a sloužila jako referenční deska k ověření vztahů dle ČSN EN 1992-1-1 [7] a fib Model Code for Concrete Structures 2010 [10]. Další z desek byla o stejné ploše výztuže jako varianta s ocelovou výztuží, ale byla provedena z FRP výztuže. Díky tomu bylo možné provést porovnání chování desek s rozdílnými typy výztuže při protlačení. Tato varianta srovnávala výsledky dle upravené ČSN EN 1992-1-1 pro FRP výztuž a stejně tak pro upravený fib Model Code for Concrete Structures 2010 pro FRP výztuž. Byly zde ověřeny návrhové vztahy stávajících předpisů pro FRP výztuž dle ACI 440.1R-15 [3] a CSA 806-12 [4]. Další dvě zkušební desky měly stejnou plochu hlavní FRP výztuže jako předchozí varianta s podélnou FRP výztuží, ale navíc bylo provedeno smykové vyztužení desek. U těchto desek bylo navrženo rozdílné provedení smykové FRP výztuže. Bylo možné pozorovat chování smykové FRP výztuže v deskách při porušení protlačením. Desky se smykovou výztuží porovnávaly upravené vztahy jako tomu bylo v předchozí variantě bez smykové výztuže. Navíc zde byl použit vztah navržený Hassanem a kol. v [9].

Na základě výsledků předběžného návrhu, nelineárního výpočtu pomocí softwaru Aténa a provedených reálných zkoušek bylo možné přistoupit k případné úpravě navržených přístupů, nebo doporučení pro další testování navržených vztahů. Označení zkušebních vzorků:

- 1. OCEL
- 2. FRP
- 3. FRP-UTŘ
- 4. FRP-45TŘ,

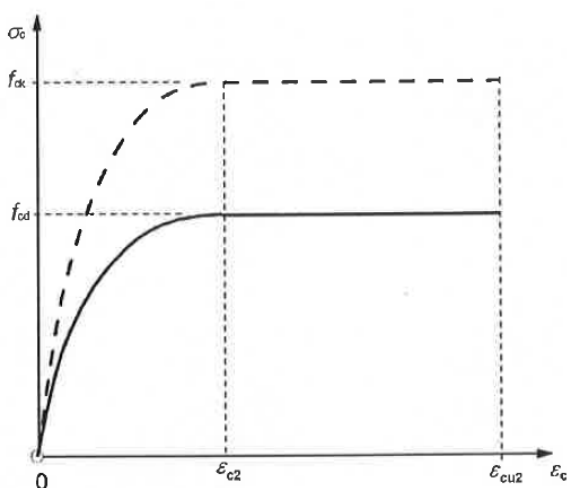
kde OCEL, FRP značí typ podélné výztuže, UTŘ, 45TŘ značí typ smykové výztuže, viz. Obrázek 21. UTŘ – třmínky se nasazovaly dodatečně na zhotovenou výztuž a bylo tedy nutné odříznout části spodní větve třmínků. 45TŘ – z třmínků se vytvořil smykový kříž, kde třmínky svíraly úhel 45° se střednicí desky a celý kříž se vložil mezi spodní a horní vrstvu výztuže. Výsledky zkoušek byly porovnány s návrhovými přístupy. Z provedeného předběžného návrhu bylo nutné z důvodu maximální síly, kterou je v laboratoři možné vyvinout, přistoupit k použití nižší pevnosti betonu. Pevnost betonu C30/37 uvedená v kapitole 6.1 byla snížena na beton třídy C20/25. Pro možné porovnání výsledků vzorků byl požadavek na shodné tloušťky všech desek.



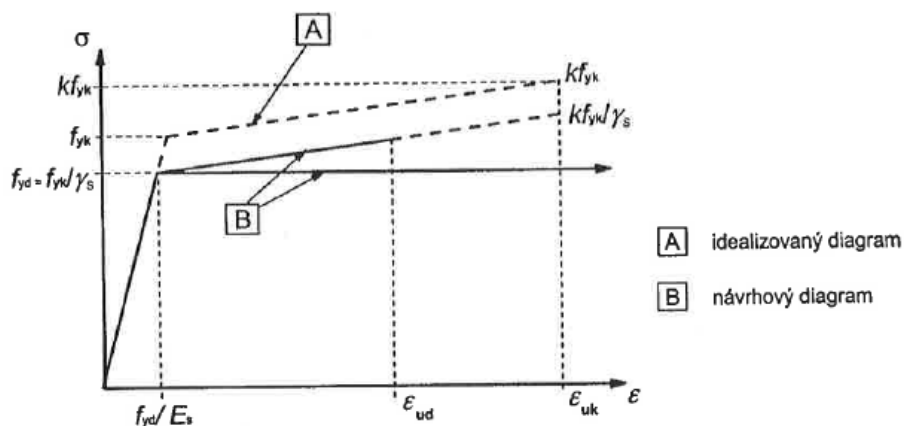
Obrázek 21: použité GFRP třmínky: vlevo UTŘ; vpravo klasický třmínek

Všechny desky byly shodně navrženy o velikosti 2000x2000 mm se zatěžovací plochou „rozměry sloupu“ 200x200 mm. Tloušťka desky byla shodně u všech zkušebních vzorků 200 mm.

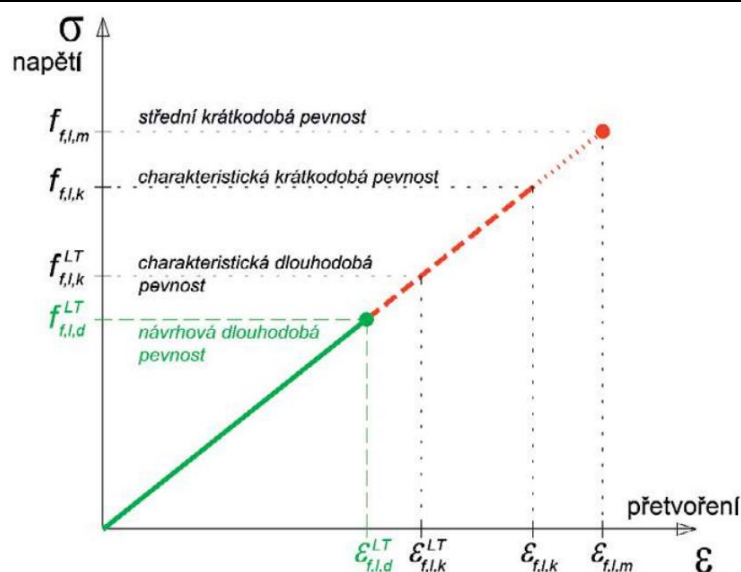
Pro stanovení únosnosti vzorků byly použity shodné pracovní diagramy materiálů.



Obrázek 22: parabolicko-rektangulární diagram pro beton namáhaný tlakem [7]



Obrázek 23: schéma pracovního diagramu betonářské oceli (pro tah i tlak) [7]



Obrázek 24: idealizovaný pracovní diagram kompozitní výztuže [2]

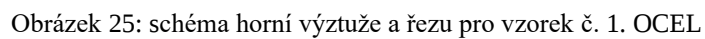
Pro návrh experimentu se uvažují střední hodnoty a součinitelé jsou rovny 1.

6.2.1 Vzorek č. 1. OCEL

Tento vzorek sloužil pro ověření správnosti a přesnosti návrhových přístupů dle ČSN EN 1992-1-1 [7] a fib Model Code for Concrete Structures 2010 [10]. Výztuž byla navržena ocelová o průměru 10 mm po 100 mm. Nebyla zde smyková výztuž. Tato varianta sloužila k porovnání chování desek při protlačení s rozdílnou osovou tuhostí výztužných vložek, tj. vzorek č. 2. FRP.

Základní vstupní údaje pro výpočet:

- velikost desky 2000x2000 mm
- výška desky 200 mm
- velikost sloupu 200x200 mm
- střední pevnost betonu $f_{cm} = 28,0$ MPa, viz. Tabulka 1
- hlavní výztuž: ocel, průměr 10 mm, $A_1 = 7,85E+1$ mm², ve vzdálenosti po 100 mm, viz. Tabulka 2
- krytí horní vrstvy výztuže $c = 15$ mm
- krytí dolní vrstvy výztuže $c = 15$ mm.



Beton		
$f_{cm} =$	28.0	MPa
$f_{ct} =$	2.2	MPa
$E_{cm} =$	30.0	GPa
$\gamma_c =$	1	

Tabulka 2: vstupní charakteristiky oceli pro stanovení únosnosti vzorku č. 1. OCEL

Ocel		
$f_{yk} =$	500	MPa
$E_s =$	200	GPa
$\varepsilon_y =$	0,0025	

6.2.1.1 Přístup dle ČSN EN 1992-1-1 [7]

6.2.1.1.1 Stanovení stupně vyztužení podélné výztuže

$$d_x = h - c - \frac{\phi_x}{2} = 200 - 15 - \frac{10}{2} = 180 \text{ mm}$$

$$d_y = h - c - \phi_x - \frac{\phi_y}{2} = 200 - 15 - 10 - \frac{10}{2} = 170 \text{ mm}$$

$$d = \frac{d_x + d_y}{2} = \frac{180 + 170}{2} = 175 \text{ mm}$$

$$c_x = 200 \text{ mm}$$

$$c_y = 200 \text{ mm}$$

$$b_x = c_x + 6 \cdot d = 200 + 6 \cdot 175 = 1250 \text{ mm (v této vzdálenosti se nachází 13 prutů, } A_{sx} = 1,02\text{E}+3 \text{ mm}^2)$$

$$b_y = c_y + 6 \cdot d = 200 + 6 \cdot 175 = 1250 \text{ mm (v této vzdálenosti se nachází 13 prutů, } A_{sy} = 1,02\text{E}+3 \text{ mm}^2)$$

$$\rho_x = \frac{A_{sx}}{b_x \cdot d_x} = \frac{1,02\text{E}+3}{1250 \cdot 180} = 0,00454$$

$$\rho_y = \frac{A_{sy}}{b_y \cdot d_y} = \frac{1,02\text{E}+3}{1250 \cdot 170} = 0,00480$$

$$\rho_1 = \sqrt{\rho_x \cdot \rho_y} = \sqrt{0,00454 \cdot 0,00480} = 0,00467$$

6.2.1.1.2 Stanovení kontrolovaného obvodu

$$u_1 = 2 \cdot (c_x + c_y) + 2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot d = 2 \cdot (200 + 200) + 2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot 175 = 2999,12 \text{ mm}$$

6.2.1.1.3 Stanovení únosnosti bez smykové výztuže

$$v_{Rd,c} = c_{Rd,c} k (100 \rho_1 f_{cm})^{\frac{1}{3}} \geq v_{min},$$

$$c_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} = \frac{0,18}{1,0} = 0,18$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \Rightarrow 1 + \sqrt{\frac{200}{175}} = 2,0$$

$$v_{Rd,c} = 0,18 \cdot 2,0 \cdot (100 \cdot 0,00467 \cdot 28,0)^{\frac{1}{3}} = 0,848 \text{ MPa}$$

$$V_{Rd,c} = v_{Rd,c} \cdot u_1 \cdot d = 0,848 \cdot 2999,12 \cdot 175 = 445,117 \text{ kN}$$

6.2.1.1.4 Stanovení minimální pevnosti

$$v_{\min} = 0,035 \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot f_{cm}^{\frac{1}{2}} = 0,035 \cdot 2,0^{\frac{3}{2}} \cdot 28,0^{\frac{1}{2}} = 0,524 \text{ MPa}$$

$$V_{\min} = v_{\min} \cdot u_1 \cdot d = 0,524 \cdot 2999,12 \cdot 175 = 274,931 \text{ kN}$$

$$v_{Rd,c} = 0,848 \text{ MPa} > v_{\min} 0,524 \text{ MPa}$$

6.2.1.2 Přístup dle fib Model Code for Concrete Structures 2010 [10]

6.2.1.2.1 Stanovení stupně vyztužení podélné výztuže

Stupeň vyztužení a účinná výška výztuže jsou stejné jako v případě dle vztahu z ČSN EN 1992-1-1 [7].

$$d = 175 \text{ mm}$$

$$\rho_f = 0,00467$$

6.2.1.2.2 Stanovení kontrolovaného obvodu

$$b_0 = 2 \cdot (c_x + c_y) + 2 \cdot \pi \cdot 0,5 \cdot d = 2 \cdot (200 + 200) + 2 \cdot \pi \cdot 0,5 \cdot 175 = 1349,78 \text{ mm}$$

6.2.1.2.3 Stanovení pootočení

Pootočení bude stanoveno dle úrovně I viz. kapitola 5.3.

$$\psi = 1,5 \cdot \frac{r_s}{d} \frac{f_{yd}}{E_s}$$

vzdálenost nulového momentu $r_s = 1000 \text{ mm}$

$$\psi = 1,5 \cdot \frac{1000}{175} \frac{500}{200000} = 0,021$$

6.2.1.2.4 Stanovení únosnosti bez smykové výztuže

$$v_{Rd,c} = k_{\psi} \frac{\sqrt{f_{cm}}}{\gamma_c}$$

$$k_{\psi} = \frac{1}{1,5 + 0,9k_{dg}\psi d} \leq 0,6$$

$$k_{dg} = \frac{32}{16 + d_g} \geq 0,75 \Rightarrow \frac{32}{16 + 8} = 1,33 \geq 0,75$$

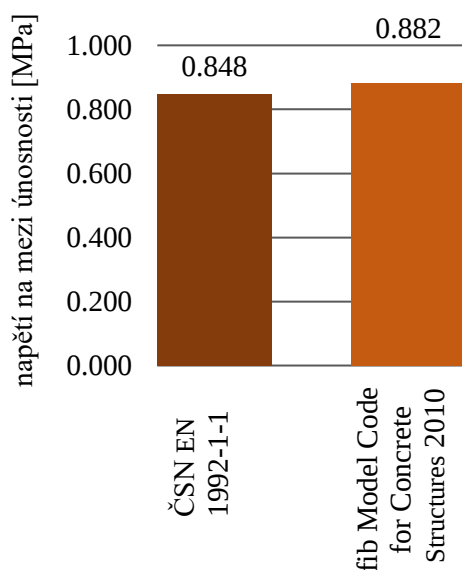
$$k_{\psi} = \frac{1}{1,5 + 0,9 \cdot 1,33 \cdot 0,021 \cdot 175} = 0,17 \leq 0,6$$

$$v_{Rd,c} = 0,17 \cdot \frac{\sqrt{28,0}}{1,0} = 0,882 \text{ MPa}$$

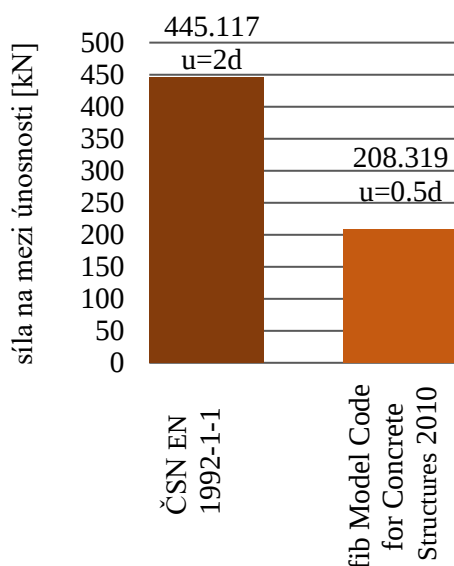
$$V_{Rd,c} = v_{Rd,c} \cdot b_0 \cdot d = 0,882 \cdot 1349,78 \cdot 175 = 208,319 \text{ kN}$$

6.2.1.3 Vyhodnocení předběžného návrhu vzorku č. 1. OCEL

Na Obrázek 26 jsou porovnané výsledné napětí na mezi únosnosti pro vzorek č. 1. OCEL. Z předběžného návrhu vyplývá, že vyšší mezní napětí stanovuje fib Model Code for Concrete Structures 2010 [10]. Mezi přístupy je však rozdíl v místě kontrolovaného obvodu, který ovlivňuje výslednou silovou únosnost v protlačení. Přístup ČSN EN 1992-1-1 [7] stanovuje únosnost v protlačení ve vzdálenosti $2d$ od líce sloupu, tomu odpovídá výsledná síla 445,117 kN. Druhý zde použitý přístup fib Model Code for Concrete Structures 2010 [10] stanovuje kontrolovaný obvod ve vzdálenosti $0,5d$ od líce sloupu, tomu odpovídá síla 208,319 kN. Grafické srovnání je vidět na Obrázek 27. Pomocí vzorku 1. OCEL bylo možné ověřit předpoklady a správnost zde použitých návrhových přístupů.



Obrázek 26: vzorek č. 1. OCEL srovnání návrhových přístupů při stanovení napětí na mezi únosnosti při protlačení



Obrázek 27: vzorek č. 1. OCEL srovnání návrhových přístupů při stanovení síly na mezi únosnosti při protlačení (u = vzdálenost kontrolovaného obvodu od líce sloupu)

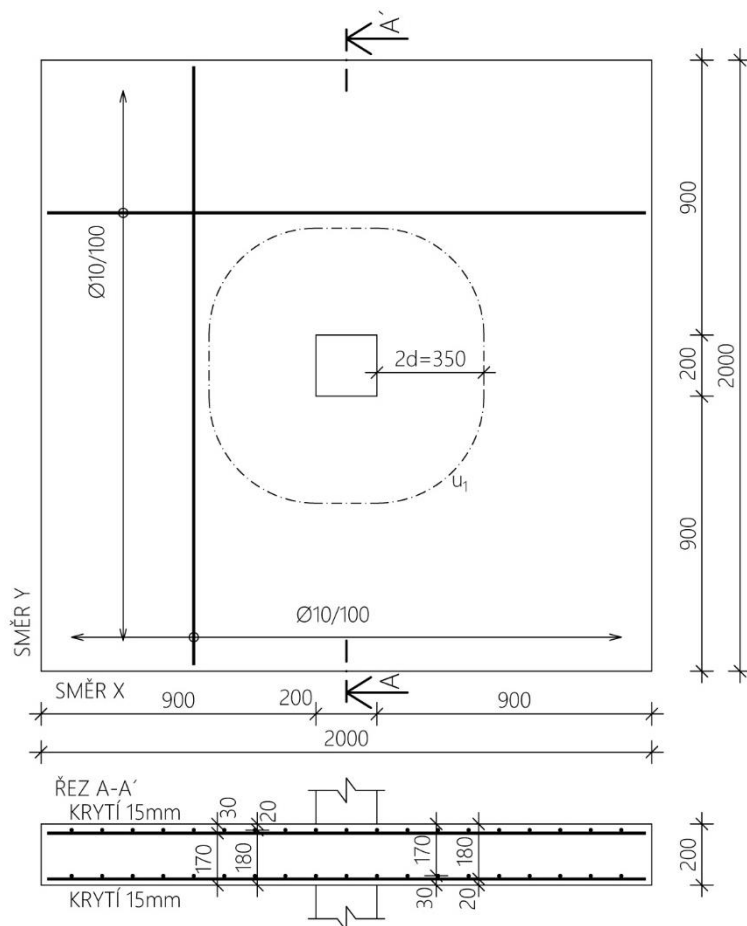
6.2.2 Vzorek č. 2. FRP

Tento vzorek byl vyztužen o stejné ploše výztuže jako varianta č. 1. OCEL. Byla zde výztuž o průměru 10 mm po 100 mm bez smykové výztuže. Hlavní podélná výztuž byla z GFRP. Vzorek č. 2. ověřoval přesnost a funkčnost upraveného vztahu (39) vycházející z ČSN EN 1992-1-1 [7] a (57) vycházející z fib Model Code for Concrete Structures 2010 [10]. Upravené vztahy stanovují pevnost v protlačení s FRP výztuží,

bez smykové výztuže. Pomocí vzorku č. 2. FRP bylo možné ověření stávajících návrhových přístupů na protlačení s FRP výztuží dle ACI 440.1R-15 [3] a CSA 806-12 [4].

Základní vstupní údaje pro výpočet:

- velikost desky 2000x2000 mm
- výška desky 200 mm
- velikost sloupu 200x200 mm
- střední pevnost betonu $f_{cm} = 28,0$ MPa, viz. Tabulka 3
- hlavní výztuž: GFRP, průměr 10 mm, $A_1 = 7,85E+1$ mm², ve vzdálenosti po 100 mm, viz. Tabulka 4
- krytí horní vrstvy výztuže $c = 15$ mm
- krytí dolní vrstvy výztuže $c = 15$ mm.



Obrázek 28: schéma horní výztuže a řezu pro vzorek č. 2. FRP

Tabulka 3: vstupní charakteristiky betonu pro stanovení únosnosti vzorku č. 2. FRP

Beton		
$f_{cm} =$	28.0	MPa
$f_{ct} =$	2.2	MPa
$E_{cm} =$	30.0	GPa
$\gamma_c =$	1	

Tabulka 4: vstupní charakteristiky FRP výztuže pro stanovení únosnosti vzorku č. 2. FRP

(*) odhad dovoleného přetvoření pro FRP podélnou výztuž

FRP		
$f_{FRP} =$	1350	MPa
$E_f =$	52,5	GPa
$\varepsilon_{f,LT} (*) =$	0,005	

6.2.2.1 Přístup dle upravené ČSN 1992-1-1 [7] pro FRP výztuž

6.2.2.1.1 Stanovení stupně vyztužení podélné výztuže

$$d_x = h - c - \frac{\phi_x}{2} = 200 - 15 - \frac{10}{2} = 180 \text{ mm}$$

$$d_y = h - c - \phi_x - \frac{\phi_y}{2} = 200 - 15 - 10 - \frac{10}{2} = 170 \text{ mm}$$

$$d = \frac{d_x + d_y}{2} = \frac{180 + 170}{2} = 175 \text{ mm}$$

$$c_x = 200 \text{ mm}$$

$$c_y = 200 \text{ mm}$$

$$b_x = c_x + 6 \cdot d = 200 + 6 \cdot 175 = 1250 \text{ mm (v této vzdálenosti se nachází 13 prutů, } A_{fx} = 1,02E+3 \text{ mm}^2)$$

$$b_y = c_y + 6 \cdot d = 200 + 6 \cdot 175 = 1250 \text{ mm (v této vzdálenosti se nachází 13 prutů, } A_{fy} = 1,02E+3 \text{ mm}^2)$$

$$\rho_x = \frac{A_{fx}}{b_x \cdot d_x} = \frac{1,02E+3}{1250 \cdot 180} = 0,00454$$

$$\rho_y = \frac{A_{fy}}{b_y \cdot d_y} = \frac{1,02E+3}{1250 \cdot 170} = 0,00480$$

$$\rho_1 = \sqrt{\rho_x \cdot \rho_y} = \sqrt{0,00454 \cdot 0,00480} = 0,00467$$

6.2.2.1.2 Stanovení kontrolovaného obvodu

$$u_1 = 2 \cdot (c_x + c_y) + 2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot d = 2 \cdot (200 + 200) + 2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot 175 = 2999,12 \text{ mm}$$

6.2.2.1.3 Stanovení únosnosti bez smykové výztuže

$$V_{Rd,c,FRP} = c_{Rd,c} k (100 \rho_1 c_{FRP} f_{cm})^{\frac{1}{3}} \geq v_{min}$$

$$c_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} = \frac{0,18}{1,0} = 0,18$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \Rightarrow 1 + \sqrt{\frac{200}{175}} = 2,0$$

$$c_{FRP} = \frac{E_f}{E_s} \cdot \frac{\varepsilon_{f,LT}}{\varepsilon_y} = \frac{52,5}{200} \cdot \frac{0,005}{0,0025} = 0,525$$

$$V_{Rd,c,FRP} = 0,18 \cdot 2,0 \cdot (100 \cdot 0,00467 \cdot 0,525 \cdot 28,0)^{\frac{1}{3}} = 0,684 \text{ MPa}$$

$$V_{Rd,c,FRP} = V_{Rd,c,FRP} \cdot u_1 \cdot d = 0,684 \cdot 2999,12 \cdot 175 = 359,082 \text{ kN}$$

6.2.2.1.4 Stanovení minimální pevnosti

$$v_{min} = 0,035 \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot f_{cm}^{\frac{1}{2}} = 0,035 \cdot 2,0^{\frac{3}{2}} \cdot 28,0^{\frac{1}{2}} = 0,524 \text{ MPa}$$

$$V_{min} = v_{min} \cdot u_1 \cdot d = 0,524 \cdot 2999,12 \cdot 175 = 274,931 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,c,FRP} = 0,684 \text{ MPa} > v_{min} 0,524 \text{ MPa}$$

6.2.2.2 Přístup dle upravené fib Model Code for Concrete Structures 2010 [10] pro FRP výztuž

6.2.2.2.1 Stanovení stupně vyztužení podélné výztuže

Stupeň vyztužení a účinná výška výztuže jsou stejné jako v případě dle upraveného vztahu z ČSN EN 1992-1-1 [7] pro FRP výztuž.

$$d = 175 \text{ mm}$$

$$\rho_f = 0,00467$$

6.2.2.2.2 Stanovení kontrolovaného obvodu

$$b_0 = 2 \cdot (c_x + c_y) + 2 \cdot \pi \cdot 0,5 \cdot d = 2 \cdot (200 + 200) + 2 \cdot \pi \cdot 0,5 \cdot 175 = 1349,78 \text{ mm}$$

6.2.2.2.3 Stanovení pootočení

Pootočení bude stanoveno dle úrovně I viz. kapitola 5.3.

$$\psi = 1,5 \cdot \frac{r_s}{d} \cdot \varepsilon_{f,LT},$$

vzdálenost nulového momentu $r_s = 1000 \text{ mm}$

$$\psi = 1,5 \cdot \frac{1000}{175} \cdot 0,005 = 0,043$$

6.2.2.2.4 Stanovení únosnosti bez smykové výztuže

$$v_{Rd,c} = k_{\psi} \frac{\sqrt{f_{cm}}}{\gamma_c}$$

$$k_{\psi} = \frac{1}{1,5 + 0,9 k_{dg} \psi d} \leq 0,6$$

$$k_{dg} = \frac{32}{16 + d_g} \geq 0,75 \Rightarrow \frac{32}{16 + 8} = 1,33 \geq 0,75$$

$$k_{\psi} = \frac{1}{1,5 + 0,9 \cdot 1,33 \cdot 0,043 \cdot 175} = 0,10 \leq 0,6$$

$$v_{Rd,c} = 0,10 \cdot \frac{\sqrt{28,0}}{1,0} = 0,504 \text{ MPa}$$

$$V_{Rd,c} = v_{Rd,c} \cdot b_0 \cdot d = 0,504 \cdot 1349,78 \cdot 175 = 119,039 \text{ kN}$$

6.2.2.3 Přístup dle ACI 440.1R-15 [3]

6.2.2.3.1 Stanovení stupně vyztužení podélné výztuže

Stupeň vyztužení a účinná výška výztuže jsou stejné jako v případě dle upraveného vztahu z ČSN EN 1992-1-1 [7] pro FRP výztuž.

$$d = 175 \text{ mm}$$

$$\rho_f = 0,00467$$

6.2.2.3.2 Stanovení kontrolovaného obvodu

$$b_0 = 2 \cdot (c_x + d) + 2 \cdot (c_y + d) = 2 \cdot (200 + 175) + 2 \cdot (200 + 175) = 1500 \text{ mm}$$

6.2.2.3.3 Stanovení únosnosti bez smykové výztuže

$$V_{Rd,c,FRP} = \frac{4}{5} \sqrt{f_{cm}} k$$

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

$$n_f = \frac{E_f}{E_c} = \frac{52,2}{30,0} = 1,750$$

$$k = \sqrt{2 \cdot 0,00467 \cdot 1,750 + (0,00467 \cdot 1,750)^2} - 0,00467 \cdot 1,750 = 0,120$$

$$V_{Rd,c,FRP} = \frac{4}{5} \sqrt{28,0} \cdot 0,120 = 0,508 \text{ MPa}$$

$$V_{Rd,c,FRP} = V_{Rd,c,FRP} \cdot b_0 \cdot d = 0,508 \cdot 1500 \cdot 175 = 133,267 \text{ kN}$$

6.2.2.4 Přístup dle CSA 806-12 [4]

6.2.2.4.1 Stanovení stupně vyztužení podélné výztuže

Stupeň vyztužení a účinná výška výztuže jsou stejné jako v případě dle upraveného vztahu z ČSN EN 1992-1-1 [7] pro FRP výztuž.

$$d = 175 \text{ mm}$$

$$\rho_f = 0,00467$$

6.2.2.4.2 Stanovení kontrolovaného obvodu

$$b_0 = 2 \cdot (c_x + d) + 2 \cdot (c_y + d) = 2 \cdot (200 + 175) + 22 \cdot (200 + 175) = 1500 \text{ mm}$$

6.2.2.4.3 Stanovení únosnosti bez smykové výztuže

$$V_{Rd,c,FRP} = \min. \{ 1 \cdot V_{Rd,c,FRP}; 2 \cdot V_{Rd,c,FRP}; 3 \cdot V_{Rd,c,FRP} \}$$

$$1 \cdot V_{Rd,c,FRP} = \left(1 + \frac{2}{\beta_c} \right) \left[0,028 \lambda \phi_c (E_F \rho_F f_{cm})^{\frac{1}{3}} \right]$$

$$\beta_c = \frac{c_x}{c_y} = \frac{200}{200} = 1,0$$

$$1 \cdot V_{Rd,c,FRP} = \left(1 + \frac{2}{1,0} \right) \cdot \left[0,028 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot (52,5 \cdot 0,00467 \cdot 28,0)^{\frac{1}{3}} \right] = 1,596 \text{ MPa}$$

$$2 \cdot V_{Rd,c,FRP} = \left[\left(\frac{\alpha_s d}{b_0} \right) + 0,19 \right] 0,147 \lambda \phi_c (E_F \rho_F f_{cm})^{\frac{1}{3}}$$

$$2. v_{Rd,c,FRP} = \left[\left(\frac{4 \cdot 175}{1500} \right) + 0,19 \right] \cdot 0,147 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot (52,5 \cdot 0,00467 \cdot 28,0)^{\frac{1}{3}} = 1,835 \text{ MPa}$$

$$3. v_{Rd,c,FRP} = 0,056 \lambda \phi_c (E_F \rho_F f_{cm})^{\frac{1}{3}}$$

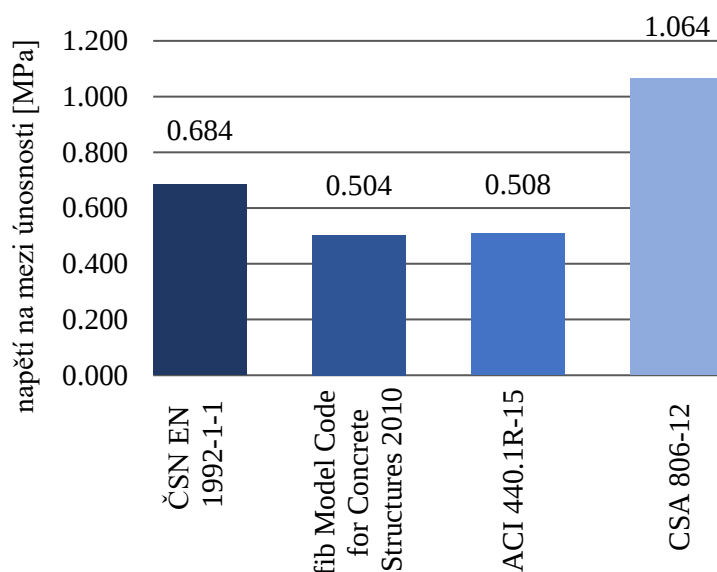
$$3. v_{Rd,c,FRP} = 0,056 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot (52,5 \cdot 0,00467 \cdot 28,0)^{\frac{1}{3}} = 1,064 \text{ MPa}$$

$$v_{Rd,c,FRP} = \min.\{1,596; 1,835; 1,064\} = 1,064 \text{ MPa}$$

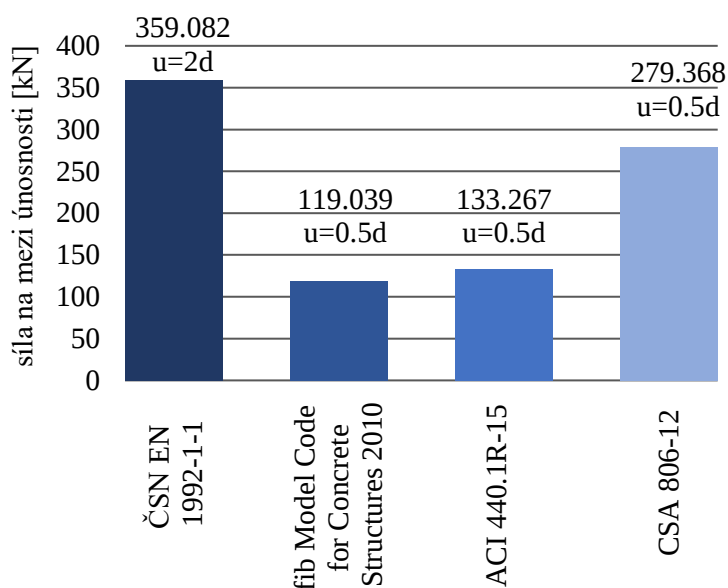
$$V_{Rd,c,FRP} = v_{Rd,c,FRP} \cdot b_0 \cdot d = 1,064 \cdot 1500 \cdot 175 = 279,368 \text{ kN}$$

6.2.2.5 Vyhodnocení předběžného návrhu vzorku č. 2. FRP

Výsledné hodnoty z předběžného návrhu dle jednotlivých přístupů jsou znázorněny na Obrázek 29. Nejvyšší hodnoty napětí na mezi únosnosti při protlačení bylo stanoveno dle CSA 806-12 [4], naopak nejnižší hodnoty bylo dosaženo dle fib Model Code for Concrete Structures 2010 [10] s úpravou pro FRP výztuž. Při stanovení hodnoty dle [10] vstupuje do výpočtu pootočení (dle úrovně I) dlouhodobé přetvoření FRP výztuže, které bylo odhadnuto na 0,005. Dlouhodobé přetvoření FRP výztuže také vstupuje do stanovení únosnosti bez smykové výztuže dle ČSN EN 1992-1-1 [7]. Ze zkoušek bylo možné přesně stanovit přetvoření ve výztuži a následně hodnotu upravit. Výsledné síly jsou závislé na místě, kde je uvažován kontrolovaný obvod. Pro ČSN EN 1992-1-1 [7], tj. kontrolovaný obvod ve vzdálenosti 2d od líce sloupu je únosnost při protlačení 359,082 kN. Zbývající přístupy uvažují kontrolovaný obvod ve vzdálenosti 0,5d od líce sloupu. Pro maximální hodnotu napětí (1,064 MPa) odpovídá síla 279,368 kN. Hodnoty pro všechny přístupy je možné porovnat na Obrázek 30. Vzorkem č. 2. FRP bylo možné pozorovat správnosti jednotlivých přístupů a případné rozdílné porušení oproti vzorku č. 1. OCEL se stejnou plochou vyztužení, ale rozdílnou osovou tuhostí výztuže.



Obrázek 29: vzorek č. 2. FRP srovnání návrhových přístupů při stanovení napětí na mezi únosnosti při protlačení



Obrázek 30: vzorek č. 2. FRP srovnání návrhových přístupů při stanovení síly na mezi únosnosti při protlačení (u = vzdálenost kontrolovaného obvodu od líce sloupu)

6.2.3 Vzorek č. 3. FRP-UTŘ

Tento vzorek byl vyztužen stejnou plochou podélné GFRP výztuže jako je vyztužen vzorek č. 2. FRP. Navíc zde byla doplněna smyková výztuž. U smykové výztuže byly odstraněny spodní části větví třmínků a tím se docílilo požadovaného tvaru „U“, viz. Obrázek 31. Díky tvaru „U“ se smyková výztuž nasunula až na hotový základní rastr. Nebylo nutné tvořit smykový kříž, který by se vkládal mezi spodní a

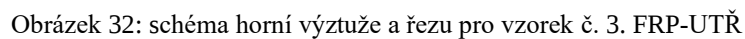
horní vrstvu výztuže. Pro zajištění polohy třmínků byly do rohů třmínků vloženy přídatné pruty GFRP průměru 10 mm. Z důvodu omezených rozměrů GFRP třmínků bylo nutné zvětšit krytí horní podélné výztuže na 20 mm. V případě tohoto vzorku se očekávaly větší deformace a nemělo dojít ke křehkému náhlému porušení. Tento vzorek sloužil pro ověření a případnou kalibraci vzorce (42) z ČSN EN 1992-1-1 [7] a (56) vycházející z fib Model Code for Concrete Structures 2010 [10]. Dále bylo možné porovnat návrhové přístupy upravené Hassanem a kol. [8] [9] uvedené v kapitole 3.4 této diplomové práce.



Obrázek 31: GFRP třmínky tvaru „U“

Základní vstupní údaje pro výpočet:

- velikost desky 2000x2000 mm
- výška desky 200 mm
- velikost sloupu 200x200 mm
- střední pevnost betonu $f_{cm} = 28,0$ MPa, viz. Tabulka 5
- hlavní výztuž: GFRP, průměr 10 mm, $A_{l1} = 7,85E+1$ mm², ve vzdálenosti po 100 mm, viz. Tabulka 6
- smyková výztuž: GFRP tvaru U, průměr 10 mm, $A_{w1} = 7,85E+1$ mm², ve vzdálenosti 0,5d, úhel mezi střednicí desky a třmínky 90°, viz. Tabulka 7
- krytí horní vrstvy výztuže $c = 20$ mm
- krytí dolní vrstvy výztuže $c = 15$ mm.



Beton		
$f_{cm} =$	28.0	MPa
$f_{ctm} =$	2.2	MPa
$E_{cm} =$	30.0	GPa
$\gamma_c =$	1	

Tabulka 6: vstupní charakteristiky FRP podélné výztuže pro stanovení únosnosti vzorku č. 3. FRP-UTŘ

(*) odhad dovoleného přetvoření pro FRP podélnou výztuž

FRP		
$f_{FRP} =$	1350	MPa
$E_f =$	52,5	MPa
$\varepsilon_{f,LT} (*) =$	0,005	

Tabulka 7: vstupní charakteristiky FRP smykové výztuže pro stanovení únosnosti vzorku č. 3. FRP-UTŘ

(*) únosnost FRP třmíneků včetně redukce pevnosti v místě ohybů

(**) odhad dovoleného přetvoření pro FRP třmínky

FRP		
$f_{FRP} (*) =$	700	MPa
$E_f =$	52,5	GPa
$\varepsilon_{f,LT} (*) =$	0,005	

6.2.3.1 Přístup dle upravené ČSN 1992-1-1 [7] pro FRP výztuž

6.2.3.1.1 Stanovení stupně vyztužení podélné výztuže

$$d_{x,l} = h - c - \frac{\phi_x}{2} = 200 - 20 - \frac{10}{2} = 175 \text{ mm (podélná výztuž)}$$

$$d_{x,p} = h - c - \frac{\phi_x}{2} = 200 - 20 - \frac{10}{2} = 175 \text{ mm (přídavná výztuž)}$$

$$d_{y,l} = h - c - \phi_x - \frac{\phi_y}{2} = 200 - 20 - 10 - \frac{10}{2} = 165 \text{ mm (podélná výztuž)}$$

$$d_{y,p} = h - c - \phi_x - \frac{\phi_y}{2} = 200 - 20 - 10 - \frac{10}{2} = 165 \text{ mm (přídavná výztuž)}$$

$$d = \frac{d_x + d_y}{2} = \frac{175 + 165}{2} = 170 \text{ mm}$$

$$c_x = 200 \text{ mm}$$

$$c_y = 200 \text{ mm}$$

$$b_x = c_x + 6 \cdot d = 200 + 6 \cdot 170 = 1220 \text{ mm (v této vzdálenosti se nachází 13 prutů podélné výztuže, } A_{fx,l} = 1,02E+3 \text{ mm}^2; \text{ 2 přídavné pruty pro zajištění pozice třmíneků, } A_{fx,p} = 1,57E+2 \text{ mm}^2)$$

$b_y = c_y + 6 \cdot d = 200 + 6 \cdot 170 = 1220 \text{ mm}$ (v této vzdálenosti se nachází 13 prutů podélné výztuže, $A_{fy,l} = 1,02\text{E}+3 \text{ mm}^2$; 2 přídatné pruty pro zajištění pozice třmínků, $A_{fy,p} = 1,57\text{E}+2 \text{ mm}^2$)

$$\rho_{x,l} = \frac{A_{fx,l}}{b_x \cdot d_{x,l}} = \frac{1,02\text{E}+3}{1220 \cdot 175} = 0,00478$$

$$\rho_{x,p} = \frac{A_{fx,p}}{b_x \cdot d_{x,p}} = \frac{1,57\text{E}+2}{1220 \cdot 175} = 0,00074$$

$$\rho_{y,l} = \frac{A_{fy}}{b_y \cdot d_{y,l}} = \frac{1,02\text{E}+3}{1220 \cdot 165} = 0,00507$$

$$\rho_{y,p} = \frac{A_{fy}}{b_y \cdot d_{y,p}} = \frac{1,57\text{E}+2}{1220 \cdot 165} = 0,00078$$

$$\rho_1 = \sqrt{(\rho_{x,l} + \rho_{x,p}) \cdot (\rho_{y,l} + \rho_{y,p})} = \sqrt{(0,00478 + 0,00074) \cdot (0,00507 + 0,00078)} = 0,00568$$

6.2.3.2 Stanovení kontrolovaného obvodu

$$u_1 = 2 \cdot (c_x + c_y) + 2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot d = 2 \cdot (200 + 200) + 2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot 170 = 2936,283 \text{ mm}$$

$u_{ef} = 1807,586 \text{ mm}$, vychází z článku o protlačení [11].

6.2.3.3 Stanovení únosnosti bez smykové výztuže

$$V_{Rd,c,FRP} = c_{Rd,c} k (100 \rho_1 c_{FRP} f_{cm})^{\frac{1}{3}} \geq V_{min}$$

$$c_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} = \frac{0,18}{1,0} = 0,18$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \Rightarrow 1 + \sqrt{\frac{200}{170}} = 2,0$$

$$c_{FRP} = \frac{E_f}{E_s} \cdot \frac{\varepsilon_{f,LT}}{\varepsilon_y} = \frac{52,5}{200} \cdot \frac{0,005}{0,0025} = 0,525$$

$$V_{Rd,c,FRP} = 0,18 \cdot 2,0 \cdot (100 \cdot 0,00568 \cdot 0,525 \cdot 28,0)^{\frac{1}{3}} = 0,730 \text{ MPa}$$

$$V_{Rd,c,FRP} = V_{Rd,c,FRP} \cdot u_1 \cdot d = 0,730 \cdot 2936,283 \cdot 170 = 364,621 \text{ kN}$$

6.2.3.4 Stanovení minimální pevnosti

$$v_{min} = 0,035 \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot f_{cm}^{\frac{1}{2}} = 0,035 \cdot 2,0^{\frac{3}{2}} \cdot 28,0^{\frac{1}{2}} = 0,524 \text{ MPa}$$

$$V_{min} = v_{min} \cdot u_1 \cdot d = 0,524 \cdot 2936,283 \cdot 170 = 261,480 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,c,FRP}=0,730 \text{ MPa} > V_{\min} 0,524 \text{ MPa}$$

6.2.3.5 Stanovení únosnosti se smykovou výztuží

$$V_{Rd,cf,FRP}=0,75V_{Rd,c,FRP}+1,5\left(\frac{d}{s_r}\right)A_{FRPw}f_{fw}\left(\frac{1}{u_{ef}d}\right)\sin\alpha < k_{\max}V_{Rd,c,FRP}$$

$$s_r=0,5\cdot d=0,5\cdot 170=85 \text{ mm}$$

$$A_{FRPw}=A_{w1}\cdot n=7,85E+1\cdot 8=6,28E+2 \text{ mm}^2 \text{ (na jednom obvodu je 8 větví třmínků)}$$

$$f_{fw}=\varepsilon_{f,LT}\cdot E_f=0,005\cdot 52500=262,5 \text{ MPa}$$

$$V_{Rd,cf,FRP}=0,75\cdot 0,730+1,5\left(\frac{170}{85}\right)\cdot 628,319\cdot 262,5\cdot\left(\frac{1}{1807,586\cdot 170}\right)\cdot \sin 90=2,158 \text{ MPa}$$

$$k_{\max}=1,45$$

$$V_{Rd,cf,FRP}=2,158 \text{ MPa} > 1,45\cdot 0,730=1,059 \text{ MPa}$$

$$V_{Rd,cf,FRP}=V_{Rd,cf,FRP}\cdot u_{ef}\cdot d=2,158\cdot 1807,586\cdot 170=663,147 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,cf,FRP}=663,147 \text{ kN} > 1,45\cdot 364,621=528,701 \text{ MPa}$$

6.2.3.6 Přístup dle upravené fib Model Code for Concrete Structures 2010 [10] pro FRP výztuž

6.2.3.6.1 Stanovení stupně vyztužení podélné výztuže

Stupeň vyztužení a účinná výška výztuže jsou stejné jako v případě dle upraveného vztahu z ČSN EN 1992-1-1 [7] pro FRP výztuž.

$$d=170 \text{ mm}$$

$$\rho_f=0,00568$$

6.2.3.6.2 Stanovení kontrolovaného obvodu

$$b_0=2\cdot(c_x+c_y)+2\cdot\pi\cdot 0,5\cdot d=2\cdot(200+200)+2\cdot\pi\cdot 0,5\cdot 170=1334,071 \text{ mm}$$

6.2.3.6.3 Stanovení pootočení

Pootočení bude stanoveno dle úrovně I viz. kapitola 5.3.

$$\psi=1,5\cdot\frac{r_s}{d}\cdot\varepsilon_{f,LT},$$

vzdálenost nulového momentu $r_s=1000 \text{ mm}$

$$\psi=1,5\cdot\frac{1000}{170}\cdot 0,005=0,044$$

6.2.3.6.4 Stanovení únosnosti bez smykové výztuže

$$v_{Rd,c} = k_{\psi} \frac{\sqrt{f_{cm}}}{\gamma_c}$$

$$k_{\psi} = \frac{1}{1,5 + 0,9 k_{dg} \psi d} \leq 0,6$$

$$k_{dg} = \frac{32}{16 + d_g} \geq 0,75 \Rightarrow \frac{32}{16 + 8} = 1,33 \geq 0,75$$

$$k_{\psi} = \frac{1}{1,5 + 0,9 \cdot 1,33 \cdot 0,044 \cdot 170} = 0,10 \leq 0,6$$

$$v_{Rd,c,FRP} = 0,10 \cdot \frac{\sqrt{28,0}}{1,0} = 0,504 \text{ MPa}$$

$$V_{Rd,c,FRP} = v_{Rd,c,FRP} \cdot b_0 \cdot d = 0,504 \cdot 1334,07 \cdot 170 = 114,292 \text{ kN}$$

6.2.3.7 Stanovení únosnosti se smykovou výztuží

$$V_{Rd,cs,FRP} = V_{Rd,c,FRP} + V_{Rd,s,FRP}$$

$$V_{Rd,s,FRP} = \sum A_{fw} k_e \sigma_{fwd} \sin \alpha$$

$$\sigma_{fwd} = \frac{E_f \psi}{6} (\sin \alpha + \cos \alpha) \left(\sin \alpha + \frac{f_{bd}}{f_{fwd}} \cdot \frac{d}{\phi_w} \right) \leq f_{fwd}$$

$$f_{fwd} = 0,005 \cdot 52500 = 262,5 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{fwd} = \frac{52500 \cdot 0,044}{6} (\sin 90 + \cos 90) \left(\sin 90 + \frac{3}{262,5} \cdot \frac{170}{10} \right) = 461,029 \text{ MPa} \leq 262,5 \text{ MPa}$$

$$A_{fw} = 7,85E+1 \cdot 4 \cdot 4 = 1,26E+3 \text{ mm}^2 \text{ (2ks třmínků = 4ks větví, 4 strany)}$$

$$V_{Rd,s,FRP} = 1256,64 \cdot 0,9 \cdot 262,5 \cdot \sin 90 = 296,881 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,cs,FRP} = 114,292 + 296,881 = 411,173 \text{ kN}$$

$$k_{sys} = 2,0$$

$$v_{Rd,max} = k_{sys} k_{\psi} \frac{\sqrt{f_{cm}}}{\gamma_c} \leq \frac{\sqrt{f_{cm}}}{\gamma_c}$$

$$v_{Rd,max} = 2,0 \cdot 0,10 \cdot \frac{\sqrt{28,0}}{1,0} \leq \frac{\sqrt{28,0}}{1,0}$$

$$v_{Rd,max} = 1,008 \text{ MPa} \leq 5,292 \text{ MPa}$$

$$V_{Rd,max}=V_{Rd,max}b_0d$$

$$V_{Rd,max}=1,008 \cdot 1334,071 \cdot 170=228,585 \text{ kN}$$

6.2.3.8 Přístup dle ACI 440.1R-15 [3] s úpravou dle Hassan [8]

6.2.3.8.1 Stanovení stupně vyztužení podélné výztuže

Stupeň vyztužení a účinná výška výztuže jsou stejné jako v případě dle upraveného vztahu z ČSN EN 1992-1-1 [7] pro FRP výztuž.

$$d=170 \text{ mm}$$

$$\rho_f=0,00568$$

6.2.3.8.2 Stanovení kontrolovaného obvodu

$$b_0=2 \cdot (c_x+d)+2 \cdot (c_y+d)=2 \cdot (200+170)+2 \cdot (200+170)=1480 \text{ mm}$$

6.2.3.8.3 Stanovení únosnosti bez smykové výztuže

$$V_{Rd,c,FRP}=\frac{2}{5}\sqrt{f_{cm}}k$$

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

$$n_f=\frac{E_f}{E_c}=\frac{52,2}{30,0}=1,750$$

$$k=\sqrt{2 \cdot 0,00568 \cdot 1,750+(0,00568 \cdot 1,750)^2}-0,00568 \cdot 1,750=0,131$$

$$V_{Rd,c,FRP}=\frac{2}{5}\sqrt{28,0} \cdot 0,131=0,278 \text{ MPa}$$

$$V_{Rd,c,FRP}=V_{Rd,c,FRP} \cdot b_0 \cdot d=0,278 \cdot 1480 \cdot 170=69,995 \text{ kN}$$

6.2.3.9 Stanovení únosnosti se smykovou výztuží

$$V_{Rd,cf,FRP}=V_{Rd,c,FRP}+V_{Rd,f,FRP}$$

$$V_{Rd,f,FRP}=\frac{\phi_f A_{fv}(0,004E_{fv})}{b_0 s_{fv}}$$

$$A_{FRPw}=A_{w1} \cdot n=7,85E+1 \cdot 8=6,28E+2 \text{ mm}^2 \text{ (na kontrolovaném obvodu je 8 větví třmínků)}$$

$$V_{Rd,f,FRP}=\frac{1 \cdot 628,319 \cdot (0,004 \cdot 52500)}{1480 \cdot 0,85}=1,049 \text{ MPa}$$

$$V_{Rd,cf,FRP}=0,278+1,049=1,327 \text{ MPa}$$

$$V_{Rd,cf,FRP}=V_{Rd,cf,FRP} \cdot b_0 \cdot d=1,327 \cdot 1480 \cdot 170=333,888 \text{ kN}$$

6.2.3.10 Přístup dle CSA 806-12 [4] s úpravou dle Hassan [8]

6.2.3.10.1 Stanovení stupně vyztužení podélné výztuže

Stupeň vyztužení a účinná výška výztuže jsou stejné jako v případě dle upraveného vztahu z ČSN EN 1992-1-1 [7] pro FRP výztuž.

$$d=170 \text{ mm}$$

$$\rho_f=0,00568$$

6.2.3.10.2 Stanovení kontrolovaného obvodu

$$b_0=2 \cdot (c_x+d)+2 \cdot (c_y+d)=2 \cdot (200+170)+22 \cdot (200+170)=1480 \text{ mm}$$

6.2.3.10.3 Stanovení únosnosti bez smykové výztuže

$$V_{Rd,c,FRP}=0,028\lambda\phi_c(E_{FP}f_{cm})^{\frac{1}{3}}$$

$$V_{Rd,c,FRP}=0,028 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot (52,5 \cdot 0,00568 \cdot 28,0)^{\frac{1}{3}}=0,568 \text{ MPa}$$

$$V_{Rd,c,FRP}=V_{Rd,c,FRP} \cdot b_0 \cdot d=0,568 \cdot 1480,0 \cdot 170=142,942 \text{ kN}$$

6.2.3.11 Stanovení únosnosti se smykovou výztuží

$$V_{Rd,cf,FRP}=V_{Rd,c,FRP}+V_{Rd,f,FRP}$$

$$V_{Rd,f,FRP}=\frac{\phi_f A_{fv}(0,005E_{fv})}{b_0 s_{fv}}$$

$$A_{FRPW}=A_{w1} \cdot n=7,85E+1 \cdot 8=6,28E+2 \text{ mm}^2 \text{ (na kontrolovaném obvodu je 8 větví třmínků)}$$

$$V_{Rd,f,FRP}=\frac{1 \cdot 628,319 \cdot (0,005 \cdot 52500)}{1480,0 \cdot 85}=1,311 \text{ MPa}$$

$$V_{Rd,cf,FRP}=0,568+1,311=1,879 \text{ MPa}$$

$$V_{Rd,cf,FRP}=V_{Rd,cf,FRP} \cdot b_0 \cdot d=1,879 \cdot 1480,0 \cdot 170=472,810 \text{ kN}$$

6.2.3.12 Přístup dle Hassan [9]

6.2.3.12.1 Stanovení stupně vyztužení podélné výztuže

Stupeň vyztužení a účinná výška výztuže jsou stejné jako v případě dle upraveného vztahu z ČSN EN 1992-1-1 [7] pro FRP výztuž.

$$d=170 \text{ mm}$$

$$\rho_f=0,00568$$

6.2.3.12.2 Stanovení kontrolovaného obvodu

$$b_0 = 2 \cdot (c_x + d) + 2 \cdot (c_y + d) = 2 \cdot (200 + 170) + 22 \cdot (200 + 170) = 1480 \text{ mm}$$

6.2.3.12.3 Stanovení únosnosti bez smykové výztuže

$$V_{Rd,c,FRP} = \beta_0 \cdot 0,056 \lambda \phi_c (E_F \rho_F f_{cm})^{\frac{1}{3}}$$

$$V_{Rd,c,FRP} = 0,64 \cdot 0,056 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot (52,5 \cdot 0,00568 \cdot 28,0)^{\frac{1}{3}} = 0,727 \text{ MPa}$$

$$V_{Rd,c,FRP} = V_{Rd,c,FRP} \cdot b_0 \cdot d = 0,727 \cdot 1480,0 \cdot 170 = 182,966 \text{ kN}$$

6.2.3.13 Stanovení únosnosti se smykovou výztuží

$$V_{Rd,cf,FRP} = V_{Rd,c,FRP} + V_{Rd,f,FRP}$$

$$V_{Rd,f,FRP} = \frac{\phi_f A_{fv} (0,004 E_{fv})}{b_0 s_{fv}}$$

$$A_{FRPw} = A_{w1} \cdot n = 7,85E + 1 \cdot 8 = 6,28E + 2 \text{ mm}^2 \text{ (na kontrolovaném obvodu je 8 větví třmínků)}$$

$$V_{Rd,f,FRP} = \frac{1 \cdot 628,319 \cdot (0,004 \cdot 52500)}{1480,0 \cdot 85} = 1,049 \text{ MPa}$$

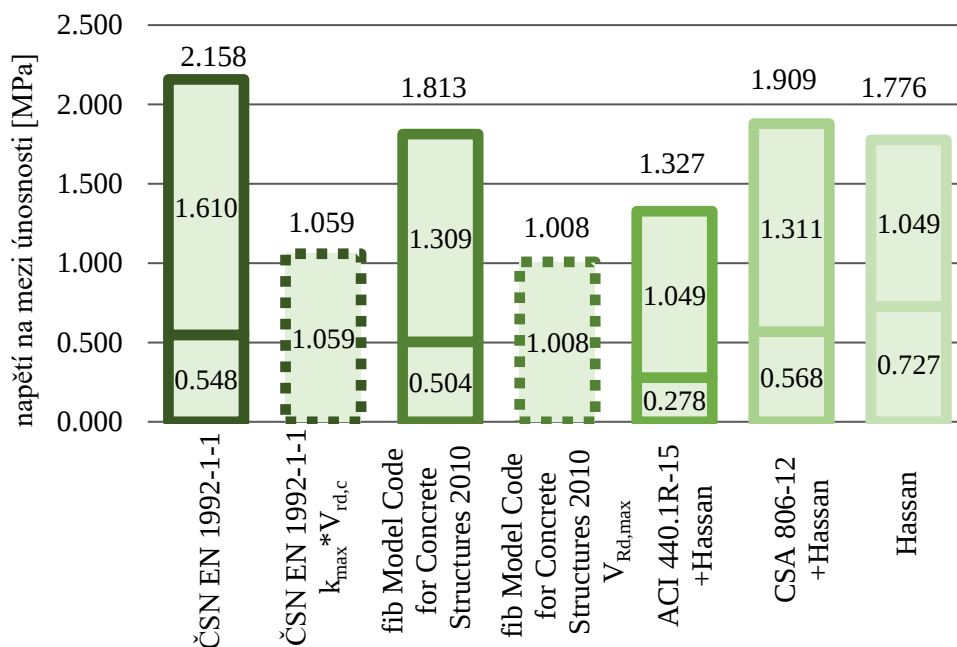
$$V_{Rd,cf,FRP} = 0,727 + 1,049 = 1,776 \text{ MPa}$$

$$V_{Rd,cf,FRP} = V_{Rd,cf,FRP} \cdot b_0 \cdot d = 1,776 \cdot 1480,0 \cdot 170 = 446,860 \text{ kN}$$

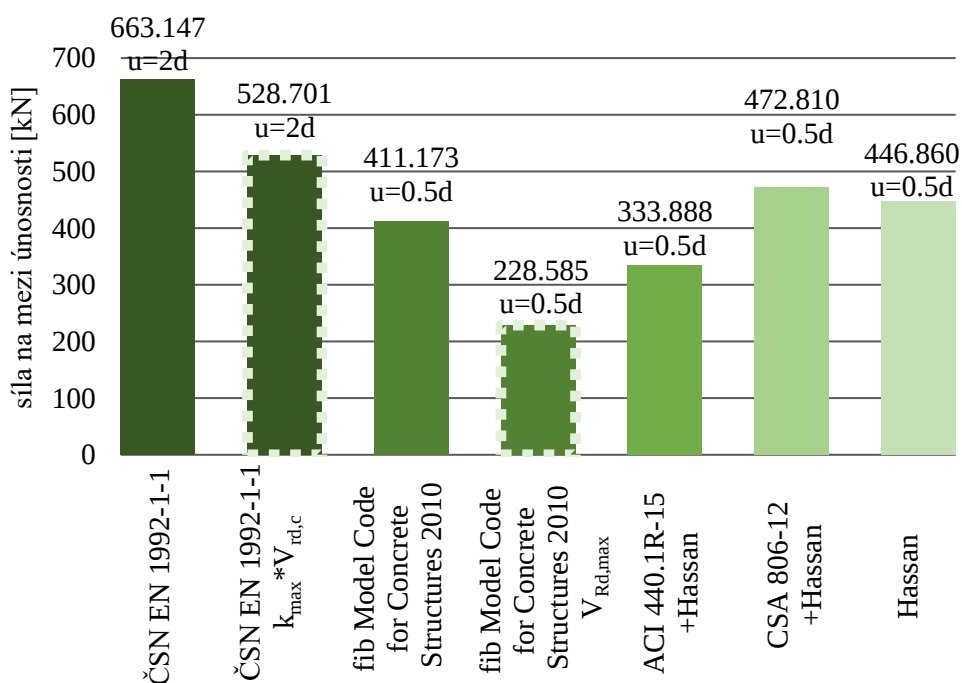
6.2.3.14 Vyhodnocení předběžného návrhu vzorku č. 3. FRP-UTŘ

Stanovení napětí na mezi únosnosti při protlačení se smykovou výztuží se skládá z příspěvku betonu a smykové výztuže. Na Obrázek 33 jsou znázorněny jednotlivé příspěvky pro použité předpisy v předběžném návrhu pro vzorek č. 3. FRP-UTŘ. Na Obrázek 34 jsou porovnány výsledné síly, které jsou vztaženy k různým kontrolovaným obvodům. Přístup dle upravené ČSN EN 1992-1-1 [7] pro FRP výztuž uvažuje kontrolovaný obvod ve vzdálenosti $2d$ od líce sloupu, zbývající přístupy uvažují kontrolovaný obvod ve vzdálenosti $0,5d$ od líce sloupu. Nejvyšší hodnotu dosahuje návrh dle upravené ČSN EN 1992-1-1 [7] pro FRP výztuž. Výsledná únosnost by měla být 659,040 kN, při omezení s ohledem na porušení betonu v tlaku by měla být únosnost 515,800 kN. V případě správnosti omezení pevnosti betonu dle fib Model Code for Concrete Structures 2010 [10] by měla únosnost 238,079 kN. Nejnižší hodnota z přímo určených přístupů pro návrh FRP je stanovena dle ACI 440.1R-15 [3] s úpravou Hassana [8]. Všechny přístupy omezují přetvoření v FRP třmínkách a některé z nich

uvažují také přetvoření v podélné FRP výztuži. Pomocí tohoto vzorku byla snaha experimentálně stanovit přetvoření v FRP výztužích (podélná a třmínky) pro další stanovení únosnosti v protlačení s využitím kompozitní výztuže.



Obrázek 33: vzorek 3. FRP-UTŘ srovnání návrhových přístupů při stanovení napětí na mezi únosnosti při protlačení se smykovou výztuží (spodní hodnota = příspěvek betonu, horní hodnota = příspěvek smykové výztuže při stanovení únosnosti se smykovou výztuží)



Obrázek 34: vzorek 3. FRP-UTŘ srovnání návrhových přístupů při stanovení síly na mezi únosnosti při protlačení (u = vzdálenost kontrolovaného obvodu od líce sloupu)

6.2.4 Vzorek č. 4. FRP-45TŘ

Tento vzorek byl vyztužen stejnou plochou GFRP výztuže jako vzorek č. 2. FRP. Navíc byl doplněn o smykovou GFRP výztuž. Je to alternativní varianta ke vzorku č. 3. FRP-UTŘ. V tomto případě se mezi horní a spodní vrstvu výztuže vkládal smykový kříž. Tento kříž tvořily podélné pruty GFRP o průměru 10 mm a třmínky z kompozitní výztuže. Úhel mezi střednicí desky a smykovou výztuží byl 45° . Bylo tedy možné porovnat vliv tvaru a orientace smykové výztuže. V případě tohoto vzorku se očekávaly obdobné deformace a chování jako u varianty s třmínky tvaru „U“. Tento vzorek sloužil pro ověření a případnou kalibraci vzorce (42) z ČSN EN 1992-1-1 [7] a (56) vycházející z fib Model Code for Concrete Structures 2010 [10]. Pomocí tohoto vzorku bylo možné porovnat návrhové přístupy upravené Hassanem a kol. [8] [9] uvedené v kapitole 3.4 této diplomové práce.

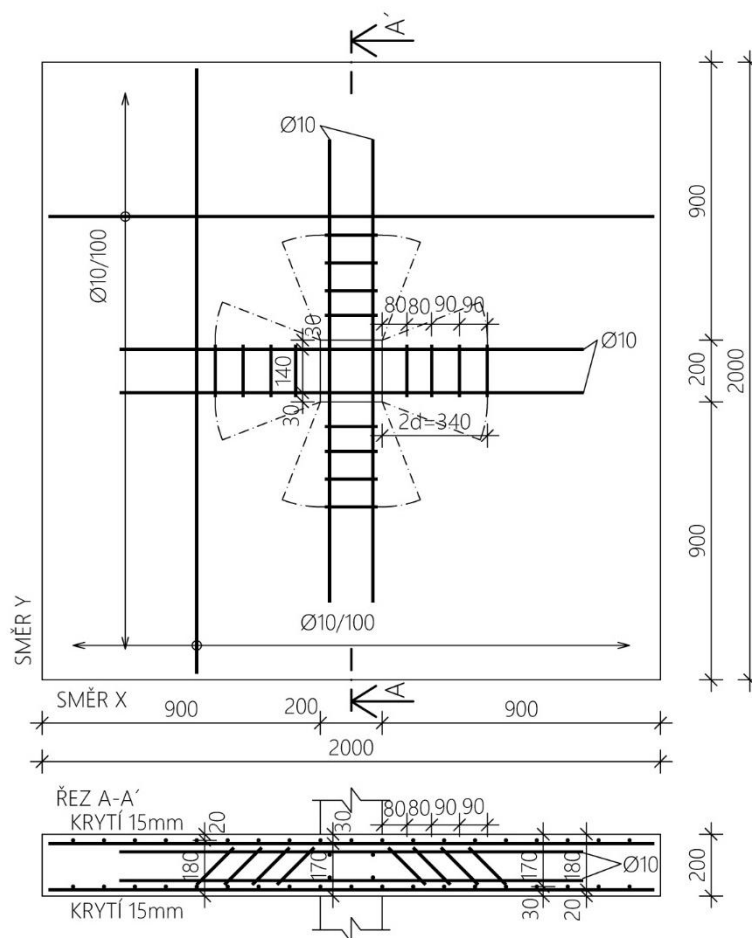


Obrázek 35: GFRP třmínky bez úprav

Základní vstupní údaje pro výpočet:

- velikost desky 2000x2000 mm
- výška desky 200 mm
- velikost sloupu 200x200 mm
- střední pevnost betonu $f_{cm} = 28,0$ MPa, viz. Tabulka 8
- hlavní výztuž: GFRP, průměr 10 mm, $A_{l1} = 7,85E+1$ mm², ve vzdálenosti po 100 mm, viz. Tabulka 9
- smyková výztuž: GFRP plného tvaru, průměr 10 mm, $A_{w1} = 7,85E+1$ mm², ve vzdálenosti 0,5d, úhel mezi deskou a třmínky 45° , viz. Tabulka 10

- krytí horní vrstvy výztuže $c = 15 \text{ mm}$
- krytí dolní vrstvy výztuže $c = 15 \text{ mm}$.



Obrázek 36: schéma horní výztuže a řezu pro vzorek č. 4. FRP-45TŘ

Tabulka 8: vstupní charakteristiky betonu pro stanovení únosnosti vzorku č. 4. FRP-45TŘ

Beton		
$f_{cm} =$	28.0	MPa
$f_{ct} =$	2.2	MPa
$E_{cm} =$	30.0	GPa
$\gamma_c =$	1	

Tabulka 9: vstupní charakteristiky FRP podélné výztuže pro stanovení únosnosti vzorku č. 4. FRP-45TŘ

(*) odhad dovoleného přetvoření pro FRP podélnou výztuž

FRP		
$f_{FRP} =$	1350	MPa
$E_f =$	52,5	MPa
$\varepsilon_{f,LT} (*) =$	0,005	

Tabulka 10: vstupní charakteristiky FRP smykové výztuže pro stanovení únosnosti vzorku č. 4. FRP-45TŘ

(*) únosnost FRP třmínků včetně redukce pevnosti v místě ohybů

(**) odhad dovoleného přetvoření pro FRP třmínky

FRP		
$f_{FRP} (*) =$	700	MPa
$E_f =$	52,5	GPa
$\varepsilon_{f,LT} (*) =$	0,005	

6.2.4.1 Přístup dle upravené ČSN 1992-1-1 [7] pro FRP výztuž

6.2.4.1.1 Stanovení stupně vyztužení podélné výztuže

$$d_{x,l} = h - c - \frac{\phi_x}{2} = 200 - 15 - \frac{10}{2} = 180 \text{ mm (podélná výztuž 13ks)}$$

$$d_{x,k} = 143 \text{ mm (výztuž kříže 2ks – předpokládaná poloha)}$$

$$d_{y,l} = h - c - \phi_x - \frac{\phi_y}{2} = 200 - 15 - 10 - \frac{10}{2} = 170 \text{ mm (podélná výztuž 13ks)}$$

$$d_{y,k} = 133 \text{ mm (přídavná kříže 2ks – předpokládaná poloha)}$$

$$d = \frac{d_{x,l} \cdot n_{x,l} + d_{x,k} \cdot n_{x,k} + d_{y,l} \cdot n_{y,l} + d_{y,k} \cdot n_{y,k}}{n_{x,l} + n_{x,k} + n_{y,l} + n_{y,k}} = \frac{180 \cdot 13 + 143 \cdot 2 + 170 \cdot 13 + 133 \cdot 2}{13 + 2 + 13 + 2} = 170 \text{ mm}$$

$$c_x = 200 \text{ mm}$$

$$c_y = 200 \text{ mm}$$

$$b_x = c_x + 6 \cdot d = 200 + 6 \cdot 170 = 1220 \text{ mm (v této vzdálenosti se nachází 13 prutů podélné výztuže, } A_{fx,l} = 1,02E+3 \text{ mm}^2; 2 \text{ pruty smykového kříže, } A_{fx,k} = 1,57E+2 \text{ mm}^2)$$

$b_y = c_y + 6 \cdot d = 200 + 6 \cdot 170 = 1220 \text{ mm}$ (v této vzdálenosti se nachází 13 prutů podélné výztuže, $A_{fy,l} = 1,02\text{E}+3 \text{ mm}^2$; 2 pruty smykového kříže, $A_{fy,k} = 1,57\text{E}+2 \text{ mm}^2$)

$$\rho_{x,l} = \frac{A_{fx,l}}{b_x \cdot d_{x,l}} = \frac{1,02\text{E}+3}{1220 \cdot 180} = 0,00465$$

$$\rho_{x,k} = \frac{A_{fx,k}}{b_x \cdot d_{x,k}} = \frac{1,57\text{E}+2}{1220 \cdot 143} = 0,00090$$

$$\rho_{y,l} = \frac{A_{fy}}{b_y \cdot d_{y,l}} = \frac{1,02\text{E}+3}{1220 \cdot 170} = 0,00492$$

$$\rho_{y,p} = \frac{A_{fy}}{b_y \cdot d_{y,p}} = \frac{1,57\text{E}+2}{1220 \cdot 133} = 0,00097$$

$$\rho_l = \sqrt{(\rho_{x,l} + \rho_{x,k}) \cdot (\rho_{y,l} + \rho_{y,k})} = \sqrt{(0,00465 + 0,00090) \cdot (0,00492 + 0,00097)} = 0,00572$$

6.2.4.2 Stanovení kontrolovaného obvodu

$$u_l = 2 \cdot (c_x + c_y) + 2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot d = 2 \cdot (200 + 200) + 2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot 170 = 2936,283 \text{ mm}$$

$u_{ef} = 1807,586 \text{ mm}$, vychází z článku o protlačení [11].

6.2.4.3 Stanovení únosnosti bez smykové výztuže

$$V_{Rd,c,FRP} = c_{Rd,c} k (100 \rho_l c_{FRP} f_{cm})^{\frac{1}{3}} \geq v_{min}$$

$$c_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} = \frac{0,18}{1,0} = 0,18$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \Rightarrow 1 + \sqrt{\frac{200}{170}} = 2,0$$

$$c_{FRP} = \frac{E_f}{E_s} \cdot \frac{\varepsilon_{f,LT}}{\varepsilon_y} = \frac{52,5}{200} \cdot \frac{0,005}{0,0025} = 0,525$$

$$V_{Rd,c,FRP} = 0,18 \cdot 2,0 \cdot (100 \cdot 0,00572 \cdot 0,525 \cdot 28,0)^{\frac{1}{3}} = 0,732 \text{ MPa}$$

$$V_{Rd,c,FRP} = V_{Rd,c,FRP} \cdot u_l \cdot d = 0,732 \cdot 2936,283 \cdot 170 = 365,370 \text{ kN}$$

6.2.4.4 Stanovení minimální pevnosti

$$v_{min} = 0,035 \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}} = 0,035 \cdot 2,0^{\frac{3}{2}} \cdot 28,0^{\frac{1}{2}} = 0,524 \text{ MPa}$$

$$V_{min} = v_{min} \cdot u_l \cdot d = 0,524 \cdot 2936,283 \cdot 170 = 261,480 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,c,FRP} = 0,732 \text{ MPa} > v_{min} 0,524 \text{ MPa}$$

6.2.4.5 Stanovení únosnosti se smykovou výztuží

$$V_{Rd,cf,FRP}=0,75V_{Rd,c,FRP}+1,5\left(\frac{d}{s_r}\right)A_{FRPw}f_{fw}\left(\frac{1}{u_{ef}d}\right)\sin\alpha < k_{max}V_{Rd,c,FRP}$$

$$s_r=0,5\cdot d=0,5\cdot 170=85\text{ mm}$$

$$A_{FRPw}=A_{w1}\cdot n=7,85E+1\cdot 8=6,28E+2\text{ mm}^2\text{ (na jednom obvodu je 8 větví třmínků)}$$

$$f_{fw}=\varepsilon_{f,LT}\cdot E_f=0,005\cdot 52500=262,5\text{ MPa}$$

$$V_{Rd,cf,FRP}=0,75\cdot 0,732+1,5\left(\frac{170}{85}\right)\cdot 628,319\cdot 262,5\cdot\left(\frac{1}{1807,586\cdot 170}\right)\cdot \sin 45=1,688\text{ MPa}$$

$$k_{max}=1,45$$

$$V_{Rd,cf,FRP}=1,688\text{ MPa}>1,45\cdot 0,732=1,061\text{ MPa}$$

$$V_{Rd,cf,FRP}=V_{Rd,cf,FRP}\cdot u_{ef}\cdot d=1,688\cdot 1807,586\cdot 170=518,569\text{ kN}$$

$$V_{Rd,cf,FRP}=518,569\text{ kN}>1,45\cdot 365,370=529,787\text{ MPa}$$

6.2.4.6 Přístup dle upravené fib Model Code for Concrete Structures 2010 [10] pro FRP výztuž

6.2.4.6.1 Stanovení stupně vyztužení podélné výztuže

Stupeň vyztužení a účinná výška výztuže jsou stejné jako v případě dle upraveného vztahu z ČSN EN 1992-1-1 [7] pro FRP výztuž.

$$d=170\text{ mm}$$

$$\rho_f=0,00572$$

6.2.4.6.2 Stanovení kontrolovaného obvodu

$$b_0=2\cdot(c_x+c_y)+2\cdot\pi\cdot 0,5\cdot d=2\cdot(200+200)+2\cdot\pi\cdot 0,5\cdot 170=1334,071\text{ mm}$$

6.2.4.6.3 Stanovení pootočení

Pootočení bude stanoveno dle úrovně I viz. kapitola 5.3.

$$\psi=1,5\cdot\frac{r_s}{d}\cdot\varepsilon_{f,LT},$$

vzdálenost nulového momentu $r_s=1000\text{ mm}$

$$\psi=1,5\cdot\frac{1000}{170}\cdot 0,005=0,044$$

6.2.4.6.4 Stanovení únosnosti bez smykové výztuže

$$v_{Rd,c} = k_{\psi} \frac{\sqrt{f_{cm}}}{\gamma_c}$$

$$k_{\psi} = \frac{1}{1,5 + 0,9 k_{dg} \psi d} \leq 0,6$$

$$k_{dg} = \frac{32}{16 + d_g} \geq 0,75 \Rightarrow \frac{32}{16 + 8} = 1,33 \geq 0,75$$

$$k_{\psi} = \frac{1}{1,5 + 0,9 \cdot 1,33 \cdot 0,044 \cdot 170} = 0,10 \leq 0,6$$

$$v_{Rd,c,FRP} = 0,10 \cdot \frac{\sqrt{28,0}}{1,0} = 0,504 \text{ MPa}$$

$$V_{Rd,c,FRP} = v_{Rd,c,FRP} \cdot b_0 \cdot d = 0,504 \cdot 1334,07 \cdot 170 = 114,292 \text{ kN}$$

6.2.4.7 Stanovení únosnosti se smykovou výztuží

$$V_{Rd,cs,FRP} = V_{Rd,c,FRP} + V_{Rd,s,FRP}$$

$$V_{Rd,s,FRP} = \sum A_{fw} k_e \sigma_{fwd} \sin \alpha$$

$$\sigma_{fwd} = \frac{E_f \psi}{6} (\sin \alpha + \cos \alpha) \left(\sin \alpha + \frac{f_{bd}}{f_{fwd}} \cdot \frac{d}{\phi_w} \right) \leq f_{fwd}$$

$$f_{fwd} = 0,005 \cdot 52500 = 262,5 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{fwd} = \frac{52500 \cdot 0,044}{6} (\sin 45 + \cos 45) \left(\sin 45 + \frac{3}{262,5} \cdot \frac{170}{10} \right) = 492,095 \text{ MPa} \leq 262,5 \text{ MPa}$$

$$A_{fw} = 7,85E+1 \cdot 4 \cdot 4 = 1,26E+3 \text{ mm}^2 \text{ (2ks třmínků = 4ks větví, 4 strany)}$$

$$V_{Rd,s,FRP} = 1256,64 \cdot 0,9 \cdot 262,5 \cdot \sin 45 = 209,926 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,cs,FRP} = 114,292 + 209,926 = 327,219 \text{ kN}$$

$$k_{sys} = 2,0$$

$$v_{Rd,max} = k_{sys} k_{\psi} \frac{\sqrt{f_{cm}}}{\gamma_c} \leq \frac{\sqrt{f_{cm}}}{\gamma_c}$$

$$v_{Rd,max} = 2,0 \cdot 0,10 \cdot \frac{\sqrt{28,0}}{1,0} \leq \frac{\sqrt{28,0}}{1,0}$$

$$v_{Rd,max} = 1,008 \text{ MPa} \leq 5,292 \text{ MPa}$$

$$V_{Rd,max}=V_{Rd,max}b_0d$$

$$V_{Rd,max}=1,008 \cdot 1334,071 \cdot 170=228,585 \text{ kN}$$

6.2.4.8 Přístup dle ACI 440.1R-15 [3] s úpravou Hassan [8]

6.2.4.8.1 Stanovení stupně vyztužení podélné výztuže

Stupeň vyztužení a účinná výška výztuže jsou stejné jako v případě dle upraveného vztahu z ČSN EN 1992-1-1 [7] pro FRP výztuž.

$$d=170 \text{ mm}$$

$$\rho_f=0,00572$$

6.2.4.8.2 Stanovení kontrolovaného obvodu

$$b_0=2 \cdot (c_x+d)+2 \cdot (c_y+d)=2 \cdot (200+170)+2 \cdot (200+170)=1480 \text{ mm}$$

6.2.4.8.3 Stanovení únosnosti bez smykové výztuže

$$V_{Rd,c,FRP}=\frac{2}{5}\sqrt{f_{cm}}k$$

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

$$n_f=\frac{E_f}{E_c}=\frac{52,2}{30,0}=1,750$$

$$k=\sqrt{2 \cdot 0,00572 \cdot 1,750+(0,00572 \cdot 1,750)^2}-0,00572 \cdot 1,750=0,132$$

$$V_{Rd,c,FRP}=\frac{2}{5}\sqrt{28,0} \cdot 0,132=0,279 \text{ MPa}$$

$$V_{Rd,c,FRP}=V_{Rd,c,FRP} \cdot b_0 \cdot d=0,279 \cdot 1480 \cdot 170=70,195 \text{ kN}$$

6.2.4.9 Stanovení únosnosti se smykovou výztuží

$$V_{Rd,cf,FRP}=V_{Rd,c,FRP}+V_{Rd,f,FRP}$$

$$V_{Rd,f,FRP}=\frac{\phi_f A_{fv}(0,004E_{fv})}{b_0 s_{fv}}$$

$$A_{FRPw}=A_{w1} \cdot n=7,85E+1 \cdot 8=6,28E+2 \text{ mm}^2 \text{ (na kontrolovaném obvodu je 8 větví třmínků)}$$

$$V_{Rd,f,FRP}=\frac{1 \cdot 628,319 \cdot (0,004 \cdot 52500)}{1480,0 \cdot 85}=1,049 \text{ MPa}$$

$$V_{Rd,cf,FRP}=0,279+1,049=1,328 \text{ MPa}$$

$$V_{Rd,cf,FRP} = V_{Rd,c,FRP} \cdot b_0 \cdot d = 1,328 \cdot 1480,0 \cdot 170 = 334,089 \text{ kN}$$

6.2.4.10 Přístup dle CSA 806-12 [4] s úpravou dle Hassan [8]

6.2.4.10.1 Stanovení stupně vyztužení podélné výztuže

Stupeň vyztužení a účinná výška výztuže jsou stejné jako v případě dle upraveného vztahu z ČSN EN 1992-1-1 [7] pro FRP výztuž.

$$d = 170 \text{ mm}$$

$$\rho_f = 0,00572$$

6.2.4.10.2 Stanovení kontrolovaného obvodu

$$b_0 = 2 \cdot (c_x + d) + 2 \cdot (c_y + d) = 2 \cdot (200 + 170) + 22 \cdot (200 + 170) = 1480 \text{ mm}$$

6.2.4.10.3 Stanovení únosnosti bez smykové výztuže

$$V_{Rd,c,FRP} = 0,028 \lambda \phi_c (E_F \rho_f f_{cm})^{\frac{1}{3}}$$

$$V_{Rd,c,FRP} = 0,028 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot (52,5 \cdot 0,00572 \cdot 28,0)^{\frac{1}{3}} = 0,569 \text{ MPa}$$

$$V_{Rd,c,FRP} = V_{Rd,c,FRP} \cdot b_0 \cdot d = 0,569 \cdot 1480,0 \cdot 170 = 143,236 \text{ kN}$$

6.2.4.11 Stanovení únosnosti se smykovou výztuží

$$V_{Rd,cf,FRP} = V_{Rd,c,FRP} + V_{Rd,f,FRP}$$

$$V_{Rd,f,FRP} = \frac{\phi_f A_{fv} (0,005 E_{fv})}{b_0 s_{fv}}$$

$$A_{FRPw} = A_{w1} \cdot n = 7,85E+1 \cdot 8 = 6,28E+2 \text{ mm}^2 \text{ (na kontrolovaném obvodu je 8 větví třmínků)}$$

$$V_{Rd,f,FRP} = \frac{1 \cdot 628,319 \cdot (0,005 \cdot 52500)}{1480,0 \cdot 85} = 1,311 \text{ MPa}$$

$$V_{Rd,cf,FRP} = 0,569 + 1,311 = 1,880 \text{ MPa}$$

$$V_{Rd,cf,FRP} = V_{Rd,cf,FRP} \cdot b_0 \cdot d = 1,880 \cdot 1480,0 \cdot 170 = 473,103 \text{ kN}$$

6.2.4.12 Přístup dle Hassan [9]

6.2.4.12.1 Stanovení stupně vyztužení podélné výztuže

Stupeň vyztužení a účinná výška výztuže jsou stejné jako v případě dle upraveného vztahu z ČSN EN 1992-1-1 [7] pro FRP výztuž.

$$d = 170 \text{ mm}$$

$$\rho_f = 0,00572$$

6.2.4.12.2 Stanovení kontrolovaného obvodu

$$b_0 = 2 \cdot (c_x + d) + 2 \cdot (c_y + d) = 2 \cdot (200 + 170) + 22 \cdot (200 + 170) = 1480 \text{ mm}$$

6.2.4.12.3 Stanovení únosnosti bez smykové výztuže

$$V_{Rd,c,FRP} = \beta_0 \cdot 0,056 \lambda \phi_c (E_{FP} f_{cm})^{\frac{1}{3}}$$

$$V_{Rd,c,FRP} = 0,64 \cdot 0,056 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot (52,5 \cdot 0,00572 \cdot 28,0)^{\frac{1}{3}} = 0,729 \text{ MPa}$$

$$V_{Rd,c,FRP} = V_{Rd,c,FRP} \cdot b_0 \cdot d = 0,729 \cdot 1480,0 \cdot 170 = 183,342 \text{ kN}$$

6.2.4.13 Stanovení únosnosti se smykovou výztuží

$$V_{Rd,cf,FRP} = V_{Rd,c,FRP} + V_{Rd,f,FRP}$$

$$V_{Rd,f,FRP} = \frac{\phi_f A_{fv} (0,004 E_{fv})}{b_0 s_{fv}}$$

$$A_{FRPw} = A_{w1} \cdot n = 7,85E + 1 \cdot 8 = 6,28E + 2 \text{ mm}^2 \text{ (na kontrolovaném obvodu je 8 větví třmínků)}$$

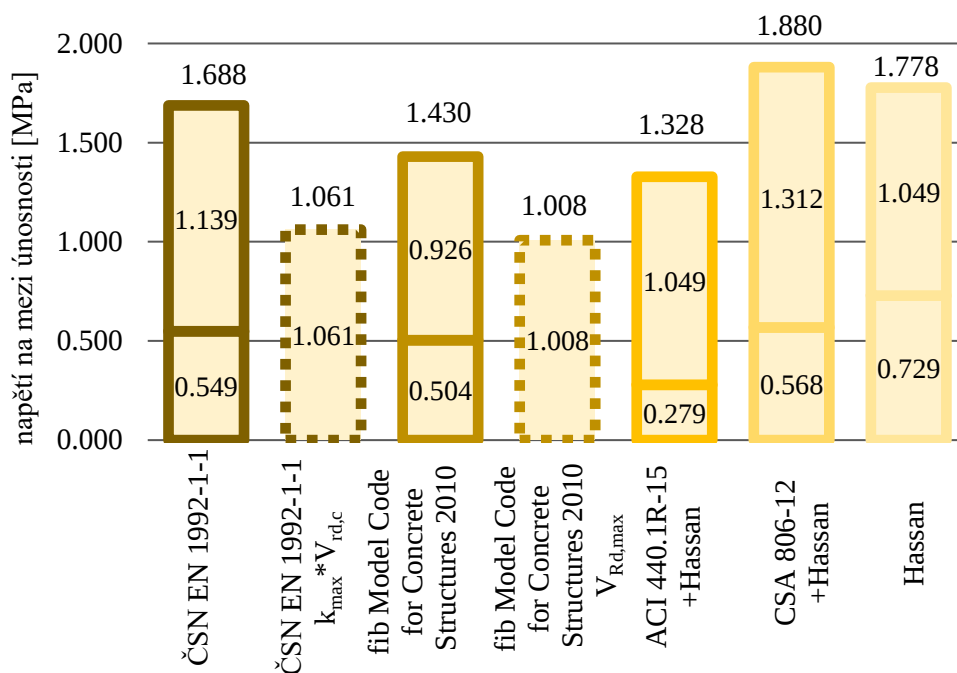
$$V_{Rd,f,FRP} = \frac{1 \cdot 628,319 \cdot (0,004 \cdot 52500)}{1480,0 \cdot 85} = 1,049 \text{ MPa}$$

$$V_{Rd,cf,FRP} = 0,729 + 1,049 = 1,778 \text{ MPa}$$

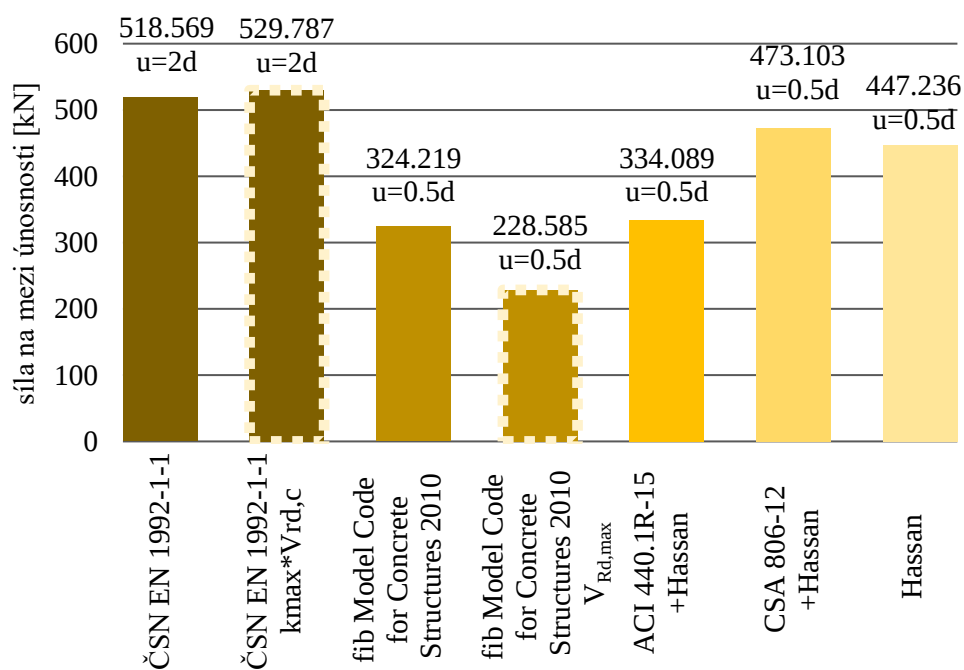
$$V_{Rd,cf,FRP} = V_{Rd,cf,FRP} \cdot b_0 \cdot d = 1,778 \cdot 1480,0 \cdot 170 = 447,236 \text{ kN}$$

6.2.4.14 Vyhodnocení předběžného návrhu vzorku č. 4. FRP-45TŘ

Pro tento vzorek jsou použité stejné návrhové přístupy jako v předchozí variantě. Tedy různým návrhovým přístupům odpovídá specifický kontrolní obvod. Výsledné hodnoty jsou znázorněny na Obrázek 38. Příspěvky betonu a smykové výztuže do celkového napětí na mezi únosnosti jsou znázorněny na Obrázek 37. Nejvyšší únosnosti bylo dosaženo dle upravené ČSN EN 1992-1-1 [7] 514,453 kN. Nejnižší hodnota odpovídá přístupu dle upravené fib Model Code for Concrete Structures 2010 [10] pro FRP výztuž 324,219 kN. V případě platnosti vztahu, který omezuje únosnost vlivem porušení betonu, byla stanovena únosnost 228,585 kN. Výsledné hodnoty jsou závislé na přetvoření v podélné a smykové výztuži. Některé přístupy ovlivňuje úhel smykové výztuže se střednicí desky. Pomocí tohoto vzorku bude možné upřesnit vstupy do jednotlivých vztahů.



Obrázek 37: vzorek č. 4. FRP-45TR srovnání návrhových přístupů při stanovení napětí na mezi únosnosti při protlačení se smykovou výztuží (spodní hodnota = příspěvek betonu, horní hodnota = příspěvek smykové výztuže při stanovení únosnosti se smykovou výztuží)



Obrázek 38: vzorek č. 4. FRP-45TR srovnání návrhových přístupů při stanovení síly na mezi únosnosti při protlačení (u = vzdálenost kontrolovaného obvodu od líce sloupce)

6.2.5 Srovnání předběžného návrhu

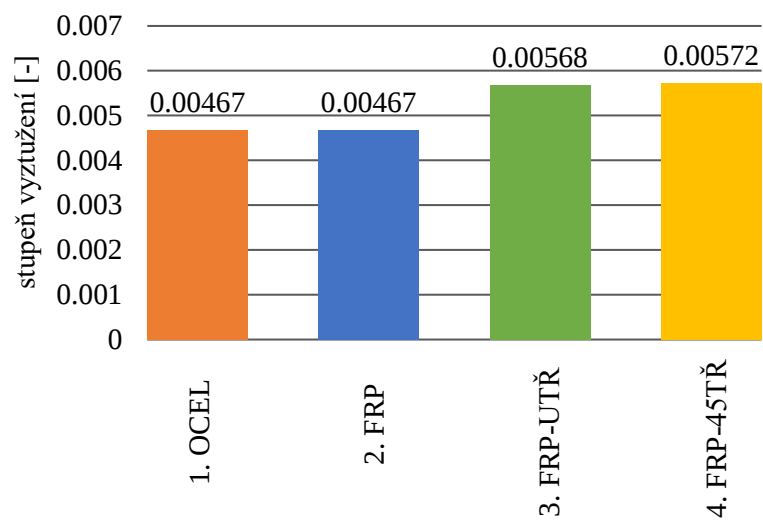
Pro provedení zkoušek byly navrženy čtyři desky v různých variantách vyztužení. V rámci předběžného návrhu se jednotlivé varianty posoudily dle stávajících případně upravených návrhových přístupů. Aby bylo možné provést porovnání odlišností v závislosti na tuhosti podélné výztuže, měly desky obdobný stupeň vyztužení podélnou výztuží. Velikost stupně vyztužení je možné vidět na Obrázek 39. U variant se smykovou výztuží byl vyšší stupeň vyztužení z důvodů započítání přídavné výztuže v rozích třmínků, které mohly mít na experimentálně dosažené výsledky vliv. Pro znázornění rozdílných tuhostí ocelové a FRP výztuže byl stanoven mechanický stupeň vyztužení. Na Obrázek 40 je znázorněn mechanický stupeň vyztužení stanoven dle následujících vzorců

$$w_s = \frac{A_s \cdot f_y}{A_c \cdot f_{cm}}; w_{FRP} = \frac{A_F \cdot f_F}{A_c \cdot f_{cm}}, \quad (64)$$

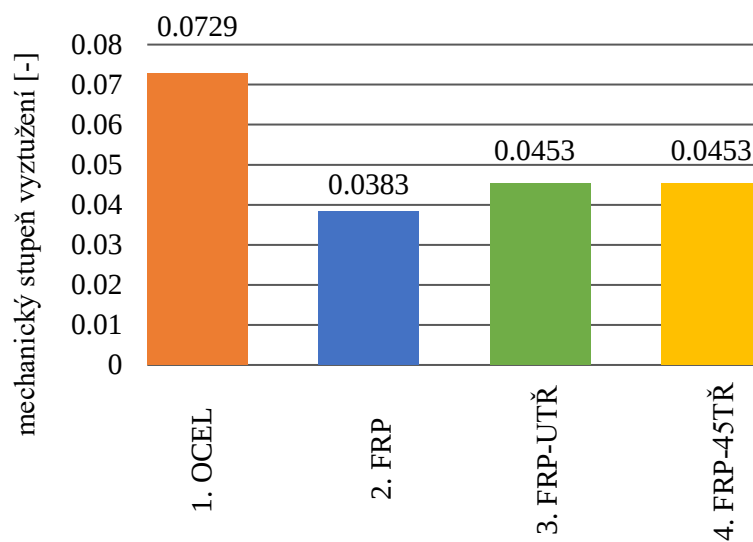
kde jmenovatel je vždy shodný, plocha výztuže je shodná pro první dva vzorky a pro vzorky se smykovou výztuží je vyšší o přidané pruty v rozích třmínků. Nejvyšší vliv má tedy pevnost podélné výztuže, kde $f_y = 500$ MPa a $f_F = 262,5$ MPa. Pevnost podélné FRP výztuže f_F vychází z předpokládaného přetvoření $\epsilon_{FRP} = 0,0005$. Pro další srovnání byl vložen do výpočtu ještě modul pružnosti, efektivní mechanický stupeň byl tedy stanoven

$$w_{s,ef} = \frac{A_s \cdot f_y \cdot E_s}{A_c \cdot f_{cm} \cdot E_{cm}}; w_{FRP,ef} = \frac{A_F \cdot f_F \cdot E_F}{A_c \cdot f_{cm} \cdot E_{cm}}. \quad (65)$$

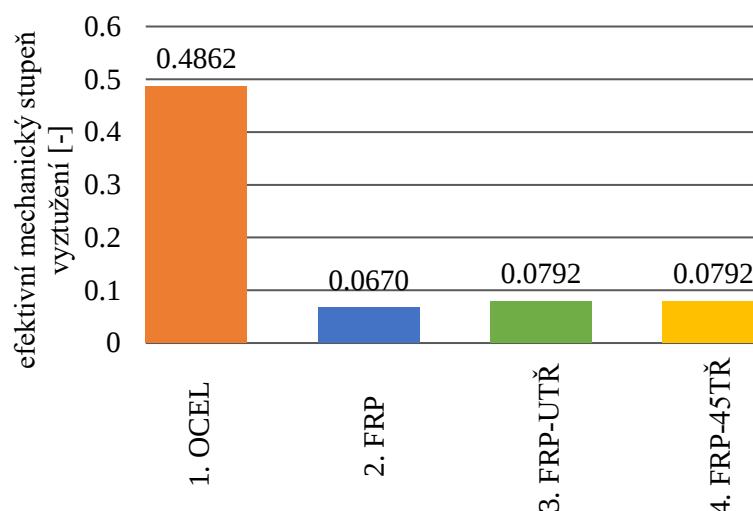
Na Obrázek 41 je patrné, že deska s ocelovou výztuží by měla být výrazně tužší než varianta s GFRP výztuží.



Obrázek 39: porovnání stupně vyztužení pro jednotlivé varianty

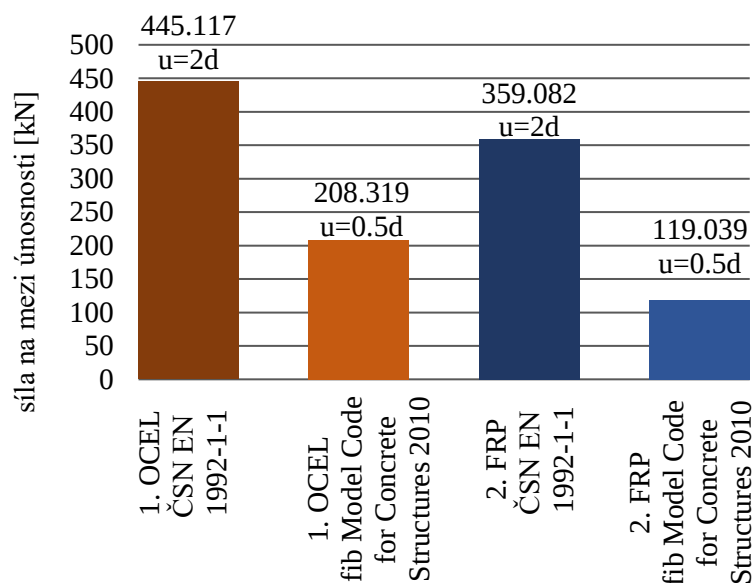


Obrázek 40: porovnání mechanického stupně vyztužení pro jednotlivé varianty

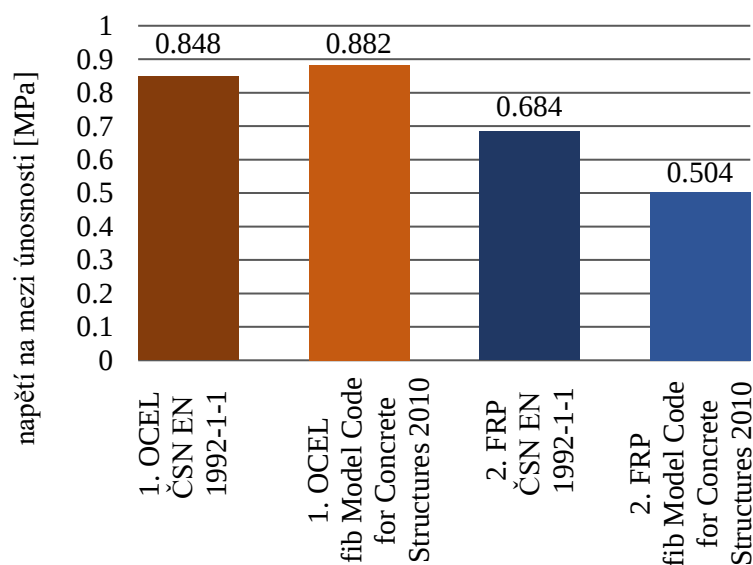


Obrázek 41: porovnání efektivního mechanického stupně vyztužení s vlivem modulu pružnosti pro jednotlivé varianty

Pro případ porovnání výsledků zkoušek v protlačení bez smykové výztuže byly navrženy vzorky 1. OCEL, 2. FRP. Byla zde snaha porovnat vliv tuhosti podélné výztuže. V případě těchto variant bylo možné porovnat návrhy dle ČSN EN 1992-1-1 [7] a fib Model Code for Concrete Structures 2010 [10]. Oba návrhové přístupy jsou určeny pro tradiční ocelovou výztuž a muselo dojít k úpravám, aby mohly být aplikovány na FRP výztuž. Do těchto úprav vstupuje omezení maximálního přetvoření podélné výztuže, odlišná (nižší) tuhost FRP výztuže. Po provedení zkoušek bylo možné hodnotu přetvoření upravit a porovnat se skutečnými výsledky. Porovnání únosnosti je možné vidět na Obrázek 42. Dle předpokladů se měl vzorek 1. OCEL porušit při vyšší síle. V návrhových přístupech [7] a [10] je rozdílná vzdálenost kontrolovaného obvodu od líce sloupu. Při porovnání napětí na mezi únosnosti (Obrázek 43) je možné si všimnout, že napětí pro 1. OCEL jsou v přístupech [7] a [10] obdobné. Pro variantu 2. FRP je mezi přístupy větší rozdíl.



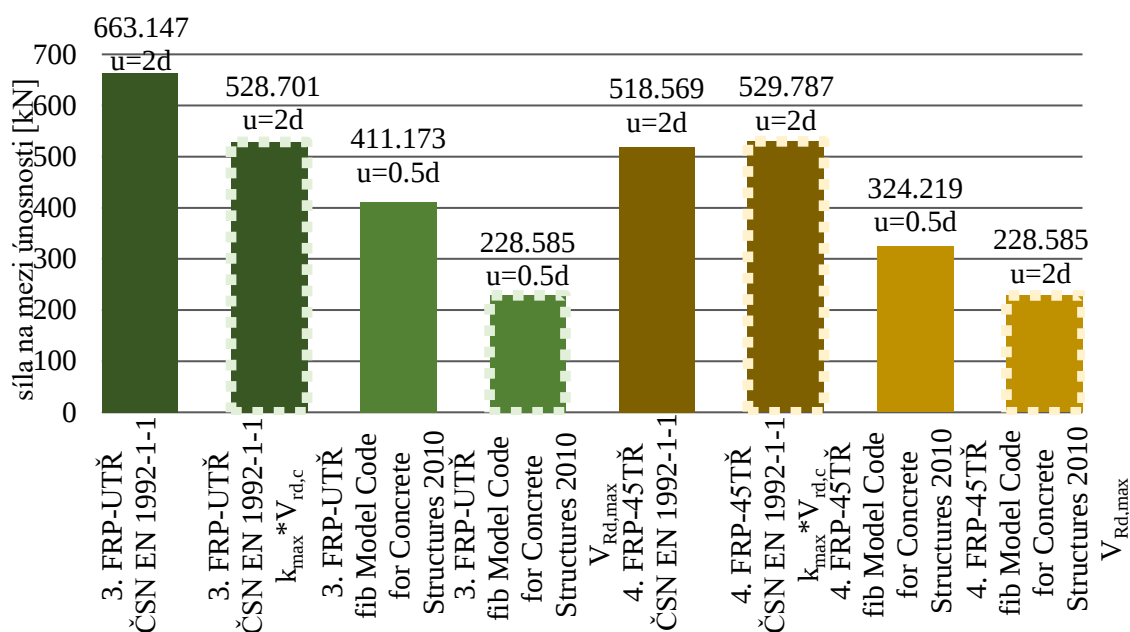
Obrázek 42: porovnání výsledků (síly) na mezi únosnosti pro vzorky č. 1. OCEL a č. 2. FRP (u = vzdálenost kontrolovaného obvodu od líce sloupu)



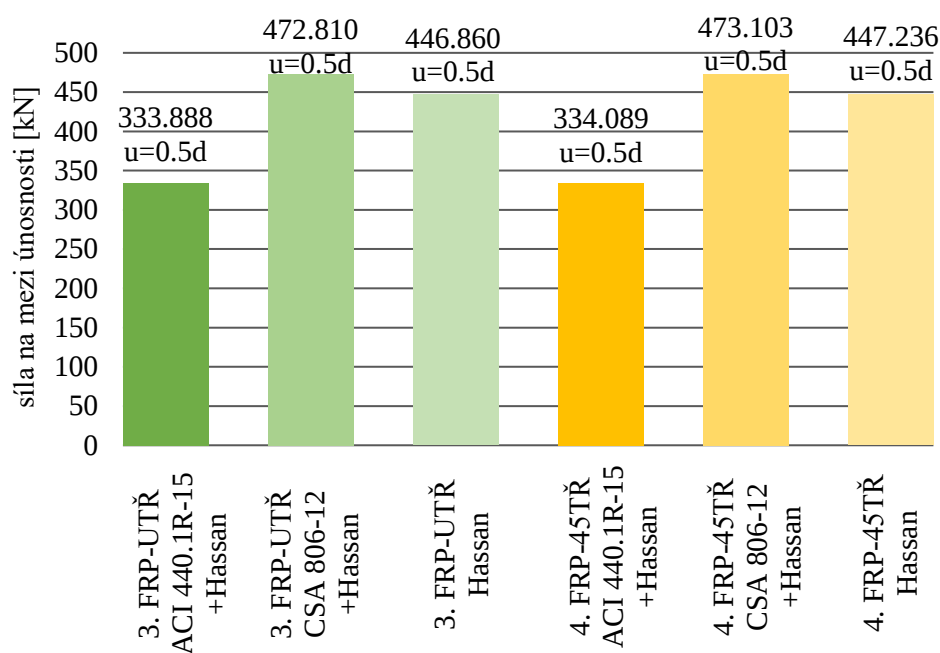
Obrázek 43: porovnání výsledků (napětí) na mezi únosnosti pro vzorky č. 1. OCEL a č. 2. FRP

Vzorky 3. FRP-UTŘ a 4. FRP-45TŘ měly navrženou smykovou výztuž. V obou případech byl navržen odlišný způsob uložení třmínků do betonové desky. Varianta s třmínky tvaru „U“ uvažovala odříznutí částí větví a nasunutí třmínků na již hotovou výztuž. Vzorek 4. FRP-45TŘ uvažoval aplikování smykového kříže, který byl vložen mezi horní a dolní výztuží. Zásadním rozdílem byl úhel mezi střednicí betonové desky a třmínkem, v případě varianty č. 3. to bylo 90° a pro variantu č. 4. to bylo 45° . S vlivem

úhlu uvažují pouze návrhové přístupy dle ČSN EN 1992-1-1 [7] a fib Model Code for Concrete Structures 2010 [10]. Výsledky jsou znázorněny na Obrázek 44. Z výsledků je zřejmé, že dle uvedených přístupů má náklon třmínků negativní vliv na únosnost a to zhruba o 30%. V případě použití návrhového přístupu [7] je omezena maximální únosnost se smykovou výztuží součinitelem k_{max} , který zohledňuje porušení betonu v tlaku. Omezení vychází z únosnosti bez smykové výztuže a je tedy nezávislé na úhlu smykové výztuže. Obdobné omezení únosnosti uvažuje i návrhový přístup [10]. V případě varianty č. 3. FRP-UTŘ je překročena tato maximální únosnost pro oba návrhové přístupy. Pro poslední vzorek bylo omezení překročeno pouze pro přístup [10]. Při provádění experimentu bylo možné pozorovat vliv dané podmínky. Pro nutnost úpravy pro použití FRP výztuže do vztahů vstupuje poměrné přetvoření podélné a smykové FRP výztuže. Z provedených zkoušek bylo možné zjistit skutečné přetvoření v podélné a smykové výztuži. Na Obrázek 45 jsou porovnány zbývající přístupy které upravil Hassan a kol. v [8] a [9]. Tyto přístupy nezohledňují vliv náklonu smykové výztuže. Výsledné hodnoty jsou pro shodné přístupy stejné i v případě různého náklonu smykové výztuže. V přístupech je odlišně zavedeno přetvoření ve smykové výztuži, z kterého se stanovuje únosnost při protlačení s vlivem smykové výztuže. Výsledné únosnosti se též liší ve velikosti započítané únosnosti bez smykové výztuže, tj. příspěvek smykové únosnosti betonu.



Obrázek 44: porovnání výsledků (síly) na mezi únosnosti pro vzorky č. 3. FRP-UTŘ a č. 4. FRP-45TŘ pro návrhové přístupy ČSN EN 1992-1-1 [7] a fib Model Code for Concrete Structures 2010 [10] (u = vzdálenost kontrolovaného obvodu od líce sloupu)

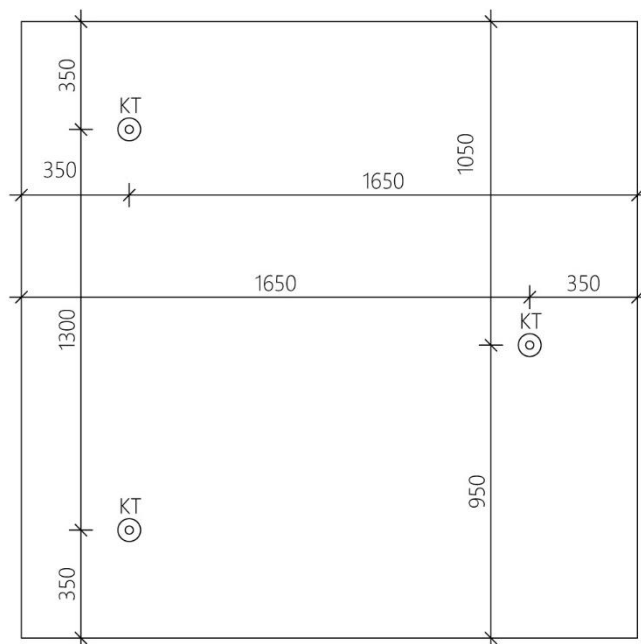


Obrázek 45: porovnání výsledků (síly) na mezi únosnosti pro vzorky č. 3. FRP-UTŘ a č. 4. FRP-45TŘ pro návrhové přístupy ACI 440.1R-15+Hassan, CSA 806-12+Hassan a Hassan

6.2.6 Návrh manipulačních úchytů

Navržené vzorky měly stejné rozměry 2000 x 2000 mm a výšku desky 200 mm. Z důvodu velikosti a tíhy desek bylo nutné navrhnout manipulační úchyty. Objem desky

byl vypočten na $0,8 \text{ m}^3$, tomu odpovídá hmotnost $2,0 \text{ t}$. Pro čtvercové desky bylo navrženo asymetrické uspořádání trnů, viz. Obrázek 46. Způsob a postup výpočtu vychází od dodavatele Halfen, systém přepravních úchytů Deha [12].



Obrázek 46: poloha transportních úchytů (KT – manipulační úchyt)

6.2.6.1 Návrh manipulačních úchytů Deha

$$L_1=L_2=2,00 \text{ m}$$

$$h=0,20 \text{ m}$$

$$V=L_1 \cdot L_2 \cdot h=2,00 \cdot 2,00 \cdot 0,20=0,80 \text{ m}^3$$

$$\gamma_c=25,00 \text{ kN/m}^3$$

vlastní tíha prvku:

$$G=V \cdot \gamma_c=0,80 \cdot 25,00=20,00 \text{ kN}$$

přilnavost bednění:

$$q=2,00 \text{ kN/m}^2$$

plocha bednění:

$$A=L_1 \cdot L_2=2,00 \cdot 2,00=4,00 \text{ m}^2$$

dynamický součinitel:

$$\psi=1,10$$

$$\psi=1,40$$

z důvodu nesymetrickosti úchytů doporučuje výrobce [12] uvažovat jako počet nosných úchytů $n = 2$.

$$\beta=15^\circ; z=1,04$$

$$\beta=30^\circ; z=1,16$$

zvedání ve výrobě

$$F=(G+q \cdot A) \cdot z/n=(20+2 \cdot 4) \cdot 1,04/2=14,56 \text{ kN}$$

přeprava ve výrobě

$$F=G \cdot f \cdot z/n=20 \cdot 1,10 \cdot 1,04/2=11,44 \text{ kN}$$

přeprava na stavbě

$$F=G \cdot f \cdot z/n=20 \cdot 1,40 \cdot 1,16/2=12,76 \text{ kN}$$

Jsou navrženy tři manipulační úchyty HALFEN DEHA Combi-Anker 6351-1,6-150 na každou desku.

6.3 Nelineární analýza

Pro řešení běžných úloh se používá lineární analýza, která idealizuje a zjednodušuje řešený problém. Základní pravidla pro řešení lineární analýzy jsou:

- rovnováha se vyjadřuje v nezdeformovaném referenčním stavu;
- vztah mezi posuvy a deformacemi jsou lineární;
- materiál je lineárně elastický (platnost Hookova zákona);
- vazby jsou reprezentovány pouze lineárními rovnicemi.

V této kapitole bylo předmětem simulovat skutečnou zatěžovací zkoušku pro všechny vzorky vycházející z předběžného návrhu a stanovit tak chování vzorků, únosnost a způsob porušení. Při předpokladu zatěžování zdeformovaného stavu nelze zcela přesně stanovit výsledek pomocí lineární analýzy. V tomto případě se přistoupilo k namodelování vzorků pomocí nelineární analýzy. Pro nelineární analýzu platí:

- stav, ve kterém se dosahuje rovnováha mechanické soustavy, je ve zdeformovaném stavu, který předem neznáme;
- vztahy mezi posuvy a deformacemi nejsou lineární;

-
- chování materiálů je obecné, tzn. vztah mezi napětím a deformací je nelineární;
 - vazby jsou reprezentovány obecnými vztahy.

Nelinearity lze rozdělit do následujících skupin:

- geometrická nelinearita – zapříčiněno velkými posuvy a natočeními, doprovázeno velkými přetvořeními;
- materiálová nelinearita – vztahy mezi napětím a přetvořením, nejsou stejné materiálové vlastnosti po průřezu;
- nelinearita při kontaktu těles [13].

Nelineární analýza tedy může simulovat skutečné zatěžovací zkoušky pro betonové prvky. Pomocí nelineární analýzy byla snaha zjistit chování a hodnotu síly při porušení na daném vzorku. Při přesné specifikaci materiálů a okrajových podmínek by měla být blízká shoda mezi výsledky skutečné zatěžovací zkoušky a výsledky získané softwarem. V této diplomové práci se provedla nelineární analýza v softwaru Aténa od Červenka consulting. Zde použitý software používá podobné předpoklady pro použití lineárního výpočtu jako bylo uvedeno výše a to:

- použití Hookova zákona;
- zanedbání kvadratických členů, zanedbává se změna tvaru a polohy konstrukce;
- zatěžovací a okrajové podmínky jsou konstantní po celou dobu výpočtu bez ohledu na deformace konstrukce;
- lineární rovnice lze použít pro materiály, které jsou daleko od bodu porušení, cca 50 % své maximální pevnosti.

Nelineární analýzu používá software Aténa z důvodu:

- nelineárního chování betonu a jeho velmi nízké tahové pevnosti;
- velkých deformací, kdy není možné zanedbat zdeformovaný tvar konstrukce;
- nárůstu deformací a zatížení v čase.

Software pro stanovení únosnosti stavebních konstrukcí používá Lagrangeho formulaci. Tato formulace sleduje chování nekonečně malých částic v čase. Pro každý

čas je možné dopočítat polohu a objem částice. Lagrangeho formulace se využívá pro výpočty statické analýzy [14].

6.3.1 Modelování vzorků

V programu Aténa a jeho prostředí GiD byly namodelovány čtyři desky:

- 1. OCEL
- 2. FRP
- 3. FRP-UTŘ
- 4. FRP-45TŘ.

Jejich velikosti, typ a způsob vyztužení vycházel z předběžného návrhu v kapitole 6.2. Vzorky byly namodelovány tak, aby simulovaly skutečný průběh zatěžovacích zkoušek a reálné okrajové podmínky. Zatěžovány byly na horním povrchu a bodové podpory byly na povrchu spodním viz. Obrázek 47. Zatěžování pobíhalo deformačně s přírůstkem 0,25 mm/krok ve směru osy Z. Zatěžovací plocha nahrazovala velikost sloupu. Jak bylo uvedeno v kapitole 6.2. Velikost zatěžovací plochy byla 200x200 mm uprostřed betonové desky. Zatěžovací deska byla modelována materiálem CC3DElastIsotropic o tloušťce 30 mm.

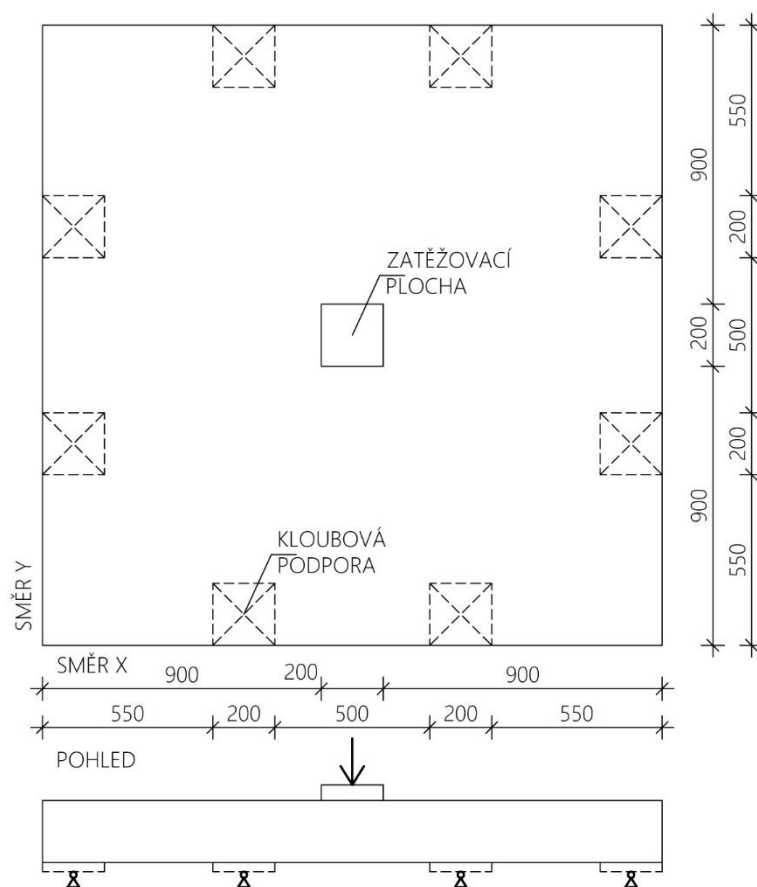
Tabulka 11: materiálové charakteristiky zatěžovací desky

materiálová charakteristika	označení	hodnota	jednotka
Modul pružnosti	E	2.00E+07	MPa
Poissonovo číslo	μ	0.3	-

Podepření bylo vytvořeno osmi kloubovými podporami. Na každé straně byly dvě, viz. Obrázek 47. Podpory měly umožňovat pootočení ve všech směrech a posunu mělo být zabráněno pouze ve svislém směru. Tyto okrajové podmínky měly umožnit nadzvedávání rohů a možný svislý průhyb mezi sousedícími podporami na každé straně. Pro podpory byly namodelovány podporové desky o rozměrech 200x200 mm a tloušťce 30 mm. Shodně jako roznášecí deska byly i desky pro podpory vytvořeny z CC3DElastIsotropic.

Tabulka 12: materiálové charakteristiky podporových desek

materiálová charakteristika	označení	hodnota	jednotka
Modul pružnosti	E	2.00E+05	MPa
Poissonovo číslo	μ	0.3	-



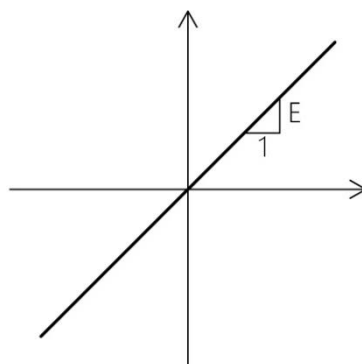
Obrázek 47: poloha zatěžovací plochy a bodových podpor

Mezi roznášecí desku a samotnou betonovou desku byl namodelován pružný materiál („guma“). Tento materiál byl také vložen mezi betonovou desku a podporové desky. Tato „guma“ byla vytvořena z CC3DElastIsotropic o tloušťce 10 mm.

Tabulka 13: materiálové charakteristiky pružného materiálu

materiálová charakteristika	označení	hodnota	jednotka
Modul pružnosti	E	5.00E+03	MPa
Poissonovo číslo	μ	0.3	-

Pomocí tohoto materiálu mělo být zabráněno drcení betonu pod zatěžovací deskou. Vložením pružného materiálu mezi podpory a betonovou desku mělo dojít k případnému nadzvedávání desky v oblasti podpor. Všechny výše uvedené materiály měly shodný lineární pracovní diagram, který je znázorněn na Obrázek 48. Mezi betonovou desku a přiléhající materiály představující zatěžovací desku, pružný materiál a podpory musela být vytvořena kontaktní vrstva. Pomocí kontaktních vrstev bylo zajištěno správné vnášení zatížení do konstrukce a přenos zatížení do podpor.

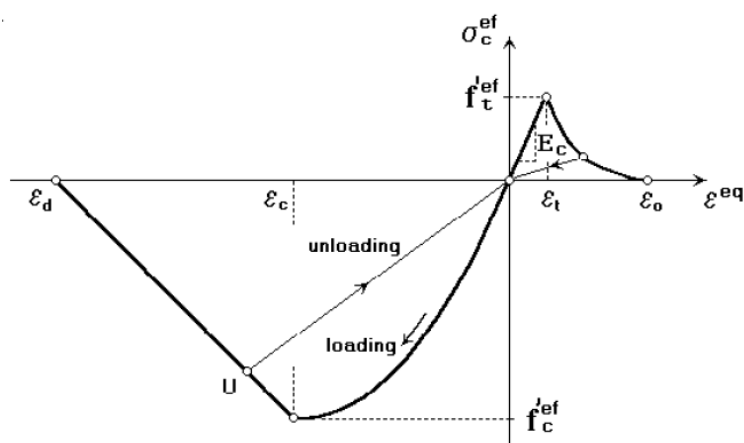


Obrázek 48: lineární pracovní diagram pro CC3DElastIsotropic materiály

Všechny betonové desky byly namodelovány ze shodného materiálu pro beton CC3DNonLinCementitious2. Materiálové charakteristiky byly použity jako střední hodnoty betonu C20/25 viz. Tabulka 14. Pracovní diagram betonu (Obrázek 49) využívá lomové chování betonu v tahu a plastické chování betonu v tlaku. Lomové chování betonu v tahu vychází z Rankinova kritéria porušení a exponenciálního změkčení. Po dosažení maximální hodnoty v tahu $f_{t'ef}$ dochází k vzniku a šíření trhlin a exponenciálnímu poklesu tahové pevnosti v betonu. Následně dochází k rozšíření trhlin bez působení betonu v tahu. Plastické působení betonu v tlaku je založeno na Menétrey-Willam modelu. Přírůstek pevnosti betonu v tlaku je v nelineární závislosti ku přetvoření betonu. Po překročení $f_{c'ef}$ dochází k vzniku trhlin a následnému klesání pevnosti betonu v lineární závislosti [14].

Tabulka 14: materiálové charakteristiky betonu C20/25

materiálová charakteristika	označení	hodnota	jednotka
Modul pružnosti	E	3.00E+04	MPa
Poissonovo číslo	μ	0.2	-
Pevnost v tlaku	f_{cm}	28	MPa
Pevnost v tahu	f_t	2.2	MPa



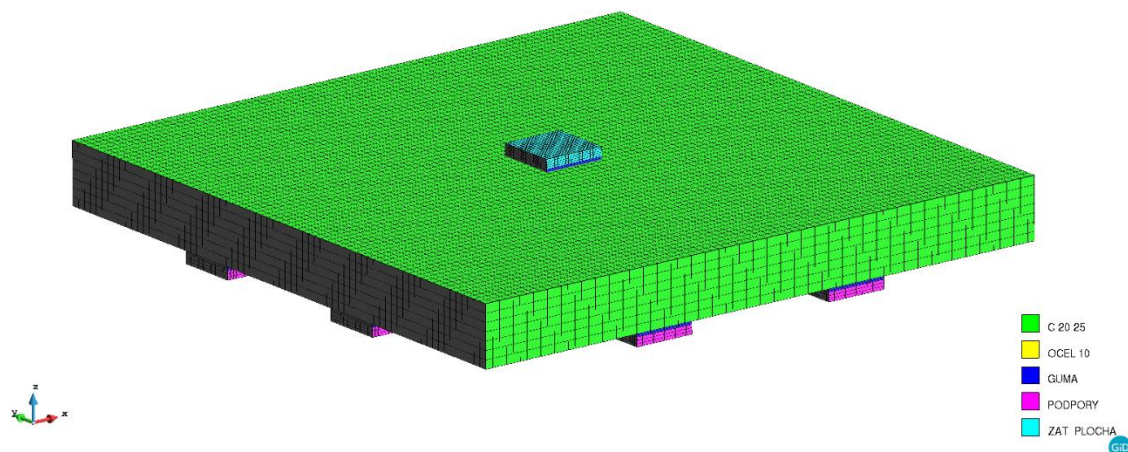
Obrázek 49: pracovní diagram pro materiál CC3DNonLinCementitious2 [14]

Materiálové charakteristiky a pracovní diagramy podélné a smykové výztuže jsou uvedeny v jednotlivých kapitolách zabývajících se návrhem daných vzorků v programu Aténa. Byly použity odlišné pracovní diagramy pro ocelovou a FRP výztuž.

Pro každou desku byla vytvořena výpočetní síť konečných prvků. Hustota sítě přímo ovlivňuje přesnost, ale i rychlost výpočtu. Ani u jednoho vzorku nebyla využita možnost symetrie, aby bylo možné pozorovat přesné chování celých vzorků. Pro 3D prvky v modelech byla použita síť pomocí hexahedra prvků sítě. Tyto prvky tvoří kvádry, které se doporučují použít pro tento typ výpočtu. Všechny modely byly vytvořeny ze stejně velkých prvků. Na délku 2000 mm betonové desky bylo použito dělení na 70 prvků. Výška desky 200 mm byla rozdělena na 7 prvků. Výsledná síť byla tvořena z hexahedra prvků o délce hrany cca 30 mm.

Pro možnost vyhodnocení vzorků byly na desky vloženy monitory. Dva monitory byly vloženy na střed desky. Jeden z nich sledoval svislý průhyb ve směru osy Z a druhý sledoval působící sílu, která zatěžovala jednotlivé vzorky. Další monitor pro

možnost sledování svislých deformací byl vložen na okraj desky mezi podpory a poslední byl umístěn na roh desky. Poslední zmíněný monitor byl zvolen z důvodu sledování nadzvedávání rohu desky.



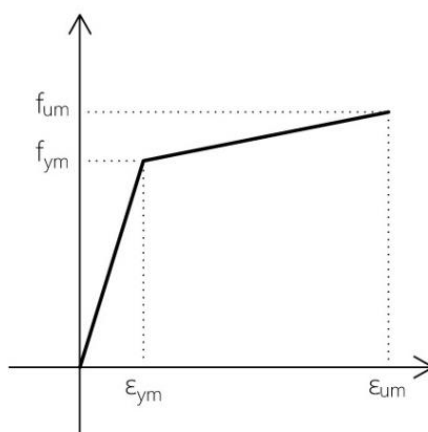
Obrázek 50: vytvořená síť pro jednotlivé materiály v programu Aténa - GiD

6.3.2 Model č. 1. OCEL

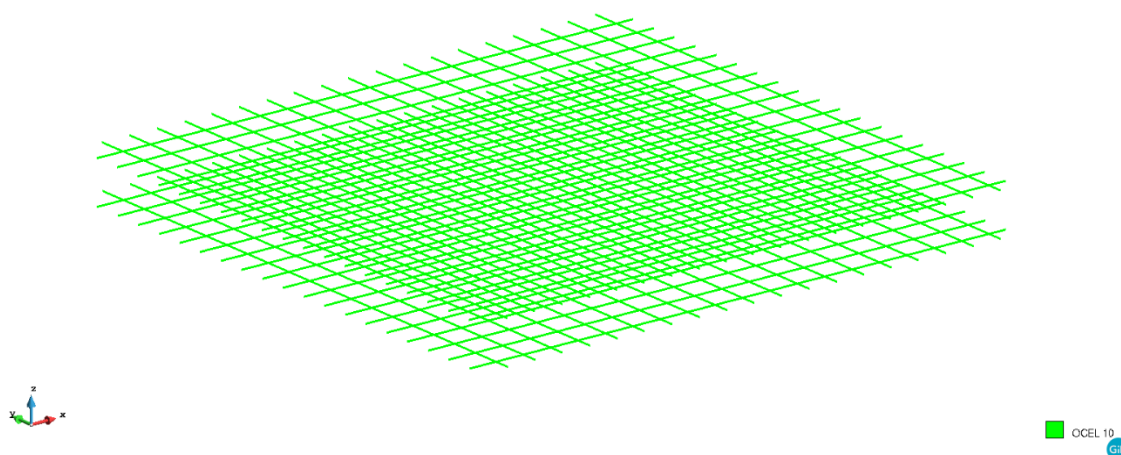
Způsob vyztužení byl stejný, jako byl uveden při předběžném návrhu v kapitole 6.2.1. Ocelová výztuž byla o průměru 10 mm ve vzdálenosti 100 mm. Krytí spodní vrstvy výztuže ve směru X bylo 15 mm. Ocelová výztuž byla namodelována pomocí 1D Reinforcement. Programem vygenerované materiálové charakteristiky oceli B500B jsou znázorněny v Tabulka 15. Pevnost na mezi kluzu ve střední hodnotě odpovídala 550 MPa. Pracovní diagram byl definován jako bilineární se zpevněnou větví viz. Obrázek 51.

Tabulka 15: materiálové charakteristiky oceli B500B

materiálová charakteristika	označení	hodnota	jednotka
Modul pružnosti	E	2.00E+05	MPa
Mez kluzu	f_{ym}	550	MPa
Přetvoření meze kluzu	ε_{ym}	0.00275	-
Mez pevnosti	f_{um}	594	MPa
Přetvoření meze pevnosti	ε_{um}	0.05	-



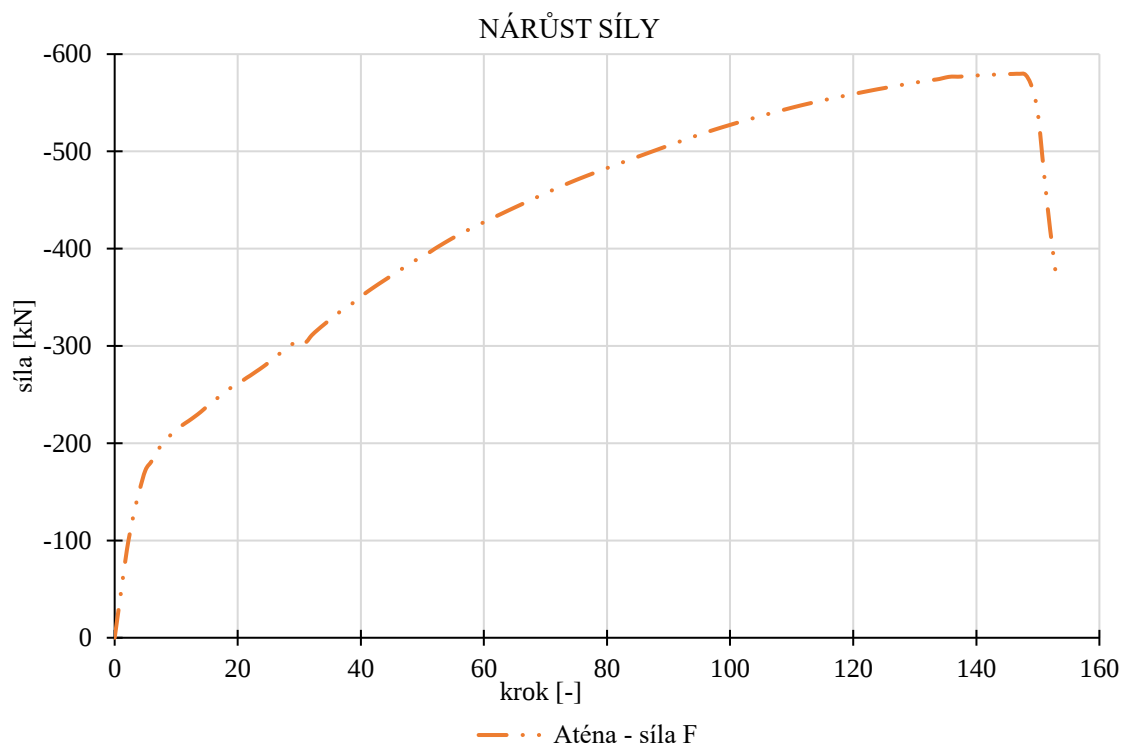
Obrázek 51: pracovní diagram pro ocelovou výztuž v software ATENA



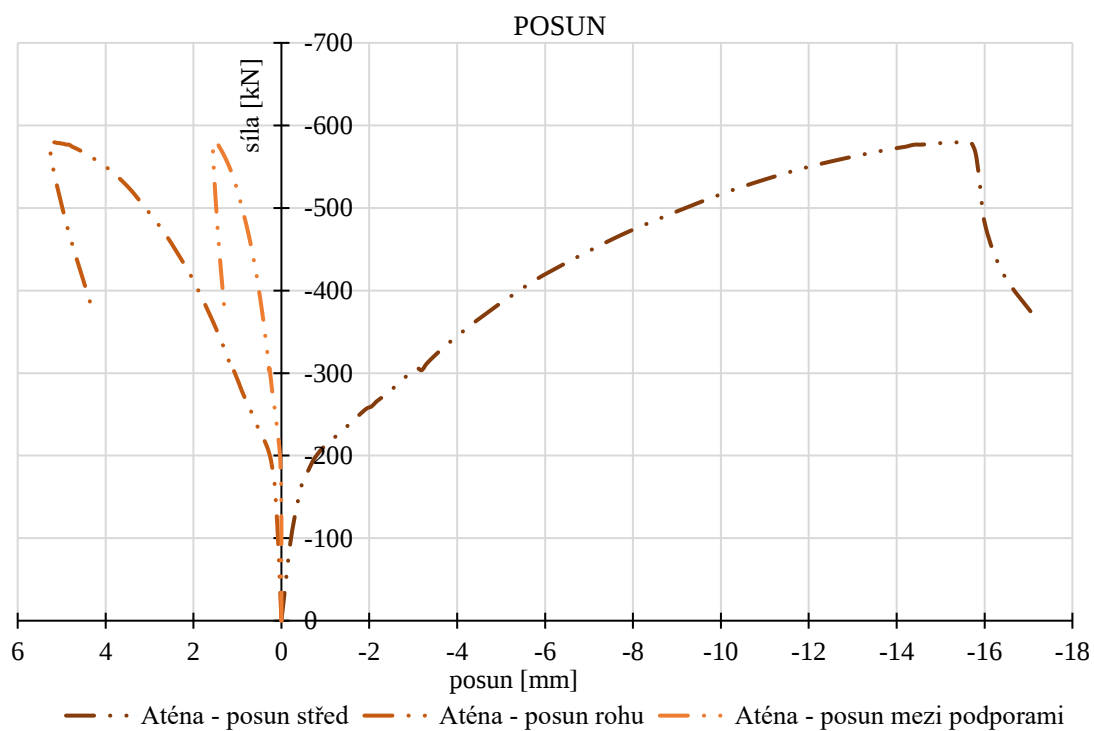
Obrázek 52: model č. 1. OCEL vymodelovaná výztuž v programu Aténa – GiD

6.3.2.1 Výsledky výpočtu model č. 1 OCEL

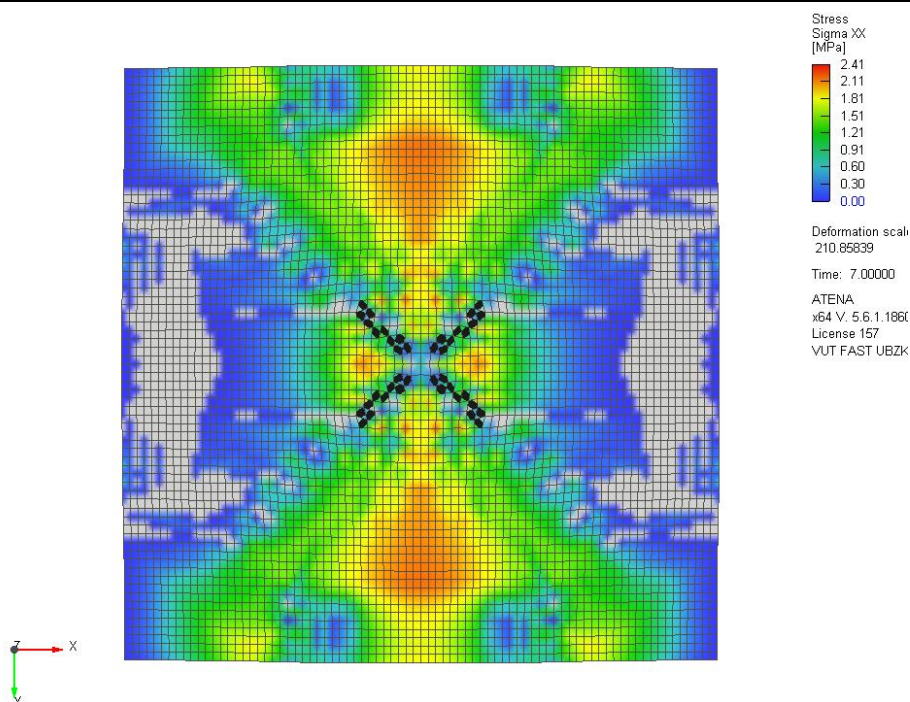
Průběh přírůstku síly v závislosti na iteračním kroku je znázorněn na Obrázek 53. Na daném obrázku je vidět, že přírůstek síly měl stejnou směrnici až do hodnoty cca 180 kN. Jako první se začaly vytvářet diagonální trhliny na spodním lící desky. Při hodnotě 180 kN bylo maximální napětí na taženém spodním povrchu betonu cca 2,4 MPa viz. Obrázek 55. Docházelo k překročení tahové pevnosti betonu. Od této chvíle začínala tahová únosnost více záviset na podélné výztuži. Napětí v podélné výztuži (po vzniku trhlin) bylo přibližně 155 MPa. Na Obrázek 54 je vidět, že deformace uprostřed desky byla přibližně 0,6 mm a začínalo docházet k nadzvedávání rohů desky.



Obrázek 53: model č. 1. OCEL-ATÉNA průběh zatěžovací síly



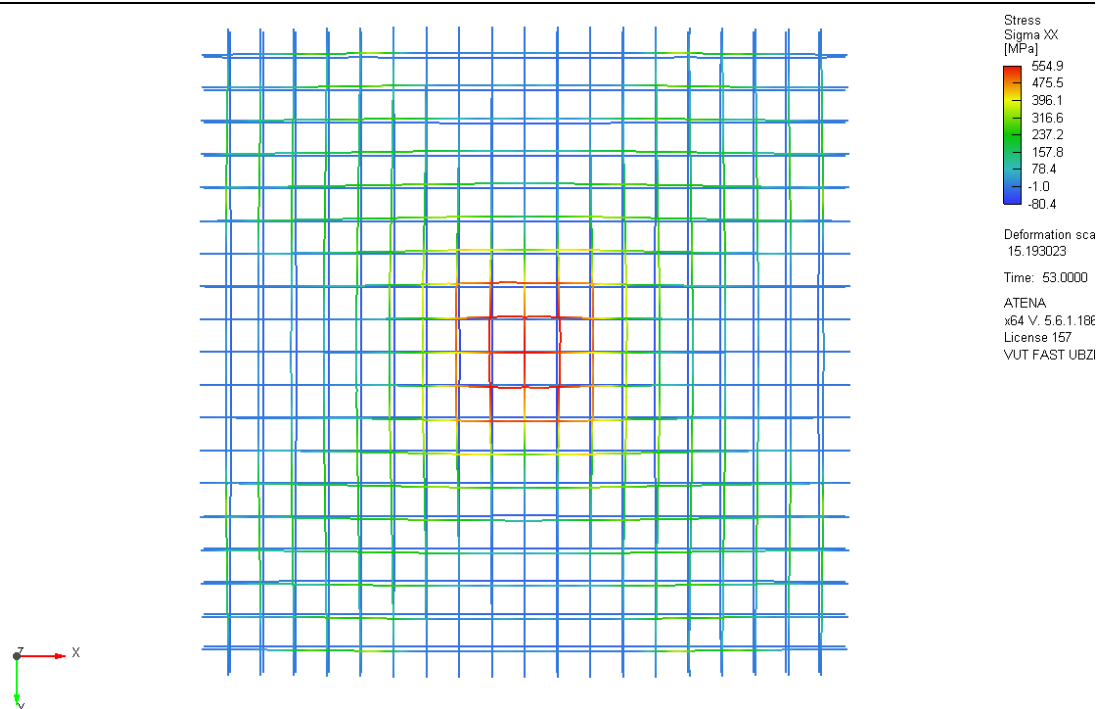
Obrázek 54: model č. 1. OCEL-ATÉNA deformace



Obrázek 55: model č. 1. OCEL-ATÉNA napětí na spodním povrchu betonu při hodnotě 180 kN se zobrazenými trhlinami (0,1 mm)

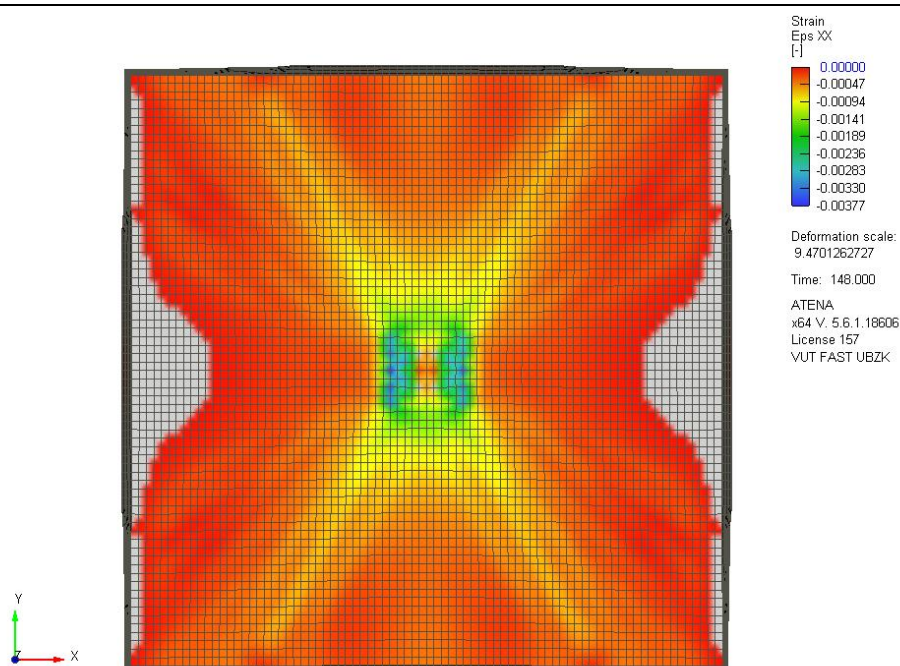
Směrnice dané křivky byla po vzniku trhliny stejná až do hodnoty přibližně 400 kN, kdy úměrně narůstala hodnota síly s deformací. Napětí v ocelové výztuži se pohybovalo na lineární větvi pracovního diagramu až do meze kluzu (platnost Hookova zákona). Při hodnotě cca 200 kN se začaly tvořit trhliny na bočních stranách desky, docházelo k rozšiřování diagonálních trhlin na spodním líci desky. S narůstající silou docházelo k vzniku nových trhlin na bočních stranách desky. Na dolním povrchu desky vznikaly a rozšiřovaly se diagonální trhliny a trhliny ve směrech podélné výztuže.

Při hodnotě 400 kN bylo dosaženo meze kluzu podélné ocelové výztuže. Na Obrázek 56 je vidět, že napětí v ocelové výztuži bylo v nejvíce exponovaném místě na hodnotě 550 MPa (pro střední hodnoty je mez kluzu rovna 550 MPa). Pracovní diagram ocelové výztuže překročil lineární větev a pokračoval po plastické větvi. Docházelo k mírnému změkčení betonové desky a v důsledku toho k zvětšení přírůstku deformací. Na horním povrchu betonové desky bylo přetvoření betonu na hodnotě přibližně 0,0015. Svislá deformace uprostřed desky odpovídala hodnotě cca 5,5 mm a roh desky se nadzvednul oproti nezatíženému stavu o cca 2,0 mm.

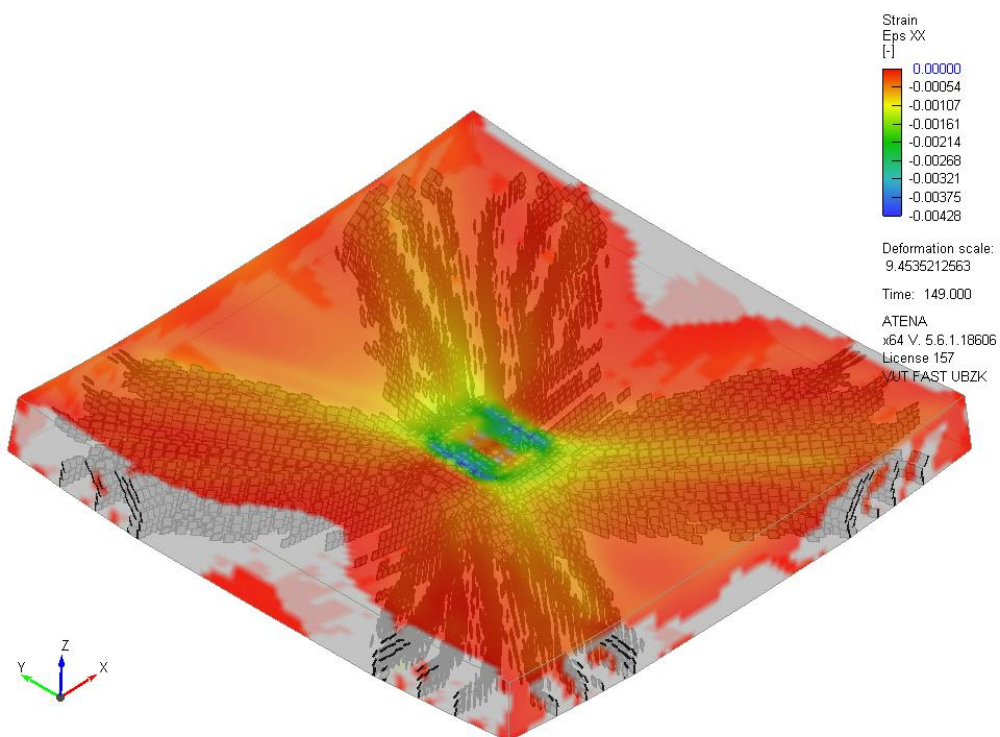


Obrázek 56: model č. 1. OCEL-ATÉNA napětí spodní podélné výztuže při hodnotě zatížení 400 kN

Selhání vzorku nastalo při síle 578 kN. Svislá deformace při porušení uprostřed vzorku byla cca 15,5 mm. Nadzvednutí rohu bylo přibližně o cca 5,0 mm. Došlo k protlačení zatěžovací desky na horním povrchu desky. Na Obrázek 57 je vidět, že přetvoření horního povrchu betonu bylo přibližně 0,003, ale nevznikly na horním povrchu betonu žádné trhliny. Napětí podélné výztuže bylo přibližně 566 MPa. Z velikosti napětí podélné výztuže, hodnotě přetvoření na horním povrchu betonu a množství vnitřních trhlin zobrazených na Obrázek 58 (zobrazeny trhliny větší jak 0,2 mm) lze konstatovat, že k porušení došlo vlivem rozdrčení vnitřních tlačných vzpěr betonu.



Obrázek 57: model č. 1. OCEL-ATÉNA přetvoření na horním povrchu betonu při hodnotě porušení 578 kN



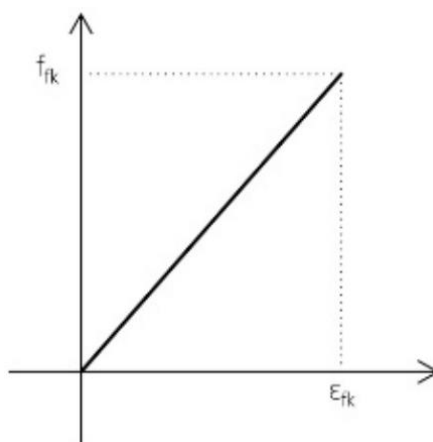
Obrázek 58: model č. 1. OCEL-ATÉNA trhliny větší jak 0,2mm uvnitř desky a přetvoření na povrchu desky při hodnotě porušení 578 kN

6.3.3 Model č. 2. FRP

Pro možnost porovnání rozdílné tuhosti výztužných vložek byl pro tento případ zvolen stejný průměr výztuže se stejnou osovou vzdáleností jako v případě modelu č. 1. OCEL. Typ a způsob výztužení vycházel z předběžného návrhu v kapitole 6.2.2. Krytí výztuže ve směru X u spodního líce bylo 15 mm. Podélná GFRP výztuž byla namodelována pomocí CCRReinforcement. Materiálové charakteristiky podélné GFRP výztuže jsou v Tabulka 16. Pro daný typ výztuže má pracovní diagram lineární větev (platnost Hookova zákona) až do porušení viz. Obrázek 59. Bylo nastaveno pevné kotvení konců výztuže, maximální soudržnost po celé délce prutu o hodnotě 10 MPa.

Tabulka 16: materiálové charakteristiky podélné GFRP výztuže

materiálová charakteristika	označení	hodnota	jednotka
Modul pružnosti	E_f	5.25E+04	MPa
Tahová pevnost	f_{fk}	1350	MPa
Přetvoření	ε_f	0.0257	-

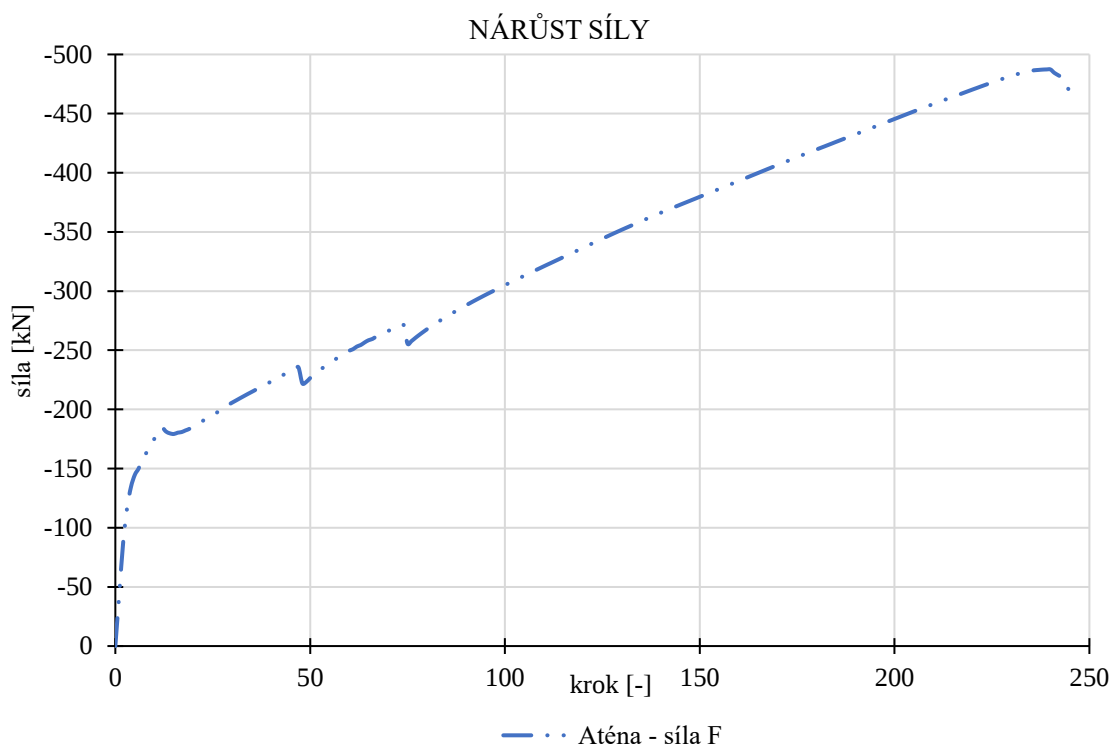


Obrázek 59: pracovní diagram pro GFRP výztuž v software ATENA

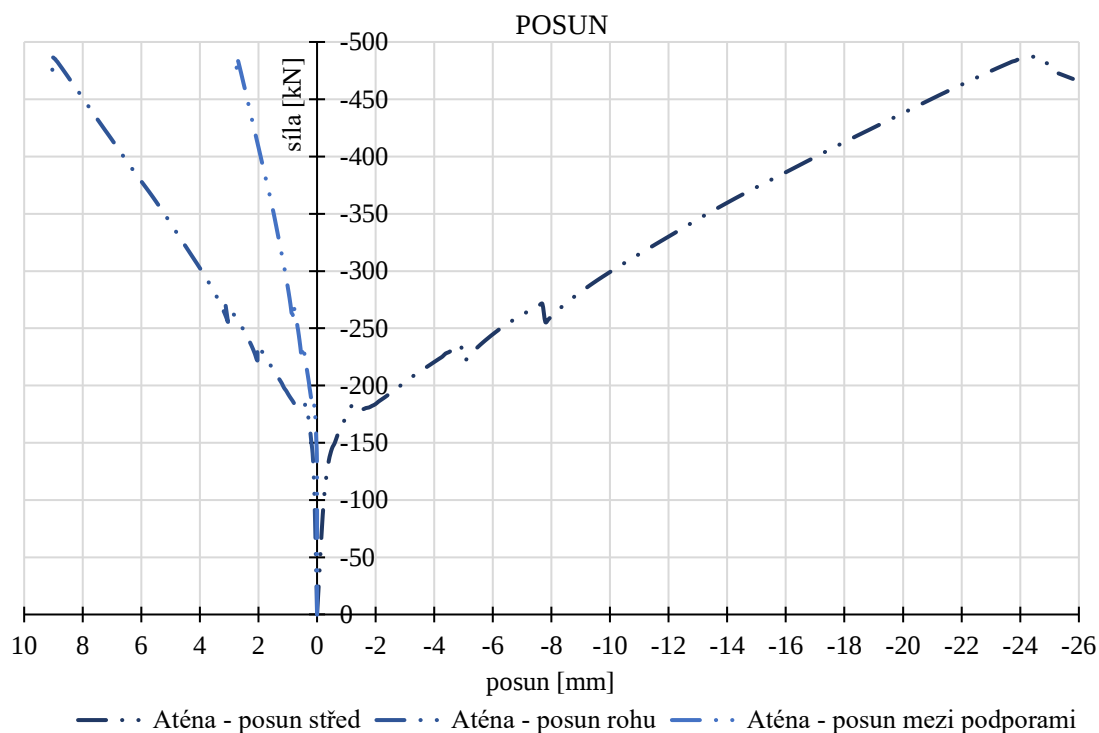
6.3.3.1 Výsledky výpočtu model č. 2. FRP

Závislost síly na iteračním kroku je znázorněna na Obrázek 60. Jako první se začaly tvořit diagonální trhliny na spodním líci při hodnotě přibližně 150 kN. Při této hodnotě bylo maximální napětí na spodním líci betonu přibližně 2,2 MPa viz. Obrázek 62. Docházelo k překročení tahové pevnosti betonu na spodním líci desky a únosnost začínala více záviset na podélné výztuži.

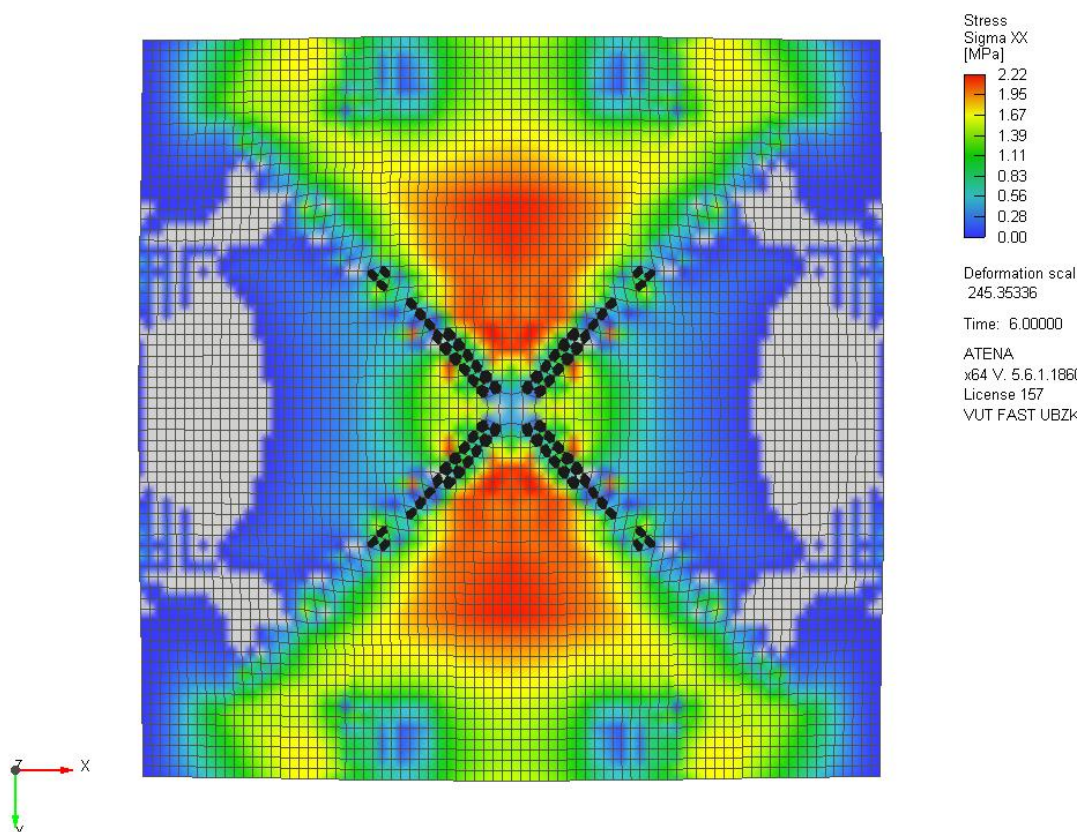
Do hodnoty 180 kN docházelo k rozvoji trhlin a vzniku trhlin v oblasti podpor. Při síle 180 kN je viditelná změna směrnice, došlo k významnému porušení betonu na spodním líci a únosnost začala záviset na výztuži. Maximální přetvoření v podélné GFRP výztuži bylo 0,0025 (tomu odpovídalo napětí 132,8 MPa). Průhyb uprostřed desky znázorněný na Obrázek 61 byl přibližně 1,2 mm, roh byl nadzvednut přibližně o 0,4 mm



Obrázek 60: model č. 2. FRP-ATÉNA průběh zatěžovací síly



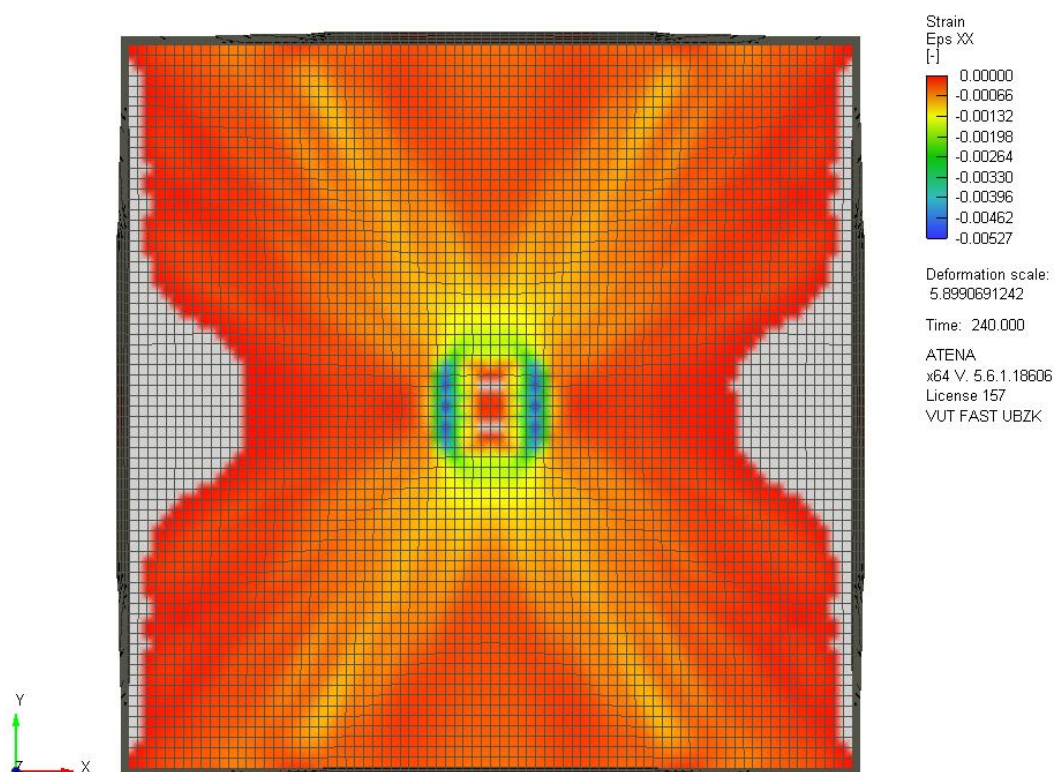
Obrázek 61: model č. 2. FRP-ATÉNA deformace



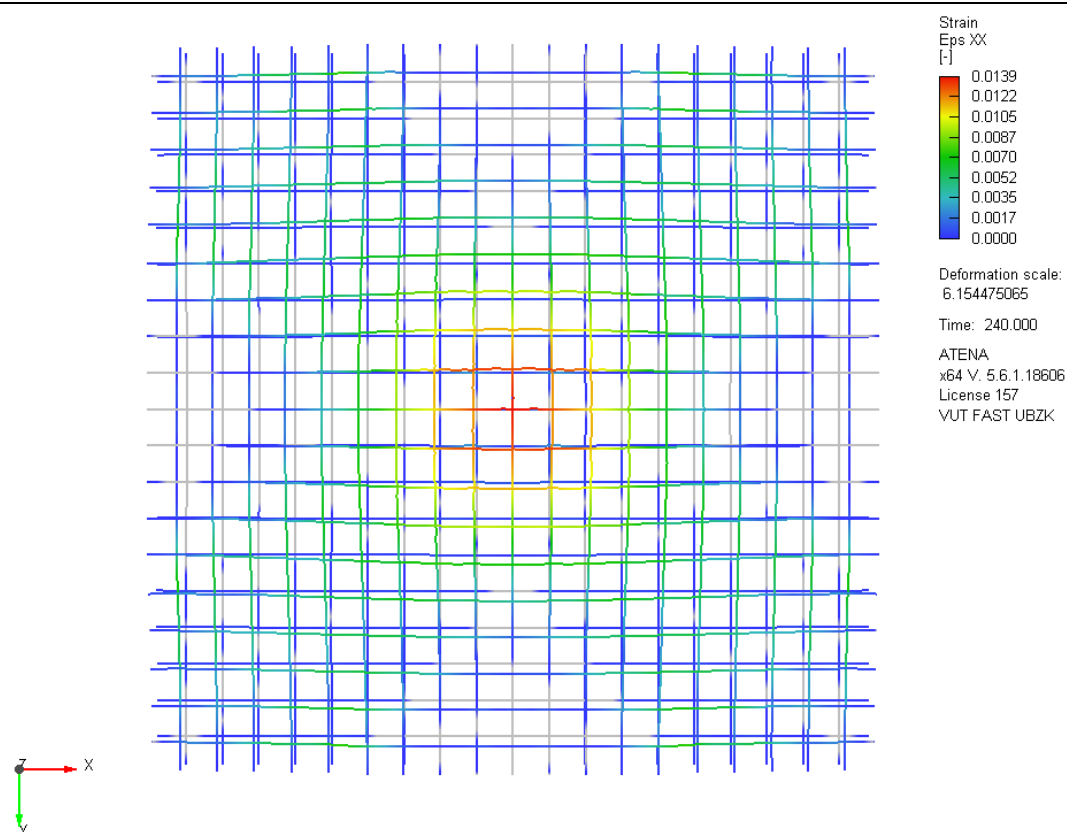
Obrázek 62: model č. 2. FRP-ATÉNA napětí na spodním povrchu betonu při hodnotě 150 kN se zobrazenými trhlinami (0,1 mm)

Po změně směrnice docházelo až do porušení k zvětšování a rozvoji trhlin, k zvyšování napětí ve výztuži. Docházelo k očekávaným deformacím, průhyb uprostřed desky měl opačný smysl než nadzvedávané rohy desky. Na výše uvedených grafech jsou viditelné skoky v nárůstu síly do úrovně přibližně 270 kN. Tyto skoky byly zapříčiněny konvergencí výpočtu. Po posledním skoku je viditelná přímá směrnice až do porušení a výpočet lze považovat za věrohodný.

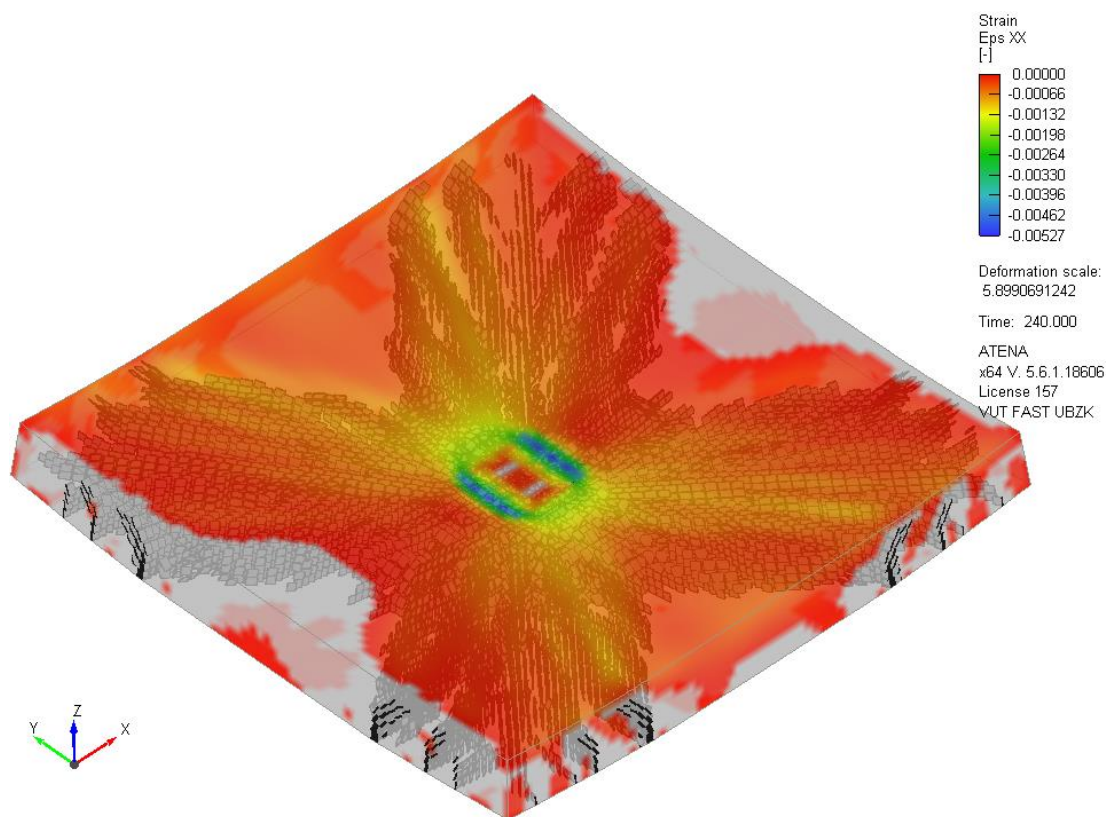
Porušení desky vyztužené podélnou GFRP výztuží v obou směrech nastalo při hodnotě přibližně 485 kN. Průhyb uprostřed byl desky 24 mm, roh desky se oproti nezatíženému stavu nadzvedl o 9 mm. Na Obrázek 63 je vidět, že k porušení došlo přímo pod zatěžovací deskou a nebylo na horním povrchu desky (mimo zatěžovací plochu) přetvoření v betonu, které by zapříčinilo jeho drcení. Maximální přetvoření podélné výztuže při porušení vzorku bylo 0,0139 (napětí = 732 MPa) viz. Obrázek 64. U nejvíce namáhaných vložek bylo využito 55 % krátkodobé pevnosti FRP výztuže. Na Obrázek 87 je znázorněno přetvoření na horním povrchu betonové desky a trhliny větší jak 0,2 mm uvnitř desky. Z množství trhlin uvnitř desky a neporušení výztuže lze konstatovat, že k porušení došlo vlivem rozdrčení betonových vzpěr uvnitř desky.



Obrázek 63: model č. 2. FRP-ATÉNA přetvoření na horním povrchu betonu při hodnotě porušení 485 kN



Obrázek 64: model č. 2. OCEL-ATÉNA přetvoření spodní podélné výztuže při hodnotě porušení 485 kN



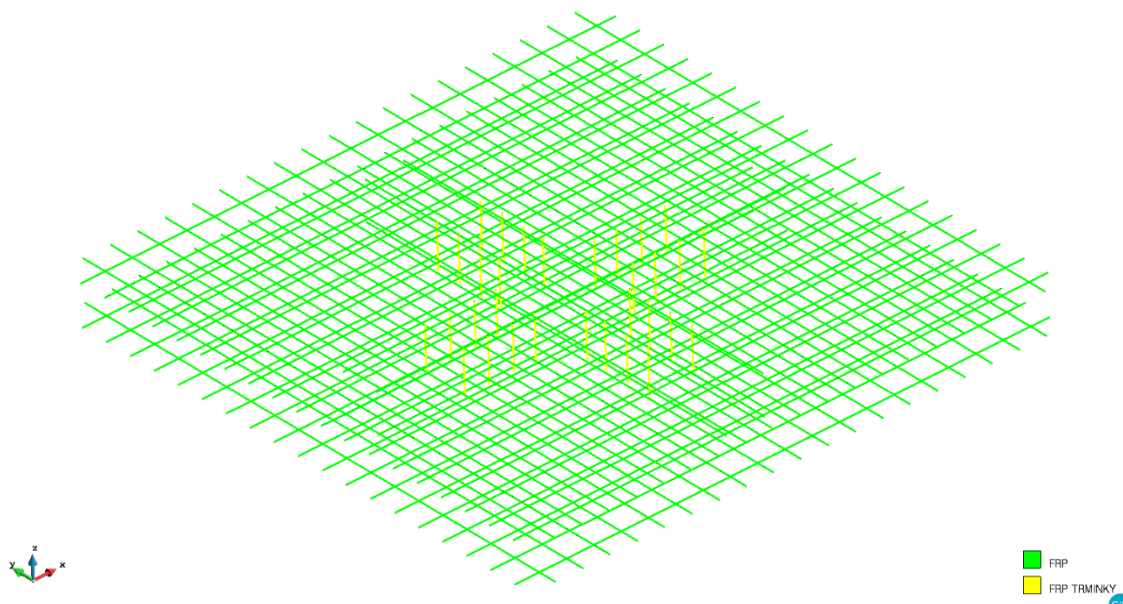
Obrázek 65: model č. 2. FRP-ATÉNA trhliny větší jak 0,2mm uvnitř desky a přetvoření na povrchu desky při hodnotě porušení 485 kN

6.3.4 Model č. 3. FRP-UTŘ

V tomto modelu byla stejná podélná výztuž jako v modelu č. 2. FRP. Materiálové charakteristiky a lineární pracovní diagram je zobrazen u předchozího modelu, kapitola 6.3.3. Z důvodu zajištění krytí smykové GFRP výztuže bylo krytí podélné výztuže ve směru X zvýšeno na 20 mm. GFRP třmínky byly namodelovány pomocí CCReinforcement. Materiálové charakteristiky jsou zobrazeny v Tabulka 17. Pracovní diagram je lineární až do porušení, jako u podélné GFRP výztuže. Tahová pevnost GFRP třmínků vychází ze vstupních předpokladů pro provádění experimentu, viz. kapitola 6.1. Třmínky byly namodelovány zjednodušeně jako svislé pruty. Pro zajištění kotvení se pro svislé pruty nastavila soudržnost o maximální hodnotě 10 MPa. Celé vyztužení modelu je zobrazeno na Obrázek 66.

Tabulka 17 materiálové charakteristiky smykové GFRP výztuže

materiálová charakteristika	označení	hodnota	jednotka
Modul pružnosti	E_f	5.25E+04	MPa
Tahová pevnost	f_{fk}	700	MPa
Přetvoření	ε_f	0.0133	-

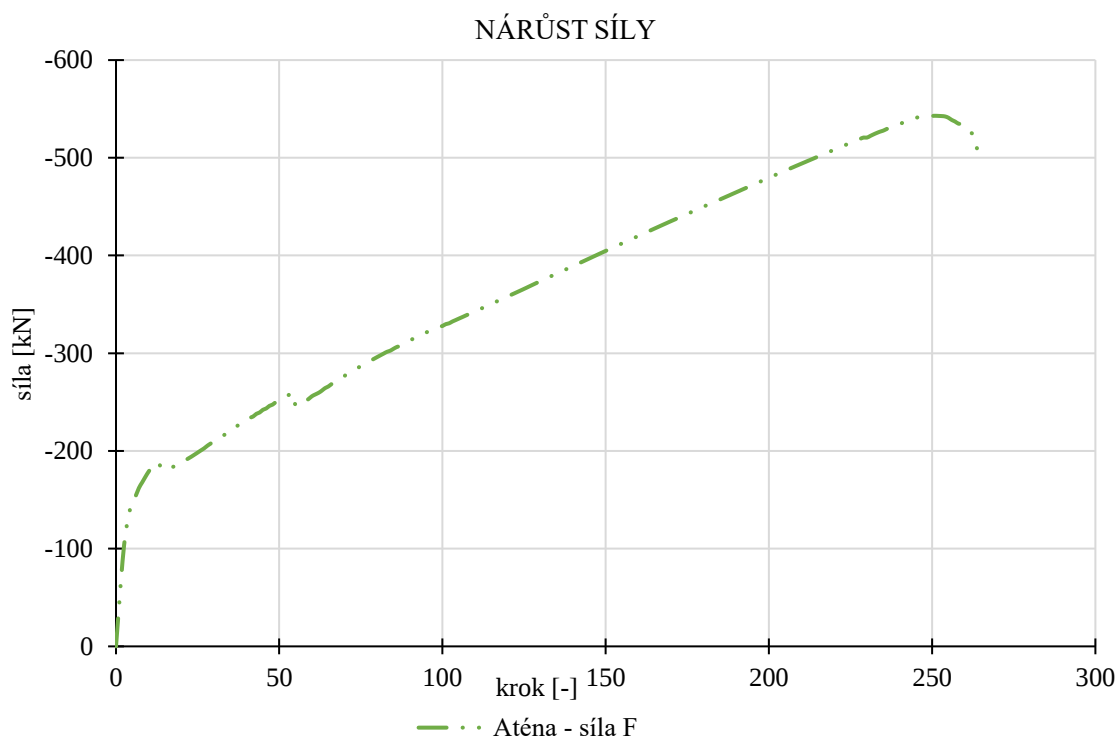


Obrázek 66: model č. 3. FRP-UTŘ vymodelovaná výztuž v programu Aténa – GiD

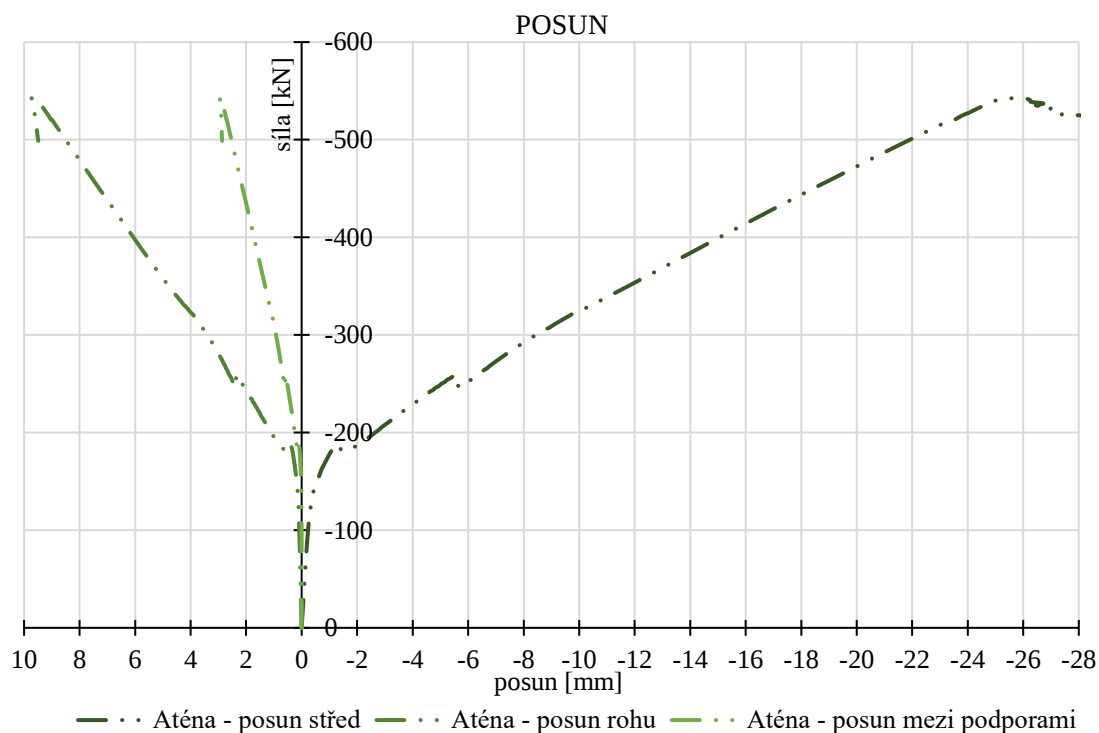
6.3.4.1 Výsledky výpočtu model č. 3. FRP-UTŘ

Hodnota zatížení v závislosti na iteračním kroku je zobrazena na Obrázek 67. Přírůstek síly měl stejnou směrnici do zatížení přibližně 180 kN. První diagonální trhliny na spodním líci desky se začaly tvořit při zatížení cca 150 kN. Napětí betonu na spodním líci desky bylo 2,21 MPa, docházelo k překročení tahové pevnosti betonu, viz. Obrázek 69. S rostoucím zatížením docházelo k rozšiřování trhlin, a únosnost začínala více záviset na smykové a podélné GFRP výztuže.

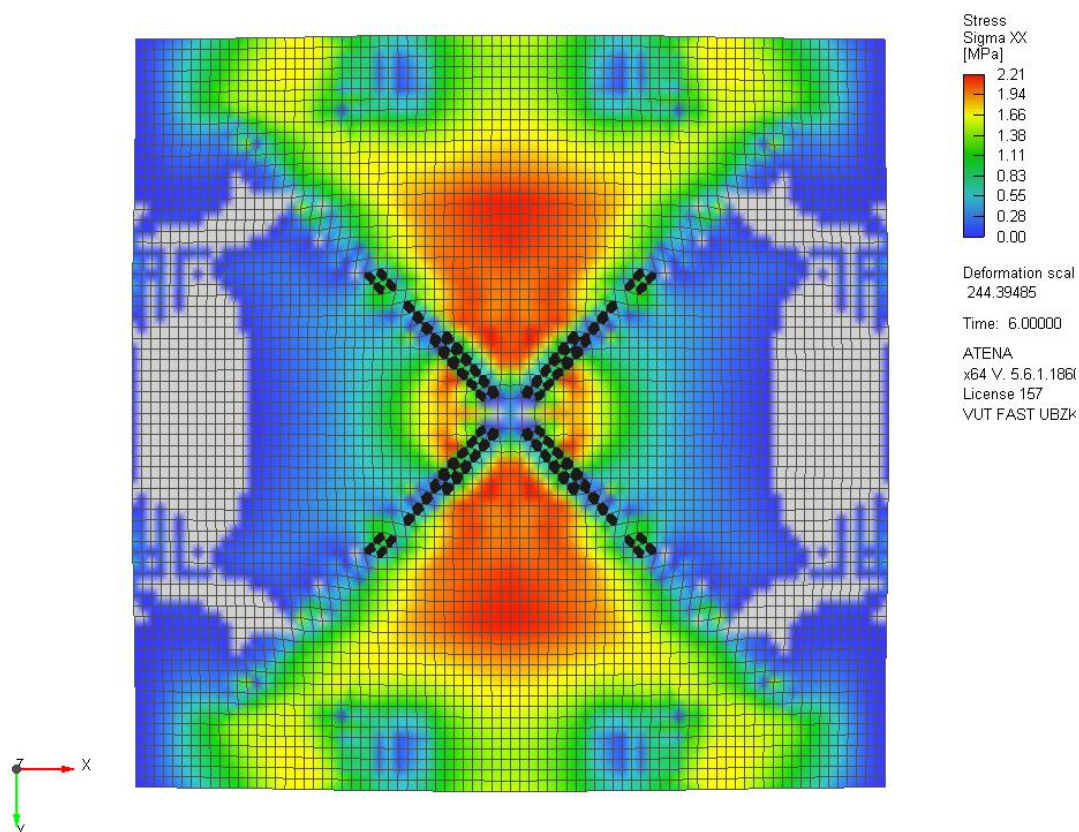
Viditelná změna směrnice nastala při síle 180 kN. Do tohoto okamžiku došlo k významnému potrhání spodního líce desky a únosnost závisela na podélné a smykové GFRP výztuži. Na Obrázek 68 je vidět, že průhyb ve středu desky byl 1,2 mm a roh byl nadzvednut oproti nezatíženému stavu o 0,4 mm. Maximální přetvoření v podélné výztuži bylo 0,002, ve smykové výztuži bylo maximální přetvoření menší než 0,0001.



Obrázek 67: model č. 3. FRP-UTŘ-ATÉNA průběh zatěžovací síly



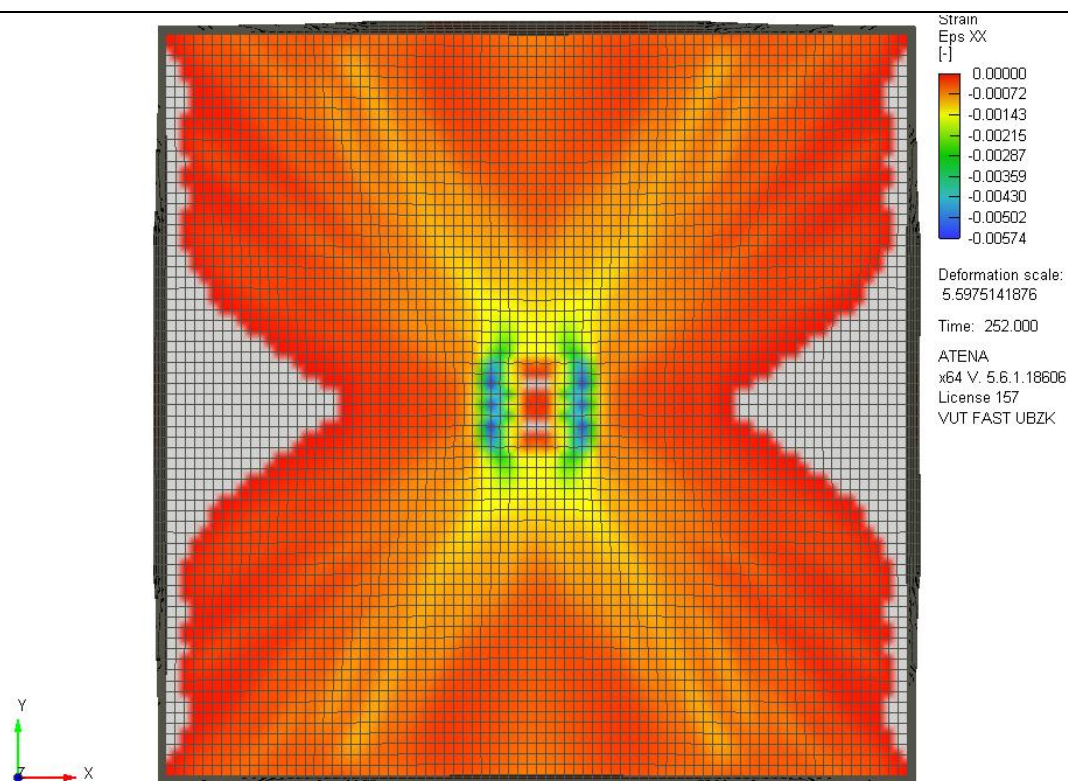
Obrázek 68: model č. 3. FRP-UTŘ-ATÉNA deformace



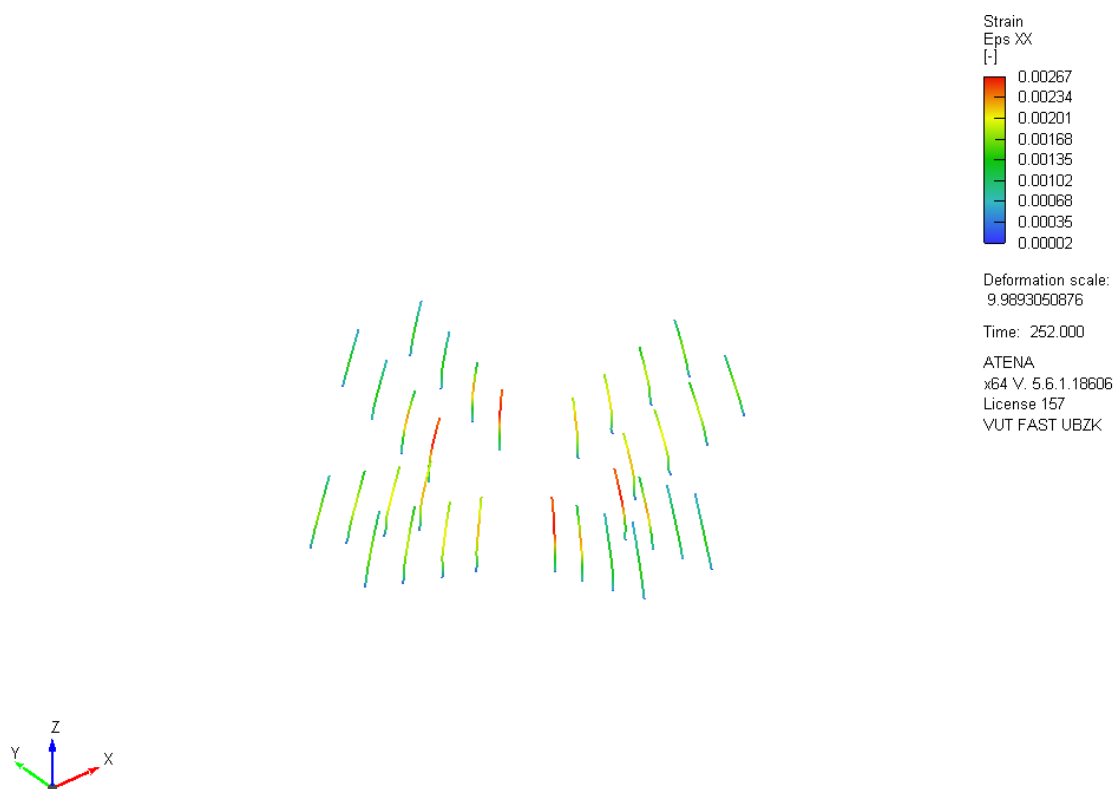
Obrázek 69: model č. 3. FRP-UTŘ-ATÉNA napětí na spodním povrchu betonu při hodnotě 150 kN se zobrazenými trhlinami (0,1 mm)

Od síly 180 kN až do porušení docházelo k zvětšování a rozvoji trhlin, k zvyšování napětí ve smykové a podélné výztuži. Výše uvedené deformace měly předpokládaný průběh. Docházelo k nadzvedávání rohu desky a průhybu uprostřed desky. Viditelné skoky v průběhu zatěžovací zkoušky do síly přibližně 250 kN byly způsobeny numerickým výpočtem. Po posledním skoku následovala přímá směřnice až do porušení a lze předpokládat, že výpočet byl korektní.

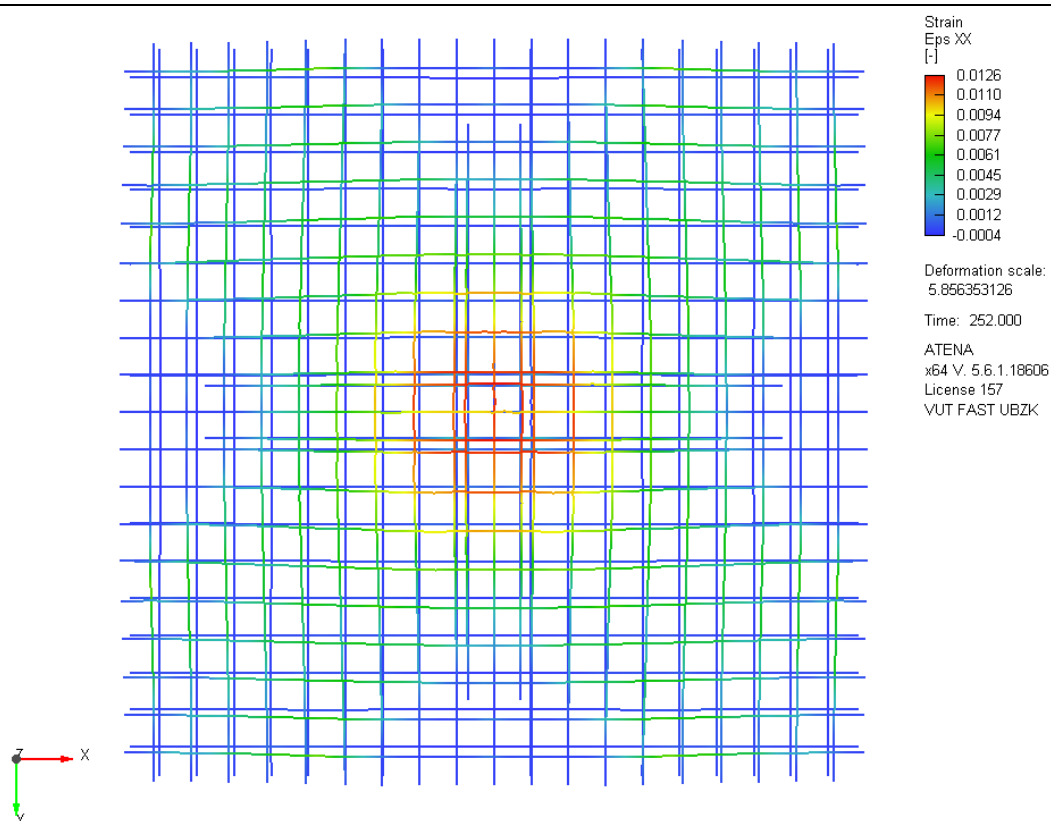
Při hodnotě 540 kN došlo k porušení desky vyztužené podélnou a smykovou GFRP výztuží. Při porušení byl roh desky nazvednut o 10 mm oproti počátečnímu stavu. Průhyb uprostřed desky byl 26 mm. Porušení nastalo přímo pod roznášecí deskou. Maximální přetvoření na horním povrchu betonové desky je zobrazeno na Obrázek 70. Na horním povrchu desky (mimo zatěžovanou plochu) nevznikly žádné trhliny vlivem drcení betonu. Při porušení bylo maximální přetvoření v třmíncích 0,0027 (napětí = 140 MPa). Na Obrázek 71 je znázorněno, že největšího namáhání bylo dosaženo v blízkosti kotevní oblasti GFRP třmínku. V nejvíce namáhané podélné výztuži bylo dosaženo přetvoření 0,0126 (napětí = 661 MPa) viz. Obrázek 72. To odpovídá přibližně 49 % krátkodobé pevnosti použité GFRP výztuže. Z velikosti trhlin větších jak 0,2mm uvnitř průřezu na Obrázek 73 lze konstatovat, že k porušení došlo vlivem rozdrcení tlačných vzpěr uvnitř průřezu.



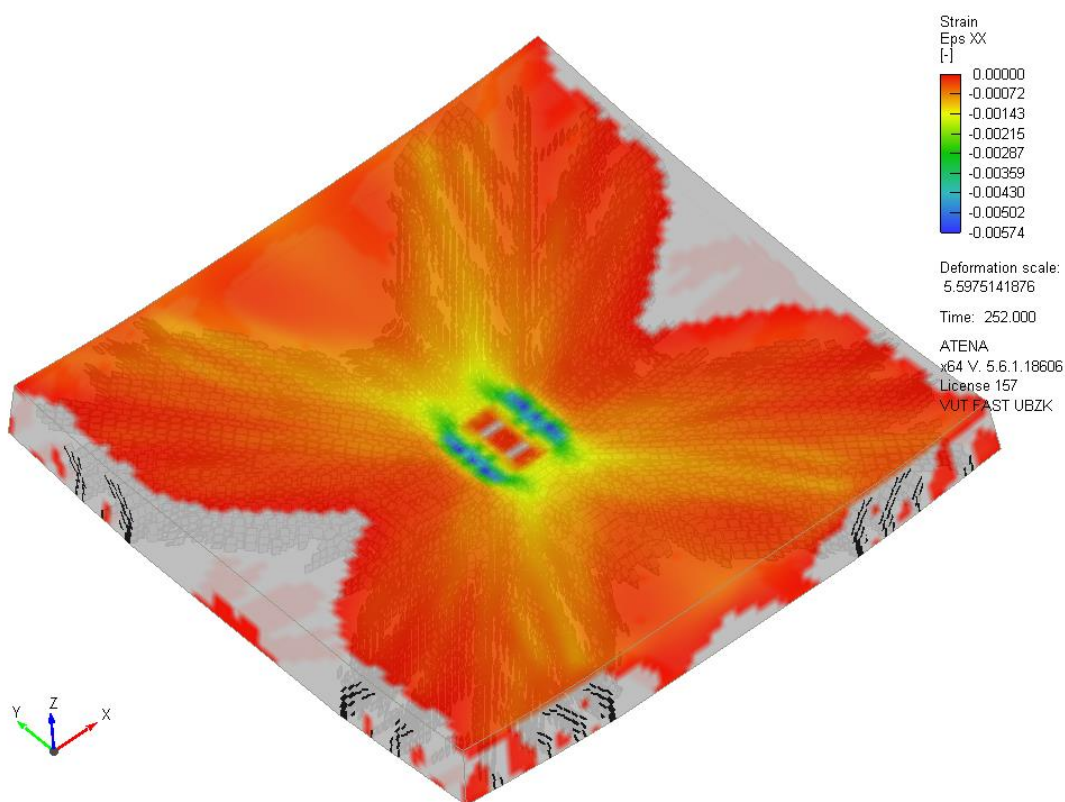
Obrázek 70: model č. 3. FRP-UTŘ-ATÉNA přetvoření na horním povrchu betonu při hodnotě porušení 540 kN



Obrázek 71: model č. 3. FRP-UTŘ-ATÉNA přetvoření GFRP třmíneků při hodnotě porušení 540 kN



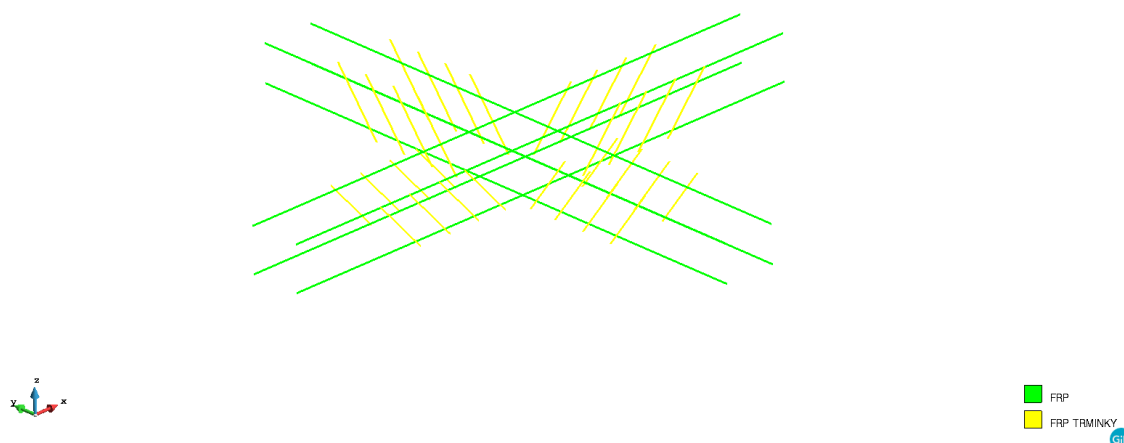
Obrázek 72: model č. 3. FRP-UTŘ-ATÉNA přetvoření spodní podélné výztuže při hodnotě porušení 540 kN



Obrázek 73: model č. 3. FRP-UTŘ-ATÉNA trhliny větší jak 0,2mm uvnitř desky a přetvoření na povrchu desky při hodnotě porušení 540 kN

6.3.5 Model č. 4. FRP-45TR

Tento model měl stejnou podélnou výztuž jako model č. 2. FRP. Pracovní diagram a materiálové charakteristiky podélné GFRP výztuže jsou uvedeny v kapitole 6.3.3. Tato varianta bude tvořit alternativní model ke vzorku č. 3. FRP-UTŘ. V tomto případě byl vytvořen smykový kříž, kde GFRP třmínky svíraly se střednicí desky úhel 45° . Pro GFRP třmínky byl použitý stejný materiál a způsob modelování jako v předchozím modelu viz. kapitola 6.3.4.

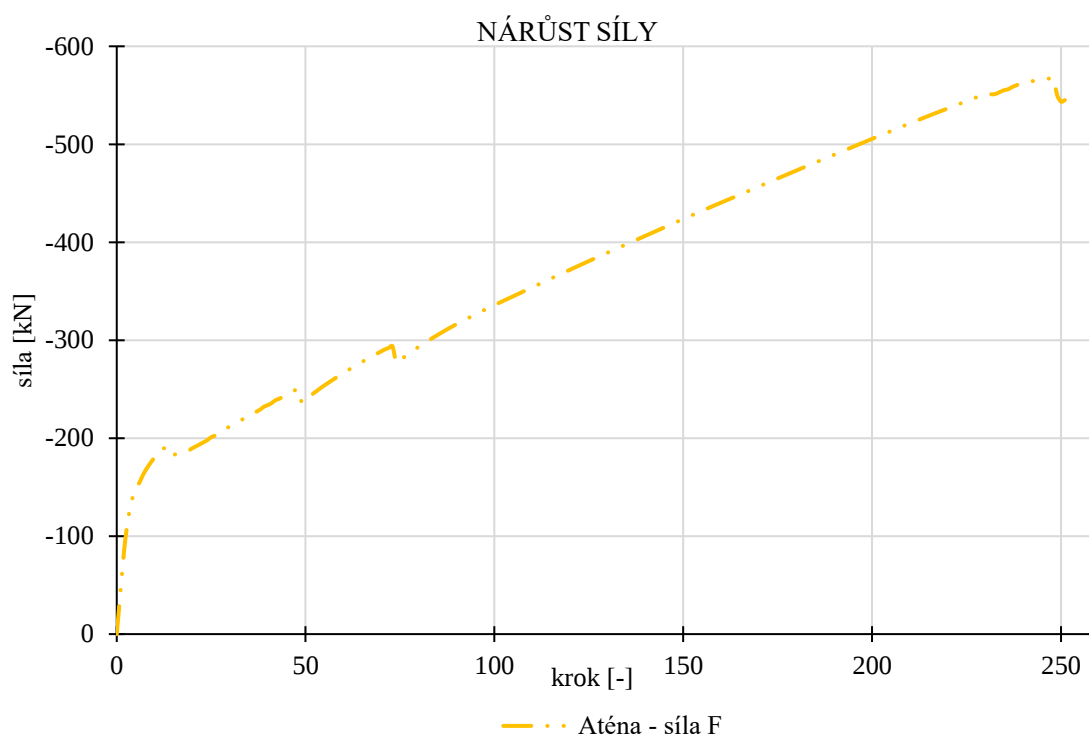


Obrázek 74: model č. 4. FRP-45TR vymodelovaný smykový kříž v programu Atena – GiD

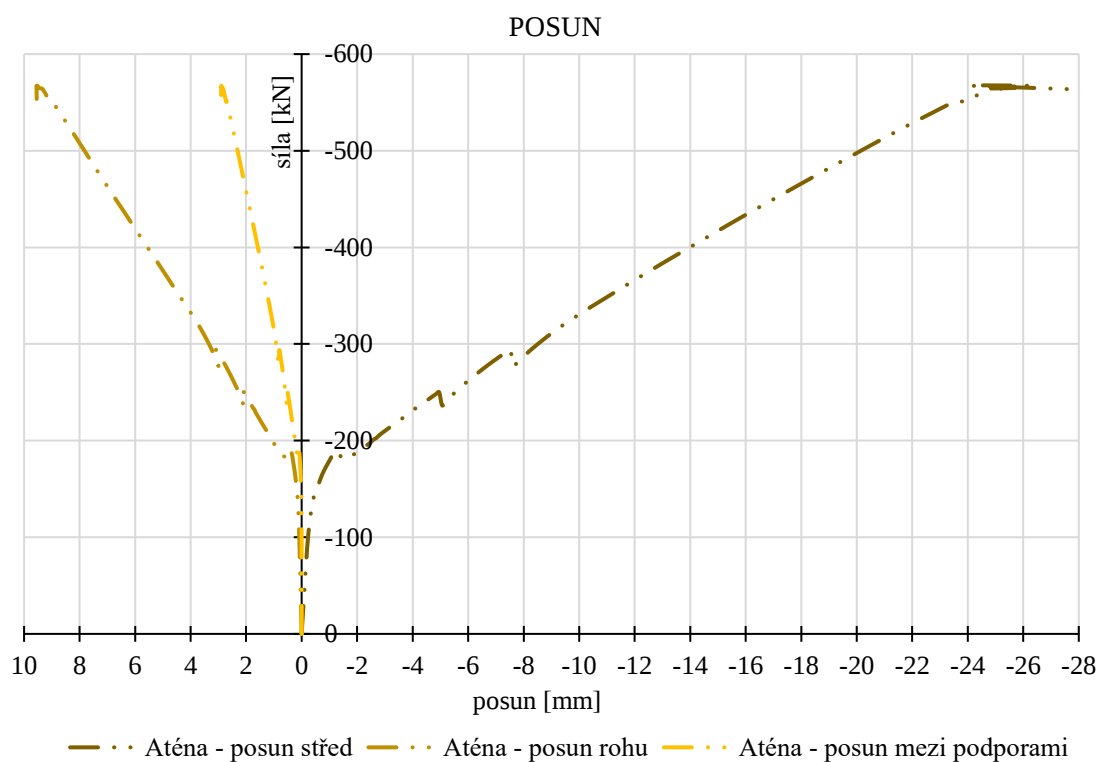
6.3.5.1 Výsledky výpočtu model č. 4. FRP-45TR

Závislost zatížení na iteračním kroku je zobrazena na Obrázek 75. Přírůstek síly měl stejnou směrnici až do hodnoty síly přibližně 180 kN. Při hodnotě síly přibližně 150 kN se na dolním povrchu desky začaly tvořit první diagonální trhliny. Na Obrázek 77 je znázorněno, že napětí betonu na spodním líci desky je 2,25 MPa a překročilo tak tahovou pevnost betonu. S rostoucím zatížením docházelo ke vzniku a rozšiřování trhlin. Únosnost začínala více záviset na podélné a smykové GFRP výztuži.

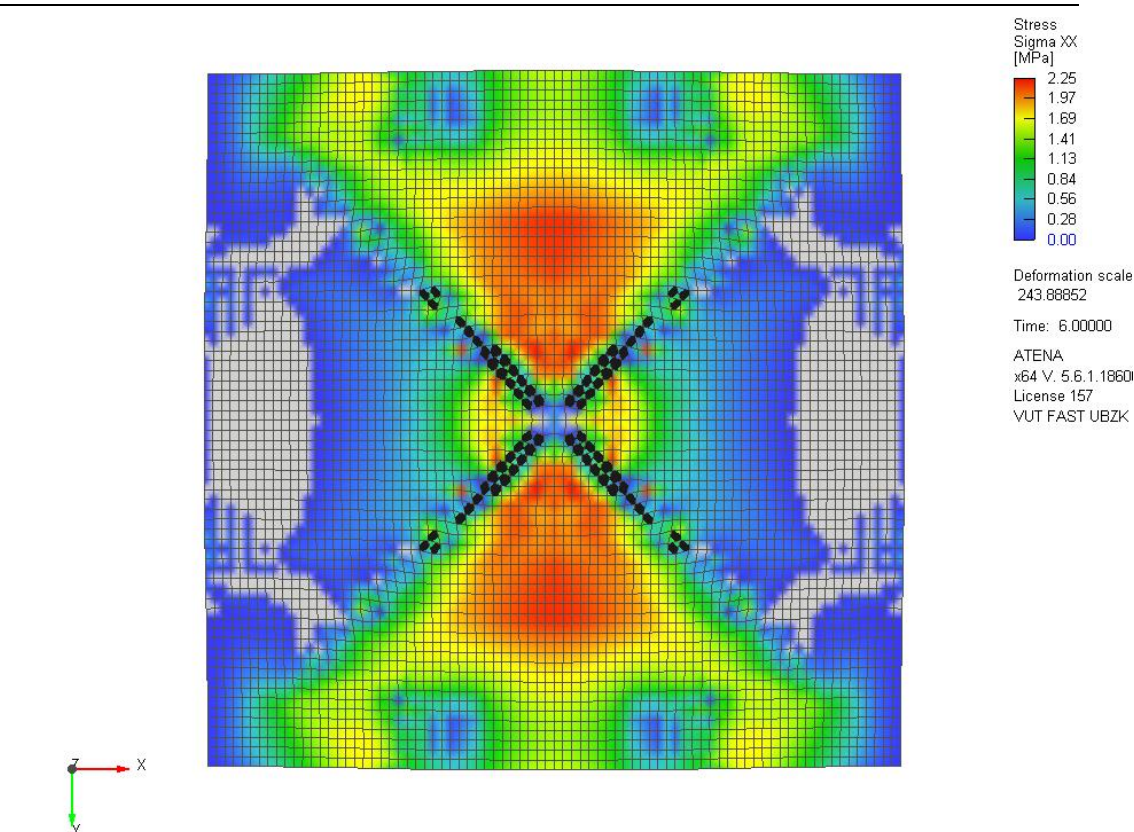
Při síle 180 kN je možné pozorovat viditelnou změnu směrnice. Docházelo k vzniku a rozvoji trhlin, únosnost závisela na smykové a podélné výztuži. Na Obrázek 76 je možné pozorovat, že průhyb ve středu desky byl 1,0 mm. Roh byl oproti nezatíženému stavu nadzvednut o 0,4 mm. Maximální přetvoření v podélné výztuži při změně směrnice bylo 0,002 a ve smykové GFRP výztuži bylo maximální přetvoření 0,0001.



Obrázek 75: model č. 4. FRP-45TR-ATÉNA průběh zatěžovací síly



Obrázek 76: model č. 4. FRP-45TR-ATÉNA deformace

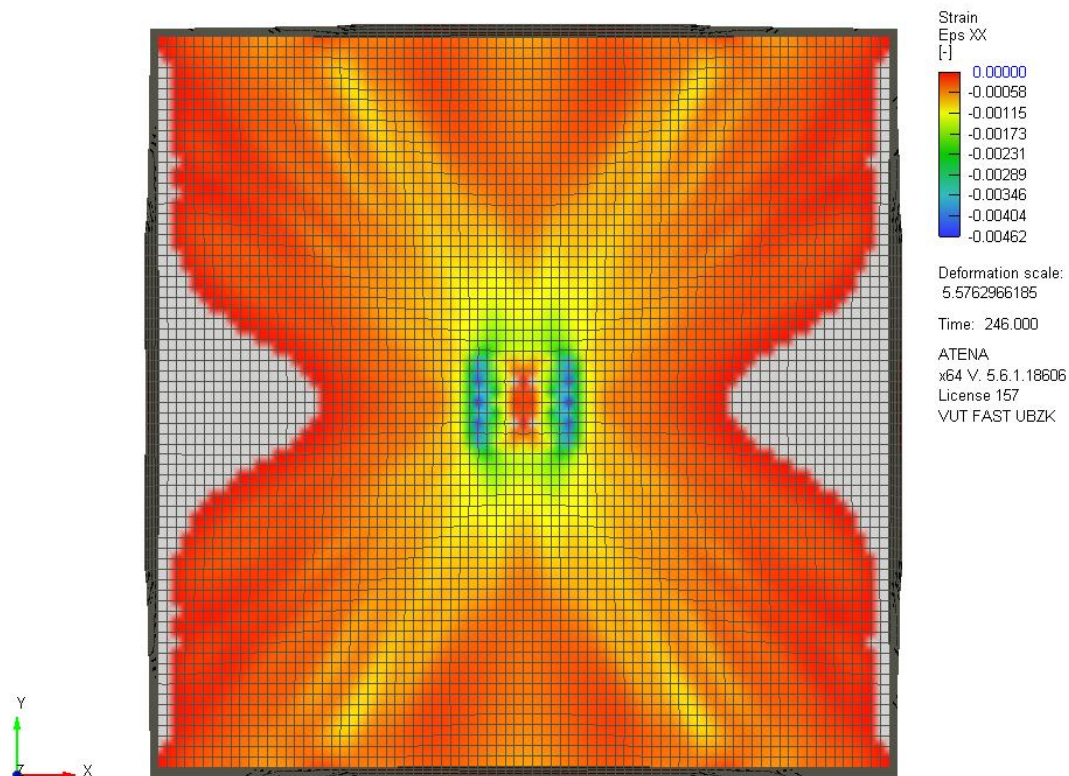


Obrázek 77: model č. 4. FRP-45TR-ATÉNA napětí na spodním povrchu betonu při hodnotě 150 kN se zobrazenými trhlinami (0,1 mm)

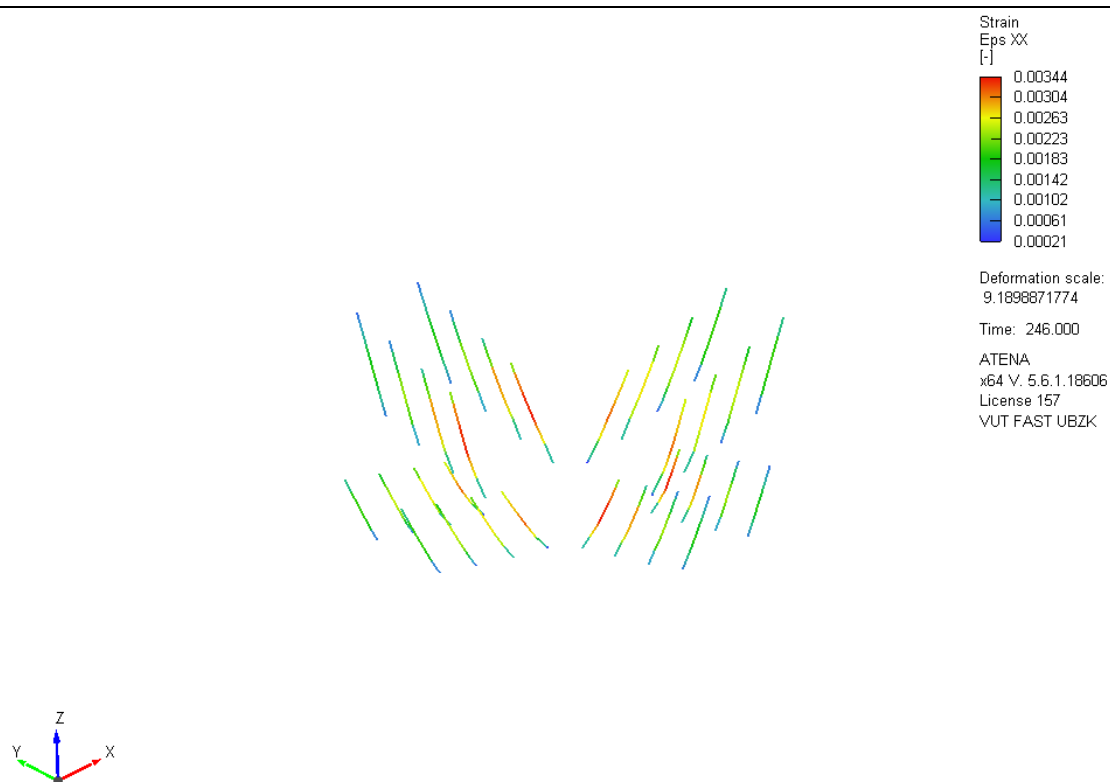
Od síly 180 kN až do porušení docházelo k zvětšování a rozvoji trhlin, k zvyšování napětí ve smykové a podélné výztuži. Výše uvedené deformace měly předpokládaný průběh. Docházelo k nadzvedávání rohu desky a průhybu uprostřed desky. Viditelné skoky v průběhu zatěžovací zkoušky do síly přibližně 295 kN byly způsobeny numerickými chybami. Po posledním skoku následovala přímá směřnice až do porušení a lze předpokládat, že výpočet byl věrohodný.

Při zatížení 565 kN došlo k porušení desky vyztužené podélnou GFRP výztuží a smykovým GFRP výztuží s třmínky pod úhlem 45 °. Průhyb ve středu desky byl při porušení přibližně 26 mm. Roh desky byl oproti počátečnímu stavu nadzvednut o 9,5 mm. K porušení došlo přímo pod zatěžovací deskou. Na Obrázek 78 je zobrazeno maximální přetvoření betonu na horním povrchu desky, nedošlo k vzniku trhlin vlivem drcení betonu. Maximální přetvoření GFRP třmínků při porušení bylo 0,0034 (napětí = 180 MPa). Maximálních hodnot bylo dosaženo v přímých částech třmínků viz. Obrázek 79. Na Obrázek 89 je vidět, že v nejvíce namáhané GFRP výztuži bylo dosaženo

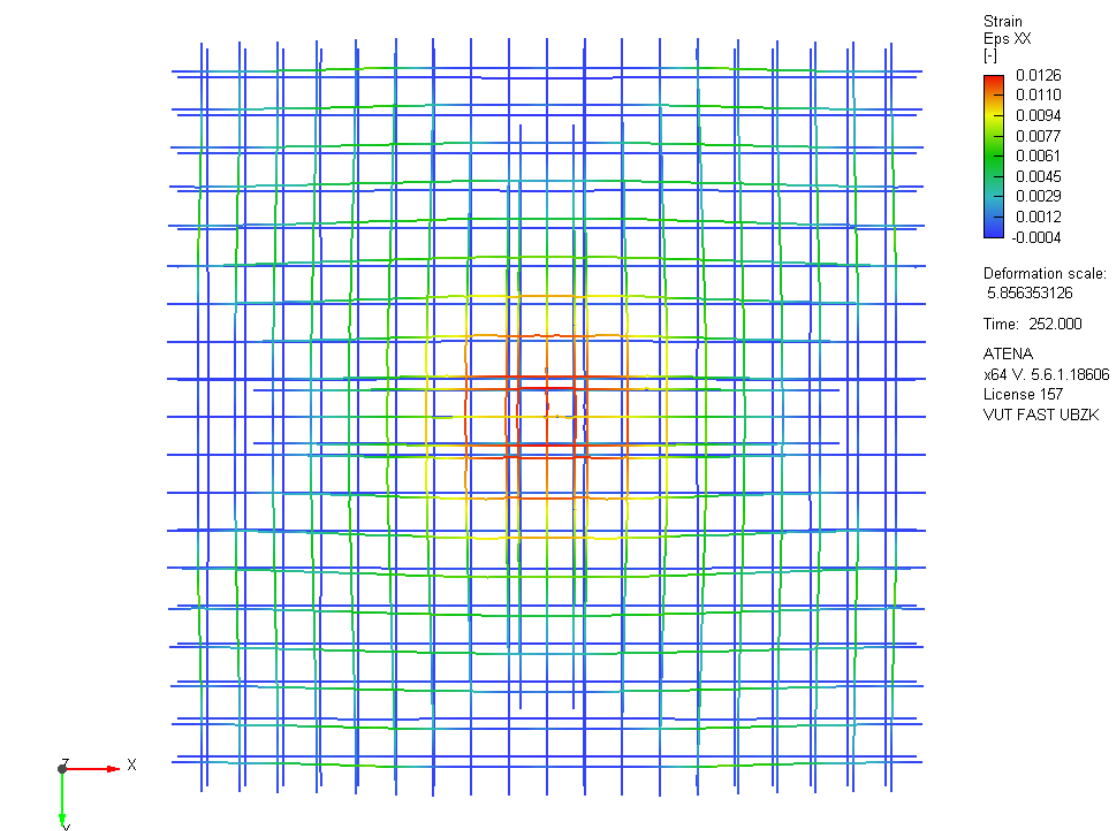
přetvoření 0,0136 (napětí = 715 MPa). Maximální dosažená hodnota odpovídá přibližně 53 % krátkodobé únosnosti přímých GFRP prutů. Z důvodu nepřetržení výztuže, velikosti trhlin uvnitř průřezu na Obrázek 81 lze konstatovat, že k porušení došlo vlivem rozdrčení tlačných vzpěr uvnitř průřezu.



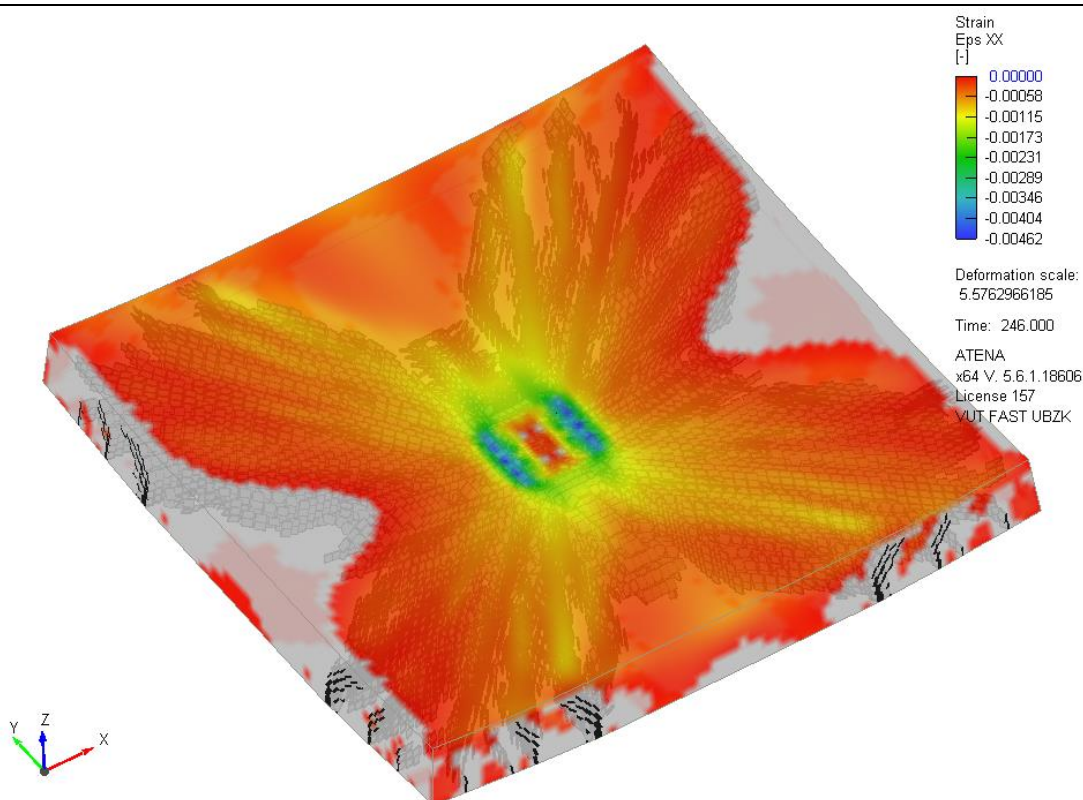
Obrázek 78: model č. 4. FRP-45TŘ-ATÉNA přetvoření na horním povrchu betonu při hodnotě porušení 565 kN



Obrázek 79: model č. 4. FRP-45TŘ-ATÉNA přetvoření GFRP třmíneků při hodnotě porušení 565 kN



Obrázek 80: model č. 4. FRP-45TŘ-ATÉNA přetvoření spodní podélné výztuže při hodnotě porušení 565 kN

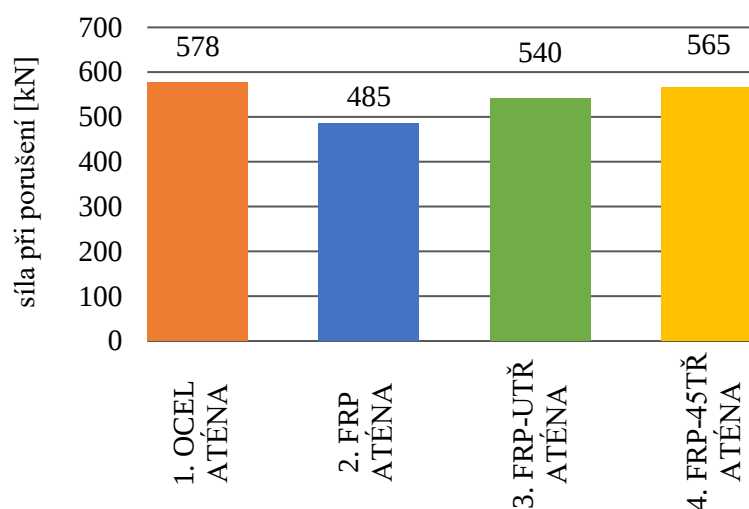


Obrázek 81: model č. 4. FRP-45TR-ATÉNA trhliny větší jak 0,2mm uvnitř desky a přetvoření na povrchu desky při hodnotě porušení 565 kN

6.3.6 Srovnání výsledků modelů

Byly provedeny čtyři modely v softwaru Aténa, které simulovaly reálnou zatěžovací zkoušku a bylo tak možné odhadnout chování reálných vzorků a sílu při které se vzorky měly porušit. Předpoklady pro nelineární modely jsou uvedeny výše v této kapitole. Typ a způsob vyztužení vycházel z předběžného návrhu v kapitole 6.2. Srovnání únosnosti pro jednotlivé modely je znázorněno na Obrázek 82. Nejvyšší únosnosti 578 kN dosáhl model č. 1. OCEL, který byl vyztužen pouze podélnou ocelovou výztuží v obou směrech. Pro srovnání vlivu tuhosti výztuže byl vytvořen model č. 2. FRP, který byl vyztužen stejnou plochou výztuže jako předchozí model, ale byla uvažována GFRP výztuž. Model s GFRP výztuží dosáhl 84 % únosnosti ocelové varianty. Zbývající modely měly poukázat na vliv vložení smykové GFRP výztuže. V případě svislých třmínků (model č. 3. FRP-UTŘ) byl nárůst únosnosti oproti modelu č. 2. FRP o 11 %. Pro model s GFRP třmínky pod úhlem 45 ° byl nárůst únosnosti o 16 %. U všech modelů došlo ke křehkému porušení přímo pod zatěžovací deskou. Po

provedení skutečných zkoušek bude možné upravit materiálové charakteristiky a vlastnosti jednotlivých modelů.



Obrázek 82: porovnání hodnot mezní únosnosti modelů v softwaru Aténa

6.4 Výroba zkušebních vzorků

Z důvodu použití nižší pevnostní třídy betonu se přistoupilo k betonáži na výzkumném centru Admas v Brně. Prefa Brno dodala čtyři kusy bednění na betonáž desek zobrazených na Obrázek 83. Včetně dřevěného bednění byla dodána svařená ocelová výztuž v požadované podobě (průměr 10 mm ve vzdálenosti po 100 mm). Prefa Brno také dodala transportní úchyty Deha. Kompozitní výztuž dodala Prefa Kompozity, a.s. Brno, celkem se jednalo cca 200 kusů prutů GFRP výztuže o délce 1960 mm viz. Obrázek 84 a cca 40 GFRP třmínků o délce hrany 170 mm viz. Obrázek 86. Desky byly zatěžovány shora tedy opačně než při klasickém působení desky podepřené sloupem. Tento fakt měl vliv na ukládání výztuže do bednění, která se kvůli tomu musela dávat naopak (horní výztuž řešeného detailu v tomto případě byla u dolního okraje).



Obrázek 83: čtyři kusy dřevěného bednění pro betonáž desek 2000x2000 mm



Obrázek 84: GRFP přímá výztuž o délce 1960 mm



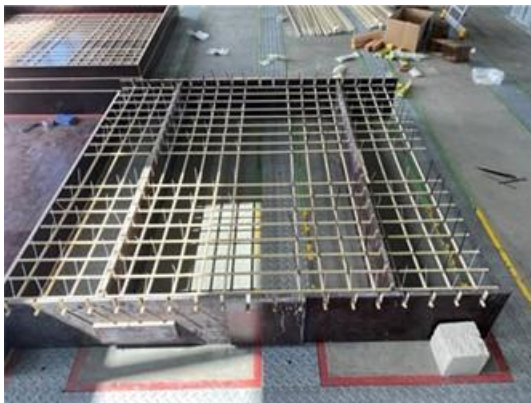
Obrázek 85: detail GRFP výztuže



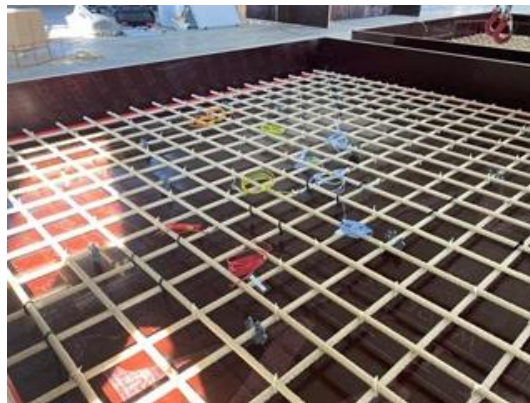
Obrázek 86: GRFP třmínky o délce větve 170 mm

Z rovných prutů bylo potřeba vytvořit požadovaný základní rastr o osové vzdálenosti 100 mm mezi pruty. Pro tento účel byla vyrobena dřevěná šablona (Obrázek 87), kde byla zajištěna přesná poloha jednotlivých prutů. Pomocí šablony bylo možné spojení GFRP výztuží pomocí stahovacích plastových pásek. Při vázání výztuže, která byla při zatěžování u dolního okraje, byly vynechány prostřední pruty. Na tyto vynechané pruty byly osazeny odporové tenzometry pro měření přetvoření ve výztuži. Pruty s tenzometry se osazovaly až před umístěním celého rastru do bednění, aby nedošlo k poškození tenzometrů při manipulaci s výztuží. V případě varianty s ocelovou výztuží byly tenzometry osazeny dodatečně na již svázanou výztuž. Desky se smykovou GFRP výztuží navíc měly odporové tenzometry i na smykové výztuži. Polohy tenzometrů jsou popsány v kapitole 6.5.1. Pro zajištění krytí spodní výztuže byly na pruty vloženy distance, které zajišťovaly krytí 15 mm (pro variantu 3.FR-UTŘ bylo krytí 20 mm). Před vložením spodní vrstvy výztuže do bednění bylo bednění očištěno a

vymazáno odbedňovacím tukem. Od tenzometrů bylo nutné vyvést kabely mimo bednění, aby nedošlo k jejich porušení při zatěžování a bylo zajištěno měření přetvoření na výztuži po celou dobu provádění zatěžovací zkoušky.



Obrázek 87: vázání výztuže v připravené šabloně, vynechání prutů, kde byly tenzometry



Obrázek 88: pohled na FRP výztuž uloženou v bednění (výztuž provedena v obrácené poloze)

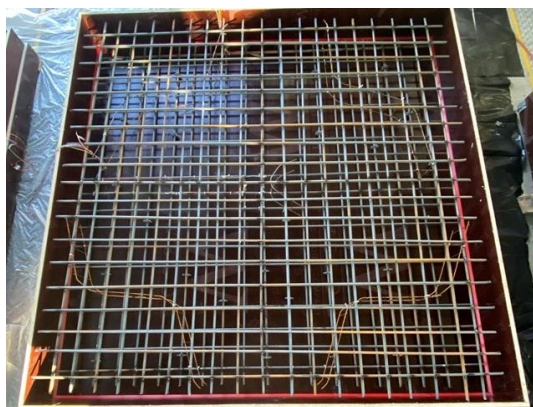
Vzorky bez smykové výztuže (1. OCEL, 2. FRP) byly vyráběny obdobně bez ohledu na typ výztuže. Na dolní výztuž uloženou v bednění se vložily ocelové mřížové distance, které zajišťovaly vzdálenost 130 mm mezi dolní a horní vrstvou výztuže. Ocelové mřížové distance byly ze slabého drátu a jejich poloha byla zvolena tak, aby nedošlo k ovlivnění výsledků při porušení protlačáním. Horní výztuž se vložila na ocelové distance a následně se zajistila jejich poloha svázáním s distancemi.



Obrázek 89: vzorek č. 1. OCEL uložení spodní ocelové výztuže v bednění, vložené ocelové distance (výztuž provedena v obrácené poloze)



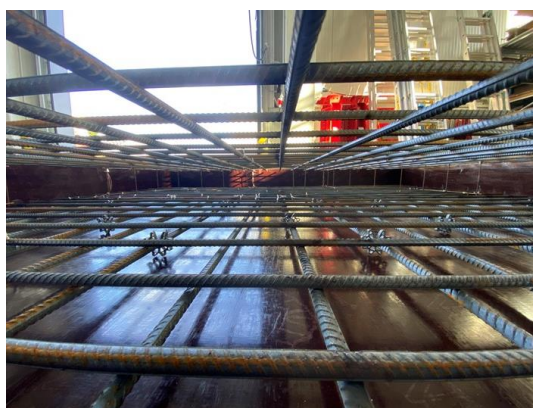
Obrázek 90: vzorek č. 2. FRP uložení spodní GFRP výztuže v bednění, vložené ocelové distance (výztuž provedena v obrácené poloze)



Obrázek 91: vzorek č. 1. OCEL hotové vyztužení
(výztuž provedena v obrácené poloze)



Obrázek 92: vzorek č. 2. FRP hotové vyztužení
(výztuž provedena v obrácené poloze)



Obrázek 93: vzorek č. 1. OCEL prostor mezi
výztužemi (výztuž provedena v obrácené poloze)



Obrázek 94: vzorek č. 2. FRP prostor mezi
výztužemi (výztuž provedena v obrácené poloze)

U vzorku č. 3. FRP-UTŘ se třmínky dodatečně nasunuly na spojenou dolní s horní výztuží. Zajištění polohy horní vrstvy výztuže bylo provedeno stejně jako u variant bez smykové výztuže pomocí ocelových distancí. Následně byly nasunuty třmínky tvaru „U“ (Obrázek 31) do polohy určené z předběžného návrhu, viz. kapitola 6.2.3 a 6.2.4. Z důvodu zajištění polohy třmínků byl do každého rohu třmínku vložen GFRP prut o průměru 10 mm. Pro možnost měření přetvoření FRP třmínků byly na třmínky osazeny odporové tenzometry. Celá svázaná výztuž byla následně zpět uložena do bednění.



Obrázek 95: vzorek č. 3. FRP-UTŘ hotové výztužení (výztuž provedena v obrácené poloze)



Obrázek 96: vzorek č. 3. FRP-UTŘ pohled na smykovou GFRP výztuž (výztuž provedena v obrácené poloze)

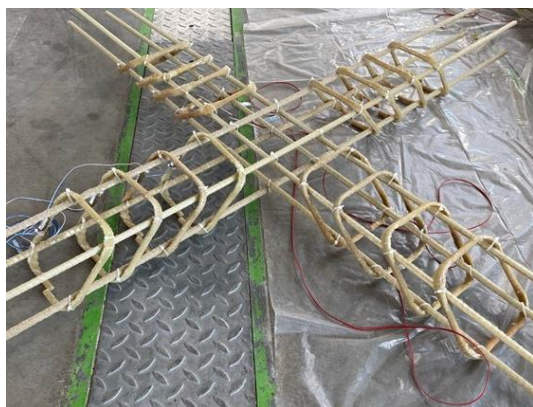


Obrázek 97: vzorek č. 3. FRP-UTŘ prostor mezi výztužemi (výztuž provedena v obrácené poloze)



Obrázek 98: vzorek č. 3. FRP-UTŘ prostor mezi výztužemi (výztuž provedena v obrácené poloze)

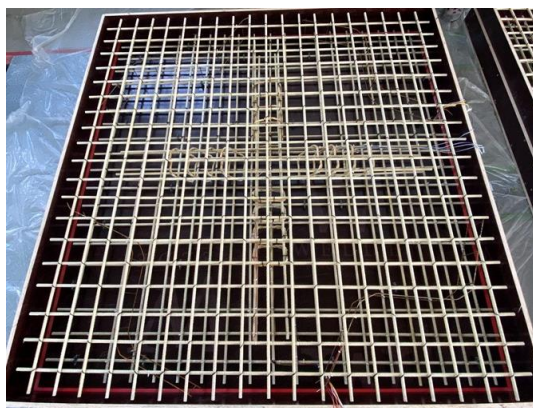
V případě vzorku č. 4. FRP-45TŘ byla smyková výztuž tvořena smykovým křížem (Obrázek 99), který tvořila přídatná výztuž v rozích třmínků a třmínky pod úhlem 45°. Smykový kříž byl vytvořen mimo bednění a následně se vložil na spodní výztuž. Pro zajištění měření přetvoření na smykové výztuži byly osazeny odporové tenzometry. Na okolní místa spodní výztuže se vložily ocelové distance jako v předchozích variantách a následně na to byla položena a zajištěna poloha horní výztuže.



Obrázek 99: vzorek č. 4. FRP-45TŘ smykový kříž



Obrázek 100: vzorek č. 4. FRP-45TŘ vložení smykového kříže na spodní vrstvu výztuže (výztuž provedena v obrácené poloze)



Obrázek 101: vzorek č. 4. FRP-45TŘ hotové vyztužení (výztuž provedena v obrácené poloze)



Obrázek 102: vzorek č. 4. FRP-45TŘ prostor mezi výztužemi (výztuž provedena v obrácené poloze)

Z betonárky Presta-mix Kuřim byl objednávan domíchávač s betonem o pevnosti C20/25, konzistenci S5 a maximální velikostí zrna kameniva 8 mm. Betonáž probíhala postupně po jednotlivých vzorcích. Beton byl z domíchávače dopravován pomocí skluzu do bednění. V bednění se beton rovnoměrně zhutňoval pomocí ponorného vibrátoru. Při betonáži se do bednění umístily transportní trny Deha. Výšková úroveň horní hrany desky se upravila pomocí dřevěné latě, kterou se odstranil přebytečný beton. Po částečném zatuhnutí betonu byly horní plochy betonových desek uhlazeny ocelovým hladítkem a zakryty fóliemi. Desky byly kropeny vodou a zakrývány fóliemi, aby byl redukován negativní vliv smrštění a vysychání.

V průběhu betonáže všech vzorků byl postupně odebírán beton, který se umístil do zkušebních sedmi krychlí a třech trámců. Krychle a trámce byly zhutněny na vibračním stole. Tyto vzorky byly odebrány z důvodu, aby bylo možné přesně specifikovat

materiálové charakteristiky betonu, z kterého byly vzorky vyrobeny. Pomocí přesných materiálových charakteristik je následně možné zpřesnit předběžných návrh a nelineární analýzu.



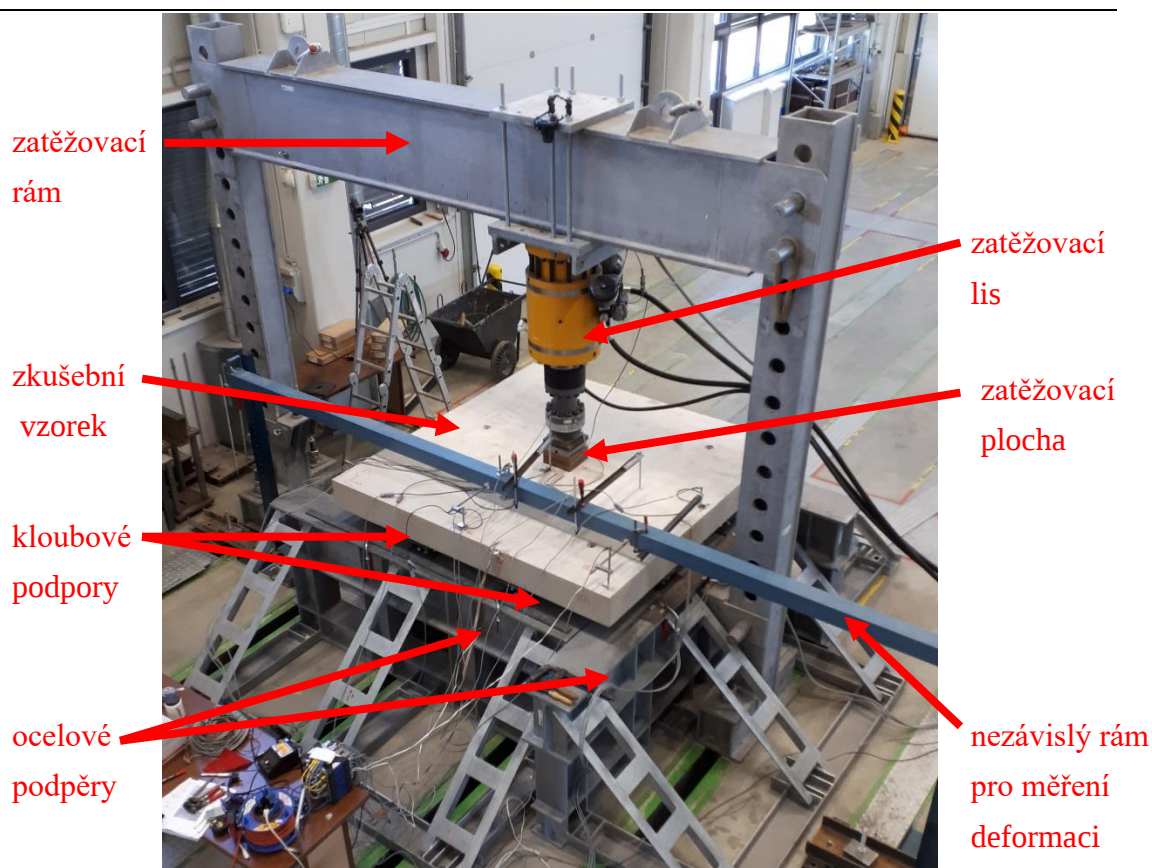
Obrázek 103: zahmlazený povrch vybetonované desky



Obrázek 104: krychle s odebraným betonem pro stanovení charakteristik betonu

6.5 Provádění experimentu

Čtyři varianty betonových desek s odlišným typem vyztužení se po nabytí 7denní pevnosti betonu odbednily, přemístily na skládku a nechaly vytvrdnout. Po nabytí plné 28denní pevnosti betonu se přistoupilo ke zkoušení vzorků. Pro možnost zkoušení se vytvořil zkušební rám tvořen z příčnicku se zatěžovacím pneumatickým lisem a ocelových podpěr pro umístění bodových kloubových podpor. Z důvodu měření deformací na povrchu desky byl vytvořen nezávislý rám. Zkušební místo s popisem je znázorněno na Obrázek 105. Pneumatický lis může vyvinout maximální sílu o hodnotě 1 MN s maximálním výsunem hlavice 10 cm. Mezi zatěžovací ocelovou desku a hlavici lisu byl vložen kloub, aby bylo zajištěno rovnoměrné zatěžování na ploše 200x200 mm uprostřed betonové desky. Vzorky byly zatěžovány deformačně, rychlostí 4 mm/min. Na ocelových podpěrách byly v předem stanovených pozicích (Obrázek 47) umístěny bodové kloubové podpory, které zajišťovaly možnost pootočení ve všech směrech. Posunu bylo zabráněno pouze ve svislém směru. Přesný typ a tvar kloubové podpory je znázorněn na Obrázek 107. Na nezávislém rámu byly umístěny indukčnostní snímače dráhy pro zajištění měření deformací na desce. Nezávislý rám byl vytvořen z důvodu, aby nedošlo k ovlivnění výsledků vlivem případných deformací zatěžovacího rámu nebo ocelových podpěr.



Obrázek 105: pohled na zkušební místo pro zkoušení betonových desek



Obrázek 106: pohled na kloubové podpory pro betonové desky

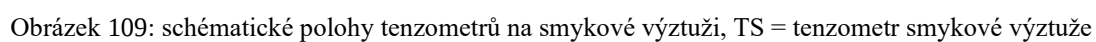
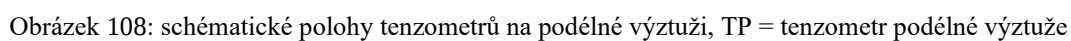


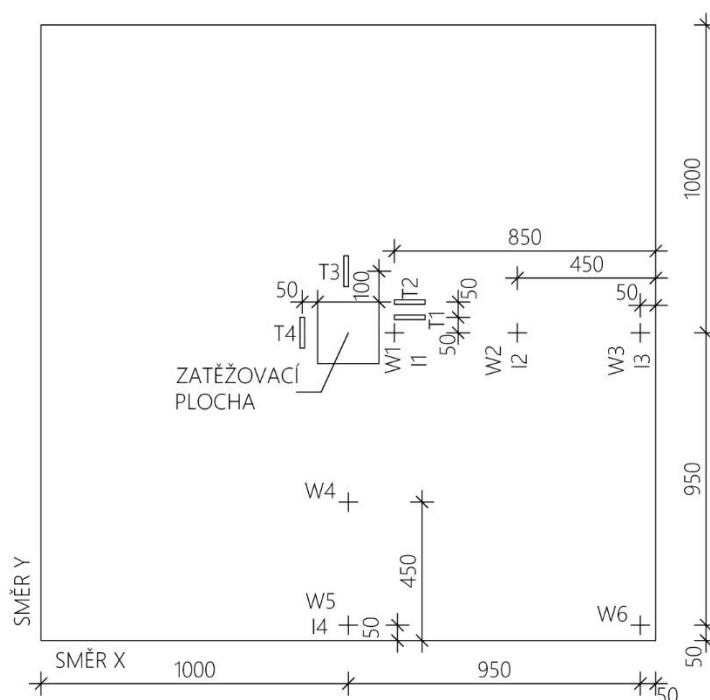
Obrázek 107: detail kloubové podpory

6.5.1 Měřicí zařízení pro vyhodnocení vzorků

Pro možnost vyhodnocení zkoušek a chování jednotlivých materiálů, ale i vzorku jako celku, byly desky osazeny řadou snímačů. Na střední podélné pruty ve směru X a Y byly osazeny tři odporové tenzometry. Dva odporové tenzometry byly také umístěny vždy na jeden prut hned vedle středového. Přesné polohy odporových tenzometrů jsou

znázorněny na Obrázek 108. V případě variant se smykovou výztuží byly odporové tenzometry také osazeny na FRP třmínky. Vždy 4 odporové tenzometry na smykovou výztuž ve směru X a 2 odporové tenzometry na 2. a 3. FRP třmínek ve směru Y viz. Obrázek 109. Odporové tenzometry umožnily sledovat přetvoření ve výztuži a bylo tak možné dopočítat napětí, kterého výztuž dosahovala. Další měřicí zařízení byla umístěna na povrchu betonové desky viz. Obrázek 110. Měřicí snímače na povrchu betonové desky byly umístěny přibližně ve stejných pozicích jako byly odporové tenzometry na vnitřní výztuži. Pro možnost sledování deformací desek byly použity indukčnostní snímače dráhy. Celkem bylo použito 6 indukčnostních snímačů dráhy v různých polohách. Díky tomu bylo možno pozorovat skutečné deformace jednotlivých vzorků. Tyto snímače byly připevněny k nezávislému měřicímu rámu, aby nedošlo k ovlivnění výsledků případnými deformacemi zatěžovacího rámu, případně ocelových podpěr. Indukčnostní snímač dráhy označen W1 byl v blízkosti zatěžované plochy a stanovoval přibližný maximální průhyb ve středu desky. Průhyb byl snímán ve směru působení zatížení. Indukčnostní snímače dráhy označeny W3 a W5 byly umístěny na okraji desky. Tyto snímače měly znázorňovat rozdílné průhyby ve směru X a ve směru Y v závislosti na účinné výšce dané podélné výztuže pro daný směr. Indukčnostní snímač dráhy umístěný v rohu desky označen W6 sledoval opačnou hodnotu než zbývající indukčnostní snímače dráhy. Předpokládalo se nadzvedávání rohů. Pro možnost zjištění náklonu desky byly použity 4 inklinometry. Toto měřicí zařízení sledovalo náklon desky v daném místě. Pomocí inklinometrů bylo možné následně stanovit tečny k průhybové čáře daného vzorku. V okolí zatěžovací plochy byly dále osazeny 4 tenzometry na povrchu betonu. Tenzometry stanovovaly přetvoření na povrchu betonu. Pomocí těchto tenzometrů bylo možné přesně stanovit přetvoření betonu v tlaku na povrchu desky.





Obrázek 110: polohy měřících zařízení na zatěžovaném povrchu desky, W = indukčnostní snímač dráhy, T = odporový tenzometr na povrchu betonu, I = inklinometr



Obrázek 111: měřící zařízení na horním povrchu desky č. 1. OCEL



Obrázek 112: inklinometr, indukčnostní snímač dráhy a tenzometry v okolí zatěžovací plochy

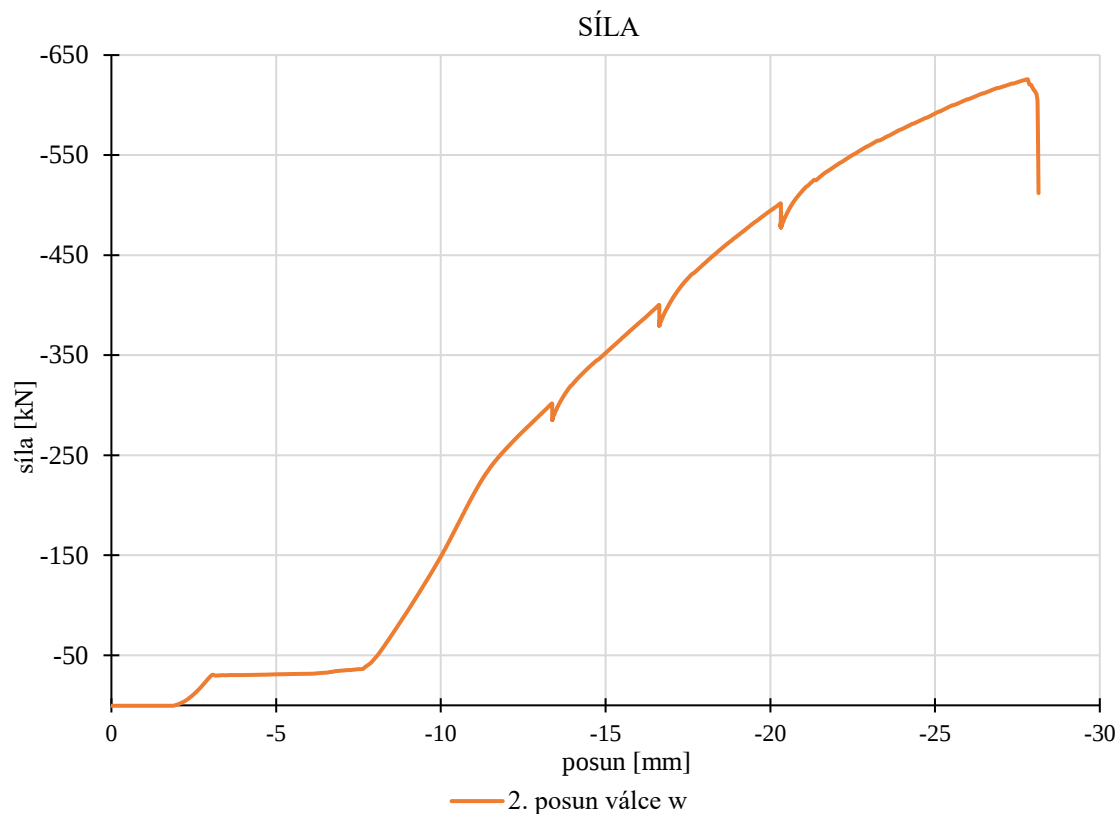
6.5.2 Vzorek č. 1. OCEL

Varianta č. 1. OCEL byla pro začátek cyklicky zatížena ve 3 cyklech. Přetížení bylo na 150 kN a odtíženo zpět na 10 kN. Poslední třetí cyklus byl přetížen na hodnotu 200 kN a zpět odtíženo na 10 kN. Při posledním cyklu vznikly na spodním povrchu trhliny viz. Obrázek 113. Po posledním odtížení na 10 kN bylo aplikováno deformační zatížení s přírůstkem 4 mm/min až do porušení. Deformační zatížení až do porušení bylo aplikováno již potrháný vzorek na spodním líci desky.

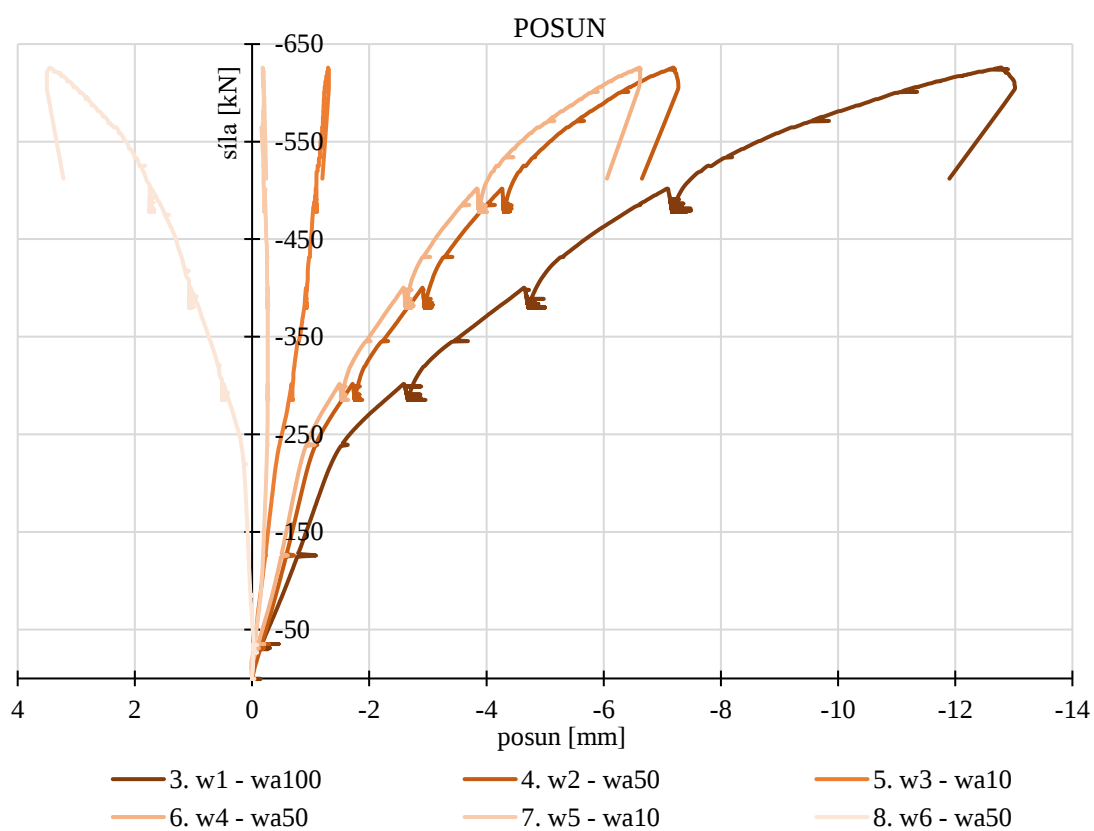


Obrázek 113: vzorek č. 1. OCEL trhliny na spodním líci při překročení hodnoty 150 kN během cyklického zatížení

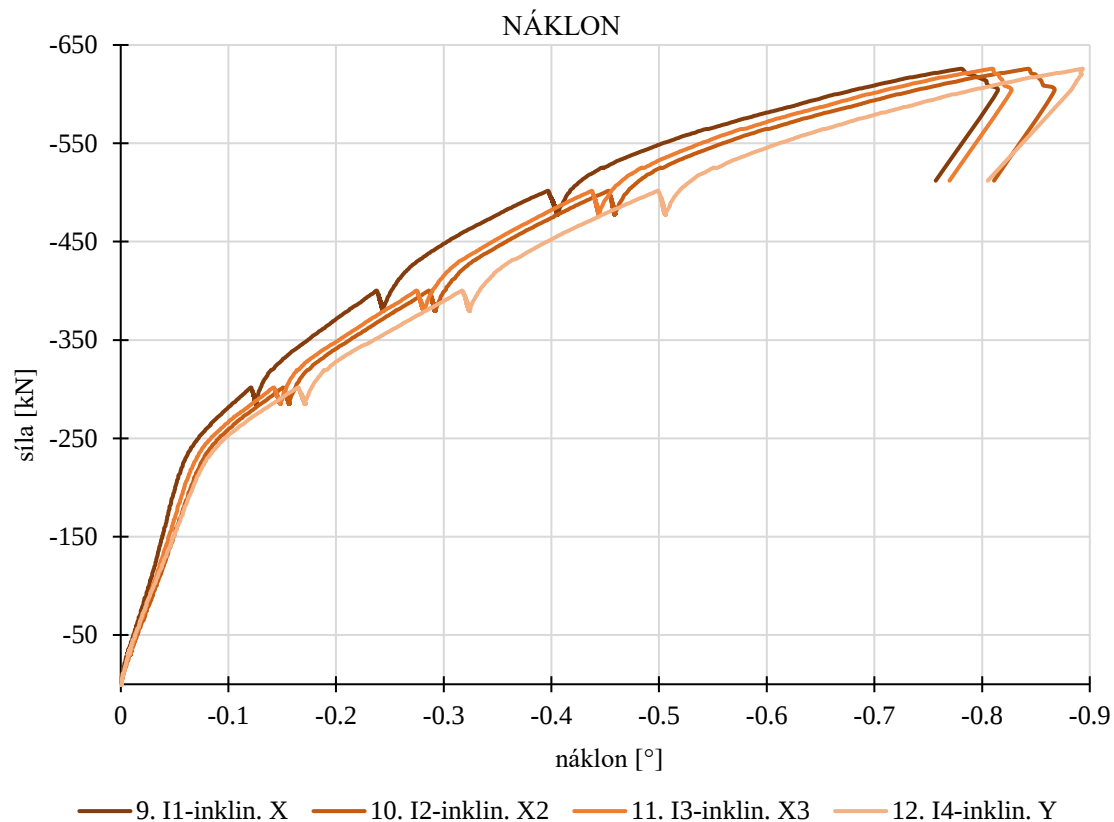
Na Obrázek 114 je možné sledovat nárůst zatížení ku posunu válce hydraulického lisu. Při posledním cyklu, při nulové síle je vidět posun zatěžovacího válce přibližně na 2 mm. Tento nárůst byl způsoben dosednutím zatěžovacího válce na zatěžovací ocelové podložky. Od té doby začínala narůstat síla při malém přírůstku posunu zatěžovacího válce do hodnoty přibližně 30 kN. V této úrovni síly je patrný značný posun zatěžovacího válce bez nárůstu síly. Tento posun válce byl způsoben dotlačením gumových podložek mezi roznášecí deskou a betonovou deskou, dotlačením betonové desky na bodové podpory. Dále došlo k dosednutí ocelových podpěr pod bodovými podporami a možnému dotlačení zatěžovacího rámu. Na Obrázek 115 jsou v hodnotě 30 kN vidět drobné posuny deformací, ale nedochází ke změně směrnice zatěžovací křivky. Obrázek 116 ukazuje že při této hodnotě nedocházelo k výrazným průhybům (náklonům) desky. Napětí na horním povrchu betonu při hodnotě 30 kN také neznačí výrazné změny. Při této hodnotě ani nedocházelo k výraznému nárůstu přetvoření na podélné výztuži v obou směrech viz. Obrázek 118 a Obrázek 119.



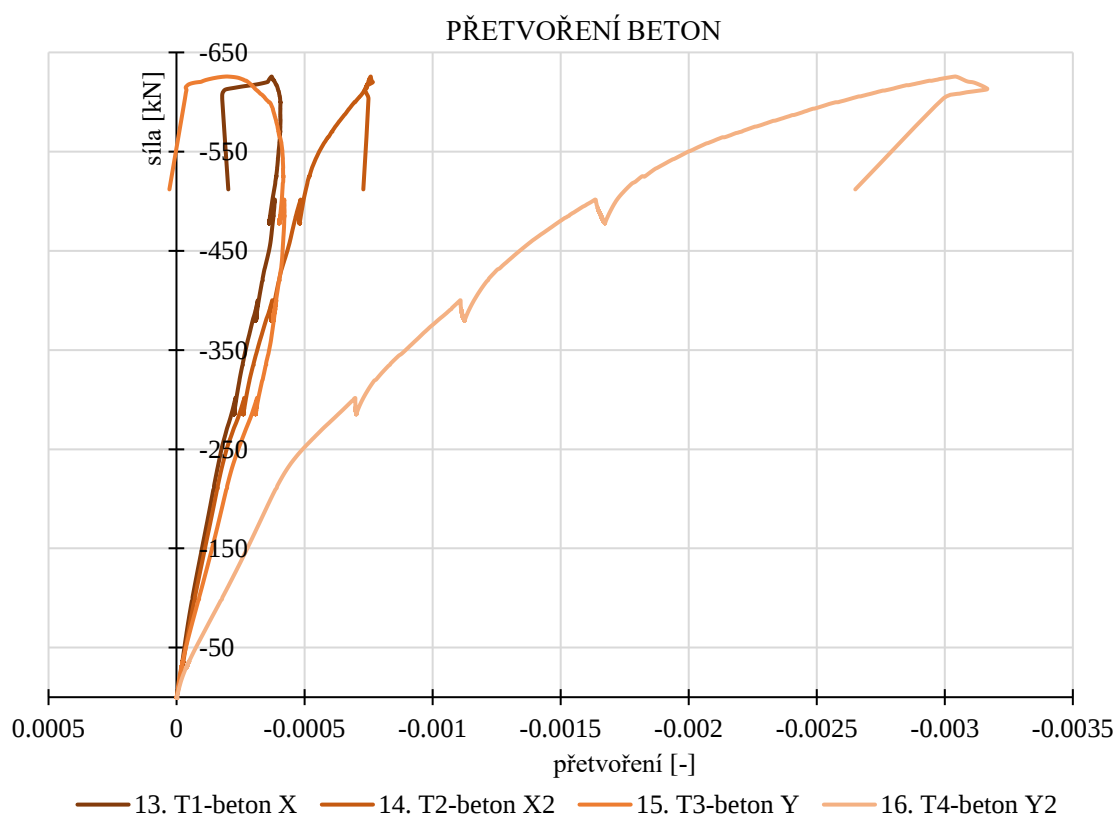
Obrázek 114: vzorek č. 1. OCEL graf nárůstu síly v závislosti na výsunu zatěžovacího válce



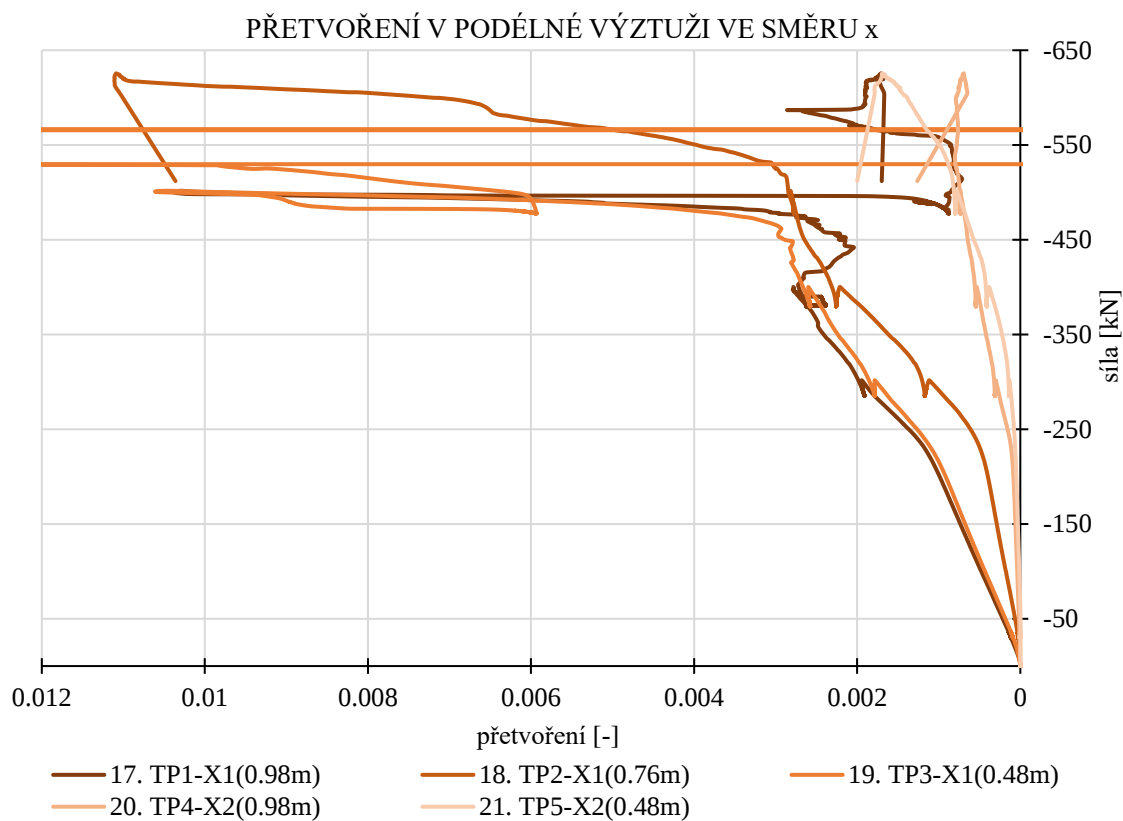
Obrázek 115: vzorek č. 1. OCEL posuny indukčnostních snímačů dráhy



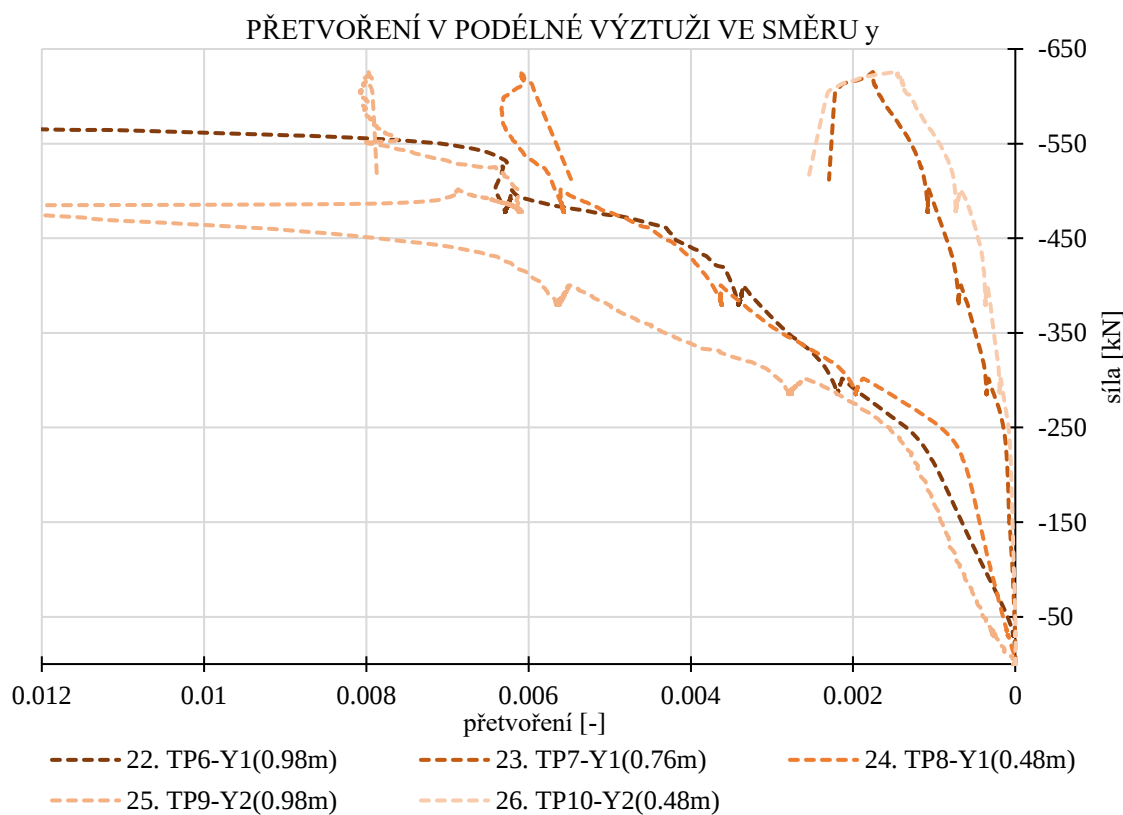
Obrázek 116: vzorek č. 1. OCEL náklon inklinometrů



Obrázek 117: vzorek č. 1. OCEL přetvoření na povrchu betonu



Obrázek 118: vzorek č. 1. OCEL přetvoření podélné výztuže ve směru X

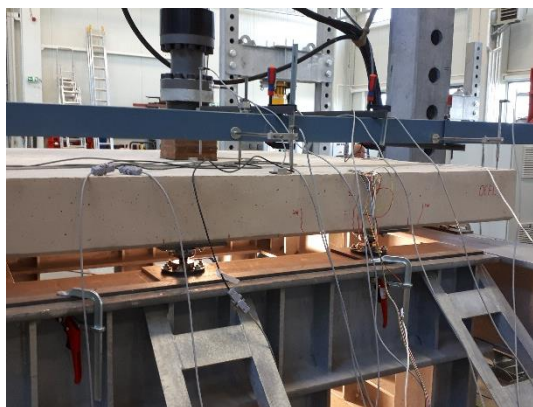


Obrázek 119: vzorek č. 1. OCEL přetvoření podélné výztuže ve směru Y

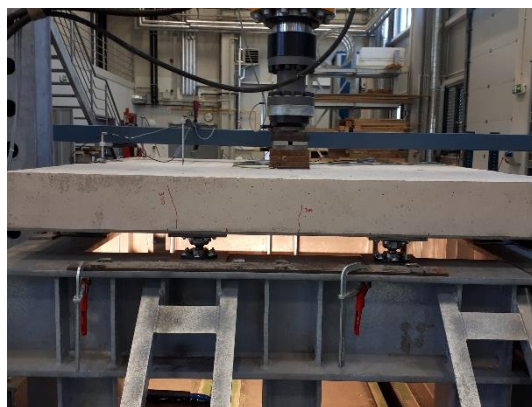
Od úrovně síly 30 kN je možné pozorovat stejnou směrnici křivky až do úrovně přibližně 230 kN. Při hodnotě cca 200 kN došlo k rozšiřování trhlin, které vznikly na spodním povrchu při aplikaci cyklického zatížení viz. Obrázek 113. Více trhlin vzniklo ve směru kolmém k Y. Došlo k „prokreslení“ nižší vrstvy výztuže. Také vznikla jedna trhlina ve směru kolmém k X. Při této hodnotě vznikla první diagonální trhlina. Na horním povrchu ani na bočních stranách nedošlo k vzniku trhlin. Na Obrázek 118 a Obrázek 119 je vidět, že ve výztuži že přetvoření ve výztuži se neblížilo mezi kluzu.

Při překročení 230 kN došlo k výrazné změně směrnice oproti předchozímu průběhu. Došlo k významnějšímu rozvoji trhlin a přestával působit beton v tahu. Ohybová únosnost začínala záviset především na podélné výztuži. Tato směrnice zůstává stejná až do hodnoty přibližně 450 kN. Obrázek 115 znázorňuje, že průhyb přibližně ve středu desky (indukčnostní snímač dráhy W1) je 1,2 mm a dochází k nadzvedávání rohů desek (indukčnostní snímač dráhy W6). Do této chvíle se deska v rámci deformací chovala symetricky ($W_2 = W_4$, $W_3 = W_5$).

Při hodnotě síly 300 kN došlo k zastavení zatěžování a zakreslení trhlin na porušovaném vzorku. Do této hodnoty došlo k rozšíření trhlin na spodním lící desky. Nově vznikly trhliny na bočních stranách desky viz Obrázek 122 až Obrázek 123. Trhliny byly ve většině případů mezi podporami. Několik trhlin také vzniklo v oblasti podpor. Při této hodnotě byl průhyb W5 2,6 mm. Rohy desky se stále nadzvedávaly. Na okrajích desky byly větší deformace ve směru X přibližně o 0,5 mm. Rozdílný průhyb na okraji desky v různých směrech pokračoval až do porušení. Náklon desek se dá požadovat za symetrický pro obě osy. Tenzometr T4 na Obrázek 117 ukazuje největší přetvoření na horním povrchu betonu. Hodnota přetvoření se ale neblížila hodnotě, při které dochází k drcení betonu. Přetvoření pro oba směry výztuže by se dalo při hodnotě 300 kN považovat za rovné. Ve výztuži ve směru X a Y měla výztuž hodnotu přetvoření přibližně 0,002. Výztuže se nacházeli stále na lineární vzestupné větvi pracovního diagramu.



Obrázek 120: vzorek č. 1. OCEL trhliny vzniklé do 300 kN na boční straně X1



Obrázek 121: vzorek č. 1. OCEL trhliny vzniklé do 300 kN na boční straně X2

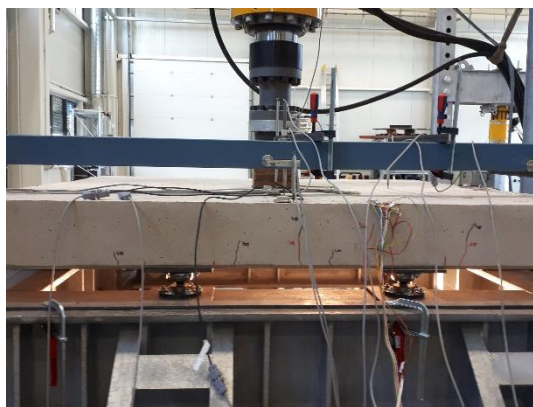


Obrázek 122: vzorek č. 1. OCEL trhliny vzniklé do 300 kN na boční straně Y1

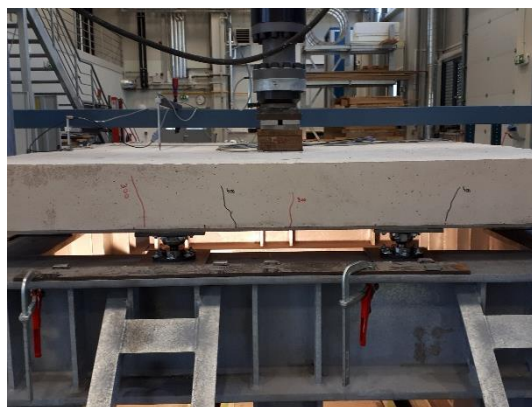


Obrázek 123: vzorek č. 1. OCEL trhliny vzniklé do 300 kN na boční straně Y2

Další pozastavení přírůstku síly nastalo při hodnotě 400 kN. Průběh zatěžovací křivky měl stále stejnou směrnici. Docházelo k dalšímu rozvoji trhlin a vzniku nových trhlin na spodním lící desky. Trhliny kopírovaly rast výztuže, přibývaly diagonální trhliny. Docházelo k výraznějšímu prodloužení stávajících trhlin a rozvoji nových trhlin v oblasti podpor na stranách desky viz. Obrázek 124 až Obrázek 128. Všechny grafy stále narůstaly ve stejném poměru jako v předchozím kroku. Deformace na okrajích desky mezi podporami neměly výrazný nárůst. Stále docházelo k výraznému průhybu uprostřed desky a k nadzvedávání rohů desek. Přetvoření na povrchu betonu se neblížilo hodnotě znamenající drcení betonu. Tenzometry na prostředním prutu X ukazují poměrné přetvoření podélné výztuže blížící se mezi kluzu (0,0025). Výztuž ve směru Y se pohybuje za mezi kluzu.



Obrázek 124: vzorek č. 1. OCEL trhliny vzniklé do 400 kN na boční straně X1



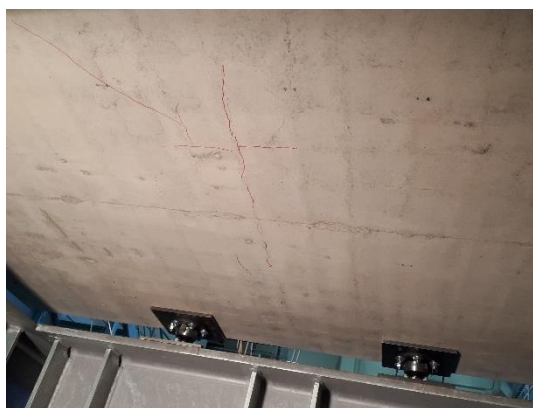
Obrázek 125: vzorek č. 1. OCEL trhliny vzniklé do 400 kN na boční straně X2



Obrázek 126: vzorek č. 1. OCEL trhliny vzniklé do 400 kN na boční straně Y1



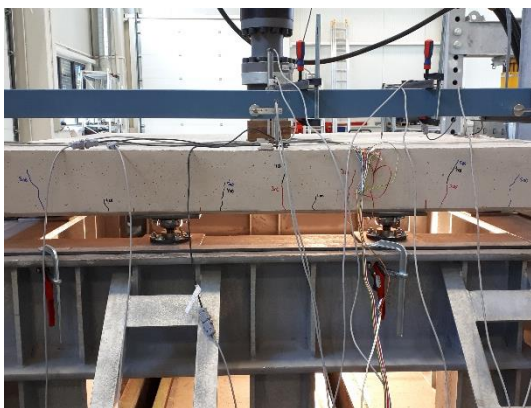
Obrázek 127: vzorek č. 1. OCEL trhliny vzniklé do 400 kN na boční straně Y2



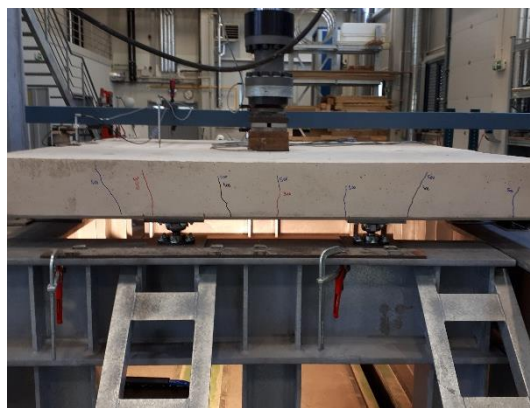
Obrázek 128: vzorek č. 1. OCEL trhliny na spodním líci při hodnotě 400 kN

Při hodnotě zatížení 450 kN překročilo významné množství podélných výztuží mez kluzu (přestal platit Hookův zákon). Na Obrázek 118 je tedy vidět výrazný nárůst přetvoření výztuže ve směru X. Ve směru Y není tato změna tolik výrazná.

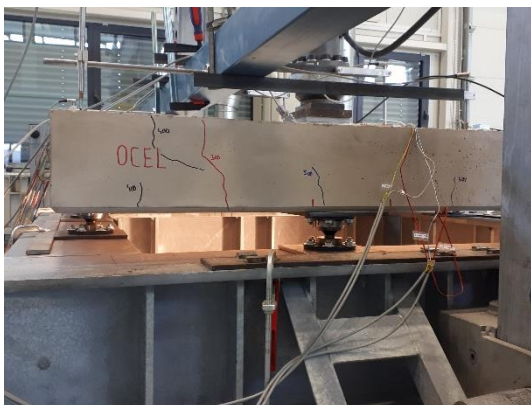
Při hodnotě 500 kN došlo k dalšímu zastavení zatěžování a zakreslení trhlin. Na dolním povrchu docházelo k výraznému zvětšení šířky trhlin. Došlo k prodloužení trhlin na bočních stranách desky až k tlačené vrstvě betonu. Začínaly se tvořit trhliny tvořící kritický obvod na dolním povrchu desky v oblasti protlačení.



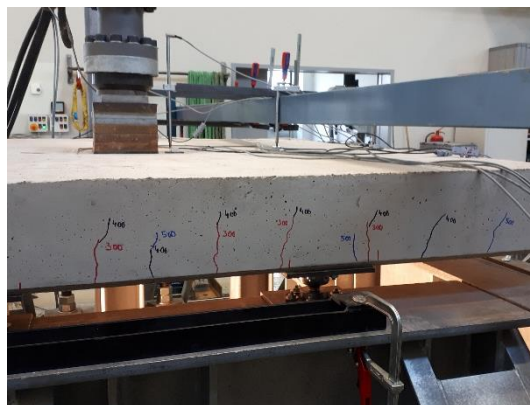
Obrázek 129: vzorek č. 1. OCEL trhliny vzniklé do 500 kN na boční straně X1



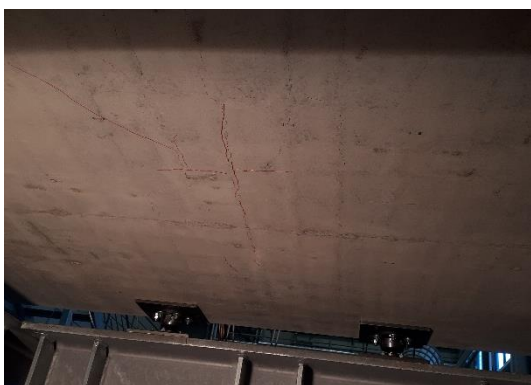
Obrázek 130: vzorek č. 1. OCEL trhliny vzniklé do 500 kN na boční straně X2



Obrázek 131: vzorek č. 1. OCEL trhliny vzniklé do 500 kN na boční straně Y1



Obrázek 132: vzorek č. 1. OCEL trhliny vzniklé do 500 kN na boční straně Y2



Obrázek 133: vzorek č. 1. OCEL trhliny na spodním líci při hodnotě 500 kN

Při hodnotě 625 kN došlo ke křehkému porušení protlačněním s maximálním průhybem přibližně ve středu desky 13 mm. Roh desky byl oproti nezatíženému stavu nadzvednut o 3,5 mm. Protlačení bylo přímo pod zatěžovanou plochou 200x200 mm. Zatlacení zatěžovací plochy je znázorněno na Obrázek 134 a Obrázek 135. Přetvoření na horním povrchu betonu bylo maximálně 0,003. Na horním povrchu nebyly vidět žádné tlakové trhliny. Z důvodu neporušení podélné výztuže v žádném směru lze předpokládat, že došlo k porušení vlivem rozdrčení betonových vzpěr uvnitř betonové desky. Na spodním lici bylo velké množství diagonálních trhlin a trhlin ve směru podélných výztuží. Protlačení na spodním povrchu mělo rovnoměrný tvar. Ve směru X byl na obou stranách porušený obvod ve vzdálenosti 300 mm od okraje desky. Ve směru Y byl porušený obvod na každé straně ve vzdálenosti 400 mm od okraje desky viz. Obrázek 138. Pro zvětšení trhlin a lepší znázornění porušeného obvodu se deska odtížila a zpětně přitížila s rychlejším nárůstem síly.



Obrázek 134: vzorek č. 1. OCEL zatlačení zatěžovací desky při porušení



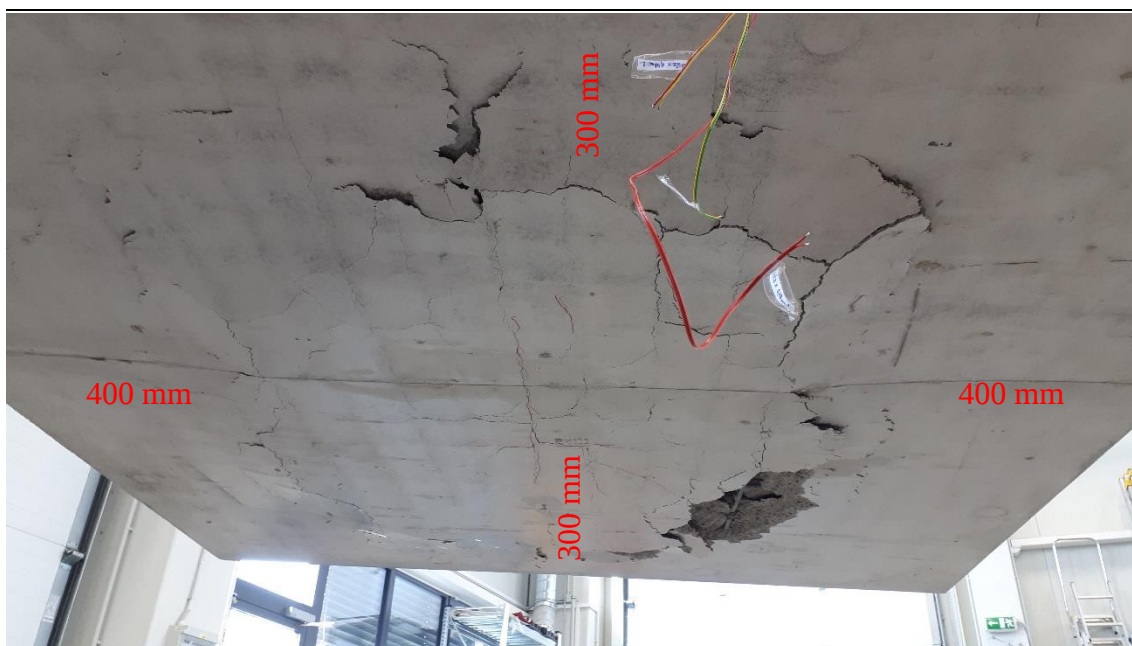
Obrázek 135: vzorek č. 1. OCEL porušení protlačněním na horním líci desky



Obrázek 136: vzorek č. 1. OCEL porušení protlačněním na spodním líci desky



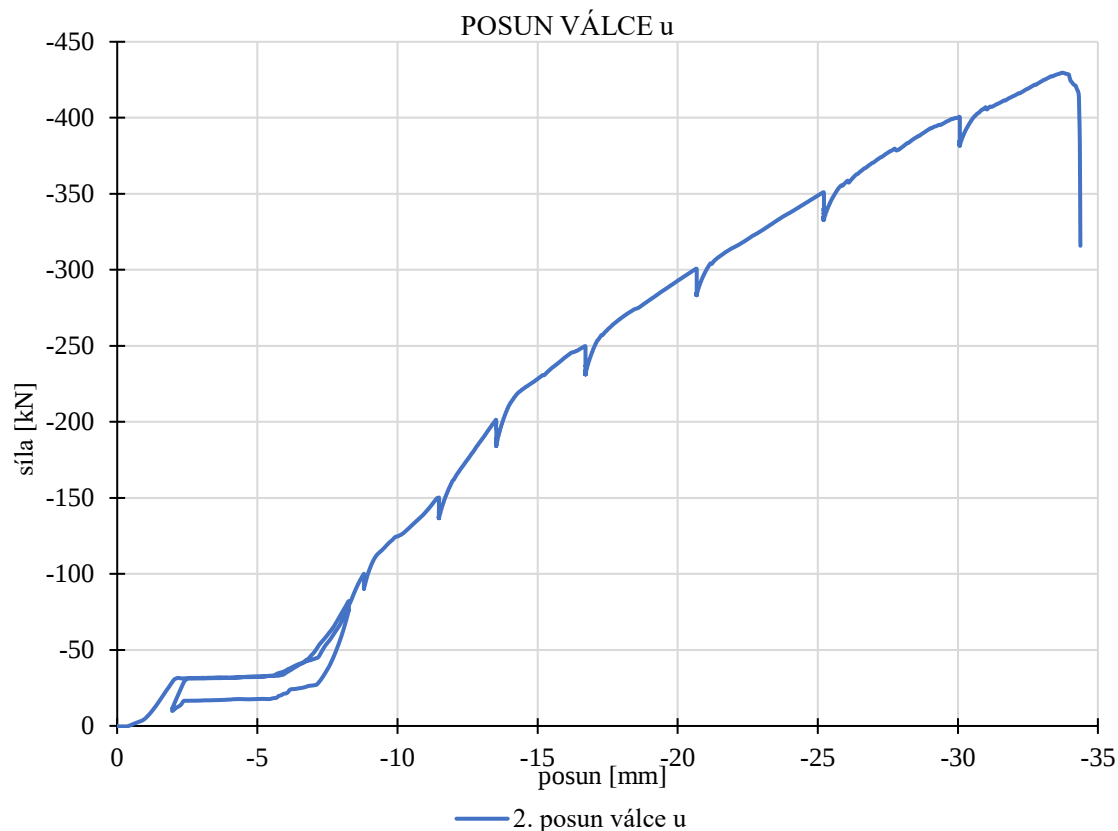
Obrázek 137: vzorek č. 1. OCEL porušení protlačněním na spodním líci desky



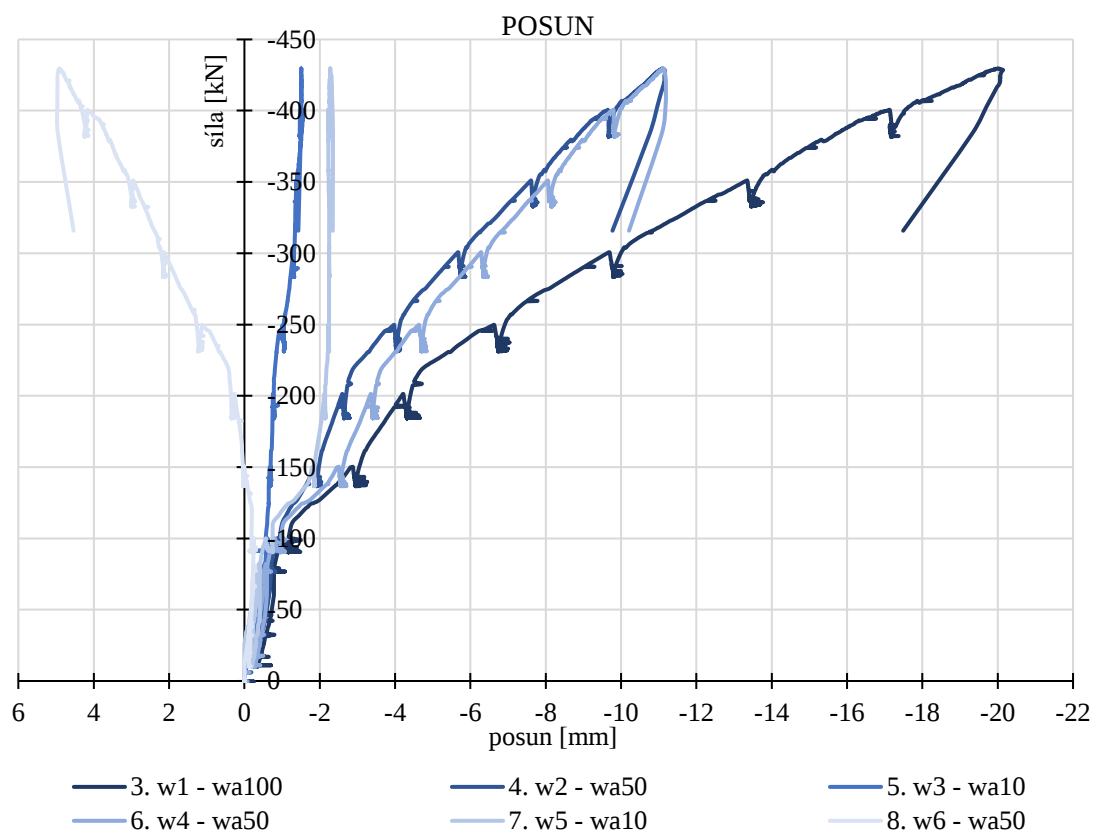
Obrázek 138: vzorek č. 1. OCEL porušený obvod při protlačení na spodním líci desky

6.5.3 Vzorek č. 2. FRP

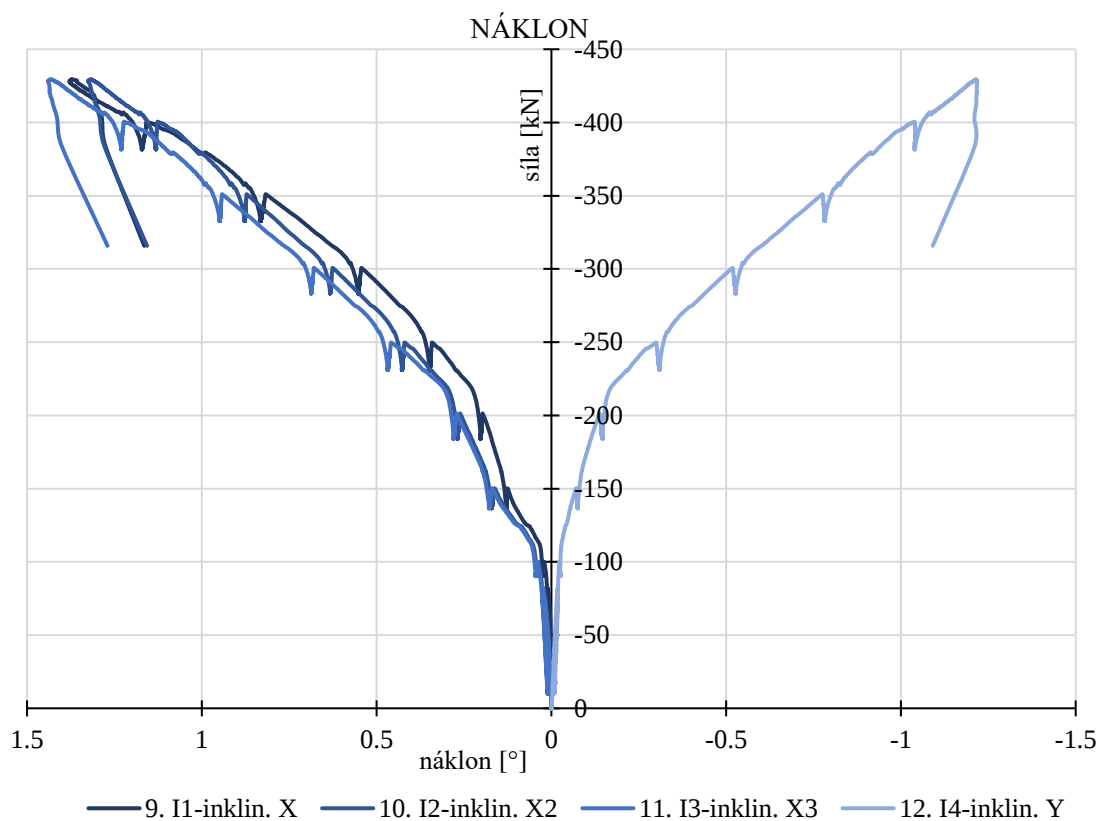
Vzorek vyztužený podélnou GFRP výztuží byl v prvním kroku přitížen na 80 kN a zpět odtížen na 10 kN. Následně bylo aplikováno deformační zatížení s přírůstkem 4 mm/min až do porušení viz. Obrázek 139. Při hodnotě síle 30 kN je na daném grafu vidět posun zatěžovacího válce bez přírůstkem síly. V daném okamžiku docházelo k dotlačení gumových podložek mezi roznášecí deskou a betonovou deskou, dotlačením betonové desky na bodové podpory, dosednutí ocelových podpěr pod bodovými podporami a možnému dotlačení zatěžovacího rámu. Při prvotním zatížení ani při aplikaci deformačního zatížení nedošlo při síle 80 kN ke vzniku trhlin na spodním líci betonové desky.



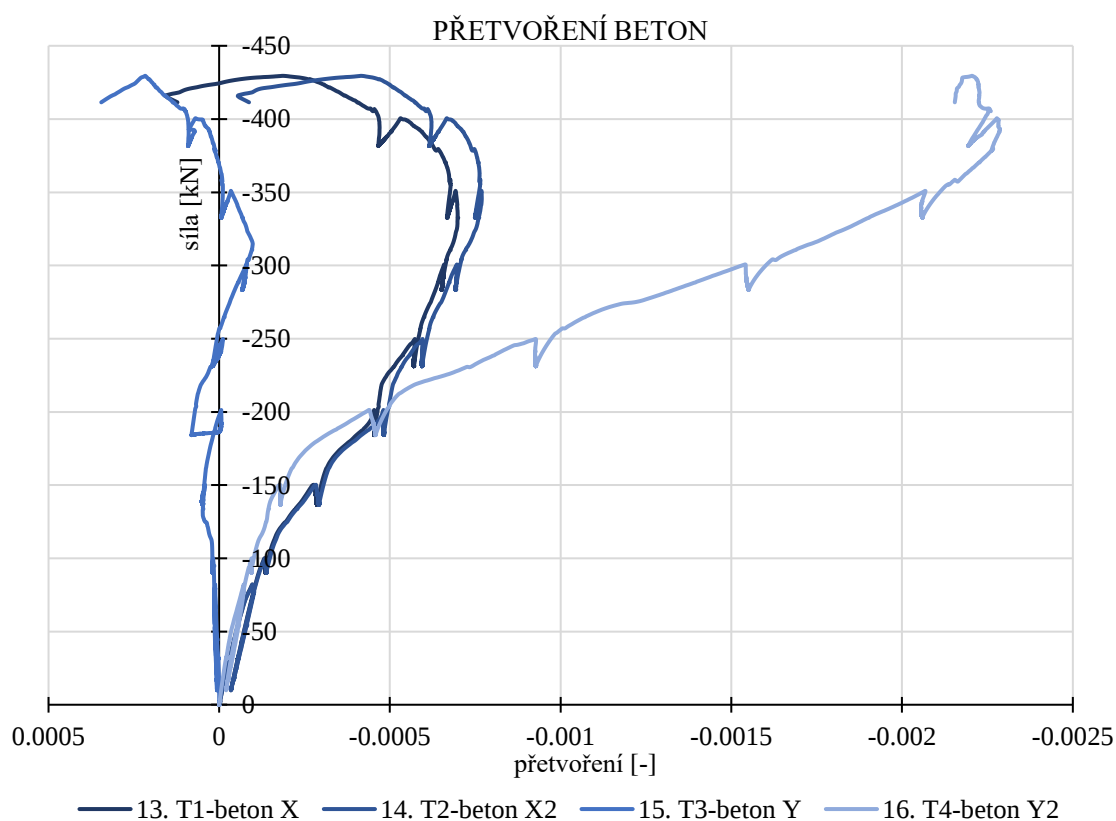
Obrázek 139: vzorek č. 2. FRP graf nárůstu síly v závislosti na výsunu zatěžovacího válce



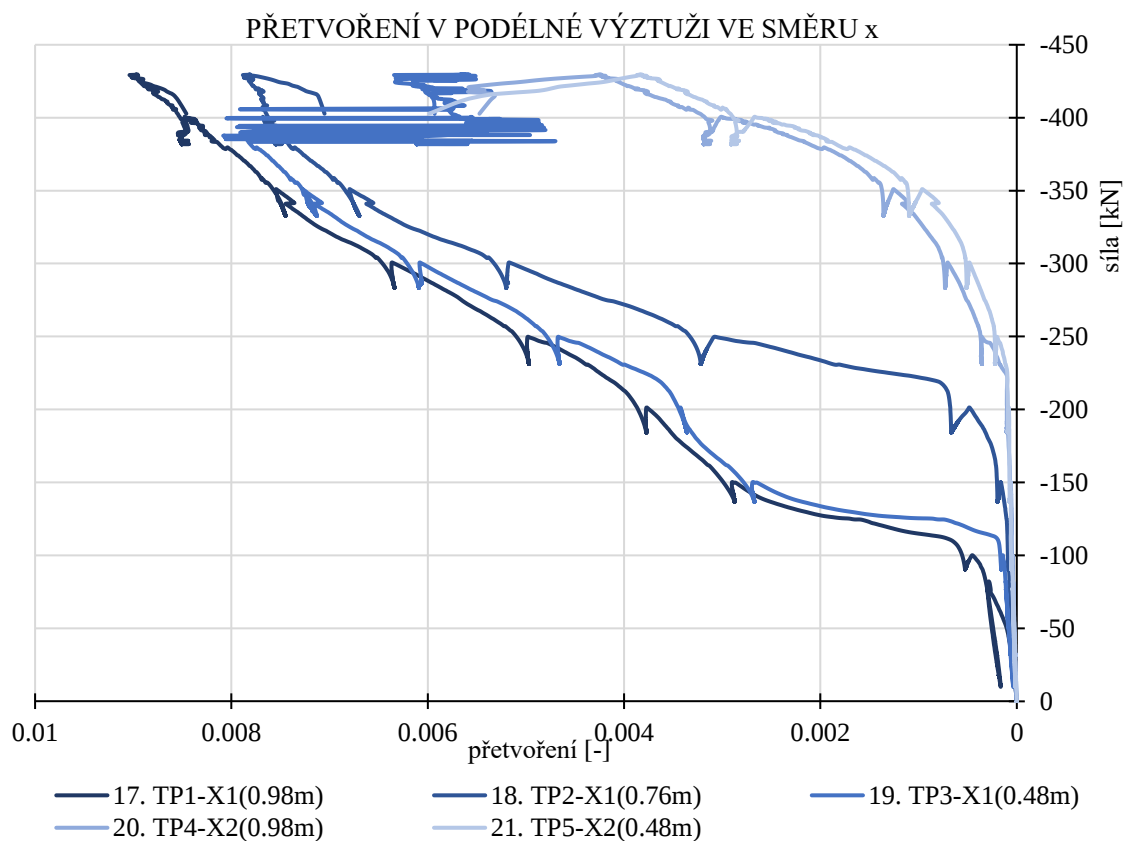
Obrázek 140: vzorek č. 2. FRP posuny indukčních snímačů dráhy



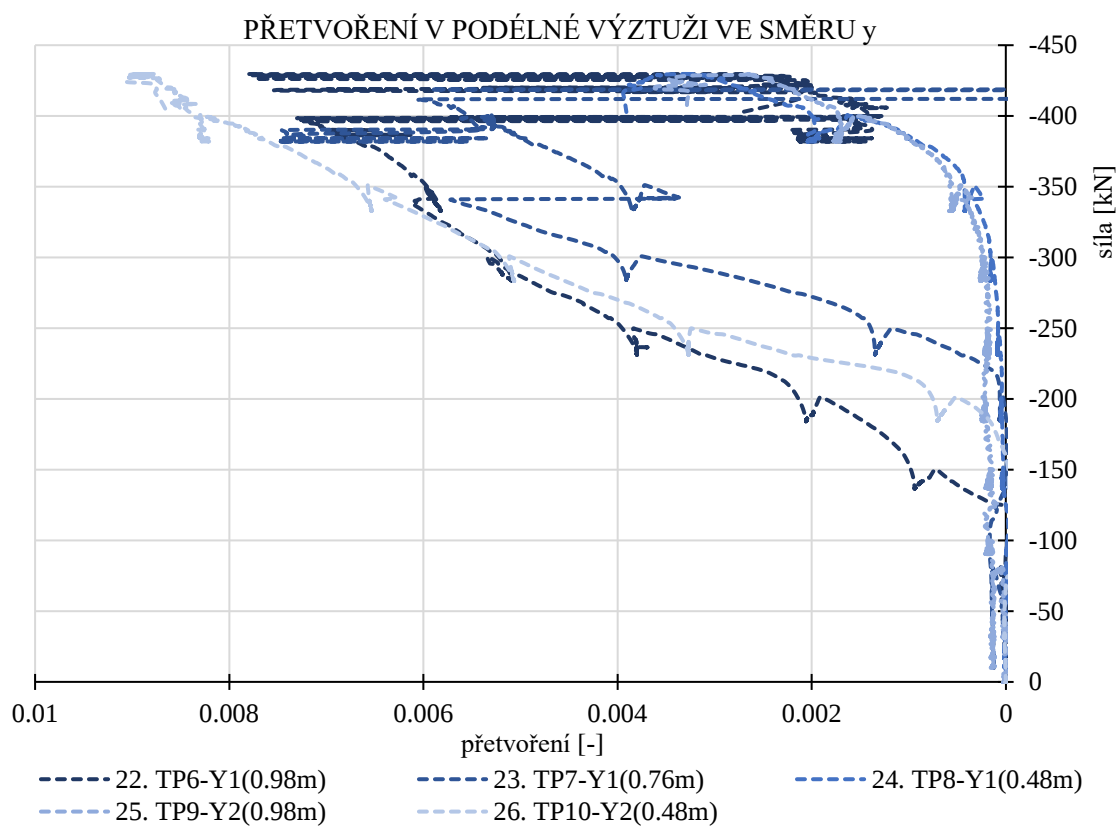
Obrázek 141: vzorek č. 2. FRP náklon inklinometrů



Obrázek 142: vzorek č. 2. FRP přetvoření na povrchu betonu

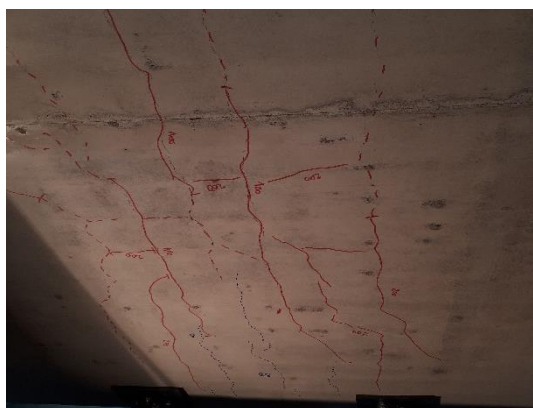


Obrázek 143: vzorek č. 2. FRP přetvoření podélné výztuže ve směru X



Obrázek 144: vzorek č. 2. FRP přetvoření podélné výztuže ve směru Y

Při hodnotě zatížení 100 kN vznikly na spodním povrchu betonové desky první trhliny ve směru kolmém na osu X. Deformace na indukčnostním snímači dráhy v blízkosti středu desky (W1) byla přibližně 1,2 mm viz. Obrázek 140. Roh desky při vzniku trhlin nebyl nadzvedáván, naopak indukčnostní snímač dráhy (W6) naměřil deformaci 0,2 mm ve stejném směru jako W1. S narůstajícím zatížením docházelo k rozvoji trhlin na spodním lici desky a ke vzniku trhlin na bočních stranách desky. Směrnice zatěžovací křivky byla stejná až do úrovně síly přibližně 200 kN. Při zatížení 200 kN byla na spodním lici desky síť trhlin ve všech směrech viz. Obrázek 145 až Obrázek 148. Na Obrázek 143 a Obrázek 144 je vidět, že vyššího přetvoření dosahovala výztuž ve směru X. Maximální napětí na horním lici betonu viz. Obrázek 142 bylo přibližně 0,0005, nedocházelo k drcení betonu. Průhyb v blízkosti středu desky byl 4,1 mm, roh desky byl nadzvednut o 0,2 mm.



Obrázek 145: vzorek č. 2. FRP trhliny vzniklé do 200 kN na spodní straně



Obrázek 146: vzorek č. 2. FRP trhliny vzniklé do 200 kN na boční straně X2



Obrázek 147: vzorek č. 2. FRP trhliny vzniklé do 200 kN na boční straně Y1



Obrázek 148: vzorek č. 2. FRP trhliny vzniklé do 200 kN na boční straně Y2

Po překročení síly 200 kN došlo ke změně směrnice křivky, která byla přímá až do porušení. Od této úrovně síly začala únosnost záviset především na podélné GFRP výztuži. Docházelo k rozšiřování a vzniku nových trhlin na spodním líci desky a bočních stranách. Trhliny ze spodního líce desky a bočních stran začínaly být propojené. Poslední zakreslení trhlin na spodním líci desky bylo při hodnotě zatížení 250 kN. Na spodním líci byly diagonální trhliny a trhliny kopírující rastr výztuže. Při rostoucím zatížení docházelo k rozšiřování a k vzniku nových trhlin viz. Obrázek 151. Na bočních stranách vzniklo velké množství trhlin viz. Obrázek 150 až Obrázek 152. Velikosti náklonů měřených inklinometry (Obrázek 141) ukazují, že náklon desky se choval v obou směrech přibližně symetricky. Indukčnostní snímače dráhy v blízkosti okraje desky (W3, W5) značí, že ve směru osy Y byly až do porušení větší deformace o přibližně 1 mm.



Obrázek 149: vzorek č. 2. FRP trhliny vzniklé do 450 kN na spodní straně



Obrázek 150: vzorek č. 2. FRP trhliny vzniklé do 450 kN na boční straně X2



Obrázek 151: vzorek č. 2. FRP trhliny vzniklé do 450 kN na boční straně Y1



Obrázek 152: vzorek č. 2. FRP trhliny vzniklé do 450 kN na boční straně Y2

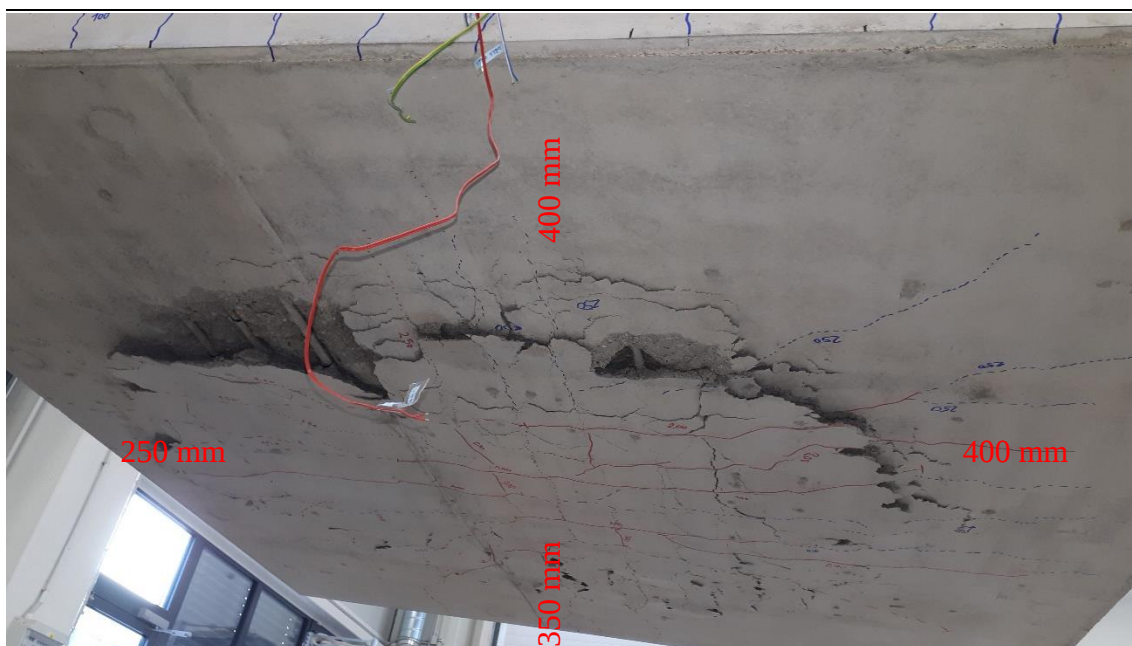
Při hodnotě 429 kN došlo ke křehkému porušení protlačnění přímo pod zatěžovanou plochou viz. Obrázek 153. Přetvoření na horním povrchu betonové desky bylo maximálně 0,0022, nedošlo k drcení betonu na horním povrchu desky. Na horním povrchu nebyly žádné trhliny. Průhyb v blízkosti středu desky byl 20 mm a roh byl nadzvednut oproti nezatíženému stavu o cca 4,9 mm. Maximální přetvoření podélné výztuže bylo 0,009. Z důvodu neporušení podélné výztuže lze předpokládat, že došlo k rozdrčení betonových vzpěr uvnitř betonové desky. Při porušení bylo na spodním lici velké množství trhlin ve všech směrech viz. Obrázek 154. Pro znázornění kritického obvodu a zvětšení trhlin byla deska po porušení odtížena a znova přitížena s rychlejším nárůstem síly. Porušení ve směru X lze považovat za symetrické, kdy na jedné straně byl porušený obvod ve vzdálenosti od okraje desky 350 mm a na druhé straně 400 mm viz. Obrázek 155. Ve směru Y byl na jedné straně porušený obvod ve vzdálenosti 250 mm od okraje desky a na druhé straně 400 mm.



Obrázek 153: vzorek č. 2. FRP zatlačení zatěžovací desky při porušení



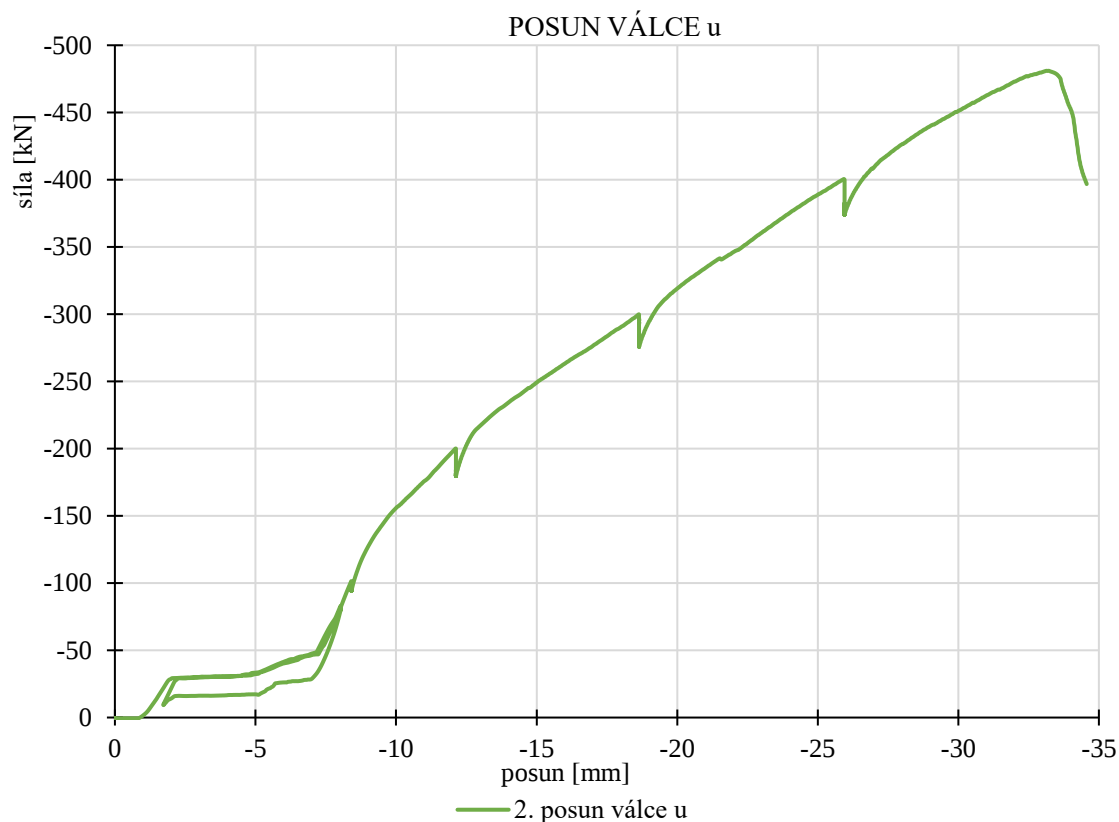
Obrázek 154: vzorek č. 2. FRP porušení protlačnění na spodním lici desky



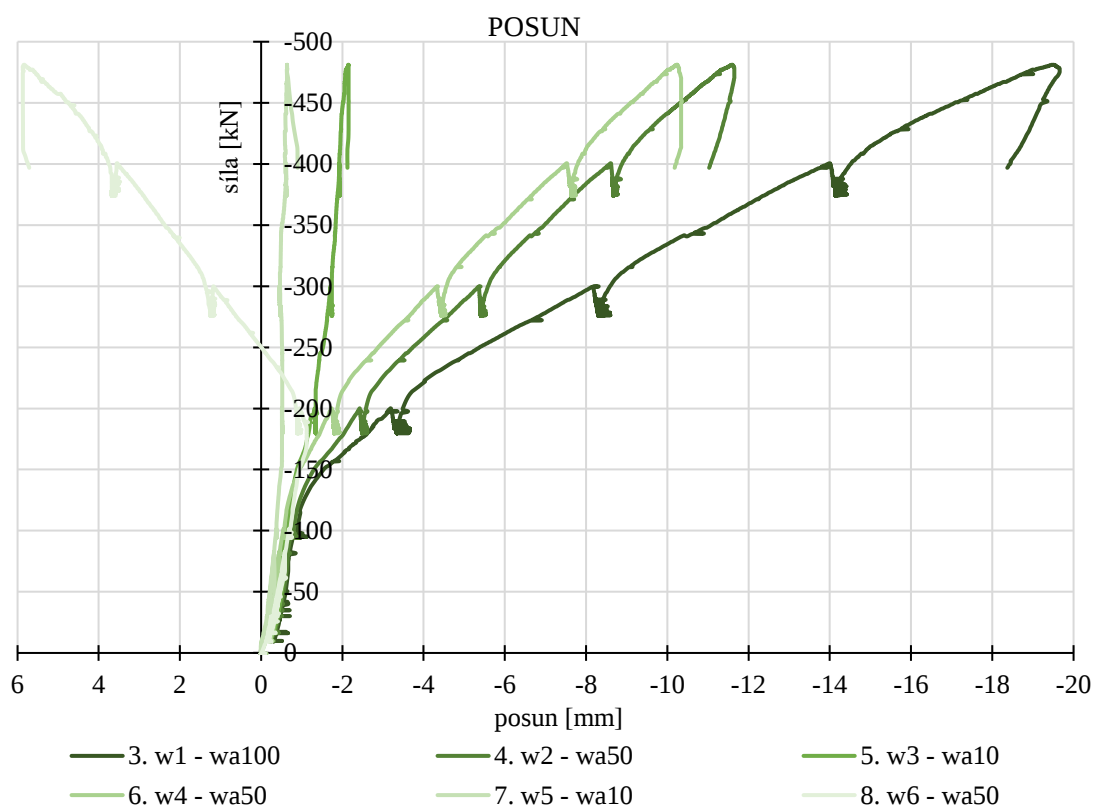
Obrázek 155: vzorek č. 2. FRP porušený obvod při protlačení na spodním líci desky

6.5.4 Vzorek č. 3. FRP-UTŘ

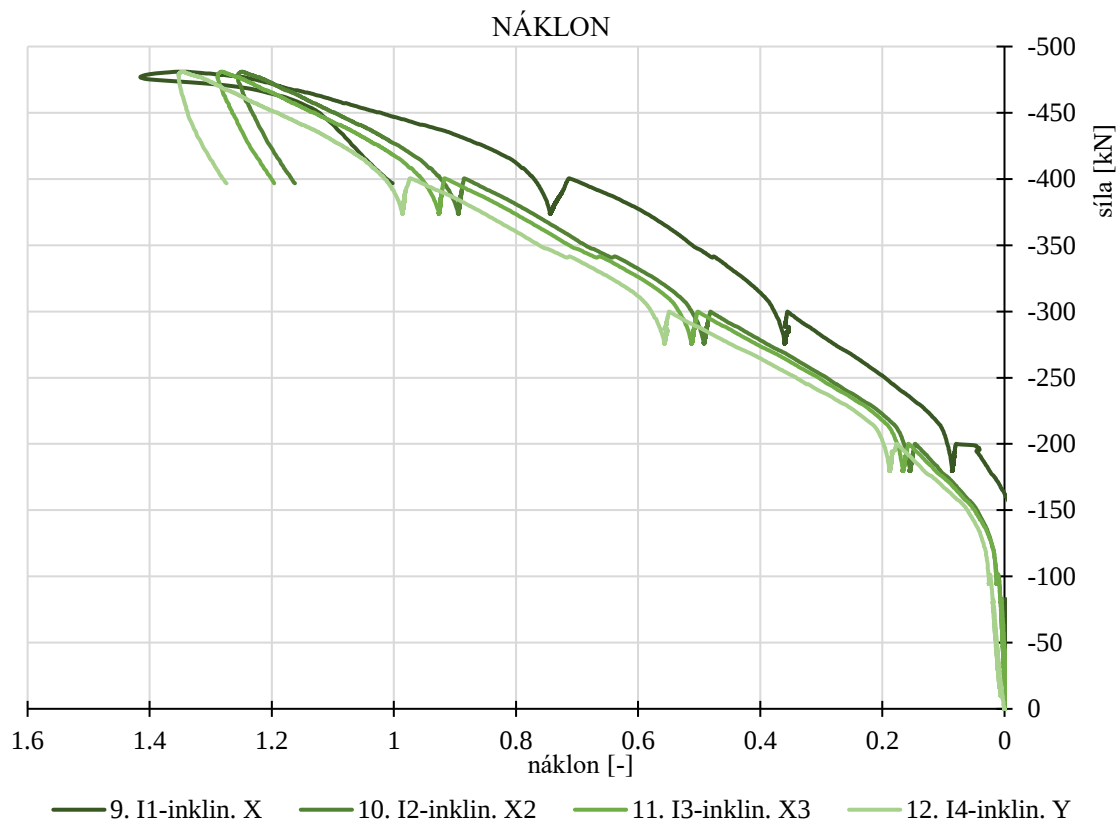
Tento vzorek měl stejnou podélnou výztuž jako vzorek č. 2. FRP, navíc zde byla doplněna smyková výztuž tvaru „U“. Provedené vyztužení je zobrazeno v kapitole 6.4. V tomto případě bylo prvotní přetížení na 80 kN a zpětné odtížení na 10 kN. Následně bylo aplikováno deformační zatížení s krokem 4 mm/min až do porušení, jako tomu bylo u předchozího vzorku obsahující pouze podélnou GFRP výztuž. Na Obrázek 156 je průběh síly ku posunu zatěžovacího válce. Při nulové síle docházelo k dosednutí zatěžovacího válce na zkoušený vzorek, dotlačení gumových podložek mezi roznášecí deskou a betonovou deskou. Při zatěžovací síle přibližně 30 kN dosednul zatěžovaný vzorek na bodové podpory, ocelové podpěry pod bodovými podporami, došlo k dotlačení zatěžovacího rámu. Při prvotním zatížení, ani při konečném deformačním zatížení nevznikly při hodnotě 80 kN na betonové desce žádné trhliny. První trhlina na spodním povrchu se vytvořila při zatížení 100 kN, trhlina byla kolmá na směr Y. Od této síly docházelo k překročení tahové pevnosti betonu na spodním líci desky.



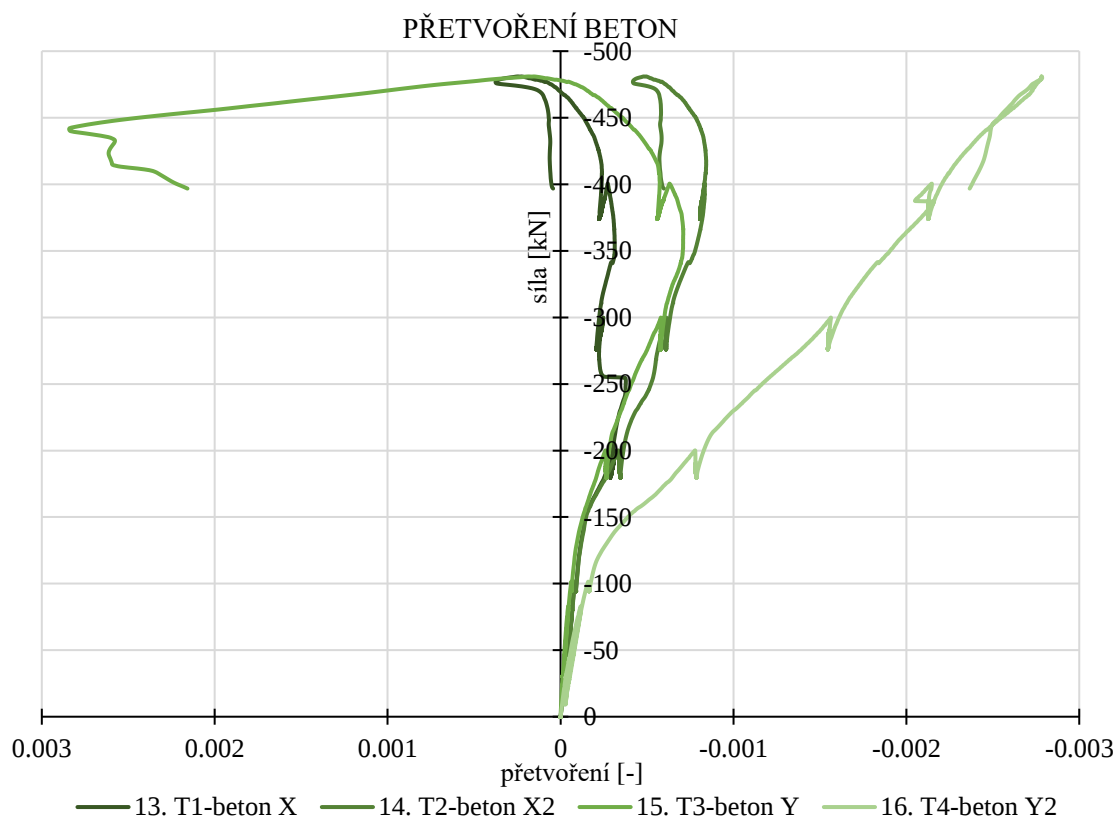
Obrázek 156: vzorek č. 3. FRP-UTŘ graf nárůstu síly v závislosti na výsunu zatěžovacího válce



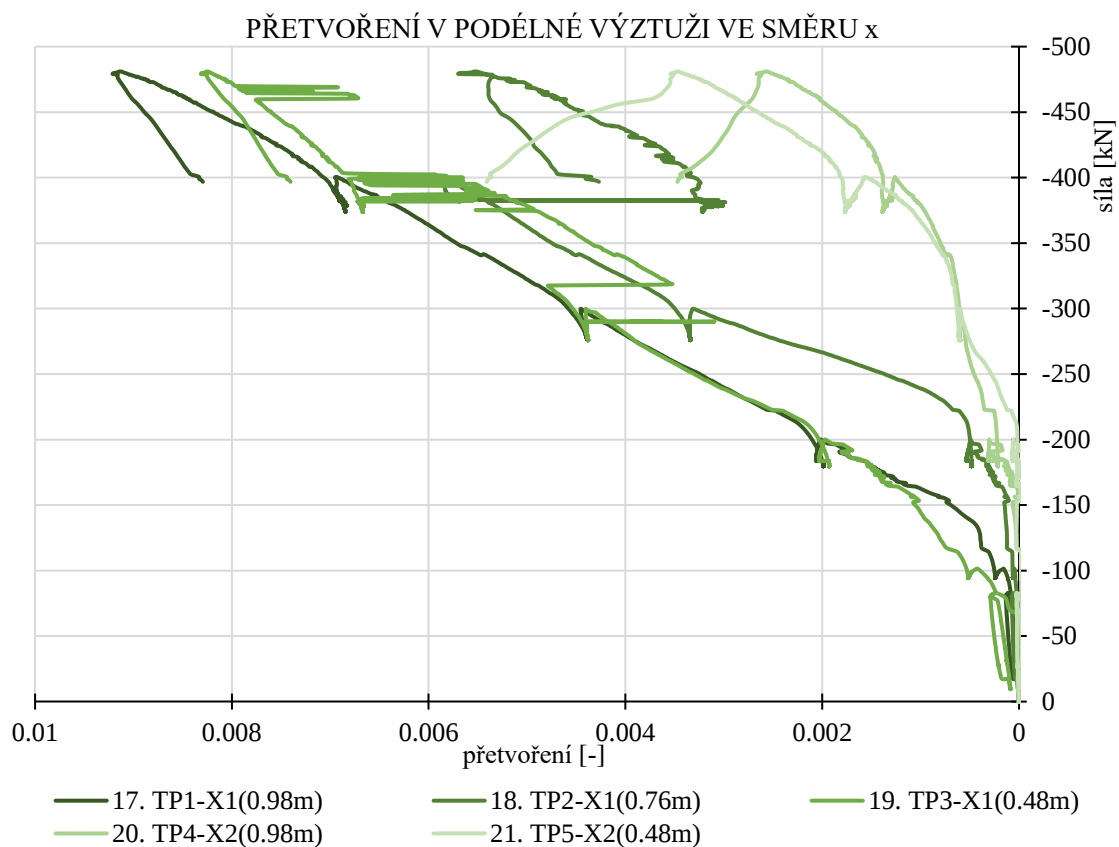
Obrázek 157: vzorek č. 3. FRP-UTŘ posuny indukčních snímačů dráhy



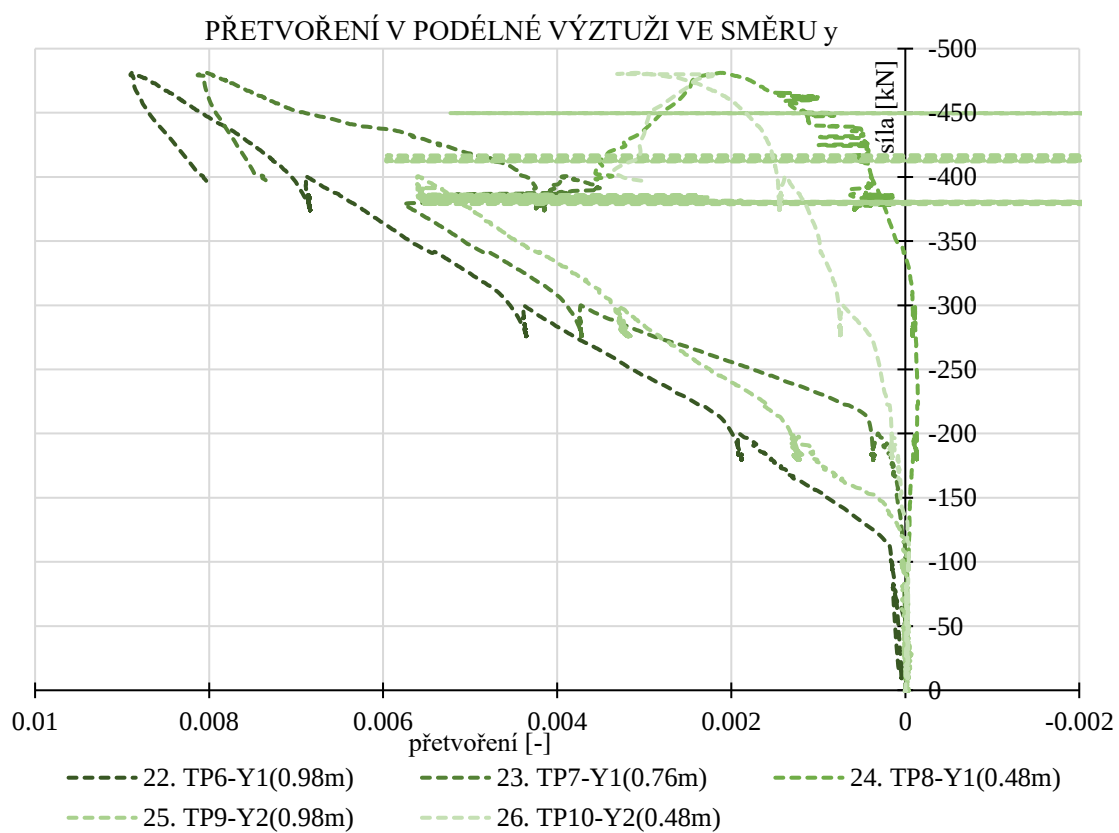
Obrázek 158: vzorek č. 3. FRP-UTŘ náklon inklinometrů



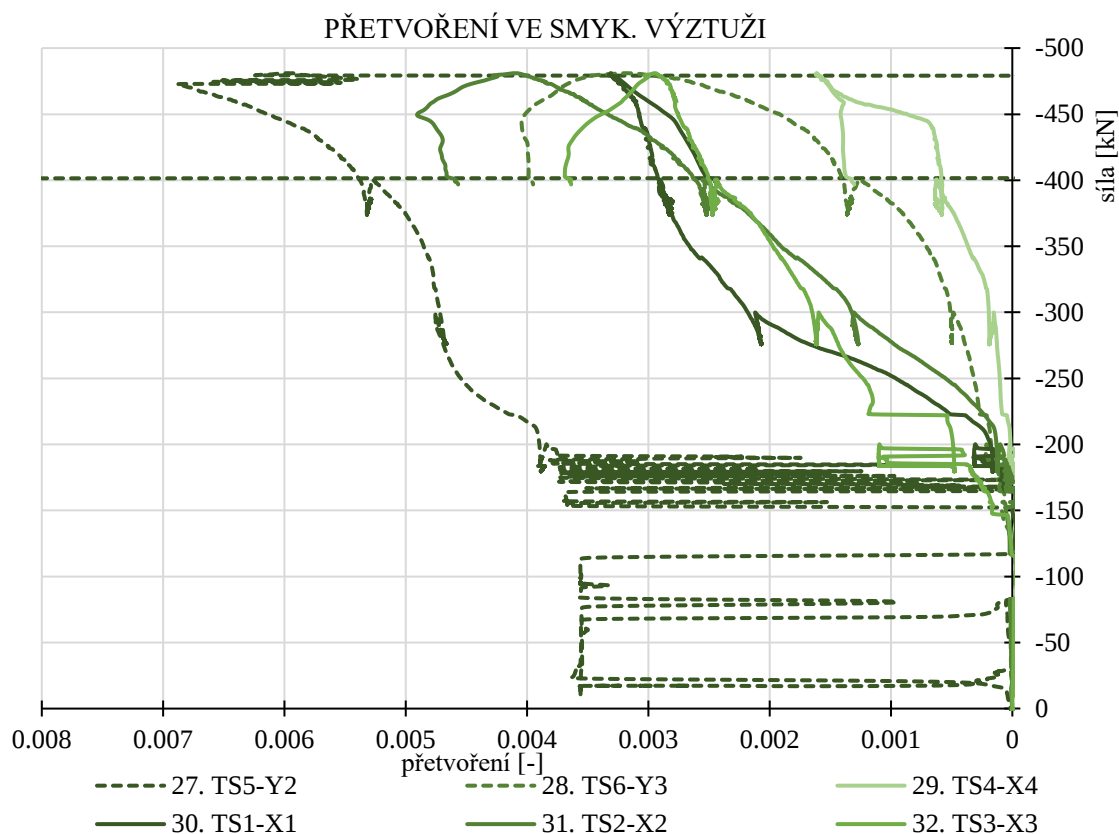
Obrázek 159: vzorek č. 3. FRP-UTŘ přetvoření na povrchu betonu



Obrázek 160: vzorek č. 3. FRP-UTŘ přetvoření podélné výztuže ve směru X

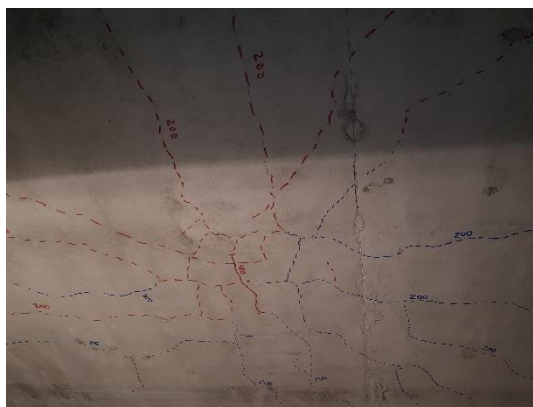


Obrázek 161: vzorek č. 3. FRP-UTŘ přetvoření podélné výztuže ve směru Y



Obrázek 162: vzorek č. 3. FRP-UTŘ přetvoření smykové výztuže

Při hodnotě 150 kN je viditelná změna směrnice křivky, která je přímá až do porušení. Na Obrázek 157 je vidět, průhyb v blízkosti středu desky (indukčnostní snímač dráhy W1) byl přibližně 1,4 mm. Roh desky (W6) měl stejný smysl průhybu jako indukčnostní snímač dráhy v blízkosti středu desky. Po změně směrnice se roh desky začal nadzvedávat až do porušení celého vzorku. Zakreslené trhliny na spodním líci desky (Obrázek 163) při úrovni zatížení 200 kN značí, že deska byla potrhána ve všech směrech a únosnost závisela na výztuži. Při síle 200 kN byly trhliny i na bočních stranách desky viz. Obrázek 164 až Obrázek 166. Maximální napětí v podélné výztuži zobrazené na Obrázek 160 a Obrázek 161 bylo ve výztuži ve směru X a to 0,001. Ve smykové výztuži (Obrázek 162) při zanedbání odchylek v měření bylo maximální přetvoření na třmínku Y2 a to 0,0037.



Obrázek 163: vzorek č. 3. FRP-UTŘ trhliny vzniklé do 200 kN na spodní straně



Obrázek 164: vzorek č. 3. FRP-UTŘ trhliny vzniklé do 200 kN na boční straně X2

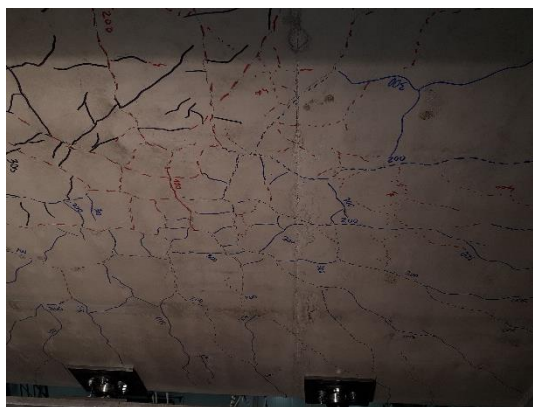


Obrázek 165: vzorek č. 3. FRP-UTŘ trhliny vzniklé do 200 kN na boční straně Y1



Obrázek 166: vzorek č. 3. FRP-UTŘ trhliny vzniklé do 200 kN na boční straně Y2

Při překročení zatížení 150 kN byla směrnice stejná až do porušení. Se zvyšující se silou docházelo k rozšiřování trhlin na spodním líci desky a bočních stranách desky. Únosnost závisela na podélné a smykové GFRP výztuži. Z náklonu inklinometru na Obrázek 158 lze konstatovat, že náklony byly přibližně stejné pro oba směry. Průhyb v blízkosti okraje desky ve směru X (W3) byl po celou dobu až do porušení přibližně o 1 mm větší než ve směru Y (W5). Poslední zakreslení trhlin na spodním líci desky bylo při síle 400 kN. Na spodním líci byla velká síť trhliny ve všech směrech, došlo k propojení trhlin až k bočním stranám desky viz Obrázek 167 až Obrázek 169.



Obrázek 167: vzorek č. 3. FRP-UTŘ trhliny vzniklé do 400 kN na spodní straně



Obrázek 168: vzorek č. 3. FRP-UTŘ trhliny vzniklé do 400 kN na boční straně X2



Obrázek 169: vzorek č. 3. FRP-UTŘ trhliny vzniklé do 200 kN na boční straně Y1

Porušení vzorku nastalo při hodnotě zatížení 481 kN, s průhybem v blízkosti středu desky přibližně 19,5 mm. Roh desky oproti nezatíženému stavu byl nadzvednut o 5,8 mm. Na spodním povrchu bylo velké množství trhlin ve všech směrech, které jsou znázorněny na Obrázek 160. Porušení nastalo přímo pod roznášecí zatěžovací deskou viz. Obrázek 171. Na horním povrchu desky nevznikly žádné trhliny, největší přetvoření betonu bylo 0,0028. Maximální přetvoření v nejvíce využitě podélné výztuži při porušení bylo 0,009, nedošlo k přetržení podélné výztuže. Největšího přetvoření ve smykové výztuži bylo dosaženo v GFRP třmínku Y2 a to 0,0069. Ve zbývajících třmíncích, na kterých bylo měřeno přetvoření, bylo dosaženo maximální hodnoty 0,0041. K porušení došlo rozdrčením tlačných betonových vzpěr uvnitř desky. Pro zvýraznění kritického obvodu byl vzorek odtížen a zpětně přitížen s rychlejším zatěžovacím krokem. Porušený obvod lze považovat za souměrný, kdy ve směru X byl

od hrany desky 200 mm a 300 mm, ve směru Y byl od hrany desky ve vzdálenosti 300 mm a 400 mm viz. Obrázek 174.

Při dodatečném zkoumání porušeného vzorku bylo zjištěno, že došlo k přetržení dvou třmínků v blízkosti ohybů viz. Obrázek 172. Na horním povrchu bylo zjištěno, že došlo k posunutí kotevních oblastí třmínků viz. Obrázek 173. Odříznutí přechýlujících větví třmínků nejspíše nezajišťovalo dostatečně dlouhou kotevní délku. Nelze zcela říct, zdali k těmto jevům došlo v průběhu zatěžování, nebo až při dodatečném přitížení z důvodu zvětšení trhlin a znázornění porušeného obvodu.



Obrázek 170: vzorek č. 3. FRP-UTŘ spodní povrch desky při porušení



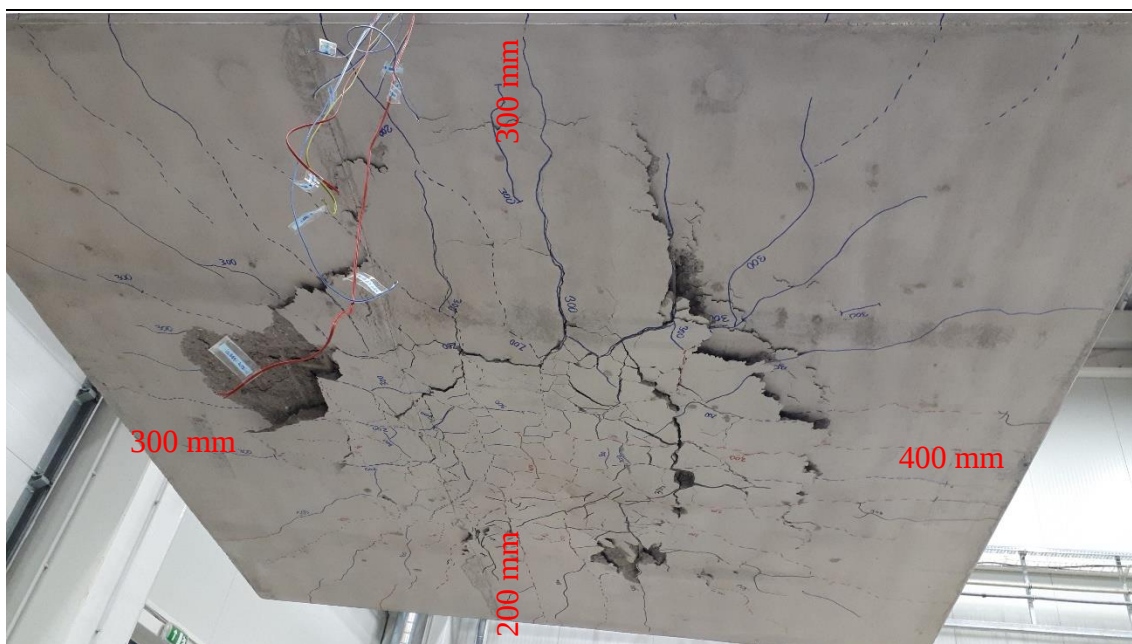
Obrázek 171: vzorek č. 3. FRP-UTŘ zatlačení zatěžovací desky při porušení



Obrázek 172: vzorek č. 3. FRP-UTŘ porušené GFRP třmínky



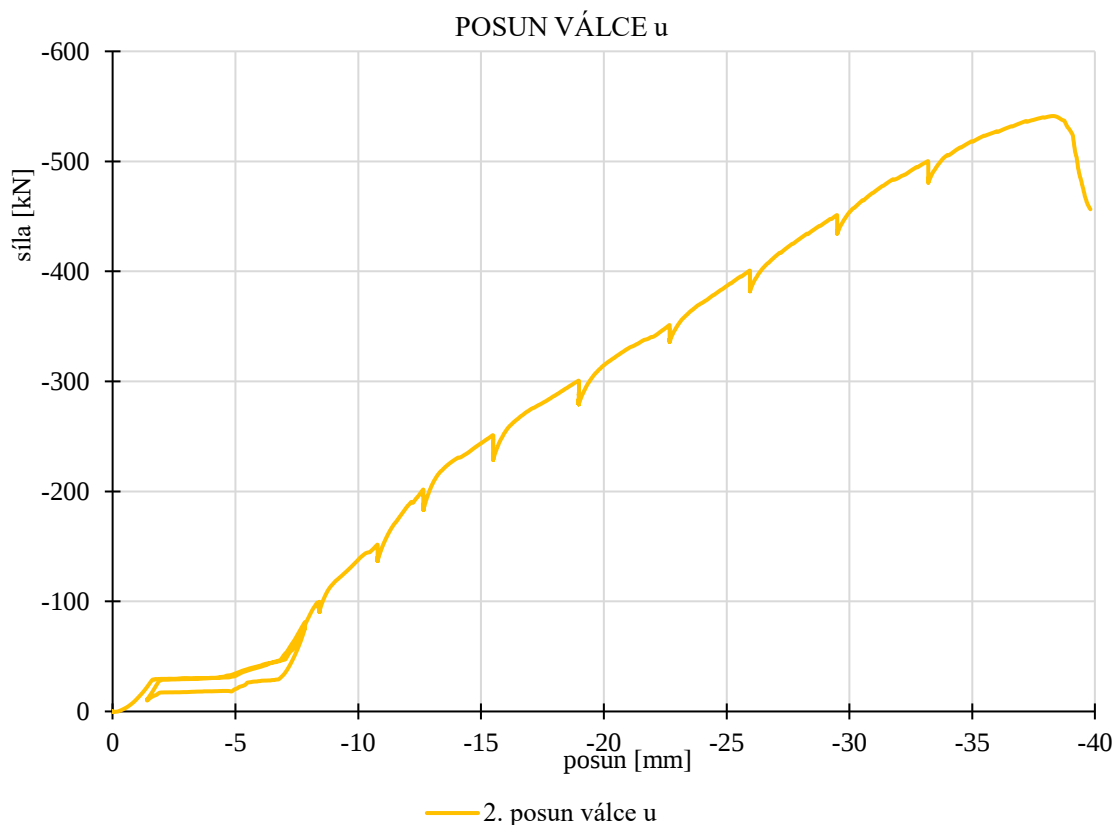
Obrázek 173: vzorek č. 3. FRP-UTŘ posun GFRP třmínků v kotevní oblasti



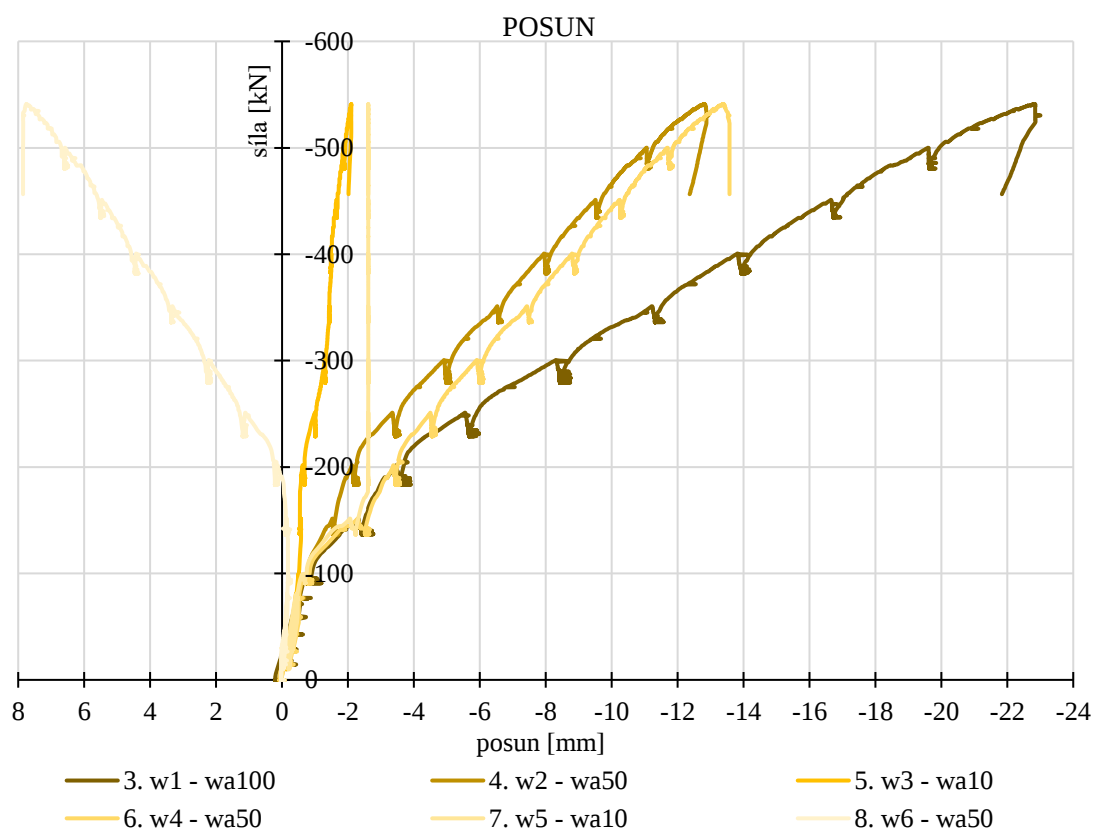
Obrázek 174: vzorek č. 3. FRP-UTR porušený obvod při protlačení na spodním lici desky

6.5.5 Vzorek č. 4. FRP-45TŘ

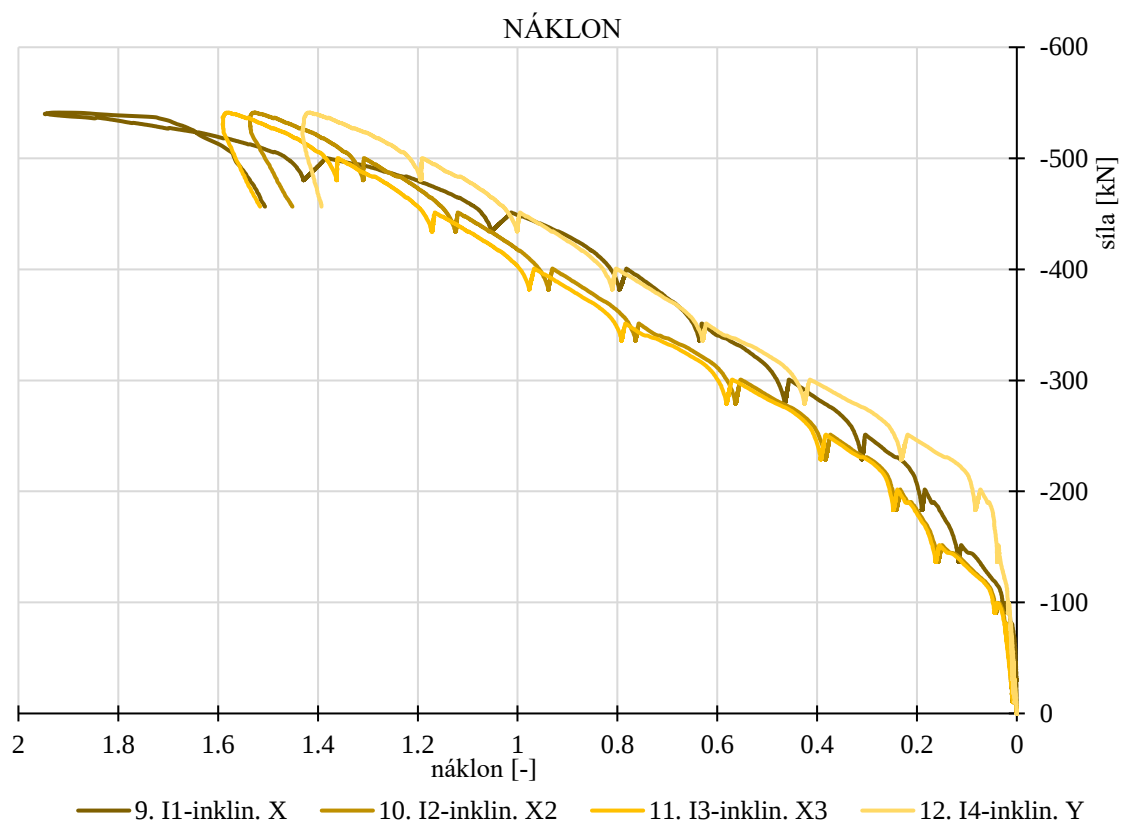
Tento vzorek byl vyztužen obdobně jako předchozí vzorek č. 3. FRP-UTR. V tomto případě svírala smyková GFRP výztuž se střednicí desky uhel 45° , více v kapitole 6.4. Obdobně jako předchozí desky byl i tento vzorek prvotně zatížen na hodnotu 80 kN a následně odtížen na 10 kN. Po odtížení bylo aplikováno deformační zatížení 4 mm/min až do porušení. Na Obrázek 175 je vidět, že při síle 30 kN docházelo k dotlačení vzorku na bodové podpory, dosednutí ocelových podpěr pod bodovými podporami a dotlačení zatěžovacího rámu. Při prvotním zatížení na 80 kN nevznikly na zkušebním vzorku žádné trhliny. První trhliny se na spodním povrchu desky objevily při hodnotě 100 kN, trhliny byly kolmé na směr X. Od této úrovně zatížení docházelo k překročení tahové pevnosti betonu a únosnost začínala více záviset na podélné a smykové GFRP výztuži. Při hodnotě 100 kN je viditelná první změna směrnice křivky přírůstku síly ku výsunu zatěžovacího válce.



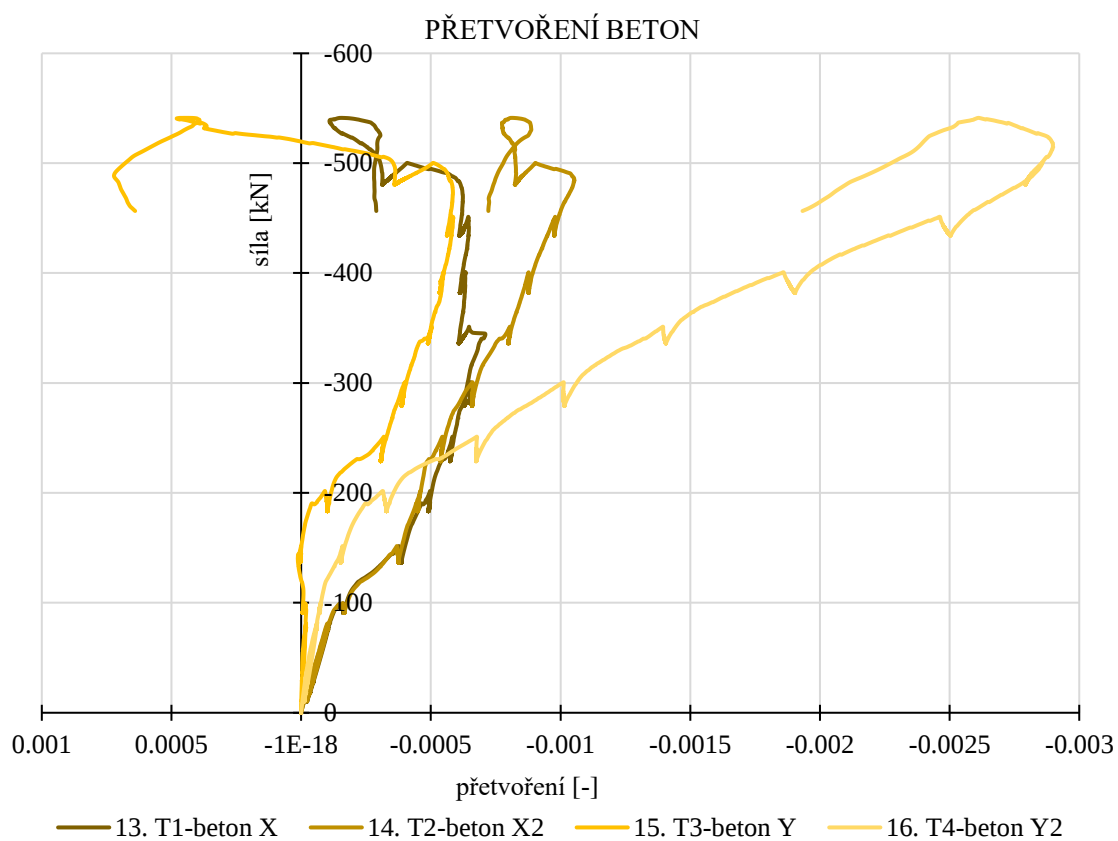
Obrázek 175: vzorek č. 4. FRP-45TŘ graf nárůstu síly v závislosti na výsunu zatěžovacího válce



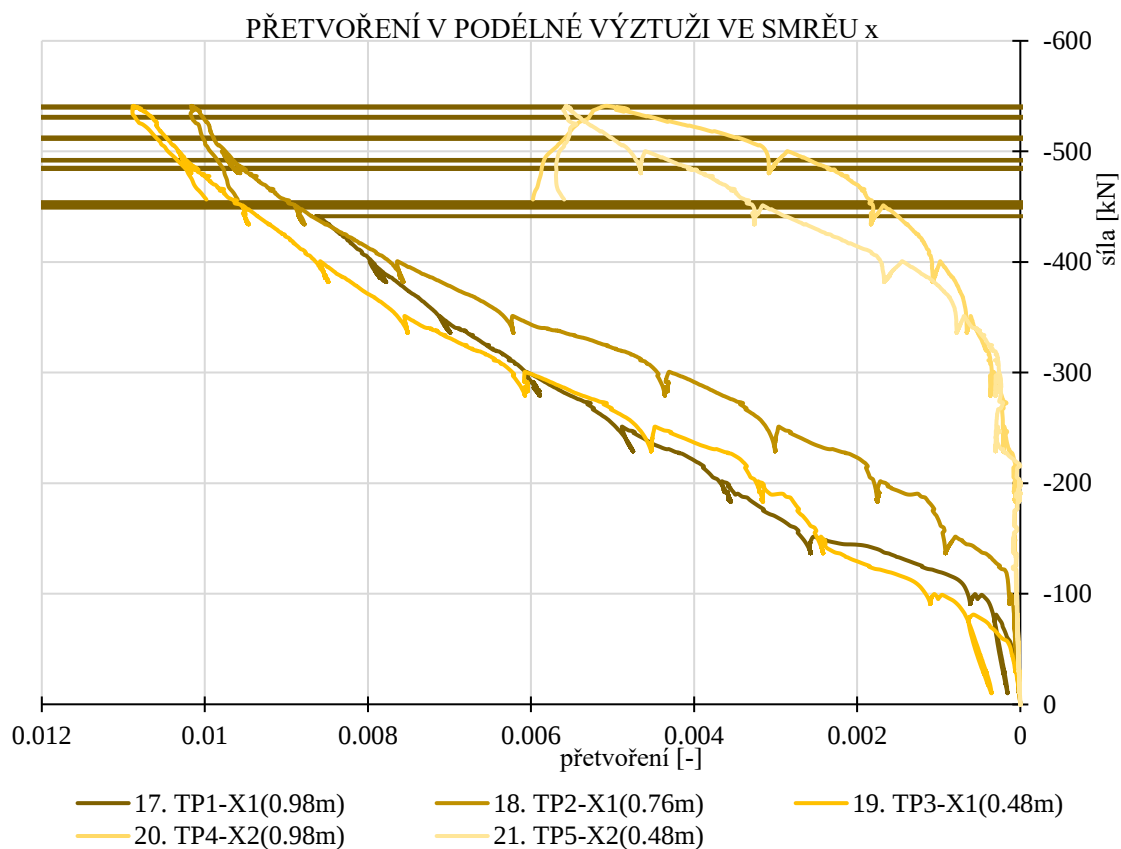
Obrázek 176: vzorek č. 4. FRP-45TŘ posuny indukčních snímačů dráhy



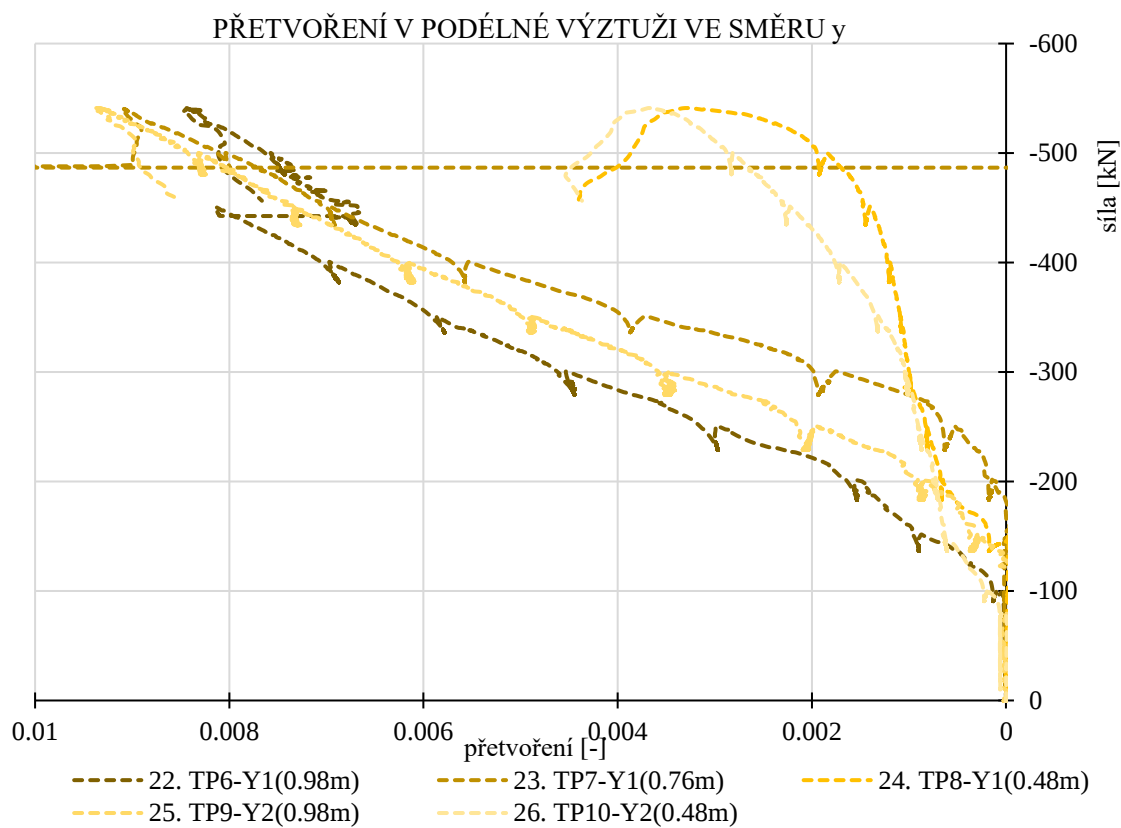
Obrázek 177: vzorek č. 4. FRP-45TŘ náklon inklinometrů



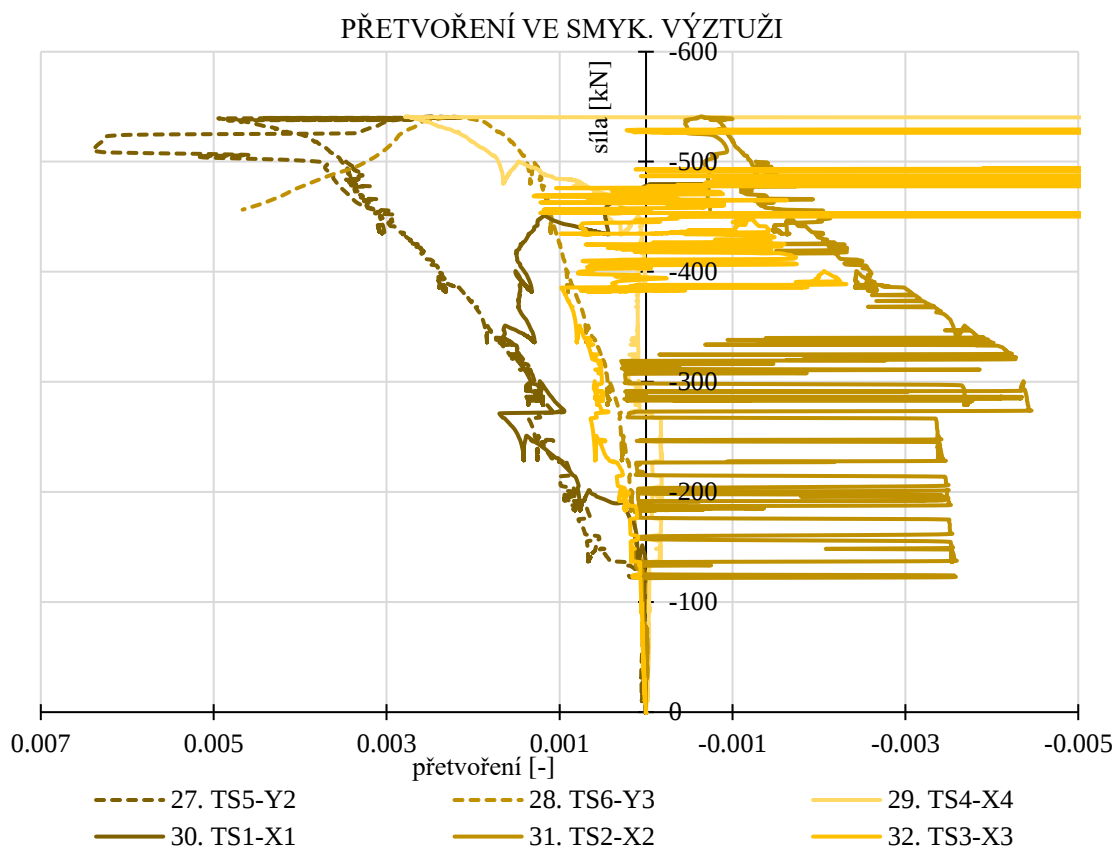
Obrázek 178: vzorek č. 4. FRP-45TŘ přetvoření na povrchu betonu



Obrázek 179: vzorek č. 4. FRP-45TR přetvoření podélné výztuže ve směru X



Obrázek 180: vzorek č. 4. FRP-45TR přetvoření podélné výztuže ve směru Y



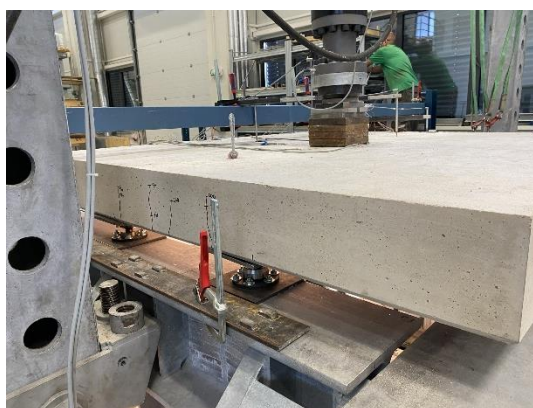
Při hodnotě zatížení 200 kN je na Obrázek 176 viditelná změna směrnice která je přímá až do porušení. Došlo k rozšíření trhlin na spodním lící desky a únosnost závisela na podélné a smykové GFRP výztuži. Trhliny byly především ve směru kolmém na osu X, vznikaly diagonální trhliny, viz. Obrázek 182. Na Obrázek 183 až Obrázek 185 je vidět, že na bočních stranách vznikaly trhliny ve směru osy Y, ve směru osy X bylo na boční straně malé množství trhlin. Indukčnostní snímač dráhy v blízkosti středu desky (W1) na Obrázek 176 ukazoval průhyb 3,7 mm. Roh desky nevykazoval žádné deformace (indukčnostní snímač dráhy W6). Na Obrázek 179 a Obrázek 180 je vidět, že maximální přetvoření v podélné výztuži bylo 0,0037.



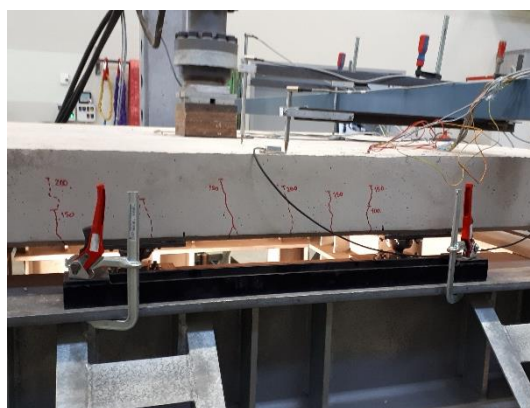
Obrázek 182: vzorek č. 4. FRP-45TŘ trhliny vzniklé do 200 kN na spodní straně



Obrázek 183: vzorek č. 4. FRP-45TŘ trhliny vzniklé do 200 kN na boční straně X1



Obrázek 184: vzorek č. 4. FRP-45TŘ trhliny vzniklé do 200 kN na boční straně Y1



Obrázek 185: vzorek č. 4. FRP-45TŘ trhliny vzniklé do 200 kN na boční straně Y2

S rostoucím zatížením docházelo z rozšiřování a vzniku nových trhlin na spodním povrchu desky. Trhliny byly ve všech směrech a některé byly propojeny s trhlinami na bočních stranách zkoušeného vzorku. Poslední trhliny na spodním povrchu desky byly zakresleny při síle 300 kN viz. Obrázek 186. Na bočních stranách desky byly trhliny naposledy zakresleny při zatížení 500 kN viz. Obrázek 187 až Obrázek 189. Z náklonů inklinometrů na Obrázek 177 lze konstatovat, že deska se až do porušení chovala přibližně symetricky. Deformace změřená indukčností snímačem dráhy na okraji desky ve směru Y (W5) byla až do porušení přibližně o 1 mm větší než deformace na okraji desky ve směru X (W3).



Obrázek 186: vzorek č. 4. FRP-45TŘ trhliny vzniklé do 500 kN na spodní straně



Obrázek 187: vzorek č. 4. FRP-45TŘ trhliny vzniklé do 500 kN na boční straně X2



Obrázek 188: vzorek č. 4. FRP-45TŘ trhliny vzniklé do 500 kN na boční straně Y1

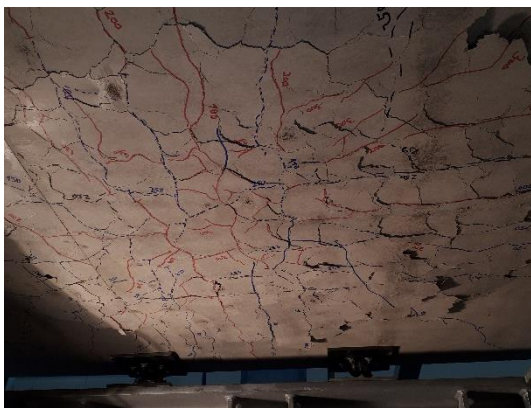


Obrázek 189: vzorek č. 4. FRP-45TŘ trhliny vzniklé do 500 kN na boční straně Y2

Porušení nastalo při zatížení silou 540 kN přímo pod roznášecí deskou viz. Obrázek 191. Maximální přetvoření na horním povrchu betonové desky bylo 0,0029, nevznikly trhliny vlivem drcení betonu. V blízkosti středu desky byla deformace při porušení 22,8 mm a roh byl oproti nezatíženému stavu nadzvednut o 7,7 mm. Maximální přetvoření v podélné výztuži bylo naměřeno 0,011, nedošlo k přetržení podélné výztuže. Na Obrázek 181 je znázorněn průběh přetvoření v GFRP třmínkách. V průběhu přetvoření jsou viditelné odchylky. Lze předpokládat, že nedošlo k přetržení žádného sledovaného třmínku a přetvoření při porušení nepřekročilo hodnotu 0,005. Porušení nastalo rozdrčením betonových vzpěr uvnitř desky. Kritický obvod na spodní straně desky lze předpokládat za souměrný, kdy ve směru osy X byly vzdálenosti od bočních stran desky 100 mm, viz. Obrázek 192. Ve směru osy Y to bylo 250 mm a 300

mm. Pro zvětšení deformací a trhlin byl porušený vzorek odtížen a znovu přitížen s rychlejším nárůstem síly.

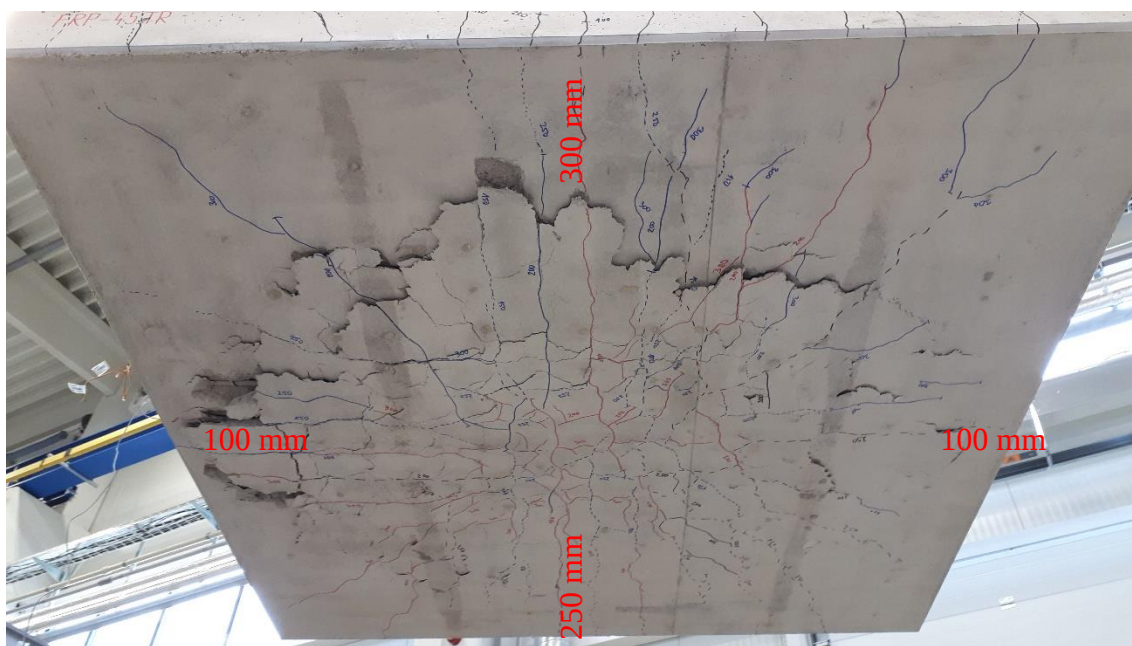
Ve směru osy X došlo při porušení k odhalení výztuže v kotevní oblasti. Při dodatečném zkoumání GFRP třmínek nebyly nalezeny žádné poškození třmínek



Obrázek 190: vzorek č. 4. FRP-45TR spodní povrch desky při porušení



Obrázek 191: vzorek č. 4. FRP-45TR zatlačení zatěžovací desky při porušení

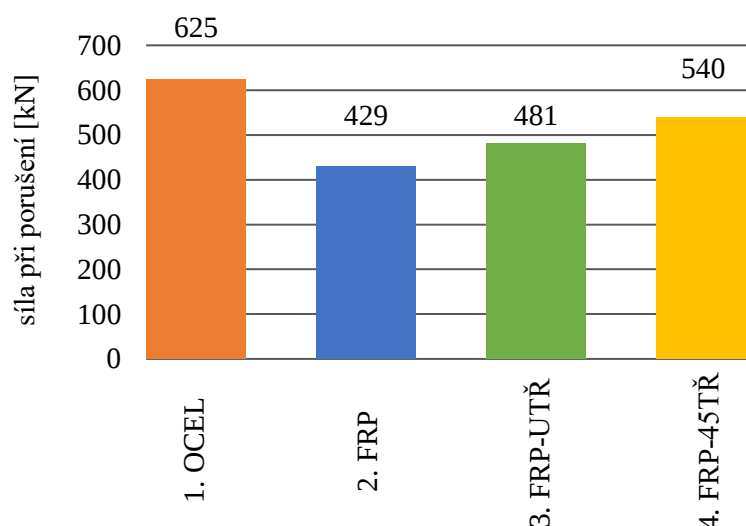


Obrázek 192: vzorek č. 4. FRP-45TR porušený obvod při protlačení na spodním lící desky

6.5.6 Srovnání výsledků experimentu

Byl proveden experiment na protlačení betonových desek. Pro možnost porovnání chování s různým typem a způsobem vyztužení byly desky vyrobeny ze stejného betonu a měly stejné rozměry. Vzorek č. 1. OCEL byl vyztužen pouze podélnou ocelovou výztuží v obou směrech. Další vzorky měly stejnou plochu podélné výztuže, ale výztuž

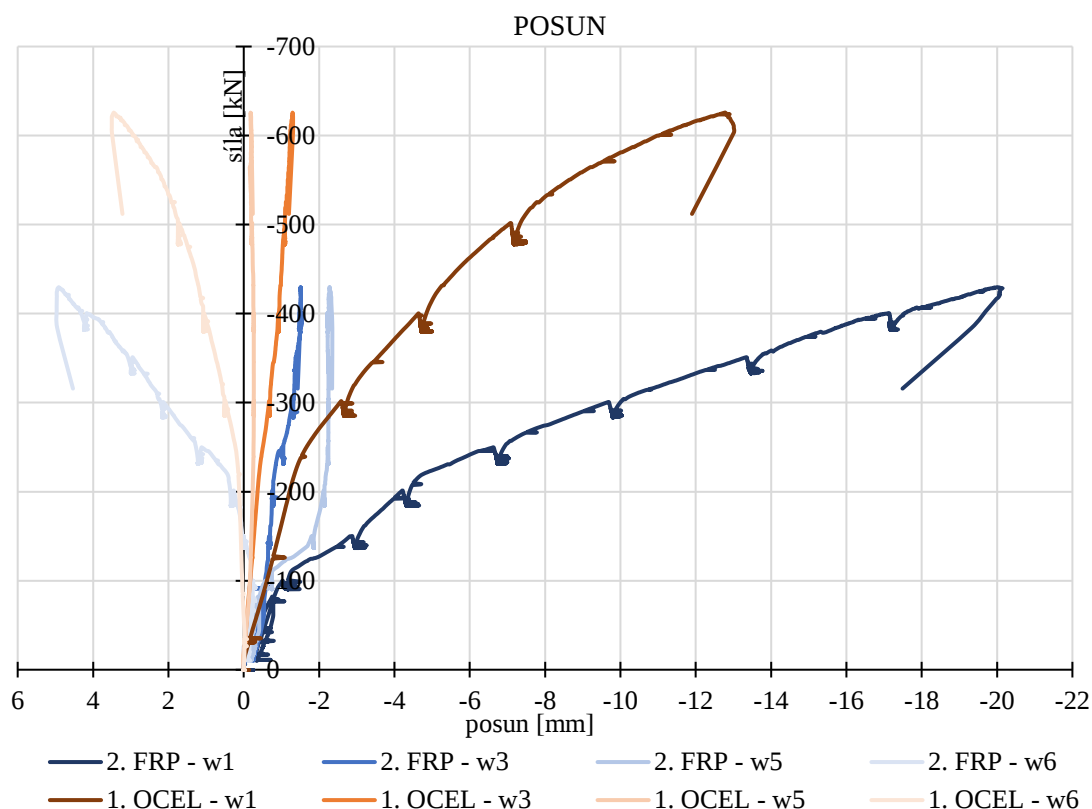
byla provedena z GFRP. Poslední dva vzorky měly navíc smykovou GFRP výztuž. Vzorek č. 3. FRP-UTŘ měl upravené třmínky, aby je bylo možné nasadit dodatečně, úhel se střednicí desky byl 90° . Poslední varianta měla vložený smykový kříž, kde třmínky svíraly úhel se střednicí desky 45° . Hodnoty, při kterých došlo k porušení jednotlivých vzorků jsou znázorněny na Obrázek 193. Nejvyšší síly při porušení dosáhl vzorek s podélnou ocelovou výztuží (1. OCEL). Vzorek 2. FRP dosáhl cca 69 % pevnosti referenčního vzorku, který měl stejnou plochu výztuže s rozdílnou tuhostí. Vložení třmínků mělo za důsledek zvýšení únosnosti proti protlačení. V případě varianty s GFRP třmínky tvaru „U“ (3. FRP-UTŘ) došlo k nárůstu oproti vzorku bez smykové výztuže o 12 %. Pro vzorek 4. FRP-45TŘ byl tento nárůst o 26 %. U všech vzorků shodně došlo ke křehkému porušení pod roznášecí zatěžovací deskou.



Obrázek 193: porovnání hodnot mezní únosnosti vzorků provedeného experimentu

Na Obrázek 194 je znázorněn průběh deformací zatěžovacích zkoušek pro varianty bez smykové výztuže. První trhliny v případě desky s ocelovou výztuží začaly vznikat při zatížení 150 kN. U vzorku s GFRP výztuží to bylo při síle 100 kN. Změna směrnice, kdy únosnost vzorků začala záviset na podélné výztuži byla v případě vzorku 1. OCEL při síle 230 kN s deformací v blízkosti středu desky (indukčností snímač dráhy W1) 1,2 mm. Stejná změna nastala u vzorku 2. FRP mezi 100 kN a až 200 kN. Při síle 200 kN byl průhyb v blízkosti středu desky 4,1 mm. V případě ocelové výztuže je viditelná změna směrnice (při síle 450 kN), kdy došlo u většiny výztuže k překročení meze kluzu a následnému změkčení vzorku. Pro vzorek s kompozitní výztuží toto nenastalo, FRP výztuž má lineární pracovní diagram až do porušení. Selhání vzorku č. 1. OCEL nastalo

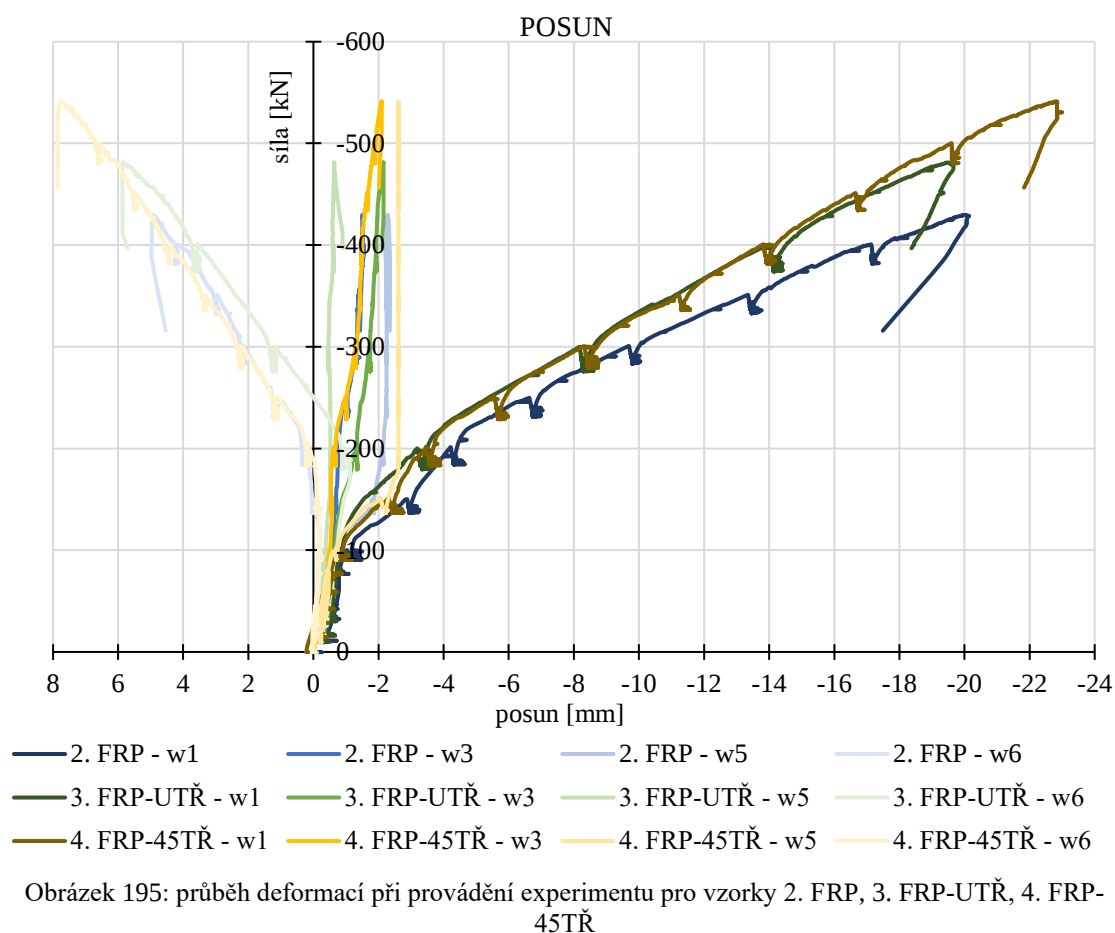
při síle 625 kN s deformací v blízkosti středu desky 13 mm. Roh desky (indukčnostní snímač dráhy W6) byl nadzvednut oproti nezatíženému stavu o 3,5 mm. Kritický porušený obvod byl ve vzdálenosti $2,9d - 3,4d$ od líce sloupu. U vzorku 2. FRP nastalo selhání při síle 429 kN s průhybem v blízkosti středu desky 20 mm, roh byl nadzvednut o 4,9 mm. V tomto případě byl kritický porušený obvod ve vzdálenosti $2,9d - 3,7d$ od líce sloupu. Tuhost výztuže má vliv na únosnost betonové desky při protlačení. V případě GFRP výztuže došlo k větším deformacím při menší zatěžovací síle.



Obrázek 194: průběh deformací při provádění experimentu pro vzorky 1. OCEL, 2. FRP

Na Obrázek 195 jsou znázorněny průběhy deformací pro vzorky s GFRP výztuží. U těchto vzorků vznikaly první trhliny při síle 100 kN. Změna směrnice, kdy únosnost začala záviset na GFRP výztuži nastala mezi 100 kN až 200 kN. Při síle 200 kN byl u vzorku č. 2. FRP průhyb v blízkosti středu desky (indukčnostní snímač dráhy W1) 4,1 mm. Pro vzorky se smykovou výztuží byla deformace v blízkosti středu desky při zatížení 200 kN přibližně shodná a to 3,5 mm. Selhání vzorku 2. FRP nastalo při síle 429 kN s průhybem v blízkosti středu desky 20 mm, roh byl oproti nezatíženému stavu nadzvednut o 4,9 mm. Kritický porušený obvod byl ve vzdálenosti $2,9d - 3,7d$ od líce

sloupu. Směrnice znázorňující přírůstek síly ku deformaci v blízkosti středu desky byly před porušením vzorků pro desky obsahující smykovou výztuž stejné. U vzorku .č 3. FRP-UTŘ nastalo selhání vzorku při zatížení 481 kN s průhybem $W1 = 19,5$ mm, roh byl nadzvednut o 5,8 mm. Porušený kritický obvod byl ve vzdálenosti $2,9d - 4,1d$. Vzorek 4. FRP-45TŘ selhal při síle 540 kN s průhybem v blízkosti středu desky 22,8 mm a roh byl nadzvednut o 7,7 mm. V tomto případě došlo k největšímu odsunutí kritického kontrolovaného obvodu od líce sloupu a to do vzdálenosti $3,5d - 4,7d$. Přidání smykové GFRP výztuže mělo příznivý vliv na celkovou únosnost a tuhost betonových desek oproti vzorku bez smykové výztuže. Smyková výztuž také ovlivnila vzdálenost porušeného kritického obvodu.



6.5.7 Materiálové charakteristiky betonu a FRP výztuže

Při výrobě čtyř vyztužených betonových desek se průběžně odebíral beton pro vytvoření dílčích vzorků viz. kapitola 6.4. Během betonáže se vyrobilo celkem 7 krychlí o délce hrany 150 mm a 4 trámce o rozměrech 100x100x400 mm. Pomocí těchto dílčích

vzorků bylo možné přesně stanovit materiálové charakteristiky použitého betonu. Souběžně se zkoušením hlavních vzorku se zkoušely krychle a trámce. Celkem 4 krychle byly zkoušeny na pevnost v tlaku na krychlích a zbývající 3 krychle byly využity pro určení pevnosti v příčném tahu. Pomocí všech 4 trámců byl stanoven modul pružnosti. Výsledné materiálové charakteristiky použitého betonu jsou znázorněny v Tabulka 18. Výrobce a dodavatel GFRP výztuže Prefa Kompozity, a.s. Brno z posledních zkoušek dodal materiálové charakteristiky GFRP podélné výztuže, která byla použita ve vzorcích. Charakteristiky GFRP výztuže jsou uvedeny v Tabulka 19. Kompozitní výztuž má lineární pracovní diagram až do porušení.

Tabulka 18: materiálové charakteristiky betonu

materiálová charakteristika	označení	hodnota	jednotka	COV
Pevnost v tlaku	$f_{c,cube}$	30.4	MPa	0.2 %
Pevnost v příč. Tahu	f_{ct}	3.0	MPa	0.3 %
Modul pružnosti	E_{cm}	24.5	GPa	3.3 %

Tabulka 19: materiálové charakteristiky podélné GFRP výztuže

materiálová charakteristika	označení	hodnota	jednotka
Modul pružnosti	E_f	54.8 ± 0.17	GPa
Tahová pevnost	f_{fk}	1363.41 ± 55.76	MPa
Přetvoření	ε_f	0.0249	-

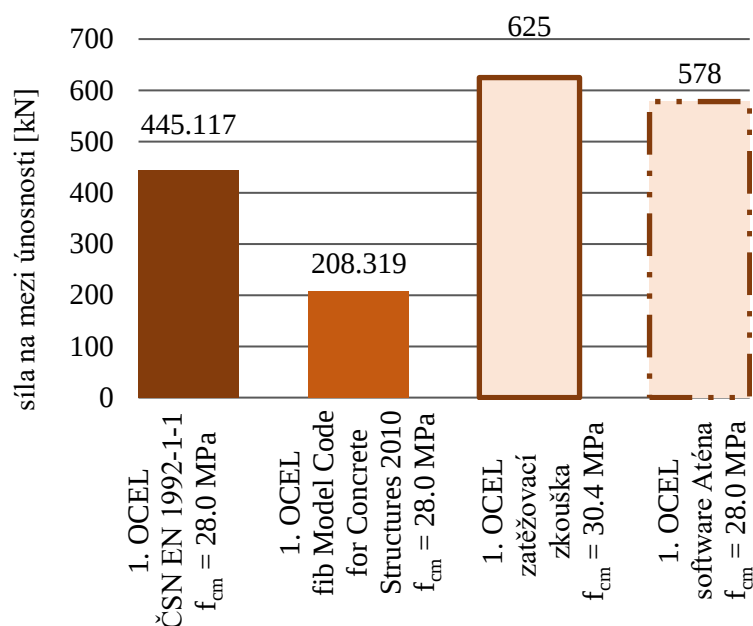
6.6 Vyhodnocení výsledků

V této kapitole jsou porovnány výsledky z předběžného návrhu a nelineární analýzy se skutečnými výsledky z reálně provedených zkoušek.

6.6.1 Vzorek č. 1. OCEL

Vyztužení daného vzorku vycházelo z předběžného návrhu z kapitoly 6.2.1. V dané kapitole se prováděl předběžný návrh dle stávající normy ČSN EN 1992-1-1 [7] a dle fib Model Code for Concrete Structures 2010 [10]. Oba přístupy řeší protlačení betonových desek vyztužených ocelovou výztuží. Nebylo tak potřeba pro tento vzorek

provádět žádné úpravy. Významný rozdíl mezi návrhovými přístupy je vzdálenost uvažovaného kontrolovaného obvodu od líce sloupu. Pro stávající normu [7] je základní kontrolovaný obvod ve vzdálenosti $2d$ od líce sloupu. Dle [10] se uvažuje základní kontrolovaný obvod ve vzdálenosti $0,5d$ od líce sloupu. Na Obrázek 196 je vidět porovnání sil při porušení pro vzorek 1. OCEL. Porušení při zatěžovací zkoušce nastalo při síle 625 kN. Průběh zatěžovací zkoušky a způsob porušení je popsán v kapitole 6.5.2. Porušený obvod znázorněn na Obrázek 138 byl ve vzdálenosti 500 – 600 mm od líce sloupu. To odpovídá hodnotě přibližně $2,9d$ – $3,5d$. Porušení tedy nastalo ve větší vzdálenosti od líce sloupu, než uvažují oba použité návrhové předpisy v předběžném návrhu. ČSN EN 1992-1-1 [7] predikovalo přibližně 71 % skutečné únosnosti. Daný přístup lze považovat za správný a bezpečný. Po použití skutečných materiálových vlastností z 6.5.7 by mohla být dosažena vyšší přesnost předběžného návrhu (předběžný návrh $f_{cm} = 28,0$ MPa, skutečnost $f_{cm} 30,4$ MPa). Druhý použitý přístup dle fib Model Code for Concrete Structures 2010 [10] stanovil pouze 33 % skutečné únosnosti. Zásadní rozdíl je ve vzdálenosti kontrolovaného obvodu, při kterém má dojít k porušení. Přístup [10] uvažuje vzdálenost $0,5d$. U předběžného návrhu dle [10] by mohlo přesnosti výsledku pomoci upravení materiálových vlastností betonu. Zásadní vliv na výpočet by však mělo upravení předpokladu výpočtu pootočení. V předběžném návrhu se použil výpočet pootočení dle I. úrovně. Při zadání přesného pootočení získaného při zatěžovací zkoušce by se měla přesnost daného návrhového přístupu významně přiblížit síle při porušení.



Obrázek 196: vzorek č. 1. OCEL porovnání výsledků předběžného návrhu, zatěžovací zkoušky a nelineární analýzy softwaru Aténa

Z Obrázek 196 je vidět, že předběžně stanovená síla při porušení pomocí nelineární analýzy byla blízká skutečnému porušení. Software Aténa dosáhl 92% síly při porušení. Podobnost zatěžovacích křivek s přírůstkem deformací je znázorněna na Obrázek 197. Sledované body však nebyly v úplně stejných polohách.

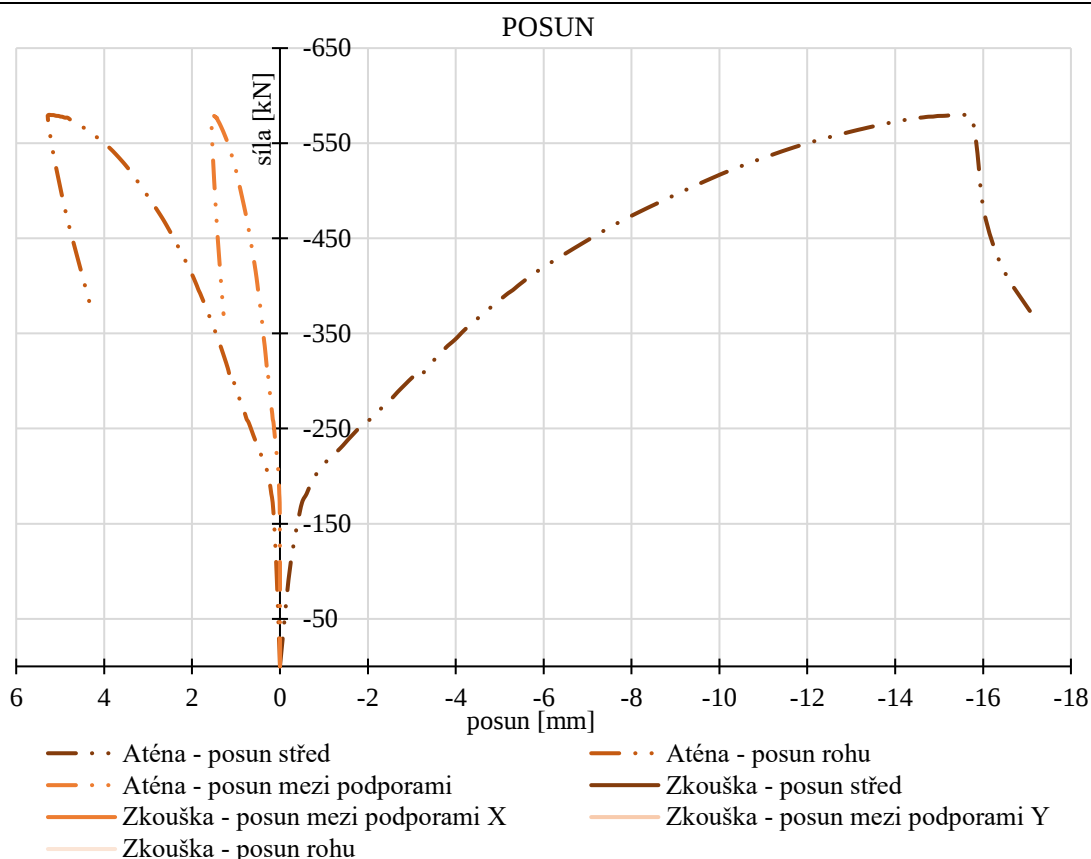
V softwaru Aténa byl vznik prvních ohybových trhlin při síle přibližně 180 kN. Od daného okamžiku přestával působit beton v tahu a začínala tahová únosnost, tuhost vzorku a jeho odezva, záviset na ocelové výztuži. Deformace uprostřed desky při vzniku prvních trhlin byla přibližně 0,6 mm. Obdobná změna tuhosti nastala na skutečném vzorku až při hodnotě přibližně 240 kN s deformací v blízkosti středu desky přibližně 1,2mm (předběžný návrh $f_{cm} = 2,2$ MPa, skutečnost $f_{cm} 3,0$ MPa). Změna směrnice na skutečném vzorku byla ze stejného důvodu. Únosnost začala významně záviset na pevnosti ocelové výztuže. Z náklonu křivek je vidět, že v případě skutečného vzorku byl vyšší přírůstek deformací. Tento rozdíl směrnic může být způsoben rozdílnými materiálovými charakteristikami betonu oproti předpokladu (předběžný návrh $E_{cm} = 30,0$ MPa, skutečnost $E_{cm} 24,5$ MPa). Vložením materiálových charakteristik použitého betonu při zkoušce do softwaru Aténa by měla být dosažena vyšší shoda. Deformace v rozích desky byly v obou případech obdobné. Začalo docházet k nadzvedávání rohů desky.

Změna křivosti v případě softwaru Aténa trvala až do síly přibližně 400 kN, kdy docházelo k rozvoji především diagonálních trhlin na spodním líci desky. Méně vznikaly trhliny ve směru výztuží. U skutečného vzorku došlo ke změně křivosti při síle 450 kN. Na spodním povrchu desky docházelo k rovnoměrnému rozvoji trhlin ve všech směrech. Na tento rozdíl poukazují deformace mezi podporami. V případě reálného vzorku došlo k malému průhybu mezi podporami. Tento průhyb nijak významně nenarůstal. V případě modelu v softwaru Aténa došlo k nadzvednutí desky v prostoru mezi podporami.

Do hodnoty 400 kN pro software Aténa a 450 kN pro reálnou zkoušku záviselo chování vzorku, jeho tuhost, na ocelové výztuži, která byla na lineární větvi pracovního diagramu. Do tohoto okamžiku platil Hookův zákon. Z důvodu použití středních hodnot v programu Aténa byla hodnota meze kluzu uvažována 550 MPa. Skutečná výztuž ve směru X měla přetvoření při pozorované změně tuhosti přibližně 0,0025 viz. Obrázek 118. Při předpokladu platnosti Hookova zákona získáme hodnotu 500 MPa.

Porušení v reálném i teoretickém případě nastalo protlačením zatěžovací desky do horního povrchu betonové desky. V ani jednom z případů nebylo přetvoření na horním povrchu betonové desky na úrovni, při které by docházelo k drcení betonu. V žádném z případů nedošlo k přetržení podélné výztuže. Způsob porušení, i porovnávané chování, lze považovat za shodné. V softwaru Aténa došlo k porušení při síle 578 kN s průhybem uprostřed desky 15,7 mm. Nadzvednutí v rozích desky bylo přibližně o 5,2 mm. Při reálné zatěžovací zkoušce došlo k porušení při síle 624 kN s průhybem v blízkosti středu desky 12,9 mm. Indukčnostní snímač dráhy v blízkosti rohu při porušení naměřil nadzvednutí o 3,4 mm.

Z výsledků a průběhu křivek ukazující závislost přírůstku síly na deformaci lze konstatovat že model v softwaru Aténa fungoval správně. Po upravení materiálových charakteristik by výsledky a průběhy křivek s vysokou pravděpodobností dosahovaly velmi blízké shody.

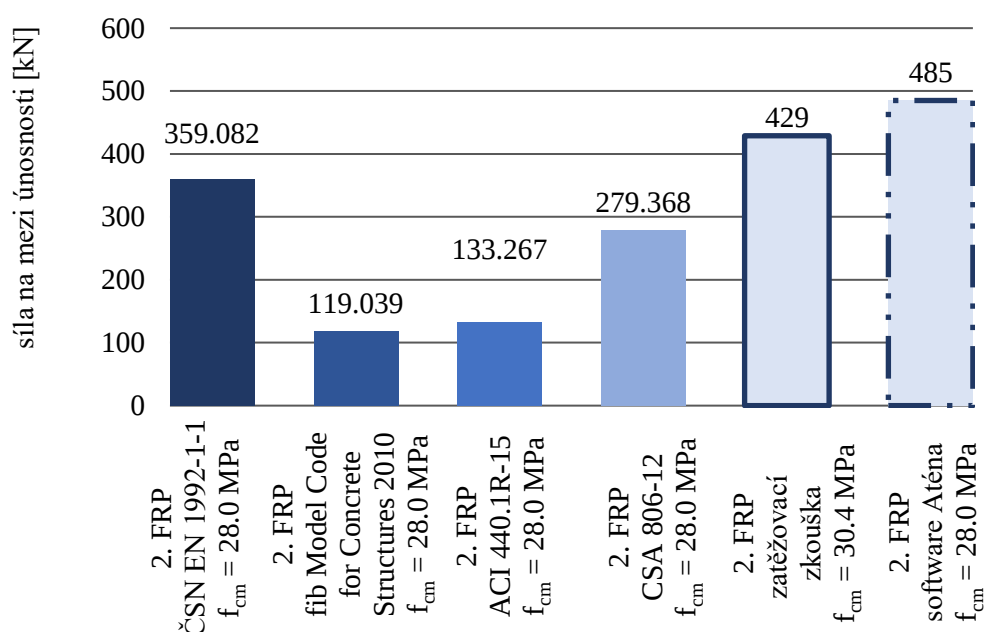


Obrázek 197: vzorek č. 1. OCEL porovnání deformací skutečné zatěžovací zkoušky se softwarem Aténa

6.6.2 Vzorek č. 2. FRP

Tento vzorek byl vyztužen podélnou GFRP výztuží, jako je uvedeno v předběžném návrhu v kapitole 6.2.2. Pro předběžný návrh byla provedena úprava stávající normy ČSN EN 1992-1-1 [7], aby byla možná aplikace pro FRP výztuž. Obdobné úpravy musely být provedeny pro návrhový přístup dle fib Model Code for Concrete Structures 2010 [10]. Do úprav vstupuje odhadnuté dovolené přetvoření podélné FRP výztuže, tak aby bylo zohledněno předpokládané chování a tuhost FRP výztuže. Tato hodnota je možná upravit dle výsledků zkoušek. Návrhový přístup byl také proveden pomocí předpisů, které řeší protlačení betonových desek vyztužených podélnou FRP výztuží, a to dle ACI 440.1R-15 [3] a CSA 806-12 [4]. Jediný přístup dle [7] uvažuje základní kontrolovaný obvod ve vzdálenosti $2d$ od líce sloupu. Ve zbývajících třech přístupech se tato vzdálenost uvažuje rovna $0,5d$. Na Obrázek 198 jsou znázorněny výsledky předběžného návrhu, hodnota při které došlo k porušení vzorku, výsledek nelineární analýzy z programu Aténa. Vzorek č. 2. FRP byl při experimentu porušen při síle 429 kN, kde porušený obvod byl ve vzdálenosti $2,9d - 3,7d$. Porušení tedy nastalo ve větší

vzdálenosti, než uvažují všechny návrhové přístupy. Návrhový přístup ČSN EN 1992-1-1 [7] uvažuje největší vzdálenost kontrolovaného oproti ostatním přístupům a predikoval 84 % únosnost skutečného vzorku. Po užití skutečných materiálových vlastností z kapitoly 6.5.7 by mohlo být dosaženo vyšší přesnosti (předběžný návrh $f_{cm} = 28,0$ MPa, skutečnost $f_{cm} 30,4$ MPa). Významný vliv na stanovení únosnosti má hodnota přetvoření FRP výztuže. Po jeho zpřesnění ze zkoušek by mohlo být dosaženo vyšší přesnosti. Druhý použitý přístup dle fib Model Code for Concrete Structures 2010 [10] stanovil pouze 28 % skutečné únosnosti. Významný rozdíl je ve vzdálenosti kontrolovaného obvodu. Návrhový přístup [10] uvažuje s výpočtem pootočení. V tomto případě byl použit výpočet I. úrovně. Při zadání přesného pootočení získaného při zatěžovací zkoušce by mělo dojít k dalšímu zpřesnění předběžného návrhu. Zbývající hodnoty byly stanoveny dle existujících přístupů pro posouzení protlačení s podélnou FRP výztuží. Přístup ACI 440.1R-15 [3] stanovil 31 % a CSA 806-12 [4] stanovil 65 % únosnosti skutečného vzorku. Obrázek 29 ukazuje, že přístup dle [4] stanovil přibližně 2x větší napětí na mezi únosnosti oproti ostatním přístupům. Po upřesnění materiálových charakteristiky by mělo dojít ke zpřesnění výsledků.



Obrázek 198: vzorek č. 2. OCEL porovnání výsledků předběžného návrhu, zatěžovací zkoušky a nelineární analýzy softwaru Aténa

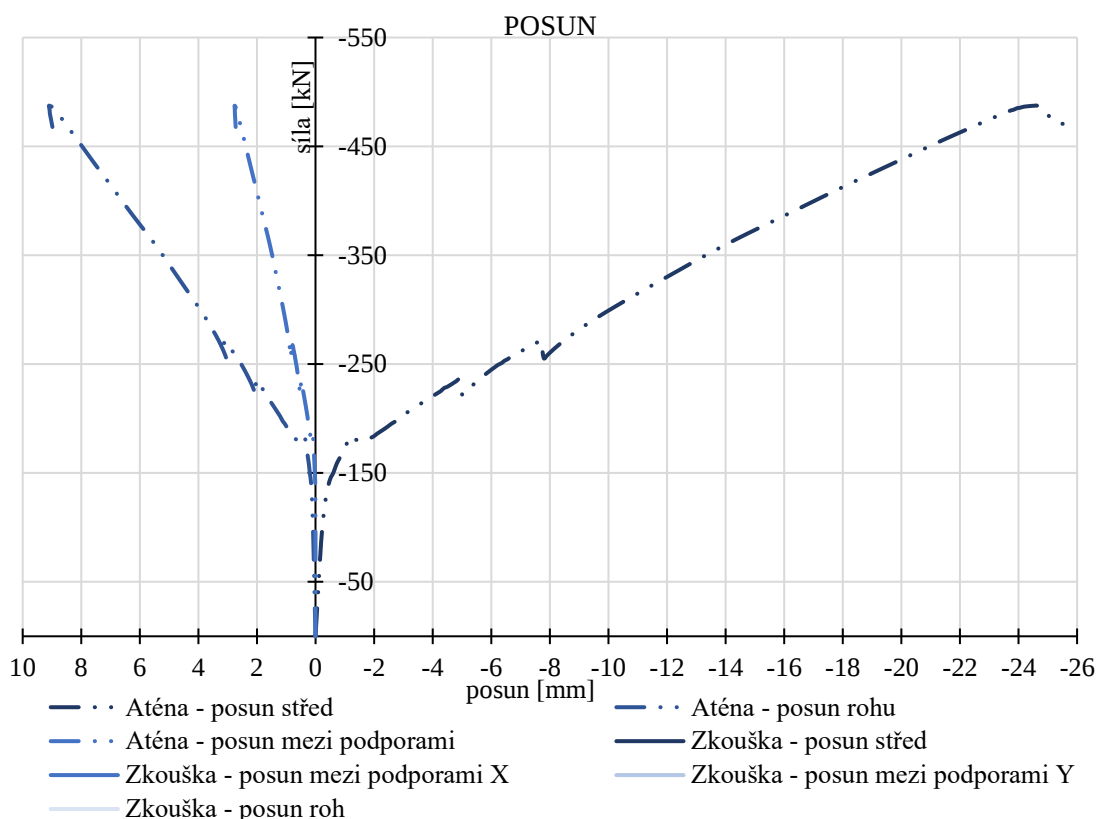
Na Obrázek 198 je vidět, že předběžně stanovená síla při porušení pomocí nelineární analýzy stanovila 113 % skutečné únosnosti vzorku č. 2. FRP. Podobnost

křivek vyjadřující závislost přírůstku síly na deformaci je znázorněna na Obrázek 199. Sledované body nebyly v přesně stejných polohách.

V softwaru Aténa začaly vznikat první trhliny při síle 150 kN. Při skutečné zatěžovací zkoušce začaly vznikat trhliny při síle 100 kN. Docházelo k rozšiřování a vzniku nových trhlin. Únosnost začínala záviset více na podélné výztuži. Změna směrnice v případě softwaru Aténa nastala při síle 180 kN. Průhyb ve středu desky byl 1,2 mm a roh byl nadzvednut o 0,4 mm. Změna směrnice reálné zatěžovací zkoušky nastala přibližně při síle 200 kN. Průhyb v blízkosti středu desky byl 4,1 mm, roh desky byl nadzvednut o 0,2 mm. Od dané chvíle začala únosnost záviset především na podélné GFRP výztuži. Zpřesněním materiálových vlastností betonu z Tabulka 18 a GFRP podélné výztuže z Tabulka 19 by mělo být dosaženo vyšší shody.

Absence plastické větve pracovního diagramu měla za důsledek přímou směrnici až do porušení. S rostoucí silou docházelo k rozšiřování a vzniku nových trhlin. V případě nelineárního modelu docházelo k nadzvedávání desky mezi podporami, u skutečného vzorku docházelo k průhybům v podobném místě. Porušení v reálném vzorku i modelu nastalo přímo pod roznášecí zatěžovací deskou. Ani v jednom z případů nedošlo ke vzniku trhlin na horním povrchu desky. Selhání modelu v software Aténa nastalo při síle 485 kN. V případě reálné zatěžovací zkoušky došlo k porušení při síle 429 kN s průhybem v blízkosti středu desky 20 mm a roh desky byl nadzvednut oproti nezatíženému stavu o 4,9 mm. Průhyb uprostřed desky byl dle numerického výpočtu 24 mm, roh desky se oproti nezatíženému stavu nadzvedl o 9 mm. V žádném z případů nedošlo k přetržení výztuže, porušení nastalo rozdrčením tlačných vzpěr uvnitř průřezu.

Výsledné hodnoty a průběhy ukazující závislost přírůstku síly na deformaci lze konstatovat, že po upravení materiálových charakteristik a zpřesnění kotevního napětí v modelu by výsledky pravděpodobně dosahovaly velmi blízké shody. Numerický výpočet v softwaru Aténa byl korektní.

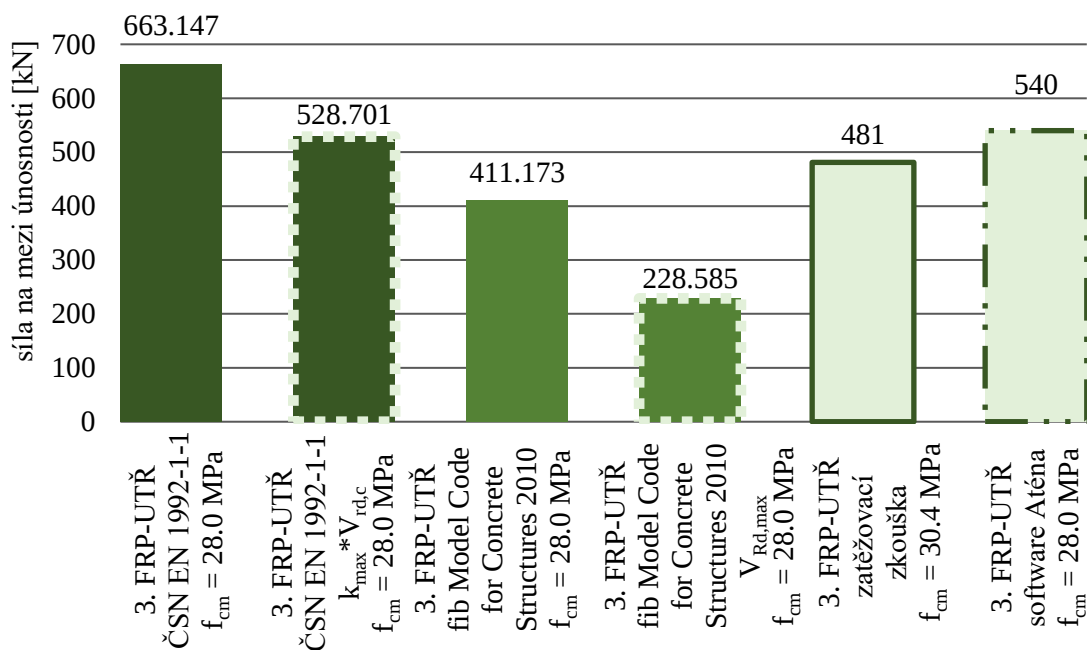


Obrázek 199: vzorek č. 2. FRP porovnání deformací skutečné zatěžovací zkoušky se softwarem Aténa

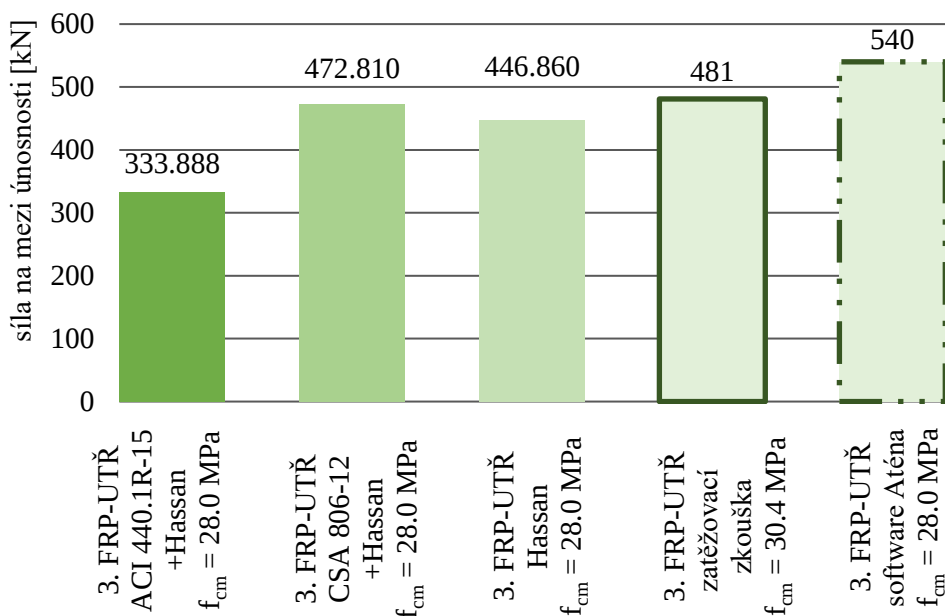
6.6.3 Vzorek č. 3. FRP-UTŘ

Tato varianta byla vyztužena stejnou podélnou výztuží jako vzorek č. 2. FRP. Navíc byla přidána smyková výztuž z GFRP třmínků tvaru „U“. Vyztužení vycházelo z předběžného návrhu z kapitoly 6.2.3. V předběžném návrhu byla použita upravená norma ČSN EN 1992-1-1 [7] pro návrh desek na protlačení vyztužených podélnou a smykovou GFRP výztuží. Obdobné úpravy byly provedeny pro návrhový přístup dle fib Model Code for Concrete Structures 2010 [10], který byl také použit v předběžném návrhu. Úpravy vychází z předpokládaného chování a tuhosti FRP výztuže, do vztahů bylo tak odhadnuto přetvoření v podélné a smykové FRP výztuži. Stávající návrhové přístupy (ACI 440.1R-15 [3], CSA 806-12 [4]) pro stanovení únosnosti v protlačení s FRP výztuží neuvažují se smykovou FRP výztuží. Pro stanovení únosnosti s vlivem smykové FRP výztuže tak byly použity vzorce upravené Hassanem a kol. z článků [8] a [9]. Na Obrázek 200 a Obrázek 201 jsou zobrazeny výsledky předběžného návrhu, nelineárního výpočtu pomocí software Aténa a únosnost skutečné zatěžovací zkoušky. Vzorek č. 3 FRP-UTŘ byl porušen při síle 481 kN. Porušený obvod byl ve vzdálenosti

2,9d – 4,1d od líce sloupu. K porušení došlo ve větší vzdálenosti, než jsou uvažovány základní kontrolované obvody v předběžném návrhu. Návrhový přístup [7], který stanovuje základní kontrolovaný obvod ve vzdálenosti 2d od líce sloupu stanovil 138 % únosnost skutečného vzorku. Při omezení vlivem rozdrčení tlačných vzpěr byla stanovena únosnost 110 % skutečného vzorku. Omezení únosnosti vlivem drčení betonových vzpěr lze předpokládat za správné. Výpočet pro stanovení celkové únosnosti by potřeboval upravit, případně smyková výztuž nefungovala dle předpokladů (nebylo dostatečné kotvení smykové výztuže). Po dosazení skutečných materiálových vlastností betonu, výztuže a jejího přetvoření by mohlo dojít k úpravám a upřesnění výsledků. Zbývající přístupy uvažují vzdálenost základního kontrolovaného obvodu od líce sloupu 0,5d. Přístup [10] stanovil 85 % únosnost skutečného vzorku. V případě omezení vlivem drčených vzpěr betonu byla stanovena 48 % únosnost skutečného vzorku. Byla získána dobrá shoda, ale je velmi rozdílná vzdálenost porušeného obvodu. Významný vliv na výpočet mělo stanovení pootočení, které bylo uvažováno dle I. úrovně. Po provedení experimentu by bylo možné dosadit skutečné pootočení vzorku č. 3. FRP-UTŘ, čímž by došlo dalšímu zpřesnění předběžného návrhu. V přístupech s úpravami dle Hassana [8] a [9] bylo nejvíce stanoveno 98 % skutečné únosnosti. Nově upravený vztah dle Hassana z článku [9] stanovil 93 % únosnost. Ze zjištěných výsledků lze konstatovat že vztahy uvedené Hassanem a kol. v [8] a [9] jsou korektní a dosáhly velmi blízké shody. Z porovnání napětí při únosnosti v protlačení na Obrázek 33 je vidět, že mezi návrhovými přístupy nebyly velké rozdíly. Síla při protlačení velmi závisí na vzdálenosti kontrolovaného obvodu od líce sloupu. Po zpřesnění materiálových vlastností betonu, výztuže by bylo možné stanovit přesnější hodnoty a případně provést úpravy jednotlivých přístupů. Pro popis přesného chování třmínků tvaru „U“ by bylo nutné provést další experimentální zkoušky a podrobněji sledovat chování smykové výztuže, především v kotevní oblasti.



Obrázek 200: vzorek č. 3. FRP-UTŘ porovnání výsledků předběžného návrhu dle [7] a [10], zatěžovací zkoušky a nelineární analýzy softwaru Aténa



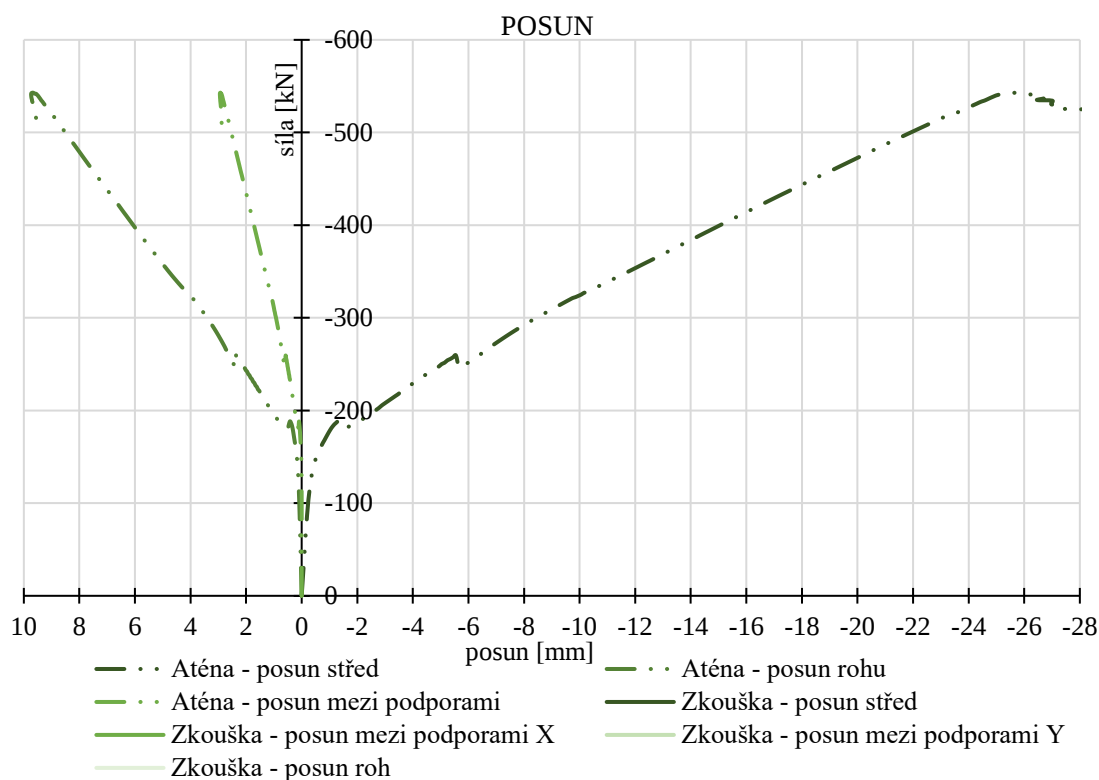
Obrázek 201: vzorek č. 3. FRP-UTŘ porovnání výsledků předběžného návrhu dle [8] a [9], zatěžovací zkoušky a nelineární analýzy softwaru Aténa

Na Obrázek 200 je vidět, že v předběžně vytvořeném modelu v softwaru Aténa došlo k porušení protlačení při síle 540 kN. Numerický model stanovil 112 % únosnost skutečného vzorku č. 3. FRP-UTŘ. Na Obrázek 202 jsou porovnány průběhy křivek vyjadřující závislost přírůstku síly na deformaci.

První trhliny na spodním povrchu betonové desky se v softwaru Aténa začaly vytvářet při síle 150 kN. V případě reálné zatěžovací zkoušky se začaly první trhliny na spodním povrchu desky tvořit při síle 100 kN. Po vzniku prvních trhlín docházelo k rozšiřování a vzniku nových trhlín. Únosnost začínala více záviset na smykové a podélné GFRP výztuži. Po dostatečném změkčení betonové desky začala únosnost záviset především na podélné a smykové GFRP výztuži. Tuto změnu je možné pozorovat jako změnu směrnice na Obrázek 202. V softwaru Aténa tato změna směrnice nastala při síle 180 kN, s průhybem ve středu desky 1,2 mm a roh byl nadzvednut o 0,4 mm. U reálné desky nastala tato změna směrnice při zatížení 150 kN. Průhyb v blízkosti středu desky byl 1,4 mm. Roh desky při změně směrnice nebyl nadzvedáván, k nadzvedávání rohu desky začalo docházet s rostoucím zatížením. Zpřesněním a použitím skutečných materiálových vlastností betonu z Tabulka 18 podélné výztuže z Tabulka 19 by mělo dojít k zpřesnění výsledků. Smyková GFRP výztuž by měla mít v softwaru stejné materiálové charakteristiky jako tomu bylo při reálném experimentu. Na přiblížení ke skutečnosti by mělo vliv zpřesnění kotevního napětí pro smykovou a podélnou GFRP výztuž.

Absence plastické větve pracovního diagramu měla za důsledek přímou směrnici až do porušení. S rostoucí silou docházelo k rozšiřování a vzniku nových trhlín, zvyšování přetvoření v podélné a smykové GFRP výztuži. V případě nelineárního modelu docházelo k nadzvedávání desky mezi podporami, u skutečného vzorku docházelo k průhybům v podobném místě. Porušení v reálném vzorku i modelu nastalo přímo pod roznášecí zatěžovací deskou. Předběžný model v softwaru Aténa selhal při síle 540 kN. Průhyb ve středu desky byl při porušení 26 mm a roh byl nadzvednut oproti nezatíženému stavu o 10 mm. Selhání reálné zatěžovací zkoušky nastalo při síle 481 kN s průhybem v blízkosti středu desky 19,5 mm. Roh byl při porušení nadzvednut o 5,8 mm. Ani v jednom z případů nebylo přetvoření na horním povrchu desky takové, aby došlo k vzniku trhlín vlivem drcení betonu. V obou případech nebylo přetvoření v podélné GFRP výztuži na takové úrovni, aby došlo k přetržení výztuže. Model v softwaru Aténa ukazoval maximální přetvoření GFRP smykové výztuže v místě kotvení, viz. Obrázek 71. Je možné, že v případě reálné zkoušky došlo k posunutí GFRP třmínků v kotevní oblasti již při zatěžování viz. Obrázek 173. V obou případech došlo ke shodnému porušení vlivem rozdrčení betonových vzpěr uvnitř průřezu.

Výsledné hodnoty a průběhy ukazující závislost přírůstku síly na deformaci lze konstatovat, že po upravení materiálových charakteristik a zpřesnění kotevního napětí pro podélnou a smykovou GFRP výztuž v modelu by výsledky pravděpodobně dosahovaly velmi blízké shody. Model lze považovat za správný.

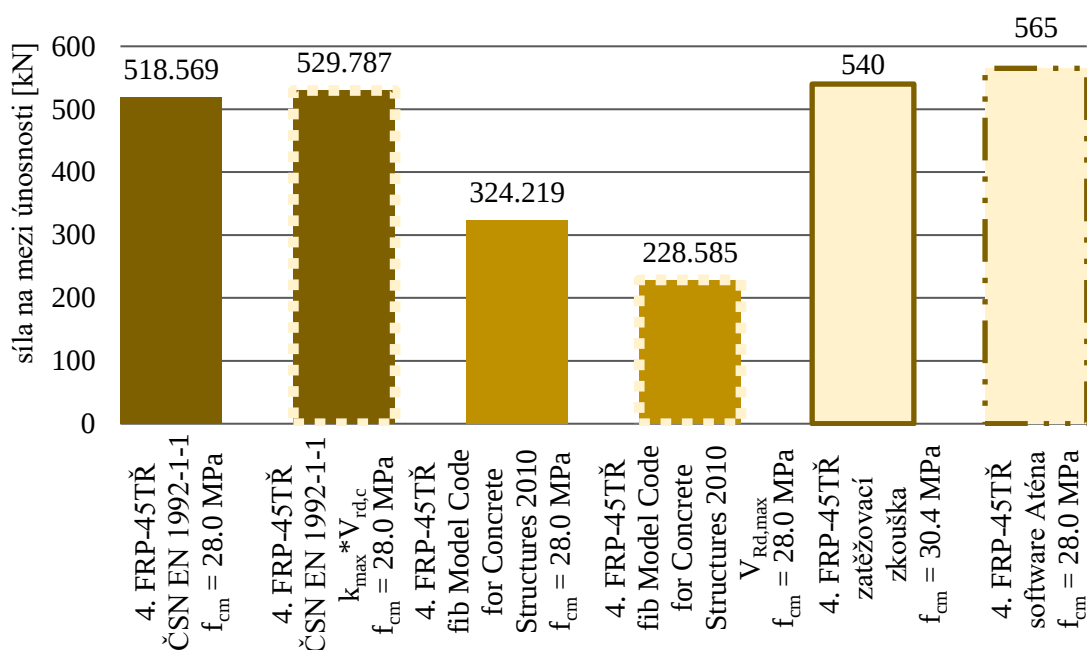


Obrázek 202: vzorek č. 3. FRP-UTŘ porovnání deformací skutečné zatěžovací zkoušky se softwarem Aténa

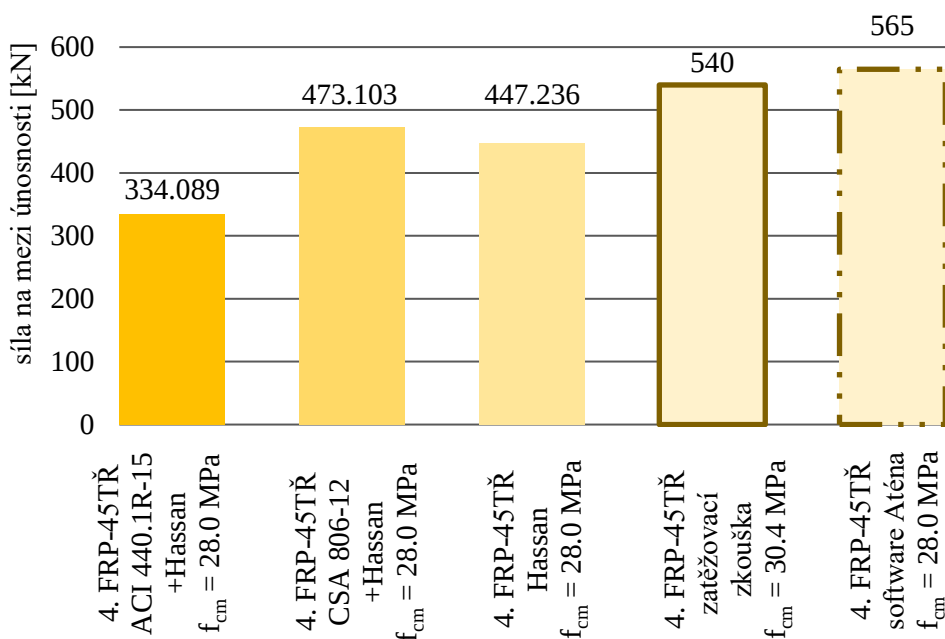
6.6.4 Vzorek č. 4. FRP-45TŘ

Tento vzorek tvořil alternativu k vzorku č. 3. FRP-UTŘ. Změna byla ve způsobu provedení smykové výztuže. Smykovou výztuž tvořil smykový kříž z GFRP třmínků, které byly pod úhlem 45° , viz. vyztužení v předběžném návrhu kapitola 6.2.4. V předběžném návrhu byla použita upravená norma ČSN EN 1992-1-1 [7] pro návrh desek na protlačení vyztužených podélnou a smykovou GFRP výztuží. Úpravy spočívaly v odhadnutí přetvoření v podélné a smykové FRP výztuži, tak aby byl do výpočtu zaveden vliv tuhosti a předpokládaného chování FRP výztuže. Dále byl použit fib Model Code for Concrete Structures 2010 [10], pro který musely být provedeny obdobné úpravy jako pro návrhový přístup [7]. Stávající návrhové přístupy (ACI 440.1R-15 [3], CSA 806-12 [4]) pro stanovení únosnosti v protlačení s FRP výztuží

neuvažují se smykovou FRP výztuží. Pro stanovení únosnosti s vlivem smykové FRP výztuže tak byly použity vzorce upravené Hassanem a kol. z článků [8] a [9]. Na Obrázek 203 a Obrázek 204 jsou zobrazeny výsledky předběžného návrhu, nelineárního výpočtu pomocí software Aténa a únosnost skutečné zatěžovací zkoušky. Vzorek č. 4 FRP-45TŘ byl při experimentu porušen při síle 540 kN. Porušený obvod byl ve vzdálenosti 3,5d – 4,7d od líce sloupu. K porušení došlo ve větší vzdálenosti, než jsou uvažovány základní kontrolované obvody v předběžném návrhu. Návrhový přístup [7] stanovil 96 % únosnost skutečného vzorku. Na tuto blízkou přesnost měla vliv vzdálenost kontrolovaného obvodu, s kterou návrhový přístup uvažuje. Jako jediný přístup [7] uvažuje se vzdáleností 2d od líce sloupu, ve zbývajících použitých přístupech v předběžném návrhu je tato vzdálenost uvažována jako 0,5d od líce sloupu. Po zpřesnění materiálových charakteristik by mělo dojít bližší shodě, případně by mohly být provedeny úpravy předběžného návrhu dle [7]. Přístup [10] stanovil 60 % únosnost skutečného vzorku. Při omezení vlivem drcených vzpěr betonu byla stanovena 42 % únosnost skutečného vzorku. V tomto případě je velmi rozdílná vzdálenost kontrolovaného obvodu se skutečným porušením. Významný vliv na výpočet mělo stanovení pootočení, které bylo uvažováno dle I. úrovně. Po provedení experimentu by bylo možné dosadit skutečné pootočení vzorku č. 4. FRP-45TŘ, čímž by došlo dalšímu zpřesnění předběžného návrhu. V přístupech s úpravami dle Hassana [8] a [9] bylo nejvíce stanoveno 88 % skutečné únosnosti. Nově upravený vztah dle Hassana z článku [9] stanovil 82 % únosnost. Z porovnání napětí při únosnosti v protlačení na Obrázek 37 je vidět, že mezi návrhovými přístupy nebyly velké rozdíly. Vztahy uvedené Hassanem a kol. z [8] a [9] lze považovat za korektní, ale je vhodné je upravit o vliv náklonu smykové výztuže. Síla při protlačení velmi závisí na vzdálenosti kontrolovaného obvodu od líce sloupu. Po zpřesnění materiálových vlastností betonu, GFRP výztuže by bylo možné stanovit přesnější hodnoty a případně provést úpravy jednotlivých přístupů.



Obrázek 203: vzorek č. 4. FRP-45TR porovnání výsledků předběžného návrhu dle [7] a [10], zatěžovací zkoušky a nelineární analýzy softwaru Aténa



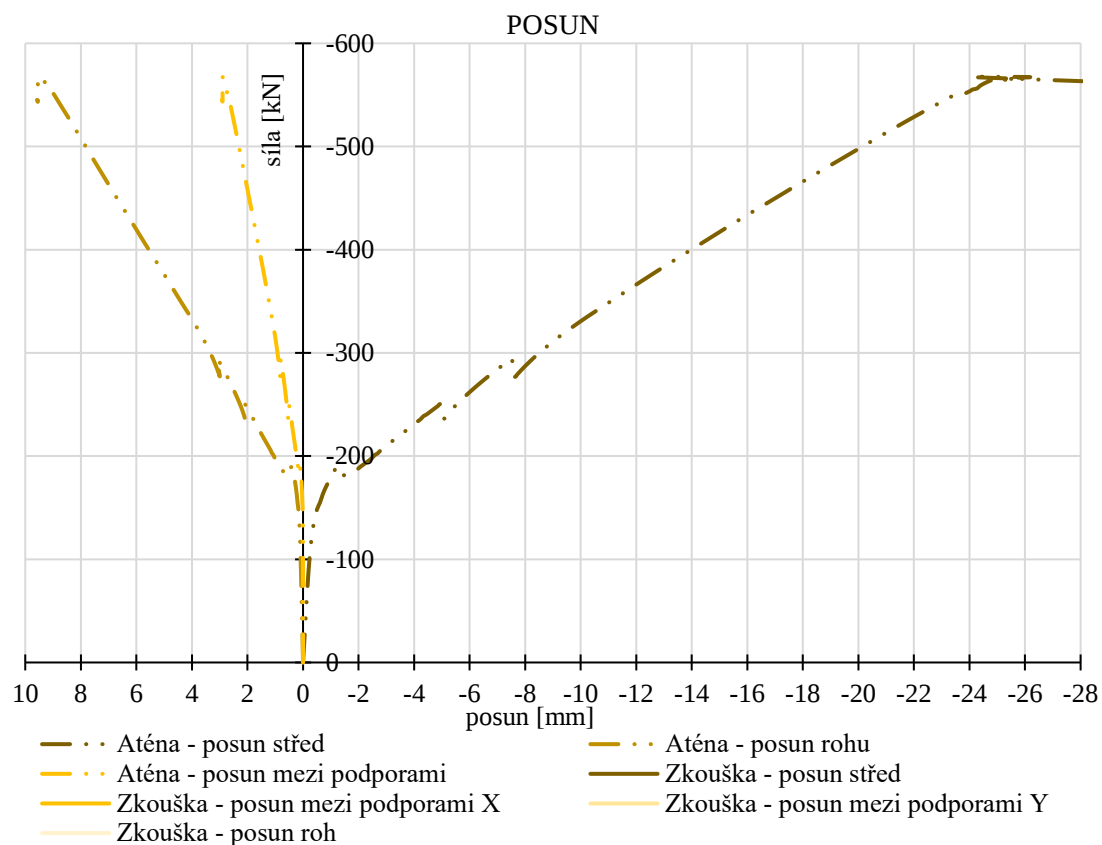
Obrázek 204: vzorek č. 4. FRP-45TR porovnání výsledků předběžného návrhu dle [8] a [9], zatěžovací zkoušky a nelineární analýzy softwaru Aténa

Předběžně vytvořený model v softwaru Aténa stanovil porušení protlačení při síle 565 kN, to odpovídá 105 % únosnosti skutečného vzorku. Na Obrázek 205 jsou srovnány průběhy deformací pro model v softwaru Aténa a reálnou zatěžovací zkoušku.

V případě modelu v softwaru Aténa se první trhliny na spodním povrchu desky začaly vytvářet při zatížení 150 kN. U reálně zatěžované desky se začaly první trhliny

na spodním povrchu tvořit při síle 100 kN. Po vzniku prvních trhlin docházelo k rozšiřování a vzniku nových trhlin. Únosnost začínala více záviset na smykové a podélné GFRP výztuži. Po dostatečném změkčení betonové desky začala únosnost záviset především na podélné a smykové GFRP výztuži. Tuto změnu je možné pozorovat jako změnu směrnice na Obrázek 205. U modelu v softwaru Aténa nastala tato změna směrnice při zatížení 180 kN. Svislá deformace ve středu desky byla 1,0 mm a roh byl oproti počátečnímu stavu nadzvednut o 0,4 mm. V případě reálné zatěžovací nastala změna směrnice při síle 200 kN, s deformací v blízkosti středu desky 3,7 mm. Roh desky nevykazoval žádné deformace. Zpřesněním materiálových vlastností betonu z Tabulka 18 a podélné GFRP výztuže z Tabulka 19 by mělo dojít k zpřesnění výsledků. Smyková GFRP výztuž by měla mít v softwaru stejné materiálové charakteristiky, jako tomu bylo při reálném experimentu. Na přiblížení ke skutečnosti by mělo vliv zpřesnění kotevního napětí pro smykovou a podélnou GFRP výztuž. Lineární pracovní diagram FRP výztuže má za důsledek přímou směrnici až do porušení. S rostoucím zatížením docházelo k vzniku a rozšiřování trhlin, zvyšování přetvoření v podélné a smykové FRP výztuži. U reálné zatěžovací desky docházelo po celou dobu zkoušky k průhybům mezi podporami, v případě modelu docházelo v podobném místě k nadzvedávání. V obou případech nedošlo ke vzniku trhlin na horním povrchu desky a porušení nastalo přímo pod zatěžovací deskou. Model v softwaru Aténa se porušil při síle 565 kN s průhybem ve středu desky 26 mm. Roh desky byl oproti počátečnímu stavu nadzvednut o 9,5 mm. Skutečný vzorek selhal při zatížení 540 kN. V blízkosti středu desky byla deformace při porušení 22,8 mm a roh byl oproti nezatíženému stavu nadzvednut o 7,7 mm. V obou případech nebylo přetvoření v podélné GFRP výztuži na takové úrovni, aby došlo k přetržení výztuže. Porušení pro oba případy bylo shodné, a to rozdrcení tlačných vzpěr uvnitř betonové desky. Na Obrázek 79 je vidět, že k maximálnímu přetvoření FRP třmínků v softwaru Aténa docházelo v přímých větvích FRP třmínku.

Výsledné hodnoty a průběhy ukazující závislost přírůstku síly na deformaci lze konstatovat, že bylo dosaženo velmi dobré shody mezi predikcí a reálnou zkouškou. Po upravení materiálových charakteristik a zpřesnění kotevního napětí pro podélnou a smykovou GFRP výztuž v modelu by došlo k další zvýšení přesnosti predikce.



Obrázek 205: vzorek č. 4. FRP-45TR porovnání deformací skutečné zatěžovací zkoušky se softwarem Aténa

7 Závěr

Předmětem této diplomové práce bylo řešení protlačení betonových desek vyztužených podélnou a smykovou FRP výztuží. Danou problematiku s podélnou kompozitní výztuží řeší malé množství návrhových přístupů. Vliv smykové FRP výztuže je předmětem zkoumání a nejsou uvedeny vztahy v žádných návrhových přístupech. Bylo nutné provést úpravy návrhových vztahů, které stanovují únosnost v protlačení s tradiční betonářskou výztuží tak, aby byl zaveden vliv FRP výztuže. Pomocí stávajících a upravených návrhových přístupů byly předběžně navrženy čtyři betonové desky s různým typem a způsobem vyztužení, viz. kapitola 6.2. Správnost použitých návrhových přístupů byla ověřena pomocí reálných zatěžovacích zkoušek. Pro předpokládané porušení skutečných vzorků byly provedeny nelineární výpočty v softwaru Aténa, kde byly vytvořeny modely simulující zatěžovací zkoušky viz. kapitola 6.3.

Vzorek č. 1. OCEL byl vyztužen podélnou tradiční betonářskou výztuží a ověřoval již existující návrhové přístupy dle ČSN EN 1992-1-1 [7] a fib Model Code for Concrete Structures 2010 [10]. V kapitole 6.6.1 bylo provedeno porovnání návrhových přístupů, nelineárního výpočtu a skutečné zatěžovací zkoušky. Stanovená únosnost v předběžném návrhu je závislá na vzdálenosti kontrolovaného obvodu pro daný přístup. Návrhový přístup [7] stanovuje vzdálenost kontrolovaného ve vzdálenosti $2d$ od líce sloupu, v případě přístupu dle [10] je tato vzdálenost $0,5d$. Porušený obvod v případě reálného vzorku byl ve vzdálenosti $2,9d - 3,5d$. Dle přístupu [7] bylo dosaženo bližší shody se skutečným porušením 71 %. Po dosazení skutečných materiálových vlastností z kapitoly 6.5.7 by mělo dojít k větší přesnosti výsledků předběžného návrhu. V softwaru Aténa byl proveden nelineární výpočet pro daný vzorek, který stanovil 92 % únosnost skutečného vzorku. Lze předpokládat, že pro stanovení únosnosti s ocelovou výztuží byl předpoklad provedený v softwaru Aténa správný. Po dosazení skutečných materiálových charakteristik by mělo dojít k bližší shodě mezi modelem a skutečným vzorkem. Další zkoumání by bylo zaměřeno na bližší rozbor jednotlivých návrhových přístupů a především na úhel smykové trhliny a s tím související vzdálenost kontrolovaného obvodu.

Vzorek č. 2. FRP měl stejnou plochu výztuže jako vzorek č. 1. OCEL, ale výztuž byla provedena z GFRP. Bylo možné sledovat rozdílné chování v závislosti na typu výztuže. Pro tento vzorek musely být návrhové přístupy ČSN EN 1992-1-1 [7] a fib Model Code for Concrete Structures 2010 [10] upraveny, tak aby byly zohledněny rozdílné vlastnosti FRP výztuže. Do vzorců vstupovalo odhadnuté přetvoření FRP výztuže. V předběžném návrhu byly použity existující přístupy, které stanovují únosnost v protlačení s podélnou FRP výztuží (ACI 440.1R-15 [3] a CSA 806-12 [4]). Stejně jako v předchozím vzorku únosnost předběžných návrhu závisela na vzdálenosti kontrolovaného obvodu. Návrhový přístup [7] jako jediný uvažuje vzdálenost $2d$ od líce sloupu, ve zbývajících přístupech je tato vzdálenost $0,5d$. Skutečný porušený obvod byl ve vzdálenosti $2,9d - 3,7d$. Nejvyšší shody (84 %) dosáhl přístup [7]. Úpravy pro stanovení únosnosti v protlačení s podélnou kompozitní výztuží lze v tomto přístupu považovat za správné. Pro zpřesnění výsledků by bylo možné dosadit do vztahů skutečné materiálové charakteristiky. Pro další zkoumání by bylo možné z provedených zkoušek přesně stanovit bezpečné přetvoření v podélné výztuži, které má významný vliv v upravených vztazích. Software Aténa stanovil 113 % únosnost skutečného vzorku. Po zpřesnění materiálových charakteristik lze předpokládat vyšší shodu. Srovnání předběžného návrhu, nelineárního výpočtu a skutečné zatěžovací zkoušky je popsáno v kapitole 6.6.4. Vzorek s podélnou GFRP výztuží dosáhl 69 % únosnosti vzorku s ocelovou výztuží viz. kapitola 6.5.6. Při porušení měl o 7 mm větší průhyb v blízkosti středu desky. Pokles únosnosti není tak rozdílný, jak lze předpokládat z efektivního mechanického stupně vyztužení viz. Obrázek 41. Typ výztuže má vliv na únosnost a tuhost betonové desky v protlačení.

Vzorek č. 3. FRP-UTŘ zjišťoval vliv přidání smykové GFRP výztuže. Podélná výztuž byla stejná jako ve vzorku č. 2. FRP. Smykovou výztuž tvořily dodatečně nasunutě třmínky tvaru „U“, které svíraly úhel se střednicí desky 90° viz. kapitola 6.2.3. Pro možnost dodatečného nasunutí musely být odříznuty přečnívající větve třmínků a došlo tak ke zkrácení kotevní délky. Pro stanovení únosnosti v protlačení se smykovou FRP výztuží byly upraveny vztahy vycházející z ČSN EN 1992-1-1 [7] a fib Model Code for Concrete Structures 2010 [10]. Existující přístupy ACI 440.1R-15 [3] a CSA 806-12 [4] uvažují pouze s podélnou FRP výztuží a byly tak použity jejich úpravy Hassanem a kol. z článků [8] a [9]. Jediný návrhový přístup [7] stanovuje vzdálenost

základního kontrolovaného obvodu od líce sloupu 2d. Ve zbývajících přístupech je uvažována vzdálenost 0,5d. U experimentu byla vzdálenost porušeného obvodu 2,9d – 4,1d. Návrhové přístupy [7] a [10] mají omezující podmínku, která zohledňuje vliv drcení betonových vzpěr. Vzhledem k porušení reálného vzorku lze tuto podmínku předpokládat za správnou. Návrhový přístup [7] stanovil vyšší únosnost, než bylo dosaženo při zatěžovací zkoušce. Vyšší únosnost předpokládal model v softwaru Aténa. Při zkoumání porušeného vzorku byla zjištěna změna polohy v kotevní oblasti GFRP třmínků a některé třmínky byly porušeny v místě ohybů viz. kapitola 6.5.4. Nelze jednoznačně tvrdit, zda k tomu došlo v průběhu zatěžovací zkoušky nebo při dodatečném přetížení. Z polohy maximálního přetvoření v GFRP třmínkách v nelineárním modelu (kapitola 6.3.4) je možné, že upravené třmínky měly krátkou kotevní délku. Pro zpřesnění modelu v softwaru Aténa by musely být upraveny materiálové charakteristiky a kotevní napětí pro smykovou a podélnou GFRP výztuž. Pro optimalizaci vzorců v předběžném návrhu by bylo vhodné provést experiment na protlačení s GFRP třmínky bez úpravy v kotevní oblasti. Vložení třmínků mělo příznivý vliv na únosnost v protlačení oproti vzorku č. 2. FPR. Došlo zvětšení vzdálenosti porušeného obvodu a zvýšení únosnosti o 12 % viz. kapitola 6.5.6. Návrhové přístupy [7] a [10] správně předpokládají další kontrolované obvody ve větší vzdálenosti od líce sloupu při použití smykové výztuže. Návrhové přístupy dle Hassana a kol. z článků [8] a [9] lze považovat za korektní a dosáhly velmi dobré shody.

Vzorek č. 4. FRP-45TŘ tvořil alternativu k předcházejícímu vzorku, bylo možné sledovat vliv náklonu GFRP třmínků. Byl vytvořen smykový kříž z třmínků pod úhlem 45° se střednicí desky viz. kapitola 6.2.4. U třmínků nebyly provedené žádné úpravy v kotevní oblasti. V předběžném návrhu byly použity stejné návrhové přístupy jako pro vzorek č. 3. FRP-UTŘ. Návrhové přístupy ČSN EN 1992-1-1 [7] a fib Model Code for Concrete Structures 2010 [10] jako jediné zahrnují do výpočtu vliv náklonu smykové výztuže. Náklon výztuže má ve výpočetních vztazích negativní vliv na konečnou únosnost proti protlačení. Nejbližší shody (96 %) se skutečným porušením stanovil vztah dle [7]. V tomto případě omezení drcením betonu stanovilo vyšší hodnotu (98 %) viz. kapitola 6.6.4. Porušený obvod při experimentu byl ve vzdálenosti 3,5d – 4,7d od líce „sloupu“. Došlo k zvětšení vzdálenosti kontrolovaného obvodu, a lze předpokládat že tato poloha smykové výztuže zajišťovala lepší funkci než u předchozího vzorku.

Únosnost v porovnání se vzorkem č. 2. FRP byla zvýšena o 26 %. Předběžný nelineární model určil 104 % únosnost experimentálního vzorku. Dle modelu v softwaru Aténa bylo maximální přetvoření smykové výztuže dosaženo v přímé větvi GFRP třmínků a nebyla tak namáhána oblast ohybů viz. kapitola 6.3.5. Po upravení materiálových charakteristik a zpřesnění kotevního napětí pro podélnou a smykovou GFRP výztuž by model v softwaru Aténa dosahoval vyšší shody se skutečnou zkouškou. Bylo by vhodné provést další experimenty s nakloněnou smykovou GFRP výztuží a zavést vliv náklonu smykové výztuže do vztahů od Hassana a kol. ([8] a [9]), které i přes to stanovily velmi dobrou shodu a lze je považovat za správné.

8 Seznam použitých zdrojů

- [1] VAŠÁTKO, David. *Využití kompozitních materiálů při návrhu betonových konstrukcí*. Brno, 2020, 62 s., 92 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav betonových a zděných konstrukcí. Vedoucí práce Ing. František Girgle, Ph.D.
- [2] JANUŠ O., MATUŠÍKOVÁ A. a ŠTĚPÁNEK P.: NAVRHOVÁNÍ BETONOVÝCH PRVKŮ VYZTUŽENÝCH KOMPOZITNÍ VÝZTUŽÍ – NÁVRH NA OHYB. *Beton TKS* [online]. 2017, **2017**(3), 54-59. Dostupné z: http://www.betontks.cz/sites/default/files/2017-3-54_0.pdf
- [3] ACI 440.1R-15: *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars*. American Concrete Institute, 2015. ISBN: 978-1-942727-10-1.
- [4] CSA S806-12: *Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers*. Canadian Standards Association, 2012. ISBN 978-1-55491-931-4.
- [5] 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.
- [6] BÁRTOVÁ, Denisa. *Využití moderních kompozitních materiálů při návrhu betonových konstrukcí*. Brno, 2020, 63 s., 170 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav betonových a zděných konstrukcí. Vedoucí práce Ing. František Girgle, Ph.D.
- [7] ČSN EN 1992-1-1 (731201): *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Ed.2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [8] E. SALAMA, Ahmed, Mahoamed HASSAN a Brahim BENMOKRANE. Effectiveness of Glass Fiber-Reinforced Polymer Stirrups as Shear Reinforcement in Glass Fiber-Reinforced Polymer- Reinforced Concrete Edge Slab-Column Connections. *ACI Structural Journal*. 2019, **2019**(5), 97-112. Dostupné z:

doi:10.14359/51716757

- [9] E. SALAMA, Ahmed, Mohamed HASSAN a Brahim BENMOKRANE. Effect of GFRP Shear Stirrups on Strength of Two-Way GFRP RC Edge Slabs: Experimental and Finite-Element Investigations. *American Society of Civil Engineers*. 2020, **2020**(2), 04020056-1-16. Dostupné z: doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002593
- [10] Fib Model Code for Concrete Structures 2010. fédération internationale du béton/International Federation for Structural Concrete (fib), 2013. ISBN: 978-3-433-03061-5.
- [11] SMEJKAL, Jiří, Jaroslav PROCHÁZKA a Hana HANZLOVÁ.: NAVRHOVÁNÍ NA MEZNÍ STAV PORUŠENÍ PROTlačNÍM - ČÁST I. *Beton TKS* [online]. 2011, **2011**(5), 66-72. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/clanky/2011-5-66-navrhovani-na-mezni-stav-poruseni-protlacenim-cast-i/>
- [12] *DEHA SYSTÉM PŘEPRAVNÍCH ÚCHYTŮ S KULOVOU HLAVOU: Informace o výrobku* [online]. 10/08n. Dostupné z: https://downloads.halfen.com/catalogues/cz/media/catalogues/reinforcementsystems/KKT08_CZ.pdf
- [13] MARTIN, Fusek a Radim HALAMA. *MPK a MHP* [online]. Ostrava, 2011 Dostupné z: https://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/metoda_konecných_prvku_a_hranic_nich_prvku.pdf. Matematika pro inženýry 21. století. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava a Západočeská univerzita v Plzni.
- [14] ČERVENKA, Vladimír, Libor JENDELE a Jan ČERVENKA. *ATENA Program Documentation: Part 1 Theory*. Praha, 2020. Dostupné také z: https://www.cervenka.cz/assets/files/atena-pdf/ATENA_Theory.pdf

9 Seznam příloh

P1. POUŽITÉ PODKLADY

01 – VÝKRES 1. NP	M 1:75	4xA4
02 – VÝKRES 2. NP	M 1:75	4xA4
03 – VÝKRES 3. NP	M 1:75	4xA4
04 – ŘEZY A-A; B-B	M 1:75	4xA4

P2. STATICKÝ VÝPOČET

P2.1. TECHNICKÁ ZPRÁVA

P2.2. STATICKÝ VÝPOČET

P3. VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE

01 – VZOREK č. 1. OCEL – VÝZTUŽ, TVAR	M 1:10	6xA4
02 – VZOREK č. 2. FRP – VÝZTUŽ, TVAR	M 1:10	6xA4
03 – VZOREK č. 3. FRP-UTŘ – VÝZTUŽ, TVAR	M 1:10	6xA4
04 – VZOREK č. 4. FRP-45TŘ – VÝZTUŽ, TVAR	M 1:10	6xA4
05 – VÝKRES TVARU	M 1:50	6xA4
06 – VÝKRES VÝZTUŽE SPODNÍHO POVRCHU	M 1:50; 1:25	6xA4
07 – VÝKRES VÝZTUŽE HORNÍHO POVRCHU	M 1:50; 1:25	6xA4