



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra betonových a zděných konstrukcí

Kotevní oblasti v UHPC

Anchorage in UHPC

DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. Jan Prchal

Doktorský studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

Školitel: doc. Ing. Lukáš Vráblík, Ph.D., FEng.

Praha, 2024

PROHLÁŠENÍ

Jméno doktoranda: Jan Prchal


Název disertační práce: Kotevní oblasti v UHPC

Prohlašuji, že jsem uvedenou disertační práci vypracoval/a samostatně pod vedením školitele doc. Ing. Lukáše Vráblíka, Ph.D., FEng.

Použitou literaturu a další materiály uvádím v seznamu použité literatury.

Disertační práce vznikla v souvislosti s řešením projektu: SGS22/038/OHK1/1T/11, SGS23/039/OHK1/1T/11, CK02000329 a CZ.01.1.02/0.0/0.0/16_045/0010595.

V Praze dne 31.3.2024



podpis

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval svému školiteli Lukáši Vráblíkovi za dlouholetou podporu, všestrannou pomoc při práci na disertačním tématu, a především za příležitost studovat. Moc děkuji kolegům Davidu Čítkovi, Karlu Hurtigovi a Martinu Holečkovi z Kloknerova ústavu ČVUT za úsilí při četných experimentech a za množství entusiasmů při jejich práci. Veliké díky patří kolegovi Janu Markovi ze společnosti KŠ PREFA s.r.o. za významnou podporu ve věcech týkajících se UHPC a neutuchající kritický pohled na věc. Sluší se poděkovat kolegům z KŠ PREFA s.r.o. za přípravu všech zkušebních vzorků pro experimenty, stejně jako společnosti PREMIX servis, spol. s r.o. za poskytnutí materiálu pro přípravu zkušebních vzorků.

Disertační práci by nebylo možné dokončit bez mé manželky Evy, které děkuji za nezměrnou podporu, kritické myšlení a ochotu. Děkuji našim synům Václavovi, Jaroslavovi, Stanislavovi a Rudolfovi za velkou dávku inspirace.

Anotace

Vývoji a praktickému uplatnění materiálu UHPC je stále věnováno velké množství pozornosti. Kotvení v tomto moderním kompozitním materiálu představuje důležitou součást komplexní problematiky navrhování a realizace prefabrikovaných konstrukcí z UHPC. Práce se zaměřuje na vlastnosti kotvení v prvcích z materiálu UHPC. Cílem práce je provedení experimentálního výzkumu kotevních oblastí, pomocí kterého budou blíže popsány možnosti kotvení v UHPC.

Bylo provedeno téměř 250 experimentálních zkoušek, pomocí kterých byla zkoumána problematika kotevních oblastí a kotvení v UHPC obecně. Praktickému ověřování předcházelo podrobné studium současného stavu řešené problematiky, které představovalo zkoumání stávajících přístupů k navrhování a hodnocení kotvení, které byly následně konfrontovány s materiálem UHPC co do základních principů, vlastností a výrobních a technologických postupů.

Byly provedeny tři experimentální programy zaměřené na vlastnosti, které významnou měrou ovlivňují kotvení v UHPC. Zkoušky tenkých desek s kotevními šrouby, pomocí kterých lze popsat parametry kotvení (typ a tvar kotevních přípravků, směr působícího zatížení, počet kotevních přípravků). Zkoušky kotevních oblastí se zaměřením na sledování vlivu rozdílného množství drátků v_r , efektivní hloubky zapaštění kotevních prostředků h_{ef} a polohy kotevního prostředku vzhledem ke směru betonáže na výsledné vlastnosti kotevních oblastí. Ověření kotevních oblastí prvku se skutečnými okrajovými podmínkami, jako reálné dimenze konstrukce, vyztužení běžnou výztuží a technologie výroby. Výsledkem analýz jsou početní vztahy pro výpočet únosnosti kotvení zahrnující různé vlivy související s UHPC.

Při zkoušení byl kladen důraz na uplatnění výsledků a jejich přesahy do praktického navrhování a provádění. Experimenty vychází z použití předem zabudovaných kotevních přípravků variantního provedení pro prefabrikované prvky.

Klíčová slova

UHPC, UHPFRC, kotevní oblast, kotva, prefabrikace, vlákna, únosnost, betonový kužel

Abstract

More and more attention is being paid to the development and practical application of UHPC material. Anchorage in this modern composite material is an important part of the complex issue of the design and implementation of prefabricated structures made of UHPC. This thesis focuses on anchorage properties in UHPC elements. The aim of the thesis is to carry out experimental research on anchorage and therefore further describe the possibilities of anchoring in UHPC.

Nearly 250 experimental tests have been carried out to investigate the problems of anchorage areas and anchorage in UHPC in general. Practical verification was preceded by a detailed study of the current state of the field and consisted of an investigation of existing approaches to designing and evaluating anchorages, which were then analyzed side by side with UHPC material in terms of basic principles and properties, as well as manufacturing and technological procedures.

Three experimental programs were carried out focusing on properties that significantly affect anchorage in UHPC. These properties were: thin plates with anchor bolts, which can be used to describe anchorage parameters (the type and shape of anchors, direction of applied load, the number of anchors); anchorage areas, focusing on monitoring the effect of different amounts of fibers v_f , the effective depth of embedment of anchors h_{ef} and the position of the anchor relative to the direction of concreting on the resulting properties; the anchorage of an element with real boundary conditions, such as the realistic dimensions of the structure, reinforced with conventional reinforcement and fabrication technology. The analysis shows numerical relationships for calculating anchorage capacity while incorporating various UHPC related effects.

Testing emphasized the application of the results and their transfer to practical design and implementation. The experiments are based on the use of cast-in anchors for precast elements.

Keywords

UHPC, UHPFRC, anchorage, anchor, prefabrication, fibers, load capacity, concrete cone

Obsah

Poznámky k terminologii.....	8
Seznam zkratk a symbolů	10
1. Úvod.....	12
1.1. Cíle disertační práce	13
1.2. Členění práce.....	14
2. Rešeršní část: současný stav řešené problematiky	15
2.1. UHPC jako materiál.....	15
2.1.1. Historie a vývoj	15
2.1.2. Složení a hlavní principy návrhu receptury	15
2.1.3. Technologie výroby UHPC	18
2.1.4. Mechanické vlastnosti UHPC ovlivňující kotvení	19
2.1.5. Vlastnosti konstrukcí z UHPC.....	24
2.2. Kotvení v betonových konstrukcích	27
2.2.1. Obecně.....	27
2.2.2. Princip porušení	28
2.2.3. Běžný beton (NC).....	30
2.2.4. Tvar a velikost kotevního prostředku	33
2.2.5. Vysokopevnostní beton (HSC)	35
2.2.6. Vláknobeton (FRC a HPFRC).....	36
2.2.7. UHPFRC	39
2.2.8. Kotvení v předpjatém betonu	44
2.2.9. Normy a předpisy	45
2.3. Shrnutí	46
3. Experimentální část.....	48
3.1. Zkoušky kotvení v tenkých deskách z HPFRC	49
3.1.1. Materiálové vlastnosti	50
3.1.2. Prostý tah, jedna kotva	52
3.1.3. Prostý tah, dvojice kotev.....	59
3.1.4. Smyk, jedna kotva	62
3.1.5. Smyk, dvojice kotev	64
3.1.6. Kombinované namáhání (N+V), dvojice kotev	67
3.1.7. Shrnutí zkoušek kotvení v tenkých deskách z HPFRC	72
3.2. Tahové zkoušky kotevních oblastí v UHPFRC	74
3.2.1. Zkušební vzorky	75

3.2.2. Uspořádání a průběh zkoušení	80
3.2.3. Výsledky zkoušek	82
3.2.4. Vliv dílčích parametrů na vlastnosti kotevních oblastí	89
3.2.5. Zobecnění výsledků.....	102
3.2.6. Shrnutí zkoušek kotevních oblastí v UHPFRC	108
3.3. Zkoušení kotvení v nosnících z UHPFRC.....	109
3.3.1. Zkušební vzorky	110
3.3.2. Uspořádání a průběh zkoušek	115
3.3.3. Výsledky zkoušek	117
3.3.4. Zhodnocení výsledků.....	121
3.3.5. Shrnutí zkoušek kotvení v nosnících.....	124
4. Závěr	126
4.1. Shrnutí výzkumu a dosažených výsledků	126
4.1.1. Zkoušky kotvení v tenkých deskách z HPFRC.....	126
4.1.2. Tahové zkoušky kotevních oblastí v UHPFRC	127
4.1.3. Zkoušení kotvení v nosnících z UHPFRC	127
4.2. Přínos výsledků pro vědní obor a stavební praxi	127
4.3. Zaměření dalšího výzkumu	128
5. Seznam literatury.....	129
5.1. Normy, předpisy a návrhová doporučení	129
5.2. Články, publikace a akademické práce	131
5.3. Další zdroje	137
5.4. Vlastní zdroje vztahující se k této práci.....	138
Seznam souvisejících projektů	139
Seznam ilustrací	140
Seznam tabulek.....	144
Přílohy	146

Poznámky k terminologii

Existují termíny a označení, které jsou v oboru betonového stavitelství zažitá a které není třeba podrobněji vysvětlovat. Moderní cementové kompozity mají ve stavební praxi své místo, avšak jsou poměrně mladými materiály a používaná terminologie je mnohdy nejednotná a často vede k nepřesnému nebo zavádějícímu vyjadřování. Proto považuji za potřebné nastínit na tomto místě moje chápání a užívání vybraných termínů a zasadit je do kontextu obvykle používané terminologie ve stavebnictví.

NC = běžný beton (normal concrete), takto v tomto textu označuji širokou škálu betonů běžně používaných ve stavební praxi.

HPC = vysokohodnotný beton (high performance concrete), materiál, který svými vlastnostmi překonává běžný beton. Většinou se jedná o beton s vodním součinitelem (w/c) nižším než 0,4. [35]

HSC = vysokopevnostní beton (high strength concrete) je beton s vysokou pevností v tlaku, dle ČSN 206-1 se jedná o betony pevnostní třídy C 50/60 a vyšší. HSC je podmnožinou *vysokohodnotných betonů*.

FRC = beton vyztužený vlákny nebo také *vláknobeton (fiber-reinforced concrete)*, je obecné označení betonu s všesměrně orientovanou výztuží ve formě vláken, která jsou přidávána do kompozitu pro zajištění vyšší integrity materiálu. Více o výztužných vláknech a vůbec o FRC je uvedeno v části 2.2.6.

UHPC = Ultra vysokohodnotný beton je cementový kompozit, který se od běžného betonu odlišuje nižším vodním součinitelem, absencí hrubého kameniva, přítomností řady příměsí, superplastifikátorů a výztužných mikrovláken. Vyniká vysokými hodnotami mechanických a fyzikálních parametrů.

UHPFRC = Ultra vysokohodnotný beton vyztužený vlákny je obecně používané označení pro UHPC, jehož matrice je vyztužena mikrovláknem, které dodávají UHPC potřebnou duktilitu. Protože většina aplikací UHPC vyztužení pomocí mikrovláken využívá, jedná se přesnější označení, ale nikoli více běžné.

Označení UHPC a UHPFRC vychází z angličtiny, přičemž panuje značná nejednotnost v označování materiálu již v tomto jazyce. Lze se setkat s určitými odlišnostmi při označování materiálu, a to *Ultra-High Performance Concrete*, *Ultra High-Performance Concrete* a dokonce *Ultra-High-Performance Concrete*. Stejně tak se lze setkat s nejednoznačnostmi ve tvaru *Fiber Reinforced* a též *Fiber-Reinforced* apod.¹

R-UHPFRC = Vyztužený Ultra vysokohodnotný beton vyztužený vlákny, jedná se o podrobné označení materiálu s vyztužením ve formě běžné či předpínací výztuže.²

Kotevní oblast je část konstrukce nebo konstrukčního prvku, ve kterém je zabudována kotva zprostředkávající přenos zatížení.³

¹ Podrobnější rozbor tohoto problému je zcela nad rámec této práce, nicméně bych chtěl poukázat na fakt, že i napříč celosvětovou komunitou zabývající se problematikou UHPC panuje neshoda v pojmenovávání tohoto kompozitu.

² Označení *R-UHPFRC* je používáno a vůbec zmiňováno proto, že lze navrhovat specifické konstrukční prvky, které jsou zcela bez běžné výztuže a potřebné tahové odolnosti je dosaženo využitím rozptýlené mikrovýztuže (podrobněji v 2.1.2). Potom může vzniknout potřeba jednotlivé způsoby vyztužení odlišit.

³ V rámci této práce tímto nejsou přímo myšleny kotevní oblasti v předpínaných betonových konstrukcích, kterým však definice odpovídá také.

Efektivní (kotevní) délka, někdy též *hloubka* je rozměr kotevního přípravku, který zajišťuje účinný přenos zatížení do kotevní oblasti konstrukce.⁴

Kotvení je chápáno jako označení systému, který zajišťuje přenos vnějšího zatížení do betonového (nebo jiného) konstrukčního prvku, a který obsahuje především kotevní oblast, kotevní prostředek (ať již se o systémovou kotvu, spojovací prostředek nebo vložený ocelový prvek) a další součásti umístěné vně konstrukčního prvku, které se mohou lišit podle využití kotvení.

⁴ Až na výjimky se označení *kotevní délka* (resp. *hloubka*) v této práci vztahuje ke kotevním prostředkům zabudovaným v betonu. V případech, kde se jedná o kotevní délky výztuže, je to výslovně uvedeno.

Seznam zkratk a symbolů

Ačkoli jsou používané zkratky ve většině případů vysvětlovány přímo v textu, zde je pro přehlednost uveden výčet alespoň těch nejfrekventovanějších.

a	exponent sloužící pro zohlednění okrajových podmínek při posuzování interakce sil působících na kotvení
A_h	plocha hlavy kotevního šroubu [mm ²]
A_s	plocha ocelového průřezu [mm ²]
c_{nom}	nominální velikost krycí vrstvy výztuže [mm]
d_f	průměr výztužného vlákna [mm]
d_h	průměr hlavy kotevního prostředku [mm]
d_s	průměr tyčového kotevního prostředku [mm]
E_{cm}	střední hodnota modulu pružnosti betonu v tlaku [Pa]
f_{ck}	charakteristická hodnota pevnosti betonu v tlaku [Pa]
f_{cm}	průměrná hodnota pevnosti betonu v tlaku [Pa]
$f_{ct,L,f}$	pevnost betonu v tahu za ohybu odpovídající rozevření trhliny 0,05 mm [Pa]
$f_{ct,sp}$	pevnost betonu v příčném tahu [Pa]
f_{ctk}	charakteristická hodnota pevnosti betonu v tahu [Pa]
$f_{ctk,f}$	charakteristická pevnost betonu v tahu za ohybu [Pa]
$f_{ctm,f}$	průměrná pevnost betonu v tahu za ohybu [Pa]
f_{Ftud}	návrhová zbytková pevnost UHPC v tahu v MSÚ [Pa]
f_{Rim}	průměrná zbytková pevnost betonu v tahu za ohybu odpovídající příslušnému rozevření vrubu CMOD [Pa]
$F_{u,m}$	střední hodnota únosnosti betonového kuželu [N]
h_{ef}	efektivní hloubka kotvení [mm]
$K_{0,3,m}$	průměrná tuhost kotevní oblasti, která vyjadřuje charakteristiku spočtenou z průběhu zkoušky v prostém tahu v rozsahu do 30 % únosnosti kotevní oblasti. Na této úrovni se stále uvažuje s lineární závislostí mezi zatížením a deformací. [N/m]
k_F	součinitel zohledňující vliv okrajových podmínek na orientaci vláken [-]
L_f	délka výztužného vlákna [mm]
l_m	dosah betonového kuželu, jedná se o vzdálenost na porušeném povrchu betonu mezi kotevním prostředkem a místem, kam dosahuje vytržená část kotevní oblasti – betonového kuželu. Průměrná hodnota z jedné kotevní oblasti. [mm]
S_x	směrodatná odchylka experimentálně ověřovaného souboru vzorků
V_f	objemové zastoupení vláken ve směsi, dané procento objemu směsi je tvořeno výztužnými vlákny [%]
V_x	variační koeficient

α	úhel betonového kuželu, který svírá přímka podél vytrženého betonového kuželu s vodorovnou rovinou, respektive s rovinou kolmou na směr zatěžování; také úhel roznosu zatížení [°]
β	úhel působícího zatížení na kotevní prostředek měřený vzhledem k ploše s kotevním prostředkem [°]
$\beta_{cc}(t)$	součinitel zohledňující vliv stárí materiálu na pevnost
μ	součinitel tažnosti (také ductility index) charakterizuje schopnost kotevní oblasti (v post kritické fázi působení) odolávat větším deformacím bez náhlého poklesu síly. Index tažnosti μ je veličina vypočtená z každého pracovního diagramu kotevní oblasti. [-]
ρ	objemová hmotnost materiálu [kg/m ³]
CCD	Concrete Capacity Design
et al.	a další
kol.	kolektiv
MSP	mezní stav použitelnosti
MSÚ	mezní stav únosnosti
obr.	obrázek
PVA	polyvinyl alkohol (Polyvinylalcohol)
SCC	samozhutnitelný beton, z angl. <i>Self-compacting Concrete</i> (případně <i>Self-consolidating concrete</i>)
SF	ocelová vlákna, z angl. <i>steel fibers</i>
tab.	tabulka
vč.	včetně
VTD	výrobní technická dokumentace

1. Úvod

Ačkoliv je mnohdy označován jako beton a zařazován mezi beton, v mnoha ohledech se od betonu odlišuje do takové míry, že je nejednou prohlášen za komposit, což zvláště v angličtině nepůsobí žádné újmy na jeho zkráceném označení. Je to UHPC – materiál, který se svými vlastnostmi vymyká běžné betonářské praxi. Mechanické vlastnosti kompositu v kombinaci s odolností vůči různým agresivním vlivům ho předurčují k použití pro extrémně namáhané konstrukce, které mohou nabývat různých tvarů, a to vzhledem ke značné kompaktnosti materiálu. Vývoji materiálu UHPC bylo a stále je věnováno velké množství pozornosti, přičemž aktuálně se lze setkávat se stále větším uplatňováním UHPC v praxi. Důkazem je skutečnost, že na počátku druhé dekády tohoto století byly v ČR budovány první konstrukce využívající UHPC a o více než dekádu později je realizováno přes 40 staveb či konstrukcí s uplatněním UHPC. Zahraniční trendy jsou obdobné, přičemž se liší jednak dobou, kdy bylo s realizacemi započato, a především také celkovým množstvím aplikací.

Vzhledem k vývoji, jaký je zaznamenáván u aplikací UHPC za poslední desetiletí, lze konstatovat, že početnější část produkce UHPC je alespoň v našich podmínkách realizována s využitím prefabrikace, kdy se výroba konstrukce odehrává v prostředí s vhodnějšími podmínkami oproti podmínkám staveniště. S prefabrikováním konstrukčních dílců se obecně neoddělitelně pojí nutnost jejich přemístování, které je zpravidla zajišťováno s využitím rozličných, zpravidla ocelových, prvků, které jsou zabudovávány do útrob konstrukčních dílců. Tím vzniká problém manipulace a s ním souvisejícího kotvení v prefabrikovaných dílcích z UHPC. Žádný z předpisů pro navrhování kotvení totiž neřeší specifika materiálu UHPC a rozsah použití těchto předpisů sahá k maximální pevnosti betonu v tlaku kolem 50 MPa, resp. 90 MPa a podobně je rozsah omezen z hlediska tloušťky konstrukčního prvku a kotevní délky h_{ef} . Protože vývoj a aplikace konstrukcí z UHPC i tak přirozeně probíhají, je aktuálně nutné hledat pro návrh a ověření kotvení jiné cesty.

Za předpokladu, že dimenze konstrukčního prvku z UHPC umožňují fyzicky umístit adekvátní kotevní přípravek, může být problematické dodržet okrajové podmínky stanovené výrobcem přípravku. Tyto podklady zpravidla vycházejí z technických norem či z provedených zkoušek, které se v naprosté většině vztahují k běžnému betonu. Typickým příkladem těchto podmínek je minimální vzdálenost kotvy od okraje dílce či doplňková výztuž, bez které nelze zaručit deklarovanou únosnost. Jiným příkladem jsou deskové dílce z UHPC, u kterých se při manipulaci nabízí využít řešení se závitovým systémem. Jedná se o širokou množinu tenkých deskových dílců. Tloušťka takových desek může na první pohled umožnit použití vybraných závitových pouzder či kotev, které lze jednoduše doplnit o vázací prostředky a následně využít pro manipulaci z formy či při montáži. Podle návrhových podkladů konkrétního produktu je dosažení uvedené únosnosti kotvy podmíněno použitím doplňkové výztuže kotvy, která je zpravidla v podobě závlačí, přetočených prutů, smyček apod., ale ve tvaru znemožňujícím použití v původně navrženém tenkém konstrukčním prvku.

Materiál UHPC přitom vyniká vysokými pevnostmi, díky kterým lze výrazně zkrátit kotevní délky výztuže. Prakticky tak lze využít dostupná řešení pro kotvení v dílcích, většinou ale s redukcí či úplnou eliminací doplňkové výztuže. V kombinaci s materiálem UHPC to nemusí znamenat podcenění návrhu a výsledné řešení je tak i přes omezení dodatečného vyztužení spolehlivé a bezpečné. Návrhové podklady výrobců kotevních systémů však nejsou na použití UHPC (do jisté míry logicky) připraveny a je tak nutné hledat nové cesty.

I přes postupné zavádění UHPC do praxe a s ním také vstupování tohoto materiálu do širšího povědomí znesnadňuje absence návrhových podkladů navrhování konstrukčních prvků z UHPC. Ačkoli to není vždy zcela zřejmé, tak právě kotvení a manipulace (v případě

prefabrikovaných prvků z UHPC) hraje v návrhu konstrukce zásadní roli, a ne zřídka rozhoduje o dimenzích prvku jako takového. Není proto divu, že této problematice je třeba věnovat dostatek pozornosti.

Tyto skutečnosti byly motivací pro výběr tématu disertační práce a hlubší studium problematiky kotvení v UHPC. Aktuálně existují studie zaměřené na kotvení v UHPC, které jsou založeny na výsledcích laboratorních zkoušek s omezeným rozsahem. Snahou je provést experimentální ověření kotvení v UHPC s reprezentativním počtem zkoušek a s charakterem odpovídajícím reálnému uplatnění výsledků.

1.1. Cíle disertační práce

Cíle disertační práce jsou následující:

1. Shrnutí současného stavu poznání o UHPC, a to především se zaměřením k navazujícímu výzkumu kotevních oblastí a materiálových vlastností. Rešerše současného stavu problematiky kotvení v běžných betonech a v betonu vyztuženého drátkou včetně cementových kompozitů.
2. Provedení experimentálního ověření kotvení v kompozitu HPFRC s PVA vlákny. Zkoušky budou zaměřeny na chování kotvení v dílcích s optimalizovanými rozměry, které jsou realizovatelné vzhledem k parametrům UHPC v čerstvém i ztvrdlém stavu. Jedná se především o malou tloušťku deskových dílců a s ní související malou kotevní délku, která se u prvků z běžného betonu nevyskytuje. Nejsou tak k dispozici potřebná data, ze kterých by bylo možné vycházet při návrhu a provádění kotvení v tenkých dílcích z UHPC.

Cílem je provedení dostatečného (reprezentativního) počtu zkoušek, pomocí kterých bude možné popsat jednotlivé parametry kotvení (typ a tvar kotevních přípravků, vliv směru působícího zatížení, vliv počtu kotevních přípravků atp.). Dílčím cílem je formulace vztahů pro výpočet únosnosti kotvení v HPFRC s PVA vlákny, který zohlední velikost kotevního prostředku spolu s dalšími specifiky kompozitního materiálu.

3. Provedení experimentálního ověření kotevních oblastí v kompozitu UHPFRC se zaměřením na sledování vlivu rozdílného objemového zastoupení drátků v_f , efektivní hloubky zapuštění kotevních prostředků h_{ef} a polohy kotevního prostředku vzhledem ke směru betonáže na výsledné vlastnosti kotevních oblastí. Jedná se o parametry zcela zásadní pro výsledné vlastnosti konstrukcí z UHPFRC, přičemž k problematice existují pouze kusé informace týkající se zmíněných parametrů. Snahou je tyto vlivy kvalifikovat a kvantifikovat.

Dílčím cílem je zde formulace početních vztahů, které budou popisovat vlastnosti kotvení se zohledněním anizotropie UHPFRC a umožní tak predikovat únosnost kotev zabudovaných v tomto kompozitu.

4. Provedení experimentálního ověření kotevních oblastí v reálném prvku z UHPFRC, které navazuje na předchozí výzkumnou činnost, ve které je problematika kotvení v UHPC řešena do jisté míry izolovaně. Cílem je experimentálně ověřit vlastnosti kotvení na vzorcích se skutečnými okrajovými podmínkami, jako jsou reálné dimenze konstrukce, vyztužení běžnou výztuží a v neposlední řadě i technologie výroby.
5. Výsledky výše popsaných zkoušek je v plánu podrobně dokumentovat, aby mohly posloužit jako podklad pro případnou navazující výzkumnou činnost.

6. Shrnutí řešené problematiky, nastínění možného využití dosažených výsledků a formulace možných směrů navazujícího výzkumu.

1.2. Členění práce

Text disertační práce je rozdělen do několika kapitol. Po úvodní části je provedena rešerše se zaměřením jednak na vlastnosti UHPC ve vztahu k lokálnímu namáhání, které kotvení představuje, a zároveň na problematiku kotvení v širším slova smyslu, kdy jsou podrobně zdokumentovány různé přístupy k analýze a navrhování kotvení. Zvláštní důraz je kladen na rešerši kotvení v různých typech betonu z hlediska složení či s ohledem na konstrukční použití. V závěru kapitoly věnované rešerši je souhrn poznatků k řešené problematice, který vedl k formulaci cílů pro další části výzkumu.

Na rešerši navazuje praktická část práce v podobě sérií experimentálních výzkumů. Zaměření zkušebních programů je navrženo tak, aby byly, pokud možno, nezávisle zkoumány odlišné aspekty, které různou měrou ovlivňují výsledné vlastnosti kotvení. Řazení experimentálních studií vychází z podrobnosti, jakou v globálním měřítku zkoumané aspekty představují pro kotevní jako celek, přičemž se postupuje od zaměření na kotevní prostředek jako takový, přes účinek vlastností matrice UHPC až po vlivy, které přináší proces výroby konstrukčních prvků v reálném měřítku. Každý z experimentálních programů je doplněn podrobnou analýzou vybrané otázky a zakončen formulací závěru s možným řešením problému.

Závěrečná kapitola je věnována souhrnu dosažených výsledků s možnostmi uplatnění a možnými směry dalšího výzkumu.

2. Rešeršní část: současný stav řešené problematiky

„Fantazie je důležitější než informace.“

Albert Einstein

V této úvodní kapitole je obsažena rešerše studované problematiky *kotevních oblastí v cementovém kompozitu UHPC*. První část obsahuje souhrn informací o materiálu UHPC se zaměřením na údaje potřebné k následnému hlubšímu rozboru kotevních oblastí v UHPC. I přes skutečnost, že je na poli stavebnictví na UHPC mnohdy nahlíženo jako na „neznámý“ materiál, věnuje se výzkumu a vývoji UHPC celá řada výzkumných pracovišť z celého světa, a to již více než čtyři dekády. V určitém období jsme mohli být svědky výslovného boomu ve výzkumu UHPC. Tomuto úsilí přímo odpovídá i množství publikací. Snahou proto bylo akcentovat a vybrat ty nejdůležitější zdroje a informace, které by poskytly stručný a výstižný přehled o materiálu a zároveň vhodné vstupní údaje pro vlastní výzkum.

V druhé části je uveden souhrn informací o kotvení v betonových konstrukcích. Zmíněny jsou obecné informace a dále je zaostřeno na kotvení namáhané tahovým zatížením. Byl zpracován přehled studií a návrhových přístupů, které vedou k určení únosnosti kotvení. Přístupy se liší stářím, a tedy i mírou poznání v oboru v daném čase. Nahlédnuto je na kotvení v různých druzích betonu (z hlediska složení a výsledných vlastností). Zpracovány jsou také specifické okrajové podmínky, které různou měrou ovlivňují výsledné vlastnosti kotvení v betonu.

2.1. UHPC jako materiál⁵

2.1.1. Historie a vývoj

Vývoj UHPC je všeobecně pokračováním rozvoje vysokohodnotných betonů (HPC), které se od běžného betonu odlišovaly nižším vodním součinitelem a použitím pevnějšího kameniva. [35] V průběhu 90. let 20. století představil Francouz Pierre Richard materiál reactive powder concrete (RPC) [32], který se vyznačoval vysokým obsahem pojiv, nízkým vodním součinitelem, obsahem jemnozrnných příměsí, superplastifikátorů a výztužných drátků. [38] V roce 1994 použil François de Larrard termín UHPC [39], který se ujal pro označení ultra vysokohodnotných betonů. První realizovanou konstrukcí z UHPC byla lávka pro pěší v Kanadském Québecu. [40] V současné chvíli je po celém světě několik tisíc staveb využívajících UHPC, ale v celkovém objemu globální stavební produkce jde stále o malý zlomek. V ČR byla první stavební aplikace UHPC na nosnou konstrukci v roce 2012, šlo o desky ztraceného bednění na mostu v Benátkách nad Jizerou. Dnes máme v ČR již desítky aplikací využívajících materiál UHPC. [100]

2.1.2. Složení a hlavní principy návrhu receptury

UHPC je směs silikátového hydraulického pojiva, drobného kameniva, mikroplniva, latentně hydraulických příměsí (případně inertních příměsí), přísad a vody. Od běžného betonu se UHPC výrazně liší v mnoha ohledech. UHPC neobsahuje hrubou frakci kameniva,

⁵ Vybrané části následujícího textu byly již publikovány [99].

kteřá je v běžném betonu zdrojem imperfekcí a omezuje proto dosažení vyšších pevností. Složení UHPC se vyznačuje vysokým obsahem cementu, nízkým vodním součinitelem, obsahem příměsí, vysokými dávkami přísad a také vysokým obsahem vláken [22].⁶ Příklad složení UHPC a porovnání s běžnými typy betonu a vysokohodnotného betonu jsou uvedeny v tab. 1.

Tab. 1 Příklad složení směsí běžného, vysokohodnotného a ultra-vysokohodnotného betonu

	NC	HPC [78]	UHPC [80]
Složky:	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]
Portlandský cement	<400	410	600–1000
Hrubé kamenivo	1000	920	-
Drobné kamenivo	700	620	1000–1200
Příměsí	-	40	50–300
Superplastifikátor	-	5	10–70
Voda	>200	100–150	110–170
Vyztužení/Vlákna [kg/m³]	návrh	návrh	80–250
Vodní součinitel	>0,4	0,28–0,38	<0,24

Hlavními principy návrhu UHPC jsou snížení pórovitosti, zlepšení mikrostruktury, zvýšení homogenity a zvýšení houževnatosti. Vstupní suroviny, způsob přípravy a režim tuhnutí mají významný vliv na vlastnosti výsledného UHPC. Pro dosažení co nejlepších fyzikálních a mechanických vlastností jak čerstvé směsi, tak ztvrdlého UHPC se při návrhu receptury reflektují zásady týkající se výběru složek, zastoupení jednotlivých složek, míchání a ošetřování směsi. Mimo jiné se jedná hlavně o tyto principy:

Snížení pórovitosti

Struktura, velikost a rozmístění pórů zásadním způsobem ovlivňují pevnost ztvrdlých materiálů na cementové bázi. Jednou z cest ke snížení pórovitosti, kterým lze navýšit pevnost betonu, je minimalizace mezerovitosti kameniva, které lze docílit optimalizací křivky zrnitosti kameniva. Při návrhu receptury UHPC se optimální mezerovitosti a hutnosti dosahuje použitím příměsí, jemnozrnných anorganických látek s největší velikostí zrn 0,25 mm. Ty mohou současně ovlivnit reologické vlastnosti čerstvé směsi. Vzhledem k vysoké dávce cementu (tab. 1) plní část zrn nezhydratovaného cementu funkci mikroplniva.⁷ Redukce vodního součinitele je dalším přístupem, který vede k redukci porozity a nárůstu pevnosti. Pro UHPC je zásadní použití superplastifikátorů, které při redukováném vodním součiniteli (viz tab. 1) zaručují zpracovatelnost čerstvého materiálu.

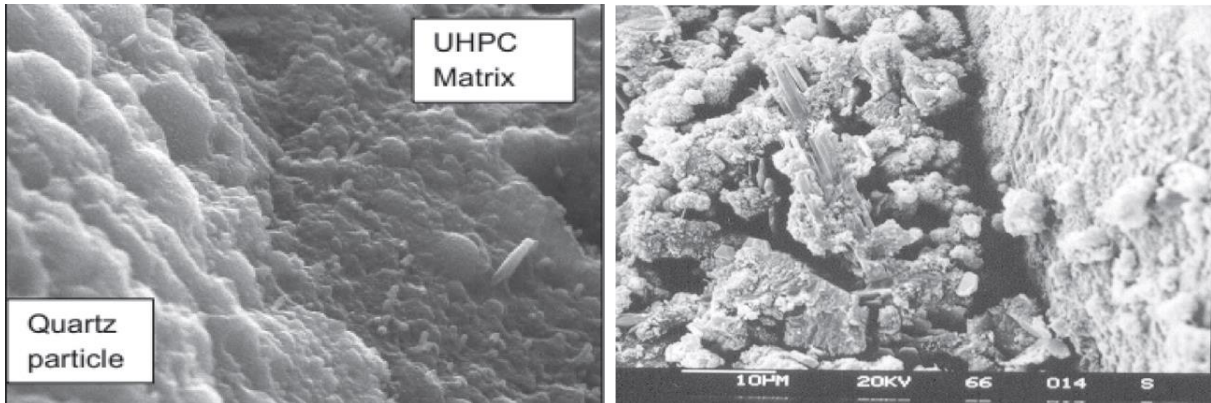
Vylepšení homogenity

Použitím hrubého kameniva v běžném betonu, ve kterém se může velikost zrna kameniva pohybovat mezi 4 a 63 mm, vznikají v tranzitní zóně mezi cementovou pastou a kamenivem vlivem rozdílných mechanických vlastností těchto dvou součástí smyková a tahová napětí, která mohou vést ke vzniku mikrotrhlin. Šířka mikrotrhlin proporcčně odpovídá velikosti zrn kameniva. [32] Pro eliminaci těchto jevů je v UHPC místo hrubého kameniva použit křemičitý písek s velikostí zrna do 4 mm. Při zmenšení zrna kameniva se jednak

⁶ V případě vyztužení UHPC vlákny se jedná o *Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete* (UHPFRC). Pokud je materiál dále vyztužen betonářskou výztuží je výsledný kompozit označován jako *Reinforced Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete* (R-UHPFRC).

⁷ Jako hranice pro hydrataci všech zrn cementu bývá označována hodnota $w/c = 0,4$.

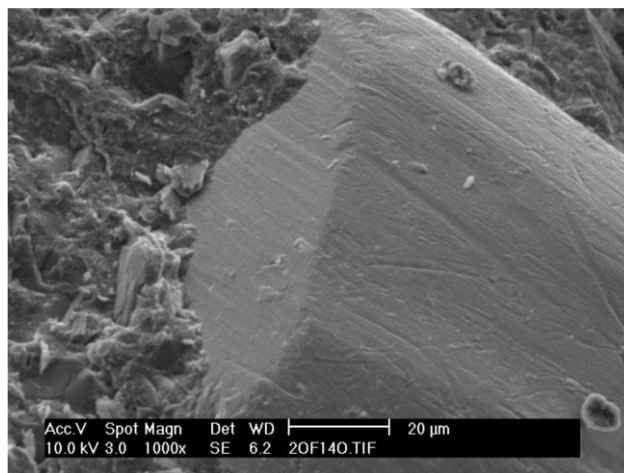
zmenšuje velikost mikrotrhlin a zároveň se snižuje pravděpodobnost poškození samotného kameniva a je tak dosaženo vyšší homogenity. Tranzitní zóna mezi kamenivem a cementovou pastou je v UHPC velmi hustá (obr. 1), což je základem pro dosažení mimořádných vlastností materiálu. Oproti tomu v běžném betonu se vlivem zvýšené porozity stává tato zóna jedním z nejslabších článků matrice.



Obr. 1 Detail tranzitní zóny mezi kamenivem a cementovou pastou v UHPC (vlevo) a srovnání s běžným betonem (vpravo) [34]

Zvýšení duktility

Pro zajištění houževnatosti a vysoké duktility výsledného UHPC je nutné doplnit matici všesměrně orientovanou vláknovou výztuží. [22] Vhodným materiálem jsou ocelová mikrovlákna s délkou v rozmezí od 8 do 18 mm a s průměrem menším než 0,3 mm [25]. Použit lze též vlákna z materiálů na bázi polymerů, případně vlákna skleněná. Zkoušeny byly též betony vyztužené kombinací vláken z různých materiálů. [83] Kombinací vláken z různých materiálů lze pozitivně ovlivnit požární odolnost UHPC a eliminovat segregaci vláken.



Obr. 2 Vazba mezi maticí a ocelovým vláknem na mikroúrovni [79]

Ukazatelem vyztuženosti matrice UHPFRC je objemové zastoupení vláken v_f . [25] Minimální dávkování ocelových vláken pro prefabrikované dílce je 1,5 % objemu, tedy přibližně 120 kg/m³. Toto dávkování zaručuje duktilní chování UHPFRC s tahovým změkčením, přičemž umožňuje návrh konstrukce s využitím tahových pevností. Použitím UHPFRC s vyšším stupněm vyztužení v_f lze docílit tahového zpevnění materiálu. Podrobněji v části 2.1.4.

2.1.3. Technologie výroby UHPC⁸

Vzhledem k vysokým nárokům na výsledné vlastnosti a s nimi souvisejícími nároky na přípravu materiálu je (alespoň prozatím) větší část produkce využívající kompozit UHPC řešena pomocí prefabrikace. Betonáž UHPC in situ je ve větším měřítku uplatňována v USA a Švýcarsku. Produkce UHPC v prostředí závodů se zavedeným systémem výroby přináší logicky řadu výhod. Výrobní poskytují kontrolované podmínky pro skladování jednotlivých složek UHPC a výrobu prefabrikátů lze vhodně provádět ve stabilním prostředí chráněném proti povětrnosti s možností následného ošetřování.

Některé aplikace UHPC se nicméně neobejdou bez přípravy čerstvé směsi přímo na staveništi nebo bez transportu čerstvého UHPC z betonárny na stavbu. Příprava čerstvého materiálu je pak obdobná, ale navíc je nutné zohledňovat požadavky týkající se doby zpracovatelnosti čerstvé směsi a počítat s možnými odlišnostmi po uložení materiálu, který může obsahovat větší množství vzduchu či vykazovat vyšší míru segregace výztužných vláken. Těmto jevům lze však úspěšně předcházet vhodnými technologickými opatřeními.

Princip UHPC je založen zejména na velmi přesném dávkování složek a přítomnosti jennozrnných příměsí, které vychází z výsledků laboratorních zkoušek. Při přípravě v množství v řádu kubických metrů UHPC jsou kladeny přísné požadavky jednak na skladovací prostory, ve kterých musejí být zajištěny stabilní podmínky co do vlhkosti a teploty, a jednak na navažovací zařízení. K přípravě UHPC ve větším měřítku se využívá předem připravená suchá složka UHPC, jež je ve formě big bagů či pytlů přímo aplikována na váhy betonárky. Tím odpadne i potřeba přesně navažovat jednotlivé složky UHPC těsně před mícháním.

K přípravě čerstvého UHPC lze využít standardní míchací zařízení pro přípravu běžného betonu. Příprava čerstvého UHPC je však specifická disciplína náročná na energii, a proto se při míchání většinou využívá jen částečná kapacita míchačky, čímž se celková doba míchání může oproti běžnému betonu prodloužit. Zcela zásadním krokem je přidání superplastifikační přísady. Ocelová vlákna jsou obvykle dávkována až v závěru míchání. I při poměrně vysokých dávkách vláken od 120 do 240 kg/m³ je potřeba zajistit jejich rovnoměrné rozptýlení. Při ukládání se obvykle postupuje bez vibrace.

Zásadním krokem je ošetřování ihned po betonáži. Nezbytné je zamezit odparu již tak malého množství vody. Prvotní autogenní smrštění je proti běžnému betonu rychlejší a markantnější, nevyztužené části průřezu jsou ke smrštění náchylnější. Problematickými místy mohou být spoje vyztužených a nevyztužených částí.

Vlastnosti čerstvé směsi UHPC připomínají samozhutnitelný beton (SCC), což přináší zvýšení tlaků působících na bednění, respektive na formy. Konstrukce formy musí být schopna odolávat tomuto zatížení při současném omezení deformací, jež by jinak mohly vést k větším geometrickým odchylkám výsledného prvku.⁹ Vlastnosti vysoce odolných a tuhých forem jdou mnohdy proti fenoménu smršťování, které je u UHPC zvlášť významné v rané fázi hydratace. [86] U tvarově složitějších prvků je zapotřebí tuhé formy uzpůsobovat tak, aby umožnily volnou deformaci zrajícího dílce, a předešlo se tak vzniku trhlin. V současné době se vývoj a výzkum v oblasti betonáží zaměřuje na úpravy směsí vedoucí k možnosti čerpání, stříkání a tištění.

⁸ Shrnuto na základě [80] a [99].

⁹ Z praktických zkušeností plyne, že při zajištění potřebné únosnosti a tuhosti forem je naopak dosaženo velmi vysoké geometrické přesnosti hotových konstrukčních prvků.

2.1.4. Mechanické vlastnosti UHPC ovlivňující kotvení

Přednostmi UHPC jsou vynikající mechanické vlastnosti jako vysoká tlaková pevnost, vysoká duktilita a dlouhá trvanlivost. [34] Na tomto místě jsou vyzdvíženy ty charakteristiky UHPC, které jistou měrou ovlivňují chování kotevních oblastí v UHPC. Srovnání některých mechanických vlastností běžného betonu, vysokohodnotného a ultra vysokohodnotného betonu je uvedeno v tab. 2.

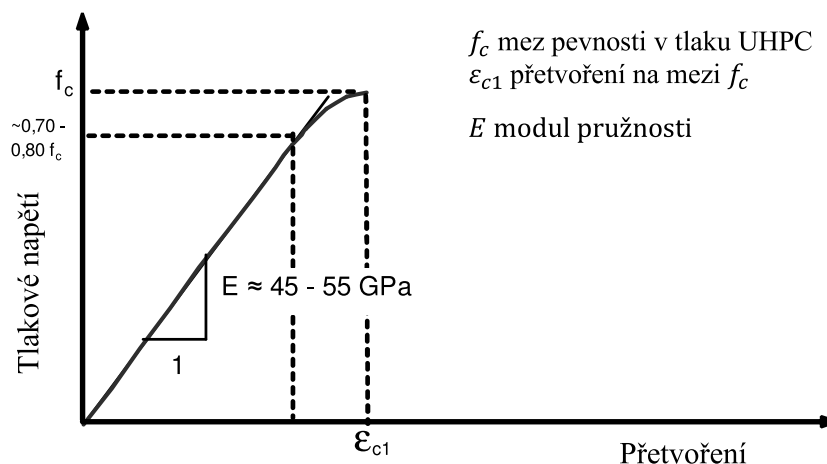
Tab. 2 Srovnání vybraných vlastností betonu běžného (NC), vysokohodnotného (HPC) a ultra vysokohodnotného (UHPC) [99]

Veličina	Jednotka	NC	HPC [35]	UHPC
Charakteristická válcová pevnost v tlaku f_{ck}	MPa	12–50	50–110	110–170
Střední hodnota modulu pružnosti E_{cm}	GPa	27–37	38–44	45–55
Charakteristická pevnost betonu v prostém tahu f_{ctk} (5% kvantil)	MPa	1,1–2,9	3–3,5	4–10
Hloubka průsaku tlakovou vodou	mm	20–25	20–25	0–5
Odolnost povrchu vůči působení rozmrazovacích látek, CHRL	g/m ²	200–700	50–150	0–50

Pevnost v tlaku a modul pružnosti

Typická pevnost v tlaku UHPC se pohybuje v intervalu od 110 MPa do 220 MPa.¹⁰ Zhruba do 70 až 80 % tlakové pevnosti vykazuje UHPC lineárně pružné chování (obr. 3). Vzhledem k vlastnostem matrice dosahuje modul pružnosti UHPC výrazně vyšších hodnot ve srovnání s běžným i vysokohodnotným betonem. [79]

Porušení UHPC bez vláken je náhlé a má explozivní charakter. V pracovním diagramu (obr. 3) se tak nevyskytuje žádná klesající větev. Podobný jev lze také pozorovat i u HPC s tlakovou pevností nad 90 MPa. [78]



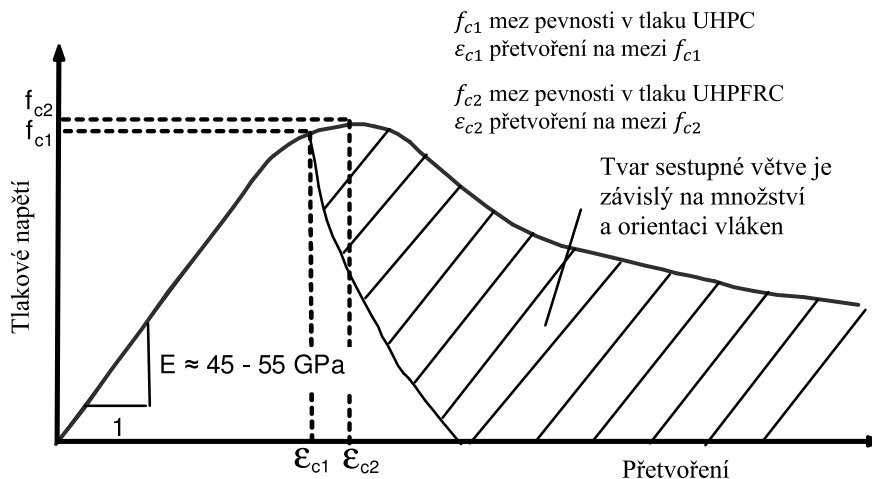
Obr. 3 Pracovní diagram UHPC v tlaku bez výztužných vláken, upraveno dle [79]

Vliv vyztužení vláknou na pevnost v tlaku je obecně malý. Při $v_f = 2,5$ % bylo zaznamenáno zvýšení pevnosti v tlaku cca o 15 %. Hlavním rozdílem ve srovnání s UHPC bez vláken je

¹⁰ Obvykle uváděná hranice tlakové pevnosti pro klasifikaci UHPC v literatuře je 150 MPa. Správnou vypovídající hodnotu má informace pouze při uvedení typu a rozměru zkušebního tělesa a stáří vzorku v okamžiku zkoušení. U nás je za UHPC zpravidla označován materiál od pevnosti 110 MPa. Jako reference se ustálila 28denní pevnost zjištěná na válci o průměru 100 mm a výšce 200 mm. [25]

charakter porušení betonu, které je pozvolné a dochází k přenosu zatížení i po vzniku trhliny (obr. 4).

Tepelné ošetřování UHPC může značně urychlit vývoj pevnosti v tlaku a také ovlivnit výslednou pevnost v tlaku. Sérii experimentů zohledňujících ošetřování zkušebních vzorků ve vodním prostředí s variací teplot (20° , 70° a 90°) v porovnání se vzorky neošetřovanými provedl Příbramský [86]. Při teplotě 250°C lze dosáhnout výrazného zvýšení pevnosti, protože vysoká teplota nejen urychluje chemickou reakci, ale vede také ke zlepšení mikrostruktury. [79]



Obr. 4 Pracovní diagram UHPFRC v tlaku, dávka vláken 1,0 až 2,5 %, upraveno dle [79]

Vzhledem k hutnosti matrice je modul pružnosti UHPC vyšší než u normálního a vysoko-pevnostního betonu při použití stejného druhu kameniva. Střední hodnota modulu pružnosti se pohybuje v rozmezí 45 až 55 GPa. [79] Ošetřování UHPC při zvýšené teplotě ve vodní lázni ukázalo zanedbatelný vliv na modul pružnosti. Vzorky ošetřované za zvýšené teploty dosahují nárůstu modulu pružnosti pouze 2,5 %. [86]

Stejně jako u běžného betonu je i u UHPC pro klasifikaci a posuzování shody rozhodující pevnost zkoušená ve stáří 28 dní. [11] Jak již bylo naznačeno v části 2.1.3, v našich podmínkách je alespoň prozatím větší část produkce UHPC řešena pomocí prefabrikace. Nárůst pevnosti v tlaku UHPC v čase je tak vhodné sledovat provedením zkoušek ve vybraném stáří, které většinou odpovídá první manipulaci s prvkem, nebo vnášení předpínací síly apod. UHPC mj. vyniká rychlým počátečním nárůstem pevností. V rakouské normě [20] je uveden vztah (2.1) zohledňující vývoj tlakové pevnosti UHPC v čase. Jedná se o stejný způsob stanovení jako v eurokódu 2 [4], ovšem s upřesněním součinitele typu cementu $s = 0,21$.¹¹

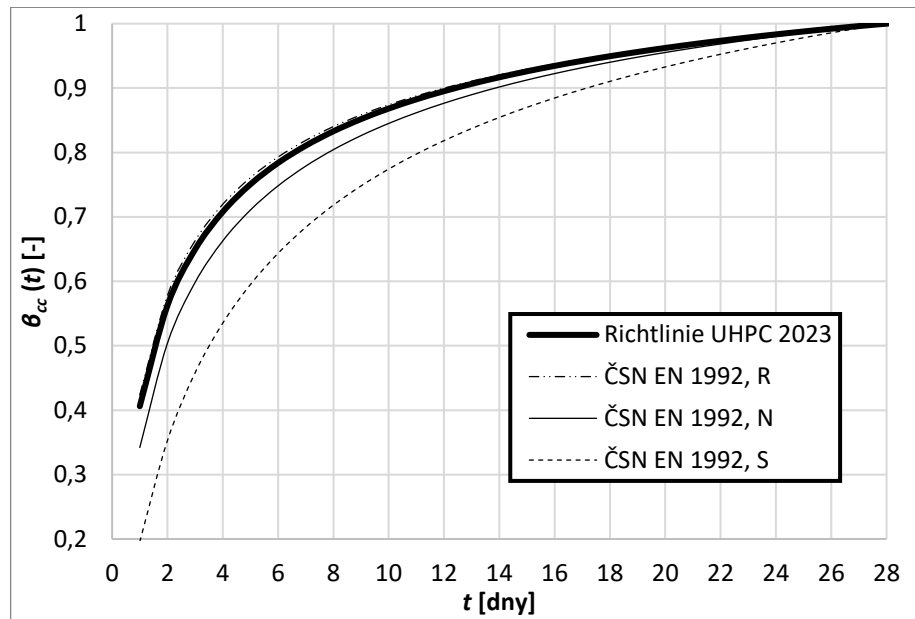
$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{cm}$$

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ 0,21 \cdot \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{0,5} \right] \right\} \quad (2.1)$$

$\beta_{cc}(t)$ je součinitel zohledňující stáří materiálu, t je čas ve sledovaném okamžiku, $f_{cm}(t)$ je průměrná pevnost v tlaku ve sledovaný okamžik.

¹¹ Součinitel s závisí na třídě cementu je v eurokódu 2 [4] roven 0,2 pro cementy pevnostní třídy CEM 42,5 R, CEM 52,5 N a CEM 52,5 R (třída R).

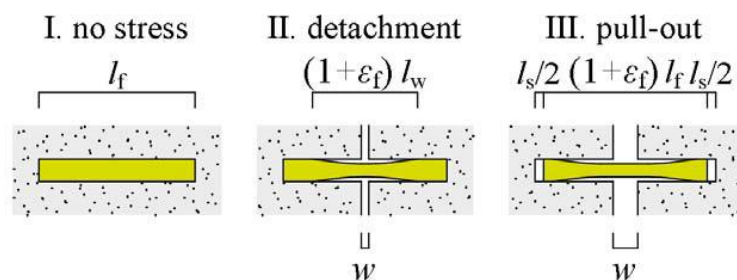
Vývoj součinitele $\beta_{cc}(t)$ je uveden v grafu na obr. 5, a to jednak pro UHPC dle normy [20], a zároveň podle eurokódu 2 [4] s rozlišením typů použitého cementu. Uvedené vztahy je vhodné pojímat jako orientační, a zvláště vývoj raných pevností (do 3 dnů) je nutné ověřit pomocí zkoušek.



Obr. 5 Součinitel $\beta_{cc}(t)$ v čase podle Richtlinie UHPC [20] a podle ČSN EN 1992-1-1 [4]

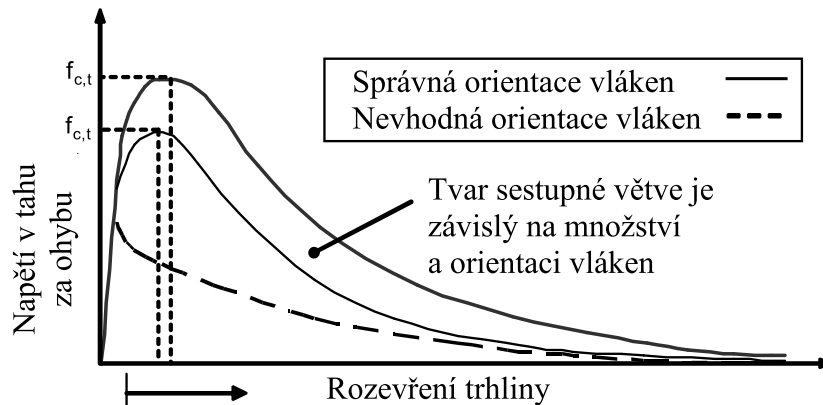
Pevnost v tahu

Tahová pevnost UHPC bez vyztužení vláknou dosahuje velikosti 7–10 MPa. K porušení nevyztuženého prvku dochází ihned po vzniku trhliny, tj. dosažení tahové pevnosti f_{ct} . Do meze $f_{ct,L}$ je závislost napětí a přetvoření lineární. U prvků z UHPFRC jsou po dosažení pevnosti matrice (a vzniku mikrotrhlin) aktivována vyztužná vlákna (obr. 6). V závislosti na vlastnostech vyztužení (množství, tvar, délka, štíhlostní poměr, materiálové charakteristiky vláken) se mění nelineární chování kompozitu po vzniku trhliny. Pro slabě vyztužené prvky je typické tzv. tahové změkčení, které je charakterizováno lokalizací porušení do jedné trhliny a porušením prvku. Pokud prvek přenáší rostoucí zatížení při narůstajícím přetvoření, jde o tahové zpevnění. Příklady obecného pracovního diagramu jsou pro různé způsoby vyztužení UHPC uvedeny na obr. 7.



Obr. 6 Mechanika vyztužných vláken v matrici (postup aktivace) [70]

Samotná zkouška pro stanovení prosté tahové pevnosti je komplikovaná.¹² Problémem je zajištění nepoddajného uchycení vzorku do zkušebního stroje a upnutí zajišťující namáhání prostým tahem, tj. bez excentricit způsobujících přidavné ohybové namáhání. Proto se k určení tahové pevnosti používá zkouška v tahu za ohybu. Nejčastěji se jedná o zkoušku v třibodovém ohybu na trámci s vrubem se záznamem CMOD,¹³ např. dle normy ČSN EN 14 651+A1 [9]. Referenčním zkušebním tělesem (jak jej uvádí české předpisy, např. TP ČBS 07 [25]) je trámec s rozměry 150×150×700 mm. Pro zjištění pevnosti v tahu za ohybu lze použít i alternativní těleso – trámec s rozměry 100×100×400 mm. Záznam standardní zkoušky trámců v třibodovém ohybu s vrubem a s měřením CMOD včetně zbytkové pevnosti je na obr. 64.



Obr. 7 Pracovní diagramy zkoušky pevnosti UHPFRC v tahu za ohybu, upraveno dle [79]

Porovnání pevnosti v tahu a pevnosti v tahu za ohybu na různých typech vzorků, vč. lomové energie dokumentuje ve své práci Kusumawardaningsiha [85]. Tab. 3 zobrazuje pevnost a lomovou energii UHPFRC. Vzorky byly odlévány shodně ve vodorovné poloze. Pevnost v prostém tahu byla zkoušena na hranolech 40×40×160 mm s vrubem, tah za ohybu na trámci 40×40×160 mm (3bodová zkouška), resp. na trámci 150×150×700 mm (4bodová zkouška). Z výsledků pevnosti v tahu za ohybu jsou patrné vlivy rozměrového a stěnového efektu, které jsou typické pro malé trámce 40×40×160 mm, jejichž výsledky jsou cca 1,5x vyšší než na velkém trámci. Za zmínku stojí poměr mezi pevnostmi v prostém tahu a v tahu za ohybu, který je pro malý trámec průměrně 0,4 a pro velký trámec průměrně 0,62.¹⁴

Tab. 3 Srovnání lomové energie a tahové pevnosti měřených na odlišných tělesech [85]

	stáří [dny]	prostý tah 40×40×160 mm	tah za ohybu (% nárůst oproti prostému tahu)			
			40×40×160 mm	150×150×700 mm		
Lomová energie [N/m]	7	16757	20100	120 %	20355	121 %
	28	14555	18052	124 %	19892	137 %
Tahová pevnost [N/mm ²]	7	14,2	34,0	239 %	22,1	156 %
	28	13,3	35,7	268 %	22,2	167 %

¹² Zkoušení UHPFRC v prostém tahu není v českých podmínkách běžné a není pro ověřování tahových vlastností požadováno. Zkušební postup je uveden např. ve švýcarské normě SIA 2052 [18] nebo v japonském návrhové doporučení JSCE [19]. Zkoušky UHPC v prostém tahu provádí zpravidla pouze specializované laboratoře a nelze očekávat, že by se zkoušení významně rozšířilo.

¹³ CMOD (Crack Mouth Opening Deflection) – měření šířky rozevření trhliny. [22]

¹⁴ Pro srovnání se ve [25] pro převod z pevnosti v tahu za ohybu f_{tm} při rozevření trhliny 0,5 mm (CMOD1) na velkém trámci 150×150×700 mm na pevnost v prostém tahu využívá poměr 0,5.

Zkoušení pevnosti v příčném $f_{ct,sp}$ tahu není u UHPC příliš obvyklé. Existuje ovšem několik zahraničních studií zaměřených na materiálové charakteristiky UHPC, v rámci kterých byla pevnost v příčném tahu zkoušena.¹⁵ Hoang [84] shromáždil dostupná zkušební data obsahující jednak tlakovou pevnost a zároveň pevnost v příčném tahu UHPC. Spolu s informacemi o typu a množství drátků v_f provedl regresní analýzu, která je založena na výsledcích osmi dalších experimentálních studií doplněných o data z vlastního výzkumu. Výsledkem je vztah (2.2) pro stanovení pevnosti drátkobetonu v příčném tahu na základě pevnosti v tlaku a parametrů výztužných vláken.

$$f_{ct,sp} = \left(0,94v_f \frac{l_f}{d_f} b_f + 0,67 \right) \sqrt{f_c} \quad (2.2)$$

b_f je součinitel zohledňující kotevní vazbu – tvar vlákna (0,5 pro vlákna s kruhovým průřezem a 0,75 pro zahnuté a lisované drátky).

Zkouška pevnosti v příčném tahu UHPC je nekomplikovaná a je popsána normou ČSN EN 12390-6 [15]. Zkušebním vzorkem je krychle nebo válec. Při výrobě těchto těles nevznikají mezi vzorky tak významné rozdíly jako např. při výrobě trámců pro zkoušku tahu za ohybu, které jsou obzvláště citlivé na odchylky od normového výrobního postupu [9]. Ověření pevnosti v příčném tahu by tak bylo vhodné např. pro kontrolní zkoušky UHPC. Bohužel není zpracován převodní vztah mezi pevností v příčném tahu a pevností v prostém tahu nebo v tahu za ohybu.

Lomová energie

Lomová energie je lomová práce, která je definována jako práce vnější síly od počátku zatěžování, až do úplného porušení vzorku, vztažená na jednotku plochy trhliny. [37] Pro určení lomové energie vytvořil RILEM [17] postup, který vychází ze zkoušky trámců v tahu v třibodovém ohybu.

Vztah (2.3) pro určení lomové energie G_f :

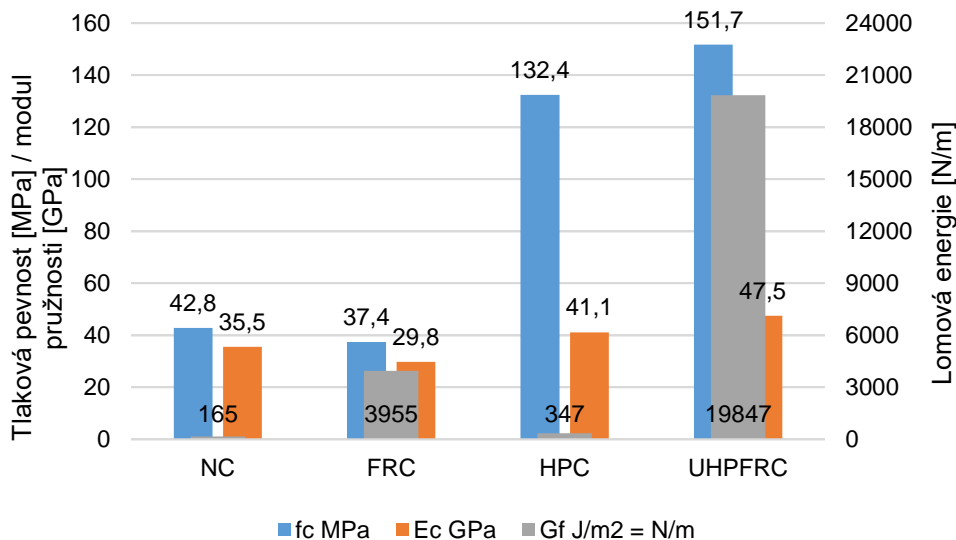
$$G_f = \frac{W_0}{b(d - a_0)} \quad (2.3)$$

kde W_0 značí práci odečtenou z pracovního diagramu zkoušky v třibodovém ohybu, b a d jsou rozměry průřezu vzorku a a_0 je výška vrubu. [68]

Pro stanovení lomové energie z výsledků zkoušky v tahu za ohybu je nutné vycházet z úplného pracovního diagramu betonu. Zkouška by měla být provedena až do vyšších hodnot rozevření trhliny (CMOD), kdy se hodnota působící síly blíží nule. [37] V případech, kdy není dostupná celá sestupná větev nebo nelze provést zkoušku až do vyšších hodnot deformace, se nabízí aproximovat chybějící data s využitím vztahů definovaných v práci Vydry [37] s. 28.

Máca a kol. [69] zkoumali vliv výztužných vláken, která byla doplněna do betonu běžných pevností (FRC) a do ultra-vysokohodnotného betonu (UHPCFRC). Vlastnosti drátkobetonů byly porovnávány s betony bez rozptýlené výztuže NC a HPC. Kromě jiných vlastností byla stanovena lomová energie, která byla stanovena dle [17] na trámcích 100×100×400 mm. V rámci studie [69] byl zaznamenán prudký nárůst lomové energie při použití vláken ať již v FRC, tak především u UHPCFRC, což dokládá také graf (obr. 8).

¹⁵ Stejně tak existuje několik výzkumů zabývajících se kotvením v betonu, kde je pevnost v příčném tahu zohledněna. Zmíněny jsou dále v textu, v části 2.2.7.



Obr. 8 Porovnání materiálových parametrů běžného betonu (NC), drátkobetonu (FRC), vysokohodnotného betonu (HPC) a UHPC s ocelovými vlákny, upraveno dle [69]

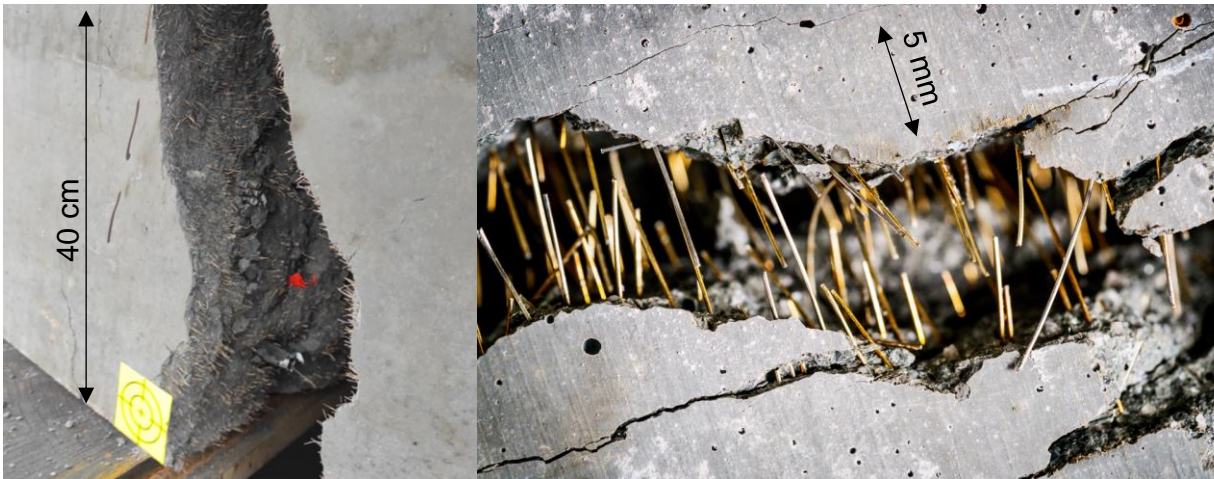
Další srovnání materiálových vlastností se zaměřením na lomové charakteristiky je uvedeno např. v práci Fehlinga [79] a je provedeno od maltových směsí až po UHPC. Dále také v práci Kusumawardaningsihe [85] (zmněno výše v tab. 3).

2.1.5. Vlastnosti konstrukcí z UHPC

V předchozí části jsou popsány vybrané mechanické parametry materiálu UHPC zjišťované stejným nebo obdobným způsobem jako v případě jiných typů betonu. Neméně důležité je zmínit vlastnosti konstrukcí, které jsou UHPC tvořeny ať již zcela, nebo pouze částečně. Tím je myšleno hodnocení vlastností na úrovni hotové konstrukce a nikoli pouze s využitím zkušebního UHPC vzorku. V této části je poukázáno na vybrané vlastnosti konstrukčních prvků z UHPC, které mohou v menší či větší míře ovlivňovat vlastnosti kotvení.

Na první pohled se povrchy konstrukcí z UHPFRC od jiných betonových povrchů odlišují přítomností mikrovláken. Ta je specifická jednak z estetického hlediska, kdy v případě ocelových vláken dochází po určité době těsně u povrchu konstrukce k rezivění vláken a později k jejich úplnému vymizení. Z hlediska uživatelského komfortu mohou vyčnívající vlákna před jejich odřeznutím způsobovat komplikace. Rozmístění vláken uvnitř konstrukce je však lidskému oku skryto do doby, kdy je konstrukce porušena do té míry, že jsou výztužná vlákna vytržena z konstrukce ven (obr. 9 a obr. 10). Způsob rozmístění ocelových vláken v UHPFRC zkoumal mj. Rydval v rámci své disertační práce [55]. V práci je pojednáno o aspektech rozmístění vláken do značné míry souvisejících s technologií výroby prvků z UHPC. Při odlévání prvků z UHPC dochází vlivem různých technologických postupů k nerovnoměrnému rozptýlení vláken vedoucímu k nehomogenitě v materiálu. Tzv. segregace vláken je důsledkem lití materiálu a dalších výrobních postupů (čítajících úpravy povrchů čerstvého betonu, vibraci), která má za následek klesnutí určitého množství vláken směrem ke dnu formy. Konstrukční prvky ovlivněné segregací vláken mají v různých místech odlišné parametry a je tak nezbytné brát tyto jevy v úvahu již při návrhu konstrukčního prvku.¹⁶

¹⁶ To je přístup odlišný od navrhování konstrukcí z běžného betonu. Nezbytné je reflektovat technologický postup výroby, což předpokládá již v přípravných fázích projektu součinnost projektanta a technologa jakožto zástupce dodavatele UHPC.



Obr. 9 Vyčnívající ocelová vlákna po destrukci nosníku z UHPFRC

Obr. 10 Detail výztužných mikrovláken procházejících přes trhlinu při zkoušce trámce v tahu za ohybu [99]

Se segregací, jakožto s nerovnoměrným rozmístěním vláken po výšce konstrukce, souvisí fenomén tzv. stěnového efektu (z angl. *wall effect*). Jedná se o usměrnění výztužných vláken v důsledku jejich kontaktu s povrchem bednění či formy. Orientace jinak všesměrně rozptýlených vláken je v blízkosti dna nebo stěn formy ovlivněna a vlákna jsou zpravidla orientována podél roviny formy. Tento jev přináší anizotropní vlastnosti materiálu, jako např. zvýšenou tahovou pevnost u dotčeného povrchu v rovině určené povrchem prvku, což lze v konstrukcích v určitých případech vhodně využít. Dle Rydvala [55] je oblast dotčená stěnovým efektem do vzdálenosti $1 \times L_f$ ode dna či stěny. Stěnový efekt v souvislosti s kotvením ve vláknobetonu (FRC nebo HPFRC) je zmíněn dále v části 2.2.6.

Vlastnosti ohýbaných desek spolu s dalšími tělesy z materiálu UHPC zkoumal Holý [88]. V rámci své práce porovnával mimo jiné únosnost desek tloušťky od 40 do 80 mm, které byly při 3bodovém ohybu umístěny jednak ve výrobní poloze a v dalším případě v obrácené poloze.¹⁷ Z výsledků experimentálních zkoušek vyplynul rozdíl mezi jednotlivými typy desek, a to cca o 20% vyšší tahová pevnost u prvků zkoušených ve výrobní poloze, tj. s taženými vlákny dotčenými stěnovým efektem.¹⁸ Kromě vlivu stěnového efektu byl v práci zhodnocen rozměrový efekt (obecně definován Bažantem v [30]), který se projevil rozdíly v ohybových pevnostech.

Mechanické parametry UHPC zásadním způsobem ovlivňují napětí v soudržnosti. Problematiku kotevních délek betonářské i předpínací výztuže zkoumal Čítek [89] v rámci podrobného výzkumu. V práci je poukázáno na významnou redukci kotevních délek při použití UHPC, kdy pro žebírkovou výztuž postačuje k zakotvení tahové síly v prutu kotevní délka odpovídající trojnásobku průměru prutu.¹⁹ I při tloušťce krycí vrstvy $c_{nom} = d_s$ bylo dosaženo přetržení výztuže, místo potrhání prvku z UHPC. Při zkoumání smykového napětí v soudržnosti hladkých výztuží byl pozorován výrazný nárůst smykového napětí u UHPC ve srovnání s běžným betonem C30/37, a to téměř třínásobný. U hodnocení soudržnosti předpínací výztuže a UHPC byl kromě vlivů extrémních podmínek (působení extrémních teplot, cyklické teplotní namáhání) sledován vývoj smykového napětí

¹⁷ Desky ve výrobní poloze mají povrch s usměrněnými vlákny u dolního povrchu (namáhaného v tahu), kdežto prvky obrácené mají usměrněná vlákna v místě tlakového namáhání.

¹⁸ S nárůstem tahové pevnosti ve směru určeném rovinou formy je nutné počítat s obdobným úbytkem pevnosti v ostatních směrech. V předpisu [26] toto lze postihnout s využitím koeficientu k_F , který zohledňuje vliv okrajových podmínek na výslednou pevnost UHPC v daném směru.

¹⁹ Pro porovnání je v předpisu [26] uvedena minimální kotevní délka žebírkové výztuže jako 10 průměrů výztuže, pro dynamicky namáhané prvky 15 průměrů.

v soudržnosti v čase. Bylo ověřeno, že ve stáří vzorků 2 dny je dosaženo 60 % napětí v soudržnosti v čase 28 dní. [89]

Zvláštní výsadou UHPC je minimální nasákavost povrchu. Při stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou (např. dle [16]) jsou získávány hodnoty průsaku kolem 5 mm. Důsledkem toho je výrazně vyšší odolnost materiálu vůči vlivům okolního prostředí. U prvků z UHPC s vyztužením běžnou²⁰ či předpínací výztuží lze obecně použít menší tloušťku krycí vrstvy této výztuže.²¹ Menší krytí může mít dopad na použití dodatečné výztuže, které je nutné při aplikaci většiny kotevních přípravků předem zabudovávaných do konstrukce. Vzhledem k parametrům UHPC lze navrhovat subtilní konstrukční prvky, dílce malé tloušťky apod., což souvisí s potřebou využít kotevní systémy adekvátní velikosti. Vzhledem k menším nárokům na krytí [25] a možnostem redukce kotevních délek výztuže [89] vznikají vhodné podmínky pro kotvení v konstrukcích z UHPC.²² Blíže k tomuto tématu v části 2.2.7.3.

Při celkovém hodnocení konstrukcí z materiálu UHPC jistě nelze opomenout další významné vlastnosti UHPC, jejichž podrobnější rozbor je však nad rámec a mimo zaměření této práce.

²⁰ Někdy označovaných také jako R-UHPC, resp. R-UHPFRC.

²¹ Dle předpisu [26] jsou hodnoty krytí z hlediska soudržnosti pro žebírkovou výztuž min. 20 mm (pro třídy prostředí X0 až XC4), resp. 25 mm, dále krytí soudržné předpínací výztuže min. 35 mm a krytí kabelového kanálku min. 50 mm.

²² Na druhé straně však stojí problém samotného návrhu kotvení, který souvisí s nedostatkem podkladů na straně výrobců kotevních systémů a absencí normových postupů pro UHPC.

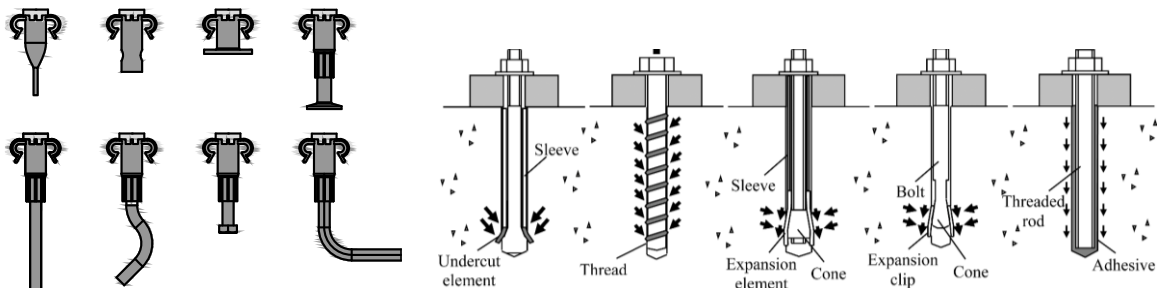
2.2. Kotvení v betonových konstrukcích

Kotvením nebo kotevními oblastmi jsou v kontextu této práce chápány části betonové konstrukce sloužící k přenosu lokálního zatížení, které působí zpravidla na povrchu betonového prvku, a přenos zatížení probíhá převážně s využitím dalšího, do betonu vkládaného prvku (kotvy, šroubu, ocelového přípravku, vložky atp.).

Tato část shrnuje dosavadní poznatky z problematiky kotvení v betonových konstrukcích. Snahou bylo rámcově zmapovat vývoj postupů, které byly a jsou používány pro navrhování a posuzování kotevních oblastí v betonu. Zmíněna jsou specifika, která přináší použití betonů vyšších pevností, drátkobetonu a v neposlední řadě HPC a UHPC. Dále jsou uvedeny zvláštnosti, které různou měrou ovlivňují vlastnosti kotvení, a to ve vztahu ke studované problematice kotvení v materiálu UHPC.

2.2.1. Obecně

Vzhledem k technologickému způsobu zabudování můžeme kotevní prostředky rozdělit na předem umístěné (které jsou nejprve vloženy do formy nebo do bednění betonového prvku a až následně je provedena betonáž) a na dodatečně instalované (umístěné do předvrtaného otvoru zpravidla kolmo k betonovému, či zděnému povrchu). Ukázky obou typů jsou na následujícím obr. 11. Dodatečně instalované kotvy lze dále dělit na prostředky kotvené mechanicky a chemicky. Předem umístěné kotvy se velmi často využívají v prefabrikovaných prvcích při manipulaci a montáži dalších prvků. Dodatečně instalované prostředky jsou používány především ke kotvení prvků rozličného způsobu využití.



Obr. 11 Příklady předem (vlevo) a dodatečně (vpravo) instalovaných kotevních prostředků [48]

Z hlediska přenosu statického a dynamického zatížení z kotevního prostředku do kotevní oblasti konstrukčního prvku lze rozlišit tři různé mechanismy:

- *uzamknutí* (mechanical interlock), při kterém dochází k mechanickému uzamčení mezi vloženým kotevním přípravkem a betonovým podkladem [43],
- *tření* (friction), přenos zatížení třecími silami mezi přípravkem a betonovým povrchem,
- *chemická vazba* (chemical bond), k přenosu zatížení dochází díky vazbám mezi přípravkem a maltou či lepidlem, stejně tak jako mezi maltou/lepidlem a stěnami otvoru v betonu. [53]

Přenos zatížení je zprostředkován jedním z výše uvedených způsobů, případně jejich kombinací. Ve všech případech vyvolává vnější zatížení tahové namáhání v betonu [42].

2.2.2. Princip porušení

Kotevní prostředky mohou být vystaveny dvěma základním způsobům namáhání: tah a smyk.²³ Při těchto způsobech namáhání je chování kotevních oblastí odlišné a nastávají rozdílné způsoby porušení, shrnuto dle Eurokódu 1992-4 [5] v následující tabulce (tab. 4). Módy porušení při tahovém namáhání předem instalovaných kotev jsou: porušení ocelové kotvy, vytržení kuželu betonu, vytržení kotvy, kombinované porušení (2 a 3), porušení betonového prvku, vylomení betonu. [5]

Únosnost ocelové kotvy se odvíjí od pevnosti oceli a průřezové plochy kotevního přípravku. K porušení ocelové kotvy dochází při větších kotevních hloubkách, kdy kapacita betonového kuželu přesahuje únosnost oceli. *Vytržení kuželu betonu* je nejčastější a nejvyžadovanější způsob porušení kotevní oblasti. Vytržení kuželu nastává při dostatečné tahové kapacitě ocelové kotvy a při vyčerpání tahové pevnosti betonu. K *vytržení kotvy z betonu* dochází převážně u mladého betonu při nedostatečném náběhu pevnosti [42], nebo v menších kotevních hloubkách (h_{ef}). K *porušení betonového prvku* dochází při zabudování kotvy v tenkém betonovém prvku nebo v případech, kdy je namáháno více kotev, které jsou zabudovány v těsné blízkosti vedle sebe. *Vylomení betonu* nastává u kotev s větší kotevní hloubkou h_{ef} , jež jsou umístěny v blízkosti volného konce betonového prvku.

Tab. 4 Módy porušení kotevních oblastí²⁴

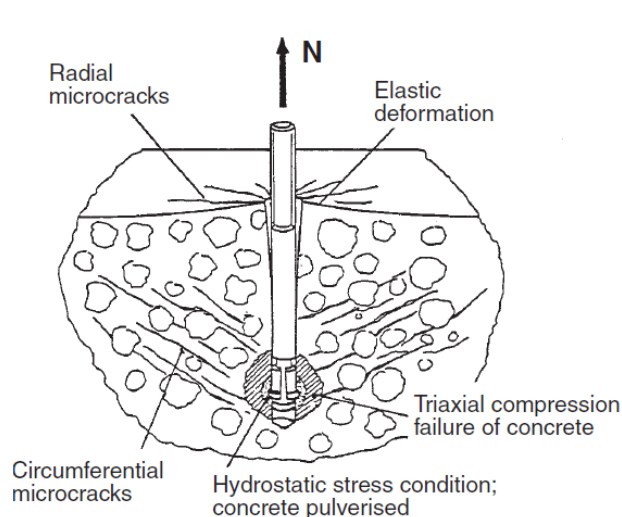
Č.	Způsob porušení	Ozn.	Schéma	Č.	Způsob porušení	Ozn.	Schéma
TAH				SMYK			
1.	Porušení oceli	$N_{Rk,s}$		1.	Ustříhnutí ocelové kotvy	$V_{Rk,s}$	
2.	Vytržení kuželu betonu	$N_{Rk,c}$		2.	Porušení ocelové kotvy (síla na rameni)	$V_{Rk,s,M}$	
3.	Vytržení kotvy	$N_{Rk,p}$		3.	Vylomení betonu	$V_{Rk,cp}$	
4.	Kombinované porušení (2 a 3)	$N_{Rk,p}$		4.	Porušení okraje betonu	$V_{Rk,c}$	
5.	Porušení betonového prvku	$N_{Rk,sp}$		TAH A SMYK			
6.	Vylomení betonu	$N_{Rk,cb}$		1.	Porušení pomocné výztuže	$N_{Rk,re}$	-
				2.	Ztráta soudržnosti výztuže	$N_{Rk,a}$	-

Kotvení v betonu představuje specifický druh lokálního namáhání, kdy je do poměrně malé části betonové konstrukce koncentrováno vysoké napětí. Napětí vznikající na rozhraní tahem namáhaného kotevního prvku a betonu (v oblasti přenosu zatížení) může při

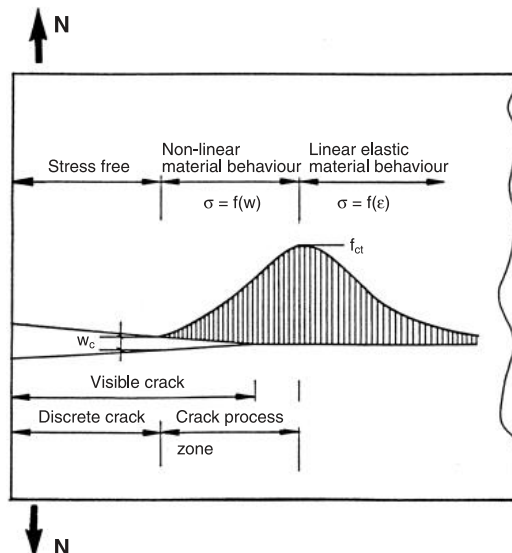
²³ Namáháním ve smyku je myšleno namáhání kolmo na směr zabudování kotevního přípravku. Namáhání kotevních prostředků může být složitější, a to například při namáhání skupiny kotev, kdy dochází k přerozdělování zatížení mezi jednotlivé kotvy na základě tuhosti nadkotevní konstrukce [60], nebo může být vlivem poddajnosti této konstrukce vnášeno do kotev další namáhání od páčení. [42]

²⁴ Shrnuto na základě ČSN EN 1992-4 [5].

působení provozního zatížení přesáhnout pevnost betonu. V důsledku toho začínají vznikat v betonu mikrotrhliny. První mikrotrhliny začínají vznikat v okolí hlavy šroubu již při 30 % maximálního zatížení,²⁵ přičemž v počáteční fázi se trhliny šíří pod úhlem přibližně 15 až 20 stupňů. [50]



Obr. 12 Znárodnění mechanismu porušení expanzní kotvy odvozené z numerické analýzy [42]



Obr. 13 Rozdělení napětí pro případ šířící se trhliny [42]

S rostoucím zatížením se mikrotrhliny šíří stabilní rychlostí až do mezního zatížení. Chování betonu namáhaného tahem ve spojení s gradientem deformace, který se vyskytuje v oblasti přenosu zatížení kotvy, lze popsat modelem fiktivní trhliny (dle obr. 13).²⁶ Šíření obvodových trhlin je doprovázeno vznikem radiálních trhlin na povrchu betonu směřujících od kotevního prostředku (obr. 12). Stabilní růst trhliny je dán neúměrným nárůstem objemu betonu mobilizovaného v lomové procesní zóně s propagující se trhlinou a přerozdělením tahového napětí přes mikrotrhliny. Za hranicí maximálního zatížení se růst trhliny stává nestabilním a vytváří se konečný betonový kužel. S rychlým nárůstem deformace klesá tahová kapacita kotevní oblasti.

Úhel kuželu se mění v závislosti na receptuře betonu a dalších proměnných. V průměru dosahuje přibližně 35°, měřeno vzhledem k rovině kolmé k ose kotvy. Úhel má tendenci se zvětšovat s rostoucí kotevní hloubkou.²⁷ V následující oddílech jsou blíže popsána specifika kotvení ve vybraných typech betonu a mimo jiné i se zaměřením na úhel betonového kuželu.

²⁵ Vznik a šíření prvotních mikrotrhlin nejsou pozorovatelné na povrchu betonového prvku. K analýze těchto trhlin byly využity metody, při níž byly rozřezávány zkušební vzorky předem vystavené postupnému zatěžování.

²⁶ Při kritické šířce trhliny w_c je okraj trhliny bez napětí, tj. existuje diskretní trhlina. Poté následuje procesní zóna vzniku trhliny, která vykazuje nelineární chování betonu, v němž tahové napětí závisí na šířce trhliny. Mimo tuto zónu se beton chová lineárně-elasticky a tahové napětí závisí na deformaci betonu. V maximu se rovná jednoosé pevnosti v tahu.

²⁷ Shrnuto na základě [42].

2.2.3. Běžný beton (NC)

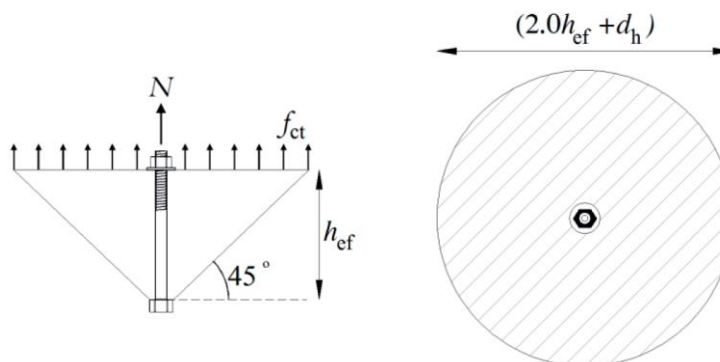
2.2.3.1. První studie

V průběhu 70. a 80. let minulého století vznikaly první modely popisující chování předem instalovaných kotev v betonu. Do americké normy (ACI 349-85) [1] byl implementován model založený na studii Cannona [28], přičemž únosnost betonového kuželu byla stanovena rovnicí (2.4). Model využívá tlakovou pevnost betonu, průměr hlavy a hloubku kotvy. Model počítá s úhlem roznosu zatížení 45° (obr. 14). Metoda je někdy označována jako *Model 45° kuželu* a vztah (2.4) přímo vychází z povrchu komolého kuželu, který je násoben tahovou pevností betonu.²⁸

$$N_u = 0,3 \cdot f_{cc}^{0,5} \cdot \pi \cdot h_{ef}^2 \cdot (1 + d_h/h_{ef}) \quad (2.4)$$

N_u značí únosnost betonového kuželu, f_{cc} je tlaková pevnost betonu, d_h je průměr hlavy kotvy, h_{ef} je hloubka kotvy.

Později bylo sérií experimentů poukázáno na fakt, že návrhové přístupy založené na závislosti h_{ef}^2 nadhodnocují únosnost kotev v rozsahu běžně používaných hloubek zapuštění. [41]

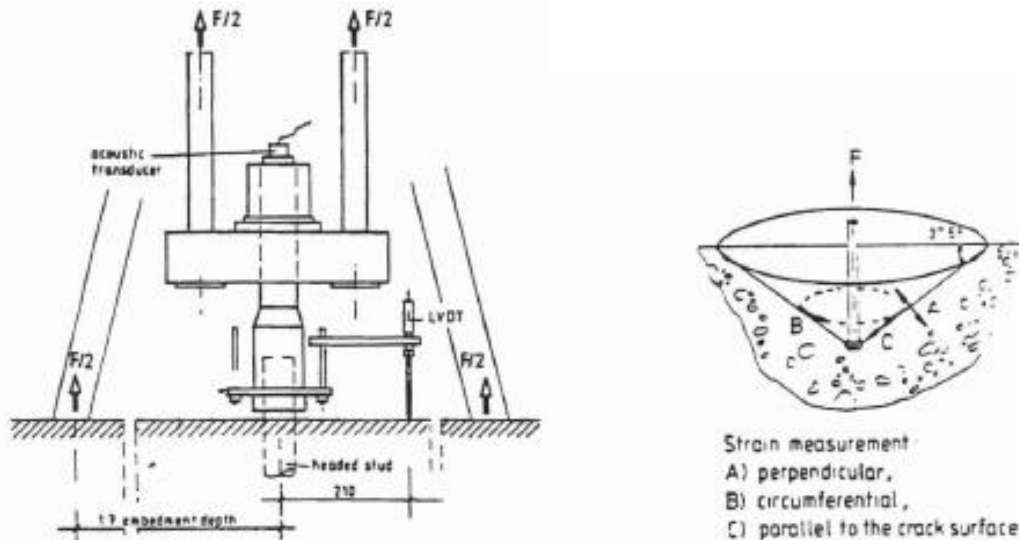


Obr. 14 Tvar vytrženého kuželu podle modelu 45° [63]

2.2.3.2. Studie založené na lomové mechanice

Podle Eligehausena a Sawade [27] závisí tahová kapacita kotvení na modulu pružnosti E_c a na lomové energii G_f , které výstižněji popisují složení betonu, a nikoli na tahové (nebo tlakové) pevnosti betonu. V rámci experimentální studie (obr. 15) byly testovány kotvy zabudované v hloubce od 130 mm do 520 mm, z čehož plyne, že vhodně popisuje chování hlouběji zapuštěných kotev. Výsledkem je vztah (2.5) pro predikci únosnosti betonového kuželu založený na lineární lomové mechanice (LEFM). V rámci studie byl zjištěn průměrný úhel roznosu zatížení $37,5^\circ$, tj. sklon betonového kuželu. Pro jistou nepraktičnost, kterou způsoboval člen $E_c \cdot G_f$ (zejména stanovení těchto parametrů betonu E_c a G_f), nedošlo k praktickému rozšíření této metody.

²⁸ Tahová pevnost zde zohledněna jako $f_{ct} = f_{cc}^{0,5}$.



Obr. 15 Zkušební sestava a způsob měření přetvoření na vzorcích kotvení dle Eligehausena a Sawade [27]

$$N_u = 2,1 \cdot \sqrt{E_c \cdot G_f} \cdot h_{ef}^{1,5} \quad (2.5)$$

2.2.3.3. Vliv rozměrového efektu

Tzv. rozměrový efekt, o jehož popis se zasloužil prof. Zdeněk Bažant, vystihuje chování betonu vystaveného tahovému namáhání. Při mezním zatížení není tahové napětí podél lomové plochy konstantní, ale snižuje se při zvětšování lomové plochy. Rozměrový efekt je obecný jev, který je pozorován u betonových prvků vystavených gradientu tahového namáhání.²⁹ Bažant [30] uvádí, že k určení mezního zatížení prvků menších rozměrů může být použita teorie plasticity, naopak pro rozměrnější prvky lineární lomová mechanika. [31]

Uplatnění rozměrového efektu při porušování betonového kuželu je popsáno rovnicí (2.6), jež byla pro praktičtější použití sestavena autory Eligehausenem a Ožboltem. [29] Rovnice je modifikací vztahu (2.5), kdy došlo mj. k nahrazení lomové houževnatosti ($E_c \cdot G_f$) tlakovou pevností betonu.

$$N_u = \frac{k_1 \cdot f_{cc}^{0,5} \cdot h_{ef}^2}{\sqrt{1 + h_{ef}/h_{ef}^0}} \quad (2.6)$$

Koeficienty $k_1 = 2,7$ a $h_{ef}^0 = 50 \text{ mm}$ byly určeny na základě zkoušek. Pro větší kotevní hloubky únosnost dle rovnice (2.6) odpovídá $h_{ef}^{1,5}$, viz srovnání jednotlivých modelů v grafech níže (obr. 17).

2.2.3.4. Concrete Capacity Design

Z provedených numerických výpočtů a experimentálních zkoušek bylo zřejmé, že model 45° kuželu výrazně nadhodnocuje tahovou únosnost kotev s velkou hlavou, protože zanedbává vliv rozměrového efektu na únosnost kotvy. Proto byl Fuchsem a kol. [44]

²⁹ Důsledky rozměrového efektu lze mj. pozorovat při zkouškách pevnosti UHPFRC, pro které je typické použití více různých druhů zkušebních těles. [33] Typické jsou rozdíly při zjišťování pevností v tahu za ohybu na škále těles od malých trámek 40×40×160 mm [10], přes trámce 100×100×400 mm až po 150×150×700 mm [9].

formulován uživatelsky přívětivý systém pro určení tahové kapacity kotvení, který vycházel z velkého počtu experimentů provedených v Evropě a v Severní Americe. Databáze obsahovala výsledky zkoušek s variantním provedením kotev v různých efektivních hloubkách zabudování.

Metoda CCD³⁰ (Concrete Capacity Design) využívá náhradu – tlakovou pevnost betonu f_c za kombinaci E_c a G_f z rovnice (2.5) a zároveň zachovává rozměrový efekt ($h_{ef}^{1,5}$). V porovnání s předchozími metodami vychází z úhlu porušení kuželu 35° (obr. 16). [44] Rozšířený tvar rovnice pro určení kapacity betonového kuželu dle metody CCD je následující:

$$N_u = k_1 \cdot \sqrt{f_c} \cdot k_2 \cdot h_{ef}^{2,0} \cdot k_3 \cdot h_{ef}^{0,5} \quad (2.7)$$

Rozbor jednotlivých členů rovnice (2.7) lze chápat tak, že:

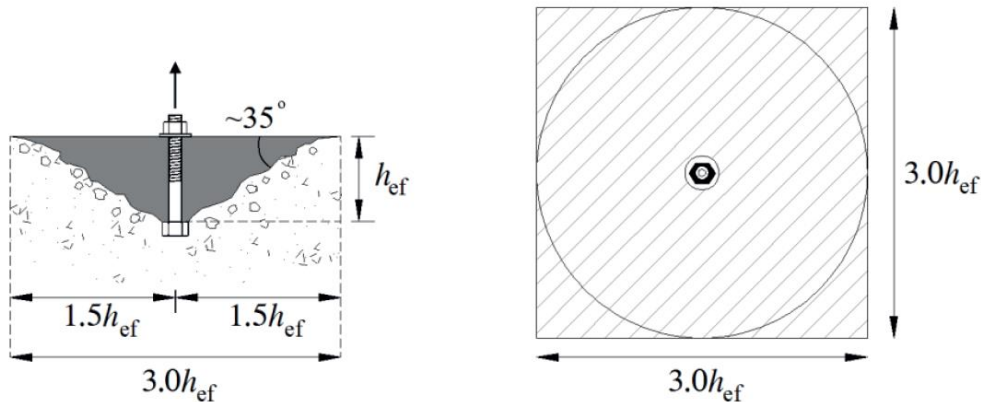
- $k_1 \cdot \sqrt{f_c}$ představuje nominální tahovou pevnost betonu,³¹
- $k_2 \cdot h_{ef}^{2,0}$ představuje geometrickou podstatu pravoúhlé základny,
- $k_3 \cdot h_{ef}^{0,5}$ reprezentuje maximální rozměrový efekt dle Bažanta (rovnice (2.6)).

Celkové zjednodušení vztahu do rovnice (2.8) je uživatelsky přívětivé. [46]

$$N_u = k \cdot \sqrt{f_c} \cdot h_{ef}^{1,5} \quad (2.8)$$

$$k = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3$$

Koeficient k slouží k rozlišení betonu s trhlinami a bez trhlin, a také k rozlišení kotvení předem či dodatečně.³²



Obr. 16 Tvar a idealizovaná plocha vytrženého kuželu podle CCD [63]

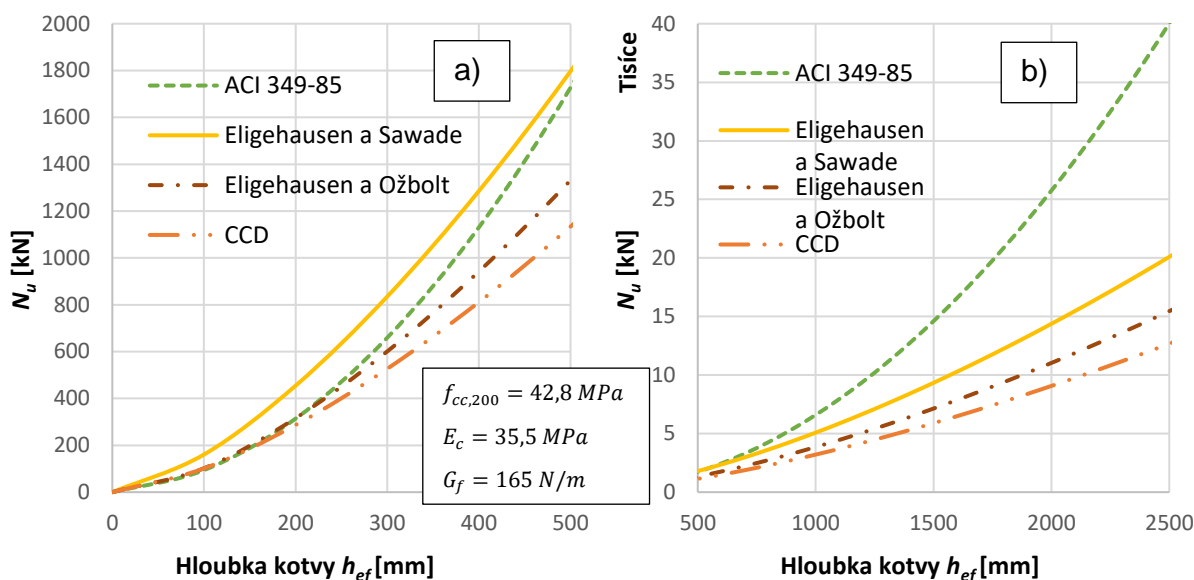
Model je určen pro předem i dodatečně zabudované kotvy, což vše přispělo ke značnému rozšíření metody CCD, která je obsažena mj. v Eurokódu 1992-4 [5], bulletinu 58 fib [6] nebo CEB-FIP [7]. Tyto publikace proto nejsou v této části dále zmiňovány.

³⁰ Označení CCD je využíváno především v USA, lze se setkat i se zkráceným označením CC (Concrete Capacity) method.

³¹ Princip stanovení mezního zatížení dle CCD na první pohled nesouvisí s popisem založeným na lomové mechanice, protože nezavádí závislost na lomových charakteristikách betonu. Závislost je nicméně ukryta ve členu $\sqrt{f_c}$. Metoda CCD je založena na předpokladu, že modul pružnosti betonu E_c je úměrný $f_c^{0,3}$ a lomová energie G_f je úměrná $f_c^{0,7}$, pak lze snadno prokázat, že tlaková pevnost f_c je úměrná součinu $E_c \cdot G_f$. [46] Pro běžné betony (bez výtuzných vláken) je tento způsob určení únosnosti povětšinou vyhovující a lze jím tak aproximovat výpočet využívající tahovou pevnost betonu.

³² Koeficient $k=16,8$ pro beton bez trhlin, $k=11,8$ pro beton s trhlinami.

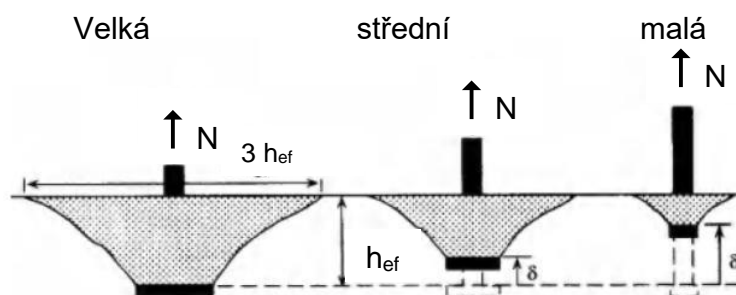
Na obr. 17 jsou porovnány jednotlivé modely pro predikci únosnosti betonového kuželu, které byly popsány rovnicemi (2.4) až (2.8), přičemž část a) zobrazuje menší kotevní hloubky do 500 mm a v části b) jsou hloubky kotvení od 500 mm.



Obr. 17 Porovnání modelů pro predikci únosnosti betonového kuželu, závislost zatížení na efektivní hloubce³³

2.2.4. Tvar a velikost kotevního prostředku

Předem zabetonované kotevní prostředky mají různou podobu. Často se jedná o tyčový prvek s rozšířenou patou neboli hlavou. Rozměr hlavy logicky zásadně ovlivňuje únosnost ale i další mechanické vlastnosti kotvení. [46] Chování kotev s hlavou vystavených působení tahového zatížení podrobně zkoumal Furche [45]. Popsal model pro stanovení únosnosti betonového kuželu jako funkci napětí b_p pod hlavou kotvy. Pokud je plocha hlavy dostatečně velká, odolnost betonového kuželu není ovlivněna lokálním drcením betonu. Naopak menší hlava kotevního prostředku vede ke snížení účinné hloubky zapaštění v důsledku snížení únosnosti betonu, kdy dochází k podrcení betonu pod hlavou (obr. 18).



Obr. 18 Znárodnění porušeného betonového kuželu pro různé velikosti hlavy kotvy [46]

Vztah pro určení únosnosti betonového kuželu dle Furcheho [45] je dán rovnicí (2.9). Exponent 1,5 značí, že model zohledňuje (maximální) rozměrový efekt dle [23] a vychází tak z metody CCD podle Fuchse a kol. [44].

³³ Pro porovnání byla použita data z experimentálního porovnání obsahující pevnost v tlaku, modul pružnosti i lomovou energii běžného betonu. [69] h_{ef}^0 je voleno jako 50 mm.

$$\begin{aligned}
 N_{u,m} &= \alpha \cdot f_{cc}^{0,5} \cdot (h_{ef} - \delta_u)^{1,5} \\
 \delta_u &= \frac{k_a \cdot k_A}{c_1} \cdot \left(\frac{b_p}{f_{cc}}\right)^2 \\
 k_a &= \sqrt{5/a} \geq 1 \\
 k_A &= \sqrt{d_s^2 + 9(d_h^2 - d_s^2)} - 0,5 \cdot d_h \\
 b_p &= N_{u,m}/A_h
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

δ_u je pokluz kotvy způsobený drcením betonu v oblasti pod kotvou, α je kalibrační součinitel, k_a a k_A jsou součinitele geometrie, c_1 je součinitel pro rozlišení betonu bez trhlin ($c_1 = 600$) a s trhlinami ($c_1 = 300$), b_p je napětí pod hlavou kotvy, a je vyložení hlavy kotvy, d_h je průměr hlavy.

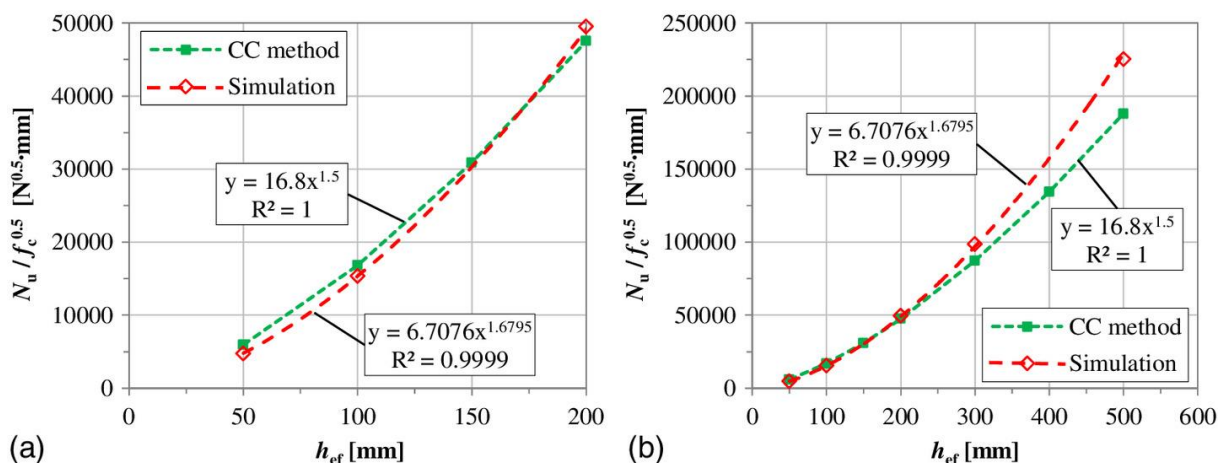
Vliv velikosti kotvy byl zaveden ještě dříve do vztahu (2.4) publikovaného Cannonem [28], viz část 2.2.3.1. Tento přístup je však odlišný od Furcheho [45] a zakládá se na stanovení únosnosti pomocí součinu pevnosti a plochy komolého kuželu, kde menší podstava kuželu představuje hlavu kotevního prostředku. Tato metoda nezohledňuje rozměrový efekt a v některých případech nadhodnocuje únosnost betonového kuželu. [31]

Na základě rozsáhlé numerické analýzy a zkoušek modifikoval Nilforoush a kol. [47] vztah (2.8), který původně definovali Fuchs a kol. [44] v rámci CCD pro určení únosnosti betonového kuželu. Práce [47] byla motivována neshodou výsledků experimentálních měření a numerických analýz s výsledky CCD. Při změně výšky konstrukčního prvku a velikosti kotevního prvku bylo zaznamenáno podhodnocení únosnosti kotev s $h_{ef} > 280$ mm a zároveň nadhodnocení únosnosti kotev v menších kotevních hloubkách, což je znázorněno na obr. 19. Nilforoush a kol. [47] proto navrhl tvar rovnice (2.10), která zohledňuje vliv výšky konstrukčního prvku s kotvou, velikost napětí pod hlavou a tím i vliv velikosti hlavy kotvy a vyztužení prvku.

$$\begin{aligned}
 N_{u,m} &= N_{u,m}^{code} \cdot \psi_H \cdot \psi_{AH} \cdot \psi_{Sr} \\
 N_{u,m}^{CCD} &= k \cdot f_{cc}^{0,5} \cdot h_{ef}^{1,5} \\
 \psi_H &= \left(\frac{h}{2,0 \cdot h_{ef}}\right)^{0,25} \leq 1,20; \text{ pro prvky bez doplňkové výztuže } \psi_H = 1,0 \\
 \psi_{AH} &= \left(\frac{A_b}{A_b^{code}}\right)^{0,1}; \\
 \psi_{Sr} &= \begin{cases} 1,35 \left(\frac{h_{ef}}{H}\right)^{0,25} \leq 1,20 & \text{pro } H \leq 3,0 \cdot h_{ef} \\ 1,0 & \text{pro } H > 3,0 \cdot h_{ef} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

V rovnici je pomocí součinitelů ψ_H a ψ_{Sr} zaveden vliv výšky konstrukce h a vyztužení. Součinitelem ψ_{AH} je zaveden vliv rozměrů kotvy. A_b^{code} je ekvivalentní plocha hlavy kotvy vystavená napětí $\sigma_b = 15 \cdot f_c$:

$$A_b^{code} = \frac{N_{u,m}^{CCD}}{\sigma_b} = \frac{k \cdot f_{cc}^{0,5} \cdot h_{ef}^{1,5}}{15 \cdot f_c} \tag{2.11}$$



Obr. 19 Závislost únosnosti na hloubce h_{ef} – srovnání modelu CCD s numerickou analýzou kotev s malou hlavou dle [47], a) h_{ef} do 200 mm, b) h_{ef} do 500 mm

2.2.5. Vysokopevnostní beton (HSC)

Vysokopevnostní beton je zpravidla definován jako materiál s vysokou pevností v tlaku, která je vyšší než určitá hodnota, a je jakousi podmnožinou vysokohodnotných betonů (HPC). Hodnoty pevnosti v tlaku, které definují HSC, se v různých normových předpisech liší, nicméně mezi HPC se tak obvykle řadí betony s pevností v tlaku v intervalu 50 až 120 MPa. Kromě vysokých pevností v tlaku vykazuje HSC i další výborné materiálové parametry, kterými jsou vyšší modul pružnosti a pevnost v tahu, nižší dotvarování a vyšší trvanlivost. Zmíněné vlastnosti mají dopad na chování kotevních oblastí v HSC.³⁴

Primavera [62] studoval chování kotev zabudovaných v HSC a porovnával tahem namáhané kotvy v betonu s tlakovou pevností 50 MPa a 80 MPa. U obou materiálů byl zaznamenán úhel roznosu α mezi 21° a 23°.³⁵ Ve studii [62] byla dále porovnávána únosnost a tuhost kotvení v betonech s pevností 50 a 80 MPa. Nárůst únosnosti kotvení byl mezi dvěma materiály cca 10 %, kdežto nárůst tuhosti dokonce 77 %. Výsledky do značné míry korespondují se závěry Eligehausena a Sawade [27], že tahová kapacita kotvení závisí na E_c a G_f , a nikoli na tlakové pevnosti betonu (viz 2.2.3.2). Dle závěrů studie Darwina [65] má nárůst tlakové pevnosti HSC malý vliv na lomovou energii. Charakteristické je stále křehčí chování se vzrůstající tlakovou pevností.

Podobným způsobem zkoušel Nilforoush [64] kotvení předem zabetonované v materiálech s pevností 40 MPa, resp. 80 MPa. V těchto studiích byl zaznamenán úhel roznosu α v rozsahu 25° a 30°. Při srovnání s výzkumem Primavera [62] byl v nárůstu tahové kapacity kotev zaznamenán podobný trend, kdy došlo k 25 % nárůstu únosnosti kotvení mezi betony s pevností 40 MPa a 80 MPa. Uvedené rozdíly v únosnosti plynou pravděpodobně z odlišného kameniva použitého v rámci zmiňovaných výzkumů, kdy Primavera [62] použil vápenec, kdežto Nilforoush [64] čedič.³⁶

Fuhai Li [71] provedl řadu tahových zkoušek na vzorcích z HSC se zabetonovanými spřahovacími trny (obr. 20). Vysokopevnostní beton dosahoval na krychlich 150 mm 28denní pevnosti 88,1 MPa v tlaku a 5,05 MPa v příčném tahu.³⁷ Výsledné únosnosti byly porovnány s modelem predikce CCD. Model CCD s přibývajícím kotevní délkou h_{ef} nadhodnocuje

³⁴ Shrnuje na základě [35], [36] a [67].

³⁵ Úhel pozorovaný u HSC je tedy ve srovnání s metodami zmiňovanými v části 2.2.3 (např. 35° pro CCD) výrazně menší a vytržený kužel tak rozměrnější.

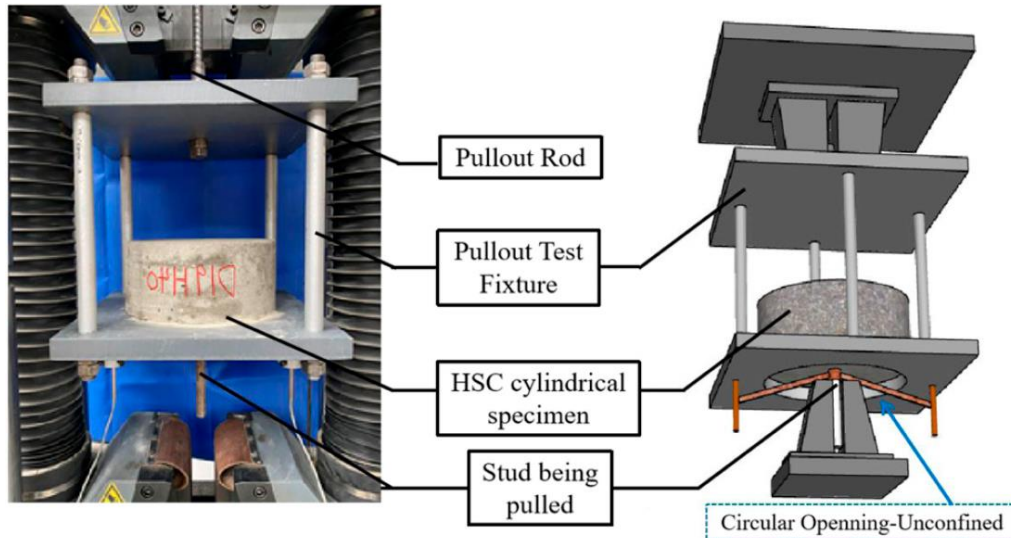
³⁶ Receptura HSC v žádném ze zmiňovaných výzkumů neobsahovala výztužná vlákna.

³⁷ Při přepočtu z krychle 150 mm na krychli 200 mm je pevnost v tlaku 83,7 MPa.

únosnost kotev zabudovaných v HSC, a proto byla navržena úprava modelu reprezentovaná rovnicí (2.12), v níž je zohledněna pevnost v příčném tahu. Tahová pevnost vystihuje lépe než pevnost v tlaku vlastnosti cementových kompozitů. Jedná se především o případy, ve kterých dochází k rozdílnému poměru mezi f_{cc} a f_{ct} při úpravě receptury.³⁸

$$N_u = k_t \cdot f_{ct,sp} \cdot h_{ef}^{1,5} \quad (2.12)$$

$$k_t = 24,5$$



Obr. 20 Schéma sestavy při zkoušce kotvení v HSC dle [71]

Závěrem lze ke kotvení v HSC podotknout, že predikovaná únosnost kotev zabudovaných v HSC s využitím modelu CCD (2.2.3.4) může být nadhodnocena, a to až o 20 % pro beton s pevností 80 MPa, kdežto pro beton s pevností 50 MPa je únosnost nadhodnocena pouze o cca 3 %. [62] Zmíněné odchylky lze vysvětlit pomocí výše zmiňovaných studií Eligehausena a Sawade [27] a Darwina [65]. Li [58] sestavil rovnici (2.12) na základě CCD metody. V tomto ohledu by bylo vhodné na poli kotvení ve vysokopevnostním betonu provést další zpřesňující výzkum.

2.2.6. Vlákobeton (FRC a HPFRC)

Tento oddíl je věnován kotvení v betonech, jejichž matrice je doplněna výztužnými vlákny. Blíže je nahlédnuto na materiály označované například jako Fiber Reinforced Concrete (FRC)³⁹ a High Performance Fiber Reinforced Concrete (HPFRC). Vlastnosti betonu se mohou po přidání výztužných vláken dramaticky proměnit. Při doplnění matrice betonu o ocelová vlákna se z křehkého materiálu se zanedbatelnou pevností v tahu může stát beton umožňující přenos zatížení i po vzniku trhliny. Po vzniku trhliny dochází k aktivaci výztužných vláken. Dochází tak k formování mikrotrhlin a oddaluje se proces propagování trhlin. Přidání vláken má obecně pozitivní vliv také na další vlastnosti ztvrdlého betonu jako jsou duktilita, tuhost nebo odolnost proti vlivům prostředí. [67] Použití vláken zásadním způsobem ovlivňuje parametry čerstvé směsi betonu, a to především konzistenci, která je měřitelná pomocí celého spektra zkoušek od sednutí kužele [12] po zkoušku rozlití [13], a to v závislosti na typu betonu a použitých vláknech. Je nezbytné ověřit schopnost směsi

³⁸ Jednou z modifikací receptury betonu je přidání vláken, čemuž se dále věnují oddíly 2.2.6 a 2.2.7.

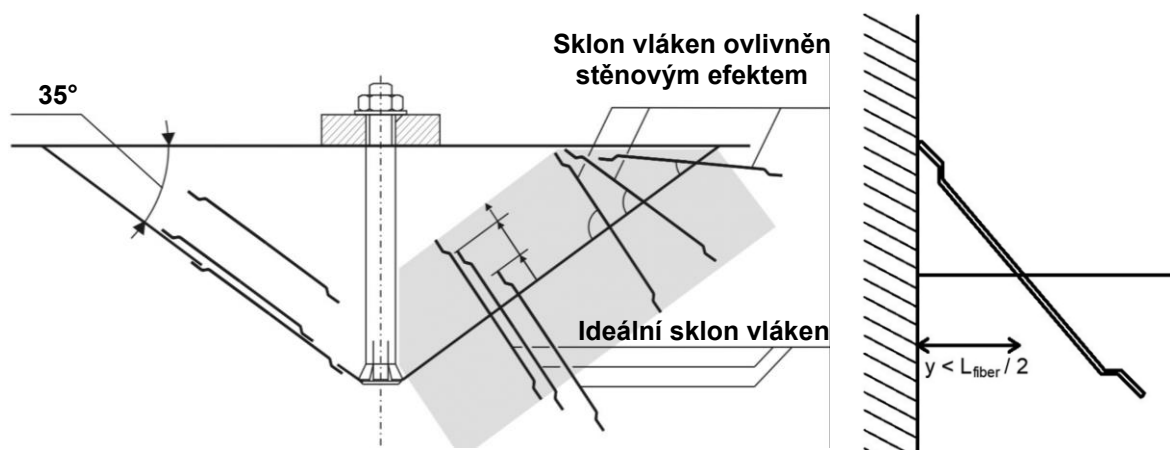
³⁹ Označením FRC je chápáno jako běžný beton doplněný výztužnými vlákny. Viz poznámky k terminologii.

obsahující vlákna protékat bedněním či formou a také probetonovat armaturu případně další prvky, vč. kotevních.

Při použití vláken vznikají nároky na homogenitu distribuce vláken v rámci konstrukce. Je vyvinuto několik metod pro hodnocení distribuce vláken uvedených např. v disertační práci Rydvala [55]. Gettu [54] ve své teoretické práci o rozložení vláken v betonu zmiňuje kromě distribuce také problém orientace vláken. Metody hodnocení rozložení výztužných vláken jsou většinou založeny na kvantifikaci vláken v sektorech řezné plochy betonového prvku. Přidání vláken může různými způsoby ovlivnit vlastnosti kotevních oblastí a je nutné toto zohlednit při návrhu kotvení.

Při kontaktu čerstvé směsi drátkobetonu s formou či bedněním dochází k usměrňování vláken, pro což se užívá termín *stěnový efekt* (wall effect). Oblast betonu ovlivněná stěnovým efektem je dle Tótha [60] do vzdálenosti poloviny délky vlákna,⁴⁰ tedy $y < \frac{L_f}{2}$, jak je znázorněno na obr. 22. V souvislosti se stěnovým efektem popisuje Klug [52] minimální efektivní délku h_{ef} kotevního přípravku pomocí rovnice (2.13). Studie je v souladu s metodou CCD založena na úhlu roznosu zatížení 35° (obr. 21). Při umístění kotvy v menší hloubce dochází k ovlivnění únosnosti kotevní oblasti v důsledku stěnového efektu, což koresponduje s tvrzením Tótha. [60]

$$h_{ef} \geq \frac{L_f}{2} \quad (2.13)$$



Obr. 21 Rozložení ocelových vláken v FRC podél lomové plochy betonového kuželu (dodatečné kotvení) [52]

Obr. 22 Rozsah stěnového efektu v FRC dle [60]

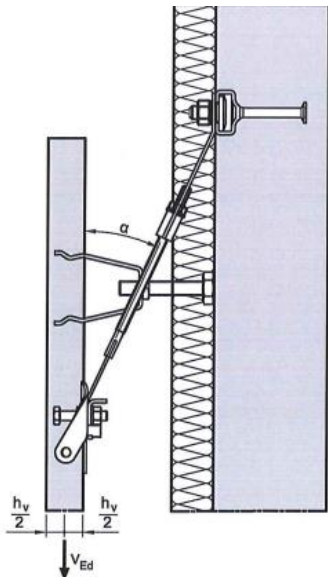
Holschemacher a kol. [53] provedli tahové a smykové zatěžovací zkoušky s různými typy dodatečně instalovaných kotev v NC a v FRC. Hloubka zapuštění zkoušených kotev se pohybovala mezi 50 a 60 mm. U testovaných typů kotev nebylo zaznamenáno žádné zvýšení mezního zatížení a byl učiněn závěr, že konstrukční chování kotevních prvků se v FRC ($L_f = 35$ mm, zvlněná ocelová vlákna a $L_f = 50$ mm, $d_f = 0,8$ mm hákovitá ocelová vlákna) ve srovnání s běžným betonem nezlepšuje. Ve většině případů se však pozorovaný způsob porušení kotvení lišil od módu porušení betonu, a proto nebylo možné prokázat příznivé účinky FRC na únosnost kotvení. Autoři navíc předpokládali, že orientace vláken byla ovlivněna stěnovým efektem a podstatná část byla orientována rovnoběžně s povrchem dílce (kolmo na směr namáhání kotvy). V důsledku toho nebylo množství

⁴⁰ V rámci studie Tótha [60] byly využita ocelová vlákna s délkou 35 mm a štíhlostním poměrem 47.

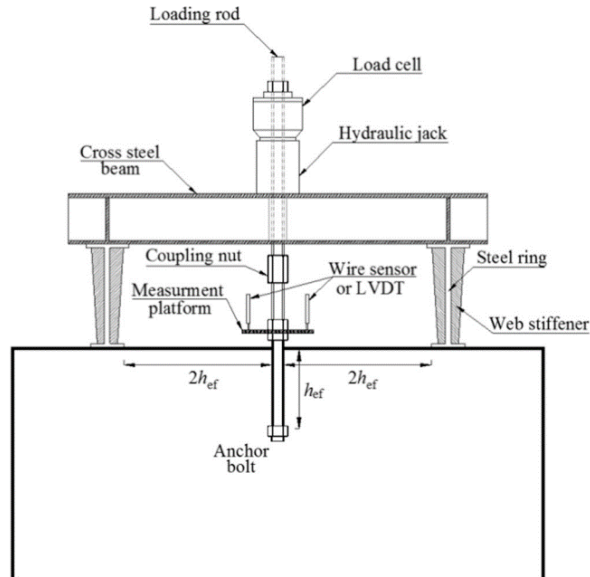
vláken, která zasahovala do lomové plochy betonu, dostatečné pro zlepšení parametrů kotvení.

Kurz a kol. [56] zkoumali chování čtyř různých typů kotevních prostředků (lepené kotvy, rozpěrné kotvy, lepená rozpěrná kotva, šroub do betonu) při zatížených tahem v NC a ve FRC. Hloubka h_{ef} se pohybovala mezi 65 a 75 mm. Mezi sledovanými způsoby porušení byly vytažení kotvy, porušení oceli a vytržení betonového kuželu. Při zkouškách lepených kotev s poměrem $h_{ef}/d_s = 5,8$ bylo dosaženo vytržení betonového kuželu a zvýšení mezního zatížení přidáním 25 resp. 60 kg/m³ vláken do základní směsi činilo 17, resp. 23 %. Kurz a kol. v [56] došli k závěru, že obsah ocelových vláken ($L_f = 60$ mm, $d_f = 0,75$ mm) nemá významný vliv na únosnost a chování dodatečně instalovaných kotev.

Podrobná experimentální studie zaměřená na ověření vlastností kotevních prostředků v tenkostěnných fasádních prvcích z HPFRC byla zpracována Grzesiakem a kol. [57]. Práce byla zaměřena na sledování vlivu objemového zastoupení PVA vláken v_f v matrici HPC na únosnost kotvení. Byly použita vlákna s rozměry $d_f = 0,7$ mm a $L_f = 30$ mm a v dávkách 10, 15, 25 a 35 kg/m³. Jako kotvy byly testovány přípravky z komerčně dostupného systému pro fasádní prvky. [90] Schéma fasádního dílce s dvěma typy kotev je na obr. 23. Kotevní hloubka h_{ef} byla 25 nebo 26 mm, podle typu použité kotvy. Ačkoli byl zaznamenán prokazatelný nárůst tahové únosnosti kotvení při zvyšování v_f , nebyly provedeny doprovodné zkoušky tahové pevnosti.⁴¹ Výsledky prokázaly obecně pozitivní vliv zvětšování množství vláken (v_f) na tahovou únosnost kotev a na jejich chování v po vzniku trhliny. Lze se domnívat, že při použití vláken s $L_f = 30$ mm v kombinaci s kótami o menší kotevní hloubce ($h_{ef} < L_f$) není v takové aplikaci zcela využít potenciál vláknobetonu. Při použití kratších vláken (s podobnou štíhlostí L_f/d_f) lze očekávat vyšší nárůst únosnosti při stejném v_f , což je vhodným námětem na rozšiřující experimentální výzkum.



Obr. 23 Kotevní prostředky testované v rámci studie [57], převzato z [90]



Obr. 24 Schéma zkoušky při ověřování kotev zabetonovaných v NC, HPC, FRC a HPFRC, Nilforoush a kol. [64]

Nilforoush [64] ve svém výzkumu porovnával vlastnosti předem zabudovaných kotev v FRC a HPFRC. Pro vzájemné porovnání byly doplněny vzorky z betonů bez výztužných vláken (NC a HPC (viz 2.2.5)). Kotvy stejného průměru $d_s = 36$ mm byly zabetonované

⁴¹ Provedeny byly pouze zkoušky pevnosti v tlaku na krychlích o hraně 100 mm, které ukázaly pokles pevnosti při zvýšení v_f , a to od 90,9 do 81,9 MPa, pro v_f od 10 do 35 kg/m³. Stáří vzorků bylo 32 dní, v některých případech 33 dní.

v totožné efektivní hloubce 220 mm. Vzorky se lišily jednak recepturou použitého betonu a také výškou vzorku (od 330 do 660 mm). Schéma zkoušky je na obr. 24. V FRC a HPFRC došlo s přídatkem 80 kg/m³ ocelových vláken ($L_f = 60$ mm, $d_f = 0,92$ mm, vlákna se zahnutými konci) k významnému zvýšení tahové únosnosti kotev s hlavou, a to o 27 %, resp. o 43 %. Deformace při maximálním zatížení a také tažnost vykazovaly výrazné zvýšení ve srovnání s chováním kotev v prostém betonu. Nilforoush a kol. v [63] rovněž zjistili, že metoda CCD [44] podhodnocuje únosnost betonového kuželu kotev s hlavou v FRC. Úhel roznosu byl pro FRC 30° až 35°, pro NC 25° až 30°.

Výzkum provedený Tóthem [60] a kol. hodnotil výzkum Nilforoushe a kol. [63] a přinesl další experimentální výsledky pro dodatečně instalované kotvy v FRC. Cílem výzkumu bylo poskytnout modifikační součinitel pro návrh kotev, který by zohlednil vliv výztužných vláken na únosnost kotev. Studie ukázala, že součinitel γ_{fiber} může být použit jak pro předem zabetonované, tak pro dodatečně instalované kotvy a pro FRC s obsahem vláken (v_f) v rozmezí od 30 do 80 kg/m³ a délkou L_f od 35 do 60 mm. Rovněž bylo zjištěno, že aby byl přínos FRC znatelný, je třeba, aby minimální h_{ef} nebo vzdálenost kotvy od okraje byly větší než 1,7násobek L_f . Byl navržen modifikační součinitel podle rovnice (2.14). Použití výše uvedeného modifikačního faktoru spolu s modelem CCD (rovnice (2.8) v části 2.2.3.4) vedlo k chybě menší než 6 %.

$$\gamma_{fiber} = 1 + \frac{v_f}{300} \leq 1,25 \quad (2.14)$$

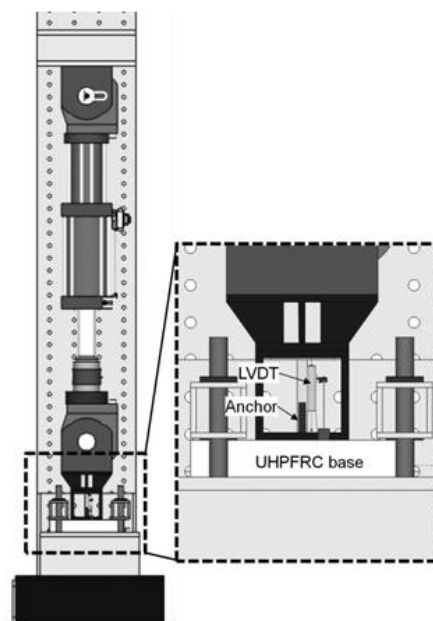
2.2.7. UHPFRC

Existuje několik studií zaměřených na kotvení v kompozitu UHPFRC. V mnohém navazují na práce věnované vláknobetonu FRC a vysokohodnotnému betonu HPC, resp. HPFRC. V rámci tohoto oddílu je kromě souhrnu těchto studií nahlédnuto také na související problematiku spřažených ocelobetonových konstrukcí a na současný stav kotvení v UHPC po praktické stránce.

2.2.7.1. Výzkumné studie – tahové namáhání

Choi [66] sledoval ve své studii vliv hloubky zapuštění kotvy h_{ef} a vzdálenosti kotvy od okraje zkušebního tělesa c_{al} na tahovou a smykovou únosnost kotevní oblasti z UHPFRC. Materiál obsahoval 2,0 % ocelových vláken a dosahoval tlakové pevnosti 199 MPa. Schéma vnášení zatížení při zkoušce kotvení v prostém tahu je na obr. 25. Vzorky byly tvořeny předem zabudovanými kotvami s hlavou v UHPC kvádru s rozměry 600×600×100 mm.

Dílčím výsledkem studie je vztah (2.15) pro predikci únosnosti betonového kuželu, která je založena na tlakové pevnosti materiálu, což je přístup vycházející z CCD metody (viz 2.2.2) vyskytující se ve většině návrhových norem pro kotvení v běžném betonu. Zde byl na základě experimentů odvozen modifikační součinitel zohledňující použití UHPFRC. Podrobnosti zkoušek provedených Choiem [66] jsou uvedeny v tab. 5.



Obr. 25 Princip zatěžování vzorků při tahové zkoušce kotevní v UHPFRC dle studie Choie [66]

$$N_u = 16,74 \cdot \Psi_{UHPRFC} \cdot \sqrt{f_c} \cdot h_{ef}^{1,5} \quad (2.15)$$

$$\Psi_{UHPRFC} = 1,56$$

Fuhai Li a kol. [58] testovali chování kotev v UHPC, UHPRFC s ocelovými vlákny a v UHPRFC s kombinací ocelových a polymerních vláken (obr. 26). Práce obsahuje analýzu vlivu použitého materiálu, průměru kotevních prostředků d_s a kotevní hloubky h_{ef} na mechanické parametry kotevních oblastí, jako jsou únosnost, tuhost a duktilita. Li zohledňuje při stanovení únosnosti kuželu pevnost UHPRFC v příčném tahu $f_{ct,sp}$.⁴² Vztah vychází z předchozích studií [66] a [61] a ze srovnání experimentálně zjištěných a predikovaných únosností betonového kuželu. Studie však neobsahuje dostatečné množství experimentálně podložených dat k plnohodnotné kalibraci modelu, respektive početního vztahu (2.16). Rozsah zkoušek v UHPRFC je uveden v tab. 5.

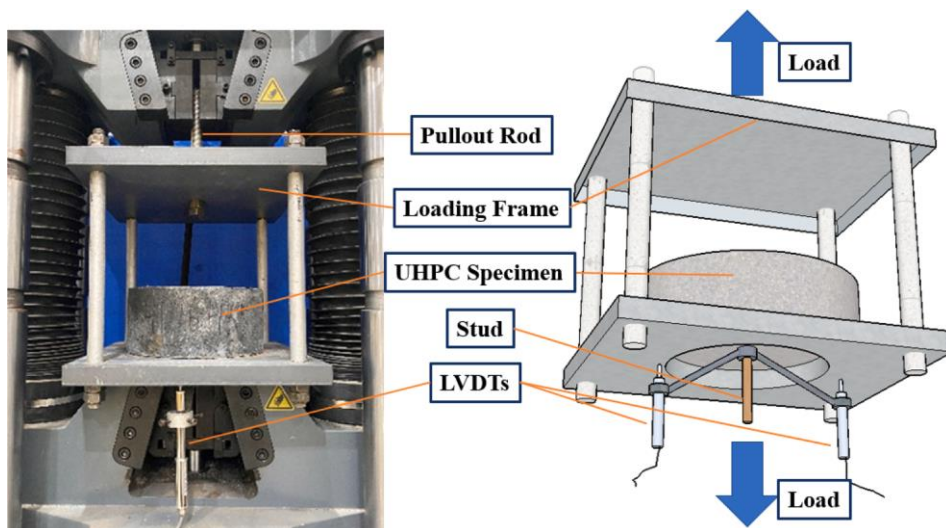
$$N_{u,cm} = k_c \cdot f_{ct,sp} \cdot h_{ef}^{1,5} \quad (2.16)$$

kde $f_{ct,sp}$ je pevnost UHPRFC v příčném tahu na krychli o hraně 150 mm, součinitel $k_c = 15,5$.

Konečná hodnota únosnosti betonového kužele s vlivem velikosti kotevního prostředku d_s a velikosti betonového prvku h je v návaznosti na rovnici (2.10) a práci Nilforoushe a kol. [47] vyjádřena rovnicí (2.17), kde jsou výše uvedené vlivy vyjádřeny pomocí součinitelů (stejně jako v rovnici (2.10)).

$$N_u = N_{u,cm} \cdot \psi_H \cdot \psi_{AH} \quad (2.17)$$

Uvedený výpočetní postup je původně sestaven na základě dat s velkými kotvami s h_{ef} od 150 do 1500 mm. Otázkou tedy je, do jaké míry je tento výpočetní postup vhodný pro zkoušený typ kotvení, kde je maximální kotevní délka 65 mm, a vůbec pro kotvení v UHPC. Pro zodpovězení by bylo nutné provést verifikaci na větším vzorku zkušebních dat.



Obr. 26 Uspořádání zkoušek při stanovení únosnosti kotvení v UHPRFC dle Li [58]

Srovnání UHPC a HSC (vysokohodnotného betonu) provedl Lu a kol. [72] ve studii, kde jsou provedeny výhradně tahové zkoušky kotvení, přičemž je sledován vliv průměru kotvy

⁴² Zkoušení UHPRFC pevnosti v příčném tahu $f_{ct,sp}$ není příliš běžné a existuje několik málo srovnávacích studií. Lze odvodit na základě experimentů realizovaných Hoangem [84].

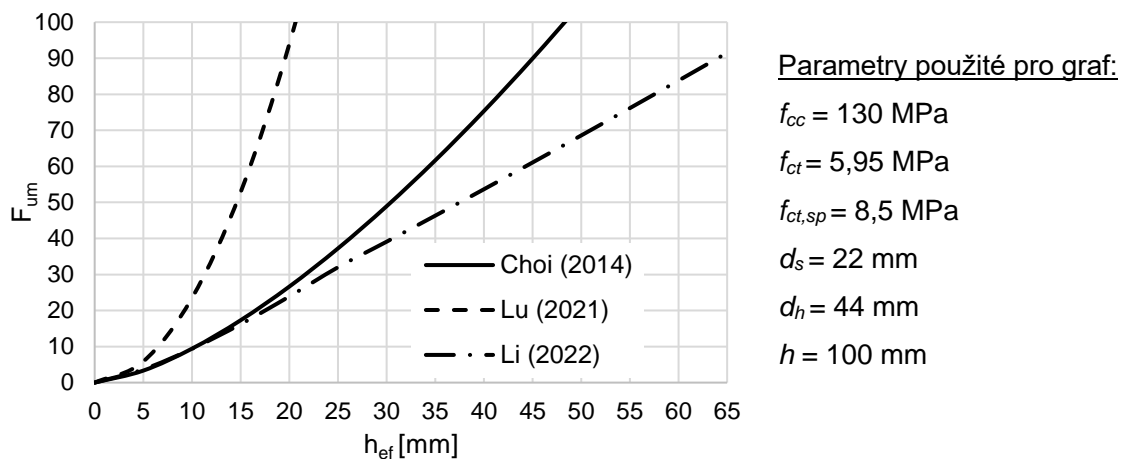
d_s a hloubky h_{ef} . Lu bere při stanovení maximálního zatížení kromě pevnosti UHPFRC v prostém tahu f_{ct} i objemové zastoupení vláken v_f , které je ve vztahu (2.18) zohledněno součinitelem k . I přes zavedení tohoto součinitele jsou však dostupné výsledky pouze s $v_f = 2,0\%$. V rovnici (2.18) není při stanovení součinitele k zohledněna délka a štíhlost vláken, jak ji používá např. Hoang [84] v rovnici (2.2).

$$N_{bf} = kf_{ct}\pi h_{ef}^2 \quad (2.18)$$

$$k = 2.8v_f + 12.5$$

Ačkoli je průměr kotvy d_s jednou z proměnných, není uvedeno, jakým způsobem lze vliv velikosti kotvy (resp. hlavy) zohlednit při výpočtu únosnosti. Za zásadní nedostatek lze označit absenci rozměrového efektu, což vede k nadhodnocování únosnosti u větších kotevních hloubek h_{ef} , což bylo již dříve zmíněno v části 2.2.3.3.

Pro vzájemné porovnání návrhových přístupů vycházejících z výše popsaných prací byl sestaven graf (obr. 27) normalizovaný využitím shodných parametrů UHPFRC a také kotevních přípravků pro všechny zmíněné rovnice.⁴³



Obr. 27 Závislost únosnosti na h_{ef} podle rovnic ve studiích [58], [66] a [72]

Tab. 5 Přehled experimentálních studií kotevních prostředků v UHPFRC

Autor (rok)	Množství vláken v_f [%]	Rozměry vláken L/d_f [mm]	Pevnost v tlaku f_{cc} [MPa]	Pevnost v tahu f_{ct} [MPa]	Rozměry vzorku pro zkoušku kotvení - [mm]	Úhel roznosu zatížení α [°]	Průměr kotvy d_s [mm]	Kotevní hloubka h_{ef} [mm]
Choi (2014) [66]	2,0	13/0,2	199 ⁴⁴	15,3 ⁴⁵	kvádr 600×600×100	22,88	20	30; 40; 50; 60

⁴³ Ačkoli jsou parametry materiálu smyšlené (pro účely srovnání uvedených rovnic), pohybují se v blízkosti parametrů dosažených v rámci jednotlivých experimentů. Pro stanovení vzájemného vztahu mezi pevnostmi v příčném tahu a v tahu za ohybu byl použit poměr 0,50, který vychází ze série zkoušek provedených autorem vždy na stejném typu materiálu.

⁴⁴ Ošetřování párou po 72 h při 90°C.

⁴⁵ Pevnost v prostém tahu na trácích s průřezem 25×75 mm.

Autor (rok)	Množství vláken V_f [%]	Rozměry vláken L/d_f [mm]	Pevnost v tlaku f_{cc} [MPa]	Pevnost v tahu f_{ct} [MPa]	Rozměry vzorku pro zkoušku kotvení -	Úhel roznosu zatížení α [°]	Průměr kotvy d_s [mm]	Kotevní hloubka h_{ef} [mm]
Lu (2021) [72]	2,0	13/0,2	126,7 ⁴⁶	7,2 ⁴⁷	kvádr 250×250×100	20,1 až 24,0	20; 22	50; 70; 33; 55; 77
Li (2022) [58]	1,0	12,9/0,2	109,47	různé ⁴⁸	válec výšky 270, průměru 120	24,4 až 30,0	13; 16	35; 50; 65

2.2.7.2. Kotvení jako součást spřažených ocelobetonových konstrukcí

Jednu z odnoží problematiky kotvení v UHPC představují spojovací (spřahovací) prvky konstrukcí složených z ocelových a UHPC částí. UHPC je v této souvislosti používán jako materiál v tlačené zóně konstrukce (zpravidla jako UHPC deska na ocelových nosnících) [73], ale i jako zesilující výplň u ocelových prvků, kterým hrozí ztráta stability v důsledku boulení nebo které z jiných důvodů vyžadují zesílení (omezená únosnost detailů, koroze atd.)⁴⁹ [74]. Spřahovací prvky, které jsou tvořeny zpravidla trny navařenými na ocelovou pánsnici nosníku, jejichž úkolem je vytvoření co nejuztšího a nejuznějšího spojení mezi oběma typy materiálů, jsou v některých případech namáhány obdobně jako kotevní prvky sloužící k manipulaci či k upevňování. Dominantním namáháním je v případě zabetonovaných spřahovacích prvků nejčastěji smyk. Z dostupných dat popisujících namáhání kotevních prvků ve smyku by tak bylo možné vyjít při zkoumání kotevních prostředků zabudovaných v UHPC. [75]

2.2.7.3. Kotvení v UHPFRC v dosavadní praxi

Studie zaměřené na kotvení v UHPC zmíněné v předchozích oddílech jsou založeny na výsledcích laboratorních zkoušek. Při opuštění laboratorního prostředí a uvedení UHPC do praxe a jeho používání v prefabrikaci jsou získávány nové poznatky. Vzniká problém manipulace a s ním souvisejícího kotvení v prefabrikovaných dílcích. Žádný z předpisů pro navrhování kotvení totiž neřeší specifika materiálu UHPC a rozsah použití těchto předpisů sahá k maximální pevnosti betonu v tlaku kolem 50 MPa, resp. 90 MPa⁵⁰ a podobně je rozsah omezen z hlediska tloušťky konstrukčního prvku a kotevní délky h_{ef} .⁵¹

Za předpokladu, že je konstrukční prvek z UHPC dostatečně masivní a jeho dimenze umožňují fyzicky umístit adekvátní kotevní přípravek, může být problematické dodržet okrajové podmínky stanovené výrobcem přípravku. Tyto podklady zpravidla vycházejí z technických norem či z provedených zkoušek, které se v naprosté většině vztahují k běžnému betonu. Typickým příkladem těchto podmínek je minimální vzdálenost kotvy od okraje dílce či doplňková výztuž, bez které nelze zaručit deklarovanou únosnost.

⁴⁶ Na krychli 150×150×150 mm.

⁴⁷ Pevnost v prostém tahu na tělese typu dog-bone 100×50 mm.

⁴⁸ Pevnost v tahu za ohybu $f_{ct,f} = 12,78$ MPa. Pevnost v příčném tahu $f_{ct,sp} = 10,43$ MPa.

⁴⁹ Nespornou výhodou aplikace UHPC pro zesilování ocelových prvků je schopnost materiálu v čerstvém stavu vyplnit složité tvarované prostory či dutiny, a to bez nutnosti dodatečné vibrace a s omezeným množstvím vzniklých vzduchových kaveren.

⁵⁰ Bulletin fib 58 [6] pracuje s betonem do maximální třídy C50, norma EN 1992-4 [5] je určena pro betony v rozsahu C12/15 až C90/105 s odkazem na ČSN EN 206+A2 [11].

⁵¹ Bulletin fib 58 [6] omezuje rozsah platnosti na kotevní hloubku od $h_{ef,min} = 40$ mm.

Praktickým příkladem je segment konstrukce pražské Štvanické lávky, jehož parapet dosahuje šířky 220 mm a jehož celková hmotnost se pohybuje od 30 do 50 tun. Pro manipulaci se segmentem a otáčení z výrobní polohy byly využity tyčové kotvy se závitem Rd52, resp. Rd64 zabudované mj. v tenkém parapetu, čímž nebyla splněna podmínka minimální tloušťky konstrukčního dílce. [98] Vzhledem k vlastnostem použitého UHPC a současnému použití běžné betonářské výztuže nepředstavovalo použití těchto kotev komplikace. V případě splnění okrajových podmínek vycházejících z použití kotev by zesílení konstrukce vedlo k nelogické spotřebě materiálu a použití UHPC by postrádalo význam.



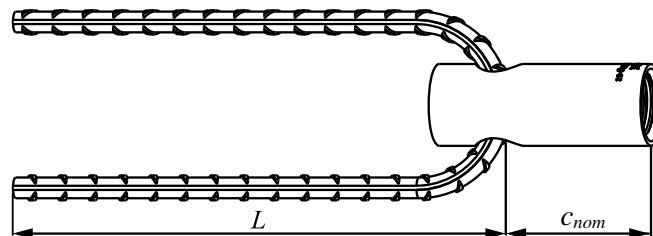
Obr. 28 Typický prefabrikovaný segment Štvanické lávky a manipulační přípravy

Jiným praktickým příkladem jsou deskové dílce z UHPC, při manipulaci s nimiž se nabízí využít řešení se závitovým systémem. Jedná se o širokou množinu tenkých deskových dílců, které jsou vhodné např. jako konstrukce tvořící ztracené bedněné desky z běžného betonu atd. (viz obr. 29). Tloušťka takových nepředepnutých desek může být v závislosti na zatížení a rozpětí od 30 do 70 mm. To na první pohled umožňuje navrhnout vybraná závitová pouzdra či kotvy, které lze jednoduše doplnit o vázací prostředky a následně využít pro manipulaci z formy či při montáži. Podle návrhových podkladů konkrétního produktu (např. dle [93]) je dosažení uvedené únosnosti kotvy podmíněno použitím doplňkové výztuže kotvy, která je zpravidla v podobě závlačí, přetočených prutů, smyček apod., ale ve tvaru znemožňujícím použití v původně navrženém tenkém konstrukčním prvku.



Obr. 29 Deskové dílce ztraceného bednění po montáži mezi ocelové nosníky mostu [92]

Materiál UHPC přitom vyniká vysokými pevnostmi, díky kterým lze výrazně zkrátit kotevní délky výztuže. [89] Prakticky tak lze využít dostupná řešení pro kotvení v dílcích, většinou ale s redukcí či úplnou eliminací doplňkové výztuže. V kombinaci s materiálem UHPC to nemusí znamenat podcenění návrhu a výsledné řešení je tak i přes omezení dodatečného vyztužení spolehlivé a bezpečné. Návrhové podklady výrobců kotevních systémů však nejsou na použití UHPC (do jisté míry logicky) připraveny a je proto nutné hledat nové cesty. Příklad běžné dostupného kotevního prvku s doplňkovou výztuží a vyznačením délky této výztuže a jejího krytí, které je vhodné optimalizovat (např. zohledněním zvýšeného napětí v soudržnosti dle [89]) při použití v UHPC, je na obr. 30.



Obr. 30 Příklad kotevního prostředku – závitového pouzdra s doplňkovou výztuží, upraveno dle [91]

Výše uvedené příklady jsou pouze zlomkem doposud realizovaných aplikací [100], u kterých byl v rámci návrhu kotvení zaznamenán rozpor s návrhovými podklady.

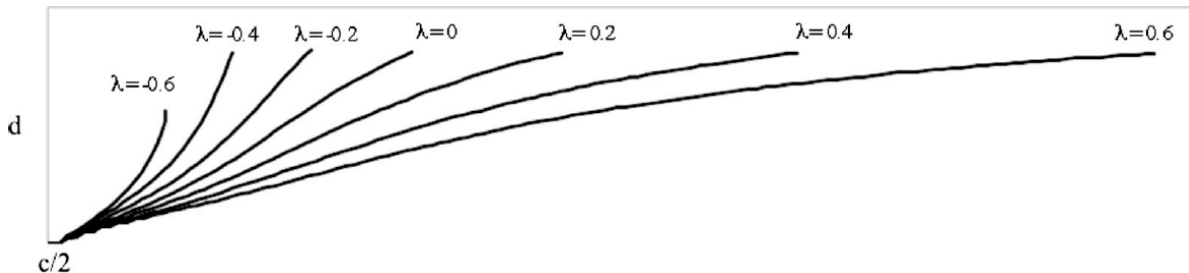
2.2.8. Kotvení v předpjatém betonu

Napětí působící v kotevní oblasti konstrukce, které přímo nevzniká v důsledku namáhání kotevního prostředku, nýbrž je generováno jinými účinky (předpětí, namáhání konstrukce jako celku), má dopad na výsledné vlastnosti kotvení. Podle toho, jestli v kolmém směru na osu kotevního prostředku působí tahové či tlakové napětí, se mění únosnost kotvení. Piccinin [49] provedl rozsáhlý výzkum chování předem zabetonovaných kotev s hlavou v předpjatém betonu. Zkoušky [49] byly rozděleny do několika částí, které se lišily hloubkou zapuštění h_{ef} [51] a mírou předepnutí. V rámci [49] vlivu působícího napětí na chování kotvení byl zaveden součinitel $\lambda = \sigma_c / f_t$, který definuje poměr mezi (tlakovým či tahovým) napětím σ_c , které působí kolmo na zabudovaný kotevní prostředek, a tahovou pevností betonu f_t . Pro $\lambda > 0$ je betonový prvek namáhán v tlaku, pro $\lambda < 0$ je namáhán tahem působícím kolmo na kotevní prostředek. Dle Piccinina [49] má působící napětí zásadní vliv na tvar vytrženého kuželu, přesněji řečeno na úhel roznosu, který se pohybuje od 35° do

10° (pro působící tlakové napětí σ_c). Pro různé λ je polovina porušené konstrukce se zabudovanou kotvou znázorněna na obr. 32.



Obr. 31 Zkušební deska při stanovení vlivu předpětí na únosnost předem zabudovaných kotev v běžném betonu [49]



Obr. 32 Průběh trhliny na předpjaté konstrukci se zabudovanou kotvou jako funkce [49]

Výsledky zkoušek kotvení v předpjatém betonu [49] neprokázaly zlepšení únosnosti kotev zabudovaných v malé hloubce 25 mm ($\lambda = 1$). U kotev v předpjatém betonu s $h_{ef} = 50$ mm se tahová únosnost zvýšila o 20 % ve srovnání s kotvami v nepředpjatém betonu, protože předpětí oddálilo vznik trhlin. Při porovnání výsledků [49] s metodou CCD (2.2.3.4) byly u nepředpjatého betonu sledovány srovnatelné výsledky. CCD však značně podhodnocuje únosnost kotev s rostoucí úrovní předpětí, kdy poměr mezi výsledky zkoušek a predikcí činil 1,5. Pro predikci únosnosti betonového kuželu pro kotvy v předpjatém betonu byl sestaven vztah (2.19), který je založen na výsledcích experimentálních a početních studií. Jedná se o modifikaci rovnice (2.8), se kterou lze (ve srovnání s CCD modelem) výstižněji popsat vlivy napjatosti v betonu působící příčně na kotevní prvky.⁵²

$$N_u = (16,8 + 0,9\sigma_c)\sqrt{f_c} \cdot h_{ef}^{1,5} \quad (2.19)$$

2.2.9. Normy a předpisy

Pro navrhování a provádění kotvení existuje řada předpisů a návrhových příruček. Jedná se především o následující:

- ČSN EN 1992-4. *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 4: Navrhování kotvení do betonu*. [5] Jedná se o harmonizovanou normu ze systému eurokódů, jež slouží pro návrh a posouzení kotvení předem i kotvení dodatečného

⁵² Z uvedeného vyplývá, že je vhodné posoudit účinky globálního namáhání prvku na únosnost kotvení, přičemž se nemusí jednat pouze o účinky předpětí.

v betonu do pevnosti na úrovni třídy C90/105, čímž do jisté míry pokrývá oblast s materiály typu HPC.

- Transportní kotvy – Technická pravidla ČBS 06 [21] jsou ekvivalentem německé směrnice pro navrhování, provádění a zkoušení kotevních prostředků určených pro transport.
- Bulletin fib 58 [6] představuje podrobnou příručku pro navrhování různých druhů kotvení v běžném betonu do C50 a s minimální kotevní hloubkou $h_{ef} = 40$ mm, což jsou nejedna omezení, vzhledem ke kterým se rozsah neslučuje s použitím pro UHPC. Svou podrobností a rozsahem představuje tato publikace komplexní přehled rozmanitého spektra kotevních přípravků namáhaných různými způsoby.
- ETAG 034-1 [2]
- EAD 330232-00-0601 [3]
- ACI 349-85 [1] je jedním z prvních normativních dokumentů pro návrh kotvení pocházející z 80. let z USA. Od prvního vydání došlo k mnoha aktualizacím a zásadním koncepčním změnám v přístupu k navrhování.

Všechny výše uvedené předpisy svým rozsahem pokrývají oblast běžných betonů, nicméně je vhodné uvážit, jestli a do jaké míry z nich lze vycházet při posuzování kotvení v UHPC.

2.3. Shrnutí

Problematicke kotvení v betonu byla a stále je věnována velká pozornost. Pro beton běžných pevností byla za posledních 50 let zpracována řada výpočetních a návrhových postupů. Ověření těchto postupů nebo definice nových přístupů pro kotvení v UHPC ovšem chybí, je neúplné nebo postavené na malém vzorku zkušebních dat. Příkladem může být:

- Stanovování únosnosti betonového kuželu kotvení s využitím tlakové pevnosti UHPC [66], která se při změně vyztužení v_f mění jen omezeně a lze se tak domnívat, že přesně nereflektuje vlastnosti kotvení v UHPC a obecně v drátkobetonu.
- Ve výzkumech využívajících pro stanovení únosnosti kuželu tahovou pevnost UHPC [58] není provedeno srovnání více receptur UHPC (lišících se v_f) a není zhodnocen vliv takovéto rozdílné matrice na vlastnosti kotvení.
- Rozměry doplňkové výztuže nutné pro správné fungování běžně využívaných kotevních přípravků [93] odpovídají kotevním délkám běžných betonů. UHPC však dovoluje významně zkrátit kotevní délku výztuže [89] a tím umožňuje vhodným způsobem navrhnout a reálně umístit kotevní přípravky v konstrukčních prvcích z UHPC.
- Technologické postupy při výrobě UHPC s podstatným vlivem na vlastnosti výsledné konstrukce (viz [55] a [88]) nejsou brány v úvahu při stanovení vlastností kotvení.

Uvedená specifika by bylo vhodné blíže zkoumat a blíže popsat, jakou měrou ovlivňují vlastnosti kotvení v UHPC.

Tab. 6 zobrazuje souhrn některých v této práci uvedených rovnic, které vychází mnohdy z rozdílných teorií a principů. Vybrané návrhové přístupy by však bylo možné použít (nebo dále modifikovat) pro navrhování kotvení v materiálech typu UHPC, které jsou navíc doplněny všesměrně orientovanou výztuží.

Tab. 6 Přehled rovnic pro určení únosnosti betonového kuželu vč. modifikací modelu CCD

Popis rovnice	Rovnice	Rov.	Cit.
Lomová mechanika	$N_u = 2,1 \cdot \sqrt{E_c \cdot G_f} \cdot h_{ef}^{1,5}$	(2.5)	[27]
Rozměrový efekt	$N_u = \frac{k_1 \cdot f_{cc}^{0,5} \cdot h_{ef}^2}{\sqrt{1 + h_{ef}/h_{ef}^0}}$	(2.6)	[30]
Vliv působícího napětí	$N_u = (16,8 + 0,9\sigma_c) \sqrt{f_c} \cdot h_{ef}^{1,5}$	(2.19)	[49]
	$N_u = \alpha \cdot f_{cc}^{0,5} \cdot (h_{ef} - \delta_u)^{1,5}$	(2.9)	[45]
Vliv velikosti hlavy kotvy	$N_u = 0,3 \cdot f_{cc}^{0,5} \cdot \pi \cdot h_{ef}^2 \cdot (1 + d_h/h_{ef})$	(2.4)	[28]
	$N_u = N_{u,m}^{code} \cdot \psi_H \cdot \psi_{AH} \cdot \psi_{Sr}$	(2.10)	[47]
HSC	$N_u = k_t \cdot f_{ct,sp} \cdot h_{ef}^{1,5}$	(2.12)	[71]
Vliv výztužných vláken	$\gamma_{fiber} = 1 + \frac{v_f}{300} \leq 1,25$	(2.14)	[60]
	$N_u = 16,74 \cdot \Psi_{UHPRFC} \cdot \sqrt{f_c} \cdot h_{ef}^{1,5}$	(2.15)	[66]
UHPRFC	$N_u = k_c \cdot f_{ct,sp} \cdot h_{ef}^{1,5}$	(2.16)	[58]
	$N_u = k f_{ct} \pi h_{ef}^2$	(2.18)	[72]

3. Experimentální část

„Experimentem k poznání, poznáním k pokroku.“

Jaroslav Heyrovský

V této kapitole jsou podrobně popsány zkušební programy, které byly realizovány za účelem bližšího zkoumání studované problematiky kotevních oblastí v UHPFRC a s ní souvisejícími jevy. Předmětem a cílem experimentálních programů bylo především:

- Bližší popis chování předem zabudovaných kotevních prostředků v UHPC s ohledem na únosnost při variantním provedení kotevního prostředku co do tvaru a rozměru. V mnoha případech je tloušťka betonového prvku z UHPC natolik malá, že je vyloučeno použití konvenčních kotevních systémů běžně používaných v praxi. Místo toho je nutné hledat jiná řešení spočívající ve využití např. ocelových spojovacích prostředků – šroubů atp. Dílčímu výzkumu na toto téma je věnována část 3.1.
- Detailní popis vlivu objemového zastoupení vláken (v_f) v UHPC, které se prakticky pohybuje v rozmezí 1,5 % až 3,0 % a které zásadním způsobem ovlivňuje mechanické vlastnosti kompozitu, spolu s vlivem polohy kotevního prostředku při odlévání konstrukčního prvku na vlastnosti kotevních oblastí. Podrobný výzkum je představen v části 3.2.
- Vyzkoušení kotevních přípravků na praktickém příkladu konstrukčního prvku a tím do jisté míry eliminovat vlivy, které se pojí s ověřováním kotvení na malých vzorcích, výsecích konstrukčních prvků atp. V rámci zkušebního programu popsaného v části 3.3 jsou statickému zatěžování podrobeny speciální kotevní přípravky zabudované v nosnících z UHPC.

Jednotlivé experimentální programy jsou pokaždé dále členěny na charakteristiku zkoušek, včetně zkušebních těles a způsobů zkoušení, na kterou navazuje dokumentace dosažených výsledků. Dle rozsahu je v hlavním textu uvedeno reprezentativní množství výsledků, které vedou k vypovídajícímu popisu problému. Podrobná dokumentace experimentů a výsledků je uvedena v přílohách. Součástí každé podkapitoly je rovněž analýza vybraného problému, studium závislostí vedoucí k formulaci závěru použitelného pro praktické užití při návrhu nebo realizaci kotvení v UHPC.

Při přípravě a realizaci experimentů byl kladen důraz na možnost praktického uplatnění výsledků. Veškeré zkušební vzorky byly vyráběny v běžných podmínkách výroby prefabrikovaných dílců, aby byly postiženy všechny postupy, které ovlivňují výslednou konstrukci včetně kotvení. Vzorky se ve všech případech přesunuly do laboratoře, kde byly podrobeny statickým zatěžovacím zkouškám a dalšímu zkoumání.

3.1. Zkoušky kotvení v tenkých deskách z HPFRC

Tento experimentální výzkum byl zaměřen na zkoumání vlastností zabetonovaných kotevních prostředků ve velmi tenkých konstrukčních prvcích, které byly tvořeny vysokohodnotným betonem (HPC) s rozptýlenou výztuží ve formě PVA mikrovláken, neboli HPFRC. Kotevní hloubka h_{ef} se u těchto prvků pohybuje od 5 do 15 mm, což je extrémně nízká hodnota, zcela mimo možnosti běžného betonu s hrubým kamenivem. Prvky z HPC nebo UHPC podobných rozměrů najdou praktické uplatnění v podobě zákrytových desek, fasádních panelů, lícních prefabrikátů a všude tam, kde je zapotřebí co možná nejjednoduššího plošného konstrukčního prvku.

Hlavním cílem provedených zkoušek bylo zjištění únosnosti předem zabetonovaných kotevních prostředků – šroubů v tenkých deskách z HPFRC, a to pro různé způsoby namáhání. Sledovanými parametry byly typ a počet použitých šroubů, tloušťka desky (resp. s ní související kotevní délka h_{ef}), směr působícího zatížení i stáří vzorků.⁵³ V rámci výzkumu byl kladen důraz na provedení reprezentativního počtu experimentů a bylo tak zhotoveno přes 280 vzorků desek s kotevními přípravky. Byly zkoušeny vzorky s jednou kotvou a s dvojicí kotev stejného typu a rozměru. Zkoušky kotevních oblastí s dvojicí kotevních šroubů byly provedeny v souladu s evropským dokumentem pro posuzování ETAG 034-1 [2]. V tomto předpisu jsou velmi přesně specifikovány požadavky na zkoušení kotevních prvků určených pro obkladové a fasádní deskové konstrukce. I přesto, že rozsah dokumentu není omezen pouze na betonové konstrukční prvky, definice konstrukčních prvků odpovídá rozměrům konstrukcí z materiálu HPC, resp. UHPC.

Provedení a vyhodnocení zkoušek mělo pomoci odpovědět na tyto otázky, které vyvstaly v souvislosti s navrhováním předem zabetonovaných kotevních prostředků v tenkých deskách z HPC s PVA výztuží:

- Jakého úhlu roznosu zatížení je dosaženo při tahových zkouškách kotvení? Předpokládá se, že pokud je kotevní hloubka h_{ef} menší než dvojnásobek světlé vzdálenosti kotev (odpovídá konzervativně úhlu roznosu zatížení cca 27°), nejsou kotevní oblasti jednotlivých kotev vzájemně ovlivněny.
- Jakým způsobem ovlivňuje velikost hlavy d_h kotevního prostředku únosnost kotvení při tahovém namáhání?
- Jaký vývoj z materiálových parametrů HPC v čase nejlépe koresponduje s nárůstem únosnosti kotvení?
- Jak lze posuzovat interakci tahové a smykové síly působící na kotvení v HPFRC, resp. UHPFRC?
- Lze únosnost kotvení zvýšit doplněním plechu, který spojuje dvojici šroubů?

Podrobnosti experimentů a jejich vyhodnocení jsou v následujícím textu rozděleny do těchto skupin:

1. Jednotlivé kotvy, prostý tah.
2. Dvojice kotev, prostý tah.
3. Jednotlivé kotvy, smyk.⁵⁴

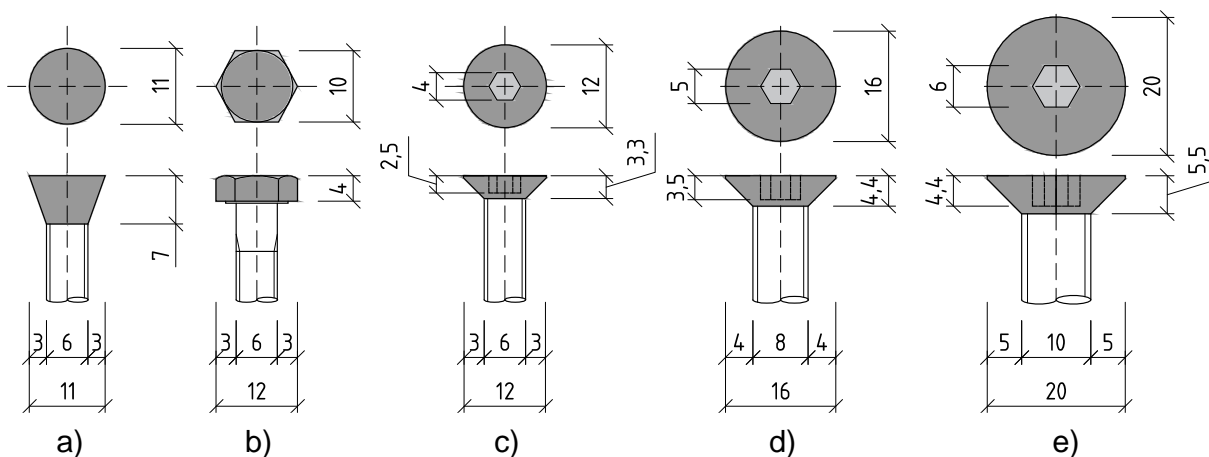
⁵³ Experimentálně zjištěná data pochází z výzkumného projektu [103]. Vyhodnocení experimentů a související analýzy popsané v rámci disertační práce nesouvisí s uvedeným projektem.

⁵⁴ Ačkoli je v některých publikacích [21] označeno jako namáhání příčnou tahovou silou, je zde pro jednoduchost používáno označení smyk, resp. namáhání ve smyku.

4. Dvojice kotev, smyk.
5. Dvojice kotev, vzájemné působení tahu a smyku.⁵⁵

Tloušťka zkoušených desek se pohybovala od 10 mm do 30 mm. Zkušební vzorky byly pro všechny série a způsoby namáhání zhotoveny z materiálu HPFRC, tedy z vysokohodnotného betonu s výztužnými vlákny. Receptura HPC je v tomto případě postavena na skladbě jemnozrnných složek s maximální velikostí zrna do 4 mm. Obsah vody je snížen a použita je superplastifikační přísada. Vlastnosti čerstvého betonu se i při přes použití mikrovláken podobají samozhutnitelnému betonu, což usnadňuje ukládku materiálu do forem a zajišťuje dokonalé obtečení a probetonování všech oblastí v blízkosti kotevních přípravků.

U všech zkušebních vzorků s kotvami v této části 3.1 platí, že *efektivní délka kotvy* je rovna poloviční výšce betonové desky, tj. $h_{ef} = \frac{h}{2}$. Přehled testovaných kotevních šroubů, které byly vždy předem instalovány do formy, je na obr. 33. Atypické šrouby typu Tergo, které jsou navrženy a využívány jako přípravky pro dodatečné kotvení (zde zabetonované předem),⁵⁶ a klasické šrouby se šestihrannou hlavou byly zkoušeny pouze v sérii tahových zkoušek s jedním zabudovaným šroubem. Šrouby s kónickou hlavou byly využity ve všech typech vzorků a pro všechny způsoby namáhání. Šrouby byly zhotoveny z nerezového materiálu A2.



Obr. 33 Kotevní prostředky – šrouby pro zkoušky kotvení v tenkých deskách z UHPC: a) Tergo M6, b) ISO 4017 M6, c) až e) DIN 7991 M6 až M10

3.1.1. Materiálové vlastnosti

Pro vyztužení matrice HPC byla použita monofilní PVA vlákna délky 12 mm a průměru 0,2 mm v dávce 11 kg/m³. Modul pružnosti použitých vláken je 30 GPa. Pro zjištění mechanických vlastností HPC byla zhotovena zkušební tělesa. Výsledné parametry ztvrdlého HPC jsou uvedeny v tab. 7. V rámci zkoušek mechanických vlastností byly testovány sady krychlí o délce hrany 100 mm a trámce o velikosti 40×40×160 mm pro zjištění pevnosti v tahu za ohybu a tlakové pevnosti.

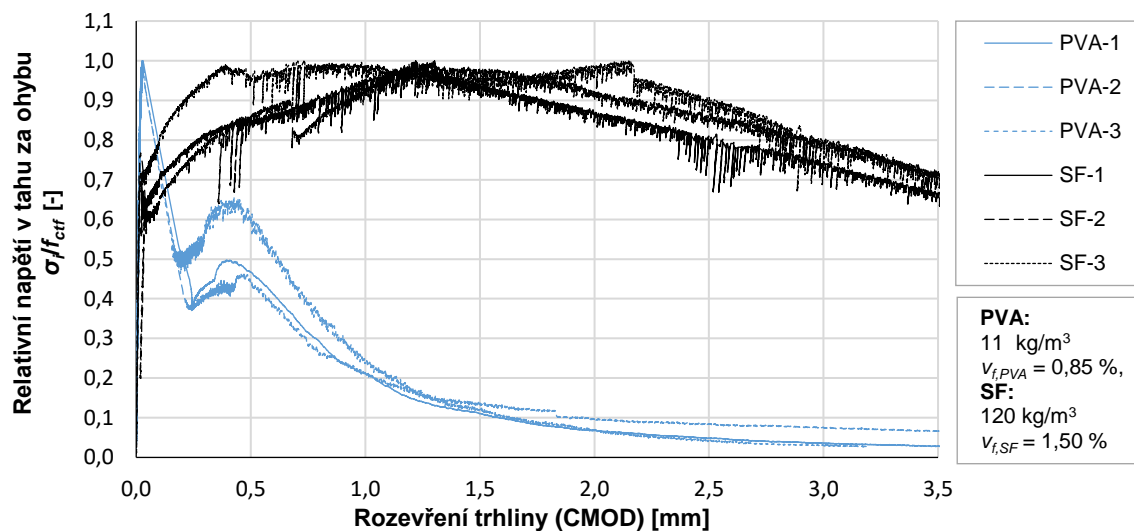
⁵⁵ Někdy též označováno jako šikmý tah. [21]

⁵⁶ Atypické šrouby typu Tergo jsou v běžných aplikacích pro dodatečně instalované kotvení doplněny o talířek a rozpínací vložku, která zajišťuje aktivaci kotvy ve vyvrtném otvoru. Zde byl využit pouze šroub s kónickou hlavou, viz obr. 33.

Tab. 7 Mechanické parametry HPC s PVA vlákny⁵⁷

Veličina	Jednotka	Zkušební těleso	Stáří [dny]	Hodnota
f_{cm}	MPa		1	71,1
f_{cm}	MPa	krychle o hraně 100 mm dle [14]	7	80,0
f_{cm}	MPa		28	85,6
ρ_m	kg/m ³		28	2290
$f_{ctm,f}$	MPa		1	11,2
$f_{ctm,f}$	MPa		7	14,4
$f_{ctm,f}$	MPa		16	16,6
$f_{ctm,f}$	MPa	trámec 40×40×160 mm dle [10]	29	17,4
f_{cm}^{58}	MPa		1	69,2
f_{cm}	MPa		7	94,2
f_{cm}	MPa		14	106,7
f_{cm}	MPa		29	115,6
ρ_m	kg/m ³		29	2294

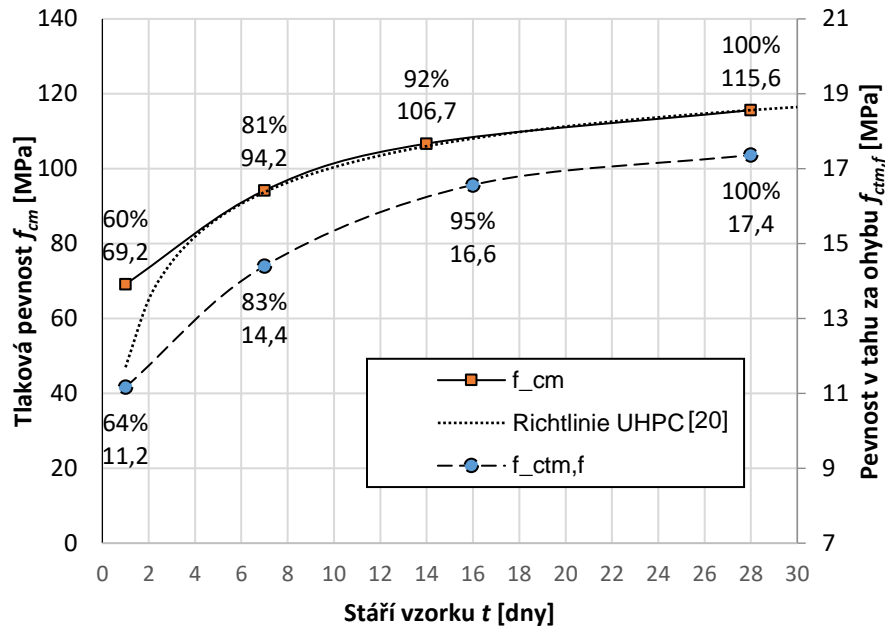
Ačkoli nebyly v čase zkoušení kotvení provedeny doprovodné zkoušky HPFRC v tahu za ohybu, je na obr. 34 doplněno orientační srovnání pracovních diagramů zkušek UHPC s PVA vlákny a s ocelovými vlákny (SF). Trámce byly vyrobeny z téhož materiálu jako vzorky pro zkoušky kotvení. Pro možnost srovnání je uvedeno tzv. relativní napětí jako poměr σ/f_{ctf} a záměrně nejsou uvedeny absolutní hodnoty pevností. Z grafů je patrné tahové zpevnění při použití SF a tahové změkčení při použití PVA vláken.


Obr. 34 Pracovní diagram – stanovení pevnosti UHPFRC v tahu za ohybu a zbytkové pevnosti dle ČSN EN 14651 + A1 [9], trámce 100×100×400 mm

⁵⁷ Podle některých obecných přístupů by sice bylo možné klasifikovat materiál jako UHPC, jelikož pevnost v tlaku přesáhla hodnotu 110 MPa, ta byla však v tomto případě zjištěna na malém trámci. Na válci průměru 100 mm a výšky 200 mm, který je považován za referenční zkušební těleso, by dle zkušeností byla hodnota nižší, a tudíž je materiál označen jako HPC. Pevnost na válcích však v rámci experimentů nebyla ověřována.

⁵⁸ Tlaková pevnost f_{cm} je stanovena na zlomcích trámců 40×40×160 mm.

V grafu (obr. 35) je dokumentován vývoj tlakové pevnosti a pevnosti v tahu za ohybu v čase na malých trámcích 40×40×160 mm. Pro srovnání je uveden časový vývoj pevnosti dle rakouské normy pro UHPC [20], který je určen početně pomocí rovnice (2.1). Z grafu vyplývá dobrá shoda naměřených výsledků s rovnicí dle normy, a to až od stáří přibližně 4 dny. Krátkodobé pevnosti HPFRC jsou výrazně vyšší, než předpokládá norma.



Obr. 35 Vývoj pevnosti HPFRC v čase, trámec 40×40×160 mm dle [10]

Značení zkušebních vzorků je provedeno zpravidla ve formátu **XYt-d_s-h-i**, kde X je označení způsobu namáhání (N pro tah, V pro smyk a NV pro vzájemné působení tahu a smyku), Y značí počet kotevních šroubů (J – jednotlivý, D – dvojice), t je stáří vzorku, d_s značí průměr kotevního šroubu, h je celková tloušťka betonové desky, i je pořadové číslo vzorku (1 až 5).

Zkoušení probíhalo v laboratoři za běžných podmínek. Průběh zkoušky byl řízen silou. Zaznamenán byl pohyb zkušebního lisu a velikost působící síly. V průběhu každé zkoušky byla udržována konstantní rychlost. Způsob zatěžování a výsledky jsou pro každý způsob zatěžování a typ kotvení tříděny a popsány dále v textu.

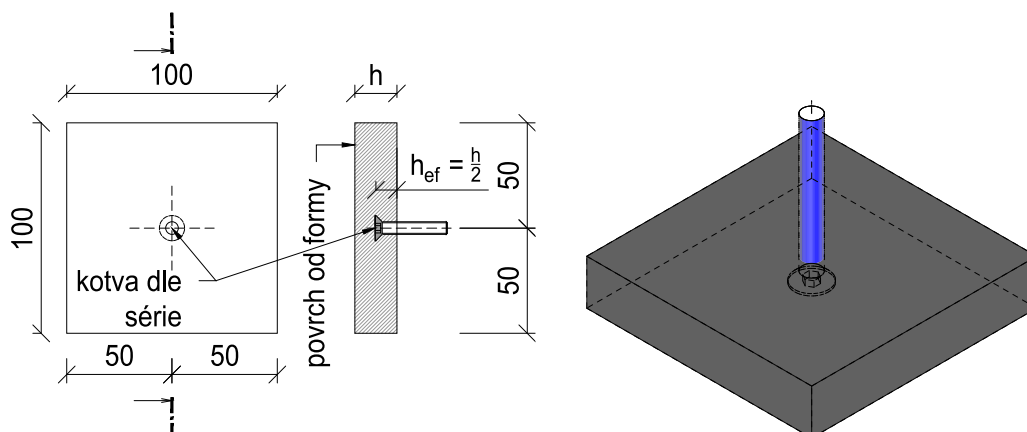
3.1.2. Prostý tah, jedna kotva⁵⁹

3.1.2.1. Uspořádání zkušek a zkušební vzorky

Úvodní experimenty byly zaměřeny na testování jednotlivých kotevních prostředků – samotných šroubů zabetonovaných v destičkách z HPC, přičemž byly porovnávány různé druhy ocelových šroubů s metrickým závitem lišících se provedením hlavy šroubu, která má zásadní vliv na roznos zatížení z kotvy do okolního betonu – do kotevní oblasti. Zkušební vzorky měly tvar kvádrů s rozměry 100×100 mm a s výškou 10 mm, resp. 20 mm. Ve středu této desky byl zabetonován kotevní šroub vyčnívající závitem na stranu hlazeného povrchu betonu (obr. 36). Kotevní přípravky – šrouby byly vloženy do formy

⁵⁹ Tato část výzkumu navazuje na práci Marka [59], kde jsou dokumentovány výsledky zkoušek desek z UHPC se zabudovanými jednotlivými šrouby, to však bez dalšího zpracování a vyhodnocení výsledků.

a zafixovány ve výškové poloze odpovídající kotevní hloubce rovné polovině výšky vzorku. Přehled vzorků včetně jejich značení je uveden v tabulce (tab. 8).



Obr. 36 Zkušební vzorky z HPC s jedním zabudovaným kotevním šroubem

Vzorky lze rozdělit do dvou skupin, kdy první část vzorků využívá atypických kotev Tergo a klasické šrouby s šestihrannou (6HR) hlavou. Oba typy byly zkoušeny ve stáří vzorků 14 dní. Další zkušební vzorky již mají šrouby s hlavou kónického tvaru (DIN 7991) a jsou zkoušeny ve stáří 24 hodin a 7 dní.

Tab. 8 Přehled a značení zkušebních vzorků kotvení s variací šroubů, prostý tah, jedna kotva⁶⁰

$h_{ef} = \left(\frac{h}{2}\right)$ [mm]	stáří [dny]	datum zkoušení	M6 (Tergo)	M6 (ISO 4017)	M6 (DIN 7991)	M8 (DIN 7991)
5	1	3. 5. 2017	-	-	TJ1-6-10	TJ1-8-10
10	1	3. 5. 2017	-	-	TJ1-6-20	TJ1-8-20
5	7	9. 5. 2017	-	-	TJ7-6-10	TJ7-8-10
10	7	9. 5. 2017	-	-	TJ7-6-20	TJ7-8-20
5	14	12. 4. 2017	TJ14-6-10	TJ14-6-10	-	-
10	14	12. 4. 2017	TJ14-6-20	TJ14-6-20	-	-

Výroba vzorku proběhla ve výrobně prefabrikátů. Vzorky byly zkoušeny v laboratoři pomocí hydraulického zatěžovacího zařízení. Zatěžování probíhalo tahovou silou působící v ose šroubu. V průběhu zkoušení byl pro každý vzorek zaznamenán pohyb zkušebního lisu spolu s působící silou.

3.1.2.2. Výsledky zkoušek

Tab. 9 shrnuje výsledky 60 testů kotvení v tenkých deskách. Průměr naměřených maximálních sil je vyneseno v grafech (obr. 37 a obr. 38).⁶¹ Vzorky s kotevními atypickými šrouby (typu Tergo) a šrouby s 6HR hlavou dosáhly srovnatelné únosnosti (obr. 37). Porovnatelné vzorky s kónickými šrouby v témže stáří 14 dní sice nebyly zkoušeny, nicméně již z výsledků zkoušek provedených ve stáří 7 dní vyplynulo, že únosnost kotvení s kónickými šrouby je při stejném průměru a kotevní hloubce výrazně vyšší, a to průměrně o 50 % pro výšku vzorku 10 mm a o 60 % pro výšku 20 mm (blíže v tab. 10). Tímto se potvrdil

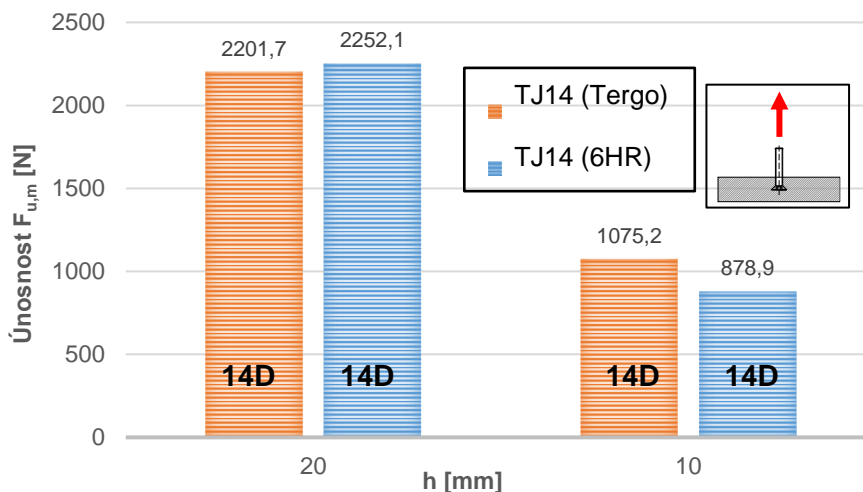
⁶⁰ Od každé série bylo vyrobeno a vyzkoušeno 5 ks vzorků.

⁶¹ Podrobné výsledky každé zkoušky jsou dokumentovány v příloze.

předpoklad o vyšší účinnosti kotevních šroubů s kónickou hlavou. Právě použití kónických hlav šroubů, jejichž tvar pomáhá maximalizovat kotevní délku, se ukazuje jako smysluplnější. Obzvláště potom při kotvení v HPC, kde je obecná snaha o minimalizaci spotřeby materiálu. Z těchto důvodů také nebyly dále zkoušeny vzorky se šrouby typu Tergo a šrouby s 6HR hlavou.

Tab. 9 Přehled výsledků zkoušek kotvení v tenkých deskách, jedna kotva, prostý tah

typ vzorků ($t-d_s-h$)	stáří vzorku t [dny]	tloušťka vzorku h [mm]	prů- měr d_s [mm]	typ šroubu -	po- čet n [ks]	prům. únosnost F_{um} [N]	sm. od- chylka S_x [N]	var. koef. V_x [-]
TJ14-6-20	14	20	6	Tergo	5	2201,7	255	0,12
TJ14-6-20	14	20	6	6HR	5	2252,1	255	0,11
TJ14-6-10	14	10	6	Tergo	5	1075,2	204	0,19
TJ14-6-10	14	10	6	6HR	5	878,9	204	0,23
TJ1-6-20	1	20	6	kónický	5	2310,8	246	0,11
TJ1-8-20	1	20	8	kónický	5	2703,9	284	0,11
TJ1-6-10	1	10	6	kónický	5	908,2	55	0,06
TJ1-8-10	1	10	8	kónický	5	1025,0	111	0,11
TJ7-6-20	7	20	6	kónický	5	3555,5	379	0,11
TJ7-8-20	7	20	8	kónický	5	4108,4	571	0,14
TJ7-6-10	7	10	6	kónický	5	1452,0	68	0,05
TJ7-8-10	7	10	8	kónický	5	1516,6	211	0,14

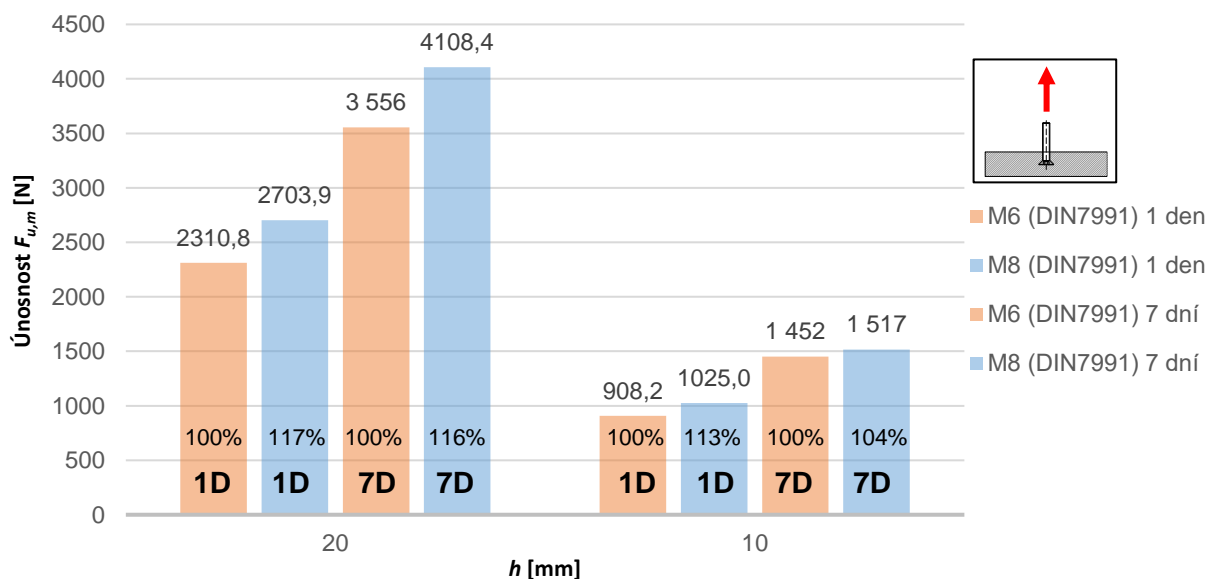


Obr. 37 Únosnost atypických kotevních šroubů M6 Tergo a 6HR, prostý tah, stáří 14 dní

Tab. 10 Porovnání únosnosti kotvení podle provedení hlavy šroubu

$h = 10 \text{ mm}$			$h = 20 \text{ mm}$		
Typ vzorku	F_{um} [kN]	% nárůst k TJ	Typ vzorku	F_{um} [kN]	% nárůst k TJ
TJ7-6-10	1,45	100 %	TJ7-6-20	3,56	100 %
TJ14-6-10	1,08	135 %	OR14-6-20	2,20	161 %
A14-6-10	0,88	165 %	A14-6-20	2,25	158 %

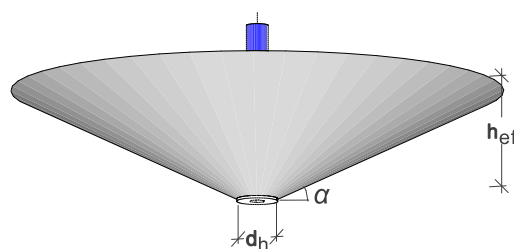
Průměrné výsledky zkoušek na vzorcích s kotevními šrouby s kónickou hlavou (DIN 7991) jsou shrnuty v grafu na obr. 38. Pozorovatelný je předpokládaný nárůst únosnosti s přibývajícím stářím, se zvětšujícím se průměrem šroubu d_s a se zvětšující se kotevní hloubkou h_{ef} (resp. s výškou vzorku h). V grafu (obr. 38) je zobrazen nárůst únosnosti způsobený zvětšením průměru kotevního šroubu d_s , a především s ním souvisejícím průměrem hlavy kotvy d_h . Při srovnání kotevních oblastí s kotvami M6 a M8 lze pozorovat rozdíl únosnosti F_{um} až 17 %. Jak již bylo zmíněno, při výpočtu únosnosti dle CCD [44] není postihnuta velikost hlavy kotvy. U prvků z běžného betonu toto zjednodušení nezpůsobuje větší komplikace, kdežto při kotvení v HPC či UHPC vznikají nezanedbatelné rozdíly.



Obr. 38 Únosnosti kotevních šroubů M6 a M8, prostý tah, stáří 1 a 7 dní

3.1.2.3. Zobecnění výsledků a možné způsoby predikce únosnosti

Pro porovnání výsledků zkoušek byl modifikován vztah původně sestavený Cannonom [28], který zohledňuje velikost hlavy kotevního prostředku, ale je založen na kuželu s úhlem 45° , viz rovnice (2.4) v části 2.2.3.1. Během experimentů s HPC a PVA vlákny byl měřen úhel betonového kuželu přibližně 33° . Zobecněním původní rovnice (2.4) podle Cannona [28] pro libovolný úhel roznosu zatížení vznikl komplexnější tvar, rovnice (3.1). Vztah vychází z rovnice plochy komolého kuželu a zohledňuje tím velikost hlavy kotevního šroubu d_h .



Obr. 39 Definice obecného komolého kuželu z rovnice (3.1)

$$N_u = k \cdot f_{cm}^{0,5} \cdot \pi \cdot h_{ef}^2 \cdot (\cotg \alpha + d_h/h_{ef}) \cdot \sqrt{1 + \cotg^2 \alpha} \quad (3.1)$$

f_{cc} je tlaková pevnost betonu, h_{ef} kotevní hloubka, α úhel roznosu zatížení, dle tvaru porušených vzorků uvažován 33° , d_h průměr hlavy kotvy, součinitel byl dle naměřených výsledků určen jako $k = 0,208$ a zohledňuje recepturu HPC s PVA vlákny a tlakovou pevnost stanovenou na malých trámčích $40 \times 40 \times 160$ mm.

Pro zhodnocení lepší výstižnosti výpočtu s tlakovou, nebo s tahovou pevností betonu byl vytvořen tvar rovnice založený na pevnosti v tahu za ohybu (3.2). Jedná se o stejný princip

stanovení únosnosti betonového kuželu jako podle rovnice (3.1) lišící se pouze charakteristikou materiálu.

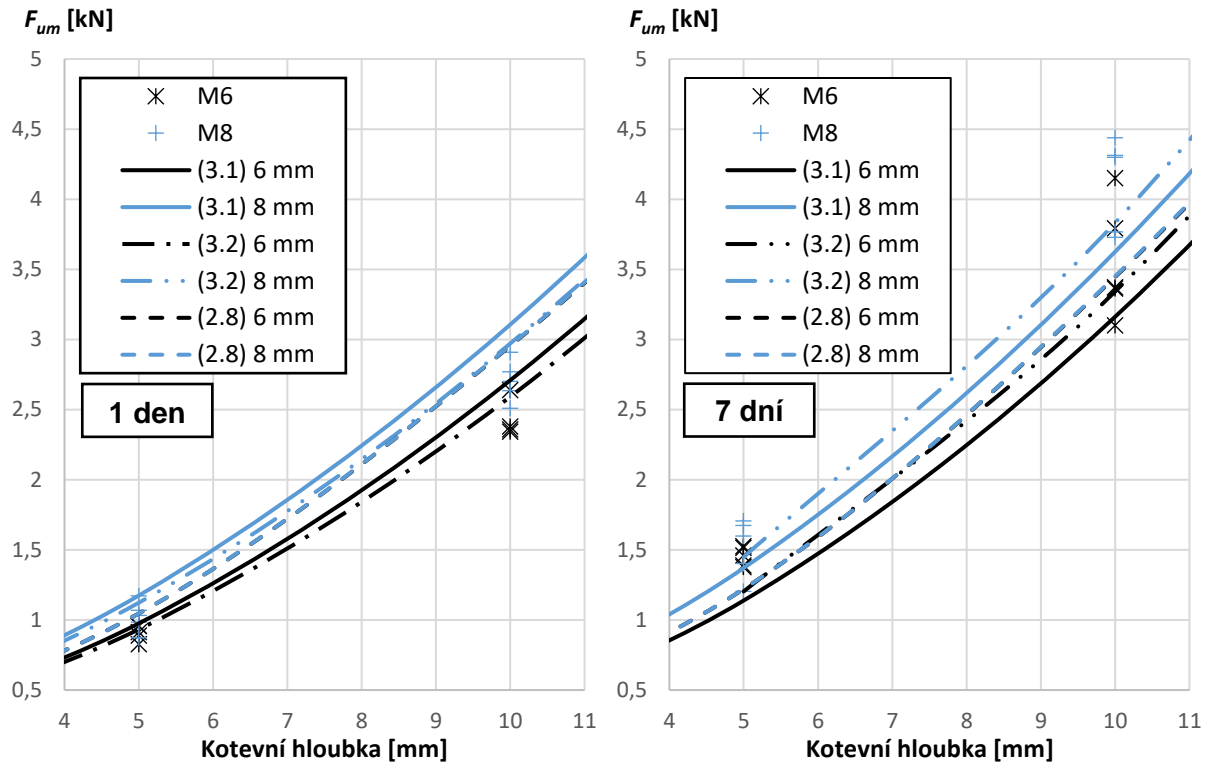
$$N_u = k \cdot f_{ctm,f} \cdot \pi \cdot h_{ef}^2 \cdot (\cotg \alpha + d_h/h_{ef}) \cdot \sqrt{1 + \cotg^2 \alpha} \quad (3.2)$$

Součinitel byl dle naměřených výsledků určen jako $k = 0,148$ a zohledňuje recepturu HPFRC a pevnost v tahu za ohybu stanovenou na malých trámcích 40×40×160 mm.

Porovnání experimentálně zjištěných dat s modely pro predikci únosnosti betonového kuželu dle Furcheho [45] (rovnice (2.9)) a podle rovnice (3.1) upravené dle původního modelu Cannona [28] je uvedeno v grafech závislosti kotevní hloubky h_{ef} na mezním zatížení (obr. 40). Grafy jsou sestaveny pro stáří 1 a 7 dní a pro kotevní šrouby průměru 6 a 8 mm, respektive rozměry hlav d_h kotevních šroubů 12 a 16 mm. Při výpočtech byly využity pevnosti HPC z tab. 7 dle příslušného stáří kotevního vzorku. V grafech je zobrazen rozsah kotevní hloubky h_{ef} do 10 mm (odpovídá tloušťce prvků do 20 mm), což je extrémně nízká hodnota, které lze na odlévaných dílcích dosáhnout díky jemnozrnnosti HPC.

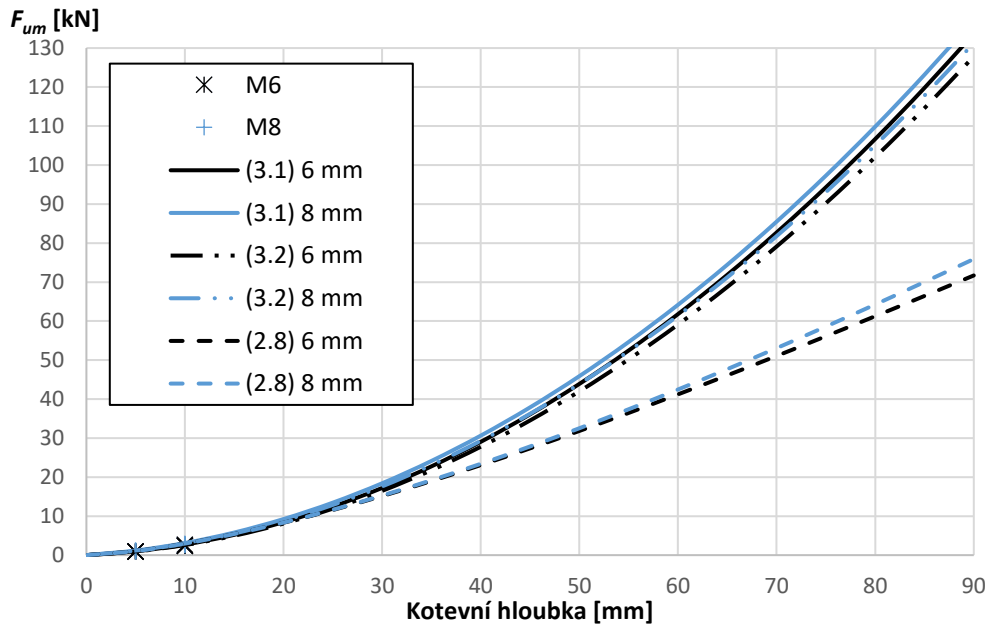
Tab. 11 Porovnání výsledků zkoušek s modely predikce únosnosti zohledňujícími rozměr hlavy kotvy

Zkouška		Únosnost dle rovnice (2.9)			Únosnost dle (3.1)		Únosnost dle (3.2)	
označení série vzorků	F_{um} [kN]	$F_{um(2.9)}$ [kN]	δ_u [mm]	shoda $\frac{F_{um(2.9)}}{F_{um}}$	$F_{um(3.1)}$ [kN]	shoda $\frac{F_{um(3.1)}}{F_{um}}$	$F_{um(3.2)}$ [kN]	shoda $\frac{F_{um(3.2)}}{F_{um}}$
TJ1-6-20	2,31	2,95	0,011	128 %	2,71	117 %	2,59	112 %
TJ1-8-20	2,70	2,96	0,005	109 %	3,11	115 %	2,97	110 %
TJ1-6-10	0,91	1,05	0,001	115 %	0,98	107 %	0,93	103 %
TJ1-8-10	1,03	1,05	0,001	102 %	1,17	115 %	1,12	110 %
TJ7-6-20	3,56	3,45	0,008	97 %	3,16	89 %	3,34	94 %
TJ7-8-20	4,11	3,45	0,003	84 %	3,63	88 %	3,83	93 %
TJ7-6-10	1,45	1,22	0,001	84 %	1,14	78 %	1,20	83 %
TJ7-8-10	1,52	1,22	0,000	80 %	1,37	90 %	1,45	95 %
Průměrná shoda		100 %			100 %		100 %	
Směrodatná odchylka		16 %			14 %		10 %	



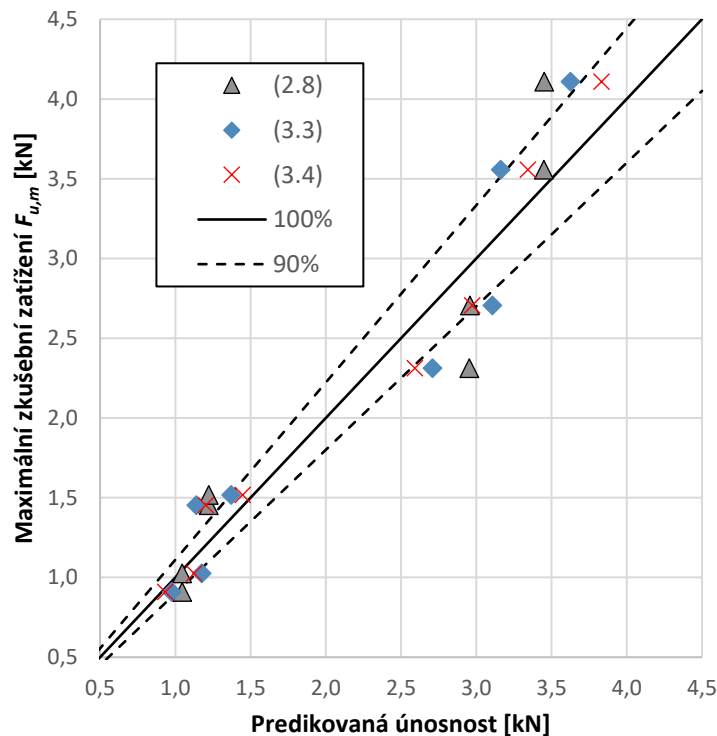
Obr. 40 Graf závislosti únosnosti betonového kuželu na kotevní hloubce se zohledněním velikosti hlavy kotevního přípravku dle rovnic (2.9), (3.1) a (3.2), stáří 1 den (vlevo), stáří 7 dní (vpravo)

Při zachování parametrů HPC a zobrazení větších kotevních hloubek (obr. 41), které řádově odpovídají kotvení v běžném betonu, se projeví rozdíly mezi přístupy Furcheho [45] a Cannona [28] (zde v modifikované podobě dané rovnicemi (3.1) a (3.2)). Zřejmě je především zanedbání vlivu rozměrového efektu v [28], kdy od hloubky 50 mm dochází k prudkému nárůstu únosnosti. Z toho plyne, že rovnice (3.1) příp. (3.2) pro stanovení únosnosti betonového kuželu je vhodné použít u desek s velmi malou tloušťkou (s kotevní hloubkou h_{ef} cca do 30 mm) a především v situacích, kdy je vhodné zohlednit velikost hlavy kotevního přípravku.



Obr. 41 Závislost únosnosti betonového kuželu na kotevní hloubce do 90 mm se zohledněním velikosti hlavy kotevního přípravku dle rovnic (2.9), (3.1) a (3.2), stáří 1 den

Graf na obr. 42 slouží pro porovnání experimentálně zjištěné a výpočtem stanovené únosnosti kotvení. Zohledněny jsou pouze šrouby s kónickou hlavou, tzn. výsledky z tab. 9. Je zřejmé, že početní přístup dle rovnice (3.2) založen na tahové pevnosti materiálu poskytuje nejpřesnější výsledky.



Obr. 42 Porovnání měření a predikce únosnosti betonového kuželu se zohledněním rozměru hlavy šroubu dle (2.9), (3.1) a (3.2)

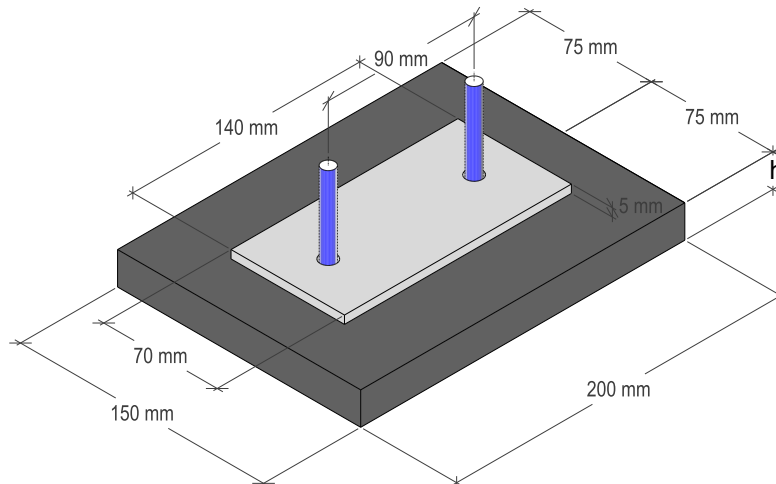
Z provedených zkoušek kotevních oblastí v HPC s PVA vlákny bylo zjištěno, že pro danou sestavu vzorků a doprovodných těles vypočtená únosnost betonového kuželu více

odpovídá výpočtu s využitím pevnosti materiálu v tahu za ohybu nežli pevnosti v tlaku.⁶² Tento závěr vychází z mechanických vlastností HPC stanovených na trámcích 40×40×160 mm. Vztah mezi tlakovou pevností a pevností v tahu za ohybu se může na jiných typech těles lišit a může se tak ukázat jako vhodnější parametr pro výpočet únosnosti tlaková pevnost.⁶³

3.1.3. Prostý tah, dvojice kotev

3.1.3.1. Uspořádání zkoušek a zkušební vzorky

Stejně jako u všech dalších zkoušek s dvojicí kotevních šroubů jsou vzorky pro dvojici tažených šroubů doplněny o ocelový plech tloušťky 5 mm, kterým prochází oba šrouby a který zajišťuje vždy stejnou vzdálenost a kolmost šroubů. Osová vzdálenost šroubů je 90 mm. Plech není zabetonován do vzorku, ale je zarovnán s horním povrchem betonu (obr. 43). Spojovací plech neslouží ke vnášení zatížení do betonového prvku a v důsledku jeho použití tak nejsou ve šroubech generovány přídatné síly.⁶⁴ Zkušební vzorky mají půdorysný rozměr 150×200 mm, výška h je proměnná, 20 nebo 30 mm.



Obr. 43 Schéma zkušební vzorku z HPC s PVA vlákny s dvojicí kotevních šroubů

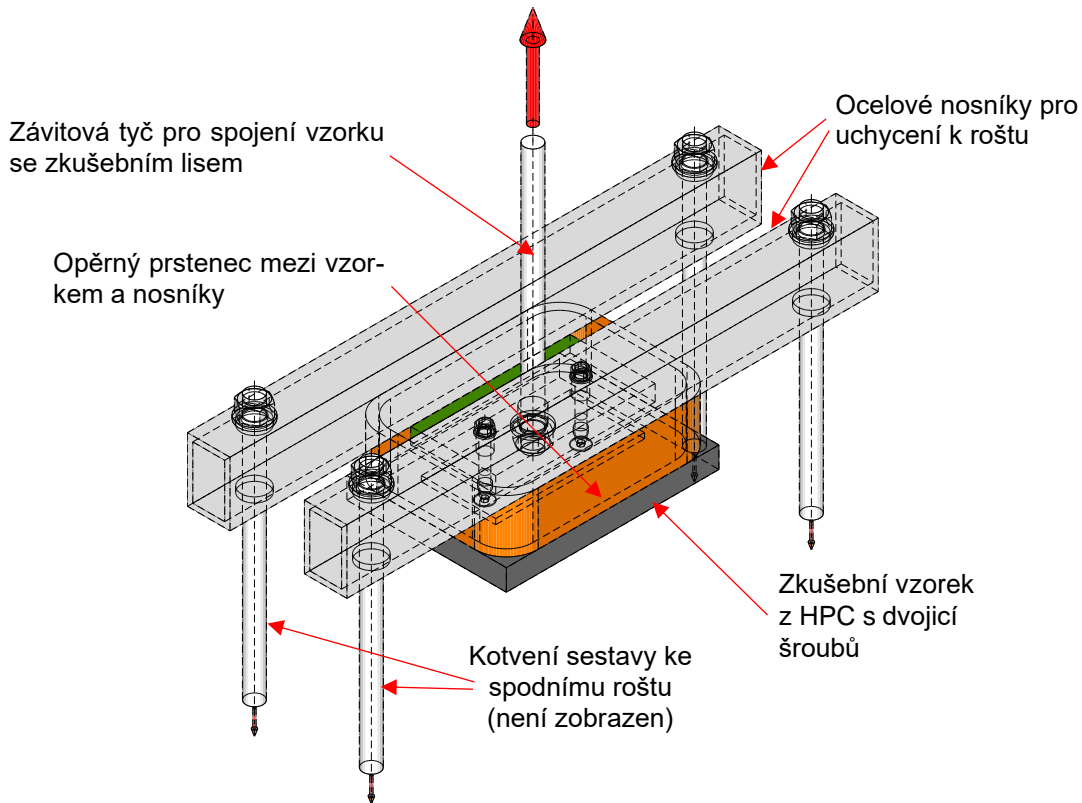
Princip uchycení vzorku při zkoušce v prostém tahu spočívá v podepření HPC vzorku po obvodu pomocí prstence, přes který jsou položeny ocelové nosníky s tyčemi uchycujícími sestavu ke zkušebnímu roštu. Vnášení zatížení probíhá přes pomocný plech s otvory pro dvojici zkoušených šroubů a závitovou tyč, která zajišťuje spojení se zkušebním lisem (obr. 44).

V rámci zkoušek kotvení s dvojicí tažených kotev byly testovány kónické šrouby průměru 6, 8 a 10 mm, viz obr. 33. Stáří zkušebních vzorků v okamžiku zkoušení bylo 24 hodin a 7 dní.

⁶² Tahová pevnost v navrženém modelu je zavedena jako $f_{ct} = \sqrt{f_{cc}}$, stejně jako ve dříve publikovaných studiích, viz část 2.2.3.

⁶³ Pro zpřesnění by bylo vhodné provést zkoušky s větším počtem doprovodných těles pro určení pevnosti HPFRC.

⁶⁴ Přídatné namáhání kotevních šroubů jako např. síly od páčení způsobované omezenou tuhostí patních plechů, ke kterému dochází v případě přenosu zatížení z plechu do kotev apod.



Obr. 44 Schéma sestavy pro zkoušku dvojice tažených kotev v desce z HPC s PVA vlákny

3.1.3.2. Výsledky zkoušek

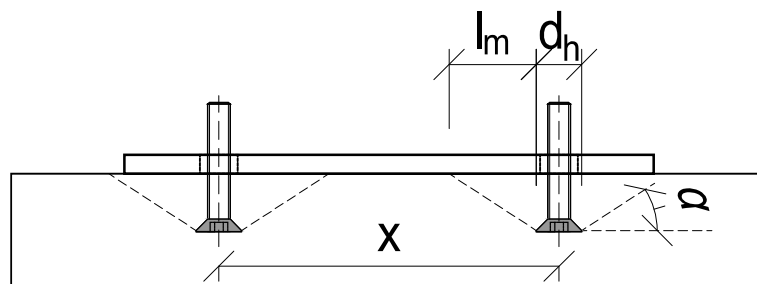
V průběhu zkoušek byl na vytržených betonových kuželech zaznamenán úhel roznosu zatížení α přibližně 33° . Zjevně nedochází k ovlivňování únosnosti jednotlivých šroubů. Ani pro největší kotevní hloubku $h_{ef} = 15$ mm v kombinaci s největším kotevním šroubem M10 s velikostí hlavy $d_h = 20$ mm (obr. 33) se betonového kužely neprotínají.



Obr. 45 Tvar vytrženého betonového kuželu u vzorků z HPFRC

Při stanovení osové vzdálenosti kotevních šroubů tak, aby nedocházelo ke vzájemnému ovlivňování jednotlivých kotev, lze vycházet z obr. 46. Při uvážení velikosti hlavy kotevního šroubu d_h a úhlu roznosu $\alpha = 33^\circ$ je minimální osová vzdálenost sousedních šroubů:

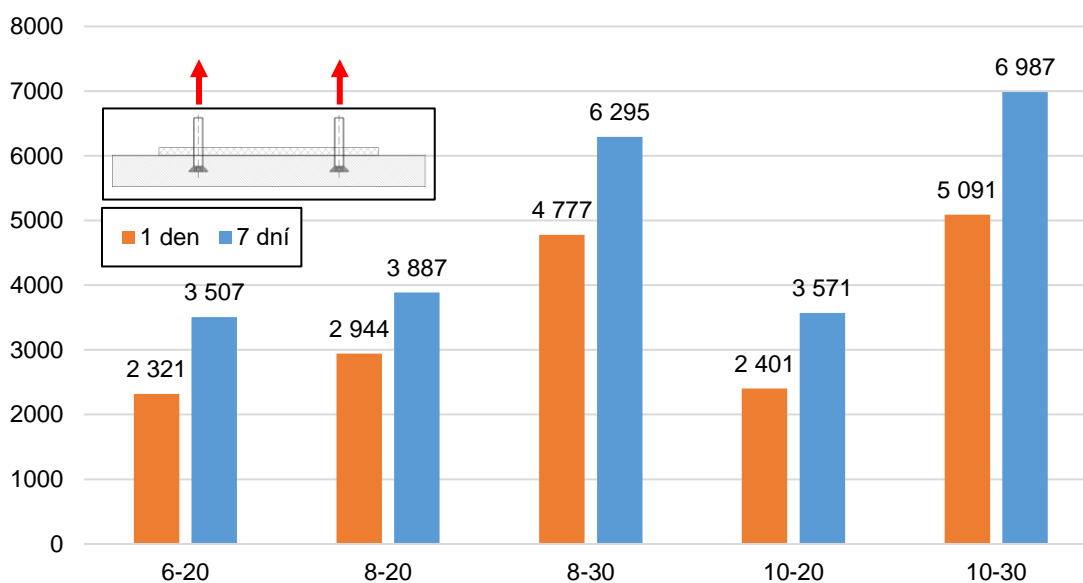
$$X = 3,1 \cdot h_{ef} + d_h \quad (3.3)$$


Obr. 46 Dosah betonového kuželu u HPFRC

Přehled vzorků a průměrné výsledky jsou uvedeny v tab. 12. Výsledná data jsou dále vykreslena v grafu (obr. 47). Výsledky sledují předpokládaný trend a únosnost se v čase mezi 1 dnem a 7 dní zvyšuje průměrně o 40 %.

Tab. 12 Souhrn výsledků tahových zkoušek dvojice kotev v desce z HPC s PVA vlákny

typ vzorků ($t-d_s-h$)	stáří vzorku t [dny]	tloušťka vzorku h [mm]	průměr šroubu d_s [mm]	počet vzorků n [ks]	prům. únosnost F_{um} [N]	sm. od- chylka S_x [N]	var. koef. V_x [-]
TD1-6-20	1	20	6	5	2321,3	246	0,11
TD1-8-20	1	20	8	2944,3	284	0,10	
TD1-8-30	1	30	8	5	4776,7	596	0,12
TD1-10-20	1	20	10	5	2401,2	238	0,10
TD1-10-30	1	30	10	5	5090,9	569	0,11
TD7-6-20	7	20	6	5	3506,5	379	0,11
TD7-8-20	7	20	8	5	3887,0	571	0,15
TD7-8-30	7	30	8	5	6294,5	827	0,13
TD7-10-20	7	20	10	5	3571,0	393	0,11
TD7-10-30	7	30	10	5	6986,9	648	0,09


Obr. 47 Průměrná únosnost dvojice tažených kotev v HPFRC

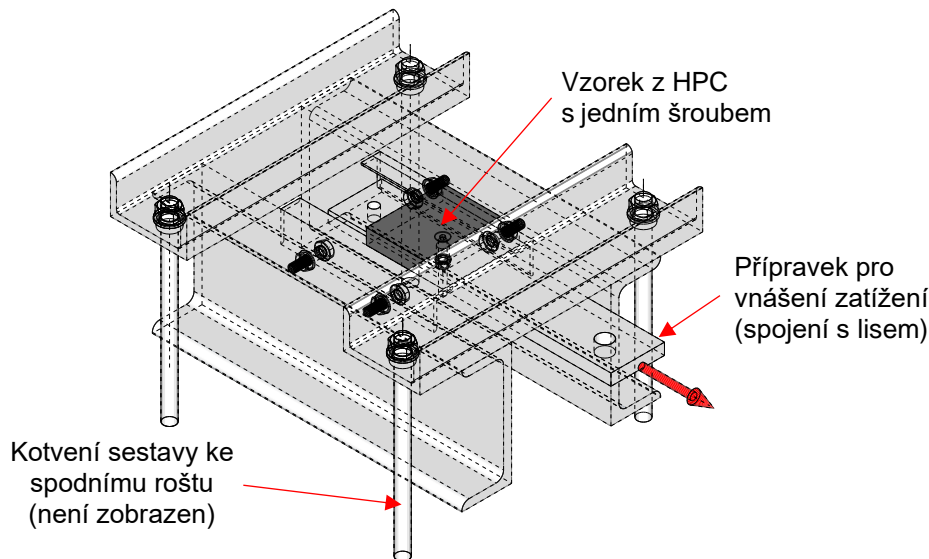
Srovnáním únosnosti jednotlivých šroubů (podle části 3.1.2) a únosnosti dvojic zjistíme, že výsledné únosnosti (celých vzorků) jsou na podobné úrovni. Zjevně se zde projevuje vliv výrobního postupu, který je určen přítomností spojovacího plechu. Ta způsobuje zadržování vzduchu a vznik kaveren pod plechem a zároveň znamená změnu lití čerstvé směsi a s ní spojenou změnu mechanických parametrů materiálu pro daný směr namáhání.⁶⁵ I přesto, že vzhledem ke geometrii nedochází k ovlivňování dvojice kotev, nebyl prokázán nárůst únosnosti kotvení při použití dvojice kotev spojených plechem.

Výsledky zkoušek dvojice tažených šroubů jsou dále využity při hodnocení interakce tahového a smykového namáhání kotevních oblastí s dvojicí kotevních šroubů (viz 3.1.2.3).

3.1.4. Smyk, jedna kotva

3.1.4.1. Uspořádání zkoušek a zkušební vzorky

Pro zjištění únosnosti kotvení při působení zatížení kolmo na osu kotevního prostředku byly provedeny zkoušky s jednou kotvou i s dvojicí kotev. Zkoušky kotvení s jedním šroubem byly provedeny na vzorcích stejného rozměru jako vzorky pro zkoušky v prostém tahu (obr. 36), výška vzorků byla rovněž pouhých 10 a 20 mm. Smyková síla byla vnášena pomocí speciálního ocelového kování (obr. 48). Zkušební vzorek s kotevním prostředkem vyčnívajícím směrem dolů byl uložen na dvojici ocelových nosníků. Vzorek byl zároveň opřen o jednu z převázek a kotevní šroub byl spojen s pásovinou, která zajistila spojení se zkušebním lisem. Lis byl uložen ve vodorovné poloze.



Obr. 48 Schéma sestavy pro zkoušku smyku s jedním kotevním šroubem v HPFRC

3.1.4.2. Výsledky a zhodnocení zkoušek

Souhrn průměrných hodnot únosnosti je uveden v tab. 13. Ačkoli bylo vyrobeno a vyzkoušeno 5 exemplářů kotvení od každého typu, nepodařilo se ve všech případech úspěšně dokončit zkoušku. Zejména v extrémně malých kotevních hloubkách ($h_{ef} = 5$ mm) je rozptyl výsledků značný, o čemž svědčí některé hodnoty variačního koeficientu v tab. 13.⁶⁶

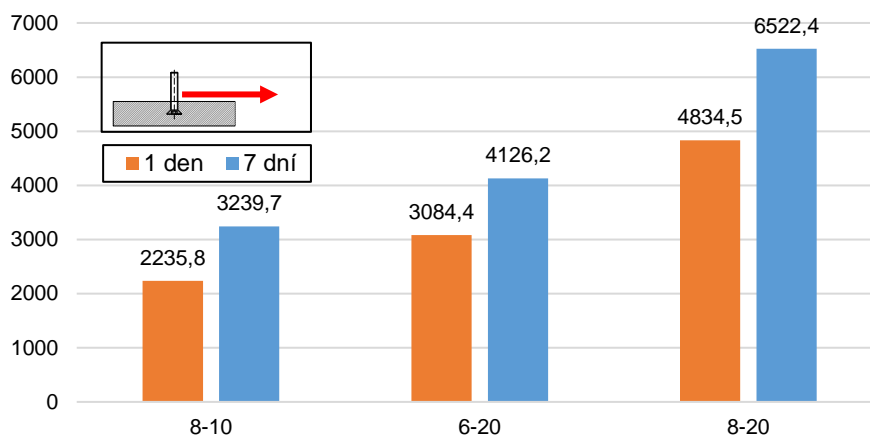
⁶⁵ Tyto změny bohužel nelze jednoduše postihnout při zkoušení pevností materiálu na normových tělesech.

⁶⁶ Obecně jsou takové výsledky zkoušky neakceptovatelné. Zde jsou výsledky ponechány především pro názornou ukázkou problematičnosti provedení kotvení v malých kotevních hloubkách.

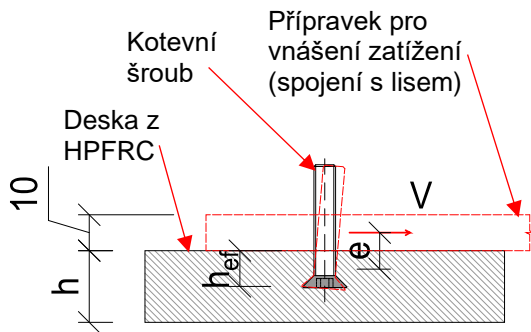
Tab. 13 Souhrn výsledků zkoušek smykového namáhání jedné kotvy v desce z HPFRC

typ vzorků ($t-d_s-h$)	stáří vzorku	tloušťka vzorku	průměr šroubu	počet vzorků	prům. únosnost	sm. od- chylka	var. koef.
	t [dny]	h [mm]	d_s [mm]	n [ks]	F_{um} [N]	S_x [N]	V_x [-]
SJ1-8-10	1	10	8	5	2235,8	726	0,32
SJ1-6-20	1	20	6	5	3084,4	235	0,08
SJ1-8-20	1	20	8	5	4834,5	291	0,06
SJ7-8-10	7	10	8	4	3239,7	1714	0,53
SJ7-6-20	7	20	6	4	4126,2	583	0,14
SJ7-8-20	7	20	8	5	6522,4	718	0,11

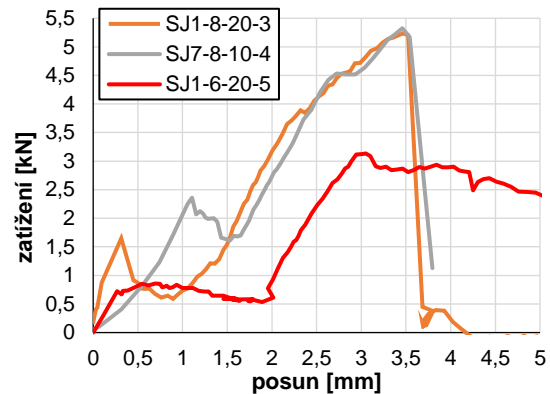
Vzorky kotvení vykazují předpokládaný nárůst únosnosti při zvětšování průměru kotevního šroubu (a současném zachování stejné h_{ef}) a se stárnutím betonu. Vývoj smykové únosnosti v čase je znázorněn v grafu (obr. 49). K průměrnému nárůstu únosnosti mezi zkouškami 1denního stáří a 7denními zkouškami došlo cca o 38 %.


Obr. 49 Průměrná smyková únosnost jednotlivých kotev

Zatěžování smykovou silou vzorků s jedním šroubem bylo charakteristické počátečním vy-lamováním kotevního šroubu. To bylo způsobeno (sice jen malou) excentricitou působící síly, která je určena tloušťkou zatěžovacího plechu. Princip porušování je uveden na obr. 50. Při pokračování zkoušky však docházelo ke zpevnění kotevní oblasti a k následnému nárůstu přenášeného zatížení, které je patrné z vybraných pracovních diagramů (obr. 51).



Obr. 50 Princip porušování kotvení s jedním šroubem při smykovém namáhání



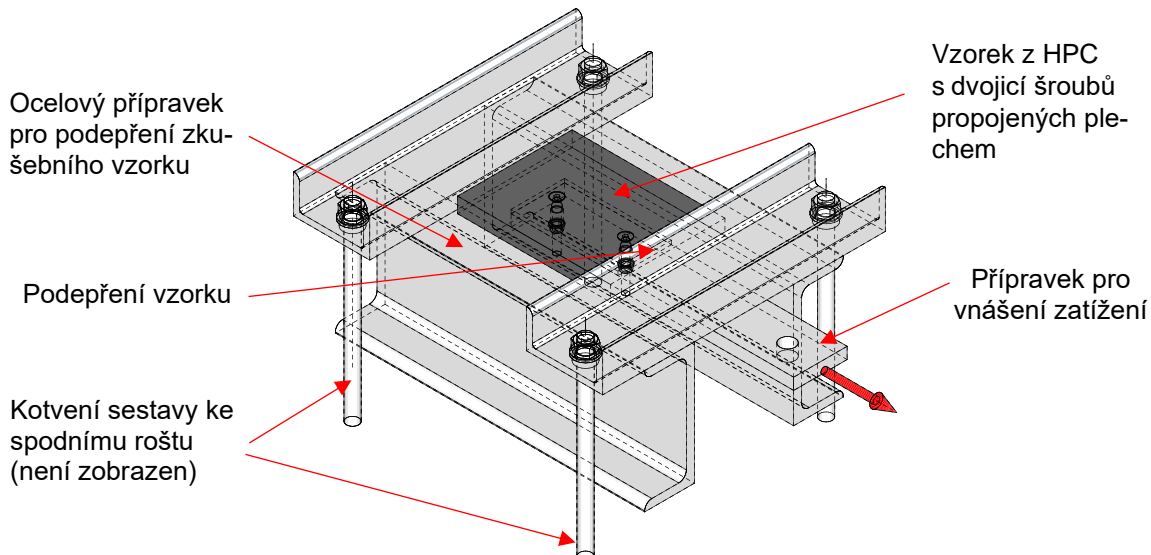
Obr. 51 Pracovní diagramy vybraných vzorků kotvení ve smyku, jeden šroub

Při praktickém navrhování však nelze připustit podobné trvalé deformace a v pružném stavu je odpovídající síla v kotvení poměrně malá. Proto byl tento způsob provedení kotvení pro smykové uspořádání označen jako neefektivní a bylo by potřeba jiným způsobem zajistit plynulý přenos smykového zatížení z kotevních šroubů do betonu.

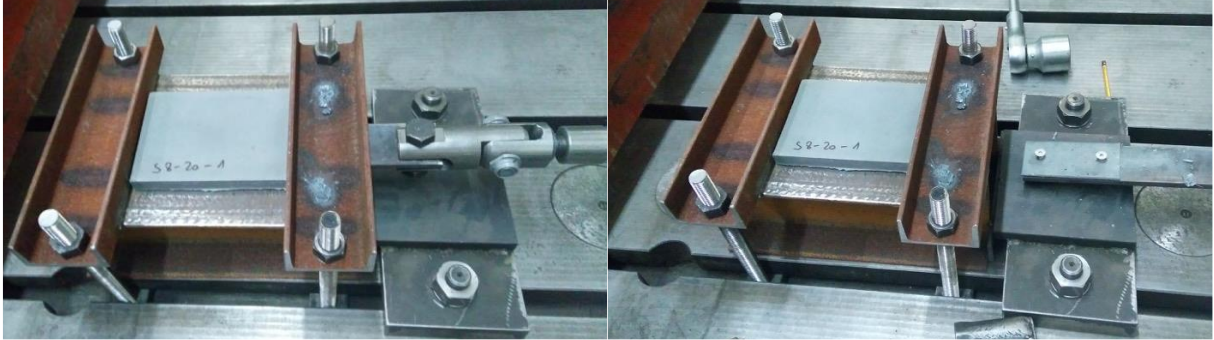
3.1.5. Smyk, dvojice kotev

3.1.5.1. Uspořádání zkoušek a zkušební vzorky

Vzorky kotvení pro zkoušky smyku s dvojicí kotev byly shodné se zkouškou dvojice tažených šroubů (obr. 43). Výška vzorku byla 20 mm, resp. 30 mm. Ve zkušební destičce byly zabudovány dvojice identických kotevních šroubů se závitem M6 až M10. Obdobně jako u zkoušky smyku s jedním šroubem byl vzorek položen na zkušební přípravek, zboku podepřen o horní převázkou a pomocí ocelového plechu spojen přes dvojici šroubů s vidlicí zkušebního lisu. Princip zkoušení je znázorněn na obrázcích (obr. 52 a obr. 53). Celkem bylo tímto způsobem vyzkoušeno 75 vzorků kotvení.



Obr. 52 Schéma sestavy pro zkoušku kotvení ve smyku s dvojicí kotevních šroubů



Obr. 53 Vzorek s dvojcí kotev před a po zkoušce smykové únosnosti

3.1.5.2. Výsledky a zhodnocení zkoušek

Při zatížení dvojice šroubů smykovou silou dochází ke složitějšímu namáhání kotevní oblasti. V závislosti na vzdálenosti kotev od volného okraje prvku, na tuhosti spojení obou šroubů a případné vůli v otvorech plechu zatěžovacího přípravku dochází k přerozdělování zatížení mezi jednotlivé kotvy.⁶⁷ Příklad porušeného vzorku (SD1-8-20-1) je na obr. 54. V porovnání se vzorky s jednou kotvou (viz 3.1.4) je smyková únosnost výrazně vyšší a výsledky jsou celkově vyrovnanější. Výsledky zkoušek dvojic kotevních šroubů ve smyku jsou shrnuty v tab. 14.



Obr. 54 Porušení vzorku po zkoušce smykové únosnosti dvojice kotev

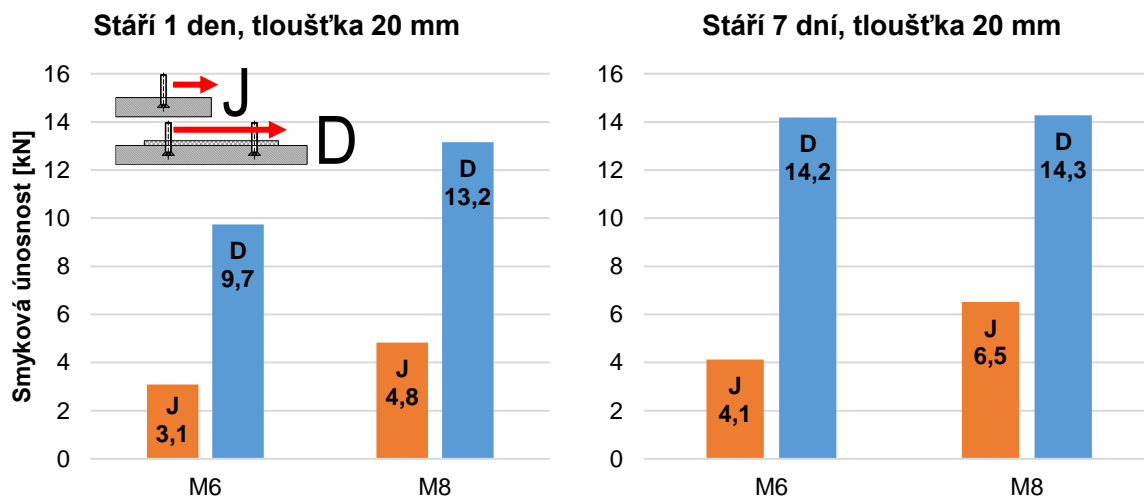
Tab. 14 Souhrn výsledků zkoušek smykového namáhání dvojice kotev v deskách z HPFRC

typ vzorků ($t-d_s-h$)	stáří vzorku t [dny]	tloušťka vzorku h [mm]	průměr šroubu d_s [mm]	počet vzorků n [ks]	prům. únosnost F_{um} [N]	sm. od- chylka S_x [N]	var. koef. V_x [-]
SD1-6-20	1	20	6	4	9742,2	1926	0,20

⁶⁷ Podrobně je tato problematika řešena v Bulletinu fib 58 [6], s. 63.

typ vzorků ($t-d_s-h$)	stáří vzorku	tloušťka vzorku	průměr šroubu	počet vzorků	prům. únosnost	sm. od- chylka	var. koef.
	t [dny]	h [mm]	d_s [mm]	n [ks]	F_{um} [N]	S_x [N]	V_x [-]
SD1-8-20	1	20	8	5	13160,8	2682	0,20
SD1-8-30	1	30	8	5	21197,5	3136	0,15
SD1-10-20	1	20	10	5	14447,4	3912	0,27
SD1-10-30	1	30	10	5	23867,1	5063	0,21
SD7-6-20	7	20	6	5	14183,0	3152	0,22
SD7-8-20	7	20	8	5	14277,0	3077	0,22
SD7-8-30	7	30	8	5	23264,8	3037	0,13
SD7-10-20	7	20	10	5	13443,1	2367	0,18
SD7-10-30	7	30	10	5	21516,1	2256	0,10
SD14-6-20	14	20	6	5	12816,3	2425	0,19
SD14-8-20	14	20	8	5	17055,9	5859	0,34
SD14-8-30	14	30	8	5	23598,7	2202	0,09
SD14-10-20	14	20	10	5	16938,6	1146	0,07
SD14-10-30	14	30	10	5	32663,4	3644	0,11

Zhodnocení efektivity dvojice kotevních šroubů spojené plechem při namáhání smykovou silou lze provést při porovnání s únosností kotvení s jedním šroubem (zkoušky jsou popsány v části 3.1.4). Grafy na obr. 55 znázorňují únosnost obou typů kotvení namáhaných ve smyku, tloušťka betonových vzorků je shodně 20 mm. Největší nárůst únosnosti mezi jedním šroubem a dvojicí je u šroubů velikosti M6, který dosahuje 316 % (stáří 1 den) a 344 % (stáří 7 dní). U šroubů M8 je nárůst 272 % (stáří 1 den), resp. 219 % (stáří 7 dní).



Obr. 55 Smyková únosnost jednotlivých kotev (J) a dvojice kotev (D), tloušťka desky 20 mm

Vysvětlení, proč je únosnost dvojice šroubů více než dvojnásobná v porovnání s jedním šroubem, spočívá v použití ocelového plechu propojujícího oba šrouby. Vodorovná (smyková) síla působí na kotevní šrouby v určité vzdálenosti od povrchu betonu, a i přes to, že

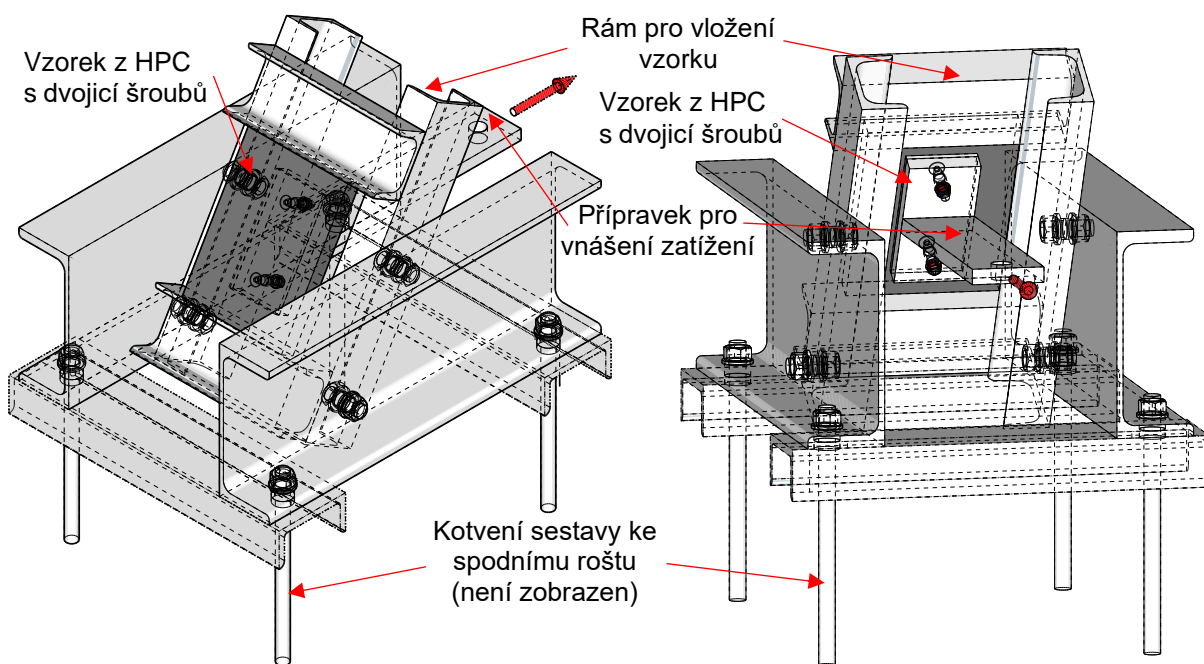
tato vzdálenost je rovna půlce tloušťky (10 mm) přípravku pro vnášení zatížení⁶⁸ (viz obr. 48 a obr. 52), dochází k přidavnému namáhání šroubu, které vede k jeho vylamování z betonu. Princip porušení vzorků s jednou kotvou je na obr. 54. Na vzorcích s dvojicí šroubů (a doplněným propojujícím plechem) je tomuto mechanismu zabráněno právě použitím plechu s přesnými otvory, který do značné míry vzdoruje tomuto ohybovému namáhání. Díky této stabilizaci je umožněn přenos většího zatížení prostřednictvím dvojice šroubů.

Výsledky zkoušek dvojice smykem namáhaných šroubů jsou dále využity při hodnocení interakce tahového a smykového namáhání kotevních oblastí s dvojicí kotevních šroubů (viz 3.1.2.3).

3.1.6. Kombinované namáhání (N+V), dvojice kotev

3.1.6.1. Uspořádání zkoušek a zkušební vzorky

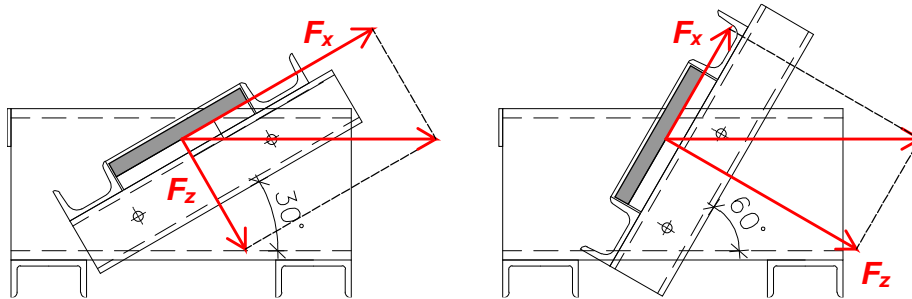
Zkoušky kotevních oblastí, při kterých byly kotevní šrouby namáhány kombinací tahové a smykové síly, byly prováděny podle výše uvedeného ETAG 034-1 [2] (kap. 5.4.2.2.3) a byly tak zvoleny dva úhly 30° a 60°, pod kterými působilo zkušební zatížení (obr. 57).⁶⁹ Byly zhotoveny nastavitelné ocelové přípravky pro uchycení vzorků pod oběma úhly. HPC vzorek byl vložen do horního rámu a dvojicí kotevních šroubů byl spojen se zkušebním lisem pomocí ocelového přípravku s příslušným úhlem. Zkušební lis vyvodil vodorovnou sílu. Princip zatěžování je zobrazen na obr. 56 a obr. 57.



Obr. 56 Schéma sestavy pro zkoušku kombinovaného zatížení dvojice kotev v desce z HPC s PVA vlákny

⁶⁸ U vzorku s dvojicí šroubů je vzdálenost zvětšena o tloušťku zabudovaného plechu.

⁶⁹ Úhel β značí sklon působícího zatížení měřený vzhledem k rovině zkušebního vzorku.



Obr. 57 Způsob zatěžování vzorků při zkoušce kotevních oblastí kombinací tahu a smyku

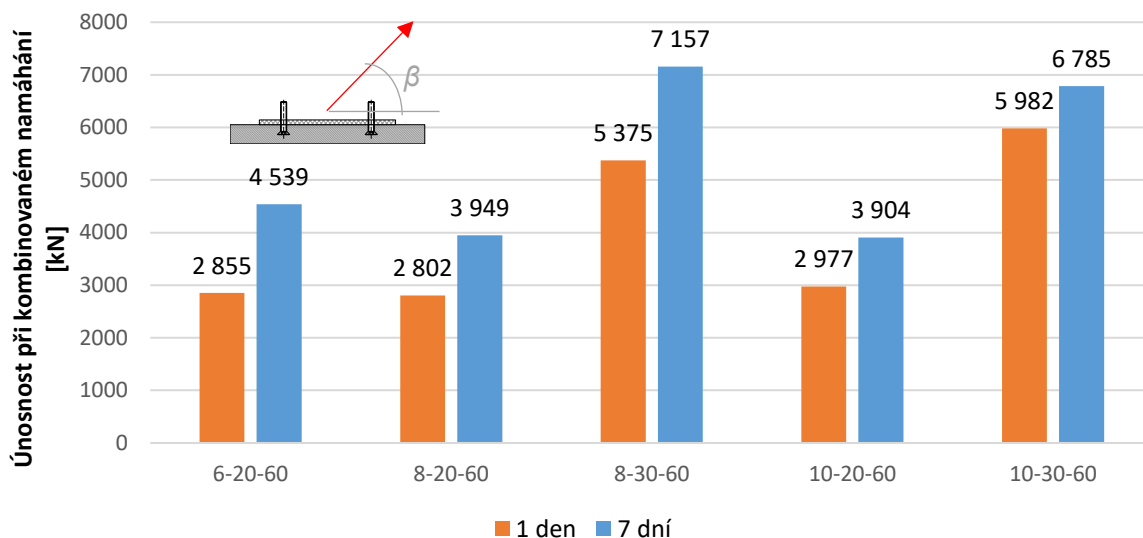
3.1.6.2. Výsledky zkoušek

Přehled vzorků a průměrné výsledky jsou uvedeny v tab. 15. Výsledná data jsou dále vykreslena v grafu (obr. 58). Výsledky mají předpokládanou tendenci a únosnost se v čase mezi 1 dnem a 7 dnů zvyšuje průměrně o 37 %. V porovnání s předchozími druhy zkoušek není u dvojice šroubů M10 v desce tloušťky 20 mm (NV-10-20-60) předpokládán nárůst únosnosti a výsledky jsou na srovnatelné úrovni se vzorky se šroubem M8 typu NV-8-20-60. Očekávaný nárůst únosnosti nastává teprve u desek s tloušťkou 30 mm. Zároveň se

Tab. 15 Souhrn výsledků zkoušek kombinovaného namáhání dvojice kotev v desce z HPFRC

typ vzorků ($t-d_s-h-\beta$)	stáří vzorku	tloušťka vzorku	prů- měr	úhel	počet vzorků ⁷⁰	prům. únos- nost	sm. od- chylka	var. koef.
	t [dny]	h [mm]	d_s [mm]	β [°]	n [ks]	F_{um} [N]	S_x [N]	V_x [%]
NV1-6-20-30	1	20	6	30	5	4006,1	710	0,18
NV1-6-20-60	1	20	6	60	5	2854,6	469	0,16
NV1-8-20-60	1	20	8	60	5	2801,7	205	0,07
NV1-8-30-60	1	30	8	60	5	5374,6	766	0,14
NV1-10-20-60	1	20	10	60	5	2977,5	377	0,13
NV1-10-30-30	1	30	10	30	5	6771,1	890	0,13
NV1-10-30-60	1	30	10	60	5	5981,8	987	0,16
NV7-6-20-60	7	20	6	60	4	4539,2	945	0,21
NV7-8-20-60	7	20	8	60	5	3948,5	360	0,09
NV7-8-30-60	7	30	8	60	5	7156,9	442	0,06
NV7-10-20-60	7	20	10	60	5	3904,2	580	0,15
NV7-10-30-60	7	30	10	60	5	6784,6	1047	0,15

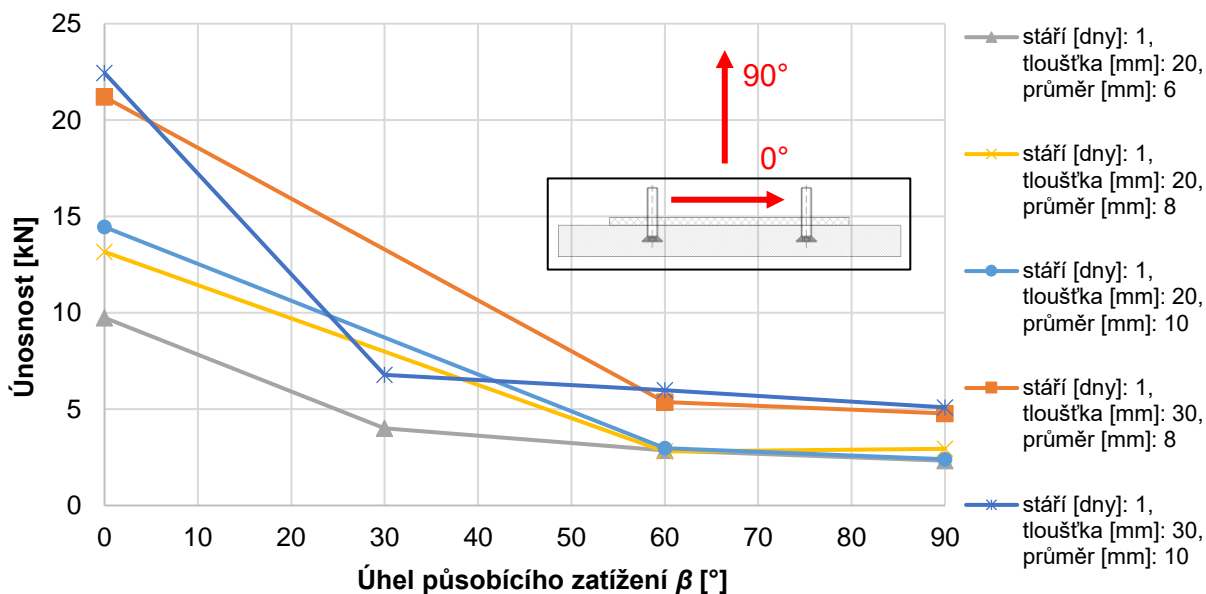
⁷⁰ U zkušebních vzorků NV1-6-20-60-5 a NV7-6-20-60-1 došlo v průběhu zkoušení k chybě a výsledky tak byly zkráceny, nejsou proto zahrnuty do vyhodnocení.



Obr. 58 Průměrná únosnost dvojice kotev v HPFRC při kombinovaném namáhání, $\beta = 60^\circ$

3.1.6.3. Posouzení kotvení namáhaného kombinací tahu a smyku

Na základě provedených experimentů (čítajících spektrum namáhání od prostého tahu, přes kombinaci tahu a smyku až po namáhání ve smyku) lze hodnotit vývoj únosnosti při měnícím se úhlu zatížení β . V grafu závislosti únosnosti kotvení na úhlu působícího zatížení (obr. 59) je patrný nárůst únosnosti s klesajícím úhlem β . Zkušební data byla dále zpracována za účelem posouzení interakce složek zatížení.



Obr. 59 Vliv sklonu působícího zatížení β na únosnost dvojice kotev pro různé tloušťky desky a průměry kotev, stáří 1 den

Fib Bulletin 58 [6] definuje vztah pro posouzení kotevních oblastí vystavených kombinovanému namáhání se zatížením kotev v tahu a ve smyku. Dle způsobu porušení

jednotlivých kotev a také dle technologie (rozlišující kotvení předem a dodatečně) se mění exponent a v rovnici (3.4).⁷¹

$$\left(\frac{N_E}{N_R}\right)^a + \left(\frac{V_E}{V_R}\right)^a \leq 1 \quad (3.4)$$

N_E a V_E je působící zatížení a N_R a V_R je únosnost kotvení, přičemž je uvažována jako minimální hodnota stanovená z jednotlivých součástí kotvení (ocel, betonový kužel atd.).

Rovnicí (3.5) je v eurokódu 1992-4 [5] uveden postup pro posouzení interakce smykové a tahové síly pro způsoby porušení jiné než porušení oceli:

$$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{Rd,i}}\right)^{1,5} + \left(\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,i}}\right)^{1,5} \leq 1$$

nebo (3.5)

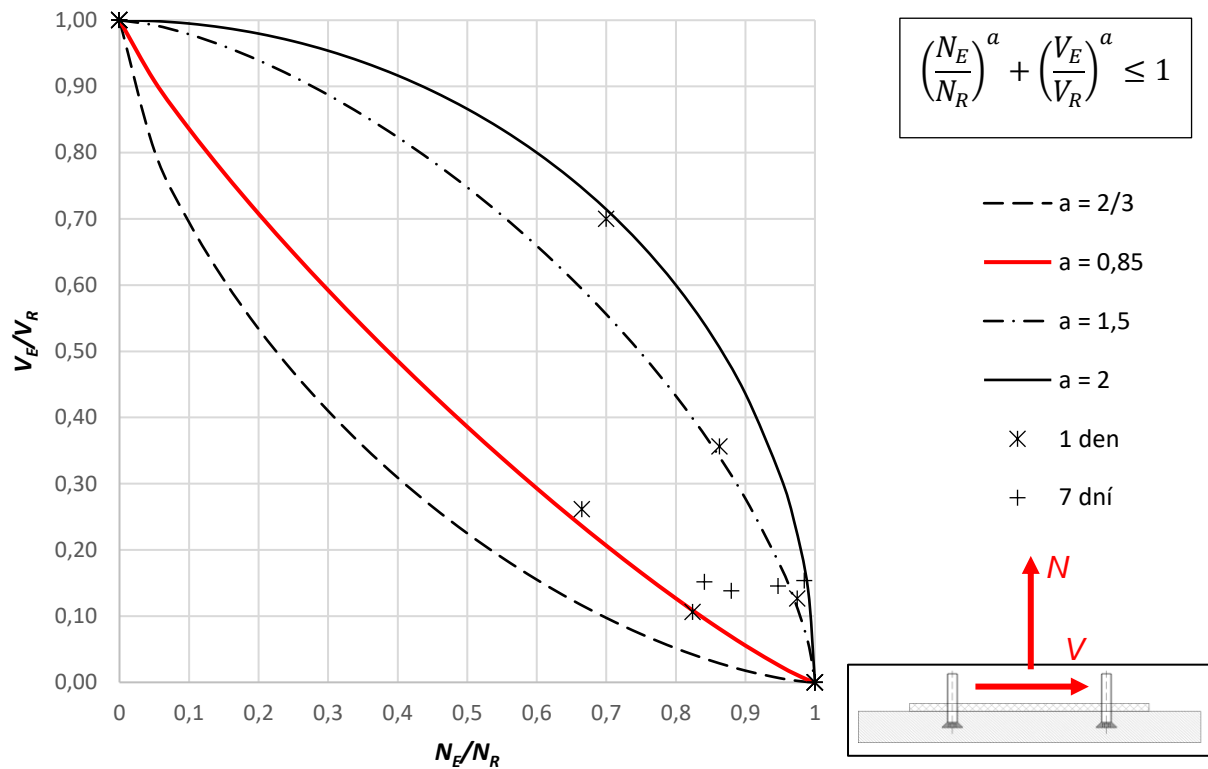
$$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{Rd,i}}\right) + \left(\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,i}}\right) \leq 1,2$$

S využitím rovnice (3.4) byl sestaven interakční diagram kotevních oblastí v HPFRC namáhaných kombinací tahové a smykové síly (obr. 60), kdy jsou zohledněna jednotlivá specifika kotvení pomocí exponentu a , viz výše. Diagram je doplněn o výsledky provedených zkoušek. Obr. 60 dále zahrnuje výsledky zkoušek kombinace N a V. Experimentálně zjištěná únosnost kombinace N a V (zatěžování pod úhlem 30° a 60°) byla přepočtena do složek svislého $F_{uz,N+V}$ a vodorovného $F_{ux,N+V}$ zatížení (obr. 57). Následně byl pomocí rovnice (3.6) stanoven poměr mezi svislou, resp. vodorovnou složkou zatížení a únosnosti zjištěné při zkoušce kotvení v prostém tahu $F_{u,N}$ (podle části 3.1.3), resp. ve smyku $F_{u,V}$ (podle části 3.1.5):

$$\frac{N_E}{N_R} \rightarrow \frac{F_{uz,N+V}}{F_{u,N}} = \frac{\sin \beta \cdot F_{u,N+V}}{F_{u,N}}$$

$$\frac{V_E}{V_R} \rightarrow \frac{F_{ux,N+V}}{F_{u,V}} = \frac{\cos \cdot \beta F_{u,N+V}}{F_{u,V}} \quad (3.6)$$

⁷¹ Pro dodatečné kotvení a porušení oceli, resp. betonu, je $a = 2$, resp. $a = 1,5$. Pro předem zabudované kotvy s doplňkovou výztuží přebírající jen tahové nebo smykové zatížení je $a = 2/3$.



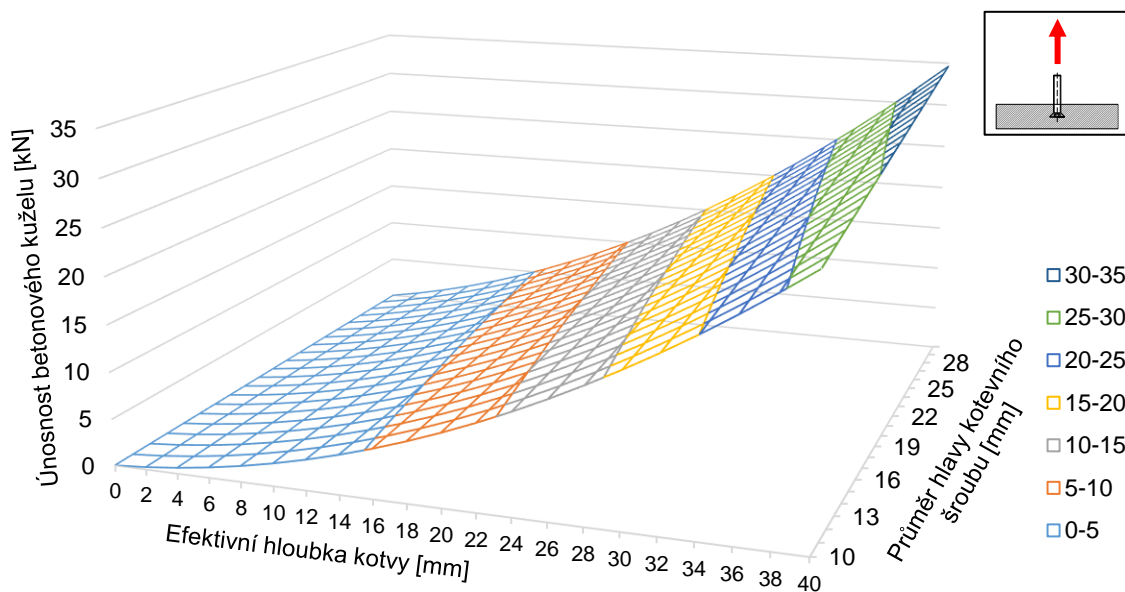
Obr. 60 Interakční diagram kotvení namáhaného kombinací normálové a smykové síly pro různé exponenty a podle rovnice (3.4)

Na základě vyhodnocení celé skupiny zkušebních vzorků s dvojicí šroubů lze konstatovat, že exponent používaný pro hodnocení interakce tahového a smykového namáhání lze při posuzování kotevních prvků zabudovaných v HPFRC či UHPFRC zvýšit na $a = 0,85$ (v souladu se sestaveným interakčním diagramem na obr. 60). Tímto lze upřesnit hodnotu, která je jinak pro běžný beton a kotvy zabudované předem uvažována jako $a = 2/3$.

3.1.7. Shrnutí zkoušek kotvení v tenkých deskách z HPFRC

Při experimentálním ověření kotevních prostředků předem zabudovaných v HPC s PVA vlákny bylo testováno na 280 zkušebních vzorků kotvení. Na základě provedených experimentů lze zformulovat následující odpovědi na otázky položené na počátku výzkumu:

- Při zkoušení byla pozorována průměrná velikost úhlu roznosu zatížení α_m (sklon vytrženého betonového kuželu) kolem 33° , viz obr. 45.⁷² Dosah takového betonového kuželu je tedy menší než hodnota $2 h_{ef}$ a tudíž ani u větší hloubek h_{ef} nedochází ke vzájemnému ovlivňování dvojice tahem namáhaných kotevních šroubů. Limitní vzdálenost dvojice kotevních přípravků byla stanovena pomocí vzorce (3.3).
- Velikost hlavy d_h kotevního prostředku přímo úměrně ovlivňuje únosnost kotvení. Na základě zkoušek jednotlivých šroubů v prostém tahu byla sestavena rovnice (3.2) pro stanovení únosnosti betonového kuželu v tenkých deskách z HPFRC, pomocí které lze zohlednit rozměr hlavy d_h kotevního šroubu je patrná ze souhrnného grafu na obr. 61. Platnost vztahu (3.2) by bylo vhodné ověřit na kotvení ve větších efektivních hloubkách. Uvedená vyhodnocení jsou založena na výsledcích kotvení v extrémně malých kotevních hloubkách 5 mm a 10 mm, které zpravidla nemají v konstrukcích z běžného betonu obdoby.



Obr. 61 Únosnost betonového kuželu v závislosti na h_{ef} a d_h dle rovnice (3.2), HPFRC⁷³

- Při konfrontaci výsledků zkoušek kotvení a souvisejících výsledků materiálových charakteristik z hlediska časového vývoje byla vyhodnocena jako vhodnější vlastnost HPFRC pro stanovení únosnosti pevnost v tahu za ohybu. Je to dáno především vývojem pevnosti v tahu za ohybu v čase, který více koresponduje s časovým vývojem únosnosti kotvení. Vzhledem k tomu, že byla zkoušena pouze jedna receptura HPFRC s neměnným zastoupením vláken v_f , nebylo možné upřesnit závislost únosnosti při změně tahové pevnosti (resp. změně v_f).⁷⁴

⁷² Hodnota se blíží velikosti úhlu 35° , ze kterého vychází metoda CCD (dle kapitoly 2.2.3.4).

⁷³ Pevnost HPFRC v tahu za ohybu byla použita z tab. 7 pro stáří 1 den.

⁷⁴ Obecně je při změně v_f zaznamenáván významný nárůst tahové pevnosti a marginální změna tlakové pevnosti. Podrobně se této problematice věnuje výzkum v části 3.2.

- Pro zhodnocení interakce tahové a smykové síly působící na kotvení byl využit interakční diagram. Ze stávajících návrhových přístupů byly aktualizovány hodnoty exponentů pro použití v kombinaci s HPFRC, resp. UHPFRC. Ukazuje se, že stávající metody (určené pro běžný beton a kotevní prostředky zabudované předem) jsou konzervativní a pomocí výsledků provedených zkoušek byla navržena úprava rovnice (3.4) spočívající v použití exponentu $a = 0,85$.
- Použití ocelového plechu s přesnými otvory se závitem, který spojuje dvojici kotevních šroubů, mělo jednoznačně pozitivní vliv na únosnost kotvení ve smyku. Použitím plechu je omezeno vylamování šroubů z betonu a přenášená smyková síla se lépe roznáší do betonu. Při použití dvojice šroubů s plechem bylo dosaženo téměř trojnásobné smykové únosnosti ve srovnání s kotvením s jedním šroubem a bez plechu.

Využitím plechu u dvojice tažených kotev lze eliminovat nepřesnosti při zabetonování šroubů a dosáhnout velmi přesné kolmosti. Naproti tomu se objevuje problém při betonáži, kdy dochází ke změně způsobu betonování a ke vzniku vzduchových kaveren pod ocelovým plechem, které vedou ke snížení únosnosti. Výsledná únosnost dvojice tažených šroubů a jednotlivého šroubu bez plechu je tak srovnatelná.

Důležitým aspektem u kotvení v UHPC obsahujícím vlákna je způsob výroby a odlévání prvku, stejně tak jako poloha kotevního prostředku vzhledem k povrchům betonového dílce, kdy lze pozorovat značný vliv usměrnění výztužných vláken (ať již vlivem postupu výroby, ošetřování povrchů nebo kontaktu čerstvé směsi s formou) na mechanické parametry. Toto je zmiňováno v části 2.2.6. Této problematice je blíže věnován experimentální výzkum popsáný v kapitole 3.2.

3.2. Tahové zkoušky kotevních oblastí v UHPFRC

Obecně vyplývá potřeba vlastního zkušebního programu z celkově malého vzorku provedených zkoušek kotvení na materiálu UHPFRC. Zkoušky realizované v rámci výzkumů uvedených v části 2.2.7 jsou většinou 28denní. Kotvení je ale ve většině případů namáháno výrazně dříve, a to především při produkci UHPC v prefabrikaci. Doposud nebyly provedeny srovnávací testy kotvení s parametry jako objemové zastoupení vláken v_f ve směsi, poloha kotvy vzhledem k postupu betonáže, a to vše spolu s proměnnou hloubkou h_{ef} .

V rámci provedeného experimentálního výzkumu byly testovány kotevní prostředky předem zabetonované ve vzorcích z UHPFRC s různým objemovým zastoupením ocelových vláken (v_f).⁷⁵ Cílem tahových zkoušek bylo zjištění únosnosti kotevní oblasti, vč. podrobného stanovení závislosti síly na posunu kotevního prostředku, přičemž:

- kotevní prostředky byly namáhány výhradně osovou tahovou silou,
- požadovaný způsob porušení kotevní oblasti byl vytržení betonového kuželu,
- proměnnými parametry byly stupeň vyztužení matrice UHPFRC (v_f), účinná hloubka zapuštění šroubu (h_{ef}) a poloha kotevního prostředku vzhledem ke směru betonáže,
- byl používán stále stejný typ kotevního šroubu,
- zkoušky byly provedeny za běžných podmínek, zkušební vzorky byly zhotoveny v průmyslových podmínkách výroby prefabrikátů,
- zkoušky byly navrženy bez vlivu okrajů betonového prvku a pouze s jedním kotevním prostředkem,
- výroba a zkoušky kotevních oblastí byly doplněny řadou zkušebních těles pro stanovení mechanických parametrů UHPFRC.

Před samotným plánováním a realizací experimentů byly přijaty následující předpoklady, které vychází ze současného poznání problematiky a z dosavadních zkušeností s materiálem UHPC. Tyto předpoklady měly být zkouškami potvrzeny a vybrané jevy detailněji popsány:

- únosnost kotevní oblasti narůstá s vyšším stupněm vyztužení UHPC drátky a s větší účinnou hloubkou zapuštění šroubu,
- podstava vytrženého kužele (resp. úhel roznosu zatížení α) se s pevností (s rostoucím v_f) materiálu zvětšuje,
- nárůst únosnosti kotvení přímo neodpovídá změně tlakové pevnosti UHPFRC, která není úměrná změně v_f , nýbrž koreluje s nárůstem pevnosti v tahu,
- tuhost kotevních oblastí narůstá úměrně zvyšování množství vyztužných vláken v_f ,
- podobně, jako u desek dochází u dna formy k segregaci vláken (což má za následek lokální nárůst tahové pevnosti materiálu a zvýšení únosnosti), se předpokládá větší únosnost kotev umístěných u dna formy oproti kotvám zabetonovaným v hlazeném povrchu.

⁷⁵ Experimentální výzkum byl proveden v rámci projektů Studentské grantové soutěže ČVUT [104] a [105]. Výsledky zkoušek byly autorem částečně prezentovány v rámci příspěvku [95] a článku [96].

3.2.1. Zkušební vzorky

Pro zkoušky kotevních oblastí byly vyrobeny vzorky z UHPFRC tvaru kvádrů s rozměry 300×300×100 mm (obr. 62). Velikost zkušebního vzorku byla zvolena s ohledem na hloubku zapuštění kotevního šroubu a předpokládaný roznos zatížení.⁷⁶ V každém vzorku byl zabetonován jeden kotevní prostředek – šroub velikosti M16 s metrickým závitem a s kónickou hlavou (DIN7991), galvanicky pozinkované šrouby pevnostní třídy 10.9.⁷⁷ Účinná hloubka zapuštění šroubů h_{ef} 25, 35 nebo 45 mm byla volena s ohledem k rozměrům vláken (0,2×14 mm) a obvyklým dimenzím prvků z materiálu UHPFRC. Pro vyztužení matrice UHPC byla použita ocelová vlákna s objemovým zastoupením (v_f) 1,5 %, 2,0 % a 2,5 %, tj. přibližně 118, 157 a 196 kg/m³.⁷⁸ Ve vzorcích nebylo použito žádné další vyztužení.

Vzorky byly vyrobeny v běžných podmínkách výroby prefabrikátů.⁷⁹ Pro míchání UHPFRC byla použita malá ruční míchačka o velikosti 250 l (série s $v_f = 1,5$ %), respektive standardní planetová míchačka. Dávkování složek do míchačky spolu se způsobem dávkování a míchacím zařízením shrnuje tabulka (tab. 16).

Tab. 16 Složení UHPC pro zkoušky kotevních oblastí

Označení série	1,5 %	2,0 %	2,5 %
Datum výroby	05.12.2022	13.02.2023	09.01.2023
Míchací zařízení	Ruční míchačka	Planetová míchačka	Planetová míchačka
Dávkování	[kg/m ³ výsledné směsi]		
Suchá složka (PREMIX) ⁸⁰	2148	2148	2148
Superplastifikační přísada	36	36	36
Voda	160	165	170
Vlákna ⁸¹ (0,2/14 mm)	120	160	200

Přehled sérií zkušebních vzorků je uveden v tabulce (tab. 17). Systém značení zkušebních vzorků je následující:

$$XX - YYZ - i \quad (3.7)$$

kde:

⁷⁶ Roznos zatížení, resp. sklon, který svírá rovina porušení s vodorovnou rovinou, byl uvažován na základě publikovaných experimentálních programů [58], [66] a [72] a dosavadních zkušeností pro různá v_f přibližně mezi 20° a 24°.

⁷⁷ Šrouby s kónickou hlavou byly zvoleny z několika důvodů. Na základě předchozích experimentů (viz část 3.1) byla posouzena vhodnost šroubu pro maximalizaci únosnosti. Kruhový tvar hlavy šroubu je pro přenos síly do betonu vhodnější a zajišťuje rovnoměrnější přenos zatížení než např. šestihlanná hlava. Konicita hlavy je výhodná z hlediska potřebného prostoru pro umístění kotvy v betonu, zvláště u prvků z UHPC, jež vynikají štíhlostí a úsporem materiálu.

⁷⁸ Při volbě stupně vyztužení v_f bylo možné navázat na již realizované výzkumy [58], kde byla mimo jiné zkoušena matrice UHPFRC s $v_f = 1,0$ %. Podle novějších předpisů [25] je pro dosažení duktility UHPFRC doporučeno použít minimálně 1,5 % ocelových vláken, proto i zde byla hodnota 1,5 % brána jako minimum.

⁷⁹ Výroba vzorků a zkoušky byly provedeny v období mezi prosincem 2022 a únorem 2023.

⁸⁰ Betonové vzorky mají pro UHPC nebývalé bílou barvu, čehož je dosaženo použitím bílého cementu. UHPFRC bílé barvy vyniká mírným nárůstem pevnosti oproti šedé variantě. Při stejném typu ocelových drátků dosahuje bílé UHPC přibližně o 7 % vyšší pevnosti v tlaku, kdežto pevnosti v tahu za ohybu jsou u obou materiálů srovnatelné.

⁸¹ Ocelová vlákna pevnosti 2000 MPa.

XX je označení stupně vyztužení UHPC (v_f),

YY je hloubka zapuštění kotevního prostředku (h_{ef}),

Z je doplňkové značení polohy kotevního prostředku při betonáži; (H) – hlazený povrch, povrch od formy (F) se pro přehlednost neuvádí.

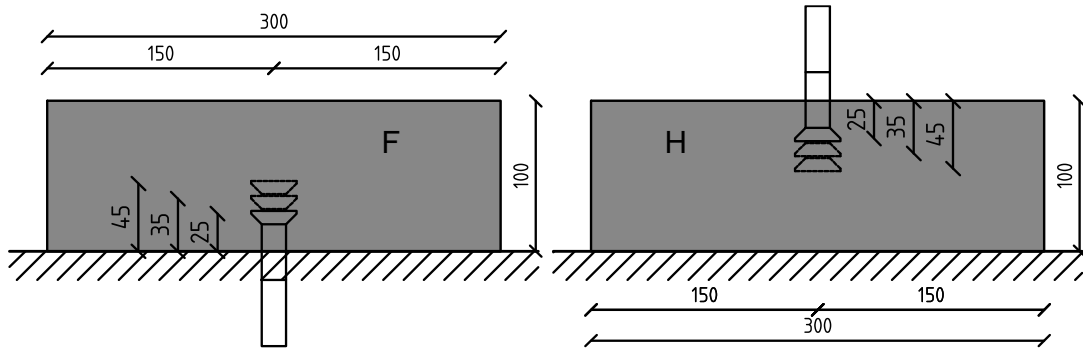
i je pořadí vzorku/zkoušky v dané sérii ($i = 1; 2; 3 \dots$), nebo průměrný výsledek ($i = M$).

Tab. 17 Přehled zkušebních vzorků pro zkoušky kotevních oblastí

Typ	v_f	h_{ef} [mm]	Povrch	Počet zkoušek daného typu
15-25	1,5 %	25	(F)	5
15-35	1,5 %	35	(F)	5
15-45	1,5 %	45	(F)	5
20-25	2,0 %	25	(F)	3
20-25H	2,0 %	25	(H)	3
20-35	2,0 %	35	(F)	3
20-35H	2,0 %	35	(H)	3
20-45	2,0 %	45	(F)	3
25-25	2,5 %	25	(F)	3
25-25H	2,5 %	25	(H)	3
25-35	2,5 %	35	(F)	3
25-35H	2,5 %	35	(H)	3
25-45	2,5 %	45	(F)	3
Celkový počet vzorků				45

Formy byly zhotoveny z vodovzdorných bednicích desek s hladkou fólií. Ve dně formy byl vyvrtán otvor pro vložení šroubu. Využitím bedněného povrchu na straně kotevního šroubu byla zajištěna rovinnost povrchu, což umožnilo rovnoměrný roznos zkušebního zatížení (viz 3.2.2). Pro zajištění svislosti šroubu byly vně spodního povrchu kotveny ocelové plotny s maticí M16 (obr. 63). Ve dvou sériích (2,0 % a 2,5 %) byl navíc sledován vliv polohy šroubu vzhledem ke směru betonáže vzorku, přičemž byly rozlišovány dva způsoby umístění šroubů: procházející dnem formy (F) (tzn. vyčnívající z povrchu od formy) a procházející hlazeným povrchem (H), blíže je patrné na obr. 62.⁸²

⁸² V případě umístění kotevního prostředku v hlazeném povrchu betonu (H) nebyla plocha v kontaktu s roznášecím plechem dokonale rovná jako v případě vzorků (F), nicméně na výsledné hodnoty únosnosti kotevní oblasti toto nemělo prakticky žádný vliv.



Obr. 62 Umístění kotvy na dně formy (F) a v horním povrchu (H)



Obr. 63 Výroba první série vzorků z UHPFRC ($v_f = 1,5\%$)

3.2.1.1. Mechanické parametry UHPFRC

Pro každou recepturu byla vyrobena tělesa pro zjištění mechanických vlastností UHPC. Ke každé sérii vzorků (z každé záměsi) byly zhotoveny válce průměru 100 mm a výšky

200 mm (pro zjištění pevnosti v tlaku a modulu pružnosti [8]), trámce 100×100×400 mm (zjištění pevnosti v tahu za ohybu [9])⁸³, krychle o hraně 100 mm (pevnost v tlaku [14]) a malé trámce 40×40×160 mm (pevnost v tahu za ohybu a v tlaku na zlomcích [10]). Výsledky jsou shrnuty v tab. 18. Kromě stáří 3 dny, kdy byly prováděny zkoušky kotvení, byly na vybraných tělesech dále zkoušeny pevnosti ve stáří 7, 28 a 90 dní.

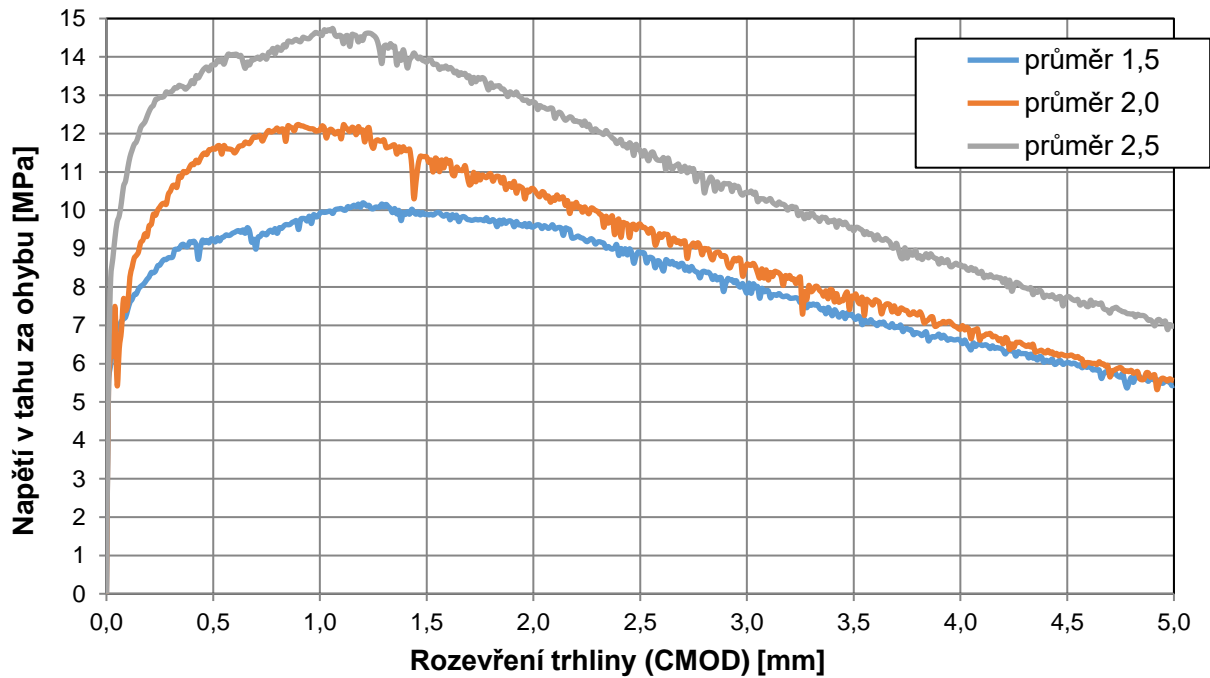
Tab. 18 Mechanické parametry UHPFRC, průměrné hodnoty

V_f				1,5 %	2,0 %	2,5 %
Veličina	Jednotka	Zkušební těleso	Stáří [dny]	Výsledek dle série v_f		
<i>Rozlítí</i>	mm	-	-	290×300	290×305	270×300
<i>Teplota po zamíchání</i>	°C	-	-	24,6	23,3	23,4
$f_{ct,f}$	MPa	trámec 100×100×400 mm	3	10,4	12,5	15,0
$f_{ct,L,f}$	MPa		3	7,6	9,1	9,7
f_{R1m}	MPa		3	9,2	11,6	13,8
f_{R2m}	MPa		3	9,9	11,4	14,0
f_{R3m}	MPa		3	8,9	9,6	11,7
f_{R4m}	MPa		3	7,2	7,8	9,4
ρ	kg/m ³		3	2430,0	2470	2500,0
f_{cm}	MPa	válec výšky 200 mm a průměru 100 mm	3	83,1	86,6	85,8
f_{cm}	MPa		28	123,3	126,4	123,7
E_{cm}	GPa		3	40,8	42,5	40,6
E_{cm}	GPa		28	46,3	45,8	47,3
ρ	kg/m ³		3	2445,0	2475	2500,0
f_{cm}	MPa	krychle o hraně 100 mm	3	97,1	99,2	98,9
f_{cm}	MPa		28	131,2	133,8	129,4
$f_{ct,f}$	MPa	trámec 40×40×160 mm	3	31,2	29,2	30,4
$f_{ct,f}$	MPa		7	31,2	35	32,0
$f_{ct,f}$	MPa		28	40,7	38,1	42,7
$f_{ct,f}$	MPa		90	40,9	40,5	42,9
f_{cm}	MPa		3	116,5	114,5	118,5
f_{cm}	MPa		7	128,0	130,0	131,5
f_{cm}	MPa		28	156,0	162,5	159,0
f_{cm}	MPa		90	176,5	175,0	177,5

Pracovní diagramy na obr. 64 zobrazující průběh zkoušky UHPFRC v tahu při 3bodovém ohybu s vrubem dle normy ČSN EN 14651 + A1 [9] dokládají pozitivní vliv dalšího přidávání výztužných vláken do UHPC. Velikost průměrného napětí na úrovni rozevření trhliny

⁸³ Velikost referenčního trámce pro zkoušku pevnosti tahu v 3bodovém ohybu je v publikacích [25] a [26] 150×150×700 mm. Zde však byla z praktických důvodů použita menší tělesa 100×100×400 mm. Dosažené výsledky na obou typech těles zpravidla vykazují vliv rozměrového efektu a menší trámce vykazují vyšší hodnoty pevnosti. Pro případný přepočítání pevností mezi uvedenými velikostmi trámců je tak vhodné použít převodní součinitel. Z praktických zkušeností je poměr mezi výsledky na velkém a malém trámci 0,86.

0,5 mm (CMOD1) f_{r1m} UHPFRC s $v_f = 2,0\%$ a $v_f = 2,5\%$ je cca o 26 %, resp. 49 % vyšší ve srovnání s UHPFRC obsahujícím 1,5 % ocelových vláken. Podrobné výsledky zkoušky pevnosti v tahu za ohybu jsou dokumentovány v příloze B.

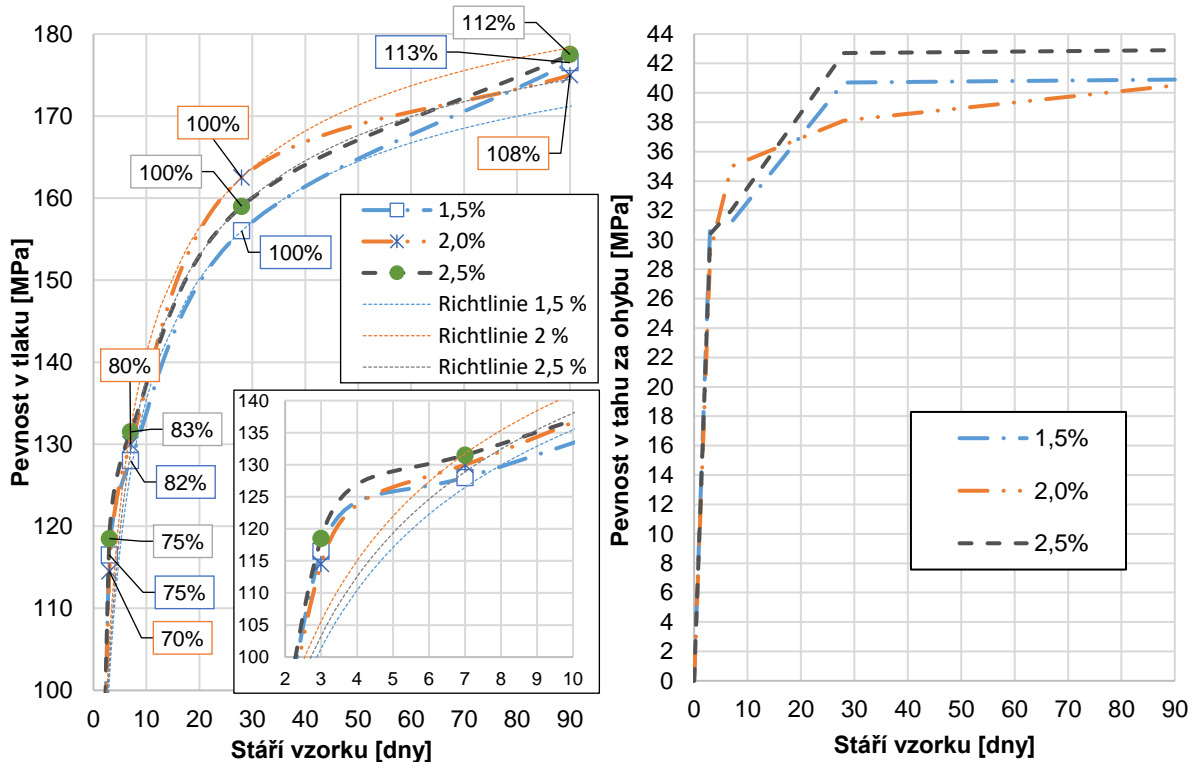


Obr. 64 Pracovní diagram – stanovení pevnosti UHPFRC v tahu za ohybu a zbytkové pevnosti dle ČSN EN 14651 + A1 [9], stáří 3 dny, trámce 100×100×400 mm



Obr. 65 Rozložení ocelových vláken v trámcích 100×100×400 mm po zkoušce v tahu za ohybu

Nárůst pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu je zřejmý z grafů (obr. 66). Časový vývoj pevnosti byl sledován na malých trámcích 40×40×160 mm. Vypovídající hodnota výsledků je spíše orientační. Předpokládaný vzájemný vývoj pevnosti mají série UHPFRC s 1,5 % a 2,5 % drátků. Receptura se 2,0 % vykazuje značné odchylky a výsledné pevnosti tak oscilují kolem výsledků zbylých dvou receptur. Hodnoty jsou vyneseny v souladu s tab. 18 pro stáří trámců 3, 7, 28 a 90 dní. Absolutní hodnota pevnosti odpovídá rozměru a charakteru zkušebního tělesa. Relativní nárůst tlakové pevnosti a pevnosti v tahu za ohybu je do stáří UHPC 28 dní srovnatelný.⁸⁴ Výraznější rozdíly vznikají ve stáří 90 dní, kdy došlo k dalšímu nárůstu pevnosti v tlaku (průměrně 111 % 28denní pevnosti), kdežto pevnost v tahu je na srovnatelné úrovni s 28denními výsledky.



Obr. 66 Nárůst pevnosti UHPFRC v čase, trámce 40×40×160 mm, průměrné hodnoty⁸⁵

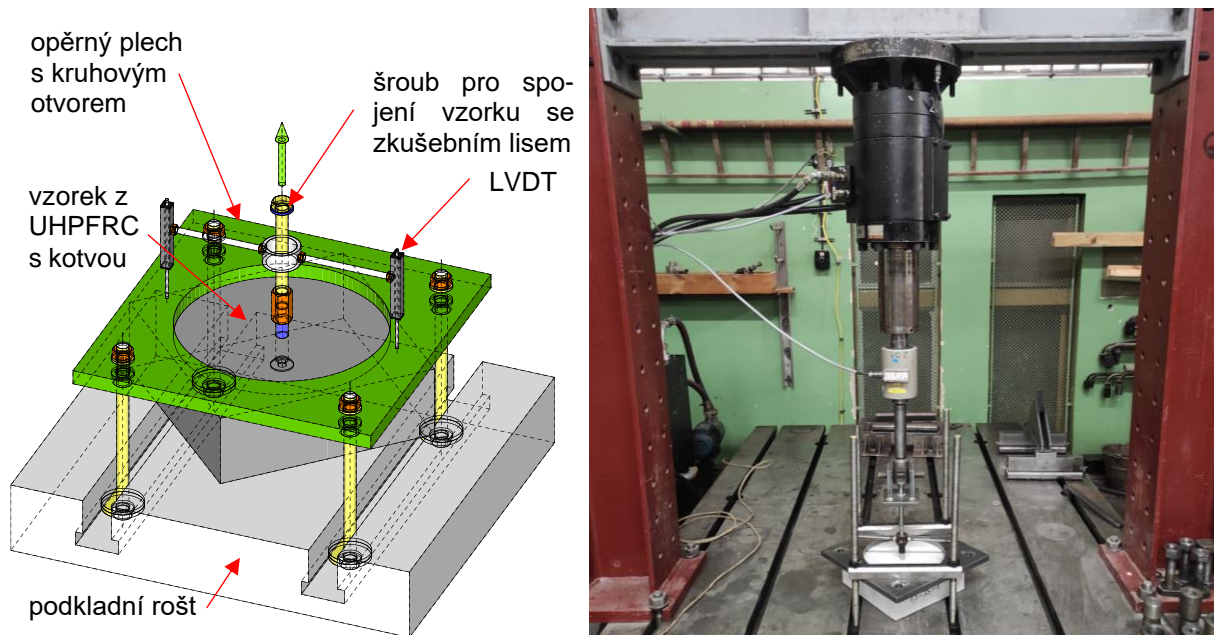
3.2.2. Uspořádání a průběh zkoušení

Cílem zkoušek kotevních oblastí bylo zjistit závislost lokálně působící tahové síly na deformaci. Zkouška byla navržena tak, aby došlo výhradně k porušení betonu – vytržení betonového kuželu. Toho bylo docíleno způsobem uchycení betonového vzorku k podkladnímu roštu (dle obr. 67), výškou betonových vzorků a zároveň i materiálem šroubů s dostatečnou rezervou v únosnosti. Vzorek byl kotven k podkladu pomocí ocelového plechu s kruhovým otvorem průměru 280 mm, jehož středem procházel vyčnívající závit zabetonovaného kotevního šroubu. Vzorek byl pomocí ocelového kování spojen se zkušebním lisem.⁸⁶

⁸⁴ Ve stáří 3 a 7 dnů je dosaženo průměrně 74 %, resp. 81 % 28denní pevnosti.

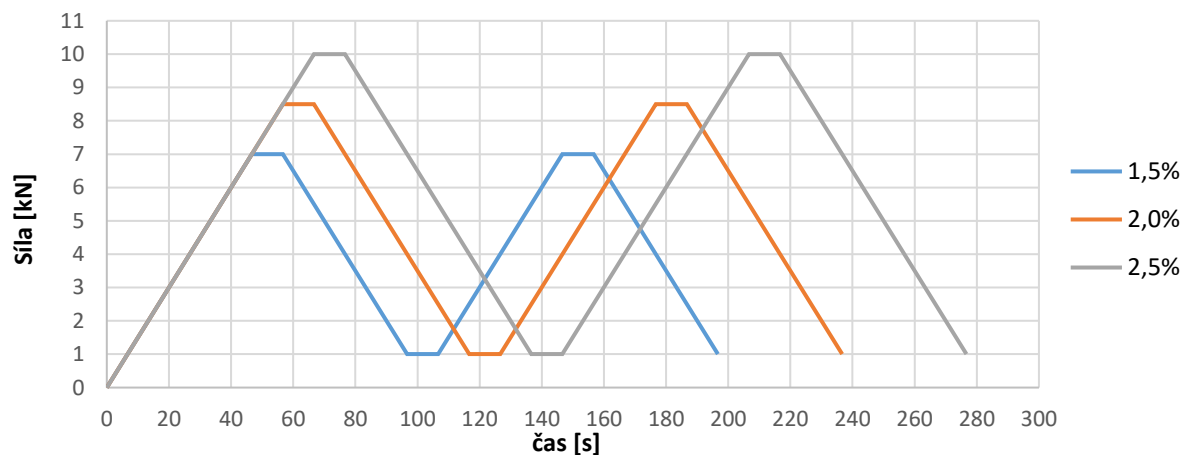
⁸⁵ Informativně byly doplněny průběhy tlakových pevností v čase podle normového výpočtu [20].

⁸⁶ Rozdílná délka kotevních šroubů (70, 80 a 90 mm), díky které byla délka vyčnívajícího závitu stejná, umožnila využívat pro všechny vzorky lišící se hloubkou šroubu (h_{ef}) stále stejný způsob uchycení k lisu.



Obr. 67 Uspořádání zkoušky kotvení v UHPFRC (navrhované a finální)

V průběhu zkoušení byly měřeny a v čase zaznamenávány síla ve válci, posun válce a deformace kotevního šroubu pomocí dvou potenciometrických snímačů. Každý vzorek byl nejprve dvakrát zatěžován rychlostí 0,15 kN/sec na přibližně 30 % odhadované únosnosti a následně odtížen na hodnotu 1,0 kN, dle grafu (obr. 68). Tímto způsobem byly plně aktivovány a dotlačeny součásti zkušební sestavy. Následně probíhala zkouška do porušení vzorku řízená posunem 0,6 mm/min.



Obr. 68 Průběh zatěžování v čase pro úvodní část zkoušky kotvení – cyklování

Vzhledem k vyztužení UHPC ocelovými drátky je i přes zformování betonového kuželu tato porušená část stále spojena se zbytkem vzorku. K oddělení kuželu dojde pouze při větší deformaci (posunu válce), přičemž přenášená síla je v této fázi již prakticky zanedbatelná. Z každého vzorku byl zcela vytržen betonový kužel (nebo alespoň jeho část) pro zjištění tvaru deformační zóny. Výsledkem každého testu je přibližně celý pracovní diagram kotevní oblasti (viz část 3.2.3). V závěru experimentu (při sledování konce sestupné zatěžovací větve) byla zkouška urychlena navýšením rychlosti zatěžování až na 2,0 mm/min.

3.2.3. Výsledky zkoušek

Celkem bylo zrealizováno 45 zkoušek kotevních oblastí v UHPC s rozdílným v_f . V této části jsou dokumentovány souhrnné výsledky experimentů, které jsou dále podrobně analyzovány. Podrobné a kompletní výsledky experimentů jsou uvedeny v příloze B. Základní přehled výsledků je uveden v tab. 19.

Tab. 19 Souhrn výsledků tahových zkoušek kotevních oblastí v UHPFRC

Typ	Počet vzorků	Únosnost [kN]			Směrodatná odchylna [kN]	Variační koeficient [%]
		Min	Max	Průměr		
15-25	5	15,0	21,5	16,6	2,8	16,9
15-35	5	26,9	37,7	32,2	5,0	15,5
15-45	5	52,9	54,3	53,6	0,6	1,1
20-25	3	17,8	19,8	18,7	1,0	5,5
20-35	3	35,7	41,9	38,3	3,2	8,3
20-45	3	58,4	73,5	66,5	7,6	11,4
20-25H	3	54,6	58,3	57,0	2,0	3,6
20-35H	3	64,2	70,9	66,8	3,6	5,3
25-25	3	22,2	26,7	24,9	2,3	9,4
25-35	3	42,6	57,7	49,2	7,7	15,7
25-45	3	71,8	78,0	74,4	3,2	4,3
25-25H	3	34,7	47,6	41,4	6,4	15,6
25-35H	3	65,3	72,9	69,6	3,9	5,6

Výstupem z každého experimentu jsou závislosti deformace kotevní oblasti na působícím zatížení, které jsou znázorněny v grafech (obr. 70 a podrobněji v příloze).⁸⁷ Dále potom tvary porušení kotevních oblastí. Pro přehlednost jsou níže uvedené výsledky členěny podle zkušebních sérií (dle v_f).

Kromě přímo měřených či sledovaných vlastností jsou dále vypočteny charakteristiky, které popisují chování kotevních oblastí v různých stádiích statického zatěžování: tuhost a duktilita neboli tažnost. Výsledky jsou shrnuty v tab. 22.

⁸⁷ Vykresleny jsou jednak pracovní diagramy každého jednotlivého vzorku (se značením 1, 2, 3...) a zároveň grafy zprůměrovaných výsledků (označené M). Průměrované grafy jsou sestaveny z aritmetických průměrů působících sil F_i dohledaných pro danou deformaci u_i .

3.2.3.1. Způsob a tvar porušení kotevních oblastí

Tab. 20 Tvar porušení vzorků, porovnání sérií (v_f) a hloubky (h_{ef}), pro každý typ jeden zástupce

	1,5 %	2,0 %	2,5 %
25 F			
25 H	Není součástí série 1,5 %		
35 F			
35 H	Není součástí série 1,5 %		
45 F			

Vzorky byly navrženy a zkušeny tak, aby při porušení došlo k vytržení betonového kuželu. Únosnost ocelového šroubu vždy přesáhla únosnost betonového kuželu. Pro vzorky s kotvou na straně formy (F) je napříč sériemi v_f charakteristický betonový kužel s průměrem odpovídajícím hloubce kotvy h_{ef} . Porušené vzorky s kotvou v hlazeném povrchu (H) mají oproti typu (F) menší rozměry vytrženého kuželu, což je dáno především změnou orientace vláken. Blíže je toto popsáno v části 3.2.4.3. Vlivem (i drobných) nepřesností při usazení šroubu do formy nebo při upevnění vzorku pod lis došlo u některých zkoušek k nerovnoměrnému vnášení zatížení, které se do určité míry podepsalo na tvaru vytrženého kuželu, který není zcela symetrický. Symetrii kuželu také ovlivňuje rozložení drátků v dané oblasti. Podrobná dokumentace všech zkušebních vzorků je uvedena v příloze.

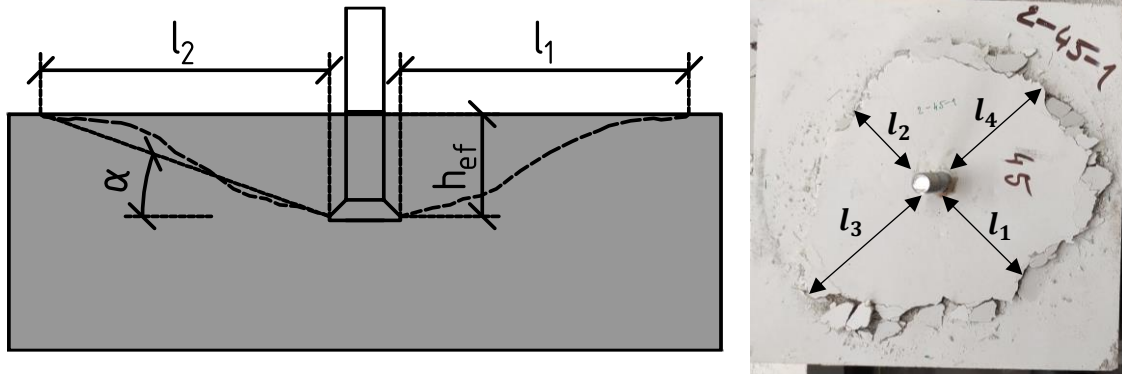
Jedním z hlavních parametrů kotvení v betonu je úhel α , který svírá přímka podél vytrženého betonového kuželu s vodorovnou rovinou, respektive s rovinou kolmou na směr zatěžování (obr. 69, vlevo). Někdy také označovaný jako úhel, pod kterým je roznášeno zatížení z kotvy do betonového prvku. U každého zkušebního vzorku byl zjištěn rozměr betonového kuželu, na základě kterého byl stanoven úhel roznosu α . Souhrn parametrů vytržených kuželů je uveden v tab. 21.

Tab. 21 Rozměry betonového kuželu porušených vzorků

Kotevní oblast	Dosah betonového kuželu, průměr l_m [mm]	Úhel roznosu zatížení α [°]	Směrodatná odchylka S_x [°]	Variační koeficient V_x	Úhel roznosu zatížení dle série $\alpha_{v,f}$ [°]
15-25	72,8	19,0	1,6	9 %	
15-35	88,3	21,9	2,6	13 %	22,2
15-45	94,3	25,6	1,8	8 %	
20-25	90,8	15,7	2,8	19 %	
20-35	102,7	19,1	3,1	18 %	19,5
20-45	102,9	23,6	0,8	4 %	
20-25H	49,8	27,5	6,3	28 %	32,9
20-35H	44,8	38,3	4,3	15 %	
25-25	85,8	16,3	1,5	9 %	
25-35	96,3	20,1	2,3	12 %	21,3
25-45	87,2	27,3	0,5	2 %	
25-25H	35,1	35,8	4,4	16 %	35,3
25-35H	50,8	34,8	3,8	15 %	

Údaje v tab. 21 vychází z naměřených rozměrů kuželu, kdy byl odměřován tzv. dosah betonového kuželu l_i , a to vždy ve dvou na sebe kolmých směrech (obr. 69, vpravo). Při měření je odečten průměr šroubu a také rozměr hlavy kotevního prostředku. Výsledný úhel roznosu je vyjádřen na základě průměrné hodnoty dosahu kuželu l_m dle rovnice (3.8):

$$l_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i, \quad n = 4 \quad (3.8)$$

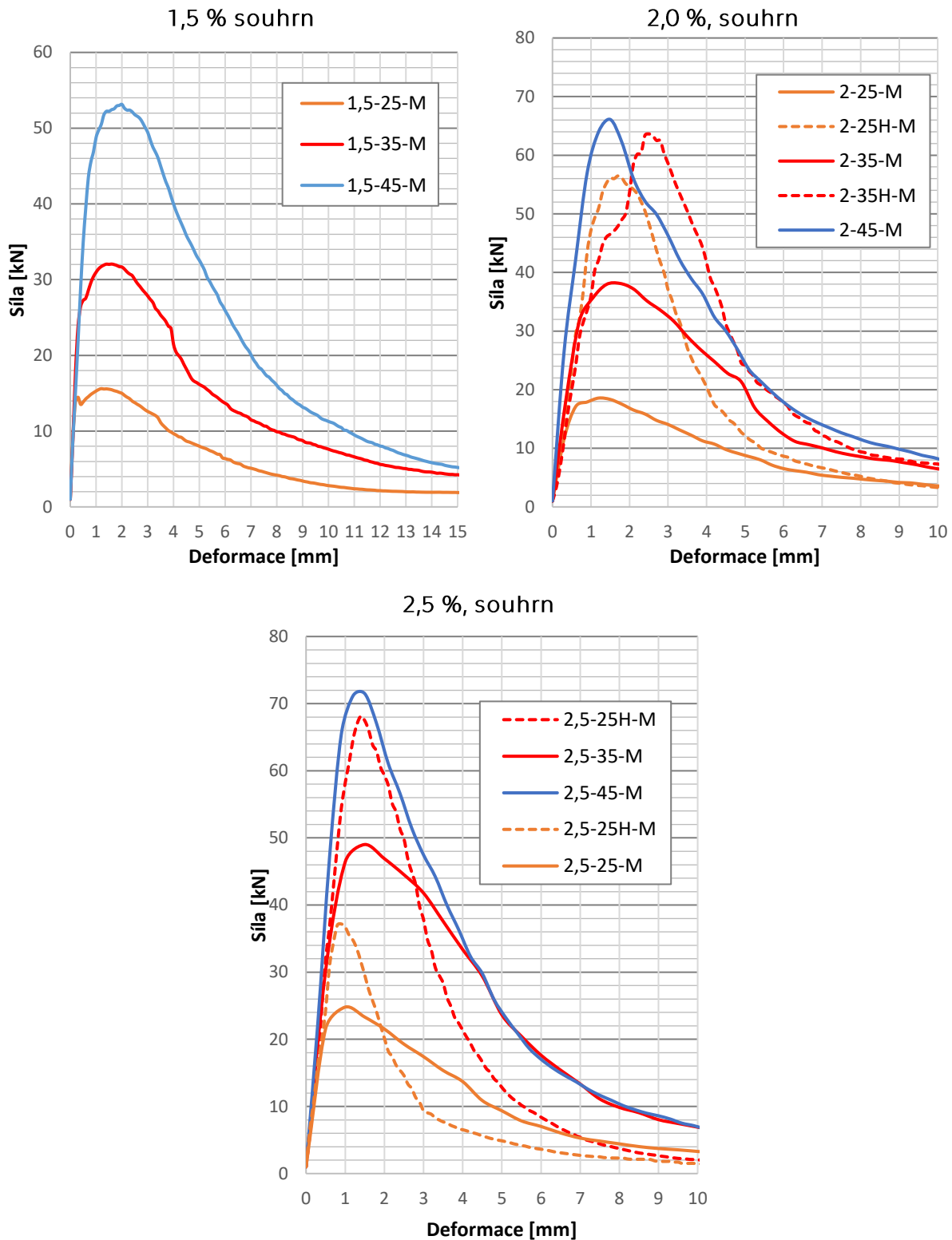


Obr. 69 Určení rozměrů vytrženého betonového kuželu

Tvar kuželu vytrženého z UHPFRC se (kvůli přítomnosti výztužných vláken) odlišuje od tvaru porušení kuželu v betonu bez rozptýlené výztuže. Markantní rozdíl je především u vzorků s kotvou v povrchu u dna formy (F), kde jsou vlákna vlivem tzv. stěnového efektu usměrněna v rovině dna formy. Tento jev má za následek aktivaci větší plochy betonového prvku, přičemž její účinnost není zvláště výrazná. Nižší účinnost vyztužení ve směru namáhání vyplývá ze samotné orientace drátků v porušené oblasti a projevuje se výslednou nižší únosností kotevní oblasti v porovnání se zkouškou kotvení v povrchu hlazeném. Podrobněji je vliv orientace vláken analyzován v části 3.2.4.3. I přes uvedené skutečnosti je úhel roznosu stanoven z poměru efektivní hloubky h_{ef} a dosahu kuželu l_m .

3.2.3.2. Závislost deformace a zatížení (pracovní diagramy)

V této části jsou dokumentovány průběhy zkušebního zatížení v závislosti na deformaci. Uvedena je vždy část zkoušky, jež byla řízena posunem zkušební lisu, dle 3.2.2. Počáteční cyklování není pro lepší přehlednost uvedeno. Deformací je míněn průměr ze dvou LVDT snímačů pohybu. V grafech (obr. 70) jsou samostatně zobrazeny pracovní diagramy jednotlivých zkušebních sérií (1,5; 2,0 a 2,5 %). Pracovní diagramy jsou sestaveny z průměrných výsledků (M). Pracovní diagramy každé zkoušky jsou dokumentovány v rámci přílohy B.



Obr. 70 Pracovní diagramy kotevních oblastí, průměrné hodnoty

3.2.3.3. Tuhost a duktilita

Tuhost $K_{0,3}$, která je spočtená pro každý zkoušený vzorek, charakterizuje elastické vlastnosti kotevní oblasti na stoupající zatěžovací větvi. Při určení tuhosti se vychází ze zatížení na úrovni 30 % únosnosti, které je uvažováno jako mez úměrnosti. Při působení zatížení

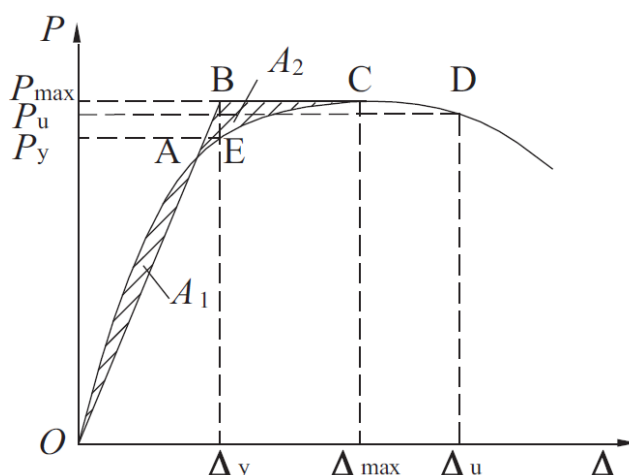
větším než 30% únosnosti betonového kuželu vznikají první obvodové trhliny kolem hlavy šroubu, dle Eligehausena [42], s. 42. Práce vychází z poznatků o běžném betonu.⁸⁸

Tažnost neboli duktilita je v rámci tohoto výzkumu charakterizována pomocí tzn. indexu tažnosti (ductility index), který popisuje schopnost kotevní oblasti (v post kritické fázi působení) odolávat větším deformacím bez náhlého poklesu síly. Index tažnosti μ je vypočten z každého pracovního diagramu kotevní oblasti dle vztahu (3.9):

$$\mu = \frac{\Delta u}{\Delta y} \quad (3.9)$$

Δu je deformace odpovídající $0,85 F_{max}$ (únosnosti) na sestupné větvi pracovního diagramu kotevní oblasti.

Δy je deformace stanovená postupem založeným na metodě energetické rovnováhy, blíže v [77]. Princip stanovení Δy je patrný z obr. 71. Pro daný pracovní diagram je nutné nalézt velikost deformace Δy tak, aby vzniklé obrazce označené A_1 a A_2 měly plochy se stejným obsahem.



Obr. 71 Poloha Δu a Δy při stanovení indexu tažnosti [77]

Souhrnné výsledky výpočtu tuhosti $K_{0,3,m}$ a indexu tažnosti μ_m jsou uvedeny v tab. 22. Spočteny byly průměrné hodnoty pro jednotlivé typy kotevních oblastí.

Tab. 22 Tuhost a index tažnosti kotevních oblastí

Typ	$K_{0,3,m}$ [kN/mm]	Směrodatná od- chylka [kN/m]	Variační koeficient [%]	μ_m [-]	Směrodatná od- chylka [-]	Variační koeficient [%]
15-25	9,5	2,1	22,5	4,1	1,2	30,3
15-35	10,7	2,2	20,9	3,5	0,8	22,8
15-45	14,2	1,4	10,1	2,8	0,3	10,8
20-25	10,5	3,1	29,7	3,5	1,0	29,7
20-35	11,5	1,2	10,7	2,6	0,4	16,8
20-45	14,6	0,7	5,0	1,6	0,5	30,4

⁸⁸ Vzhledem ke skutečné závislosti síly a deformace zjištěné během experimentu (viz pracovní diagramy z jednotlivých zkoušek kotevních oblastí v příloze B), kdy je dosaženo meze úměrnosti patrně při vyšším zatížení, je přístup mírně konzervativní. Na druhé straně stojí skutečnost, že i přes poměrně nízké zatížení působící na kotevní prostředek, které se prostřednictvím malé plochy hlavy šroubu lokálně přenáší do betonu, vznikají na této úrovni zatěžování mikrotrhliny. Velikosti napětí při přenosu kotva-beton mohou přesáhnout pevnost materiálu, blíže viz 2.2.2.

Typ	$K_{0,3,m}$ [kN/mm]	Směrodatná od- chylka [kN/m]	Variační koeficient [%]	μ_m [-]	Směrodatná od- chylka [-]	Variační koeficient [%]
20-25H	12,9	1,0	7,5	1,6	0,2	9,8
20-35H	14,6	0,8	5,4	1,7	0,5	32,4
25-25	13,9	2,5	18,0	2,7	0,6	22,6
25-35	14,5	2,2	15,5	2,2	0,3	15,2
25-45	15,9	4,5	28,1	1,4	0,6	40,4
25-25H	13,6	1,7	12,2	1,3	0,2	17,9
25-35H	14,0	1,4	10,1	1,4	0,2	12,6

3.2.4. Vliv dílčích parametrů na vlastnosti kotevních oblastí

Výsledné vlastnosti kotevních oblastí v UHPFRC namáhané tahem byly dokumentovány v oddílu 3.2.3. Pro zodpovězení otázek kladených v úvodu kapitoly a potvrzení či vyvrácení hypotéz bylo zapotřebí dosažené výsledky podrobit dalšímu rozboru. V této části jsou podrobně zkoumány a zhodnoceny vlivy sledovaných parametrů (efektivní hloubka h_{ef} , množství vláken v_f a orientace kotvy) na vlastnosti kotvení jako únosnost, tvar a velikost deformované oblasti a další.

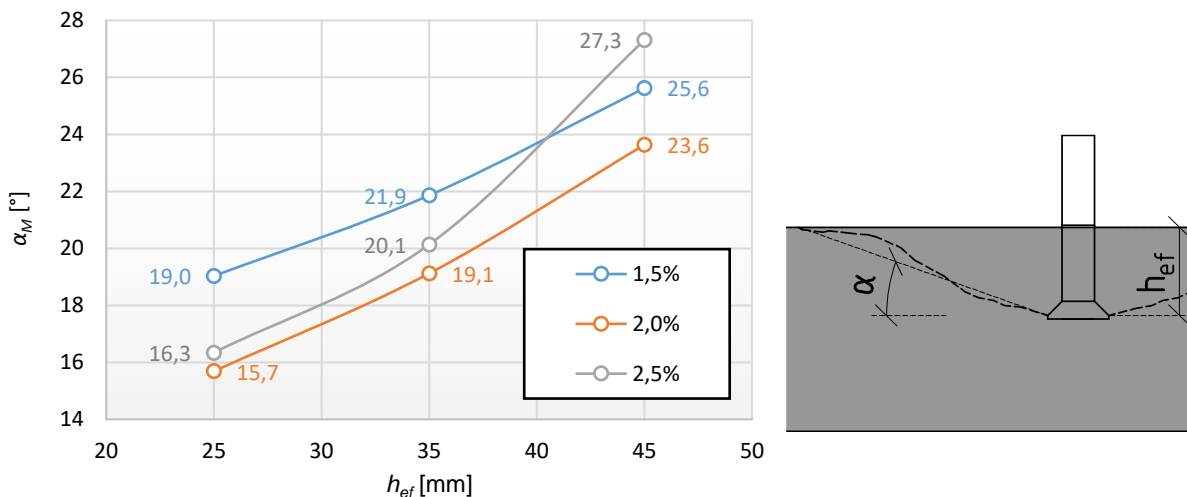
3.2.4.1. Účinek efektivní hloubky zapuštění kotvy h_{ef}

Vliv hloubky zapuštění kotvy h_{ef} na tvar porušení

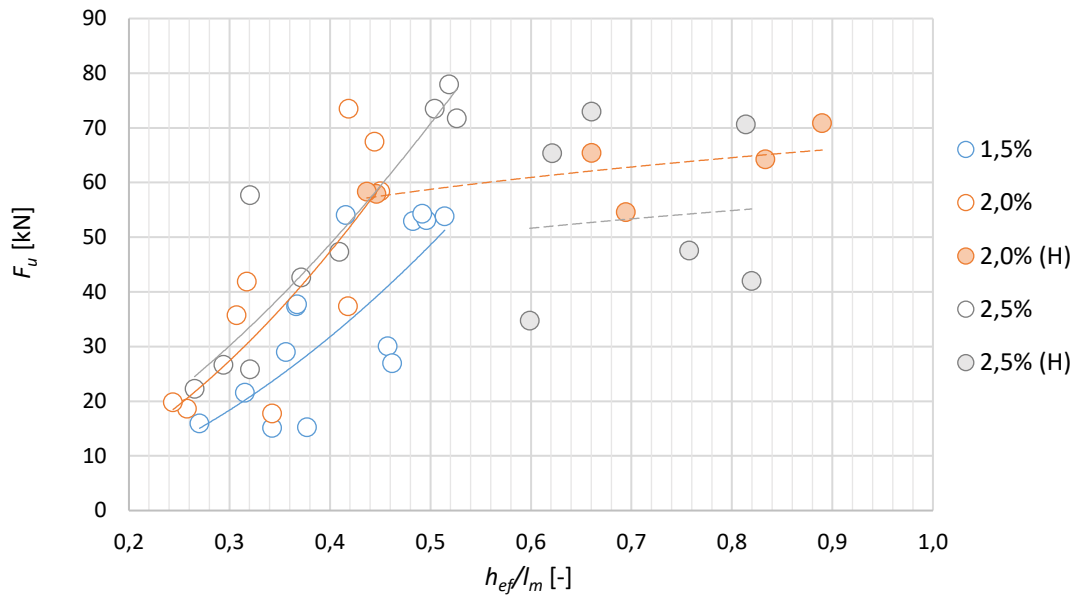
Dle tvaru a velikosti vytržených betonových kuželů byl vysledován trend, kdy je u kotev s $h_{ef} = 25$ mm dosaženo nejnižšího úhlu roznosu zatížení (viz obr. 69), který se s přibývajícím hloubkou h_{ef} zvyšuje. To znamená, že vytržená plocha betonu se sice při větším zapuštění kotvy h_{ef} v absolutní hodnotě zvětšuje (což odpovídá tab. 20), nicméně zvětšování plochy přímo neodpovídá hloubce h_{ef} . Tento jev je jednak ovlivněn usměrněním drátků o dno formy (u sérií vzorků (F)), které není závislé na hloubce kotvy h_{ef} a dosah betonového kuželu je tak prodloužen přibližně o stejnou vzdálenost (bez ohledu na h_{ef}). Zvětšení úhlu roznosu u vzorků s hloubkou 45 mm může být do jisté míry dále ovlivněno velikostí vzorku a roznášecího plechu, viz část 3.2.2. Vztah mezi úhlem roznosu α a h_{ef} je znázorněn v grafu (obr. 72) a stejně tak uveden v tab. 23.

Tab. 23 Úhel roznosu zatížení dle kotevní hloubky h_{ef} a stupně vyztužení v_f

h_{ef} [mm]	α_m [°]			Průměr ze stejného h_{ef}	Prům. ze stejného povrchu (F) či (H)
	1,5 %	2,0 %	2,5 %		
25F	19,0	15,7	16,3	17,0	21,0
35F	21,9	19,1	20,1	20,4	
45F	25,6	23,6	27,3	25,5	
25H	-	27,5	35,8	31,6	34,1
35H	-	38,3	34,8	36,6	



Obr. 72 Úhel roznosu zatížení α a vztah k hloubce zapuštění kotvy h_{ef}



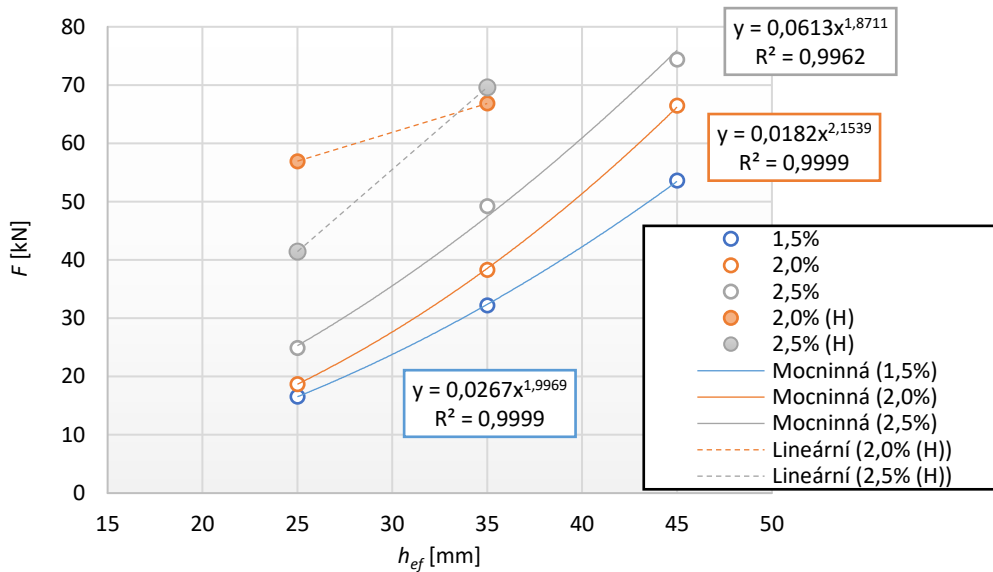
Obr. 73 Závislost únosnosti na poměru efektivní hloubky a dosahu kuželu (h_{ef}/l_m)

Vliv hloubky zapaštění kotvy h_{ef} na únosnost

Se zvětšováním efektivní hloubky se únosnost kotvy zvětšuje, což odpovídá původním předpokladům a také trendům nastíněným v části 2.2.7, kde jsou dokumentovány doposud publikované výzkumy kotvení v UHPFRC. Tab. 24 zobrazuje průměrnou únosnost pro každý typ vzorku s kotvou v povrchu (F). Nejvýraznější nárůst síly mezi různými hloubkami h_{ef} nastává u série se 2,0 % drátků, kde je dosaženo v hloubce 45 mm cca 3,5násobné únosnosti ve srovnání s hloubkou 25 mm. Série se 2,0 % drátků se tak jeví jako optimální z hlediska výsledných parametrů kotvení. Množství cca 160 kg/m³ je z technologického pohledu přijatelné i pro větší záměsi, resp. množství UHPC míchaného najednou. Při tomto dávkování vláken je také stále velká pravděpodobnost, že dojde ke správnému zamíchání vláken a jejich rovnoměrnému rozptýlení.

Tab. 24 Porovnání únosností vzorků dle h_{ef}

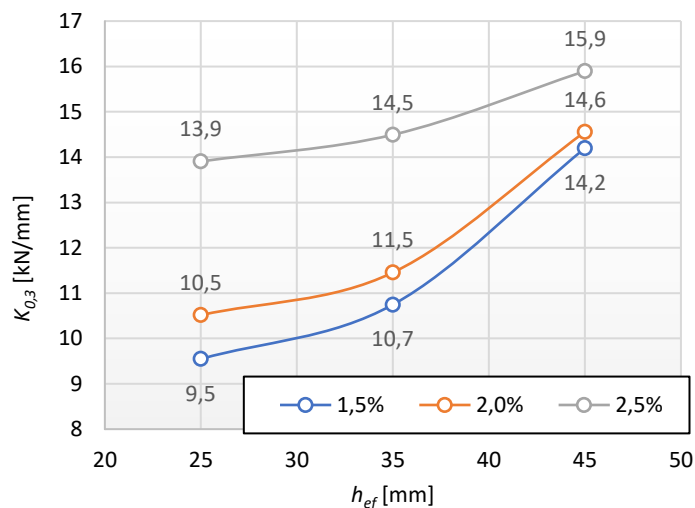
v_f	Maximální zatížení [kN]			Procentuálně k 25 mm		
	25F	35F	45F	25F	35F	45F
1,5 %	16,6	32,2	53,6	100 %	194 %	324 %
2,0 %	18,7	38,3	66,5	100 %	205 %	355 %
2,5 %	24,9	49,2	74,4	100 %	198 %	299 %



Obr. 74 Závislost únosnosti kotvení na hloubce h_{ef} ⁸⁹

Vliv hloubky zapuštění kotvy h_{ef} na tuhost

Tuhost kotevní oblasti je stanovena z pracovních diagramů pro každý zkušební vzorek. Výpočet tuhosti $K_{0,3}$ vychází ze zatížení, které odpovídá 30 % maximální dosažené zkušební síly. Do této úrovně zatěžování je uvažováno pružné chování kotevní oblasti. Dle grafů závislosti h_{ef} a $K_{0,3}$ (obr. 75) dochází k významnému rozdílu v tuhostech mezi sériemi (v_f) především při menších hloubkách zapuštění kotev, 25 mm a 35 mm. U hlouběji zabudovaných kotev se rozdíly v tuhostech snižují. U všech sérií je patrný nárůst tuhosti s větší kotevní délkou h_{ef} .



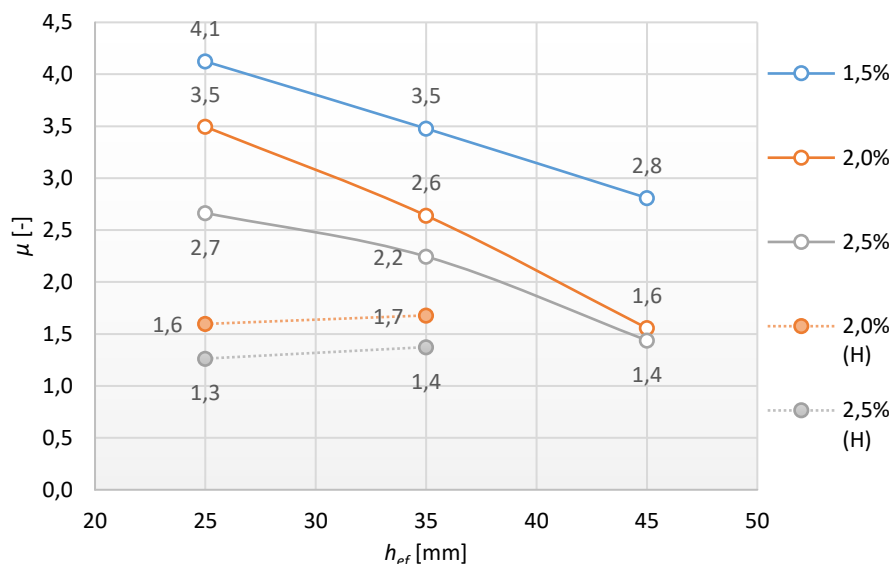
Obr. 75 Graf závislosti tuhosti $K_{0,3,m}$ na hloubce zapuštění kotvy h_{ef}

⁸⁹ Únosnosti jsou uvedeny jako průměrné hodnoty z dosažených výsledků při zkoušce.

Vliv kotevní hloubky šroubu h_{ef} na duktilitu

Pomocí součinitele tažnosti μ definovaného ve výše uvedené kapitole s výsledky zkoušek (3.2.3.3) jsou popsány vlastnosti kotevních oblastí z hlediska schopnosti plastického přetváření. Při sledování duktility v závislosti na efektivní kotevní délce (resp. hloubce) lze pozorovat tendenci, při které u kotev v povrchu od formy (F) se zvětšujícím h_{ef} klesá tažnost, a dochází tedy i ke snížení velikosti indexu tažnosti μ . Trend je patrný z následujícího grafu (obr. 76). Pokles duktility na straně (F) odpovídá nárůstu únosnosti při zvětšujícím se h_{ef} , kdy je sklon sestupné větve (patrný z pracovních diagramů na obr. 70) u vzorků s vyšší únosností prudší. To vede u vzorků s větší hloubkou h_{ef} logicky k očekávanému poklesu duktility. Obdobný vývoj duktility je pozorován i ve studii Li a kol. [58].⁹⁰

U kotev zabudovaných v hlazeném povrchu (H) je v grafu (obr. 76) pozorovatelný naopak mírný nárůst součinitele tažnosti μ při vzrůstajícím h_{ef} . Pro vysledování reprezentativního trendu zde není dostatečný počet výsledků zkoušek. Kotvení na straně (H) je však ve srovnání s povrchem od formy (F) obecně únosnější a zároveň křehčí, tudíž i hodnota součinitele tažnosti dosahuje nižších hodnot proti (F).



Obr. 76 Graf závislosti tažnosti μ_m na hloubce zapaštění kotvy h_{ef}

Závislost duktility na kotevní délce se do určité míry podobá vývoji tuhosti $K_{0,3}$, viz výše (obr. 75). Jedná se však o inverzní jev. Tuhost kotevních oblastí se se zvětšujícím h_{ef} zvyšuje. Obdobně dochází u všech sérií s nárůstem kotevní hloubky h_{ef} k poklesu duktility.

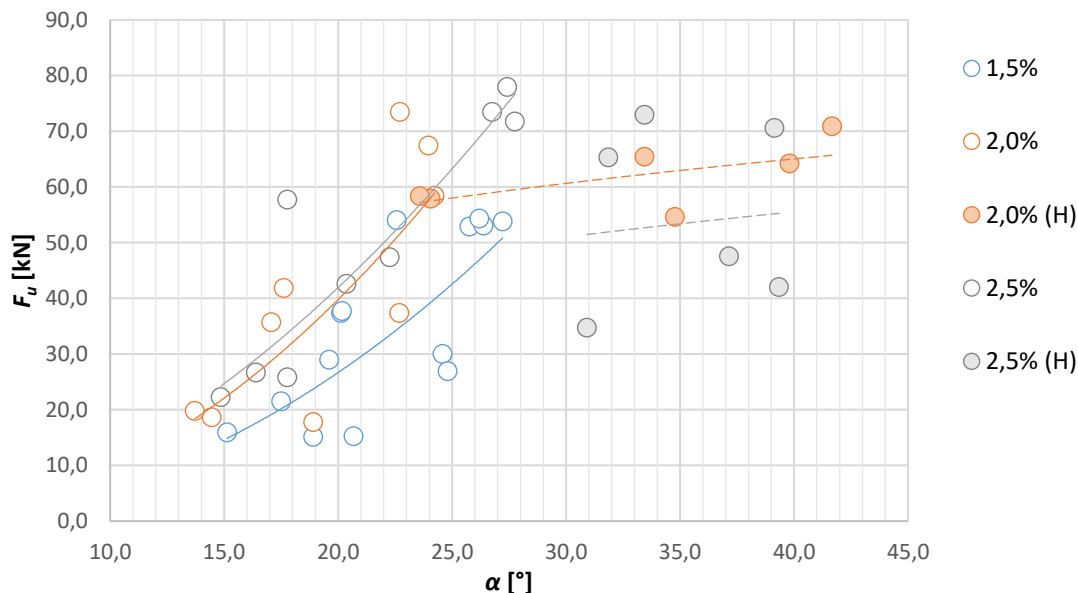
3.2.4.2. Účinek obsahu vláken v_f

Vliv množství vláken na tvar porušení

Objemové zastoupení vláken nemá výraznější vliv na velikost úhlu roznosu zatížení α , jak dokládají hodnoty pro jednotlivé série zkušebních vzorků (tab. 21 a tab. 23). Rozdíl úhlu v rámci stejné série v_f je dán vždy kotevní hloubkou, což bylo popsáno výše. Z grafu zobrazujícího sklon betonového kuželu (obr. 77) v závislosti na únosnosti vyplývá podobný

⁹⁰ Zde je zároveň sledován nárůst duktility při zmenšení průměru kotevního prostředku a při současném zachování kotevní délky. Zkušební vzorky jsou ve studii Li a kol. [58] vyráběny s kotvami v povrchu hlazeném (H). Bližší informace o úpravách povrchu ale nejsou uvedeny. Nárůst tažnosti při zmenšení průměru kotvy je ve studii [58] zdůvodněn větší deformací ocelových kotev s menším průměrem. V této studii je obecně malé množství vzorků u jednoho typu zkoušky a výsledky jsou zmiňovány spíše s ohledem na řádové porovnání.

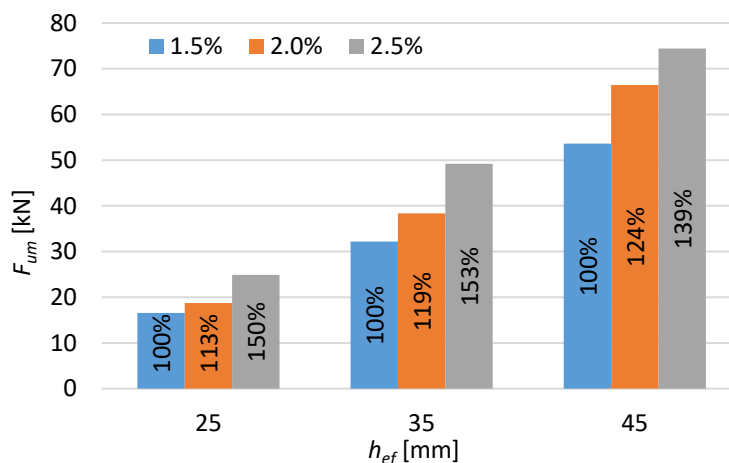
trend změny úhlu α pro série v_f , měřené u stejného povrchu (F) nebo (H). Z grafu je zřejmé, že zásadnější vliv na změnu úhlu má *usměrňování vláken* oproti jejich množství v_f , což je zde reprezentováno odlišnostmi u povrchu (F) a (H). Tyto jevy a závislosti jsou dále popsány v části 3.2.4.3. Pro povrch od formy lze brát průměrnou hodnotu úhlu roznosu 21° a pro povrch horní 34° .



Obr. 77 Závislost únosnosti F_u kotvení na velikosti úhlu roznosu α

Vliv obsahu vláken na únosnost

Dle logického předpokladu dochází s přidáváním drátků (při zvyšování v_f) k nárůstu únosnosti kotevní oblasti. Zvýšení maximálního dosaženého zatížení mezi jednotlivými sériemi vzorků (1,5 %; 2,0 % a 2,5 %) je patrné z následujícího grafu (obr. 78). Číselné srovnání průměrného maximálního zkušebního zatížení pro jednotlivé typy zkoušek s kotvou v povrchu (F) nabízí tab. 25.



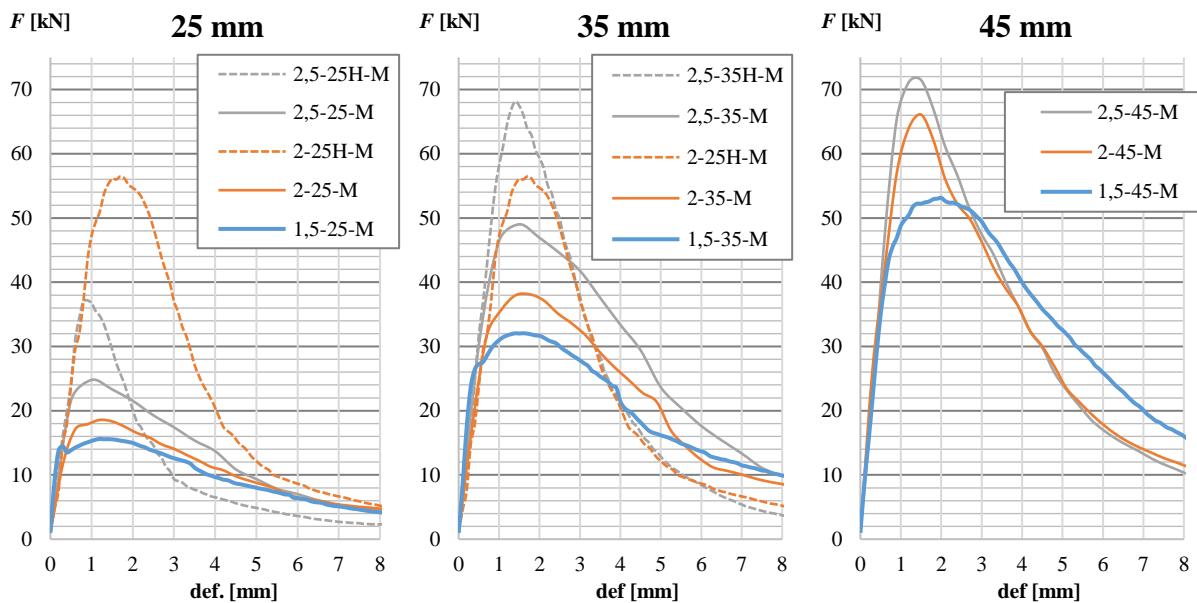
Obr. 78 Porovnání průměrné únosnosti ve vztahu k v_f a h_{ef}

Pokud budeme porovnávat pouze vzorky s kotvami od formy (F), dochází k největšímu nárůstu únosnosti u kotevních oblastí ze série s 2,5 % vláken, které dodávají matici dostatečnou tahovou pevnost.

Tab. 25 Porovnání únosností jednotlivých sérií (v_f), pouze kotvy u povrchu od formy (F)

h_{ef} [mm]	F_{um} [kN]			Procentuálně k 1,5 %		
	1,5 %	2,0 %	2,5 %	1,5 %	2,0 %	2,5 %
25	16,6	18,7	24,9	100 %	113 %	150 %
35	32,2	38,3	49,2	100 %	119 %	153 %
45	53,6	66,5	74,4	100 %	124 %	139 %

Zatímco výsledky zkoušek v tahu za ohybu na trácích (patrné např. z pracovního diagramu na obr. 64 nebo z tab. 18) sledují rovnoměrný nárůst pevnosti mezi jednotlivými sériemi s obsahem vláken 1,5 %, 2,0 % a 2,5 %, ⁹¹ u výsledků kotvení je možné mezi sériemi se stejnou hloubkou h_{ef} pozorovat další vlivy, které kromě obsahu vláken ovlivňují únosnost kotvení. Rozdíly mezi vzorky se stejnou hloubkou kotev h_{ef} jsou pozorovatelné v pracovních diagramech (obr. 79) zobrazujících průměrné výsledky všech sérií v_f . I přes to je evidentní souvislost výsledků únosnosti kotvení s tahovými pevnostmi. Se vzrůstajícím v_f dochází k více či méně obdobnému nárůstu únosnosti kotvení a tahové pevnosti UHPC, kdežto změna tlakové pevnosti je výrazně menší. Pevnosti UHPC v tahu za ohybu a v tlaku zjištěné na doprovodných tělesech v rámci experimentů jsou mezi sériemi s různým v_f srovnány v tab. 26. Na základě toho je evidentní, že **stanovení únosnosti betonového kuželu v UHPC je možné jedině na základě tahové pevnosti** a metody založené na stanovení únosnosti využívající tlakovou pevnost lze označit za nevhodné (viz vybrané v části 2.2).


Obr. 79 Pracovní diagramy kotevních oblastí podle h_{ef}

⁹¹ Pevnost v tahu za ohybu narůstá mezi sériemi (1,5 %; 2,0 % a 2,5 %) rovnoměrně, a to o 20 % resp. 44 % ve srovnání se sérií s 1,5 % drátků. Podrobné výsledky viz v tab. 18. Zásadní vliv na výslednou pevnost v tahu za ohybu má způsob výroby zkušebních tráců, a to především způsob plnění forem. Při výrobě zkušebních tráců byl striktně dodržován normou [9] stanovený postup plnění formy pro všechny série v_f .

Tab. 26 Nárůst mechanických veličin UHPFRC mezi sériemi v_f ⁹²

Veličina	Stáří [d]	Pevnost [MPa]			Procentuálně k 1,5 %		
		1,5 %	2,0 %	2,5 %	1,5 %	2,0 %	2,5 %
$f_{ct,f}$	3	10,4	12,5	15,0	100 %	120 %	144 %
f_{r1m}	3	9,2	11,6	13,8	100 %	126 %	149 %
f_{cm}	3	83,1	86,6	85,8	100 %	104 %	103 %

Zásadní rozdíl v únosnosti kotvení je mezi vzorky s kotvami v površích (F) a (H), blíže je tomuto věnován oddíl 3.2.4.3.

Je možné předpokládat, že s dalším přidáváním drátků do UHPC (se zvětšováním v_f) nebude růst únosnosti kotvení tak prudký a s velkou pravděpodobností bude dříve docházet k technologickým potížím s rozmícháním drátků při výrobě a vlastnostmi čerstvé směsi UHPC. S vyztužením matrice v_f vyšším než 3,0 % (výjimečně 3,5 %) se lze v betonářské praxi setkat jen zřídka.

Vliv obsahu vláken na tuhost

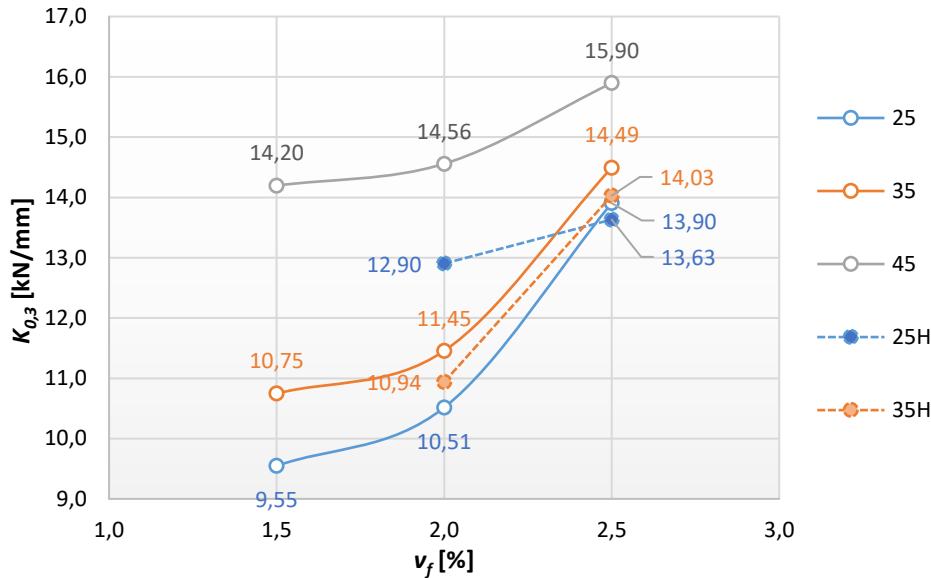
Zvětšování podílu vyztužných vláken v_f má pozitivní vliv na tuhost kotevních oblastí. Při zvětšení v_f byl zaznamenán nárůst tuhosti $K_{0,3,m}$ mezi všemi porovnatelnými vzorky se stejnou efektivní kotevní délkou h_{ef} a v povrchu od formy (F). Nejprudší nárůst tuhosti mezi sériemi v_f byl zaznamenán u vzorků s hloubkou kotvy 25 mm, jak dokládá srovnání v tab. 27 i na obr. 80. Naopak u kotev v hloubce 45 mm dochází téměř k vyrovnání tuhostí $K_{0,3,m}$.

Tab. 27 Porovnání tuhosti $K_{0,3,m}$ kotevních oblastí mezi sériemi (v_f), kotvy u povrchu (F)

h_{ef} [mm]	Tuhost $K_{0,3,m}$ [kN/mm]			Procentuálně k 1,5 %		
	1,5 %	2,0 %	2,5 %	1,5 %	2,0 %	2,5 %
25	9,5	10,5	13,9	100 %	110 %	146 %
35	10,7	11,5	14,5	100 %	107 %	135 %
45	14,2	14,6	15,9	100 %	103 %	112 %

Z uvedeného lze dojít k závěru, že markantní rozdíly v tuhosti $K_{0,3,m}$ mezi vyztužením v_f UHPFRC jsou v menších kotevních hloubkách h_{ef} . U povrchu od formy se jedná o hloubky do 45 mm. Jde o oblast dotčenou stěnovým efektem. Proto je možné se domnívat, že s přibývajícím h_{ef} bude rozdíl v tuhosti mezi UHPC s různým vyztužením matrice postupně zanikat.

⁹² Pevnost v tahu za ohybu měřena na trámcih 100×100×400 mm, tlaková pevnost měřena na válcih výšky 200 mm, viz tab. 18.



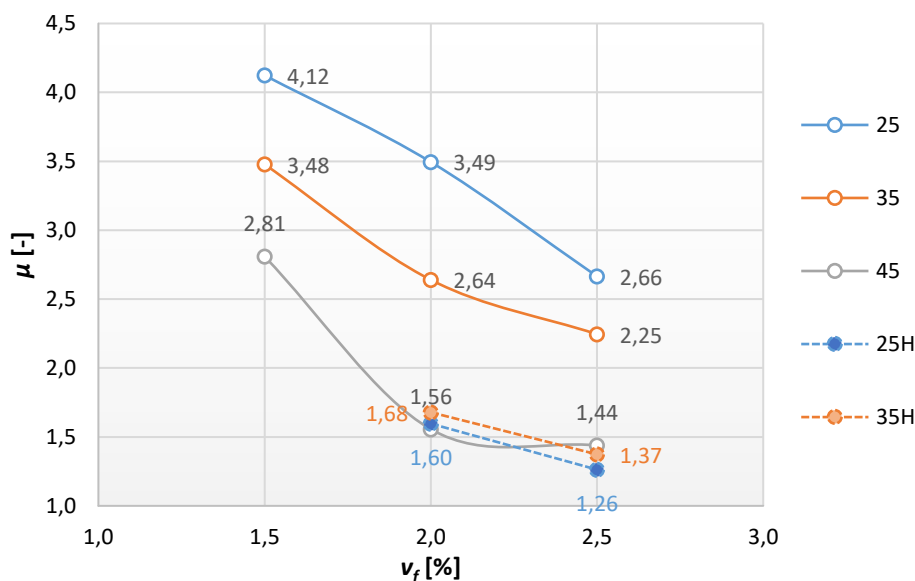
Obr. 80 Graf závislosti tuhosti $K_{0,3,m}$ na stupni vyztužení UHPFRC v_f

Vliv obsahu vláken na tažnost

Změna duktility kotvení s přibýváním vláken představuje inverzní jev k vývoji tuhosti $K_{0,3,m}$. S přidáváním ocelových vláken do UHPC dochází ke zvýšení únosnosti a tuhosti, což bylo pojednáno výše, a ruku v ruce s tím se stává kotvení křehčím a dochází tedy k poklesu tažnosti i indexu duktility. Pokles je patrný z grafu (obr. 81), kde je viditelné snížení tažnosti kotvení v obou zkoumaných typech povrchů (F) a (H), a také z tab. 28.

Tab. 28 Porovnání indexu duktility μ kotevních oblastí mezi sériemi (v_f), kotvy u povrchu (F)

h_{ef} [mm]	Index tažnosti μ [-]			Procentuálně k 1,5 %		
	1,5 %	2,0 %	2,5 %	1,5 %	2,0 %	2,5 %
25	4,1	3,5	2,7	100 %	85 %	65 %
35	3,5	2,6	2,2	100 %	76 %	65 %
45	2,8	1,6	1,4	100 %	55 %	51 %

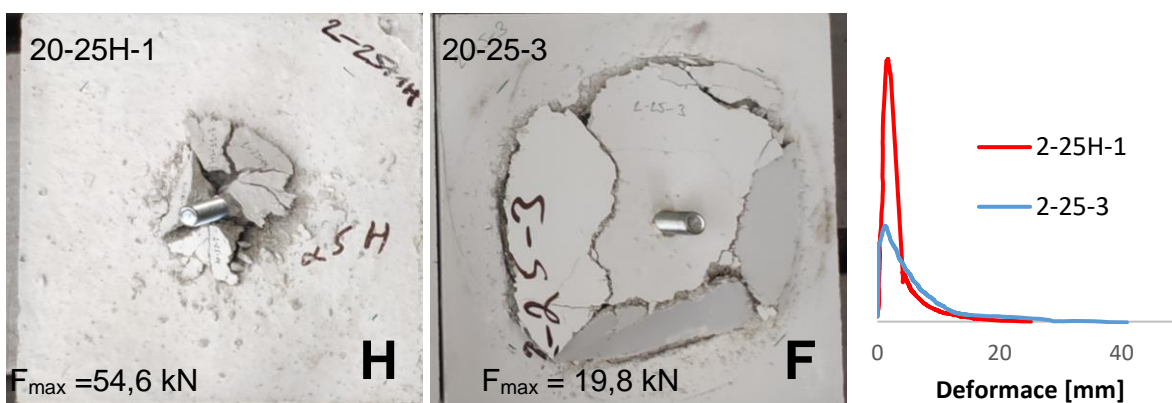


Obr. 81 Graf závislosti duktility μ_m na stupni vyztužení UHPFRC v_f

3.2.4.3. Účinek polohy kotevního šroubu při betonáži

Vliv polohy kotvy na porušení kotevní oblasti

V průběhu zatěžování kotev v betonu s povrchem od formy (F) docházelo k postupnému vzniku a propagaci trhlin, které vyústily v pozvolné vytržení betonového kuželu. K úplnému oddělení kuželu od základny betonového vzorku s kotvou od formy docházelo při velkých deformacích,⁹³ což koresponduje s velikostí vytrženého kuželu (obr. 82, vzorek 20-25-3). Značně odlišný průběh měly fakticky všechny zkoušky vzorků s kotvou zabudovanou na straně hlazeného povrchu betonu (H). Během zatěžování se před dosažením maximálního zatížení (které bylo v porovnání se vzorky (F) několikanásobně vyšší) neobjevoval průběžný růst trhlin pozorovaný u vzorků (F). Následovalo náhlé porušení vzorku a prudký pokles zatížení, jak je možné vyčíst z pracovních diagramů (obr. 70) jednotlivých typů kotevních oblastí. Kotvení na straně (H) je tak výrazně křehčí. Ve srovnání se vzorky typu (F) byla velikost vytrženého kuželu naopak významně menší. Označení „kužel“ je v tomto případě mírně zavádějící, protože vytržená část vzorku je roztržena na několik menších kusů a kotevní prostředek po vytržení není kužel celistvý.⁹⁴



Obr. 82 Srovnání tvaru porušení vzorků od dna formy (F) a z hlazeného povrchu (H)



Obr. 83 Tvar vytrženého kuželu vzorku s kotvou v povrchu (F)

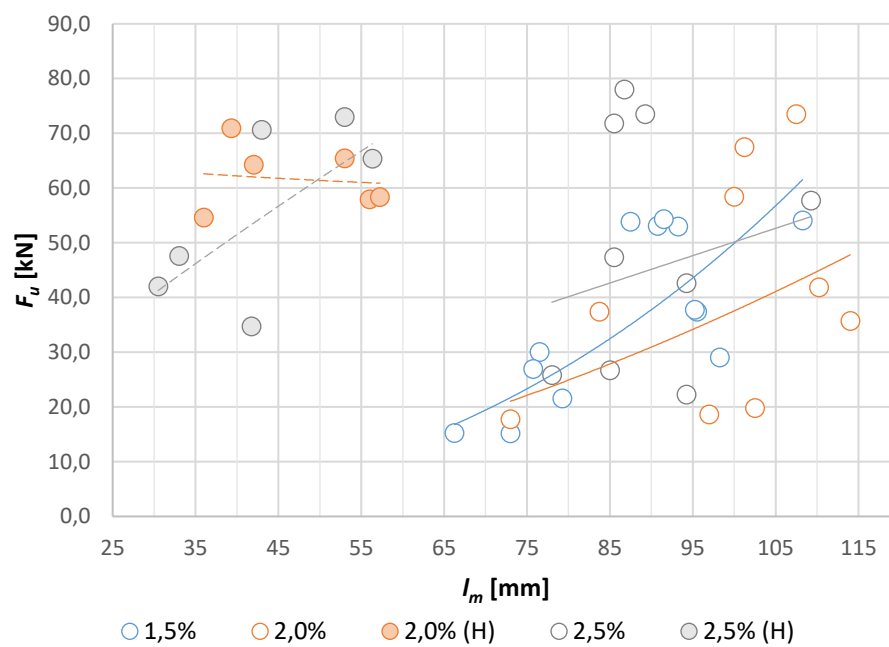
⁹³ Deformace měřená potenciometry byla větší než hloubka zapuštění kotvy h_{ef} .

⁹⁴ I přes roztržení vytržené kotevní oblasti je pro porušenou část používáno označení „kužel“, a to jednak vzhledem k charakteru deformovaného tvaru podstavy vzorku, ze které je kotva vytržena, a zároveň ke skutečnosti, že po složení jednotlivých částí tvarově odpovídá kuželu.

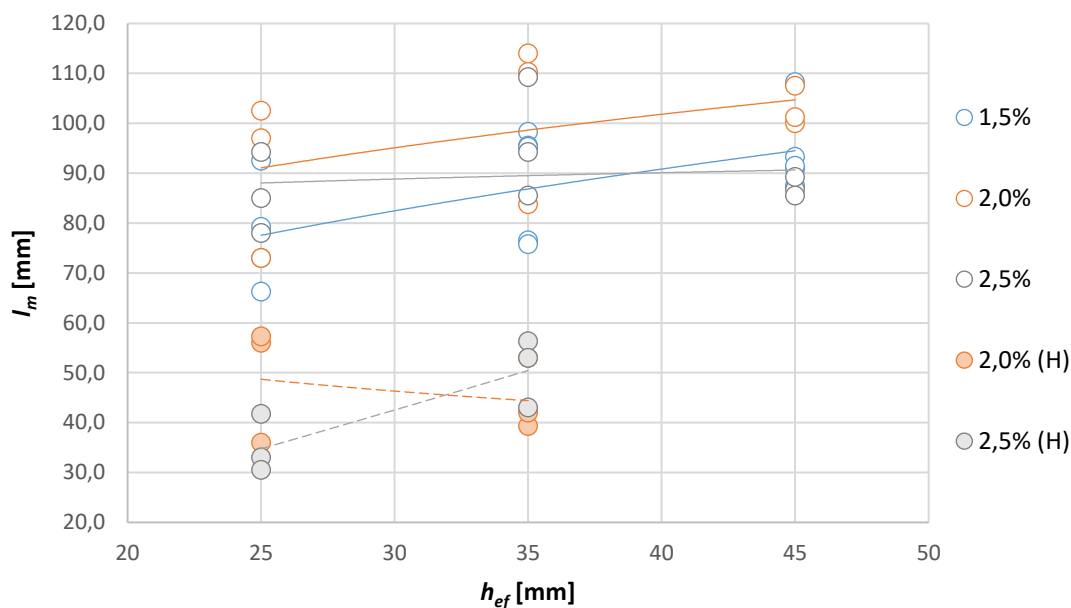
(H) 25-35-1H



Obr. 84 Tvar vytrženého kuželu vzorku s kotvou v povrchu (H)



Obr. 85 Dosah betonového kuželu v závislosti na únosnosti



Obr. 86 Graf závislosti mezi kotevní hloubkou a velikostí vytrženého kuželu

Vliv polohy kotvy na únosnost

Jak již bylo popsáno výše, tvar vytržené betonové části vzorků s povrchem od formy (F) se na první pohled odlišuje od povrchu (H) (obr. 82), tedy hlazeného povrchu. Naprosto odlišná je i velikost maximálního zatížení, kterého bylo dosaženo při zkoušce. Vzorky s kotevním prostředkem umístěným v povrchu (H) dosahují v průměru od 140 % do 304 % vyšší únosnosti oproti vzorkům (F) (v souladu s tab. 19).

Jev lze vysvětlit takto: při plnění forem dochází při kontaktu betonové směsi se dnem formy k usměrňování volně rozptýlené výztuže, k tzv. stěnovému efektu. Vlákna se při tom orientují převážně rovnoběžně s formou. Tento jev má za následek logický nárůst tahové pevnosti v rovině dna formy a ekvivalentní pokles tahové pevnosti ve směru kolmém na tuto rovinu, což je směr namáhání kotevního prostředku.⁹⁵ Jelikož je větší část výztužných vláken v této oblasti orientována v rovině formy, nabývá vytržená oblast betonu větších rozměrů. Vodorovně usměrňované drátky aktivují při vytrhávání větší část betonu, která však nemá příliš velkou účinnost a tato oblast i přes svůj rozsah neodolává většímu zatížení (obr. 82 vpravo).

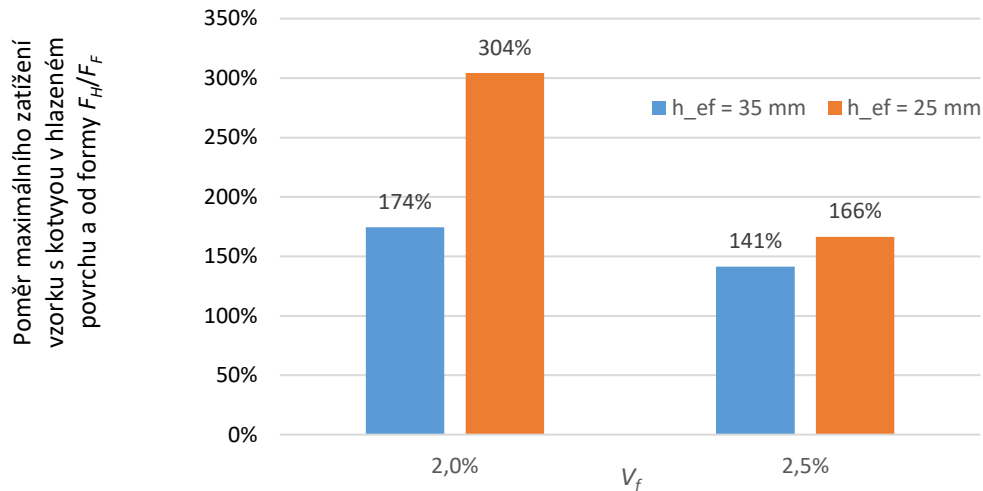
Oproti tomu v horním hlazeném povrchu není patrný vliv usměrňování vláken v důsledku kontaktu s formou.⁹⁶ Dle postupu betonáže a dalších technologických kroků při výrobě jsou vlákna rozptýlená více či méně rovnoměrně. Zatížení z kotevního šroubu se přenáší nejtužší částí kotevní oblasti, kterou tvoří UHPC s drátky ve směru namáhání šroubu. Svisle orientovaných drátků je v hlazeném povrchu logicky více, proto je nejen únosnost celé oblasti výrazně vyšší, ale i deformovaná oblast nenabývá tak velkých rozměrů jako v případě povrchu od formy. Situace je znázorněna na obr. 88 pro oba typy povrchů betonu.

Důležitým parametrem je kromě hloubky zapuštění kotvy h_{ef} také vzdálenost kotvy ode dna nebo od stěny formy, u které dochází k usměrňování orientace vláken. Vzdálenost lze

⁹⁵ Pozitivní vliv usměrnění vláken lze vhodně využít např. u ohýbaných prvků, kde je tažená část průřezu tvořena právě betonem s usměrňujícími drátky.

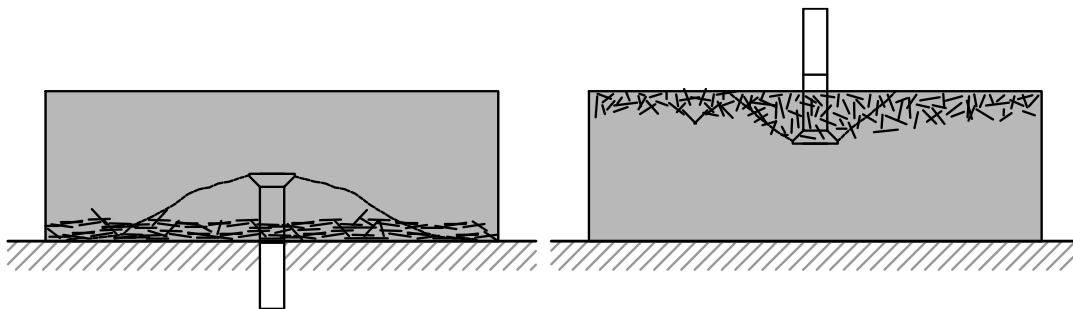
⁹⁶ V horním povrchu však může nastat další usměrňování rozptýlené výztuže, např. při ošetřování, nebo při urovnávání horního povrchu betonu.

označit jako $h - h_{ef}$. Při zvětšující se vzdálenosti od formy se relativní únosnost (spočtená jako poměr maximálních sil dosažených u obou typů povrchů $F_{(F)}$ a $F_{(H)}$) zvyšuje. Závislost je podrobněji ukázána v grafu (obr. 87). V některých případech může docházet k situaci, že při menší hloubce kotvy h_{ef} v hlazeném povrchu (H) je dosaženo vyšší únosnosti oproti větší hloubce kotvy h_{ef} zabudované v povrchu od formy (F). Tento fakt dokládají například obr. 70, kde kotvy (H) s hloubkou $h_{ef} = 25$ mm svou únosností přesahují kotvy (F) s $h_{ef} = 35$ mm.



Obr. 87 Nárůst únosnosti při zvětšující se vzdálenosti kotvy od stěny/dna formy

Závěrem je vhodné zdůraznit, že zmíněných výsledků bylo dosaženo na vzorcích výšky 100 mm, které byly vyráběny ručně v běžných podmínkách prefa provozovny. Při této výšce vzorku vzniká markantní rozdíl mezi vlastnostmi betonu od hlazeného povrchu (H) a od povrchu od formy (F). Lze předpokládat, že se zmenšující se výškou UHPC plošného prvku (v řádu mezi 25 a 50 mm tloušťky) se budou rozdíly mezi oběma povrchy stírat. Toto je vhodným námětem pro další zpřesňující výzkum.



Obr. 88 Orientační schéma rozmístění rozptýlené výztuže v blízkosti povrchů (F) a (H)

Vliv polohy kotvy na tuhost a duktilitu

U série 2,0 % byl zaznamenán mírný nárůst tuhosti u vzorků typu (H) ve srovnání se vzorky (F), viz tab. 22. U série 2,5 % je trend přesně opačný a tuhost vzorků typu (F) převyšuje tuhost vzorků a (H). Pro zobecnění těchto jevů není dostatečné množství dat. Pro případné stanovení přesnější závislosti tuhosti ve vztahu k příslušnému povrchu s umístěnou kotvou by bylo nutné realizovat větší počet experimentů.

S výrazným nárůstem únosnosti kotvení na straně hlazeného povrchu (H) souvisí i pokles duktility tohoto typu vzorků, což bylo popsáno výše. Průběh zkoušky kotevních oblastí typu (H) byl (i přes řízení zkoušky posunem) charakteristický náhlým kolapsem kotvení, kdy byl kotevní šroub prudce vytržen z betonové základny. Kotvení až do úrovně cca 90 %

únosnosti nevykazovalo známky plastické deformace, nebyly pozorovány trhliny jako u vzorků typu (F). Po dosažení mezního zatížení následoval prudký pokles síly, který je pozorovatelný na pracovních digramech (na obr. 70 i u jednotlivých vzorků v příloze). Toto je nutné zohlednit při návrhu kotevních prostředků v podobném typu materiálu (s vyztužením pomocí ocelových vláken) nebo konstrukčního prvku (kde jsou výsledné vlastnosti ovlivněny výrobním postupem).

Globálně jsou rozdíly mezi povrchy patrné ve vzdálenosti cca $2,5 L_f$ od jmenovaného povrchu.

3.2.5. Zobecnění výsledků

Aby bylo možné výsledky dosažené v rámci zkušebního výzkumu uplatnit pro praktický návrh kotvení, byl navržen výpočetní postup, který na jedné straně staví na výsledcích provedených zkoušek a na druhé straně vychází z dříve zavedených postupů a teorií. Na základě provedené rešerše velmi rozsáhlé oblasti kotvení v betonu (viz kapitolu 2.2) byly vybrány nejvýstižnější modely pro predikci únosnosti betonového kuželu, které byly porovnány s vlastními výsledky zkoušek kotvení v UHPFRC. Konkrétně se jedná o model CCD (Concrete Capacity Design) dle Fuchse a kol. [44], který je v rámci této práce reprezentován rovnicí (2.8). Kvůli malým kotevním hloubkám h_{ef} , vzhledem k nimž se dostává kotvení v UHPC mimo platnost norem, je zvolen model Eligehausena [29], který zohledňuje rozměrový efekt, rovnice (2.6). Porovnán je i vztah (2.17) sestavený pro UHPFRC dle Fuhai Li a kol. [58].⁹⁷

Vzhledem ke skutečnosti, že únosnost kotvení lze vhodněji aproximovat s využitím výstižnější tahové pevnosti nežli pevnosti tlakové (což bylo ukázáno výše v části 3.2.4.2), je doplněna vlastní rovnice (3.11), která je modifikací vztahu (2.6). Tzn., že tato rovnice zohledňuje rozměrový efekt a zároveň využívá pevnost UHPC v tahu za ohybu.

Nejprve je v následujících grafech (obr. 89) uvedeno srovnání výsledků provedených zkoušek jednotlivých sérií (v_f) s křivkami, které jsou zkonstruovány na základě rovnic pro predikci únosnosti betonového kuželu zmiňovaných výše.⁹⁸ V rámci srovnání byly hodnoceny pouze výsledky kotvení typu (F), jelikož byly zastoupeny u všech sérií v_f . Tvary křivek vychází z naměřených charakteristik UHPC (tab. 18). Tahová pevnost UHPC je zde započtena jako charakteristická pevnost tahu za ohybu, jež je dle [25] vyjádřena pomocí pevnosti v tahu za ohybu při rozevření trhliny 0,5 mm, viz rovnici (3.10).⁹⁹

$$f_t = f_{ctk,f} = 0,7 \cdot f_{R1m} \quad (3.10)$$

$$F_{um} = \frac{k_b \cdot f_t \cdot h_{ef}^2}{\sqrt{1 + h_{ef}/h_{ef}^0}} \quad (3.11)$$

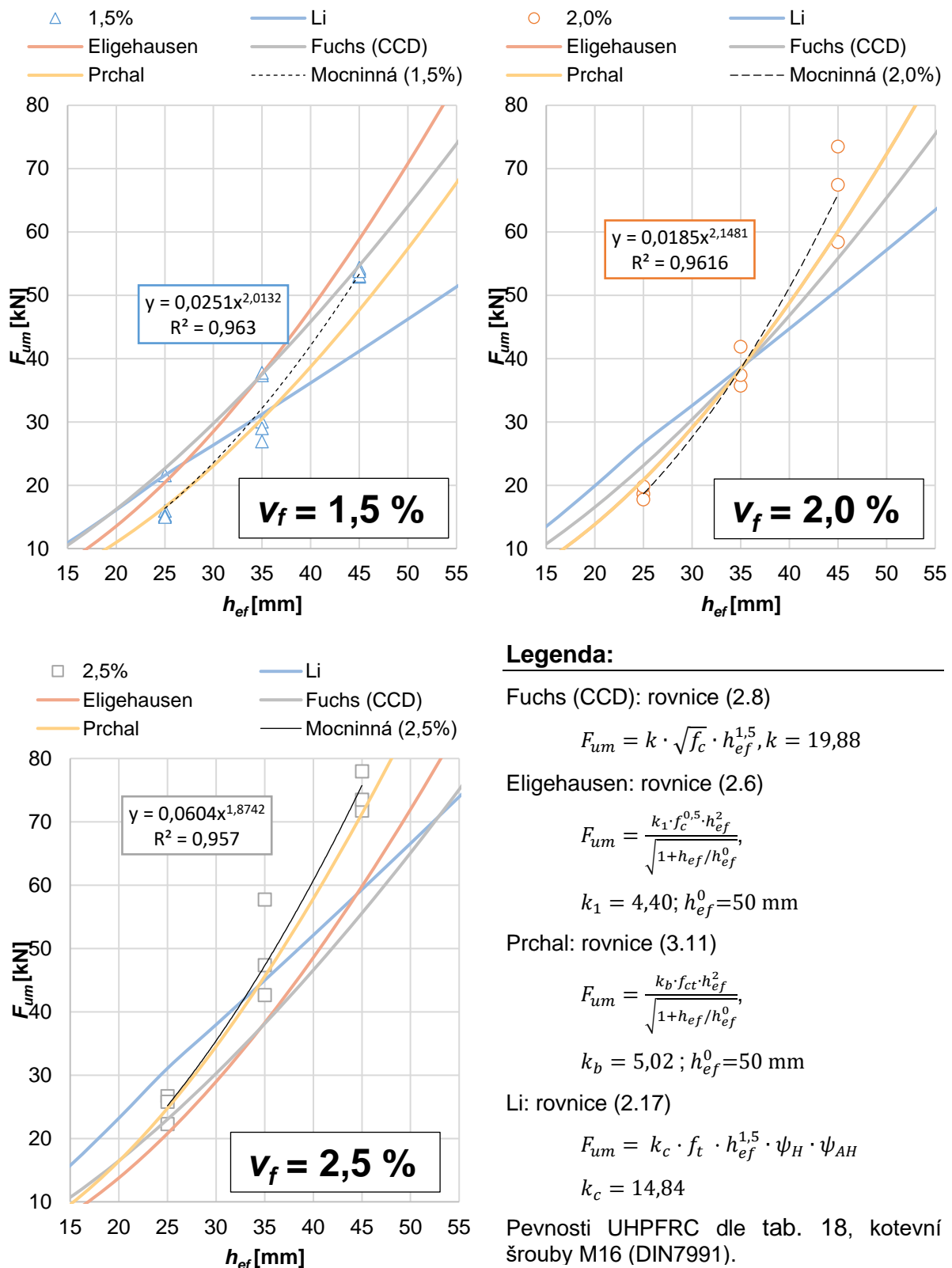
kde k_b značí kalibrační součinitel, dle výsledků zkoušek stanoven jako 5,02 -. h_{ef}^0 je voleno jako 50 mm, v souladu s Eligehausenem a kol. [29].

Rovnice (3.11) pro určení únosnosti je uvedena v nejryzejší formě bez vlivu blízkosti okrajů betonového prvku, výšky konstrukčního prvku a velikosti hlavy kotevního přípravku. Tyto a případné další vlivy lze do výpočtu zahrnout s využitím vztahů shrnutých v kapitole 2.2.7.

⁹⁷ Výpočet dle rovnice (2.17) je založen na pevnosti v příčném tahu UHPFRC. Jelikož tato pevnost nebyla zkoušena, je pro účely porovnání návrhových přístupů použita pevnost v tahu za ohybu a převodní součinitel mezi jednotlivými druhy zkoušek (příčný tah a pevnost v tahu za ohybu) je zahrnut v součiniteli k_c .

⁹⁸ Hodnoty kalibračních součinitelů k_i byly stanoveny pomocí regresní analýzy a zachovány vždy pro jeden výpočetní model u všech sérií v_f .

⁹⁹ Pevnost v tahu za ohybu lze získat přímo ze zkoušky podle [9].



Obř. 89 Porovnání experimentálně zjiřtřených dat se vztahy pro určení únosnosti betonového kuřelu

Výřsledky získané na zkušebních vzorcích s kotvou v povrchu od formy (F) vykazují poměrně dobřou shodu s vypočtenou únosností podle rovnice (3.11). Tímto způsobem však není možné rozlišit únosnost mezi rozdílnými povrchy betonu, ve kterých je kotva

zabudována. Logicky to souvisí i se zkoušením tahových pevností materiálu, jehož výsledkem je jedna hodnota pevnosti od jednoho normou daného povrchu betonu. Hodnota f_{r1m} v rovnici (3.10) se zjišťuje při zkoušce v tahu za ohybu na trámci přesně daným postupem dle normy [9]. Hodnota tudíž nemůže zohlednit vliv usměrňování vláken – stěnového efektu v rámci konstrukce. I v případě, že by byl upraven normový postup zkoušení, nebylo by možné přesně popsat účinnost vláken v závislosti na jejich usměrňování a s tím související orientací v daném směru.

Anizotropní vlastnosti UHPFRC lze však ve výpočtu postihnout způsobem částečně popsaným ve směrnici [25], kde je upravována zbytková pevnost v tahu za ohybu pomocí součinitele k_F zohledňujícího vliv okrajových podmínek na orientaci vláken. Do rovnice (3.12) je zaveden vliv anizotropie materiálu pro výpočty v mezním stavu únosnosti.

$$f_{Ftud} = k_F \cdot \sigma_{cf0}$$

$$\sigma_{cf0} = f_{ctk,f} = 0,7 \cdot f_{R1m} \quad (3.12)$$

Tento princip výpočtu předpokládá stanovení koeficientu k_F po výšce průřezu, tj. závislost k_F na vzdálenosti z od okraje počínaje povrchem od formy (F) a konče povrchem hlazeným (H). Početní postup pro stanovení součinitele k_F je navržen následovně:

1. Jsou porovnány výsledné průměrné únosnosti kotevních oblastí se stejnou kotevní hloubkou h_{ef} a lišící se povrchem, ve kterém je umístěna kotva. Předpokládá se, že poměr únosností těchto kotevních oblastí a příslušných součinitelů k_F je stejný:

$$\frac{F_{um,(H),i}}{F_{um,(F),i}} = \frac{k_{F,(H),i}}{k_{F,(F),i}} \quad (3.13)$$

2. Za předpokladu, že převrácená hodnota součinitele k_F v jednom povrchu je rovna hodnotě součinitele v povrchu druhém, platí:

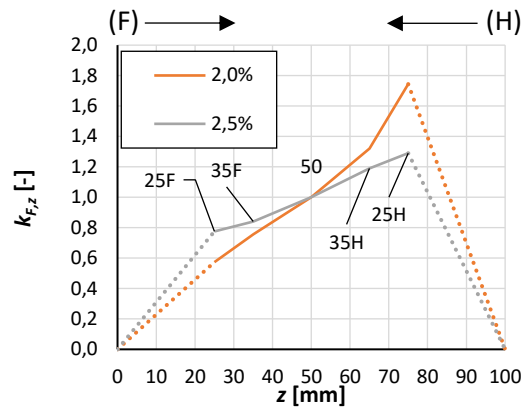
$$k_{F,(H),i} \cdot k_{F,(F),i} = 1 \quad (3.14)$$

3. Hodnotu součinitele k_F lze následně přímo určit podle vztahu:

$$k_{F,(F),i} = \sqrt{\frac{F_{um,(H),i}}{F_{um,(F),i}}} \quad (3.15)$$

Pro experimenty provedené na vzorcích kotvení velikosti 300×300×100 mm je součinitel k_F po výšce vzorku popsán křivkou (obr. 90). Předpokladem je, že v hloubce vzorku 50 mm (v tomto místě se po výšce půlí vzorek, a tudíž odpovídá stejné vzdálenosti k povrchu od formy (F) a hlazenému (H)) je materiál izotropní a vlákna jsou rozmístěna převážně rovnoměrně a tento stav odpovídá definici všesměrně rozptýlené výztuže, tedy $k_F = 1,0$. Směrem od středu vzorku ke dnu formy klesá hodnota součinitele, a naopak směrem k hornímu povrchu vzorku k_F roste, podle výsledků dosažených na vzorcích kotvení.

Se zohledněním vlivu okrajových podmínek na uspořádání výztužných vláken podle rovnice (3.12) byla upravena původní rovnice (3.11). Zpřesněný tvar je dán rovnicí (3.16).



Obr. 90 Velikost součinitele k_F po výšce zkušební tělesa¹⁰⁰

$$F_{um} = \frac{k_b \cdot f_{Ftud} \cdot h_{ef}^2}{\sqrt{1 + h_{ef}/h_{ef}^0}} \quad (3.16)$$

k_b značí kalibrační součinitel, dle výsledků zkoušek je stanoven v závislosti na množství vláken v_f následovně:

$$\begin{aligned} k_b &= 67,41v_f + 7,48, \text{ pro } 1,5 \% \leq v_f < 2,0 \% \\ k_b &= -176,44v_f + 12,36, \text{ pro } 2,0 \% \leq v_f \leq 2,5 \% \end{aligned} \quad (3.17)$$

f_{Ftud} je návrhová zbytková pevnost UHPC v tahu s vlivem okrajových podmínek podle rovnice (3.12).

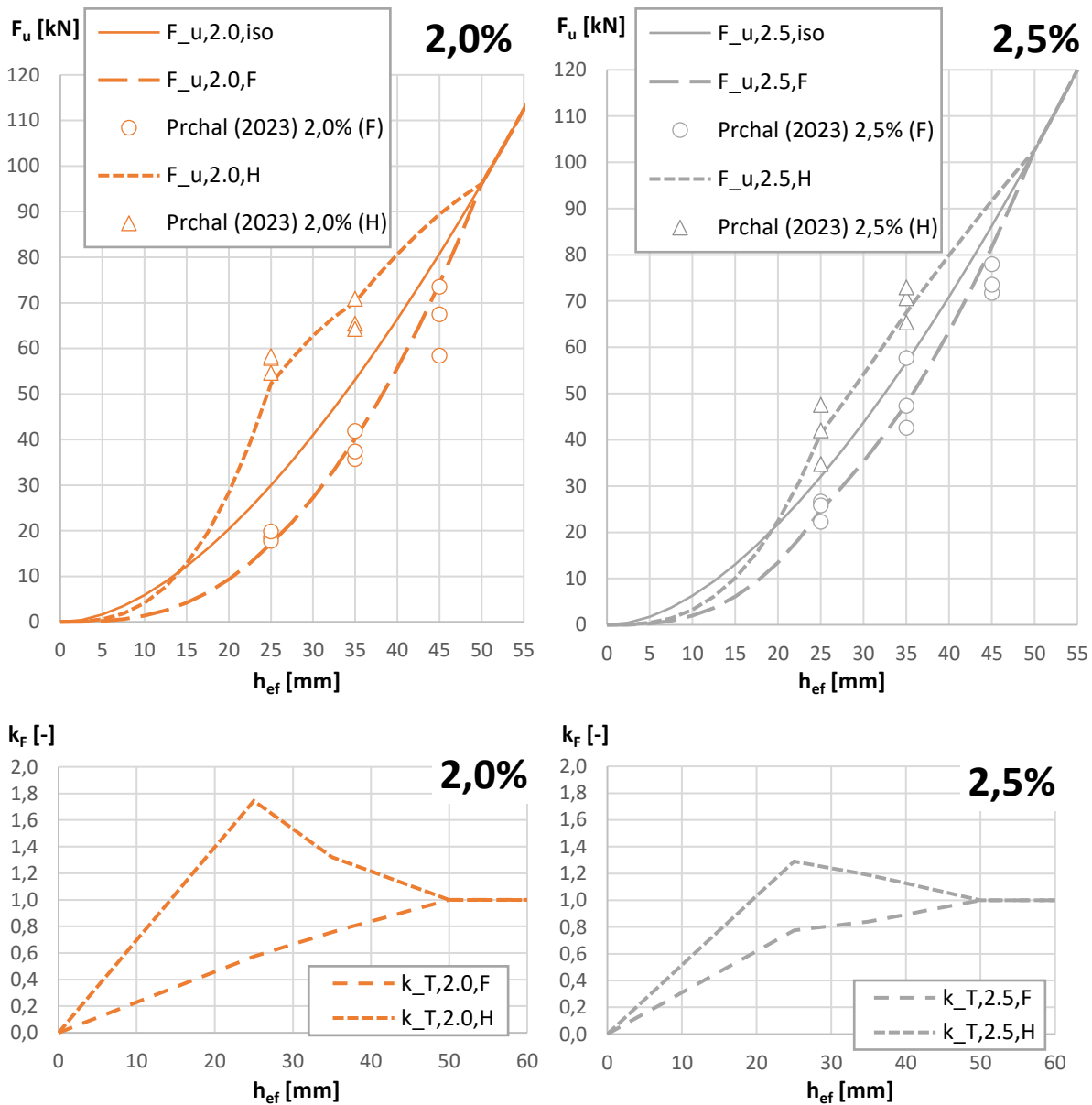
Koeficient $h_{ef}^0 = 20$ mm byl určen z provedených zkoušek tak, aby výsledné hodnoty odpovídaly vývoji únosnosti kotvení při zohlednění povrchů se zabudovanou kotvou.

Pokud uvedený přístup zobecníme a pro kotevní oblasti s efektivní hloubkou h_{ef} v rozsahu do 50 mm využijeme patřičně upravenou pevnost f_{Ftud} (s ohledem na typ povrchu UHPC a vzdálenost od tohoto povrchu), dostaneme závislost kapacity betonového kuželu F_u a efektivní hloubky h_{ef} . Závislost je uvedena na obrázku (obr. 91) spolu s jednotlivými výsledky provedených zkoušek.

Dle výše uvedeného lze uvažovat, že oblasti dotčené úpravou povrchu (ať již hlazeného (H), nebo povrchu od formy (F) ovlivněného stěnovým efektem) zasahují v prvcích podobné tloušťky (kolem 100 mm) do hloubky přibližně $2,5 L_f$.¹⁰¹

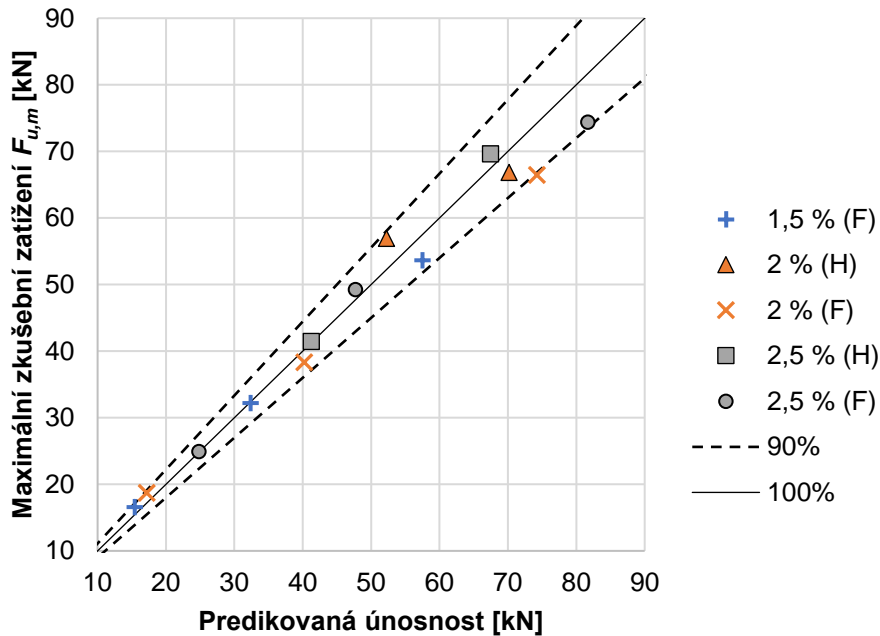
¹⁰⁰ Část grafu mezi okrajem betonu a minimální zkoušenou kotevní hloubkou (25 mm) je znázorněna čárkovanou křivkou. Předpokládá se, že by hodnota kotevní délky neměla klesnout pod hodnotu L_f , tedy délky výztužného vlákna, která je v tomto případě 14 mm.

¹⁰¹ Hodnota se může lišit v závislosti na velikosti prvku, tvarové složitosti prvku, postupu lití, rozměrech vláken a dalších okolnostech.



Obr. 91 Nahore: závislost únosnosti kotvení na hloubce zabudování kotvy h_{ef} se zohledněním povrchu betonu dle rovnice (3.16). Dole: závislost koeficientu k_F zohledňující orientaci vláken na hloubce kotvy h_{ef} , pro série s 2,0 %, respektive s 2,5 % drátků

Graf na obr. 92 slouží pro porovnání experimentálně zjištěné a výpočtem stanovené únosnosti kotvení. Zobrazeny jsou zvláště výsledky od každé série vzorků (v_f) spolu s rozlišením povrchu (F) a (H). Výsledky do $h_{ef} = 35$ mm jsou spočteny s chybou přibližně do 5 %. Větší nepřesnosti vznikají ve větší hloubce $h_{ef} = 45$ mm, ve které by bylo vhodné výsledky zpřesnit pomocí dalších zkoušek.



Obr. 92 Porovnání měření a predikce únosnosti betonového kuželu se zohledněním polohy kotvy vzhledem k povrchům konstrukčního prvku dle vztahu (3.16)

3.2.6. Shrnutí zkoušek kotevních oblastí v UHPFRC

V rámci zkušebního programu bylo testováno 45 vzorků o velikosti 300×300×100 mm, které byly rozděleny do tří sérií podle stupně vyztužení matrice UHPFRC drátky (v_f). U sérií 2,0 % a 2,5 % byly navíc zkoumány vlastnosti kotev zabudovaných jednak v povrchu u dna formy (F) a také kotvy v horním (H) povrchu (hlazeném). Kotevním prostředkem byl šroub velikosti M16 s kónickou hlavou. Na základě provedených zkoušek lze odpovědět na otázky položené na počátku výzkumu a vyvodit tyto závěry:

- Únosnost kotevních oblastí narůstá s vyšším stupněm vyztužení v_f UHPC a s větší účinnou hloubkou zapuštění šroubu. Nejvýraznější nárůst únosnosti nastává u série se 2,0 % drátků, kde je dosaženo v hloubce $h_{ef} = 45$ mm cca 3,5násobné únosnosti ve srovnání s hloubkou $h_{ef} = 25$ mm. Série se 2,0 % drátků se tak jeví jako optimální z hlediska výsledných parametrů kotvení.
- Objemové zastoupení vláken v_f nemá výraznější vliv na velikost úhlu roznosu zatížení α (viz tab. 21 a tab. 23). Zásadnější vliv na změnu úhlu α má *usměrňování vláken* oproti jejich množství v_f , což je reprezentováno odlišnostmi u povrchu (F) a (H). Pro povrch od formy (F) lze brát průměrnou hodnotu úhlu roznosu 21° a pro povrch horní (H) 34°.
- Nárůst únosnosti F_{um} kotvení neodpovídá změně tlakové pevnosti UHPFRC, která není úměrná změně v_f , nýbrž koreluje s nárůstem pevnosti v tahu za ohybu.
- Tuhost $K_{0,3,m}$ kotevních oblastí narůstá při zvyšování množství výztužných vláken v_f . Průměrně je dosaženo vyšší tuhosti o 6 % pro $v_f = 2,0$ %, resp. o 30 % pro $v_f = 2,5$ %, ve srovnání s referenčními 1,5 % vláken. K největšímu nárůstu tuhosti dochází v nižších kotevních hloubkách.
- Vlastnosti kotvení jsou zásadním způsobem ovlivněny orientací výztužných vláken. Kotevní oblasti umístěné na straně (F) jsou ovlivněny stěnovým efektem, kdy vlákna jsou orientována v rovině formy – kolmo na směr namáhání. Oproti předpokladům to způsobuje úbytek únosnosti kotvení. Naopak byl zaznamenán dramatický nárůst únosnosti na straně (H), kde jsou vlákna ve větší míře orientována ve směru namáhání kotvy. Průměrný nárůst únosnosti kotvení se stejným h_{ef} mezi povrchy (H) a (F) je přibližně 239 % pro sérii s $v_f = 2,0$ %, resp. 154 % pro sérii s $v_f = 2,5$ %. Globálně jsou rozdíly mezi povrchy znatelné do vzdálenosti cca $2,5 L_f$ od jmenovaného povrchu.
- Pro predikci tahové únosnosti kotvení v UHPFRC byla sestavena rovnice (3.16), pomocí které lze zohlednit vliv anizotropie materiálu na změny únosnosti způsobené stěnovým efektem. Je zaveden vliv okrajových podmínek, na základě kterého je upravena pevnost UHPFRC. Ve vztahu je zohledněn rozměrový efekt a je počítáno s pevností UHPFRC v tahu, což vhodně popisuje vliv v_f na výslednou únosnost a zároveň se jedná o uživatelsky dostupný parametr UHPFRC, který je výsledkem každé průkazní zkoušky materiálu.

3.3. Zkoušení kotvení v nosnících z UHPFRC

Tato kapitola je věnována zkušebnímu programu, v rámci kterého byly testovány skupiny kotevních prostředků, které jsou prakticky využívány pro manipulaci, montáž a další procesy související s betonovými prefabrikáty. Experimenty byly zaměřeny na ověření mechanických vlastností kotev, které byly předem zabudovány v nosnících z UHPFRC. Na nosnících, které tvoří nosnou konstrukci lávek, byly zkoušeny dva typy kotevních prostředků, které jsou namáhány jednak v ose, či kolmo na osu kotvy.¹⁰² Oproti zkouškám, které jsou popsány v části 3.1 a 3.2, se tyto experimenty zaměřují na ověření speciálních kotev tvořených závitovým systémem v konstrukčních prvcích s reálnými okrajovými podmínkami UHPFRC prefabrikátů.¹⁰³

S ohledem na lehkost a subtilnost konstrukčních prvků z UHPC je problematické navrhovat a používat standardní kotevní přípravky určené pro prefabrikáty takovým způsobem, jak je to definováno v návrhových příručkách a dalších podkladech, které zohledňují zabudování těchto kotev zpravidla pouze do běžného, v některých případech i do vysokohodnotného betonu. Problematické je mimo jiné dodržení minimálních rozměrů betonového prvku, umístění dodatečné výztuže kotvy i samotné určení únosnosti kotvení v UHPC. Nejen toto vedlo k vytvoření tzv. hybridních kotevních přípravků, které (ačkoli nejsou navrženy tak, aby odpovídaly nárokům kladeným normami) umožňují zabudování do subtilnějších prvků a nechávají vyniknout přednostem konstrukcí z UHPC. Konzervativní přístup, kdy jsou dodrženy okrajové podmínky návrhu, které vychází z použití pro běžné betony, by naopak vedl k neefektivnímu návrhu a do jisté míry k popření samotného principu používání UHPC.

Cílem zkoušek bylo především zjištění únosnosti předem zabudovaných hybridních kotevních prostředků v závislosti na okrajových podmínkách, tj. umístění v rámci příčného řezu konstrukce. Zároveň byly následně zjištěny další mechanické parametry kotevních oblastí (tuhost), které sloužily k vzájemnému srovnání kotevních oblastí.¹⁰⁴

Před procesem příprav a samotnou realizací zkoušek byly přijaty některé předpoklady a zjednodušení:

- Ačkoli do vztahů pro predikci únosnosti kotvení, jejichž přehledu je věnována část 2.2.7, vstupuje vždy jen efektivní hloubka kotvy h_{ef} , není zohledňována celková mocnost betonové vrstvy, ve které je umístěna kotevní oblast. Předpokládá se, že únosnost kotevních přípravků se zvětšuje s výškou betonového prvku, ve kterém jsou přípravky zabudovány.
- Studií [50] byl potvrzen pozitivní vliv předpětí (resp. tlakového napětí působícího příčně na směr namáhání kotvy) na únosnost kotvení v betonu. Vliv předpětí na reálné konstrukci, která je jinak navržena jako předem předepnutá, je v tomto experimentu z technologických důvodů zanedbán. Výsledky mohou být v tomto ohledu mírně konzervativní.

¹⁰² Experimentálně zjištěná data pochází z výzkumného projektu TAČR TH02020373 [106]. Výzkum je autorem zmíněn v článcích [101] a [102].

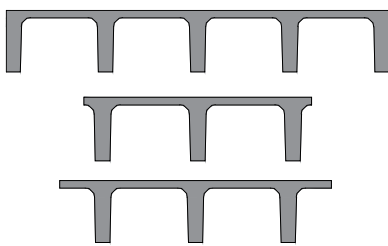
¹⁰³ Reálnými okrajovými podmínkami jsou například vzdálenost od okraje desky či výztužného žebra, výška nebo vyztužení prefabrikátu z UHPFRC, které jsou zpravidla odlišné od dílců z běžného betonu. Využity jsou kotevní přípravky používané standardně v betonových prvcích. Tyto kotevní přípravky jsou speciálně uzpůsobeny pro použití v UHPFRC.

¹⁰⁴ Výroba vzorků a zkoušky byly realizovány v období mezi květnem a červnem 2020.

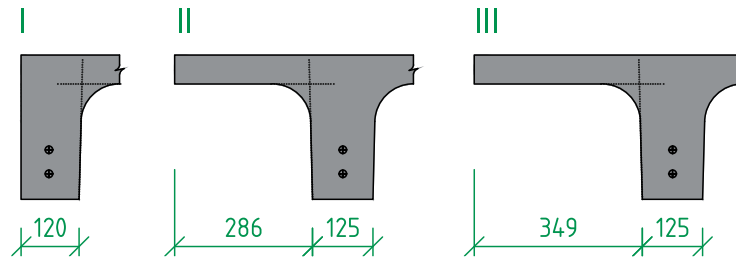
- Přípravky navrhované původně pouze pro kotvení zábradlí budou mít vzhledem k umístění v UHPFRC násobně vyšší únosnost a bude je tak možné zároveň využívat i pro manipulaci se samotným prefabrikátem.

3.3.1. Zkušební vzorky

Pro úplnost a pochopení motivace je následně stručně popsán systém prefabrikovaných prvků, které jsou prakticky využívány jako nosné konstrukce lávek a mostů. Prefabrikáty lávek z UHPFRC mají tvar trémové konstrukce sestávající z podélných trámů spojených deskou. Výšky prefabrikátů jsou obvykle od 200 mm do 500 mm a odpovídají zatížení stanovenému pro lávky pro pěší. Tyto předem předpjeté prefabrikáty jsou vhodné zejména pro budování malých mostních konstrukcí o jednom poli. Předem předepnutý prvek představuje optimální využití UHPC v nosné konstrukci, a to vzhledem k absenci konvenční betonářské výztuže, která by kladla další nároky na krytí výztuže a tím by se konstrukce sama o sobě stávala masivnější.



Obr. 93 Provedení nosníků z UHPFRC v příčném řezu



Obr. 94 Vybrané okraje nosníku pro zkoušky kotevních oblastí

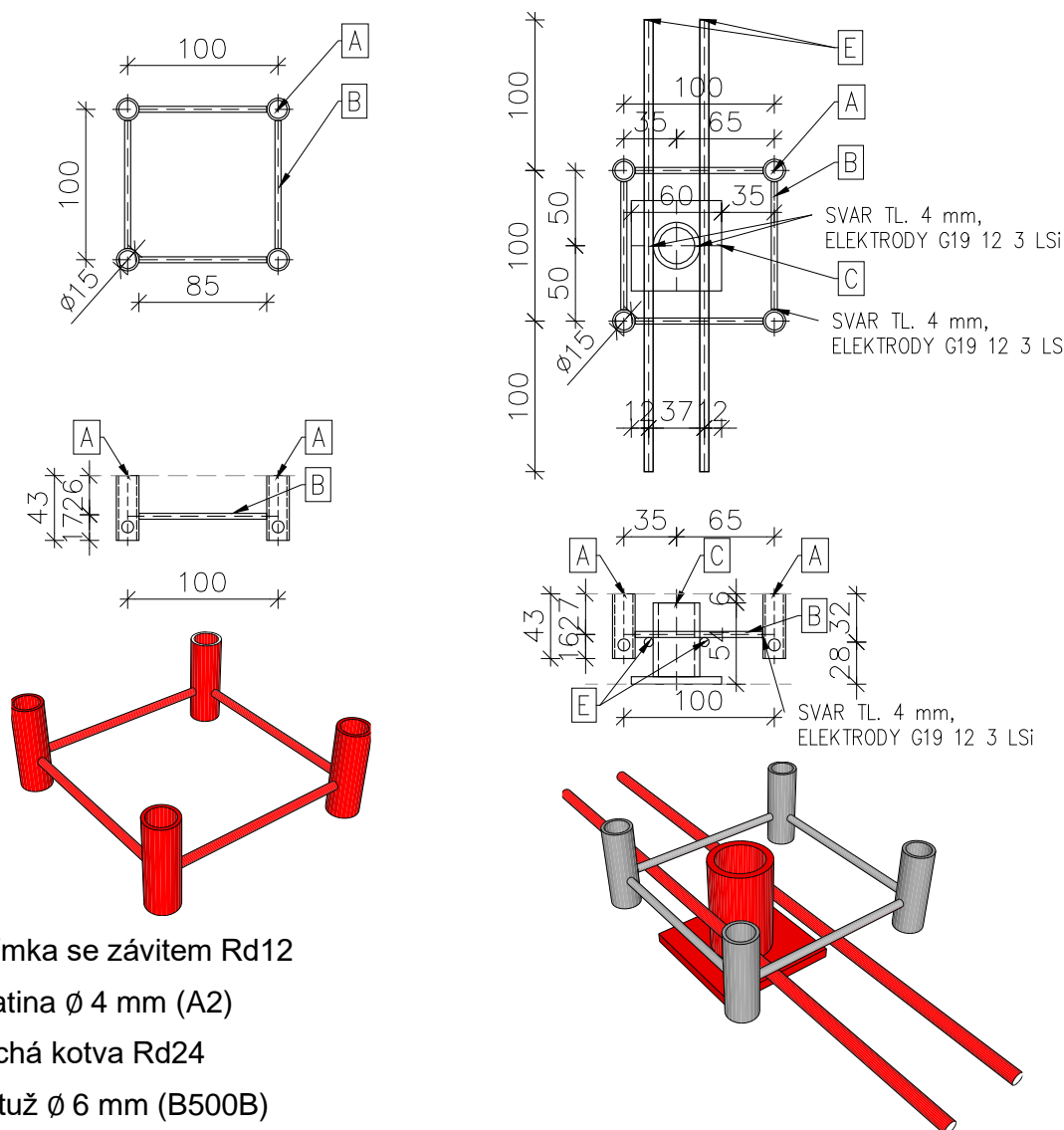
Za účelem co nejdokladnějšího napodobení podmínek při manipulaci s prefabrikáty lávek byly vyrobeny dva zkušební dílce z materiálu UHPFRC C120.¹⁰⁵ Složení materiálu viz tab. 30. Zkušební vzorky – lávky se lišily provedením okrajů v příčném řezu, tj. svislý okraj zakončený žebrem *I* a vykonzolovaná deska s kratším *II* a delším *III* vyložení (obr. 94). Hybridní kotevní přípravky dvojího typu byly zabudovány v různých částech příčného řezu konstrukce (obr. 97). Čtveřice kotev (obr. 95, vlevo), jež je označena *X* a je tvořena čtyřmi vzájemně propojenými objímkami se závitem $Rd12$, je standardně využívána ke kotvení zábradlí nebo jiné technologie k prefabrikátu. Předpokládá se, že únosnost bude dostatečná i k vyžití kotevního přípravku pro manipulaci s prefabrikátem. Pro potřeby vyšší únosnosti byl přípravek doplněn o další kotvu s větším závitem $Rd24$ (obr. 95, vpravo), čímž vznikl přípravek *Y*. Zachování čtveřice kotev i u únosnějšího typu přípravku je výhodné vzhledem k možnosti zakrýt manipulační závit $Rd24$ a ponechat jej pro případnou pozdější manipulaci s dílcem. Z těchto konstrukčních důvodů byla čtveřice kotev ponechána i pro statické zkoušení únosnějšího přípravku, jelikož se předpokládá, že obsazení čtveřice ovlivní únosnost kotevní oblasti jako celku.¹⁰⁶ Kombinací kotevních prostředků *X* a *Y* (obr. 95) a umístěním v rámci příčného řezu dílce *I*, *II* a *III* (obr. 93) bylo vytvořeno celkem 8 různých kotevních oblastí.

Rozdíl mezi dvěma typy kotevních přípravků je mimo jiné v efektivní hloubce zabudování (h_{ef}). U přípravku *X* je hloubka h_{ef} rovna 25 mm a je dána polohou příčných spojovacích prvků – kulatin. Hloubka h_{ef} přípravku *Y* odpovídá 55 mm a je určena polohou plechu

¹⁰⁵ V době zkoušení značené jako C110/130 dle [22].

¹⁰⁶ V rámci experimentů však není skrze čtveřici na přípravku *Y* vnášeno žádné zatížení, na přípravku *Y* je zatěžována vždy pouze střední kotva $Rd24$.

ploché kotvy Rd24. Zároveň zde hraje podstatnou roli doplňková výztuž a zachovaná čtveřice kotev Rd12 (jakožto přípravek X), které dohromady rozšiřují účinnou plochu kotevních oblastí.



A – objímka se závitem Rd12

B – kulatina \varnothing 4 mm (A2)

C – plochá kotva Rd24

E – výztuž \varnothing 6 mm (B500B)

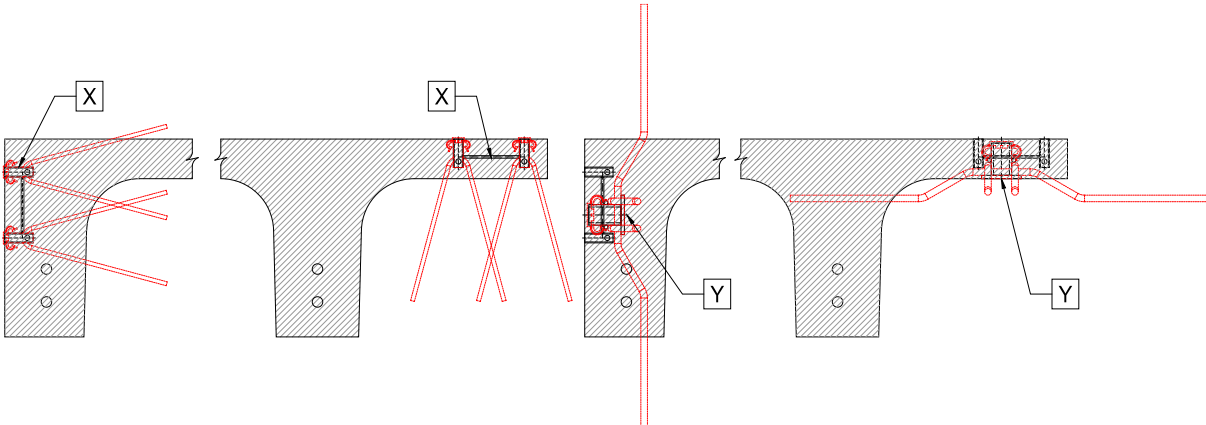
Obr. 95 Kotevní přípravy: X – plochá kotva (vpravo); Y – čtveřice kotev (vlevo)

Pro názornost je na obr. 96 uveden tvar a rozsah doplňkové výztuže, jak je požadována výrobcem prvků závitového systému. [93] Je zřejmé, že uvedená řešení nelze prakticky využít v konstrukcích z materiálu UHPC, jak bylo zmíněno v části 2.2.7.3. Uvedené kotvy jsou použity pro hybridní přípravy, avšak doplňková výztuž je zcela přepracována.

Tvar a dimenze zkušebních prefabrikátů vychází z provedení okrajů příčného řezu nosníků a z možností zkušebního lisu a manipulačního prostoru pod ním. Výška zkušebních nosníků byla navržena jako 300 mm, což je dostatečná velikost pro zajištění porušení kotevních oblastí a nikoli celého betonového prvku. Maximální délka zkoušeného výseku nosníku je s ohledem na manipulaci pod lisem 2,20 m. Konstrukce není předepnutá a je vyztužena pouze betonářskou výztuží při spodním povrchu žeber.¹⁰⁷ Přehled zkušebních kotevních oblastí je v tab. 29 a podrobně dokumentován na obr. 97. Značení kotevních

¹⁰⁷ Přesný tvar a rozměry zkušebních nosníků jsou dokumentovány v příloze C.

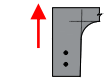
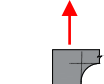
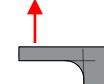

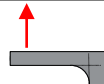

oblastí na zkušebních nosnících je provedeno následujícím způsobem: $i - j - k$, kde i je označení okraje zkušební nosníku (I, I', II či III), j je typ použitého kotevního přípravku dle obr. 95 (X nebo Y) a k slouží k rozlišení dvou zkoušek stejného typu (A nebo B).



Obr. 96 Kotevní přípravky v nosnících z UHPC s doplňkovým vyztužením dle výrobce, použito z [93]

Stáří vzorků v okamžiku zkoušení bylo 3 dny, což je okamžik, ve kterém zpravidla probíhá první manipulace s předem předepnutým dílcem při jeho vyjmutí z formy. Spolu se vzorky byla vyrobena také zkušební tělesa, na kterých byly prováděny materiálové zkoušky UHP-FRC (tab. 31). Jak již bylo nastíněno v úvodních předpokladech, oproti skutečné konstrukci nebyly zkušební dílce předepnuty a byly vyztuženy pouze běžnou betonářskou výztuží.¹⁰⁸

Tab. 29 Přehled zkušebních kotevních oblastí

Označení okraje nosníku s kotvou ¹⁰⁹	Kotevní přípravek dle obr. 95	Označení kotevní oblasti	Počet zkoušek oblasti
I 	Y	I-Y	2
I <i>kotvení na boku</i>	X	I-X	2
I' 	Y	I'-Y	2
I' <i>kotvení shora</i>	X	I'-X	2
II 	Y	II-Y	1
II 	X	II-X	1
III 	Y	III-Y	2
III 	X	III-X	2
Celkem			14

¹⁰⁸ Místo předpínacích sedmidrátových lan průměru 15,7 mm byly použity dva vyztužné profily B500B průměru 16 mm.

¹⁰⁹ V okraji nosníku I je kotevní přípravek z boku žebra, na okraji nosníku I' je kotevní přípravek umístěn shora v desce dle obr. 97.

Zkušební vzorky byly zhotoveny v prostředí výroby prefabrikátu a výroba odpovídala běžnému způsobu výroby dílců z UHPFRC. Dílce byly vyráběny v ocelové formě doplněné o bednicí překližkové desky. Výroba prvku probíhala ve finální poloze, přičemž většina kotevních přípravků byla umístěna v horním (hlazeném) povrchu betonu a část kotev byla umístěna na boku formy (oblasti I-Y a I-X). Princip výroby a umístění kotevních přípravků vzhledem k postupu betonáže dokumentují fotografie (obr. 98). Prvky byly po betonáži opatřeny nástřikem proti odpařování vody a následně zakryty. Další ošetřování nebylo provedeno. Ve stáří jeden den byly vzorky vyjmuty z forem a přesunuty na skládku, odkud byly dopraveny do zkušební laboratoře. Zkoušky kotvení byly provedeny ve stáří vzorků 3 dny.

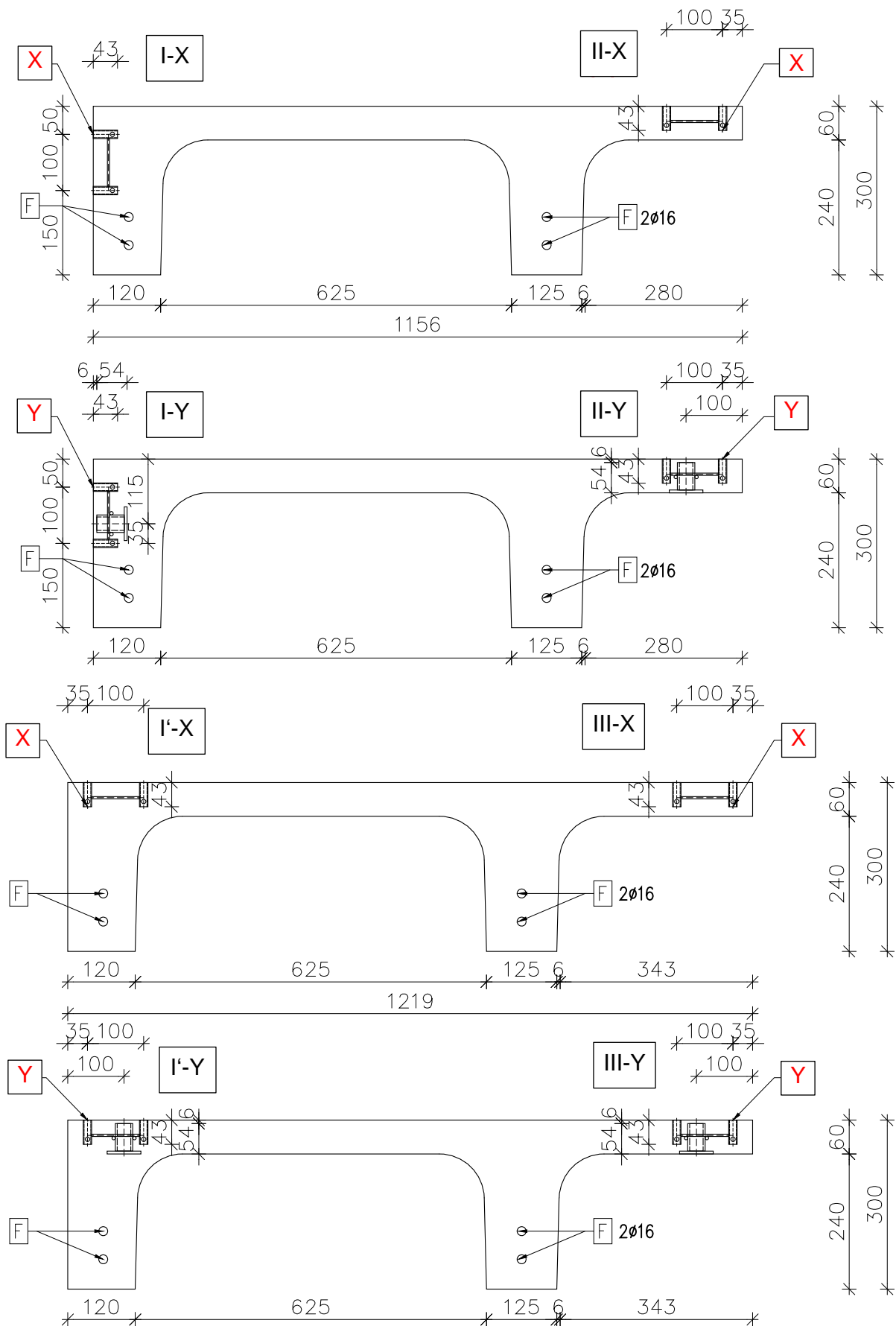
Tab. 30 Složení UHPFRC pro zkoušky kotvení v nosnících

Míchací zařízení	planetová míchačka
Suchá složka (PREMIX)	2107 kg/m ³
Superplastifikační přísada	40 kg/m ³
Voda	160 kg/m ³
Vlákna ¹¹⁰	120 kg/m ³

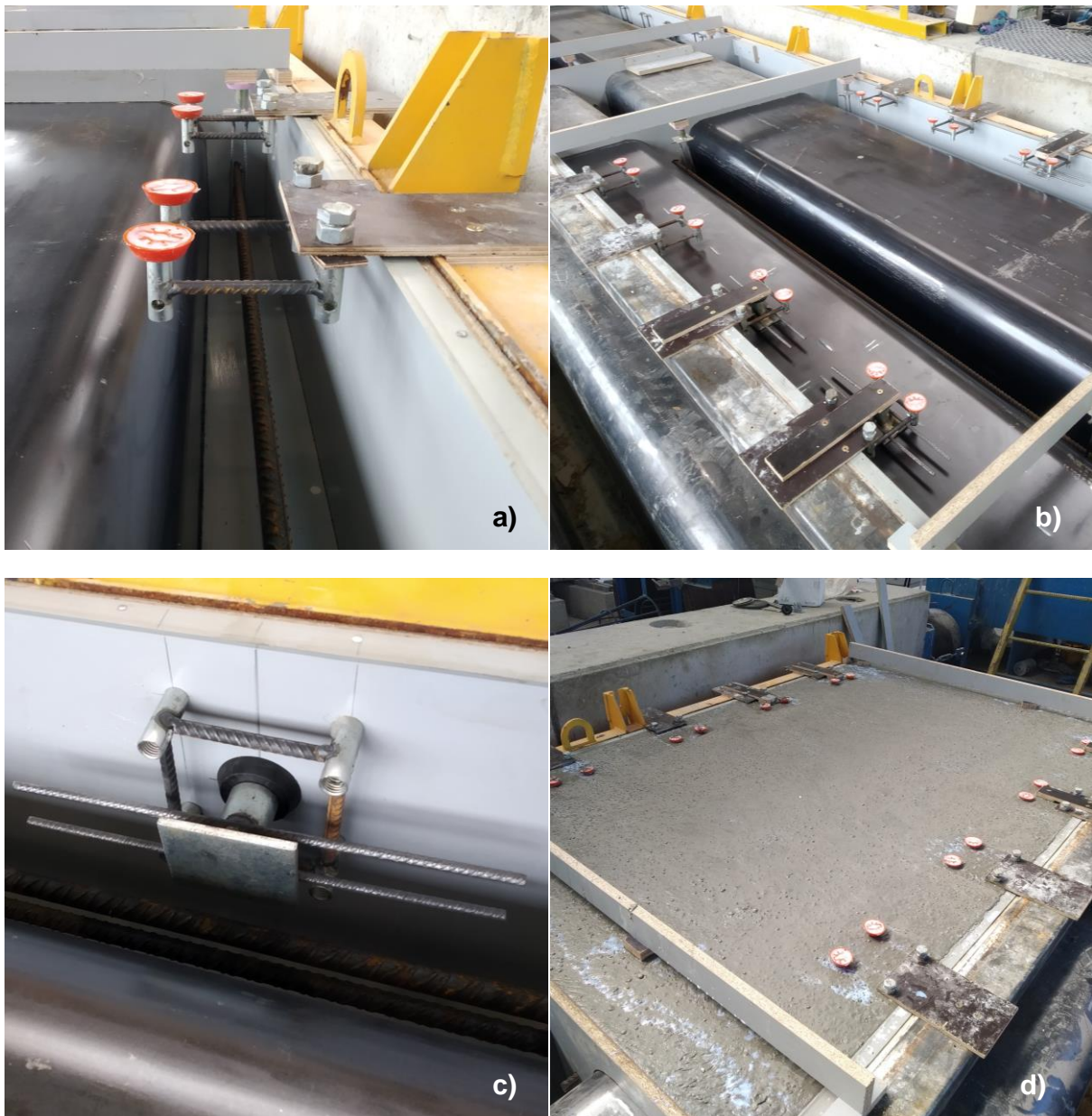
Tab. 31 Mechanické parametry UHPFRC použitého pro nosníky

veličina	jedn.	zkušební těleso	stáří [dny]	hodnota	sm. odchylka	var. koef.
<i>Rozlití</i>	mm	-	-	310x310	-	-
f_{cm}	MPa	krychle o hraně 100 mm dle [14]	28	150,2	3,9	2,8 %
f_{cm}	MPa		4	115,9	3,1	2,9 %
ρ_m	kg/m ³	Krychle 150 mm dle [14]	28	138,2	4,4	0,2 %
f_{cm}	MPa		28	109,3	5,2	3,9 %
f_{cm}	MPa	trámec 40x40x160 mm dle [10]	28	2450,0	8,8	5,9 %
f_{cm}	MPa		4	132,1	5,0	4,3 %
f_{cm}	MPa	Válec průměru 150 mm a výšky 300 mm dle [8]	28	142,5	8,2	5,8 %
E_{cm}	GPa		28	52,3	1,9	3,7 %

¹¹⁰ Ocelová vlákna pevnosti 2000 MPa, $d_f = 0,2\text{mm}$, $L_f = 12,5\text{ mm}$.



Obr. 97 Označení zkoušek a kotevních přípravků v rámci příčného řezu zkušebních nosníků (1:10)



Obr. 98 Výroba vzorků pro zkoušky kotevních prostředků v nosnících z UHPFRC: a) přípravek X instalovaný ve formě před betonáží, b) celkový pohled na formu před betonáží, c) přípravek Y kotvený ke stěně formy, d) zkušební nosník po betonáží

3.3.2. Uspořádání a průběh zkoušek

Zkoušení kotevních oblastí bylo provedeno výhradně svislou silou, tj. silou působící kolmo k desce prefabrikátu. Toto zatížení reálně odpovídá manipulaci s využitím vahadla, při kterém nevznikají v nosníku vodorovné síly. Zatížení v kotevních pouzdrech generovalo pouze tah (varianty s kotvením v desce), případně smyk¹¹¹ (varianta s kotvením v žebře I-X a I-Y viz obr. 97). Zatížení bylo vnášeno pomocí lisu, na který bylo přes ocelovou vidličku připojeno kování zhotovené speciálně pro daný typ kotevního přípravku (obr. 99). Vzorky byly pomocí ocelových převázek fixovány k podkladnímu roštu pod lisem. Jak již bylo

¹¹¹ Při tomto způsobu namáhání působí síla na minimální excentricitě dané tloušťkou zkušebního plechu a jeho podložením. Vlivem excentricity bude vznikat také ohybový moment.

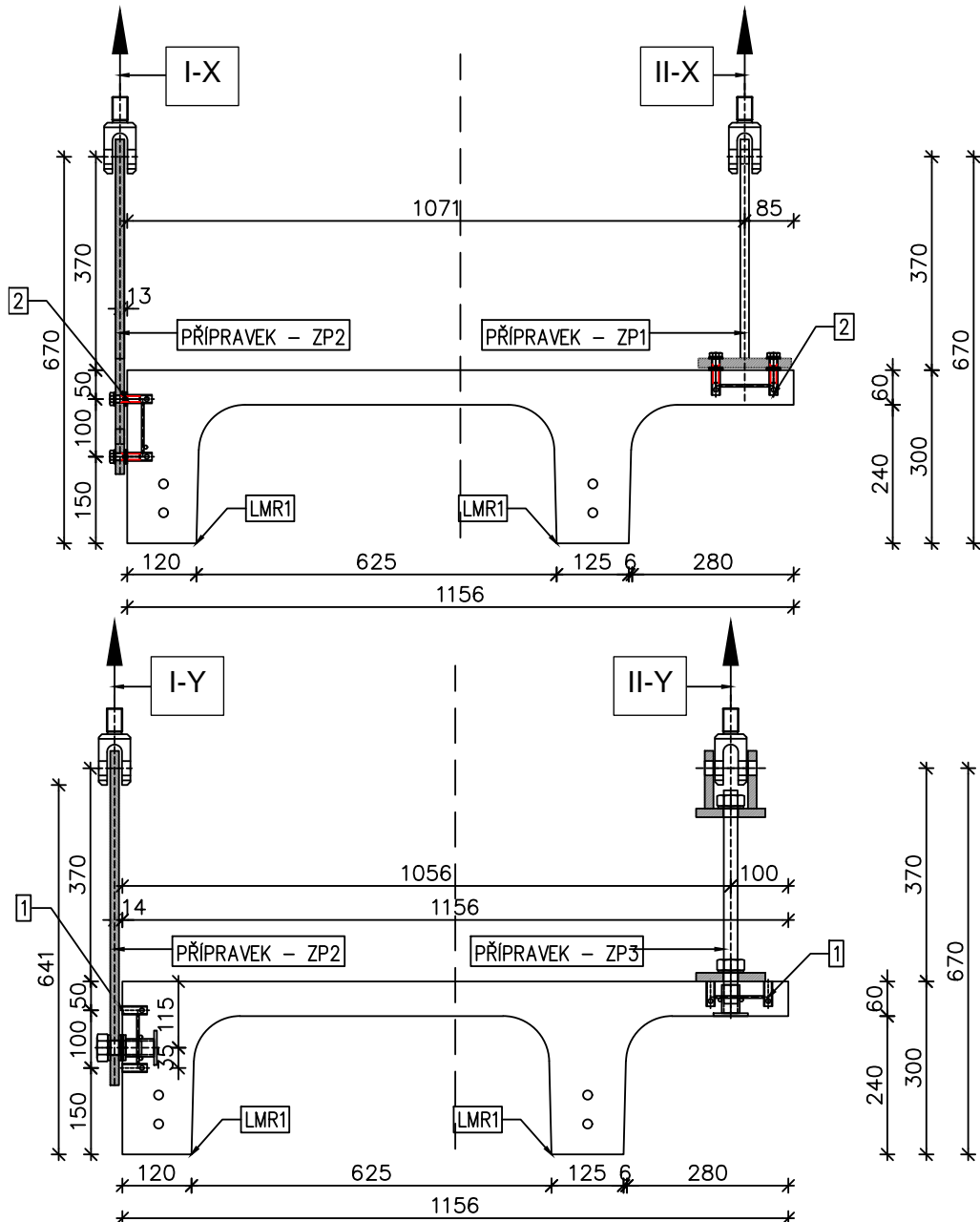
uvedeno výše, kotevní přípravky se lišily jednak počtem závitových pouzder (1 závit, respektive 4 aktivní závity) a polohou v rámci konstrukce (deska, respektive žebro). Pro všechny kombinace byly zhotoveny 3 různé ocelové přípravky (obr. 99), které byly vysokopevnostními šrouby spojeny se zkušební vzorkem.



Obr. 99 Ocelové přípravky pro přenos zkušebního zatížení pro jednotlivé typy kotvení

Podrobněji jsou varianty upevnění zkušebních vzorků k lisu zobrazeny na obr. 100, a to včetně pomocných přípravků pro přenos zatížení. Přípravek *ZP1* je určen k propojení s kotevním přípravkem *X* umístěným v desce vzorku. Přípravek *ZP2* slouží pro spojení obou kotevních přípravků *X* a *Y* umístěných v krajním žebro. *ZP3* spojuje kotevní přípravek *Y* v horní desce konstrukce.

Průběh zkoušek byl řízen posunem zatěžovacího lisu. Vzorky byly zatěžovány rychlostí 0,01 mm/s do porušení kotevní oblasti, přičemž po dosažení maximální síly nebyla z technických důvodů ve všech případech sledována sestupná větev zatěžování (viz část 3.3.3.1).



Obr. 100 Uspořádání zkoušek a způsob vnášení zatížení pro vybrané kotevní oblasti

3.3.3. Výsledky zkoušek

Tab. 32 dokumentuje souhrnné výsledky jednotlivých zkoušek, které jsou řazeny podle pořadí zkoušení. V Tab. 33 jsou popsány způsoby porušení zkušebních vzorků. Technická omezení neumožnila úplnou destrukci kotvení (např. plné vytržení betonového kuželu). Zvláště vzhledem k umístění 8 kotevních oblastí v rámci jednoho prefabrikovaného zkušebního dílce. Při úplné destrukci by hrozilo ovlivnění či porušení sousedních kotevních oblastí.

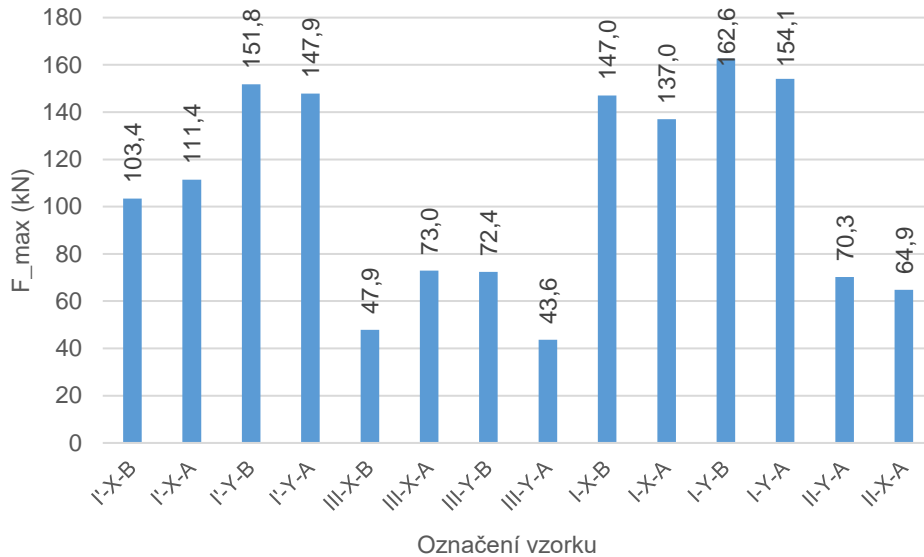
Tab. 32 Přehled výsledků zkoušek kotevních oblastí v nosnících

označení zkoušky	únosnost F_u [kN]	deformace při max. zatížení $u_{F,max}$ [mm]	pořadí	tuhost $K_{0,3}$ [kN/m]
I'-X-B	103,4	6,9	1	33,0
I'-X-A	111,4	6,0	2	16,7
I'-Y-B	151,8	13,5	3	12,4
I'-Y-A	147,9	8,6	4	23,3
III-X-B	47,9	8,1	5	10,2
III-X-A	73,0	10,7	6	11,3
III-Y-B	72,4	11,0	7	11,7
III-Y-A	43,6	8,7	8	8,8
I-X-B	147,0	11,8	9	17,6
I-X-A	137,0	13,2	10	14,5
I-Y-B	162,6	16,3	11	22,6
I-Y-A	154,1	16,4	12	9,5
II-Y-A	70,3	6,3	13	15,5
II-X-A	64,9	10,3	14	6,3

Tab. 33 Způsob porušení kotevních oblastí v nosnících

označení zkoušky	způsob porušení	orientační schéma dle [5]
I'-X-B	Vylomení betonu	
I'-X-A	Vytržení kuželu	
I'-Y-B	Svislá trhлина na žebřu + vytržení kuželu	
I'-Y-A	Vytržení kuželu	
III-X-B	Porušení konzoly	-
III-X-A	Vytržení kuželu	
III-Y-B	Vytržení kuželu	
III-Y-A	Porušení konzoly	-
I-X-B	Porušení okraje betonu	
I-X-A	Porušení okraje betonu	
I-Y-B	Porušení okraje betonu	
I-Y-A	Porušení okraje betonu	
II-Y-A	Porušení konzoly	-
II-X-A	Porušení konzoly	-

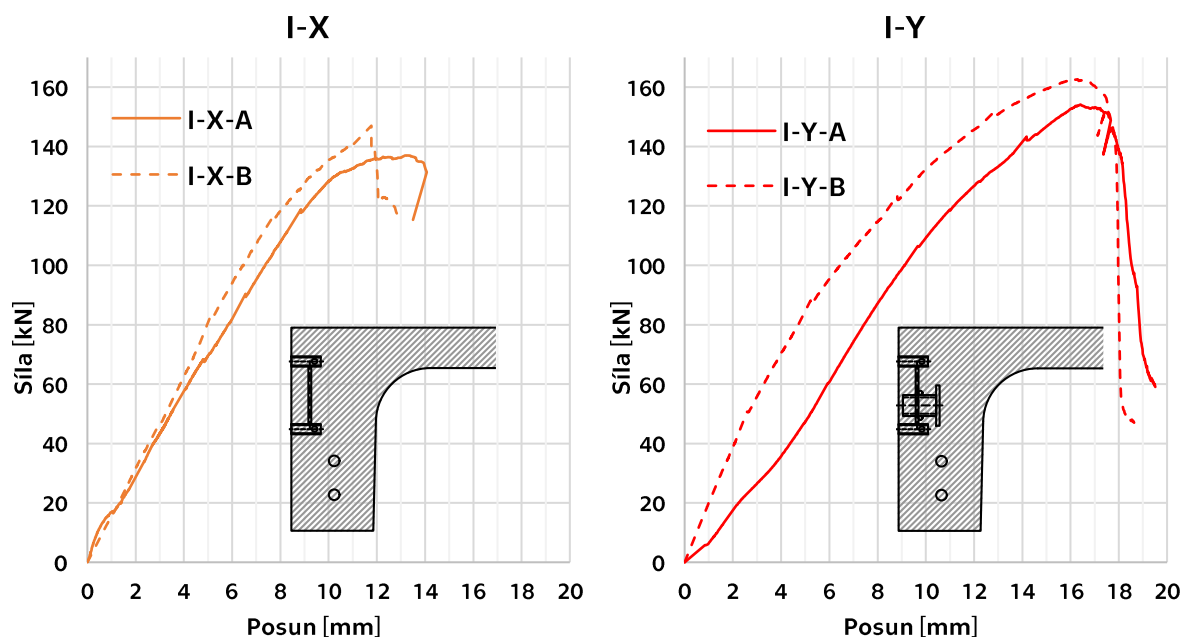
Číselné srovnání výsledných únosností nabízí graf na obr. 101, na kterém jsou výsledky řazeny podle pořadí zkoušení. U většiny výsledků je u druhé ze zkoušek dosaženo nižší únosnosti. Jedním z důvodů může být částečné ovlivnění kotevních oblastí provedením předchozí zkoušky.

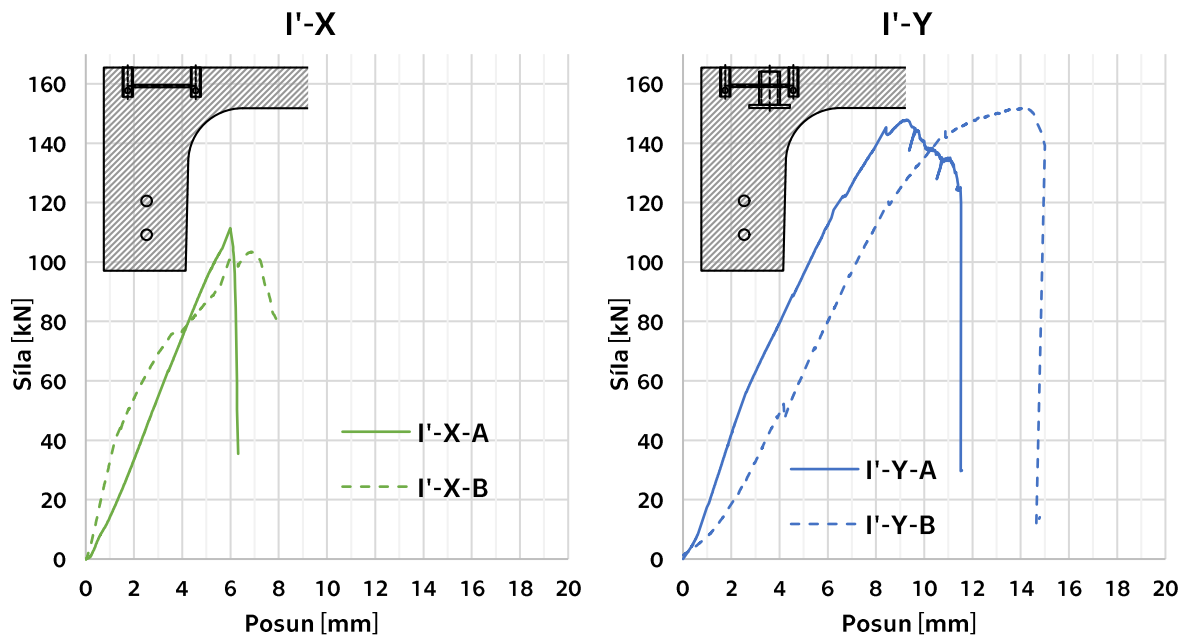


Obr. 101 Porovnání únosnosti kotevních oblastí

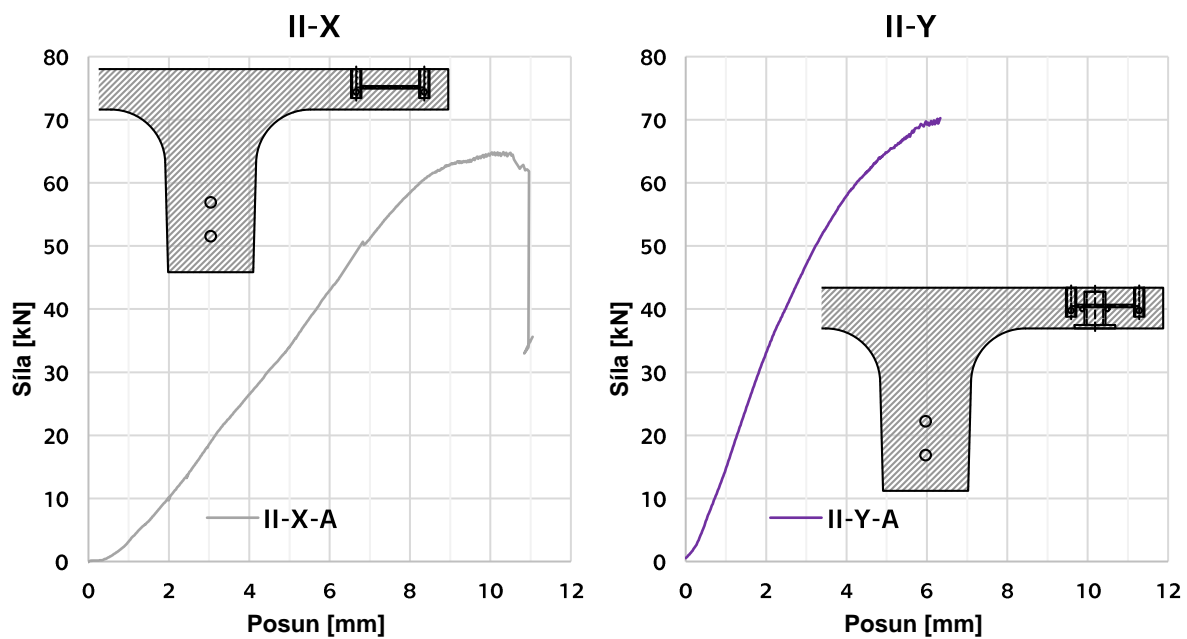
3.3.3.1. Závislost deformace a zatížení (pracovní diagramy)

Následující obrázky dokumentují odezvu kotevních oblastí na působení statického zatížení. V jednom grafu (obr. 102 a obr. 103) jsou vykresleny pracovní diagramy vzorků se stejným typem kotevních oblastí, tj. se stejným kotevním přípravkem a okrajem nosníku. Vzorky typu III-X a III-Y jsou zaznamenány ve stejném grafu (obr. 104), jelikož byly během zkoušení upraveny okrajové podmínky – upevnění prvku pod zkušební lisem, a to pro oba typy.

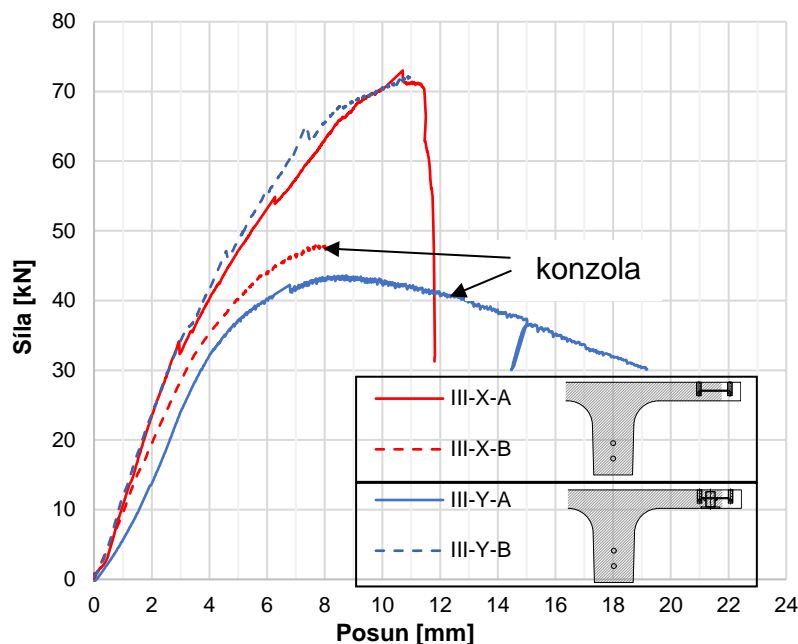




Obr. 102 Pracovní diagramy kotvení v nosnících s provedením okraje I a I'



Obr. 103 Pracovní diagramy kotvení v nosníku s provedením okraje II



Obr. 104 Pracovní diagramy kotvení v nosníku s provedením okraje III

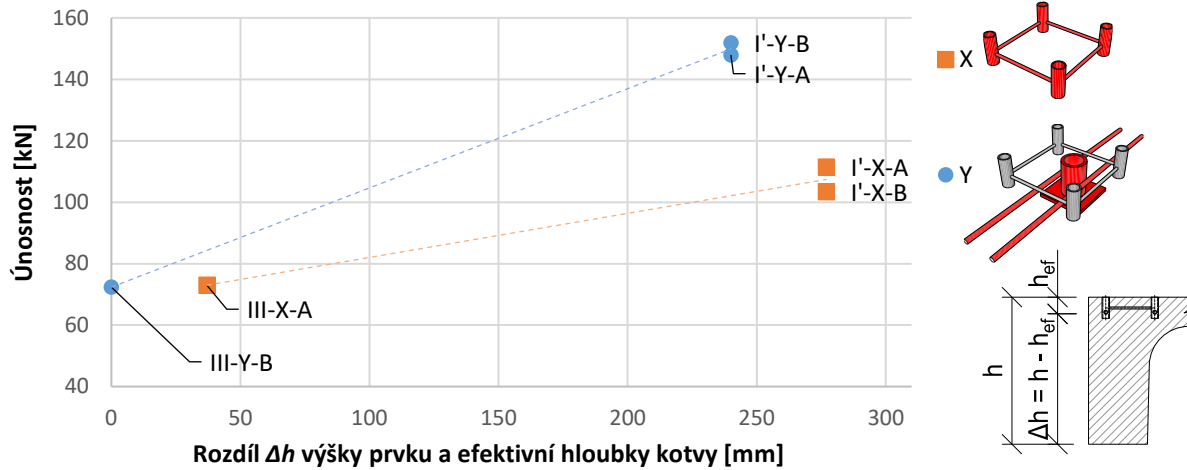
Vzorky *III-X-B* a *III-Y-A* byly zkoušeny s podepřením, které umožňovalo průhyb konzoly nosníku. Výsledky jsou proto jen minimálně ovlivněny typem použitého kotevního přípravku, který svou únosností přesahuje celkovou únosnost konzoly. Dříve než došlo k porušení kotevní oblasti, bylo dosaženo tahové pevnosti UHPFRC, které vedlo k porušení konzoly nosníku, a to u obou vzorků. Naopak u vzorků *III-X-A* a *III-Y-B* bylo zkoušeno kotvení, čemuž odpovídá charakter pracovního diagramu, jež je obdobný jako u ostatních kotevních oblastí, i nárůst únosnosti. Podrobnější porovnání je uvedeno v části 3.3.4.1.

3.3.4. Zhodnocení výsledků

3.3.4.1. Vliv výšky betonového prvku

Variace provedení zkušebních vzorků (viz obr. 94) umožnila porovnat vlastnosti kotevních oblastí podle celkové výšky konstrukce v místě zabudování kotevního prostředku. Předmětem zkoumání je vliv výšky konstrukčního prvku, respektive tloušťky betonové vrstvy pod kotvou. Obr. 105 znázorňuje závislost mezi únosností kotevní oblasti a rozdílem Δh výšky betonu a efektivní hloubky přípravku, který v podstatě definuje tloušťku betonu pod kotvou. Je zde evidentní nárůst únosnosti u kotevních prostředků zabudovaných nad žebrem, kde je celková výška konstrukce 300 mm, oproti kotevním prostředkům v tenké desce tloušťky 60 mm.¹¹² Rozdíl v únosnosti kotevních oblastí *I'-X* a *I'-Y* (výšky konstrukce 300 mm) dále odpovídá rozdílu v efektivní hloubce h_{ef} jednotlivých přípravků. Takový rozdíl však není pozorovatelný u oblastí *III-X* a *III-Y*, kde je únosnost u obou vzorků prakticky stejná. V tomto případě však není k dispozici dostatečný počet výsledků na to, aby bylo možné závěry nějakým způsobem zobecnit.

¹¹² Porovnávány jsou jen experimenty, kde bylo podepření zkušebních vzorků voleno pro zkoušku kotevní oblasti, nikoli pro zkoušku konzoly (viz obr. 104).



Obr. 105 Vztah mezi výškou betonového prvku a únosností kotevních oblastí

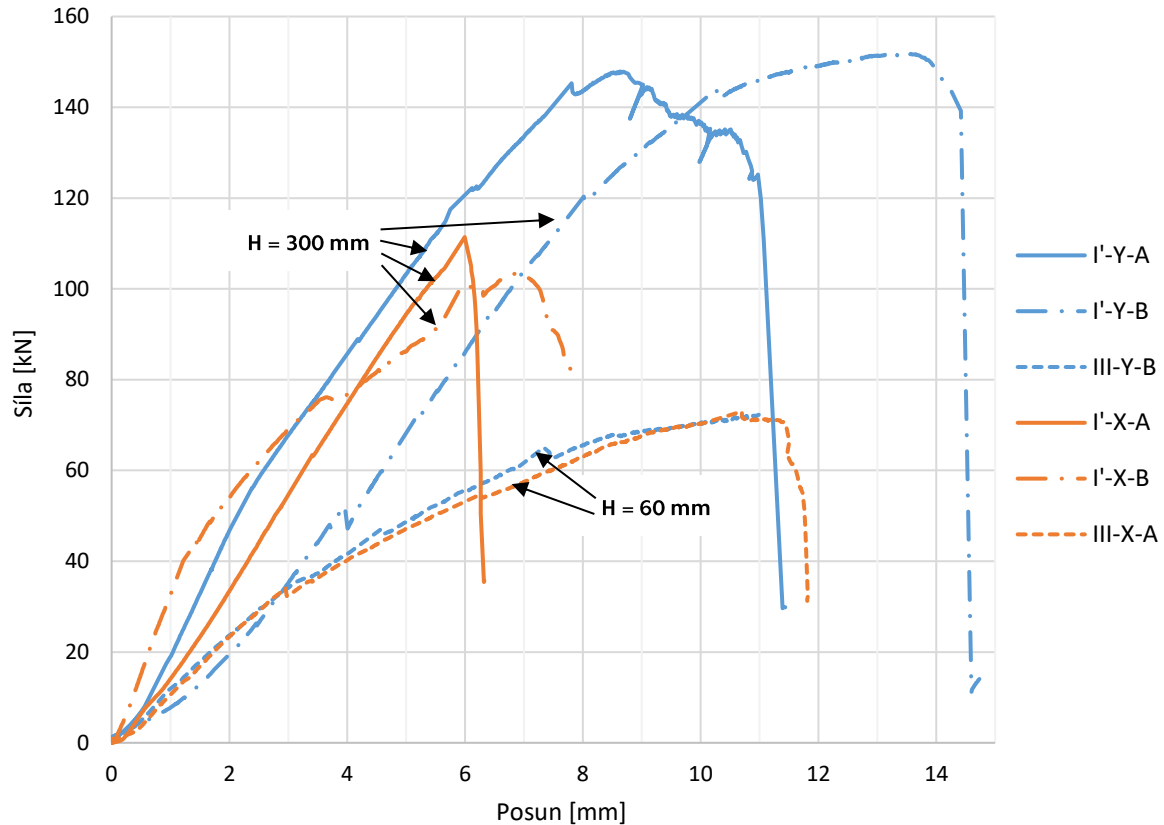
Obdobně, jako je s růstem výšky betonového prvku spojen nárůst únosnosti kotvení, se u vyšších prvků projevuje vyšší tuhost kotevních oblastí. To je pozorovatelné při srovnání pracovních diagramů (obr. 106). Růst křivek kotevních oblastí ve vyšším dílci je o poznání strmější než v dílci tloušťky 60 mm. Číselné srovnání únosnosti a tuhosti vybraných vzorků je uvedeno v tab. 32 a tab. 34.

S využitím rovnice (2.10) definované podle Nilforoushe a kol. [47] byl vyjádřen koeficient ψ_H pro zohlednění vlivu výšky konstrukčního prvku – nosníku z UHPC. Nutno dodat, že vztah vychází původně ze zkoušek provedených na kotvách s hlavou zabudovaných v deskách z běžného betonu, viz část 2.2.4. V původní rovnici (2.10) je sice koeficient ψ_H omezen na maximální hodnotu 1,2, v případě kotvy typu X ale dosahuje pro výšku konstrukce 300 mm hodnoty 1,57. Hodnota tak přesně koresponduje s nárůstem únosnosti 147 % vůči výšce prvku 60 mm. Lze se domnívat, že závislost lze použít i pro kotvení v UHPC. V případě kotvy typu Y má hodnota ψ_H pouze informační charakter, protože její vlastnosti jsou výrazně ovlivněny tvarem doplňkové výztuže a použitím čtveřice spojených kotev.

Tab. 34 Únosnost F_{um} a tuhost $K_{0,3m}$ kotvení při změně výšky konstrukce

Prvek	Výška prvku [mm]	h_{ef} [mm]	Průměrná únosnost F_{um} [kN]	Nárůst F_{um} vůči $h = 60$ mm	Průměrná tuhost $K_{0,3m}$ [kN/m]	Nárůst $K_{0,3m}$ vůči $h = 60$ mm	ψ_H^{113} [-]
I'-X	300	25	107,42	147 %	24,87	220 %	1,57
III-X	60	25	72,99	100 %	11,29	100 %	1,05
I'-Y	300	55	149,86	207 %	17,84	153 %	1,29
III-Y	60	55	72,36	100 %	11,69	100 %	0,86

¹¹³ Stanoveno podle rovnice (2.10) jako $\psi_H = \left(\frac{h}{2,0 \cdot h_{ef}}\right)^{0,25}$, tedy bez omezení $\psi_H \leq 1,20$.



Obr. 106 Pracovní diagramy kotevních oblastí v prvcích s rozdílnou výškou

Pokles únosnosti v prvcích tloušťky 60 mm lze do jisté míry přičíst stěnovému efektu, respektive usměrňování výztužných vláken v blízkosti dna formy. Tato problematika byla zkoumána v části 3.2 při srovnávání vlastností kotev umístěných na straně formy a na druhé straně – v horním (hlazeném) povrchu. V tomto případě dochází v desce tloušťky 60 mm k usměrňování ocelových vláken o dno formy. Vlákna jsou orientována především v rovině dna. Tato vlákna mají při namáhání kotevní oblasti v tahu (kolmo na povrch s usměrňovanou výztuží) nižší účinnost a matrice je tak v tomto směru oslabena. Další vysvětlení plyne z tuhosti a únosnosti samotného betonového dílce, které jsou u dílce výšky 300 mm několikanásobně vyšší.

3.3.4.2. Vliv provedení kotevního přípravku

Při namáhání kotvení se na výsledné únosnosti pozitivně projeví efekt doplňkové výztuže a vyšší efektivní hloubka h_{ef} na přípravku Y. U tahem namáhaných přípravků oblasti I' bylo s přípravkem Y dosaženo o 40% vyšší únosnosti ve srovnání s přípravkem X. Na kotevních oblastech označených I namáhaných smykovou silou (s kotevními přípravky na boku žebra) se kromě efektu výztuže a h_{ef} také výrazněji projevil vliv vzdálenosti kotvy od okraje prvku. S přípravkem Y (který je 100 mm osově vzdálen od okraje) bylo dosaženo o 12% vyšší únosnost než s přípravkem X, kde se projevila vůle otvorů v zatěžovacím přípravku ZP2 (obr. 99). Při přenosu zatížení do přípravku tak byla nejprve aktivována dvě horní závitová pouzdra a došlo tak dříve k porušení okraje betonu (obr. 107). Zajištění rovnoměrného roznosu na čtveřici závitových pouzder je při tomto typu namáhání komplikované a prakticky těžko proveditelné. Při kotvení v žebro je dostatek prostoru pro umístění přípravku Y, tudíž se lze prakticky vyhnout použití přípravku X při namáhání kotvení ve smyku.



Obr. 107 Porušení kotevní oblasti I-X nosníku

3.3.5. Shrnutí zkoušek kotvení v nosnících

V rámci experimentálního programu zaměřeného na kotvení v nosnících z UHPC bylo provedeno celkem 14 zkoušek, při kterých byly ověřovány dva typy hybridních kotevních přípravků (obr. 95), které byly navrženy s využitím běžně dostupných prvků závitového systému pro kotvení. Umístěním těchto kotevních přípravků v rámci čtyř různých částí UHPC nosníku (tab. 29) vzniklo celkem 8 typů kotevních oblastí. Zkoušky měly v co možná největší míře postihnout reálné podmínky jak při výrobě, tak při užívání kotevních přípravků, které měly sloužit pro manipulaci s nosníky i pro montáž dalšího příslušenství. Kotevní oblasti byly podrobeny zatěžování tahovou i smykovou silou, a to podle umístění v rámci konstrukce.

Návrh těchto atypických přípravků byl motivován absencí dostupných řešení kotvení pro konstrukce z UHPC, které vynikají štíhlostí a úsporou materiálu. V rámci zkoušek bylo prokázáno, že i přes atypické provedení doplňkové výztuže a kombinování či spojování kotevních přípravků, plní tyto přípravky v UHPC svou funkci bez jakéhokoli omezení.

V rámci vyhodnocení zkoušek byl stanoven koeficient ψ_H pro zohlednění nárůstu únosnosti při vzrůstající výšce betonového prvku, v kterém je kotva zabudována. Pro přípravek X, který nemá vyčnívající doplňkovou výztuž, hodnota součinitele ψ_H přesně odpovídala nárůstu únosnosti.

Tab. 35 Návrhová únosnost kotevních oblastí v nosnících z UHPFRC

Kotevní oblast	I-X	I-Y	I'-X	I'-Y	III-X	III-Y
Návrhová únosnost [kN]	56,80	63,34	42,97	59,95	29,20	28,95

Při zkouškách kotvení v nosnících došlo ve všech případech k porušení betonu. Součinitel bezpečnosti pro porušení betonu je dle technických podmínek [21] roven 2,5. S využitím součinitele byla stanovena návrhová únosnost relevantních kotevních oblastí (tab. 35).¹¹⁴

Kromě experimentálního ověření v laboratoři byly navržené kotevní přípravy otestovány na praktickém příkladu předepnutého nosníku z UHPC o hmotnosti 8,85 tun a výšce 300 mm. Přípravek typu Y byl na realizované prefabrikované konstrukci nejprve využit k manipulaci¹¹⁵ s nosníkem (obr. 108) a následně k montáži zábradlí ke čtveřici závitových pouzder (obr. 109). Tímto byly definitivně potvrzeny předpoklady o alternativních způsobech použití kotevních přípravků (běžně dostupných a užívaných v prefabrikaci) pro konstrukční prvky z UHPC.



Obr. 108 Hybridní kotevní přípravek „Y“ využitý při manipulaci s dílcem



Obr. 109 Hybridní přípravek „Y“ využitý pro kotvení

¹¹⁴ V souhrnu byly vynechány výsledky dosažené na vzorcích s upravenými okrajovými podmínkami, na kterých došlo k porušení konzoly nosníku.

¹¹⁵ Na obr. 108 je zobrazena manipulace nosníku při montáži, která probíhala ve stáří více než 28 dní. Rozhodujícím stavem však bylo vyjmutí dílce z formy ve stáří 3 dny.

4. Závěr

Tato práce byla zaměřena na studium kotvení v konstrukčních prvcích z materiálu UHPC. Kotvení v tomto moderním kompozitním materiálu představuje důležitou součást komplexní problematiky navrhování a realizace konstrukcí z UHPC. V rámci disertační práce bylo řešeno a zpracováno několik experimentálních zkoušek, pomocí kterých byla zkoumána problematika kotevních oblastí a kotvení v UHPC obecně. Praktickému ověřování předcházelo podrobné studium současného stavu řešené problematiky, které představovalo zkoumání přístupů k navrhování a hodnocení kotvení, které byly následně konfrontovány s materiálem UHPC co do základních principů, vlastností a výrobních a technologických postupů.

V rámci zkoušek byly testovány tři různé oblasti, které významnou měrou ovlivňují vlastnosti kotvení v UHPC. Při zkoušení byl kladen důraz na uplatnění výsledků a jejich přesahy do praktického navrhování a provádění. Experimenty vychází z použití kotevních přípravků variantního provedení pro prefabrikované prvky, což nutně neznamená újmu při využití výsledků v širších souvislostech. Všechny kotevní prostředky byly předem zabudované.

4.1. Shrnutí výzkumu a dosažených výsledků

Byly provedeny následující experimenty a z hlediska naplnění hlavních cílů disertační práce byly vyvozeny následující závěry:

4.1.1. Zkoušky kotvení v tenkých deskách z HPFRC

Zkoušky kotevních prostředků – šroubů v tenkých deskách HPC s PVA vlákny. Zkouškami byly ověřeny vlastnosti kotevních šroubů různých velikostí (M6, M8 a M10), které byly namáhány tahovým a smykovým zatížením a kombinací obou. Byl sledován vliv velikosti hlavy d_h a hloubky zabudování h_{ef} kotevních prostředků na únosnost kotvení. V rámci vyhodnocení byl sledován vliv počtu kotevních prostředků a také navrženy způsoby posuzování interakce sil působících na kotvení v HPFRC. Pro zaručení výstižnosti bylo provedeno přes 180 zkoušek kotvení v deskách tloušťky 10 až 30 mm. Lze pozorovat tyto výsledky:

- Na vzorcích z HPFRC bylo dosaženo úhlu roznosu zatížení $\alpha_m = 33^\circ$, což je blízká hodnota 35° , na které staví metoda CCD. [44]
- Velikost hlavy d_h kotevního prostředku přímo úměrně ovlivňuje únosnost kotvení. Na základě zkoušek jednotlivých šroubů v prostém tahu byla sestavena rovnice pro stanovení únosnosti betonového kuželu v tenkých deskách z HPFRC, pomocí které lze zohlednit rozměr hlavy d_h kotevního prostředku.
- Tahová pevnost byla vyhodnocena jako vhodnější vlastnost HPFRC pro stanovení únosnosti. Je to dáno především vývojem pevnosti v tahu za ohybu v čase, který více koresponduje s časovým vývojem únosnosti kotvení.
- Použití ocelového plechu s přesnými otvory se závitem, který spojuje dvojici kotevních šroubů, mělo jednoznačně pozitivní vliv na smykovou únosnost kotvení. Použitím plechu je omezeno vylamování šroubů z betonu a přenášená smyková síla se lépe roznáší do betonu. Při použití dvojice šroubů s plechem bylo dosaženo téměř trojnásobné smykové únosnosti ve srovnání s kotvením s jedním šroubem a bez plechu.
- Využitím plechu u dvojice tažených kotev lze eliminovat nepřesnosti při zabetonování šroubů a dosáhnout velmi přesné kolmosti. Naproti tomu se objevuje

problém při betonáži, kdy dochází ke změně způsobu betonování a ke vzniku vzduchových kaveren pod ocelovým plechem, které vedou ke snížení únosnosti.

4.1.2. Tahové zkoušky kotevních oblastí v UHPFRC

Zkoušky kotevních oblastí v UHPFRC s jednotlivými kotvami namáhanými v prostém tahu, kde byly sledovány parametry základního materiálu s proměnnou dávkou vláken v_f . Dalšími proměnnými byla hloubka kotvení h_{ef} a pozice kotevního prostředku při betonáži, přičemž byly hodnoceny vlastnosti kotev zabudovaných u dna formy (F) a na honím povrchu (H). Experimenty byly doplněny o doprovodné zkoušky mechanických vlastností UHPFRC. Součástí je podrobná analýza vlivu parametrů na vlastnosti kotevních oblastí. Závěr:

- Pro povrch od formy (F) je hodnota úhlu roznosu 21° a pro povrch horní (H) 34° . Objemové zastoupení vláken v_f nemá výraznější vliv na velikost úhlu roznosu zatížení α (viz tab. 21 a tab. 23). Zásadnější vliv na změnu úhlu α má *usměrňování vláken* oproti jejich množství v_f , což je reprezentováno odlišnostmi u povrchu (F) a (H).
- Únosnost kotevní oblasti narůstá s vyšším stupněm vyztužení v_f UHPC a s větší účinnou hloubkou zapaštění šroubu. Nejvýraznější nárůst únosnosti nastává u série se 2,0 % drátků, kde je dosaženo v hloubce $h_{ef} = 45$ mm cca 3,5násobné únosnosti ve srovnání s hloubkou $h_{ef} = 25$ mm. Série se 2,0 % drátků (přibližně 160 kg/m^3) se tak jeví jako optimální z hlediska výsledných parametrů kotvení.
- Nárůst únosnosti F_{um} kotvení neodpovídá změně tlakové pevnosti UHPFRC, která není úměrná změně v_f , ale koreluje s nárůstem pevnosti v tahu za ohybu.
- Vlastnosti kotvení jsou zásadním způsobem ovlivněny orientací vyztužných vláken. Kotevní oblasti umístěné na straně u formy (F) jsou ovlivněny stěnovým efektem, kdy vlákna jsou orientována v rovině formy – kolmo na směr namáhání, což způsobuje úbytek únosnosti kotvení. Naproti tomu byl zaznamenán dramatický nárůst únosnosti na straně (H). Průměrný nárůst únosnosti kotvení se stejným h_{ef} mezi povrchy (H) a (F) je přibližně 239 % pro sérii s $v_f = 2,0$ %, resp. 154 % pro sérii s $v_f = 2,5$ %. Globálně jsou rozdíly mezi povrchy patrné do vzdálenosti cca $2,5 L_f$ od jmenovaného povrchu.

4.1.3. Zkoušení kotvení v nosnících z UHPFRC

Zkoušky kotvení v nosnících z UHPFRC byly provedeny na nosném prvku reálných rozměrů s důrazem na vystižení reálných podmínek jak při výrobě, tak při užívání kotevních přípravků. Testovány byly dva speciálně vyvinuté kotevní přípravky uzpůsobené pro použití v konstrukcích z UHPC. Kombinací se 4 způsoby umístění na nosníku vzniklo celkem 8 různých kotevních oblastí.

- I přes atypické provedení doplňkové vyztuže a kombinování či spojování kotevních přípravků, plní hybridní přípravky v UHPC svou funkci bez omezení.
- Byl stanoven koeficient ψ_H pro zohlednění nárůstu únosnosti při vzrůstající výšce betonového prvku, v kterém je kotva zabudována. Pro přípravek X, který nemá vyčnívající doplňkovou vyztuž, hodnota součinitele ψ_H přesně odpovídala nárůstu únosnosti.

4.2. Přínos výsledků pro vědní obor a stavební praxi

Příprava a provedení zkoušek měly maximálně odrážet reálné podmínky. Zkoušeny byly materiály, které jsou běžně dostupné. Návrhy na posouzení a predikci vlastností kotvení

jsou vztaženy k doposud používaným metodám. V rámci disertační práce byly navrženy tyto postupy pro ověřování vlastností kotvení:

- Na základě zkoušek kotev v prostém tahu byla sestavena rovnice (3.2) pro stanovení únosnosti betonového kuželu v tenkých deskách z HPFRC, pomocí které lze zohlednit rozměr hlavy d_h kotevního prostředku. Uvedená vyhodnocení jsou založena na výsledcích kotvení v extrémně malých kotevních hloubkách 5 mm a 10 mm, které zpravidla nemají v konstrukcích z běžného betonu obdoby.
- Pro zhodnocení interakce tahové a smykové síly působící na kotvení byl využit interakční diagram. Ze stávajících návrhových přístupů byly aktualizovány hodnoty exponentů pro použití v kombinaci s HPFRC, resp. UHPFRC. Ukazuje se, že stávající metody (určené pro běžný beton a kotevní prostředky zabudované předem) jsou konzervativní a pomocí výsledků provedených zkoušek byla navržena úprava rovnice (3.4) spočívající v použití exponentu $a = 0,85$.
- Pro predikci tahové únosnosti kotvení v UHPFRC byla sestavena rovnice (3.16), pomocí které lze zohlednit vliv anizotropie materiálu na změny únosnosti způsobené stěnovým efektem. Je zaveden vliv okrajových podmínek, na základě kterého je upravena pevnost UHPFRC. Ve vztahu je zohledněn rozměrový efekt a je počítáno s pevností UHPFRC v tahu, což vhodně popisuje vliv v_f na výslednou únosnost a zároveň se jedná o uživatelsky dostupný parametr UHPFRC, který je výsledkem každé průkazní zkoušky materiálu.

4.3. Zaměření dalšího výzkumu

Na poli dalšího výzkumu by bylo vhodné se zaměřit na další specifika materiálu UHPC, kterými jsou různé způsoby ukládky (čerpání, stříkání, aditivní fabrikace apod.), což jsou procesy měnící vlastnosti UHPC s vlivem na parametry kotvení. Stejně jako se jeví důležitým zkoumat vlastnosti předem zabudovaných kotev, je vhodné provést ověření dodatečného kotvení.

Ačkoli byla snaha o provedení reprezentativního počtu ověřovacích zkoušek, bylo by vhodné pokračovat v experimentálním ověřování a zpřesnit modely a rovnice pro predikci únosnosti, které byly nastíněny v této práci. Zejména pak problematiku týkající se vlastností kotvení v UHPC s vlivy usměrňování vláken, která nebyla doposud výrazněji rozvíjena. Cenné by bylo zhodnotit vliv usměrňování vláken na únosnost kotvení ve smyku, kde lze za určitých okolností předpokládat zvýšení únosnosti oproti stavu s všesměrně rozptýlenou výztuží.

Podobně jako vládne nejednoznačnost v rovině názvosloví, jsou a pravděpodobně i nadále budou nejednotná zkušební tělesa a samotné zkoušky pro určování vlastností materiálů. Čím větší bude povědomí o různých typech těles a zkoušek, tím lépe se bude možné orientovat mezi jejich výsledky. Vhodné by bylo vytvořit širší databázi provedených zkoušek s dalšími parametry UHPC, na základě čehož by bylo možné o něco lépe porozumět UHPC.

Získávané poznatky o kotvení je nutné dále posouvat směrem k projektantům a k dodavatelům kotevních systémů. Zejména by bylo vhodné upravit okrajové podmínky, tak aby nevyklučovaly použití UHPC.

5. Seznam literatury

5.1. Normy, předpisy a návrhová doporučení

- [1] ACI Committee 349. ACI 349-85: Code Requirements for Nuclear Safety-Related Concrete Structures and Commentary; 1985.
- [2] ETAG 034-1. European Technical Approval 034-1 Guideline for European technical approval of kits for external wall claddings. Part 1: ventilated cladding kits comprising cladding components and associated fixings. 2012. 98 s.
- [3] EOTA. EAD 330232-00-0601 - Mechanical fasteners for use in concrete (Brussels: European Organization for Technical Assessment), 57 s., 2016.
- [4] ČSN EN 1992-1-1 ed. 2. *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019, 208 s. Třídící znak 731201.
- [5] ČSN EN 1992-4. *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 4: Navrhování kotvení do betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021, 110 s. Třídící znak 731220.
- [6] fib, fib bulletin 58 – Design of anchorages in concrete. July. 2011.
- [7] CEB-FIP, Fastenings to Concrete and Masonry Structures – State of Art report. Thomas Telford Services Ltd., 1994.
- [8] ČSN ISO 1920-10. *Zkoušení betonu – Část 10: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016, 12 s. Třídící znak 731319.
- [9] ČSN EN 14 651+A1. Zkušební metoda betonu s kovovými vlákny – Měření pevnosti v tahu za ohybu (mez úměrnosti, zbytková pevnost). Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2008, 16 s. Třídící znak 723431.
- [10] ČSN EN 196-1. *Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016, 32 s. Třídící znak 722100.
- [11] ČSN EN 206+A2. *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021, 88 s. Třídící znak 732403.
- [12] ČSN EN 12350-2. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím*, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020, 12 s. Třídící znak 731301.
- [13] ČSN EN 12350-5. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 5: Zkouška rozlitím*, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020, 12 s. Třídící znak 731301.

- [14] ČSN EN 12390-3. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020, 20 s. Třídící znak 731302.
- [15] ČSN EN 12390-6. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles*, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010, 12 s. Třídící znak 731302.
- [16] ČSN EN 12390-8. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou*, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020, 8 s. Třídící znak 731302.
- [17] Rilem Committee FMC-50. Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of the three-point-bend tests on notched beams. *Materials and Structures*, 18:285–290, 1985.
- [18] SIA 2052, Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB) – Baustoffe, Bemessung und Ausführung, Postfach, CH–8027 Zürich, 2016.
- [19] Japan Society of Civil Engineers. Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC), 2008.
- [20] Richtlinie UHPC, Österreichische Bautechnik Vereinigung, 2023.
- [21] ZICH, Miloš, Miroslav BALOUŠEK, Michal ŠTEVULA a Michal VOPLAKAL. *Transportní kotvy*. Praha: Česká betonářská společnost ČSSI, 2018. Technická pravidla ČBS, 06. ISBN 978-80-906759-7-1.
- [22] KOLÍSKO, Jiří et al. *Metodika 1: Metodika pro návrh UHPC a pro materiálové zkoušky*. Kloknerův ústav, ČVUT v Praze, 2015.
- [23] KALNÝ, Milan et al. *Metodika 2: Metodika pro navrhování prvků z UHPC*. Kloknerův ústav, ČVUT v Praze, 2015.
- [24] TICHÝ, Jan et al. *Metodika 3: Metodika pro výrobu prvků z UHPC a pro kontrolu jejich provedení*. Kloknerův ústav, ČVUT v Praze, 2015.
- [25] COUFAL, Robert, Milan KALNÝ, Jiří KOLÍSKO a Jan L. VÍTEK. *Ultra vysokohodnotný beton (UHPC)*. Praha: Česká betonářská společnost ČSSI, 2022. Technická pravidla ČBS, 07. ISBN 978-80-907611-7-9.
- [26] TP 267, Technické podmínky, *Ultra vysokohodnotný beton (UHPC)*. Ministerstvo dopravy. 62 s. Praha, 2024.

5.2. Články, publikace a akademické práce

- [27] ELIGEHAUSEN, Rolf a SAWADE, Gottfried. A fracture mechanics based description of the pull-out behavior of headed studs embedded in concrete. *Fracture mechanics of concrete structures*, 1989, s. 281–299.
- [28] CANNON, Robert W.; BURDETTE, Edwin G.; FUNK, Raymond R. Anchorage to concrete. *Tennessee Valley Authority, Division of Engineering Design, Thermal Power Engineering*, 1975.
- [29] ELIGEHAUSEN, Rolf a OŽBOLT, J. *Size effect in anchorage behavior*, 1990, s. 721–727.
- [30] BAŽANT, Zdeněk a PLANAS, Jaime. Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials. 1. *CRC Press*, 1992.
- [31] ELIGEHAUSEN, Rolf; BOUŠKA, P.; ČERVENKA, V. a PUKL, R. Size effect of the concrete cone failure load of anchor bolts. *Fracture Mechanics of Concrete Structures (FRAMCOS 1)*, 1992, s. 517–525.
- [32] RICHARD, P. a CHEYREZY, M. Composition of reactive powder concretes. *Cement and Concrete Research*, vol. 25, 1995, s. 1501–1511.
- [33] PASCHALIS, S. A. a LAMPROPOULOS, A. P. Size effect on the flexural performance of ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPC). *HPFRCC-7*, 2015, s. 177–184.
Dostupné z: <https://doi.org/10.51202/9783816793977-177>. [citováno 2023-11-09].
- [34] SHI, C.; WU, Z.; XIAO, J.; WANG, D; HUANG, Z. a FANG, Z. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. *Construction and Building Materials*, vol. 101, 2015, s. 741–751.
- [35] AÏTCIN, Pierre-Claude. *Vysokohodnotný beton*. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2005.
- [36] RUSSELL, Henry G.; VOLZ, Jeffery S. a BRUCE, Robert N. Applications and Limitations of High-Strength Concrete in Prestressed Bridge Girders. *Fourth International Bridge Engineering Conference*, 1995, s. 169–180.
- [37] VYDRA, Vítězslav. *Lomové charakteristiky betonu vystaveného působení vysokých teplot*. Habilitační práce, České vysoké učení technické v Praze, 2005.
- [38] UCK, Jonathan J.; MCDOWELL, David L. a ZHOU, Min. Effect of microstructure on load-carrying and energy-dissipation capacities of UHPC. *Cement and Concrete Research*, vol. 43, 2013, s. 34–50.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.10.006>. [citováno 2022-01-10].
- [39] DE LARRARD, F. a SEDRAN, T. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model. *Cement and Concrete Research*, vol. 26, no. 6, 1994, 997–1009.
Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(94\)90022-1](https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)90022-1). [citováno 2023-06-12].

- [40] GRAYBEAL, B.; CRANE, C.; PERRY, V.; CORVEZ, D. a AHLBORN, T. Advancing ultra-high performance concrete. *Concrete International*, vol. 41, no. 4, 2019, s. 41–45.
Dostupné z: <https://digitalcommons.mtu.edu/michigantech-p/1>. [citováno 2022-01-10].
- [41] LINGNER, R. E. Tensile Capacity of Short Anchor Bolts and Welded Studs: A Literature Review. *ACI Journal Proceedings*, vol. 79, no. 4, 1982, s. 270–279.
Dostupné z: <https://doi.org/10.14359/10897>. [citováno 2023-08-14].
- [42] ELIGEHAUSEN, Rolf; MALLÉE, Rainer a SILVA, John F. *Anchorage in Concrete Construction*. Wilhelm Ernst & Sohn Verlag fur Architektur und Technische, 2013.
- [43] STOCKER, Florian; ZEMAN, Oliver; SCHWENN, Michael a BERGMEISTER, Konrad. Load transfer mechanism of concrete screws. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, 2022, s. 578–584.
Dostupné z: <https://doi.org/10.14311/APP.2022.33.0578>. [citováno 2023-06-12].
- [44] FUCHS, Werner; ELIGEHAUSEN, Rolf a BREEN, John E. Concrete Capacity Design (CCD) Approach for Fastening to Concrete. *ACI Structural Journal*, vol. 92, no. 1, 1995, s. 73–94.
Dostupné z: <https://doi.org/10.14359/1533>. [citováno 2023-06-12].
- [45] FURCHE, J. *Zum Trag-und Verschiebungsverhalten von Kopfbolzen bei zentrischem Zug*. Disertace, University of Stuttgart, 1994.
- [46] DI NUNZIO, G. A Literature Review about the head-size effect on the capacity of cast-in anchors. *Proceedings of the 10th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*. IA-FraMCoS, 2019.
Dostupné z: <https://doi.org/10.21012/FC10.239783>. [citováno 2022-12-10].
- [47] NILFOROUSH, Rasoul; NILSSON, Martin a ELFGREN, Lennart. Experimental Evaluation of Influence of Member Thickness, Anchor-Head Size, and Orthogonal Surface Reinforcement on the Tensile Capacity of Headed Anchors in Uncracked Concrete. *Journal of Structural Engineering*, vol. 44, no. 4, 2018.
Dostupné z: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001976](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001976). [citováno 2022-12-10].
- [48] MAHREHOLTZ, Philipp; ELIGEHAUSEN, Rolf; HUTCHINSON, Tara C. a HOEHLER; Matthew S. Behavior of Post-Installed Anchors Tested by Stepwise Increasing Cyclic Load Protocols. *ACI Structural Journal*, vol. 113, no. 5, 2016, s. 997–1008.
Dostupné z: <https://doi.org/10.14359/51689023>. [citováno 2023-02-08].
- [49] PICCININ, R.; BALLARINI, R. a CATTANEO, S. Linear Elastic Fracture Mechanics Pullout Analyses of Headed Anchors in Stressed Concrete. *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 136, no. 6, 2010, s. 761–768.
Dostupné z: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0000120](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000120). [citováno 2023-02-08].

- [50] PICCININ, Roberto. *Effects of Compressive and Tensile Fields On the Load Carrying Capacity of Headed Anchors*. Disertace, Faculty of the Graduate School of the University of Minnesota, 2011.
- [51] PICCININ, Roberto; CATTANEO, Sara a BIOLZI, Luigi. Breakout Capacity of Headed Anchors in Confined Concrete: Experimental Evidence. *ACI Structural Journal*, vol. 110, no. 3, 2013, s. 469–480.
Dostupné z: <https://doi.org/10.14359/51685604>. [citováno 2023-08-14].
- [52] KLUG, Yvette; HOLSCHEMACHER, Klaus a WITTMANN, Falk. Tragverhalten von Befestigungselementen in Stahlfaserbeton. *Faserbeton: Innovationen im Bauwesen Beiträge aus Praxis und Wissenschaft*, 2002, s. 89–105.
- [53] HOLSCHEMACHER, Klaus; KLUG, Yvette a WITTMANN, Falk. Experimental Investigations on Fastening in Steel Fibre reinforced Concrete. *LACER - Leipzig Annual Civil Engineering Report*, 2002, s. 145–158.
- [54] GETTU, R.; GARDNER, D. R.; SALDÍVAR, H. a BARRAGÁN, B. E. Study of the distribution and orientation of fibers in SFRC specimens. *Materials and Structures*, 2005, s. 31–37.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/BF02480572>. [citováno 2023-08-14].
- [55] RYDVAL, Milan. *Technologie a vlastnosti UHPC*. Disertace, Kloknerův ústav, České vysoké učení technické v Praze, 2019.
- [56] KURZ, Carolin; THIELE, Catherina; SCHNELL, Jürgen; REUTER, Martin a VITT, Gerhard. Tragverhalten von Dübeln in Stahlfaserbeton. *Bautechnik*, vol. 89, no. 8, 2012, s. 545–552.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/bate.201200018>. [citováno 2023-02-08].
- [57] GRZESIAK, Szymon; PAHN, Matthias; SCHULTZ-CORNELIUS, Milan a BIES, Nora Susanne. Influence of Different Fiber Dosages on the Behaviour of Façade Anchors in High-Performance Concrete. *CivilEng*, 2021, s. 556–579.
Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/civileng2030031>. [citováno 2023-02-08].
- [58] LI, Fuhai; TANG, Huiqi; WEN, Tao; LI, Jiyun; CHEN, Zhao et al. Pullout behavior of studs in ultra-high performance concrete with steel fibers and novel structural fibers. *Structures*, vol. 44, 2022, s. 405–417.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.08.017>. [citováno 2022-12-10].
- [59] MAREK, Jan. Testing Of Shear Connectors for UHPC Slabs. *PhD Workshop, Department of Concrete and Masonry Structures*, 2017.
- [60] TÓTH, Máté; BOKOR, Boglárka a SHARMA, Akanshu. Anchorage in steel fiber reinforced concrete – concept, experimental evidence and design recommendations for concrete cone and concrete edge breakout failure modes. *Engineering Structures*, vol. 181, 2019, s. 60–75.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.12.007>. [citováno 2022-12-10].

- [61] KARMOKAR, Trijon; MOHYEDDIN, Alireza; LEE, Jessey a PARASKEVA, Thelma. Concrete cone failure of single cast-in anchors under tensile loading – A literature review. *Engineering Structures*, vol. 243, 2021.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112615>. [citováno 2022-12-10].
- [62] PRIMAVERA, Eric J.; PINELLI, J. a KALAJIAN, E. H. Tensile Behavior of Cast-in-Place and Undercut Anchors in High-Strength Concrete. *ACI Structural Journal*, vol. 94, no. 5, 1997, s. 583–594.
Dostupné z: <https://doi.org/10.14359/507>. [citováno 2023-02-08].
- [63] NILFOROUSH, Rasoul. *Anchorage in Concrete Structures*. Disertace, Luleå University of Technology, 2017.
- [64] NILFOROUSH, Rasoul; NILSSON, Martin a ELFGREN, Lennart. Experimental evaluation of tensile behaviour of single cast-in-place anchor bolts in plain and steel fibre-reinforced normal- and high-strength concrete. *Engineering Structures*, vol. 147, 2017, s. 195–206.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.05.062>. [citováno 2023-06-12]
- [65] DARWIN, David. Fracture Energy of High-Strength Concrete. *ACI Materials Journal*, vol 98, no. 5, 2001, s. 410–417.
Dostupné z: <https://doi.org/10.14359/10731>. [citováno 2023-06-12].
- [66] CHOI, Sokhwan; JOH, Changbin a CHUN, Sung-Chul. Behavior and strengths of single cast-in anchors in Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPC) subjected to a monotonic tension or shear. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2015, s. 964–973.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s12205-013-0246-8>. [citováno 2023-02-08].
- [67] AFROUGHSABET, Vahid; BIOLZI, Luigi a OZBAKKALOGLU, Togay. High-performance fiber-reinforced concrete: a review. *Journal of Materials Science*, 2016, s. 6517–6551.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10853-016-9917-4>. [citováno 2022-12-10].
- [68] HANSEN, Ernst; HANSEN, Einar; HASSANZADEH, Manouchehr; STANG, Henrik. *Determination of the Fracture Energy of Concrete: A Comparison of the Three-Point Bend Test on Notched Beam and the Wedge-Splitting Test*. SP Report, Swedish National Testing and Research Institute, 1998.
- [69] MÁČA, Petr; SOVJÁK, Radoslav a VAVŘINÍK, Tomáš. Experimental Investigation of Mechanical Properties of UHPC. *Procedia Engineering*, vol. 65, 2013, s. 14–19.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.004>. [citováno 2023-08-14].
- [70] JUHÁSZ, Károly Péter. Modified fracture energy method for fibre reinforced concrete. *Fibre concrete*, 2013.
- [71] LI, Fuhai; GAO, Hao; JIANG, Yilin; WEN, Tao; ZHAN, Yulin et al. Tensile behavior of stud connectors in high strength concrete. *Advances in Structural Engineering*, vol. 24, no. 16, 2021, s. 3677–3690.

- Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/13694332211029731>. [citováno 2023-02-08].
- [72] LU, Kaiwei; XU, Qizhi; WANG, Mingdong; YAO, Yiming a WANG, Jingquan. Anchorage performance of bolt connection embedded in thin UHPC members. *Structures*, vol. 34, 2021, s. 1253–1260.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.08.060>. [citováno 2023-08-14].
- [73] CLASSEN, Martin; HERBRAND, Martin; STARK, Alexander a HEGGER, Josef. Small scaled shear connectors in HSC/UHPC. *First International Interactive Symposium on UHPC*, 2016.
Dostupné z: <https://doi.org/10.21838/uhpc.2016.16>. [citováno 2022-12-10].
- [74] KRUSZEWSKI, Dominic. *Performance Evaluation of Shear Connectors Embedded in Ultra-High Performance Concrete as Part of a Bridge Repair Method*._Dissertace, University of Connecticut – Storrs, 2018.
- [75] KIM, Jee Sang; PARK, Sang Hyeok; JOH, Chang Bin; KWARK, Jong D. K. a CHOI, Eun Suk. Push-Out Test on Shear Connectors Embedded in UHPC. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, s. 50–54.
Dostupné z: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.351-352.50>. [citováno 2022-12-10].
- [76] SHARMA, A. Fracture behaviour of ultra-high performance concrete. *Proceedings of the 10th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, 2019.
Dostupné z: <https://doi.org/10.21012/FC10.235532>. [citováno 2023-11-18].
- [77] YANG, Wei; ZHENG, Shan-Suo; ZHANG, De-Yi; SUN, Long-Fei a GAN Chuan-Li. Seismic behaviors of squat reinforced concrete shear walls under freeze-thaw cycles: A pilot experimental study. *Engineering Structures*, vol. 124, 2016, s. 49–63.
Dostupné z: doi:10.1016/j.engstruct.2016.06.013
- [78] DE LARRARD, François a SEDRAN, Thierry. Mixture-proportioning of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, vol. 32, no. 11, 2002, s. 1699–1704.
- [79] FEHLING, Ekkehard; BUNJE, Kai a LEUTBECHER, Torsten. Design relevant properties of hardened ultra high performance concrete. *Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, 2004.
- [80] GRAYBEAL, Benjamin A. a HARTMAN, J. L. Ultra-high performance concrete material properties. *Conference: Transportation Research Board*, 2003, s. 1–8.
- [81] RICHARD, Pierre a CHEYREZY, Marcel. Composition of reactive powder concretes. *Cement and Concrete Research*, vol. 25, no. 7, 1995, s. 1501–1511.
- [82] WANG, Chong; YANG, Changhui; LIU, Fang; WAN, Chaojun a PU, Xincheng. Preparation of Ultra-High Performance Concrete with common technology and materials. *Cement and Concrete Composites*, vol. 34, no. 4, 2012, 538–544.

- [83] QIAN, C.X. a STROEVEN, P. Development of hybrid polypropylene-steel fibre-reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, vol. 30, no. 1, 2000, s. 63–69.
- [84] LE, An Hoang. Evaluation of the Splitting Tensile Strength of Ultra-High Performance Concrete. *Fibre Reinforced Concrete: Improvements and Innovations*, 2021, s. 1149–1160.
Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-3-030-58482-5_101. [citováno 2023-11-27].
- [85] KUSUMAWARDANINGSIH, Yuliarti; FEHLING, Ekkehard; ISMAIL, Mohammed a ABOUBAKR, Attitou Amen Mohamed. Tensile Strength Behavior of UHPC and UHPFRC. *Procedia Engineering*, vol. 125, 2015, s. 1081–1086.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.166>. [citováno 2023-06-24].
- [86] PŘÍBRAMSKÝ, Vladimír. *Fenomén reologie UHPC*. Disertace, České vysoké učení technické v Praze, 2022.
- [87] SHEHAB EL-DIN, Hamdy K.; MOHAMED, Heba A.; KHATER, Mahmoud Abd El-Hak a AHMED, Sayed. Effect of Steel Fibers on Behavior of Ultra High Performance Concrete. *First International Interactive Symposium on UHPC*, 2016
Dostupné z: <https://doi.org/10.21838/uhpc.2016.11>. [citováno 2023-04-14]
- [88] HOLÝ, Milan. *Optimalizace kompozitních mostních konstrukcí ze dřeva a UHPC*. Disertace, Kloknerův ústav, České vysoké učení technické v Praze, 2020.
- [89] ČÍTEK, David. *Experimentální analýza soudržnosti UHPC a výztuže*. Disertace, Kloknerův ústav, České vysoké učení technické v Praze, 2021.

5.3. Další zdroje

- [90] *HALFEN FPA-SL30 SYSTEM: Zulassung Z-21.8-2067*. Online. In: HALFEN. Dostupné z: https://downloads.halfen.com/catalogues/de/media/approvals/precast-systems/Z_FPA-SL30_Leviat_12-18.pdf. [cit. 2022-01-11].
- [91] *JENKA Lifting System: Technical Manual*. Peikko Group, 2016.
- [92] *Ztracené bednění*. KŠ PREFA s.r.o. Dostupné z: <https://ksprefa.cz/produkty/uhpc/ztracene-bedneni/>. [cit. 2024-03-11].
- [93] *Přepravní kotvy závitového systému*. Online. KONTAKT SK. Dostupné z: <https://www.kontakt-sk.com/cz/zavitovy-system>. [cit. 2024-03-12]

5.4. Vlastní zdroje vztahující se k této práci

- [94] PRCHAL, Jan. Kotevní oblasti v konstrukcích z materiálu UHPFRC a experimentální zjištění únosnosti. *Proceedings of PhD Workshop, Department of Concrete and Masonry Structures*, 2021, s. 185–190.
- [95] PRCHAL, Jan a VRÁBLÍK, Lukáš. Experimentální výzkum vlastností kotevních prostředků zabudovaných v UHPFRC. *29. Konference betonářské dny (2023) - sborník ke konferenci*, 2023, s. 182–197.
- [96] PRCHAL, Jan a VRÁBLÍK, Lukáš. Experimental Study of Cast in Anchors Embedded in UHPFRC. *Key Engineering Materials*, 2024, s. 79–91.
Dostupné z: <https://doi.org/10.4028/p-r6h4W7>. [cit. 2024-03-23].
- [97] PRCHAL, Jan a MAREK, Jan. Nové konstrukční prvky z UHPC v praxi. *28. Konference betonářské dny (2022) - sborník ke konferenci*, 2022, s. 100–110.
- [98] MAREK, Jan a PRCHAL, Jan. Výroba segmentů lávky Holešovice Karlín. *28. Mezinárodní sympozium MOSTY/BRIDGES*, 2023, s. 277–282.
- [99] MAREK, Jan a PRCHAL, Jan. Materiál UHPC. *INTRO*, č. 22, 2023, s. 44–48.
- [100] PRCHAL, Jan. Online. *UHPC MAP*. 2022.
Dostupné z: https://www.google.com/maps/d/u/0/edit?mid=1Vxn0_Ymf3WGg-bYM7cXCO3buPOz7ZQEd1&ll=49.7623658764992%2C14.815905359518968&z=8. [cit. 2024-02-13].
- [101] MAREK, Jan; PRCHAL, Jan; KOLISKO, Jiří; ČÍTEK, David; TEJ Petr et al. Implementation and Testing of Short Span Footbridge System Made of UHPC. *Solid State Phenomena*, 2021, s. 176–184.
Dostupné z: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.322.176>. [citováno 2024-02-13].
- [102] MAREK, Jan, Jan PRCHAL, Jiří KOLISKO, David ČÍTEK, Petr TEJ et al. Realizace a zkoušení lávek malého rozpětí z UHPC. In: *Sborník ke konferenci 27. Betonářské dny*, 2020, s. 186–195.

Seznam souvisejících projektů

- [103] Lícni prefabrikát pro mostní římsy z vysokohodnotného betonu", reg. č. CZ.01.1.02/0.0/0.0/16_045/0010595 v Operačním programu *Podnikání a inovace pro konkurenceschopnost*, 2014-2020, prioritní osa PO-1 "Rozvoj výzkumu a vývoje pro inovace", příjemce KŠ PREFA s.r.o. Doba řešení 26. 7. 2017 až 8. 12. 2017.
- [104] Studentská grantová soutěž ČVUT č. SGS22/038/OHK1/1T/11 *Lokální napjatost a stabilita prvků z cementových kompozitů*. 2022.
- [105] Studentská grantová soutěž ČVUT č. SGS23/039/OHK1/1T/11 *Analýza štíhlých prvků z cementových kompozitů a oblastí s vysokou koncentrací napětí*. 2023.
- [106] TAČR TH02020373 v rámci 2. veřejné soutěže v programu EPSILON, *Zvýšení životnosti a urychlení výstavby infrastrukturních dopravních staveb využitím moderního vysokohodnotného materiálu UHPC*. Hlavní účastník KŠ PREFA s.r.o. Doba řešení 1. 1. 2017 až 31. 12. 2020.

Seznam ilustrací

Obr. 1 Detail tranzitní zóny mezi kamenivem a cementovou pastou v UHPC (vlevo) a srovnání s běžným betonem (vpravo) [34].....	17
Obr. 2 Vazba mezi maticí a ocelovým vláknem na mikroúrovni [79].....	17
Obr. 3 Pracovní diagram UHPC v tlaku bez výztužných vláken, upraveno dle [79].....	19
Obr. 4 Pracovní diagram UHPFRC v tlaku, dávka vláken 1,0 až 2,5 %, upraveno dle [79].....	20
Obr. 5 Součinitel β_{cct} v čase podle Richtlinie UHPC [20] a podle ČSN EN 1992-1-1 [4].....	21
Obr. 6 Mechanika výztužných vláken v matici (postup aktivace) [70].....	21
Obr. 7 Pracovní diagramy zkoušky pevnosti UHPFRC v tahu za ohybu, upraveno dle [79].....	22
Obr. 8 Porovnání materiálových parametrů běžného betonu (NC), drátkobetonu (FRC), vysokohodnotného betonu (HPC) a UHPC s ocelovými vlákny, upraveno dle [69].....	24
Obr. 9 Vyčnívající ocelová vlákna po destrukci nosníku z UHPFRC.....	25
Obr. 10 Detail výztužných mikrovláken procházejících přes trhlinu při zkoušce trámce v tahu za ohybu [99].....	25
Obr. 11 Příklady předem (vlevo) a dodatečné (vpravo) instalovaných kotevních prostředků [48] 27	
Obr. 12 Znárodnění mechanismu porušení expanzní kotvy odvozené z numerické analýzy [42] 29	
Obr. 13 Rozdělení napětí pro případ šířící se trhliny [42].....	29
Obr. 14 Tvar vytrženého kuželu podle modelu 45° [63].....	30
Obr. 15 Zkušební sestava a způsob měření přetvoření na vzorcích kotvení dle Eligehausena a Sawade [27].....	31
Obr. 16 Tvar a idealizovaná plocha vytrženého kuželu podle CCD [63].....	32
Obr. 17 Porovnání modelů pro predikci únosnosti betonového kuželu, závislost zatížení na efektivní hloubce.....	33
Obr. 18 Znárodnění porušeného betonového kuželu pro různé velikosti hlavy kotvy [46].....	33
Obr. 19 Závislost únosnosti na hloubce h_{ef} – srovnání modelu CCD s numerickou analýzou kotev s malou hlavou dle [47], a) h_{ef} do 200 mm, b) h_{ef} do 500 mm.....	35
Obr. 20 Schéma sestavy při zkoušce kotvení v HSC dle [71].....	36
Obr. 21 Rozložení ocelových vláken v FRC podél lomové plochy betonového kuželu (dodatečné kotvení) [52].....	37
Obr. 22 Rozsah stěnového efektu v FRC dle [60].....	37
Obr. 23 Kotevní prostředky testované v rámci studie [57], převzato z [90].....	38
Obr. 24 Schéma zkoušky při ověřování kotev zabetonovaných v NC, HPC, FRC a HPFRC, Nilforoush a kol. [64].....	38
Obr. 25 Princip zatěžování vzorků při tahové zkoušce kotevní v UHPFRC dle studie Choie [66] 39	
Obr. 26 Uspořádání zkoušek při stanovení únosnosti kotvení v UHPFRC dle Li [58].....	40
Obr. 27 Závislost únosnosti na h_{ef} podle rovnic ve studiích [58], [66] a [72].....	41
Obr. 28 Typický prefabrikovaný segment Štvanické lávky a manipulační přípravky.....	43
Obr. 29 Deskové dílce ztraceného bednění po montáži mezi ocelové nosníky mostu [92].....	44
Obr. 30 Příklad kotevního prostředku – závitového pouzdra s doplňkovou výztuží, upraveno dle [91].....	44

Obr. 31 Zkušební deska při stanovení vlivu předpětí na únosnost předem zabudovaných kotev v běžném betonu [49].....	45
Obr. 32 Průběh trhliny na předpjaté konstrukci se zabudovanou kotvou jako funkce [49].....	45
Obr. 33 Kotevní prostředky – šrouby pro zkoušky kotvení v tenkých deskách z UHPC: a) Tergo M6, b) ISO 4017 M6, c) až e) DIN 7991 M6 až M10.....	50
Obr. 34 Pracovní diagram – stanovení pevnosti UHPFRC v tahu za ohybu a zbytkové pevnosti dle ČSN EN 14651 + A1 [9], trámce 100×100×400 mm.....	51
Obr. 35 Vývoj pevnosti HPFRC v čase, trámec 40×40×160 mm dle [10].....	52
Obr. 36 Zkušební vzorky z HPC s jedním zabudovaným kotevním šroubem	53
Obr. 37 Únosnost atypických kotevních šroubů M6 Tergo a 6HR, prostý tah, stáří 14 dní	54
Obr. 38 Únosnosti kotevních šroubů M6 a M8, prostý tah, stáří 1 a 7 dní	55
Obr. 39 Definice obecného komolého kuželu z rovnice (3.1)	55
Obr. 40 Graf závislosti únosnosti betonového kuželu na kotevní hloubce se zohledněním velikosti hlavy kotevního přípravku dle rovnic (2.9), (3.1) a (3.2), stáří 1 den (vlevo), stáří 7 dní (vpravo)	57
Obr. 41 Závislost únosnosti betonového kuželu na kotevní hloubce do 90 mm se zohledněním velikosti hlavy kotevního přípravku dle rovnic (2.9), (3.1) a (3.2), stáří 1 den	58
Obr. 42 Porovnání měření a predikce únosnosti betonového kuželu se zohledněním rozměru hlavy šroubu dle (2.9), (3.1) a (3.2)	58
Obr. 43 Schéma zkušební vzorku z HPC s PVA vlákny s dvojicí kotevních šroubů	59
Obr. 44 Schéma sestavy pro zkoušku dvojice tažených kotev v desce z HPC s PVA vlákny	60
Obr. 45 Tvar vytrženého betonového kuželu u vzorků z HPFRC	60
Obr. 46 Dosah betonového kuželu u HPFRC	61
Obr. 47 Průměrná únosnost dvojice tažených kotev v HPFRC.....	61
Obr. 48 Schéma sestavy pro zkoušku smyku s jedním kotevním šroubem v HPFRC.....	62
Obr. 49 Průměrná smyková únosnost jednotlivých kotev.....	63
Obr. 50 Princip porušování kotvení s jedním šroubem při smykovém namáhání	64
Obr. 51 Pracovní diagramy vybraných vzorků kotvení ve smyku, jeden šroub.....	64
Obr. 52 Schéma sestavy pro zkoušku kotvení ve smyku s dvojicí kotevních šroubů	64
Obr. 53 Vzorek s dvojicí kotev před a po zkoušce smykové únosnosti.....	65
Obr. 54 Porušení vzorku po zkoušce smykové únosnosti dvojice kotev	65
Obr. 55 Smyková únosnost jednotlivých kotev (J) a dvojice kotev (D), tloušťka desky 20 mm	66
Obr. 56 Schéma sestavy pro zkoušku kombinovaného zatížení dvojice kotev v desce z HPC s PVA vlákny.....	67
Obr. 57 Způsob zatěžování vzorků při zkoušce kotevních oblastí kombinací tahu a smyku	68
Obr. 58 Průměrná únosnost dvojice kotev v HPFRC při kombinovaném namáhání, $\beta = 60^\circ$	69
Obr. 59 Vliv sklonu působícího zatížení β na únosnost dvojice kotev pro různé tloušťky desky a průměry kotev, stáří 1 den.....	69
Obr. 60 Interakční diagram kotvení namáhaného kombinací normálové a smykové síly pro různé exponenty α podle rovnice (3.4).....	71
Obr. 61 Únosnost betonového kuželu v závislosti na h_{ef} a d_h dle rovnice (3.2), HPFRC.....	72
Obr. 62 Umístění kotvy na dně formy (F) a v horním povrchu (H).....	77

Obr. 63 Výroba první série vzorků z UHPFRC ($v_f = 1,5 \%$).....	77
Obr. 64 Pracovní diagram – stanovení pevnosti UHPFRC v tahu za ohybu a zbytkové pevnosti dle ČSN EN 14651 + A1 [9], stáří 3 dny, trámce 100×100×400 mm	79
Obr. 65 Rozložení ocelových vláken v trámcích 100×100×400 mm po zkoušce v tahu za ohybu 79	
Obr. 66 Nárůst pevnosti UHPFRC v čase, trámce 40×40×160 mm, průměrné hodnoty	80
Obr. 67 Uspořádání zkoušky kotvení v UHPFRC (navrhované a finální).....	81
Obr. 68 Průběh zatěžování v čase pro úvodní část zkoušky kotvení – cyklování.....	81
Obr. 69 Určení rozměrů vytrženého betonového kuželu	85
Obr. 70 Pracovní diagramy kotevních oblastí, průměrné hodnoty	86
Obr. 71 Poloha Δu a Δy při stanovení indexu tažnosti [77].....	87
Obr. 72 Úhel roznosu zatížení α a vztah k hloubce zapuštění kotvy h_{ef}	89
Obr. 73 Závislost únosnosti na poměru efektivní hloubky a dosahu kuželu (h_{ef}/l_m)	90
Obr. 74 Závislost únosnosti kotvení na hloubce h_{ef}	91
Obr. 75 Graf závislosti tuhosti $K_{0,3,m}$ na hloubce zapuštění kotvy h_{ef}	91
Obr. 76 Graf závislosti tažnosti μ_m na hloubce zapuštění kotvy h_{ef}	92
Obr. 77 Závislost únosnosti F_u kotvení na velikosti úhlu roznosu α	93
Obr. 78 Porovnání průměrné únosnosti ve vztahu k v_f a h_{ef}	93
Obr. 79 Pracovní diagramy kotevních oblastí podle h_{ef}	94
Obr. 80 Graf závislosti tuhosti $K_{0,3,m}$ na stupni vyztužení UHPFRC v_f	96
Obr. 81 Graf závislosti duktility μ_m na stupni vyztužení UHPFRC v_f	96
Obr. 82 Srovnání tvaru porušení vzorků od dna formy (F) a z hlazeného povrchu (H)	97
Obr. 83 Tvar vytrženého kuželu vzorku s kotvou v povrchu (F).....	97
Obr. 84 Tvar vytrženého kuželu vzorku s kotvou v povrchu (H)	98
Obr. 85 Dosah betonového kuželu v závislosti na únosnosti	98
Obr. 86 Graf závislosti mezi kotevní hloubkou a velikostí vytrženého kuželu	99
Obr. 87 Nárůst únosnosti při zvětšující se vzdálenosti kotvy od stěny/dna formy	100
Obr. 88 Orientační schéma rozmístění rozptýlené výztuže v blízkosti povrchů (F) a (H)	100
Obr. 89 Porovnání experimentálně zjištěných dat se vztahy pro určení únosnosti betonového kuželu	103
Obr. 90 Velikost součinitele k_F po výšce zkušebního tělesa.....	105
Obr. 91 Nahoře: závislost únosnosti kotvení na hloubce zabudování kotvy h_{ef} se zohledněním povrchu betonu dle rovnice (3.16). Dole: závislost koeficientu k_F zohledňující orientaci vláken na hloubce kotvy h_{ef} , pro série s 2,0 %, respektive s 2,5 % drátků.....	106
Obr. 92 Porovnání měření a predikce únosnosti betonového kuželu se zohledněním polohy kotvy vzhledem k povrchům konstrukčního prvku dle vztahu (3.16).....	107
Obr. 93 Provedení nosníků z UHPFRC v příčném řezu	110
Obr. 94 Vybrané okraje nosníku pro zkoušky kotevních oblastí.....	110
Obr. 95 Kotevní přípravky: X – plochá kotva (vpravo); Y – čtveřice kotev (vlevo)	111
Obr. 96 Kotevní přípravky v nosnících z UHPC s doplňkovým vyztužením dle výrobce, použito z [93].....	112

Obr. 97 Označení zkoušek a kotevních přípravků v rámci příčného řezu zkušebních nosníků (1:10)	114
Obr. 98 Výroba vzorků pro zkoušky kotevních prostředků v nosnících z UHPFRC: a) přípravek X instalovaný ve formě před betonáží, b) celkový pohled na formu před betonáží, c) přípravek Y kotvený ke stěně formy, d) zkušební nosník po betonáží	115
Obr. 99 Ocelové přípravky pro přenos zkušebního zatížení pro jednotlivé typy kotvení	116
Obr. 100 Uspořádání zkoušek a způsob vnášení zatížení pro vybrané kotevní oblasti.....	117
Obr. 101 Porovnání únosnosti kotevních oblastí	119
Obr. 102 Pracovní diagramy kotvení v nosnících s provedením okraje I a I'	120
Obr. 103 Pracovní diagramy kotvení v nosníku s provedením okraje II	120
Obr. 104 Pracovní diagramy kotvení v nosníku s provedením okraje III	121
Obr. 105 Vztah mezi výškou betonového prvku a únosností kotevní oblasti	122
Obr. 106 Pracovní diagramy kotevních oblastí v prvcích s rozdílnou výškou.....	123
Obr. 107 Porušení kotevní oblasti I-X nosníku	124
Obr. 108 Hybridní kotevní přípravek „Y“ využitý při manipulaci s dílcem	125
Obr. 109 Hybridní přípravek „Y“ využitý pro kotvení	125

Seznam tabulek

Tab. 1 Příklad složení směsí běžného, vysokohodnotného a ultra-vysokohodnotného betonu ...	16
Tab. 2 Srovnání vybraných vlastností betonu běžného (NC), vysokohodnotného (HPC) a ultra vysokohodnotného (UHPC) [99]	19
Tab. 3 Srovnání lomové energie a tahové pevnosti měřených na odlišných tělesech [85]	22
Tab. 4 Módy porušení kotevních oblastí	28
Tab. 5 Přehled experimentálních studií kotevních prostředků v UHPFRC.....	41
Tab. 6 Přehled rovnic pro určení únosnosti betonového kuželu vč. modifikací modelu CCD.....	47
Tab. 7 Mechanické parametry HPC s PVA vlákny.....	51
Tab. 8 Přehled a značení zkušebních vzorků kotvení s variací šroubů, prostý tah, jedna kotva..	53
Tab. 9 Přehled výsledků zkoušek kotvení v tenkých deskách, jedna kotva, prostý tah	54
Tab. 10 Porovnání únosnosti kotvení podle provedení hlavy šroubu.....	54
Tab. 11 Porovnání výsledků zkoušek s modely predikce únosnosti zohledňujícími rozměr hlavy kotvy	56
Tab. 12 Souhrn výsledků tahových zkoušek dvojice kotev v desce z HPC s PVA vlákny	61
Tab. 13 Souhrn výsledků zkoušek smykového namáhání jedné kotvy v desce z HPFRC	63
Tab. 14 Souhrn výsledků zkoušek smykového namáhání dvojice kotev v deskách z HPFRC	65
Tab. 15 Souhrn výsledků zkoušek kombinovaného namáhání dvojice kotev v desce z HPFRC .	68
Tab. 16 Složení UHPC pro zkoušky kotevních oblastí	75
Tab. 17 Přehled zkušebních vzorků pro zkoušky kotevních oblastí.....	76
Tab. 18 Mechanické parametry UHPFRC, průměrné hodnoty.....	78
Tab. 19 Souhrn výsledků tahových zkoušek kotevních oblastí v UHPFRC	82
Tab. 20 Tvar porušení vzorků, porovnání sérií (v_f) a hloubky (h_{ef}), pro každý typ jeden zástupce	83
Tab. 21 Rozměry betonového kuželu porušených vzorků.....	84
Tab. 22 Tuhost a index tažnosti kotevních oblastí.....	87
Tab. 23 Úhel roznosu zatížení dle kotevní hloubky h_{ef} a stupně vyztužení v_f	89
Tab. 24 Porovnání únosností vzorků dle h_{ef}	90
Tab. 25 Porovnání únosností jednotlivých sérií (v_f), pouze kotvy u povrchu od formy (F).....	94
Tab. 26 Nárůst mechanických veličin UHPFRC mezi sériemi v_f	95
Tab. 27 Porovnání tuhosti $K_{0,3,m}$ kotevních oblastí mezi sériemi (v_f), kotvy u povrchu (F).....	95
Tab. 28 Porovnání indexu ductility μ kotevních oblastí mezi sériemi (v_f), kotvy u povrchu (F)	96
Tab. 29 Přehled zkušebních kotevních oblastí	112
Tab. 30 Složení UHPFRC pro zkoušky kotvení v nosnících	113
Tab. 31 Mechanické parametry UHPFRC použitého pro nosníky.....	113
Tab. 32 Přehled výsledků zkoušek kotevních oblastí v nosnících.....	118
Tab. 33 Způsob porušení kotevních oblastí v nosnících	118
Tab. 34 Únosnost F_{um} a tuhost $K_{0,3m}$ kotvení při změně výšky konstrukce	122

Tab. 35 Návrhová únosnost kotevních oblastí v nosnících z UHPFRC 124

Seznam příloh

Seznam příloh	146
A. Zkoušky kotvení v tenkých deskách z HPFRC	147
A.1. Souhrn naměřených výsledků.....	147
A.1.1. Prostý tah, jedna kotva.....	147
A.1.2. Prostý tah, dvojice kotev	149
A.1.3. Smyk, jedna kotva.....	151
A.1.4. Smyk, dvojice kotev	152
A.1.5. Kombinované namáhání (N+V), dvojice kotev	154
A.2. Pracovní diagramy.....	156
A.2.1. Prostý tah, jedna kotva.....	156
A.2.2. Prostý tah, dvojice kotev	158
A.2.3. Smyk, jedna kotva.....	160
A.2.4. Smyk, dvojice kotev	162
A.2.5. Kombinované namáhání (N+V), dvojice kotev	165
B. Výsledky tahových zkoušek kotvení v UHPFRC.....	168
B.1. Zkoušky mechanických vlastností UHPFRC	168
B.2. Souhrn naměřených výsledků.....	170
B.3. Fotodokumentace porušených vzorků	172
B.4. Pracovní digramy.....	177
B.5. Výrobní dokumentace	180
C. Výsledky zkoušek kotvení v nosnících z UHPFRC	185
C.1. Fotodokumentace porušených vzorků	185
C.2. Výrobní dokumentace.....	188
D. Seznamy	192
D.1. Seznam ilustrací	192
D.2. Seznam tabulek.....	193

A. Zkoušky kotvení v tenkých deskách z HPFRC

A.1. Souhrn naměřených výsledků

V této části jsou dokumentovány únosnosti dosažené při statických zkouškách kotvení. Členěno shodně s hlavním textem.

A.1.1. Prostý tah, jedna kotva

Tab. A-1 Souhrn výsledků zkoušek kotvení v HPFRC, atypické, jedna kotva, prostý tah

typ vzorků ($t-d_s-h-i$)	stáří vzorku t [dny]	tloušťka vzorku h [mm]	průměr šroubu d_s [mm]	typ šroubu -	únosnost F_u [N]	datum zkoušky
TJ14-6-20-1	14	20	6	Tergo	2232,8	12.04.2017
TJ14-6-20-2	14	20	6	Tergo	1948,8	12.04.2017
TJ14-6-20-3	14	20	6	Tergo	2014,0	12.04.2017
TJ14-6-20-4	14	20	6	Tergo	2626,9	12.04.2017
TJ14-6-20-5	14	20	6	Tergo	2185,8	12.04.2017
TJ14-6-20-1	14	20	6	6HR	2159,6	12.04.2017
TJ14-6-20-2	14	20	6	6HR	2416,0	12.04.2017
TJ14-6-20-3	14	20	6	6HR	1827,2	12.04.2017
TJ14-6-20-4	14	20	6	6HR	2530,9	12.04.2017
TJ14-6-20-5	14	20	6	6HR	2327,0	12.04.2017
TJ14-6-10-1	14	10	6	Tergo	1074,3	12.04.2017
TJ14-6-10-2	14	10	6	Tergo	1193,7	12.04.2017
TJ14-6-10-3	14	10	6	Tergo	1210,4	12.04.2017
TJ14-6-10-4	14	10	6	Tergo	923,1	12.04.2017
TJ14-6-10-5	14	10	6	Tergo	974,3	12.04.2017
TJ14-6-10-1	14	10	6	6HR	768,6	12.04.2017
TJ14-6-10-2	14	10	6	6HR	847,1	12.04.2017
TJ14-6-10-3	14	10	6	6HR	588,3	12.04.2017
TJ14-6-10-4	14	10	6	6HR	988,8	12.04.2017
TJ14-6-10-5	14	10	6	6HR	1201,9	12.04.2017

Tab. A-2 Souhrn výsledků zkoušek kotvení v HPFRC, jedna kotva, prostý tah

typ vzorků ($t-d_s-h-i$)	stáří vzorku	tloušťka vzorku	průměr šroubu	únosnost	datum zkoušky
	t [dny]	h [mm]	d_s [mm]	F_u [N]	
TJ1-6-20-1	1	20	6	2357,8	03.05.2017
TJ1-6-20-2	1	20	6	2343,1	03.05.2017
TJ1-6-20-3	1	20	6	1836,4	03.05.2017
TJ1-6-20-4	1	20	6	2378,2	03.05.2017
TJ1-6-20-5	1	20	6	2638,3	03.05.2017
TJ1-8-20-1	1	20	8	2699,9	03.05.2017
TJ1-8-20-2	1	20	8	2508,6	03.05.2017
TJ1-8-20-3	1	20	8	2908,1	03.05.2017
TJ1-8-20-4	1	20	8	2769,4	03.05.2017
TJ1-8-20-5	1	20	8	2633,3	03.05.2017
TJ1-6-10-1	1	10	6	913,3	03.05.2017
TJ1-6-10-2	1	10	6	956,7	03.05.2017
TJ1-6-10-3	1	10	6	887,3	03.05.2017
TJ1-6-10-4	1	10	6	957,4	03.05.2017
TJ1-6-10-5	1	10	6	826,4	03.05.2017
TJ1-8-10-1	1	10	8	871,3	03.05.2017
TJ1-8-10-2	1	10	8	1031,7	03.05.2017
TJ1-8-10-3	1	10	8	1172,0	03.05.2017
TJ1-8-10-4	1	10	8	1067,5	03.05.2017
TJ1-8-10-5	1	10	8	982,7	03.05.2017
TJ7-6-20-1	7	20	6	3792,1	09.05.2017
TJ7-6-20-2	7	20	6	3363,2	09.05.2017
TJ7-6-20-3	7	20	6	3100,3	09.05.2017
TJ7-6-20-4	7	20	6	3371,6	09.05.2017
TJ7-6-20-5	7	20	6	4150,3	09.05.2017
TJ7-8-20-1	7	20	8	3727,0	09.05.2017
TJ7-8-20-2	7	20	8	4438,4	09.05.2017
TJ7-8-20-3	7	20	8	4312,2	09.05.2017
TJ7-8-20-4	7	20	8	3766,2	09.05.2017
TJ7-8-20-5	7	20	8	4298,2	09.05.2017
TJ7-6-10-1	7	10	6	1523,9	09.05.2017
TJ7-6-10-2	7	10	6	1513,3	09.05.2017
TJ7-6-10-3	7	10	6	1377,4	09.05.2017
TJ7-6-10-4	7	10	6	1387,2	09.05.2017
TJ7-6-10-5	7	10	6	1458,0	09.05.2017
TJ7-8-10-1	7	10	8	1706,1	09.05.2017
TJ7-8-10-2	7	10	8	1672,5	09.05.2017
TJ7-8-10-3	7	10	8	1402,6	09.05.2017
TJ7-8-10-4	7	10	8	1202,8	09.05.2017
TJ7-8-10-5	7	10	8	1598,9	09.05.2017

A.1.2. Prostý tah, dvojice kotev

Tab. A-3 Souhrn výsledků zkoušek kotvení v HPFRC, dvojice kotev, prostý tah

typ vzorků ($t-d_s-h-i$)	stáří vzorku t [dny]	tloušťka vzorku h [mm]	průměr šroubu d_s [mm]	únosnost F_u [N]	datum zkoušky
TD1-6-20-1	1	20	6	2545,8	18.10.2017
TD1-6-20-2	1	20	6	2400,1	18.10.2017
TD1-6-20-3	1	20	6	2494,7	18.10.2017
TD1-6-20-4	1	20	6	2048,2	18.10.2017
TD1-6-20-5	1	20	6	2117,6	18.10.2017
TD1-8-20-1	1	20	8	2834,7	18.10.2017
TD1-8-20-2	1	20	8	3102,5	18.10.2017
TD1-8-20-3	1	20	8	2602,7	18.10.2017
TD1-8-20-4	1	20	8	3476,1	18.10.2017
TD1-8-20-5	1	20	8	2705,7	18.10.2017
TD1-8-30-1	1	30	8	4008,8	18.10.2017
TD1-8-30-2	1	30	8	4831,7	18.10.2017
TD1-8-30-3	1	30	8	5496,9	18.10.2017
TD1-8-30-4	1	30	8	5166,7	18.10.2017
TD1-8-30-5	1	30	8	4379,6	18.10.2017
TD1-10-20-1	1	20	10	2037,7	18.10.2017
TD1-10-20-2	1	20	10	2684,7	18.10.2017
TD1-10-20-3	1	20	10	2471,6	18.10.2017
TD1-10-20-4	1	20	10	2473,0	18.10.2017
TD1-10-20-5	1	20	10	2339,1	18.10.2017
TD1-10-30-1	1	30	10	4420,2	18.10.2017
TD1-10-30-2	1	30	10	5892,3	18.10.2017
TD1-10-30-3	1	30	10	5197,6	18.10.2017
TD1-10-30-4	1	30	10	5260,0	18.10.2017
TD1-10-30-5	1	30	10	4684,5	18.10.2017
TD7-6-20-1	7	20	6	3588,4	25.10.2017
TD7-6-20-2	7	20	6	3990,0	25.10.2017
TD7-6-20-3	7	20	6	3597,5	25.10.2017
TD7-6-20-4	7	20	6	2916,1	25.10.2017
TD7-6-20-5	7	20	6	3440,5	25.10.2017
TD7-8-20-1	7	20	8	3465,0	25.10.2017
TD7-8-20-2	7	20	8	3670,4	25.10.2017
TD7-8-20-3	7	20	8	3654,2	25.10.2017
TD7-8-20-4	7	20	8	5245,5	25.10.2017
TD7-8-20-5	7	20	8	3399,8	25.10.2017
TD7-8-30-1	7	30	8	5495,8	25.10.2017
TD7-8-30-2	7	30	8	6046,8	25.10.2017
TD7-8-30-3	7	30	8	7697,6	25.10.2017
TD7-8-30-4	7	30	8	6148,4	25.10.2017

typ vzorků ($t-d_s-h-i$)	stáří vzorku t [dny]	tloušťka vzorku h [mm]	průměr šroubu d_s [mm]	únosnost F_u [N]	datum zkoušky
TD7-8-30-5	7	30	8	6083,9	25.10.2017
TD7-10-20-1	7	20	10	3836,5	25.10.2017
TD7-10-20-2	7	20	10	3773,4	25.10.2017
TD7-10-20-3	7	20	10	2955,4	25.10.2017
TD7-10-20-4	7	20	10	3404,7	25.10.2017
TD7-10-20-5	7	20	10	3884,9	25.10.2017
TD7-10-30-1	7	30	10	6245,9	25.10.2017
TD7-10-30-2	7	30	10	6491,2	25.10.2017
TD7-10-30-3	7	30	10	7423,5	25.10.2017
TD7-10-30-4	7	30	10	6953,8	25.10.2017
TD7-10-30-5	7	30	10	7820,3	25.10.2017

A.1.3. Smyk, jedna kotva

Tab. A-4 Souhrn výsledků zkoušek kotvení v HPFRC, jedna kotva, smyk

typ vzorků (t - d_s - h - i)	stáří vzorku t [dny]	tloušťka vzorku h [mm]	průměr šroubu d_s [mm]	únosnost F_u [N]	datum zkoušky
SJ1-6-20-1	1	20	6	2718,8	18.10.2017
SJ1-6-20-2	1	20	6	3326,1	18.10.2017
SJ1-6-20-3	1	20	6	3011,1	18.10.2017
SJ1-6-20-4	1	20	6	3232,4	18.10.2017
SJ1-6-20-5	1	20	6	3133,7	18.10.2017
SJ1-8-10-1	1	10	8	2477,2	18.10.2017
SJ1-8-10-2	1	10	8	2936,5	18.10.2017
SJ1-8-10-3	1	10	8	1642,4	18.10.2017
SJ1-8-10-4	1	10	8	1303,7	18.10.2017
SJ1-8-10-5	1	10	8	2819,0	18.10.2017
SJ1-8-20-1	1	20	8	4449,6	18.10.2017
SJ1-8-20-2	1	20	8	4903,9	18.10.2017
SJ1-8-20-3	1	20	8	5234,9	18.10.2017
SJ1-8-20-4	1	20	8	4896,1	18.10.2017
SJ1-8-20-5	1	20	8	4687,8	18.10.2017
SJ7-6-20-1	7	20	6	4814,3	25.10.2017
SJ7-6-20-3	7	20	6	4158,3	25.10.2017
SJ7-6-20-4	7	20	6	3388,5	25.10.2017
SJ7-6-20-5	7	20	6	4143,5	25.10.2017
SJ7-8-10-2	7	10	8	2757,4	25.10.2017
SJ7-8-10-3	7	10	8	1224,3	25.10.2017
SJ7-8-10-4	7	10	8	5324,5	25.10.2017
SJ7-8-10-5	7	10	8	3652,7	25.10.2017
SJ7-8-20-1	7	20	8	7103,8	25.10.2017
SJ7-8-20-2	7	20	8	6413,9	25.10.2017
SJ7-8-20-3	7	20	8	6430,4	25.10.2017
SJ7-8-20-4	7	20	8	5429,0	25.10.2017
SJ7-8-20-5	7	20	8	7235,0	25.10.2017

A.1.4. Smyk, dvojice kotev

Tab. A-5 Souhrn výsledků zkoušek kotvení v HPFRC, dvojice kotev, smyk

typ vzorků ($t-d_s-h-i$)	stáří vzorku t [dny]	tloušťka vzorku h [mm]	průměr šroubu d_s [mm]	únosnost F_u [N]	datum zkoušky
SD1-6-20-1	1	20	6	8994,2	02.08.2017
SD1-6-20-2	1	20	6	12575,7	02.08.2017
SD1-6-20-3	1	20	6	9124,1	02.08.2017
SD1-6-20-4	1	20	6	8274,6	02.08.2017
SD1-8-20-1	1	20	8	16164,5	02.08.2017
SD1-8-20-2	1	20	8	9675,5	02.08.2017
SD1-8-20-3	1	20	8	14578,5	02.08.2017
SD1-8-20-4	1	20	8	11088,4	02.08.2017
SD1-8-20-5	1	20	8	14297,0	02.08.2017
SD1-8-30-1	1	30	8	26323,5	02.08.2017
SD1-8-30-2	1	30	8	20010,0	02.08.2017
SD1-8-30-3	1	30	8	21419,7	02.08.2017
SD1-8-30-4	1	30	8	17905,6	02.08.2017
SD1-8-30-5	1	30	8	20328,8	02.08.2017
SD1-10-20-1	1	20	10	14600,2	02.08.2017
SD1-10-20-2	1	20	10	9831,6	02.08.2017
SD1-10-20-3	1	20	10	15337,8	02.08.2017
SD1-10-20-4	1	20	10	20278,5	02.08.2017
SD1-10-20-5	1	20	10	12188,8	02.08.2017
SD1-10-30-1	1	30	10	29561,4	02.08.2017
SD1-10-30-2	1	30	10	26529,0	02.08.2017
SD1-10-30-3	1	30	10	24814,7	02.08.2017
SD1-10-30-4	1	30	10	22285,4	02.08.2017
SD1-10-30-5	1	30	10	16144,7	02.08.2017
SD7-6-20-1	7	20	6	14265,8	09.08.2017
SD7-6-20-2	7	20	6	16115,7	09.08.2017
SD7-6-20-3	7	20	6	18256,0	09.08.2017
SD7-6-20-4	7	20	6	11802,1	09.08.2017
SD7-6-20-5	7	20	6	10475,5	09.08.2017
SD7-8-20-1	7	20	8	19059,0	09.08.2017
SD7-8-20-2	7	20	8	14842,6	09.08.2017
SD7-8-20-3	7	20	8	10661,0	09.08.2017
SD7-8-20-4	7	20	8	13182,3	09.08.2017
SD7-8-20-5	7	20	8	13640,2	09.08.2017
SD7-8-30-1	7	30	8	20768,6	09.08.2017
SD7-8-30-2	7	30	8	22920,0	09.08.2017
SD7-8-30-3	7	30	8	20352,4	09.08.2017
SD7-8-30-4	7	30	8	24483,2	09.08.2017
SD7-8-30-5	7	30	8	27799,9	09.08.2017

typ vzorků ($t-d_s-h-i$)	stáří vzorku t [dny]	tloušťka vzorku h [mm]	průměr šroubu d_s [mm]	únosnost F_u [N]	datum zkoušky
SD7-10-20-1	7	20	10	9962,7	09.08.2017
SD7-10-20-2	7	20	10	15039,5	09.08.2017
SD7-10-20-3	7	20	10	11980,4	09.08.2017
SD7-10-20-4	7	20	10	15045,4	09.08.2017
SD7-10-20-5	7	20	10	15187,3	09.08.2017
SD7-10-30-1	7	30	10	21842,1	09.08.2017
SD7-10-30-2	7	30	10	24435,0	09.08.2017
SD7-10-30-3	7	30	10	21526,5	09.08.2017
SD7-10-30-4	7	30	10	21681,6	09.08.2017
SD7-10-30-5	7	30	10	18095,5	09.08.2017
SD14-6-20-1	14	20	6	12499,8	16.08.2017
SD14-6-20-2	14	20	6	12354,9	16.08.2017
SD14-6-20-3	14	20	6	16982,0	16.08.2017
SD14-6-20-4	14	20	6	10889,0	16.08.2017
SD14-6-20-5	14	20	6	11355,7	16.08.2017
SD14-8-20-1	14	20	8	12070,8	16.08.2017
SD14-8-20-2	14	20	8	25650,1	16.08.2017
SD14-8-20-3	14	20	8	19991,3	16.08.2017
SD14-8-20-4	14	20	8	15852,0	16.08.2017
SD14-8-20-5	14	20	8	11715,3	16.08.2017
SD14-8-30-1	14	30	8	26874,8	16.08.2017
SD14-8-30-2	14	30	8	20894,6	16.08.2017
SD14-8-30-3	14	30	8	22886,9	16.08.2017
SD14-8-30-4	14	30	8	24315,2	16.08.2017
SD14-8-30-5	14	30	8	23021,8	16.08.2017
SD14-10-20-1	14	20	10	17980,3	16.08.2017
SD14-10-20-2	14	20	10	15499,4	16.08.2017
SD14-10-20-3	14	20	10	17649,0	16.08.2017
SD14-10-20-4	14	20	10	15903,2	16.08.2017
SD14-10-20-5	14	20	10	17661,2	16.08.2017
SD14-10-30-1	14	30	10	37224,9	16.08.2017
SD14-10-30-2	14	30	10	31365,3	16.08.2017
SD14-10-30-3	14	30	10	32654,7	16.08.2017
SD14-10-30-4	14	30	10	27478,5	16.08.2017
SD14-10-30-5	14	30	10	34593,7	16.08.2017

A.1.5. Kombinované namáhání (N+V), dvojice kotev

Tab. A-6 Souhrn výsledků zkoušek kotvení v HPFRC, dvojice kotev, kombinace N+V

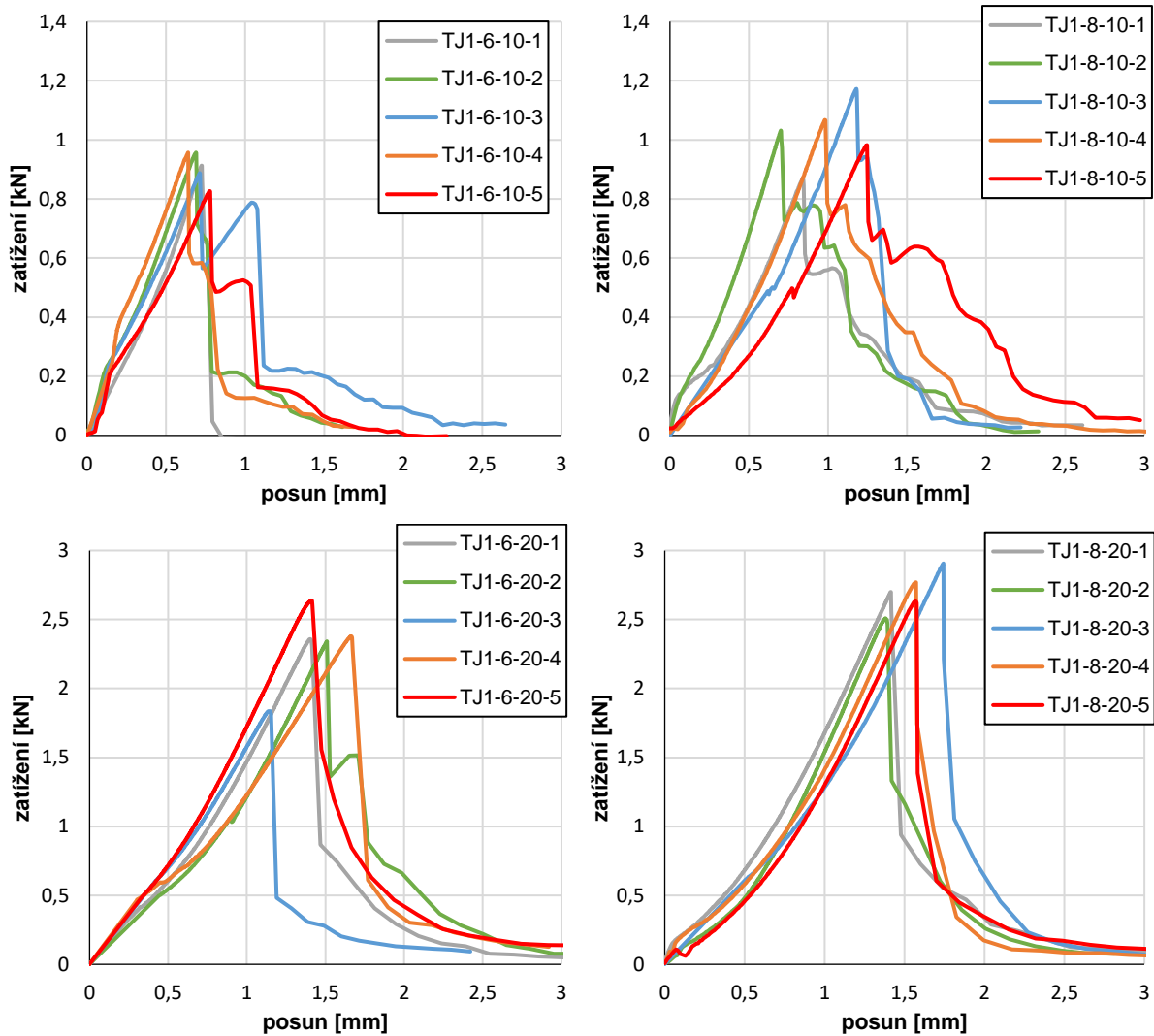
typ vzorků ($t-d_s-h-\beta-i$)	stáří vzorku	tloušťka vzorku	průměr šroubu	úhel	únosnost	datum zkoušky
	t [dny]	h [mm]	d_s [mm]	β [deg]	F_u [N]	
NV1-6-20-30-1	1	20	6	30	3170,4	18.10.2017
NV1-6-20-30-2	1	20	6	30	4648,9	18.10.2017
NV1-6-20-30-3	1	20	6	30	4793,7	18.10.2017
NV1-6-20-30-4	1	20	6	30	3475,0	18.10.2017
NV1-6-20-30-5	1	20	6	30	3942,8	18.10.2017
NV1-6-20-60-1	1	20	6	60	2514,0	18.10.2017
NV1-6-20-60-2	1	20	6	60	2263,7	18.10.2017
NV1-6-20-60-3	1	20	6	60	3379,2	18.10.2017
NV1-6-20-60-4	1	20	6	60	2891,2	18.10.2017
NV1-8-20-60-1	1	20	8	60	2779,2	18.10.2017
NV1-8-20-60-2	1	20	8	60	2723,3	18.10.2017
NV1-8-20-60-3	1	20	8	60	2967,0	18.10.2017
NV1-8-20-60-4	1	20	8	60	2512,0	18.10.2017
NV1-8-20-60-5	1	20	8	60	3027,1	18.10.2017
NV1-8-30-60-1	1	30	8	60	4706,7	18.10.2017
NV1-8-30-60-2	1	30	8	60	5367,4	18.10.2017
NV1-8-30-60-3	1	30	8	60	5393,2	18.10.2017
NV1-8-30-60-4	1	30	8	60	4784,6	18.10.2017
NV1-8-30-60-5	1	30	8	60	6621,2	18.10.2017
NV1-10-20-60-1	1	20	10	60	2865,2	18.10.2017
NV1-10-20-60-2	1	20	10	60	2628,1	18.10.2017
NV1-10-20-60-3	1	20	10	60	3023,7	18.10.2017
NV1-10-20-60-4	1	20	10	60	2769,0	18.10.2017
NV1-10-20-60-5	1	20	10	60	3601,3	18.10.2017
NV1-10-30-30-1	1	30	10	30	8349,7	18.10.2017
NV1-10-30-30-2	1	30	10	30	6284,0	18.10.2017
NV1-10-30-30-3	1	30	10	30	6267,5	18.10.2017
NV1-10-30-30-4	1	30	10	30	6560,8	18.10.2017
NV1-10-30-30-5	1	30	10	30	6393,7	18.10.2017
NV1-10-30-60-1	1	30	10	60	4925,3	18.10.2017
NV1-10-30-60-2	1	30	10	60	5704,3	18.10.2017
NV1-10-30-60-3	1	30	10	60	5593,6	18.10.2017
NV1-10-30-60-4	1	30	10	60	6111,9	18.10.2017
NV1-10-30-60-5	1	30	10	60	7574,0	18.10.2017
NV7-6-20-60-2	7	20	6	60	5848,0	25.10.2017
NV7-6-20-60-3	7	20	6	60	3617,9	25.10.2017
NV7-6-20-60-4	7	20	6	60	4494,2	25.10.2017

typ vzorků ($t-d_s-h-\beta-i$)	stáří vzorku	tloušťka vzorku	průměr šroubu	úhel	únosnost	datum zkoušky
	t [dny]	h [mm]	d_s [mm]	β [deg]	F_u [N]	
NV7-6-20-60-5	7	20	6	60	4196,6	25.10.2017
NV7-8-20-60-1	7	20	8	60	3906,4	25.10.2017
NV7-8-20-60-2	7	20	8	60	3871,6	25.10.2017
NV7-8-20-60-3	7	20	8	60	4403,2	25.10.2017
NV7-8-20-60-4	7	20	8	60	3429,8	25.10.2017
NV7-8-20-60-5	7	20	8	60	4131,8	25.10.2017
NV7-8-30-60-1	7	30	8	60	7102,5	25.10.2017
NV7-8-30-60-2	7	30	8	60	7350,5	25.10.2017
NV7-8-30-60-3	7	30	8	60	7636,0	25.10.2017
NV7-8-30-60-4	7	30	8	60	6446,9	25.10.2017
NV7-8-30-60-5	7	30	8	60	7248,7	25.10.2017
NV7-10-20-60-1	7	20	10	60	4343,7	25.10.2017
NV7-10-20-60-2	7	20	10	60	3515,5	25.10.2017
NV7-10-20-60-3	7	20	10	60	3739,1	25.10.2017
NV7-10-20-60-4	7	20	10	60	4656,6	25.10.2017
NV7-10-20-60-5	7	20	10	60	3266,3	25.10.2017
NV7-10-30-60-1	7	30	10	60	5655,8	25.10.2017
NV7-10-30-60-2	7	30	10	60	6602,3	25.10.2017
NV7-10-30-60-3	7	30	10	60	8495,9	25.10.2017
NV7-10-30-60-4	7	30	10	60	6400,5	25.10.2017
NV7-10-30-60-5	7	30	10	60	6768,3	25.10.2017

A.2. Pracovní diagramy

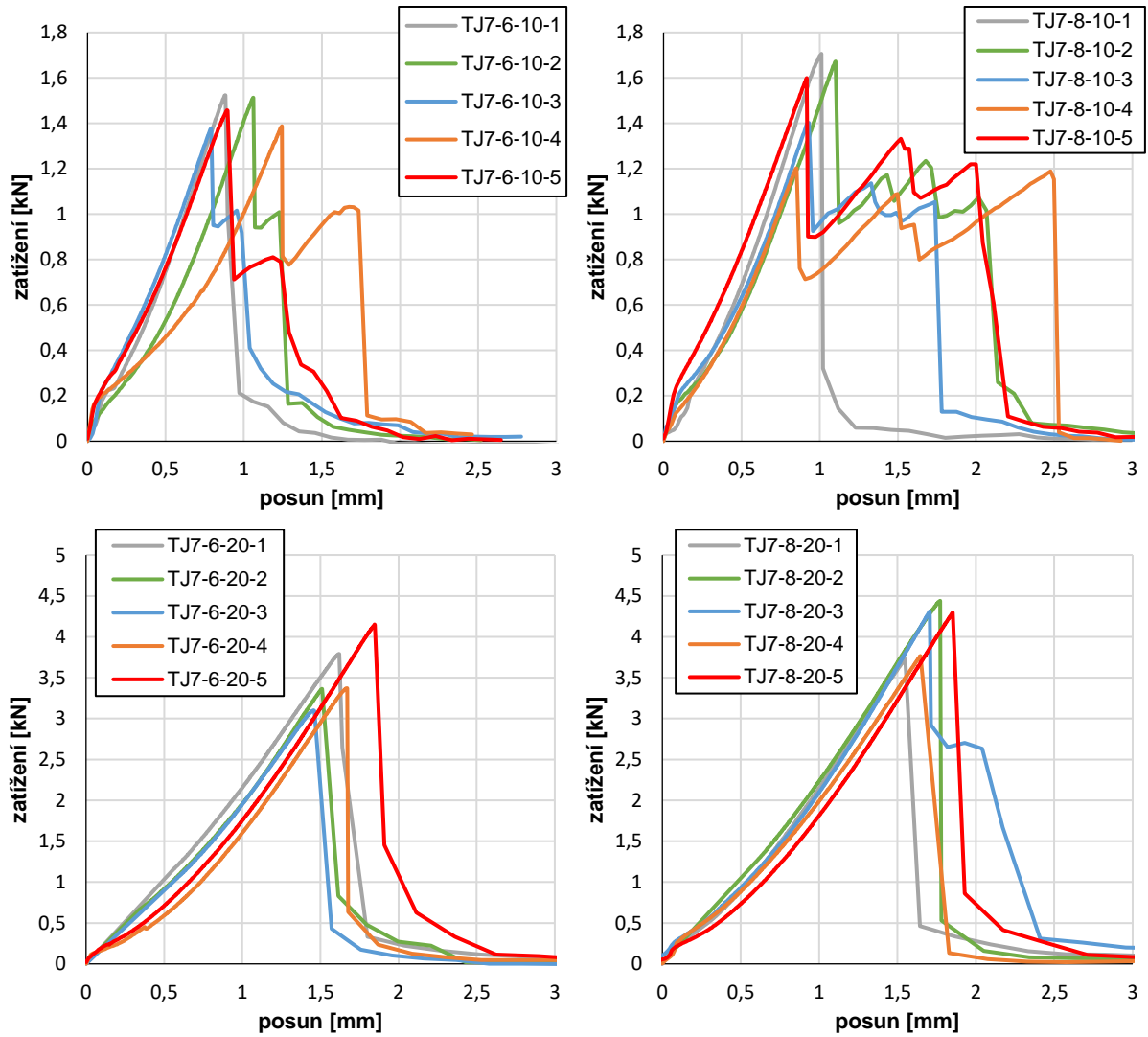
V této části jsou uvedeny grafy závislosti zatížení na deformaci pro každou jednotlivou zkoušku. Členěno shodně s hlavním textem.¹

A.2.1. Prostý tah, jedna kotva



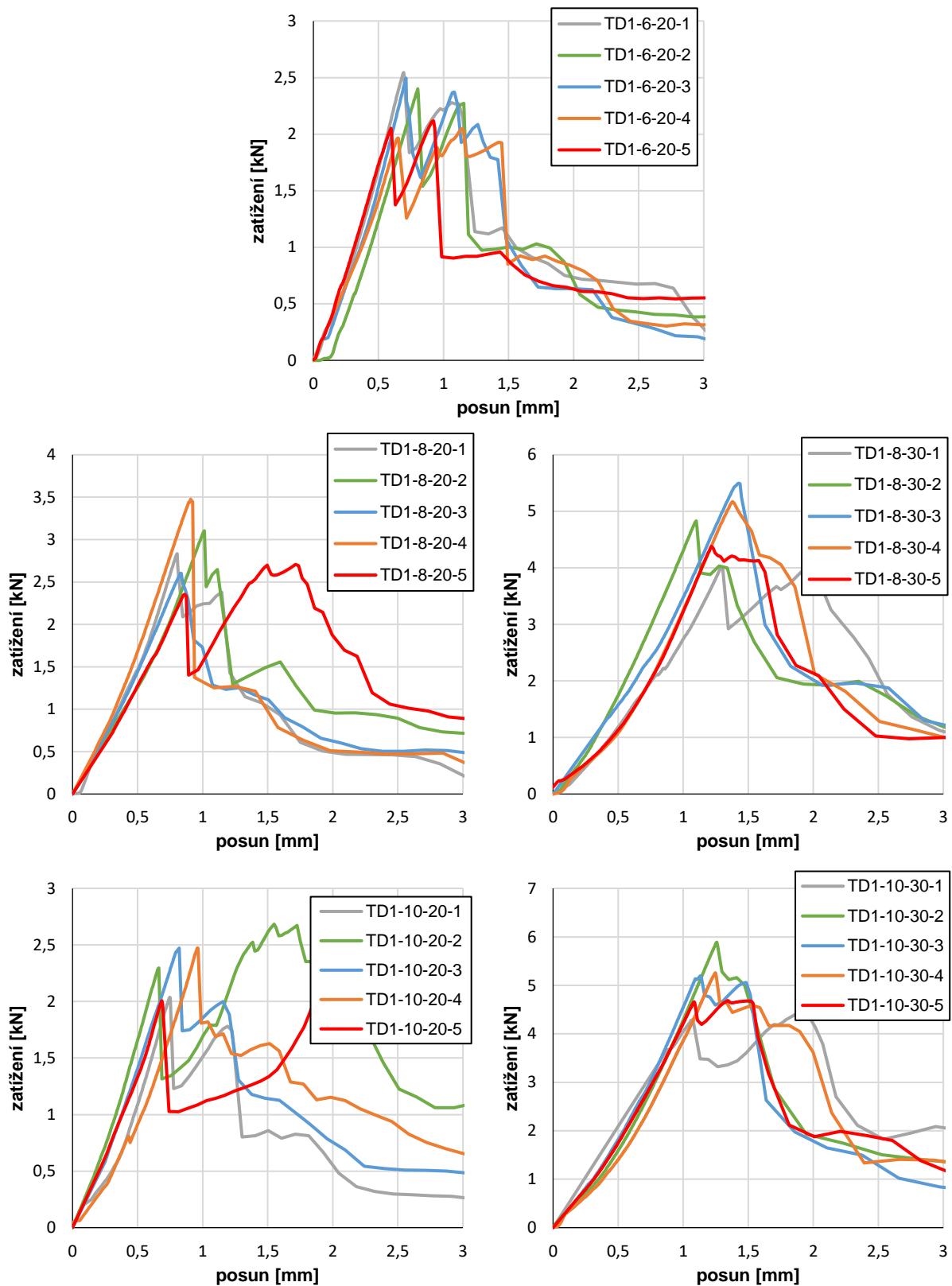
Obr. A-1 Pracovní diagramy kotvení v HPFRC, prostý tah, jedna kotva, stáří 1 dní

¹ Deformací je míněn posun zkušební lisu.

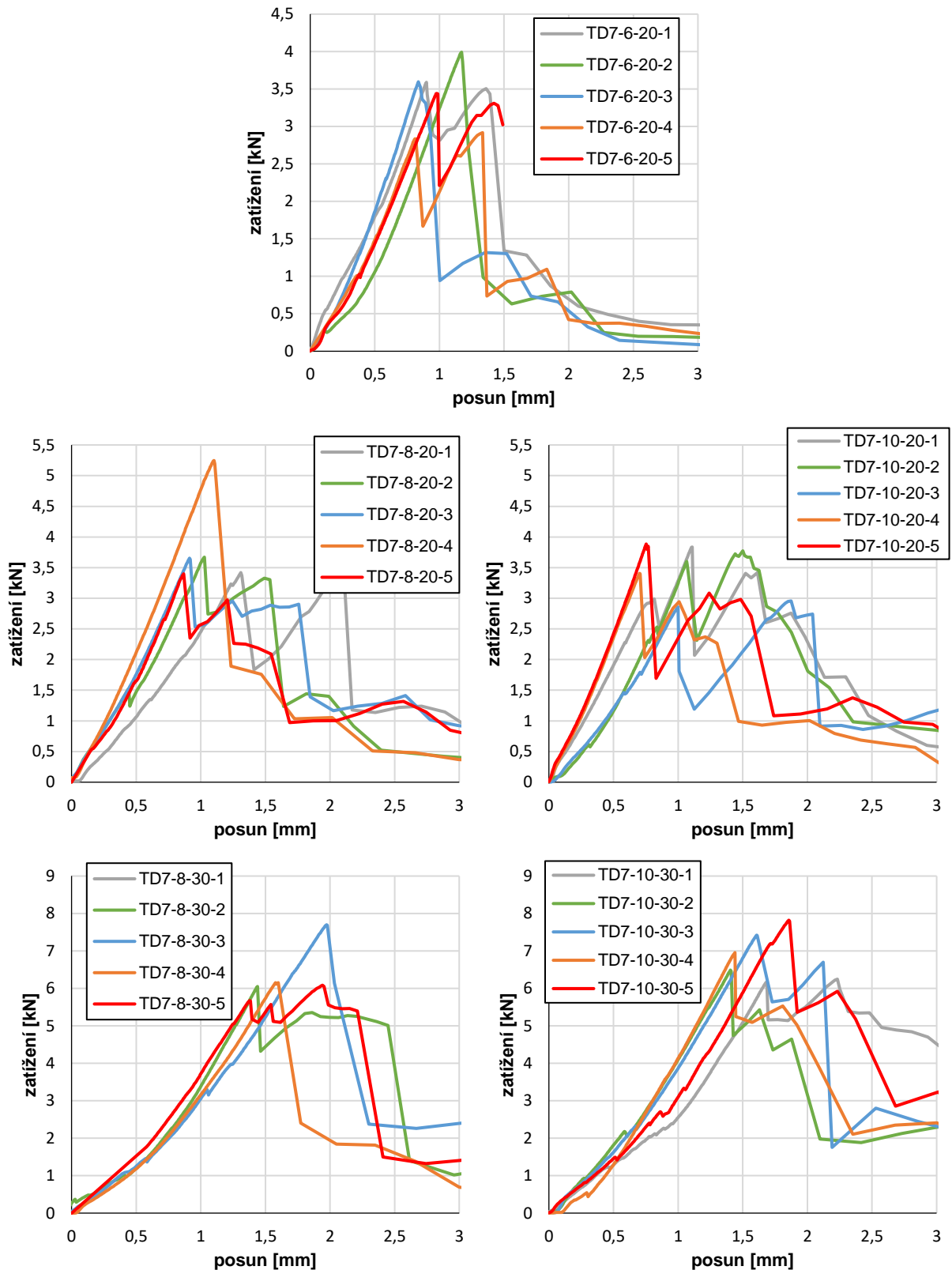


Obr. A-2 Pracovní diagramy kotvení v HPFRC, prostý tah, jedna kotva, stáří 7 dní

A.2.2. Prostý tah, dvojice kotev

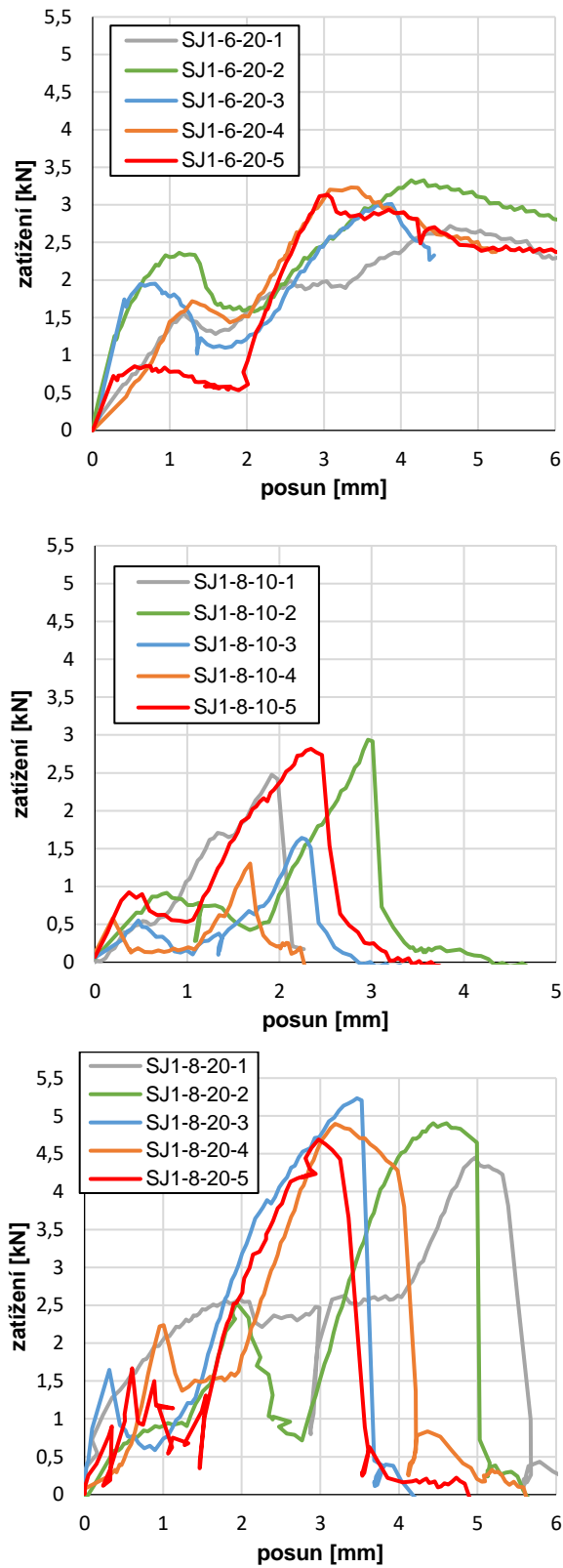


Obr. A-3 Pracovní digramy kotvení v HPFRC, prostý tah, dvojice kotev, stáří 1 den

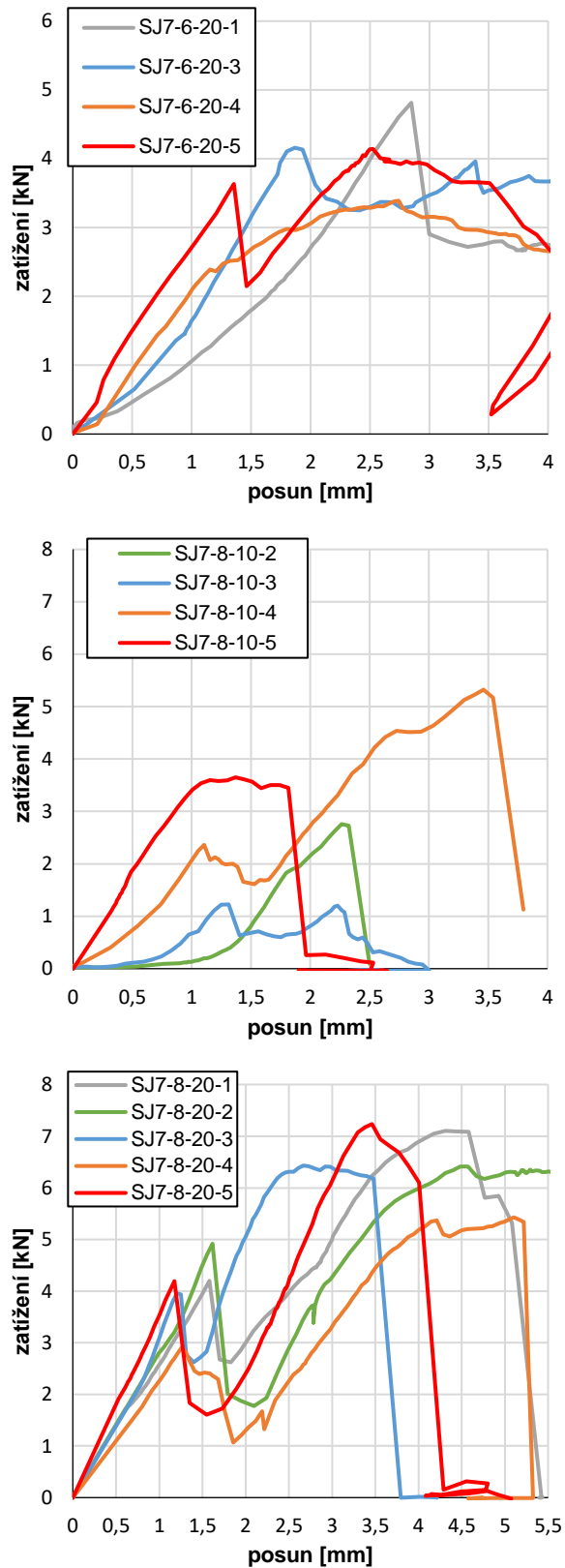


Obr. A-4 Pracovní digramy kotvení v HPFRC, prostý tah, dvojice kotev, stáří 7 dní

A.2.3. Smyk, jedna kotva

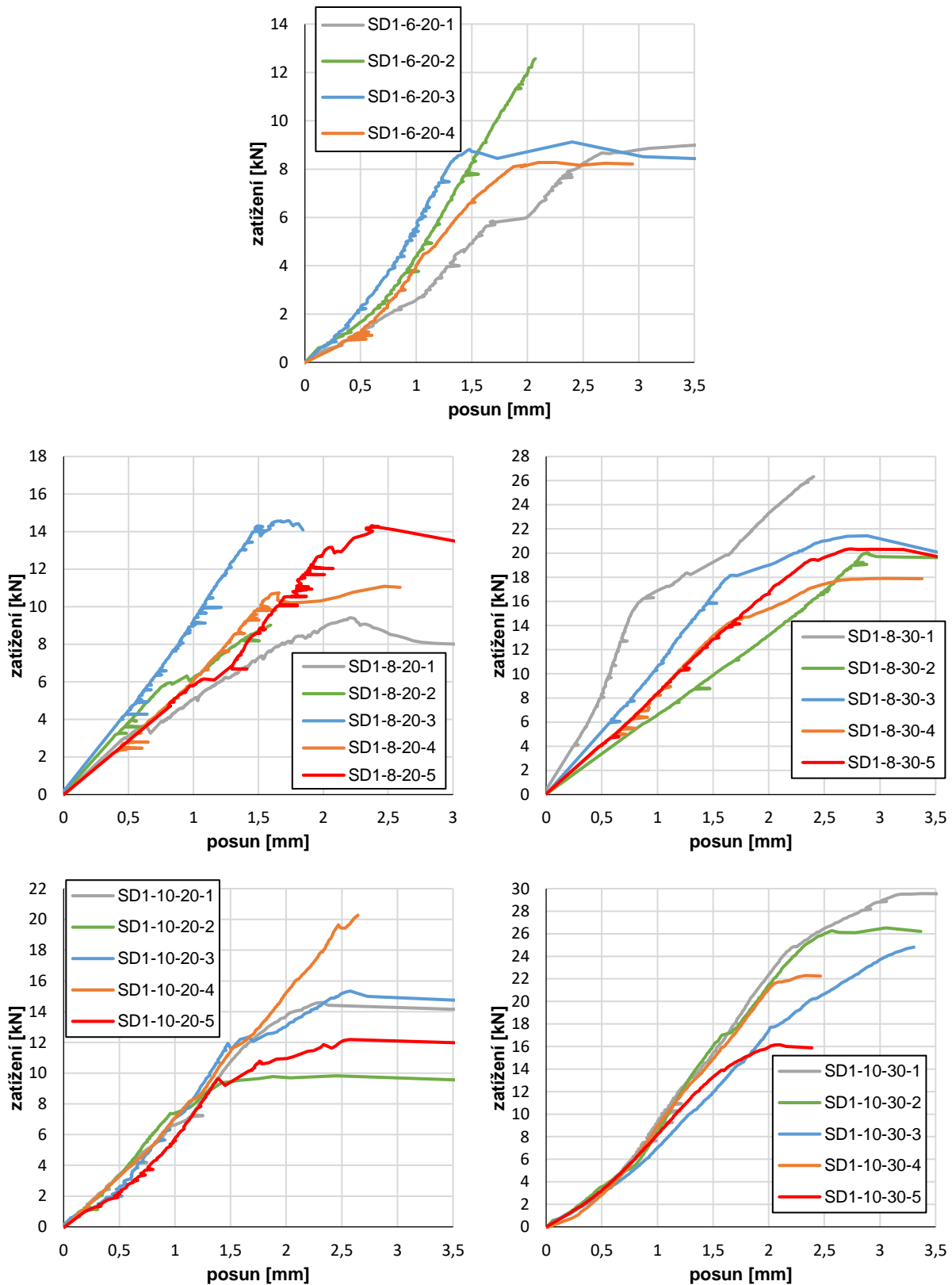


Obr. A-5 Pracovní digramy kotvení v HPFRC, smyk, jedna kotva, stáří 1 den

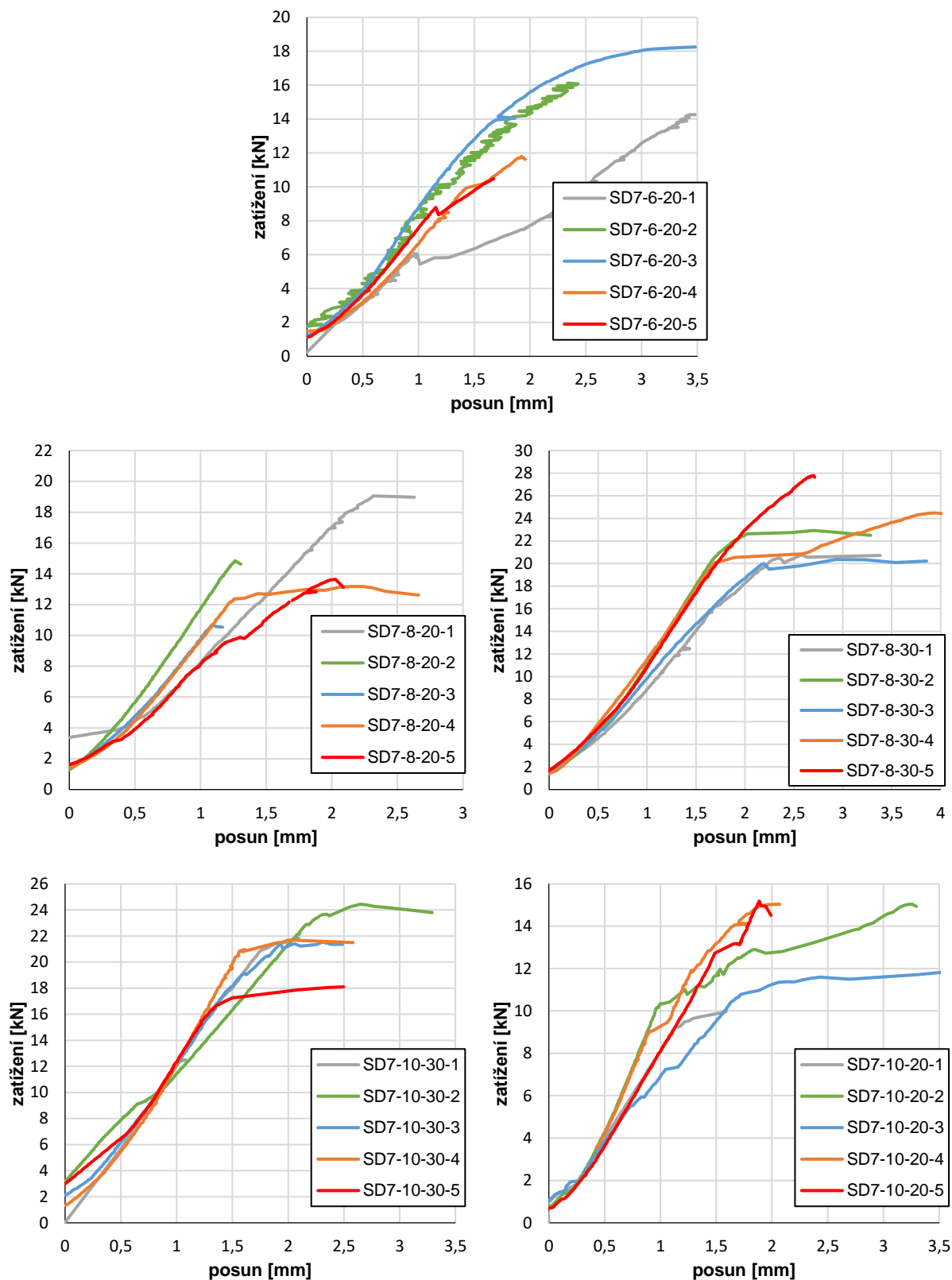


Obr. A-6 Pracovní digramy kotvení v HPFRC, smyk, jedna kotva, stáří 7 dní

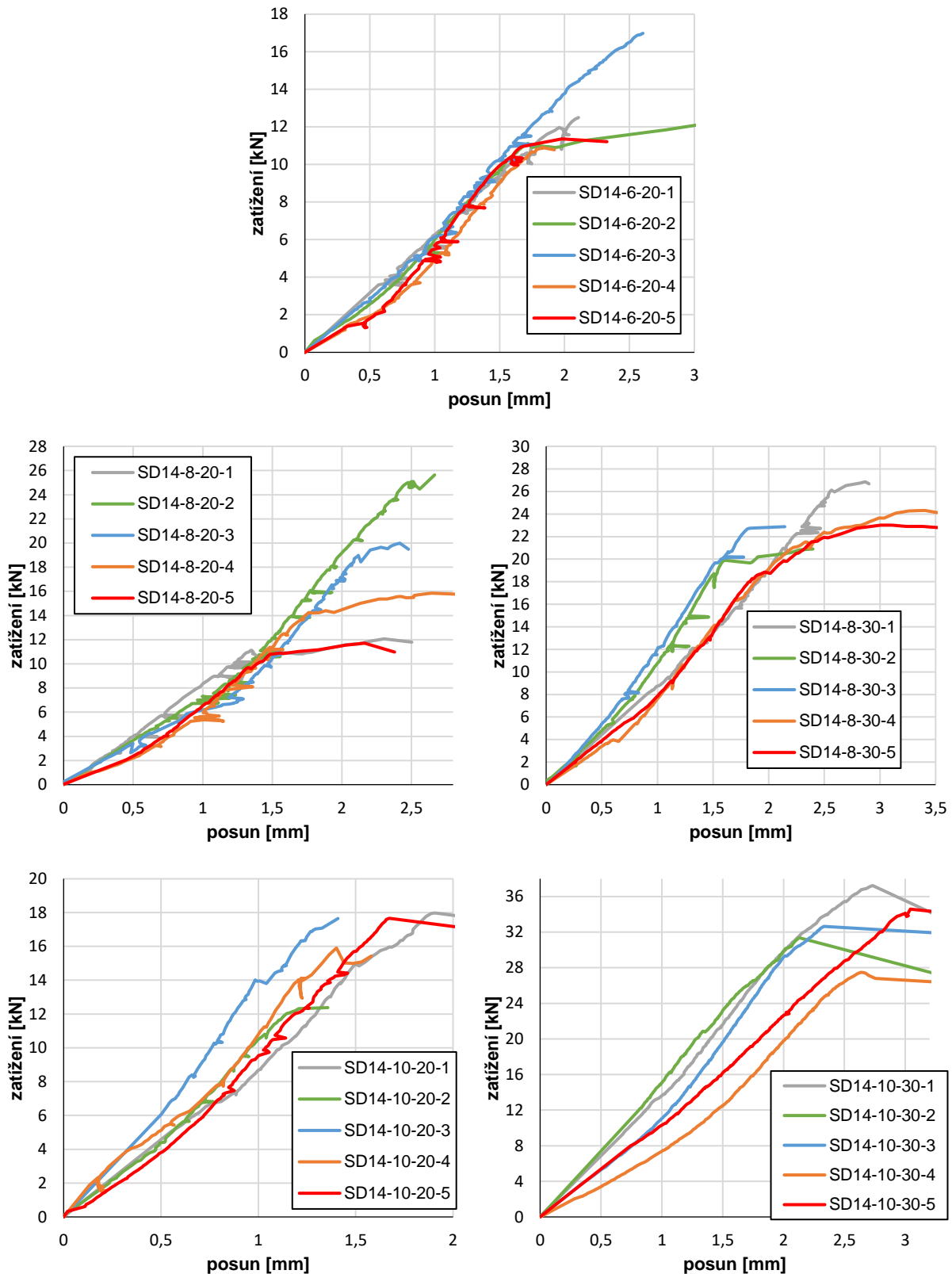
A.2.4. Smyk, dvojice kotev



Obr. A-7 Pracovní digramy kotvení v HPFRC, smyk, dvojice kotev, stáří 1 den

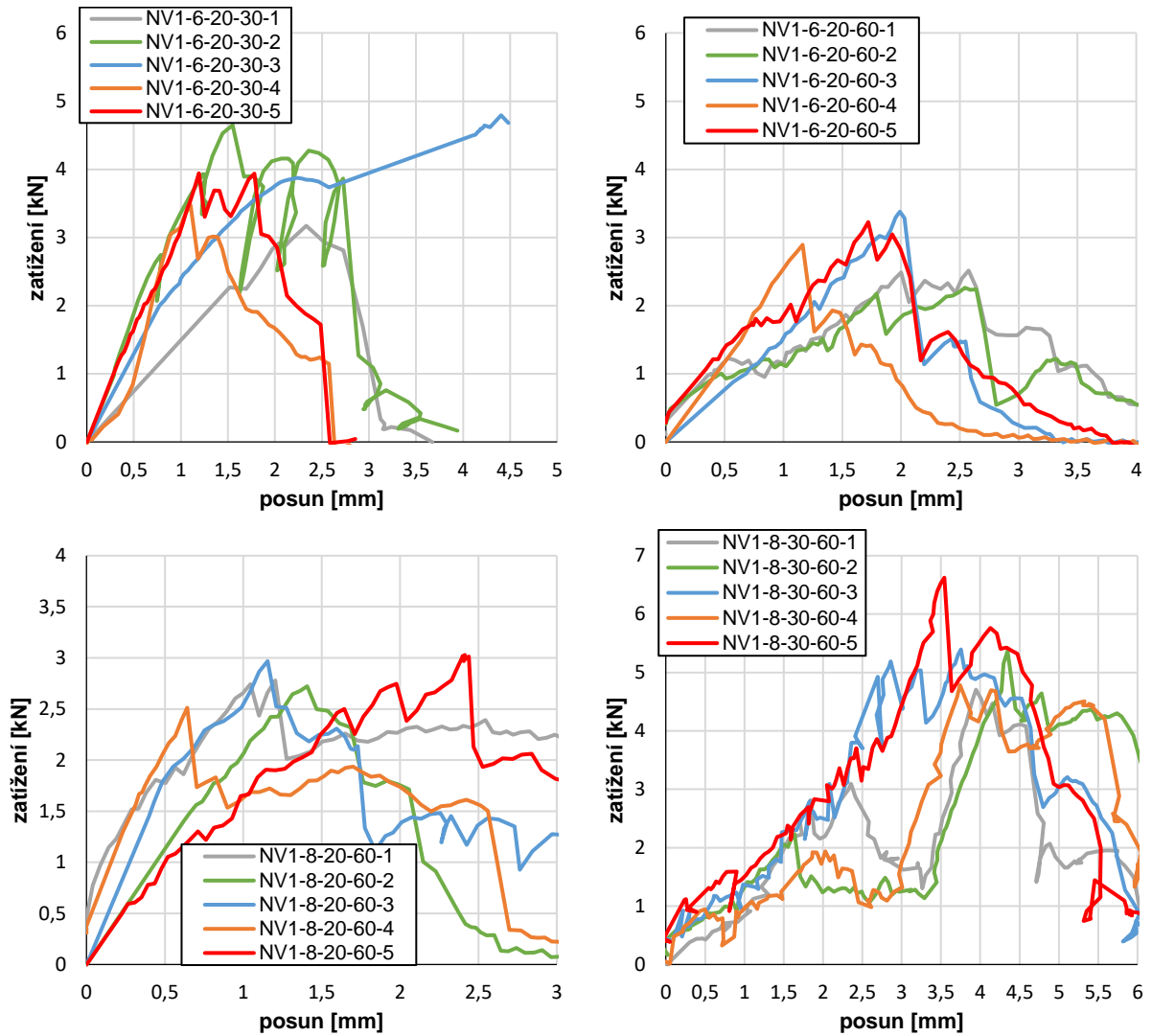


Obr. A-8 Pracovní digramy kotvení v HPFRC, smyk, dvojice kotev, stáří 7 dní

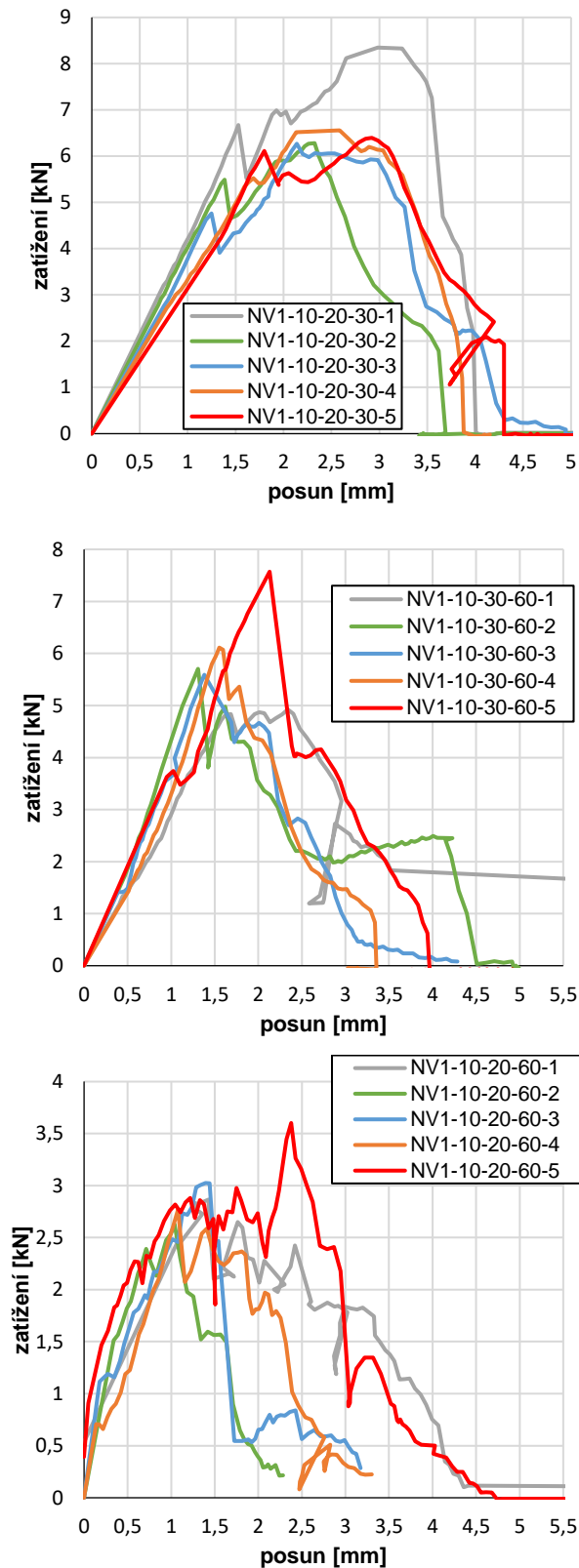


Obr. A-9 Pracovní digramy kotvení v HPFRC, smyk, dvojice kotev, stáří 14 dní

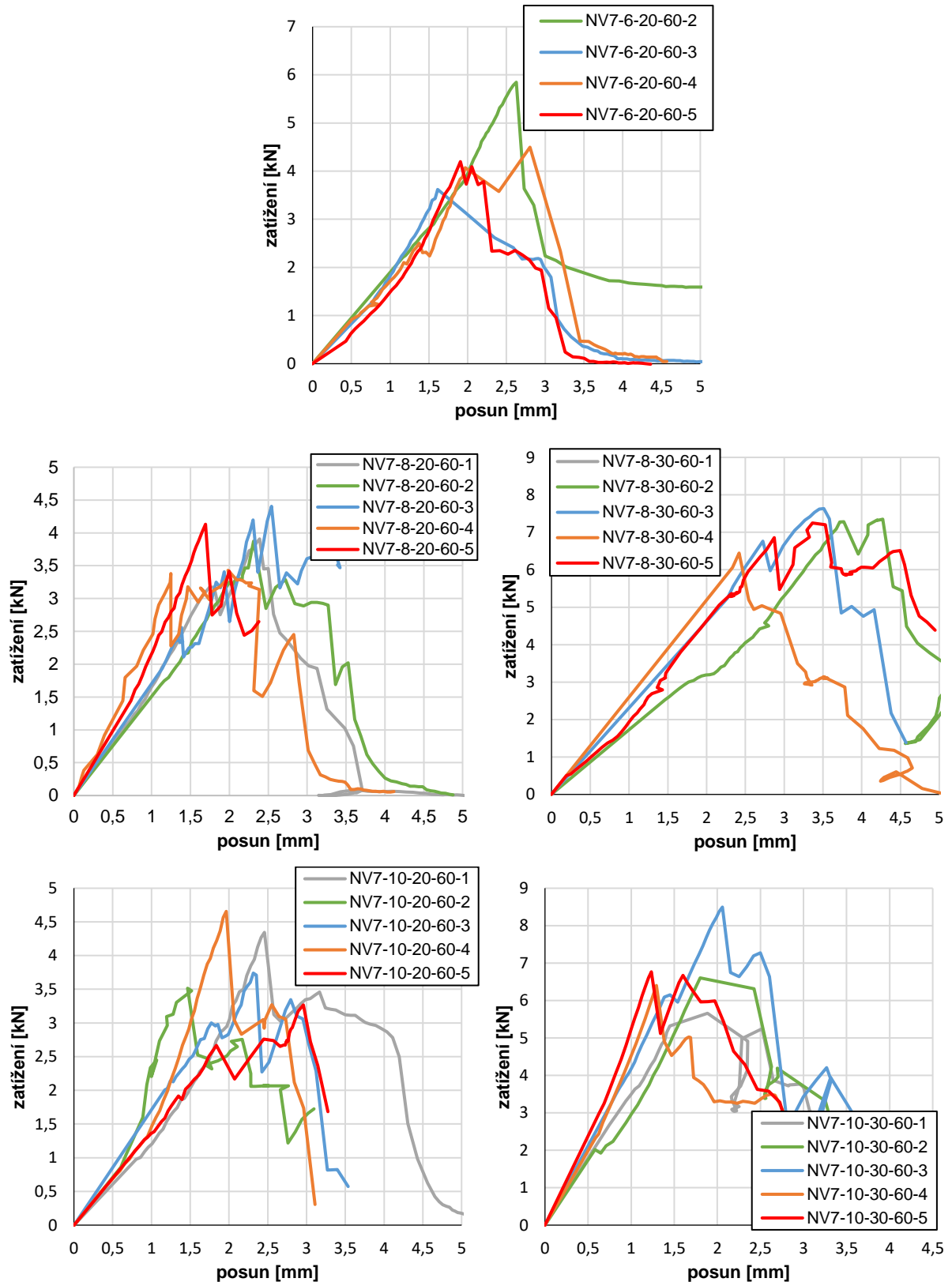
A.2.5. Kombinované namáhání (N+V), dvojice kotev



Obr. A-10 Pracovní digramy, kombinované namáhání, dvojice kotev M6 a M8, stáří 1 den



Obr. A-11 Pracovní digramy, kombinované namáhání, dvojice kotev M10, stáří 1 den



Obr. A-12 Pracovní digramy, kombinované namáhání, dvojice kotev, stáří 7 dní²

² I přes propady v zatěžovací křivce na vzorku NV7-8-20-60 bylo zatěžování vzorku plynulé.

B. Výsledky tahových zkoušek kotvení v UHPFRC

B.1. Zkoušky mechanických vlastností UHPFRC

Tab. B-1 Pevnost UHPC v tahu za ohybu dle ČSN EN 14 651+A1, reziduální hodnoty pevnosti, série $v_f = 1,5 \%$, stáří 3 dny

Označení vzorku	Rozměry				Vrub	Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Max. dosažená síla [kN]	Pevnost v tahu za ohybu při max. zatížení σ_u [MPa]	Mez úměrnosti $f_{ct,L}$ pro CMOD 0,05 mm [MPa]	Zbytkové pevnosti v tahu za ohybu při různých hodnotách rozevření trhliny CMOD [MPa]			
	b [mm]	h [mm]	l [mm]	h ₀ [mm]							$f_{R,1}$ pro CMOD 0,5 mm	$f_{R,2}$ pro CMOD 1,5 mm	$f_{R,3}$ pro CMOD 2,5 mm	$f_{R,4}$ pro CMOD 3,5 mm
1 - 1,5%	100,0	100,6	400,3	82,5	9795	2435	16,4	10,8	7,5	9,2	10,2	8,7	7,2	
2 - 1,5%	98,7	100,3	400,0	82,5	9628	2435	14,3	9,6	7,4	8,2	9,4	8,3	6,9	
3 - 1,5%	99,1	100,6	400,0	82,5	9651	2420	16,2	10,8	7,9	10,3	10,1	9,7	7,6	
Průměrná hodnota:						2430		10,4	7,6	9,2	9,9	8,9	7,2	
Směrodatná odchylka						8,7		0,7	0,3	1,1	0,4	0,7	0,4	
Variační koeficient [%]						0,4		6,9	3,6	11,4	4,4	8,1	4,9	

Tab. B-2 Pevnost UHPC v tahu za ohybu dle ČSN EN 14 651+A1, reziduální hodnoty pevnosti, série $v_f = 2,0 \%$, stáří 3 dny

Označení vzorku	Rozměry				Vrub	Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Max. dosažená síla [kN]	Pevnost v tahu za ohybu při max. zatížení σ_u [MPa]	Mez úměrnosti $f_{ct,L}$ pro CMOD 0,05 mm [MPa]	Zbytkové pevnosti v tahu za ohybu při různých hodnotách rozevření trhliny CMOD [MPa]			
	b [mm]	h [mm]	l [mm]	h ₀ [mm]							$f_{R,1}$ pro CMOD 0,5 mm	$f_{R,2}$ pro CMOD 1,5 mm	$f_{R,3}$ pro CMOD 2,5 mm	$f_{R,4}$ pro CMOD 3,5 mm
1 - 2,0%	98,2	99,6	400,5	82,4	9626	2460	18,0	12,1	10,0	11,6	10,8	8,9	7,1	
2 - 2,0%	97,9	100,3	400,0	82,7	9731	2480	16,7	11,2	8,6	10,5	10,8	9,8	8,4	
3 - 2,0%	98,4	99,4	399,3	83,2	9674	2475	21,3	14,1	8,6	12,8	12,5	10,0	7,8	
Průměrná hodnota:						2470		12,5	9,1	11,6	11,4	9,6	7,8	
Směrodatná odchylka						10,4		1,5	0,8	1,2	1,0	0,6	0,7	
Variační koeficient [%]						0,4		11,7	8,5	9,9	8,6	6,1	8,4	

Tab. B-3 Pevnost UHPC v tahu za ohybu dle ČSN EN 14 651+A1, reziduální hodnoty pevnosti, série $v_f = 2,5 \%$, stáří 3 dny

Označení vzorku	Rozměry			Vrub		Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Max. dosažená síla [kN]	Pevnost v tahu za ohybu při max. zatížení σ_u [MPa]	Mez úměrnosti $f_{ct,L}$ pro CMOD 0,05 mm [MPa]	Zbytkové pevnosti v tahu za ohybu při různých hodnotách rozevření trhliny CMOD [MPa]			
	b [mm]	h [mm]	l [mm]	h ₀ [mm]	$f_{R,1}$ pro CMOD 0,5 mm						$f_{R,2}$ pro CMOD 1,5 mm	$f_{R,3}$ pro CMOD 2,5 mm	$f_{R,4}$ pro CMOD 3,5 mm	
1 - 2,5%	99,4	98,7	400,5	83,1	9813	2500	19,2	12,6	8,4	11,6	11,5	9,0	7,3	
2 - 2,5%	98,9	100,5	399,8	83,3	9930	2500	26,9	17,6	10,4	15,3	16,9	14,7	12,4	
3 - 2,5%	100,5	99,2	399,8	82,8	9957	2500	22,6	14,7	10,4	14,5	13,5	11,3	8,6	
Průměrná hodnota:						2500		15,0	9,7	13,8	14,0	11,7	9,4	
Směrodatná odchylka						0,0		2,5	1,2	1,9	2,7	2,9	2,7	
Variační koeficient [%]						0,0		16,8	11,9	14,1	19,5	24,6	28,1	

B.2. Souhrn naměřených výsledků

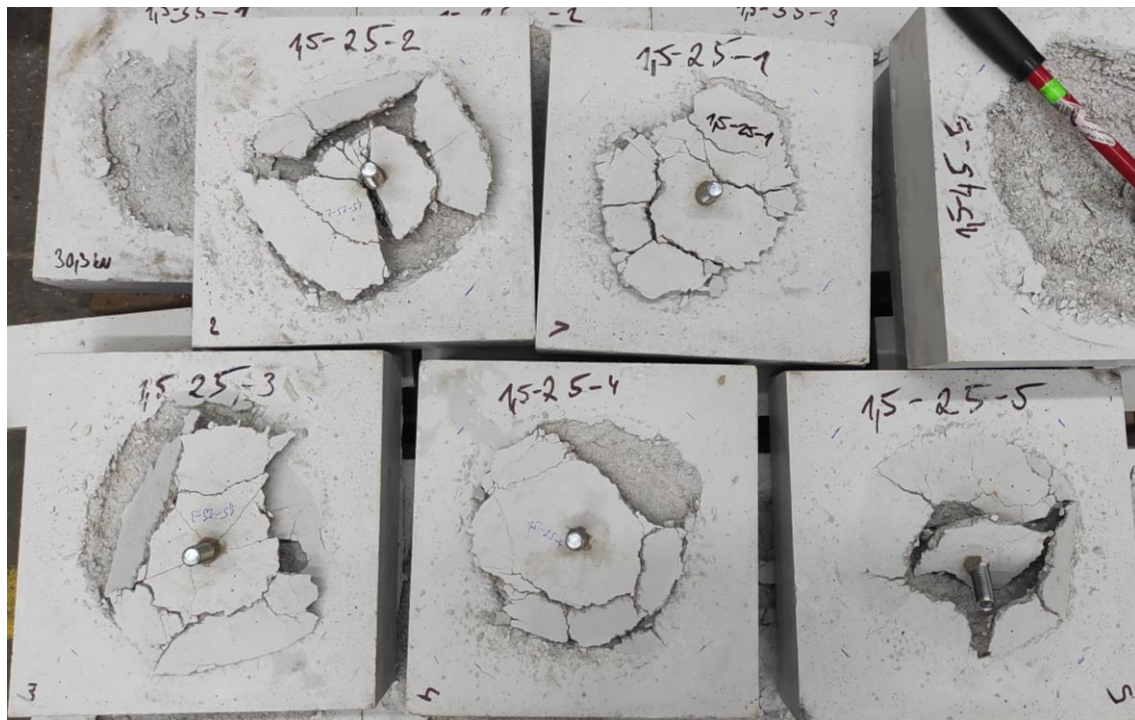
Tab. B-4 Souhrn výsledků tahových zkoušek kotvení v UHPFRC

Označení vzorku	Série (množství vláken)	Efektivní hloubka	povrch	Maximální zatížení	Deformace při max. zatížení	Dosah betonového kuželu ³					Úhel roznosu zatížení
						L_1	L_2	L_3	L_4	L_m	
-	V_f	h_{ef}	-	N_u	$U_{N,max}$	L_1	L_2	L_3	L_4	L_m	α_m
-	-	mm	-	kN	mm	mm	mm	mm	mm	mm	deg
15-25-1	1,5%	25	F	21,53	1,38	93	53	93	78	79	18
15-25-2	1,5%	25	F	15,96	1,38	93	-	-	-	93	15
15-25-3	1,5%	25	F	15,14	0,17	81	87	85	39	73	19
15-25-4	1,5%	25	F	15,23	0,16	39	75	65	86	66	21
15-25-5	1,5%	25	F	14,99	1,45	-	-	-	-	-	-
15-35-1	1,5%	35	F	30,03	1,43	62	99	75	70	77	25
15-35-2	1,5%	35	F	29,00	1,65	111	101	109	72	98	20
15-35-3	1,5%	35	F	37,36	1,68	103	93	123	63	96	20
15-35-4	1,5%	35	F	37,74	1,60	87	103	98	93	95	20
15-35-5	1,5%	35	F	26,92	1,40	79	93	67	64	76	25
15-45-1	1,5%	45	F	52,92	2,40	109	124	80	60	93	26
15-45-2	1,5%	45	F	54,03	2,28	121	108	86	118	108	23
15-45-3	1,5%	45	F	53,09	1,56	123	89	71	80	91	26
15-45-4	1,5%	45	F	54,31	1,88	98	92	95	81	92	26
15-45-5	1,5%	45	F	53,80	1,97	111	103	110	26	88	27
20-25-1	2,0%	25	F	18,62	1,33	94	108	89	-	97	14
20-25-2	2,0%	25	F	17,75	1,34	92	71	78	51	73	19
20-25-3	2,0%	25	F	19,79	1,31	108	95	107	100	103	14
20-35-1	2,0%	35	F	35,69	1,50	116	100	118	122	114	17
20-35-2	2,0%	35	F	41,82	1,59	123	113	122	83	110	18
20-35-3	2,0%	35	F	37,45	1,78	80	110	74	71	84	23
20-45-1	2,0%	45	F	58,36	1,49	88	105	93	114	100	24
20-45-2	2,0%	45	F	67,41	1,55	79	109	108	109	101	24
20-45-3	2,0%	45	F	73,50	1,63	111	103	113	103	108	23
20-25H-1	2,0%	25	H	54,54	1,74	36	36	-	-	36	35
20-25H-2	2,0%	25	H	57,82	1,68	74	23	76	51	56	24
20-25H-3	2,0%	25	H	58,30	1,44	71	45	76	37	57	24

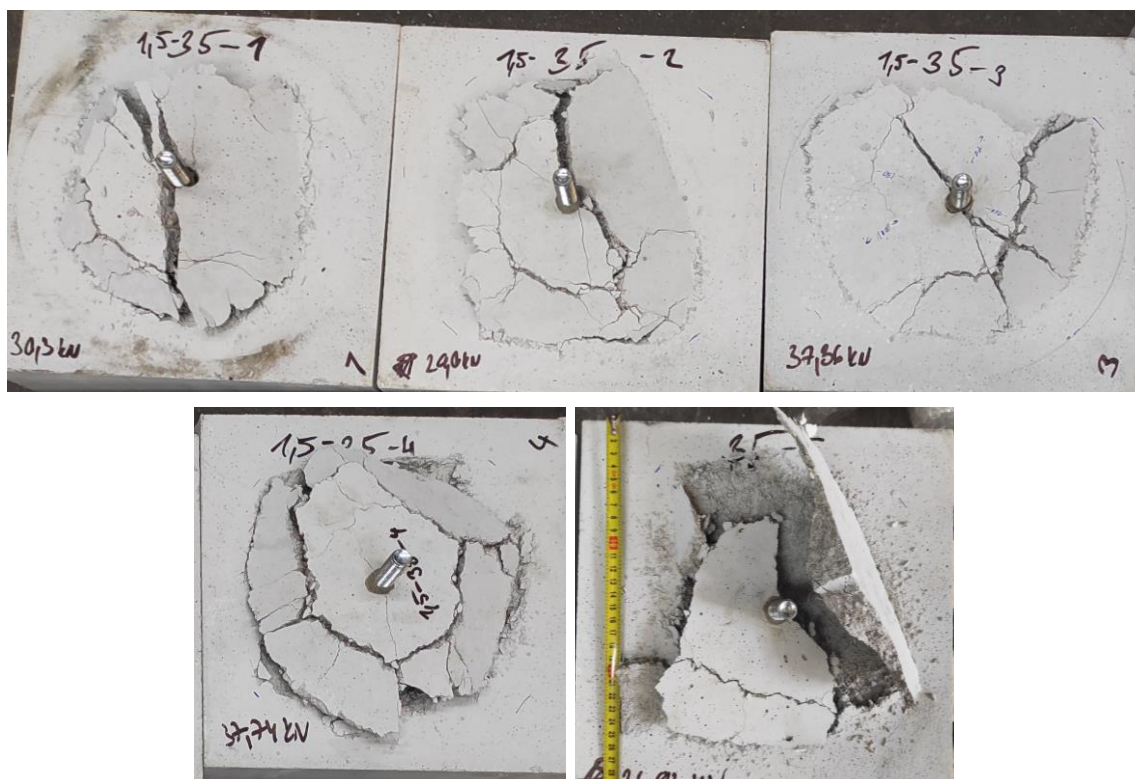
³ Chybějící údaje u vzorků, které byly při zkoušce zcela porušeny.

Označení vzorku	Série (množství vláken)	Efektivní hloubka	povrch	Maximální zatížení	Deformace při max. zatížení	Dosah betonového kuželu ³					Úhel roznosu zatížení
						L_1	L_2	L_3	L_4	L_m	
-	V_f	h_{ef}	-	N_u	$U_{N,max}$	L_1	L_2	L_3	L_4	L_m	α_m
-	-	mm	-	kN	mm	mm	mm	mm	mm	mm	deg
20-35H-1	2,0%	35	H	65,38	2,77	40	53	41	78	53	33
20-35H-2	2,0%	35	H	70,84	2,04	42	48	28	-	39	42
20-35H-3	2,0%	35	H	64,15	2,13	44	38	53	33	42	40
25-25-1	2,5%	25	F	26,66	1,00	85	85	85	85	85	16
25-25-2	2,5%	25	F	22,25	0,94	93	98	103	83	94	15
25-25-3	2,5%	25	F	25,80	1,18	83	73	83	73	78	18
25-35-1	2,5%	35	F	57,70	1,22	103	118	103	113	109	18
25-35-2	2,5%	35	F	42,61	1,44	93	98	98	88	94	20
25-35-3	2,5%	35	F	47,35	1,94	98	88	68	88	86	22
25-45-1	2,5%	45	F	77,96	1,37	73	93	73	108	87	27
25-45-2	2,5%	45	F	71,76	1,13	90	93	76	83	86	28
25-45-3	2,5%	45	F	73,50	1,63	48	123	63	123	89	27
25-25H-1	2,5%	25	H	47,57	1,31	38	28	38	28	33	37
25-25H-2	2,5%	25	H	34,71	0,77	43	33	38	53	42	31
25-25H-3	2,5%	25	H	42,01	0,76	48	23	33	18	31	39
25-35H-1	2,5%	35	H	70,61	1,89	28	43	38	63	43	39
25-35H-2	2,5%	35	H	65,34	1,30	48	48	73	-	56	32
25-35H-3	2,5%	35	H	72,94	1,27	48	58	48	58	53	33

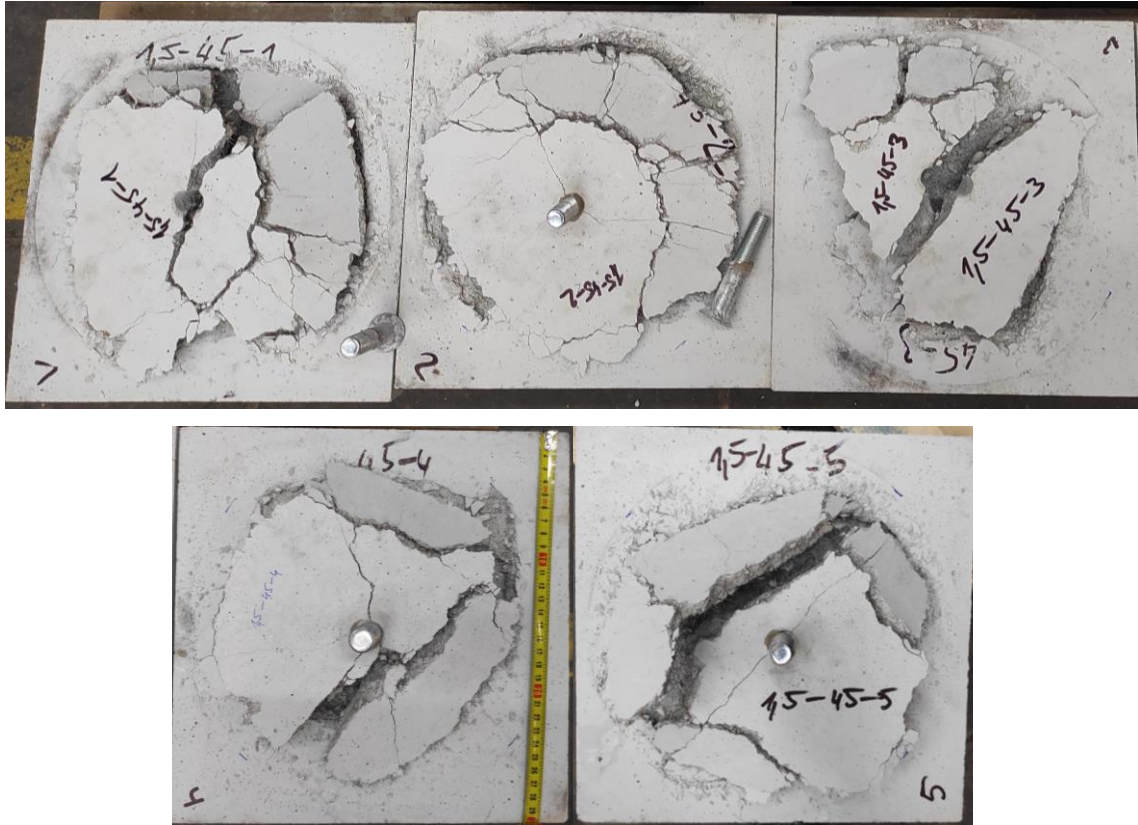
B.3. Fotodokumentace porušených vzorků



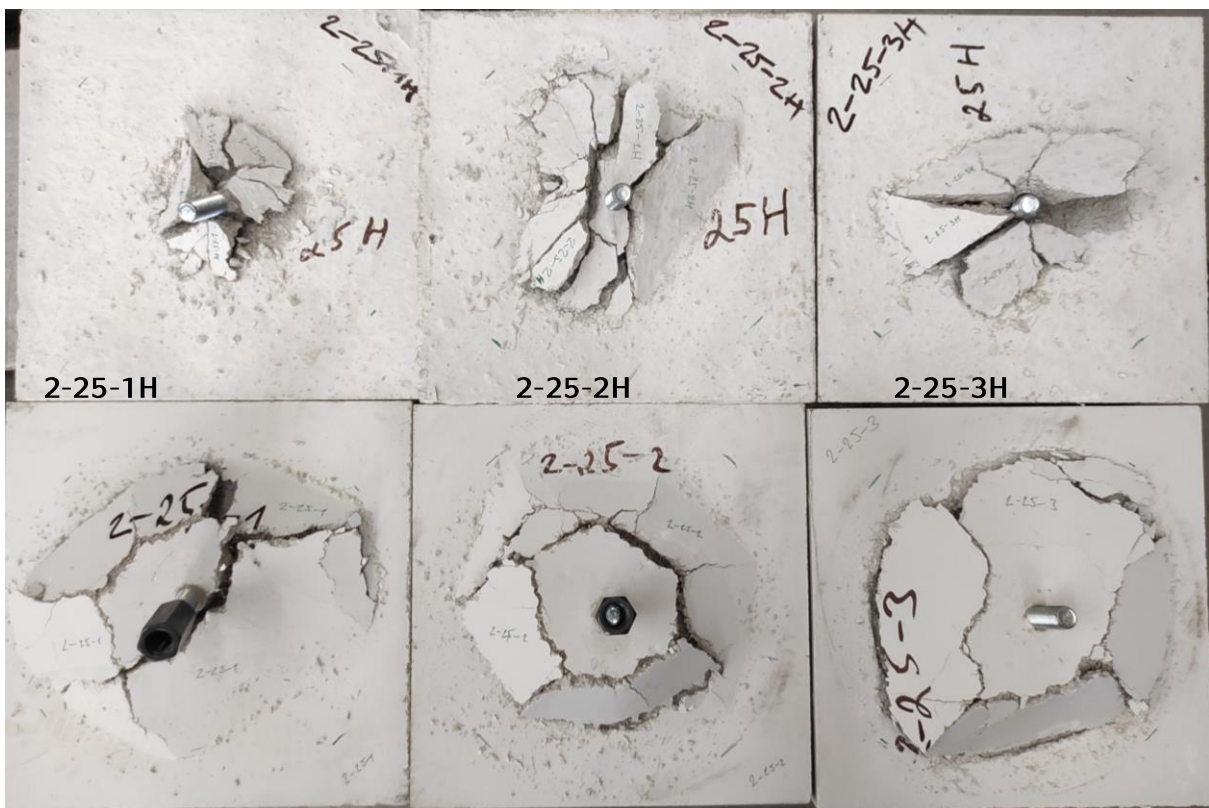
Obr. B-1 Tvar porušení vzorků série 1,5 %, $h_{ef} = 25$ mm



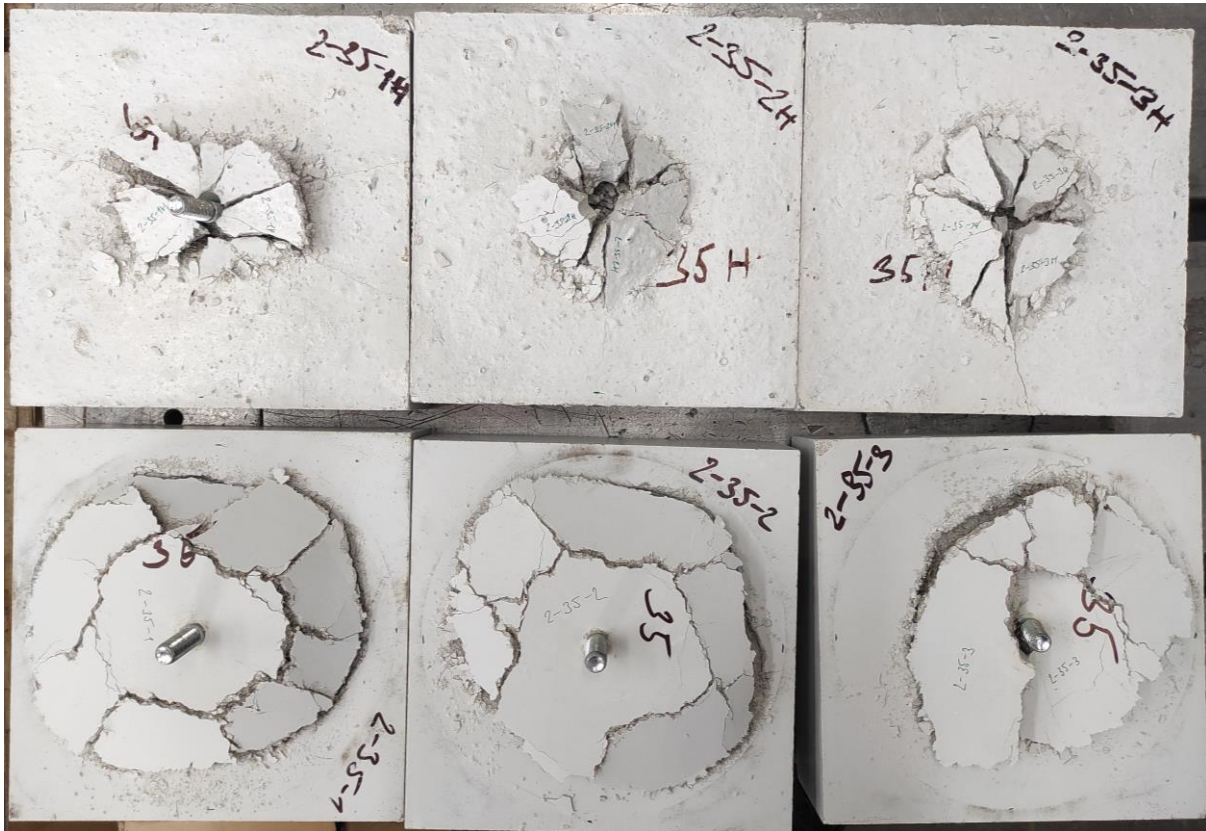
Obr. B-2 Tvar porušení vzorků série 1,5 %, $h_{ef} = 35$ mm



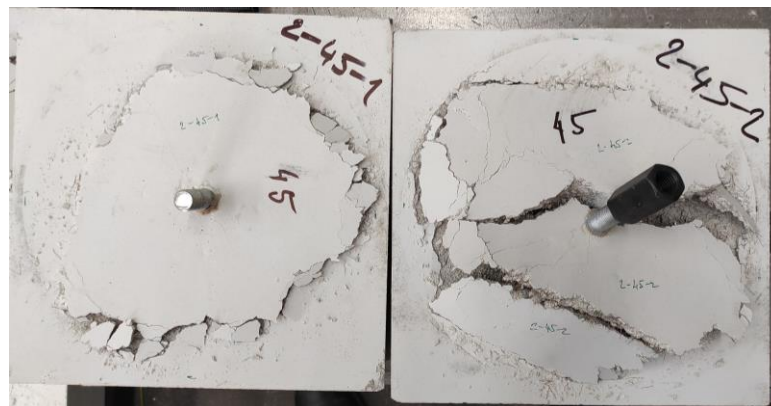
Obr. B-3 Tvar porušení vzorků série 1,5 %, $h_{ef} = 45$ mm



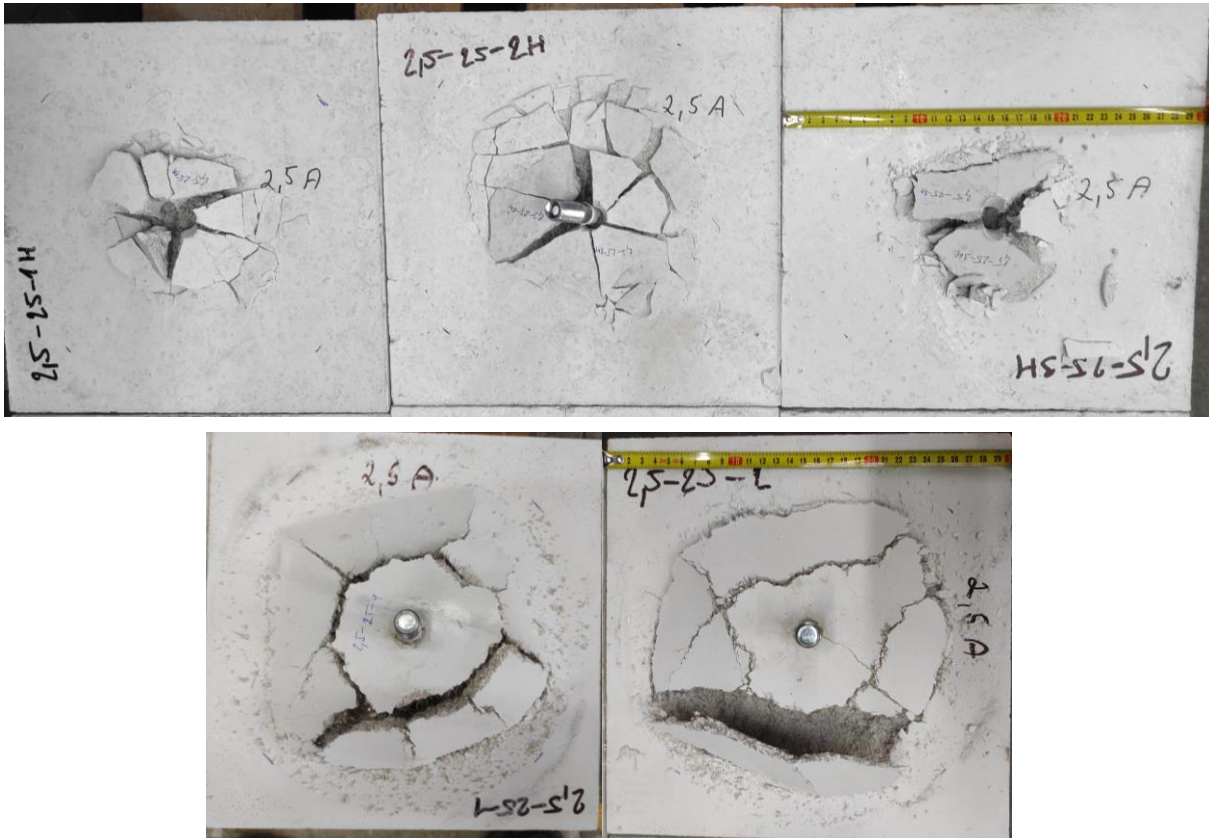
Obr. B-4 Tvar porušení vzorků série 2,0 %, $h_{ef} = 25$ mm; nahoře povrch (H), dole povrch (F)



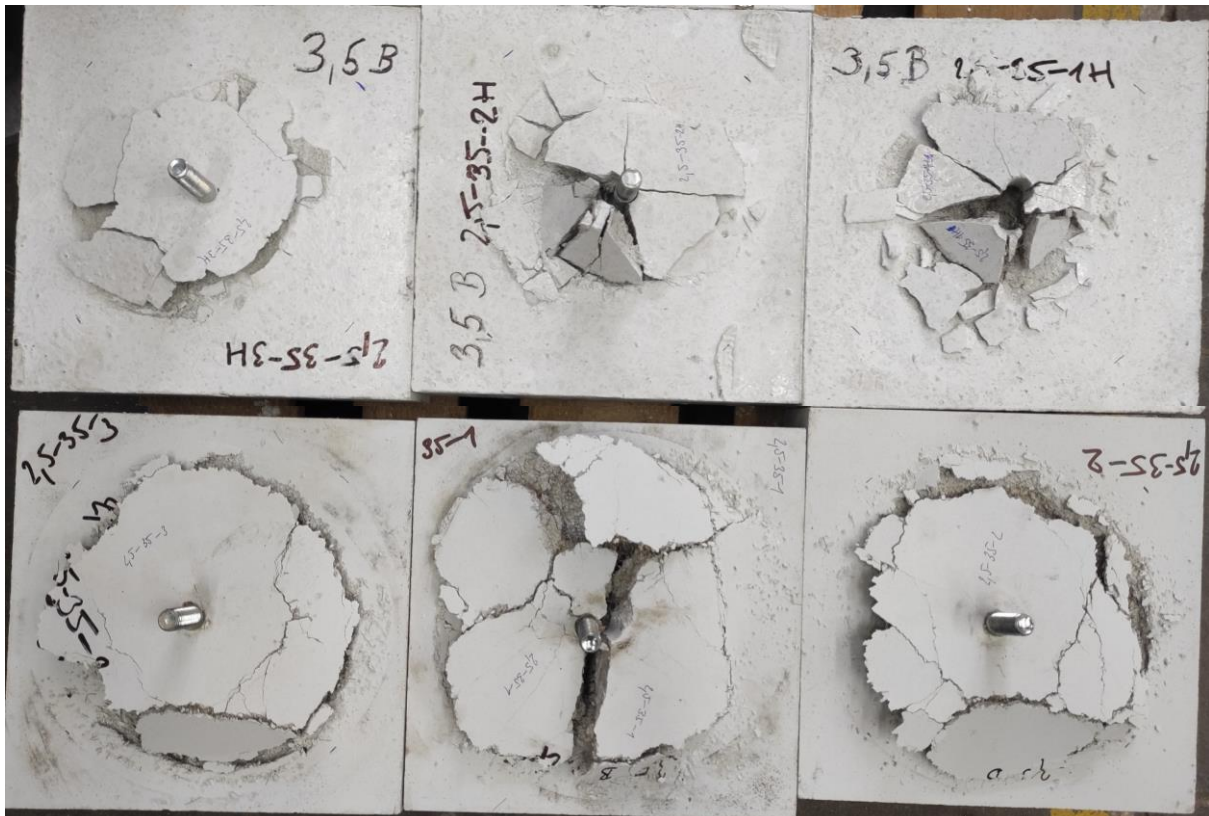
Obr. B-5 Tvar porušení vzorků série 2,0 %, $h_{ef} = 35$ mm; nahoře povrch (H), dole povrch (F)



Obr. B-6 Tvar porušení vzorků série 2,0 %, $h_{ef} = 45$ mm



Obr. B-7 Tvar porušení vzorků série 2,5 %, $h_{ef} = 25$ mm; nahoře povrch (H), dole povrch (F)



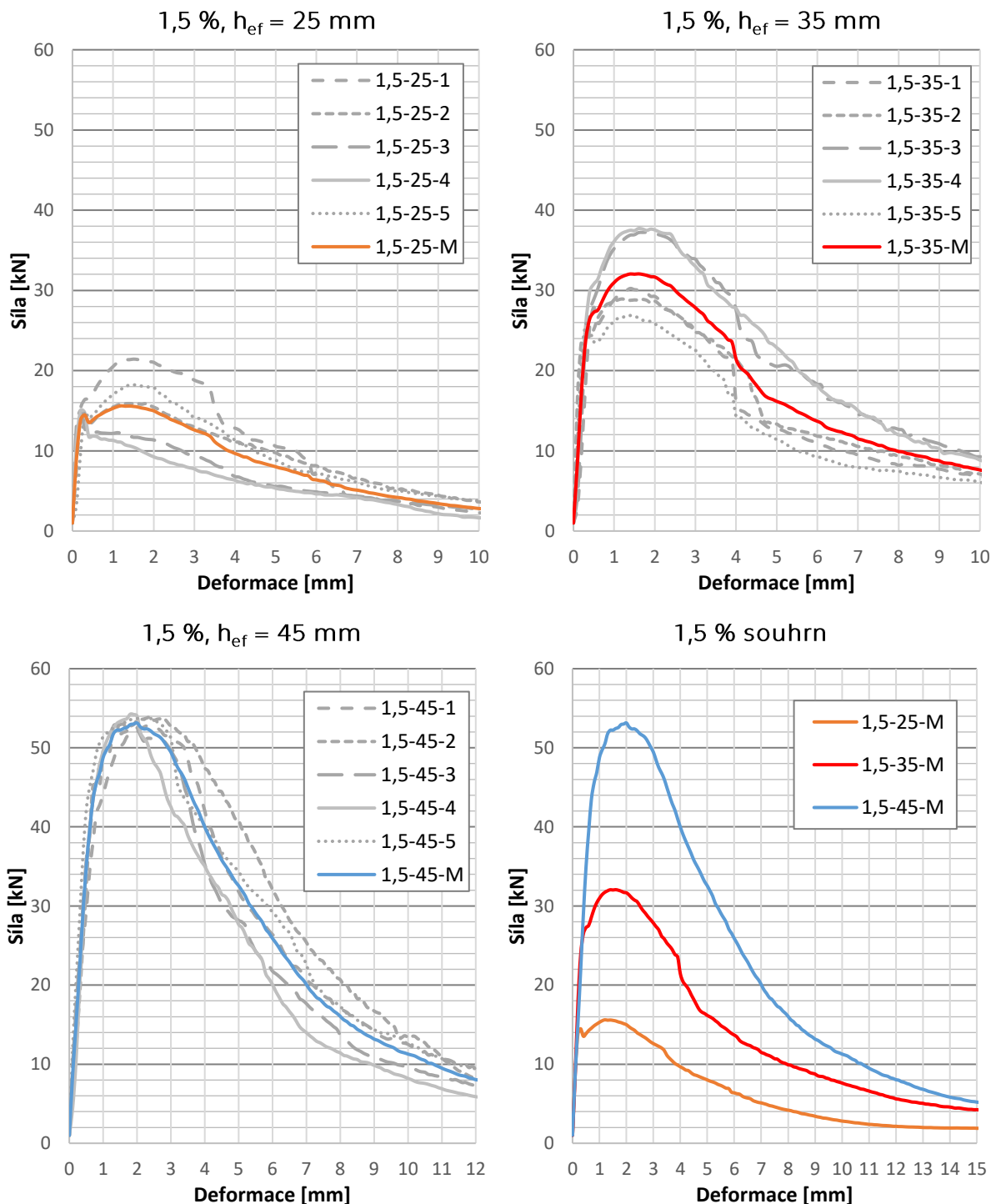
Obr. B-8 Tvar porušení vzorků série 2,5 %, $h_{ef} = 35$ mm; nahoře povrch (H), dole povrch (F)



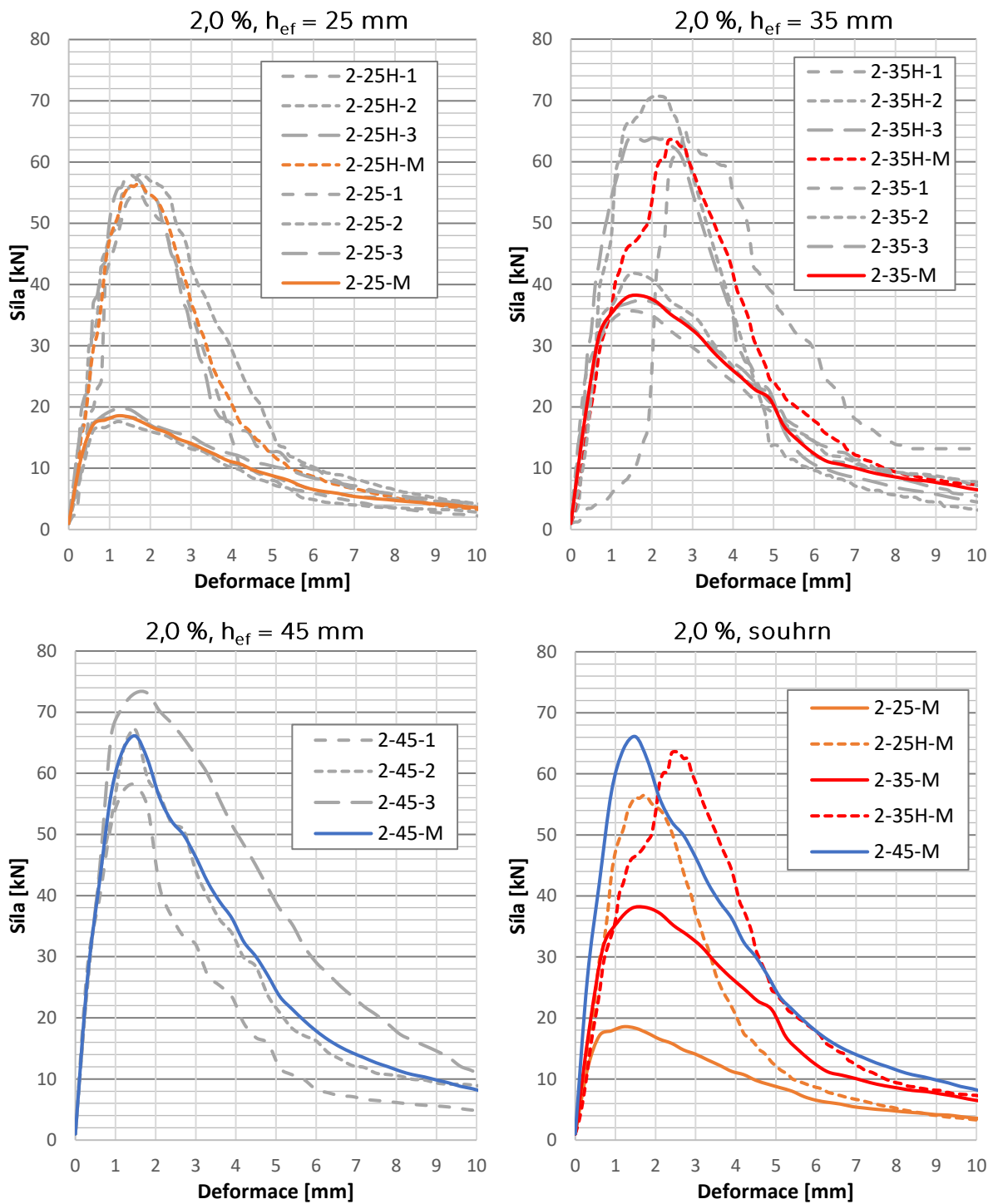
Obr. B-9 Tvar porušení vzorků série 2,5 %, $h_{ef} = 45$ mm

B.4. Pracovní digramy

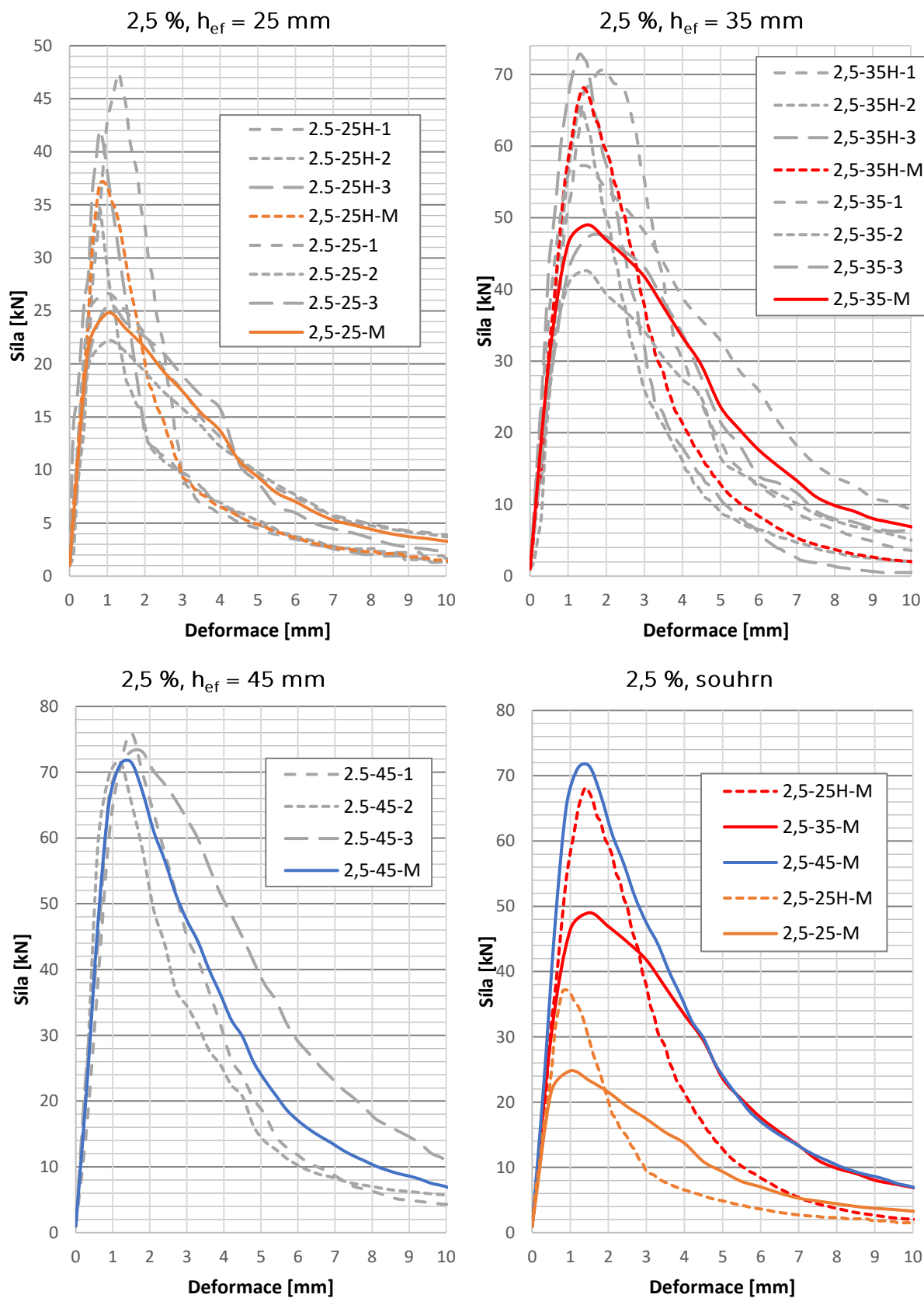
V této části jsou uvedeny grafy závislosti zatížení na deformaci pro každou jednotlivou zkoušku. Členěno podle sérií v_f a kotevních hloubek h_{ef} . Deformací je míněn průměr ze dvou LVDT snímačů.



Obr. B-10 Pracovní diagramy kotevních oblastí série 1,5 %



Obr. B-11 Pracovní diagramy kotevních oblastí série 2,0 %

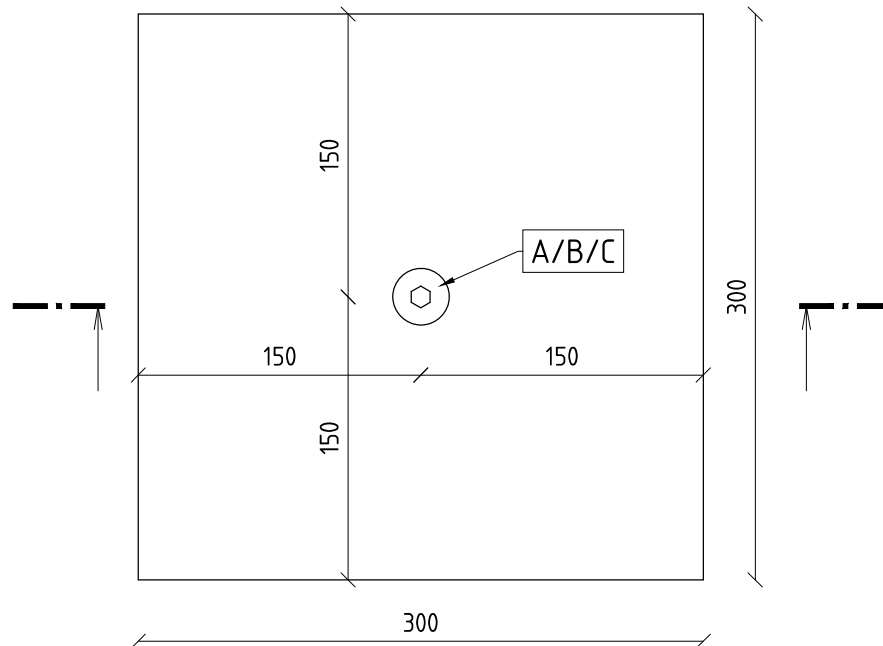


Obr. B-12 Pracovní diagramy kotevních oblastí série 2,5 %

B.5. Výrobní dokumentace

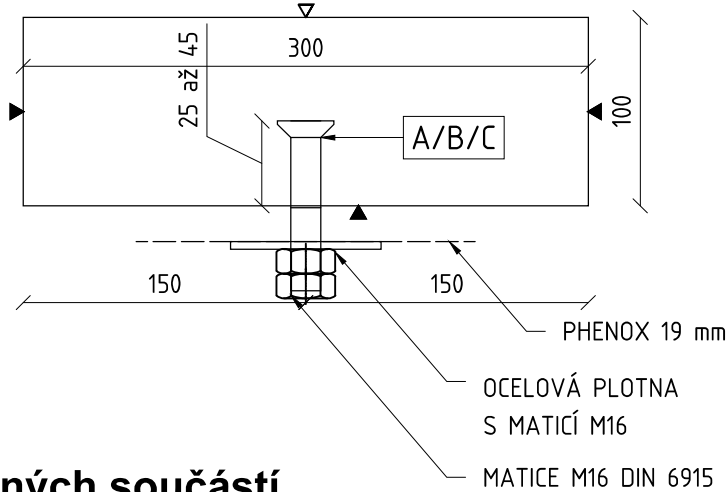
PŮDORYS

1:25



ŘEZ A-A

1:25



Výpis zabetonovaných součástí

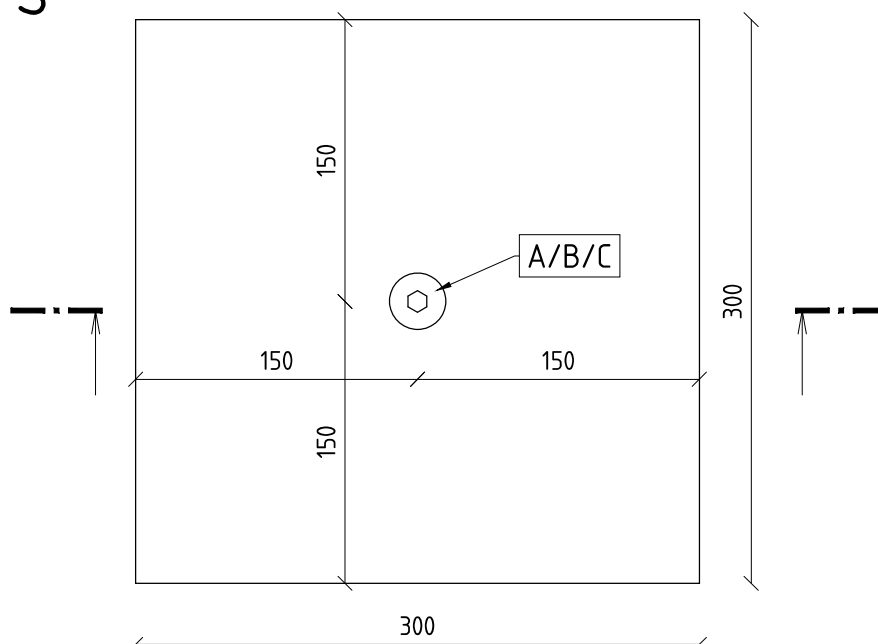
OZNAČENÍ	DOPLŇKY A KOVÁNÍ:	KS	POZNÁMKA
A	ŠROUB se zápusťnou hlavou DIN 7991 M16x070, 10.9 / h _{ef} = 25 mm	5	galvanicky pozink
B	ŠROUB se zápusťnou hlavou DIN 7991 M16x080, 10.9 / h _{ef} = 35 mm	5	galvanicky pozink
C	ŠROUB se zápusťnou hlavou DIN 7991 M16x090, 10.9 / h _{ef} = 45 mm	5	galvanicky pozink

h _{ef} (mm)	OBJEM (m ³)	HMOTNOST (kg)	POČET (ks)	
25	0,009	22,95	5	UHPC (PREMIX) Ocelové drátky 14/0,2 mm v _f : 118 kg/m ³ ; 1,5 %
35	0,009	22,95	5	
45	0,009	22,95	5	
CELKEM	0,135	344,25	15	

Obr. B-13 VTD, vzorky pro zkoušku kotvení v UHPFRC, 1,5 % (F)

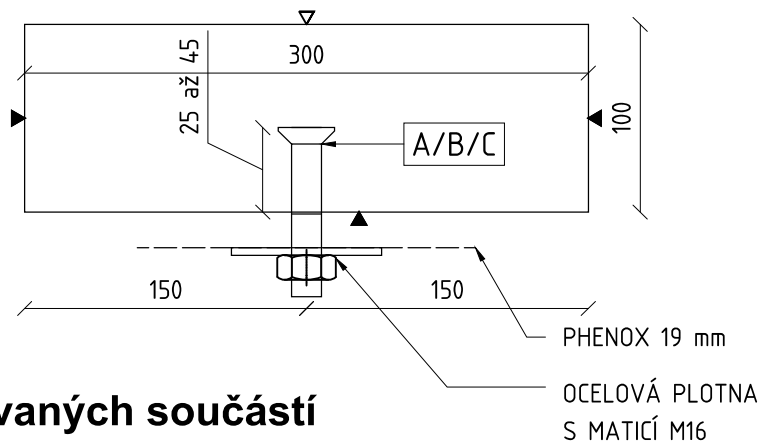
PŮDORYS

1:25



ŘEZ A-A

1:25



Výpis zabetonovaných součástí

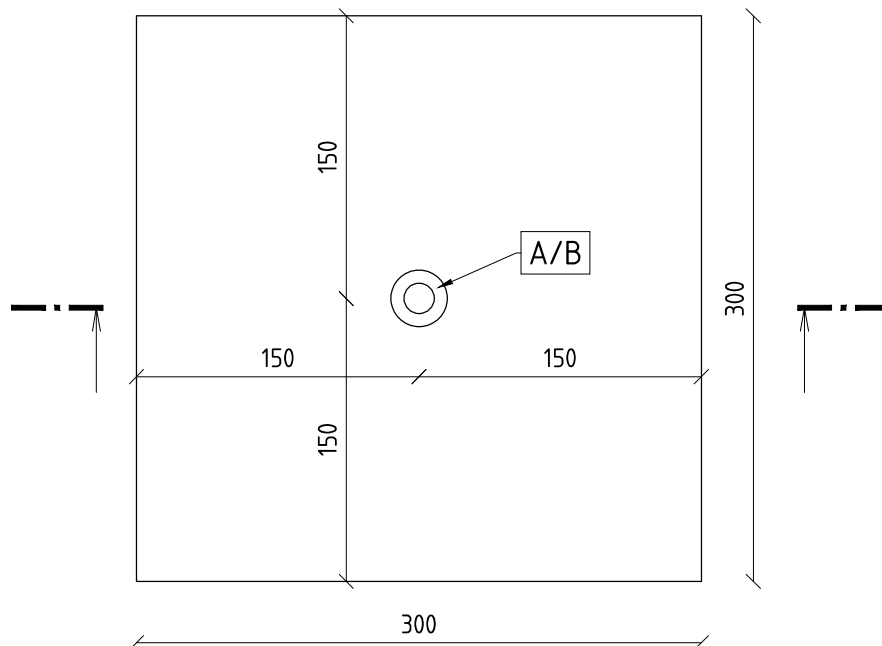
OZNAČENÍ	DOPLŇKY A KOVÁNÍ:	KS	POZNÁMKA
A	ŠROUB se zápuštnou hlavou DIN 7991 M16x070, 10.9 / $h_{ef} = 25$ mm	3	galvanicky pozink
B	ŠROUB se zápuštnou hlavou DIN 7991 M16x080, 10.9 / $h_{ef} = 35$ mm	3	galvanicky pozink
C	ŠROUB se zápuštnou hlavou DIN 7991 M16x090, 10.9 / $h_{ef} = 45$ mm	3	galvanicky pozink

h_{ef} (mm)	OBJEM (m ³)	HMOTNOST (kg)	POČET (ks)	
25	0,009	22,95	3	UHPC (PREMIX) Ocelové drátky 14/0,2 mm v_f : 157 kg/m ³ ; 2,0 %
35	0,009	22,95	3	
45	0,009	22,95	3	
CELKEM	0,081	206,55	9	

Obr. B-14 VTD, vzorky pro zkoušku kotvení v UHPFRC, 2,0 % (F)

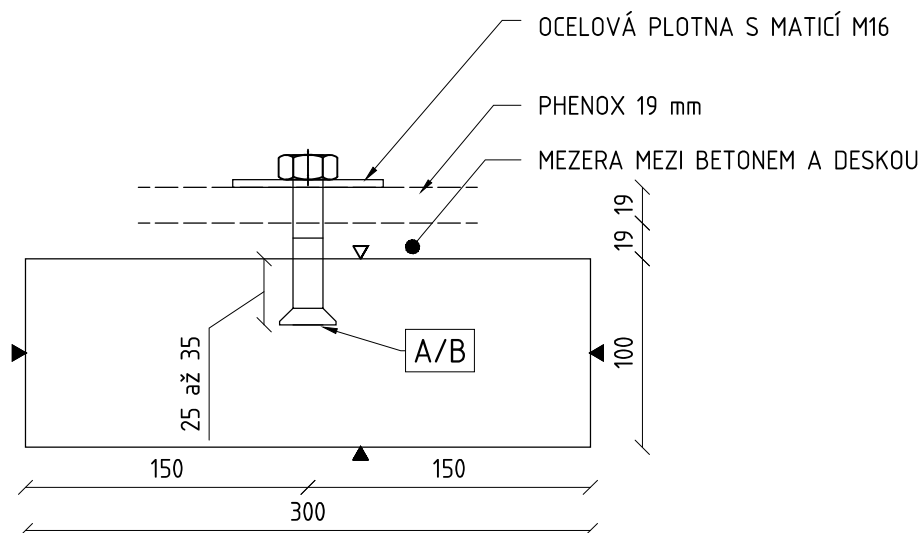
PŮDORYS

1:25



ŘEZ A-A

1:25



Výpis zabetonovaných součástí

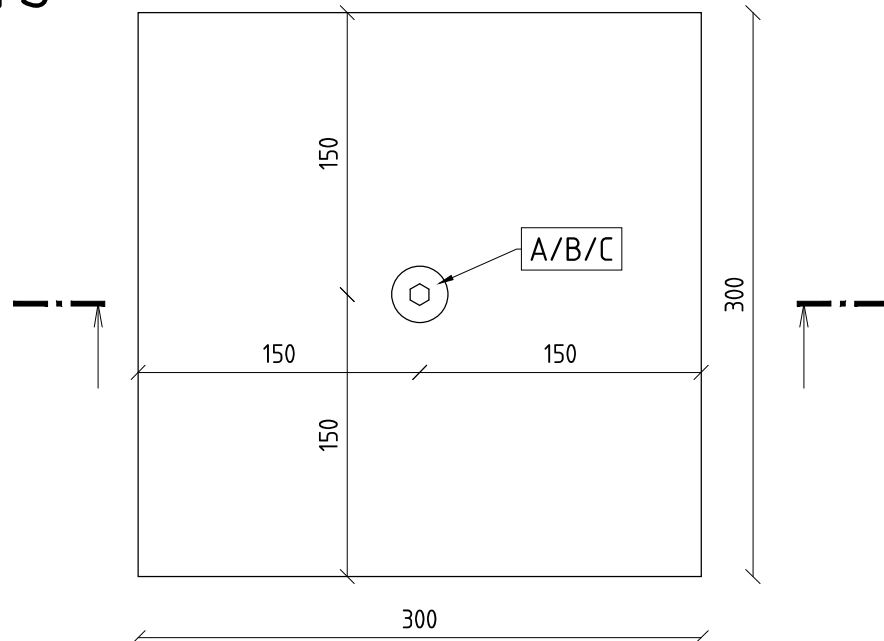
OZNAČENÍ	DOPLŇKY A KOVÁNÍ:	KS	POZNÁMKA
A	ŠROUB se zápustnou hlavou DIN 7991 M16x080, 10.9 / $h_{ef} = 25$ mm	3	galvanicky pozink
B	ŠROUB se zápustnou hlavou DIN 7991 M16x090, 10.9 / $h_{ef} = 35$ mm	3	galvanicky pozink

h_{ef} (mm)	OBJEM (m ³)	HMOTNOST (kg)	POČET (ks)	
25	0,009	22,95	3	UHPC (PREMIX) Ocelové drátky 14/0,2 mm v_f : 157 kg/m ³ ; 2,0 %
35	0,009	22,95	3	
CELKEM	0,054	137,7	6	

Obr. B-15 VTD, vzorky pro zkoušku kotvení v UHPC, 2,0 % (H)

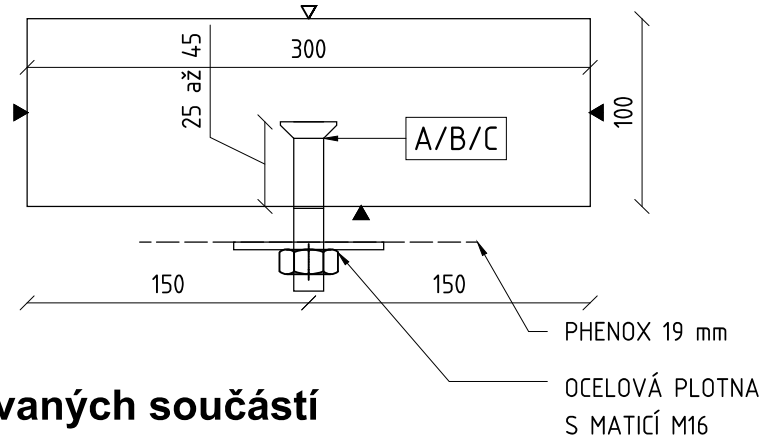
PŮDORYS

1:25



ŘEZ A-A

1:25



Výpis zabetonovaných součástí

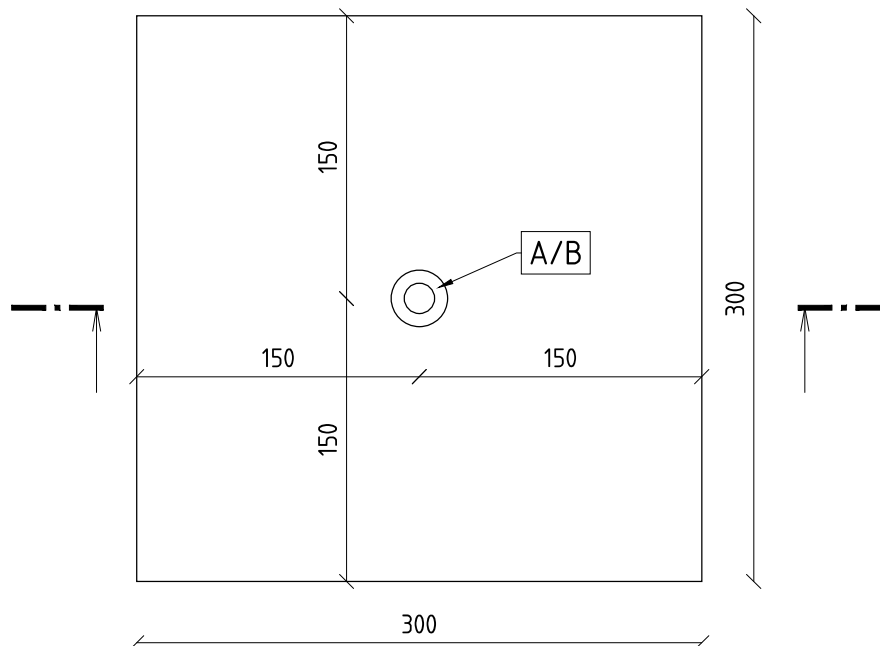
OZNAČENÍ	DOPLŇKY A KOVÁNÍ:	KS	POZNÁMKA
A	ŠROUB se zápusťnou hlavou DIN 7991 M16x070, 10.9 / $h_{ef} = 25$ mm	3	galvanicky pozink
B	ŠROUB se zápusťnou hlavou DIN 7991 M16x080, 10.9 / $h_{ef} = 35$ mm	3	galvanicky pozink
C	ŠROUB se zápusťnou hlavou DIN 7991 M16x090, 10.9 / $h_{ef} = 45$ mm	3	galvanicky pozink

h_{ef} (mm)	OBJEM (m ³)	HMOTNOST (kg)	POČET (ks)	
25	0,009	22,95	3	UHPFRC (PREMIX) Ocelové drátky 14/0,2 mm v.f: 196 kg/m ³ ; 2,5 %
35	0,009	22,95	3	
45	0,009	22,95	3	
CELKEM	0,081	206,55	9	

Obr. B-16 VTD, vzorky pro zkoušku kotvení v UHPFRC, 2,5 % (F)

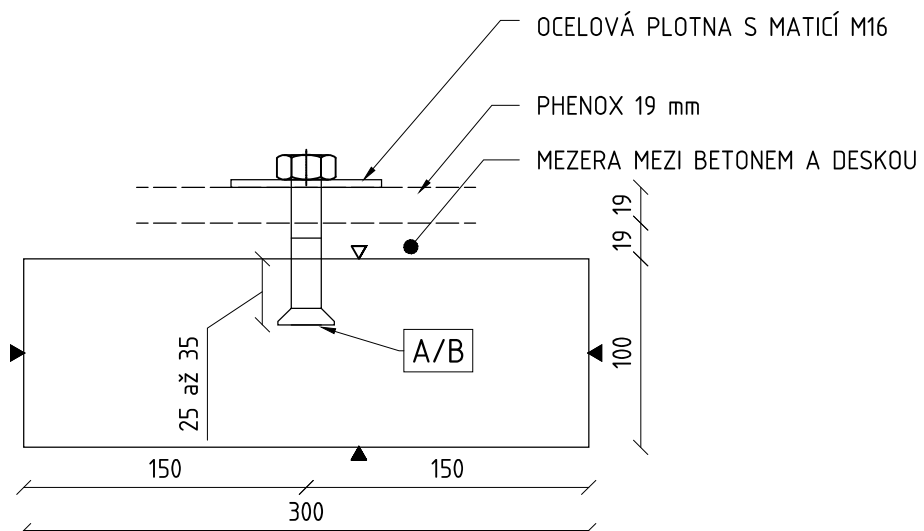
PŮDORYS

1:25



ŘEZ A-A

1:25



Výpis zabetonovaných součástí

OZNAČENÍ	DOPLŇKY A KOVÁNÍ:	KS	POZNÁMKA
A	ŠROUB se zápustnou hlavou DIN 7991 M16x080, 10.9 / $h_{ef} = 25$ mm	3	galvanicky pozínk
B	ŠROUB se zápustnou hlavou DIN 7991 M16x090, 10.9 / $h_{ef} = 35$ mm	3	galvanicky pozínk

h_{ef} (mm)	OBJEM (m ³)	HMOTNOST (kg)	POČET (ks)	
25	0,009	22,95	3	UHPC (PREMIX) Ocelové drátky 14/0,2 mm v_f : 196 kg/m ³ ; 2,5 %
35	0,009	22,95	3	
CELKEM	0,054	137,7	6	

Obr. B-17 VTD, vzorky pro zkoušku kotvení v UHPFRC, 2,5 % (H)

C. Výsledky zkoušek kotvení v nosnících z UHPFRC

C.1. Fotodokumentace porušených vzorků

Následující snímky dokumentují stav zkušebních vzorků po provedení zkoušky kotvení v nosnících.



Obr. C-1 Porušení vzorku I'-X-B

Obr. C-2 Porušení vzorku I'-X-A



Obr. C-3 Porušení vzorku I'-Y-B



Obr. C-4 Porušení vzorku I'-Y-A



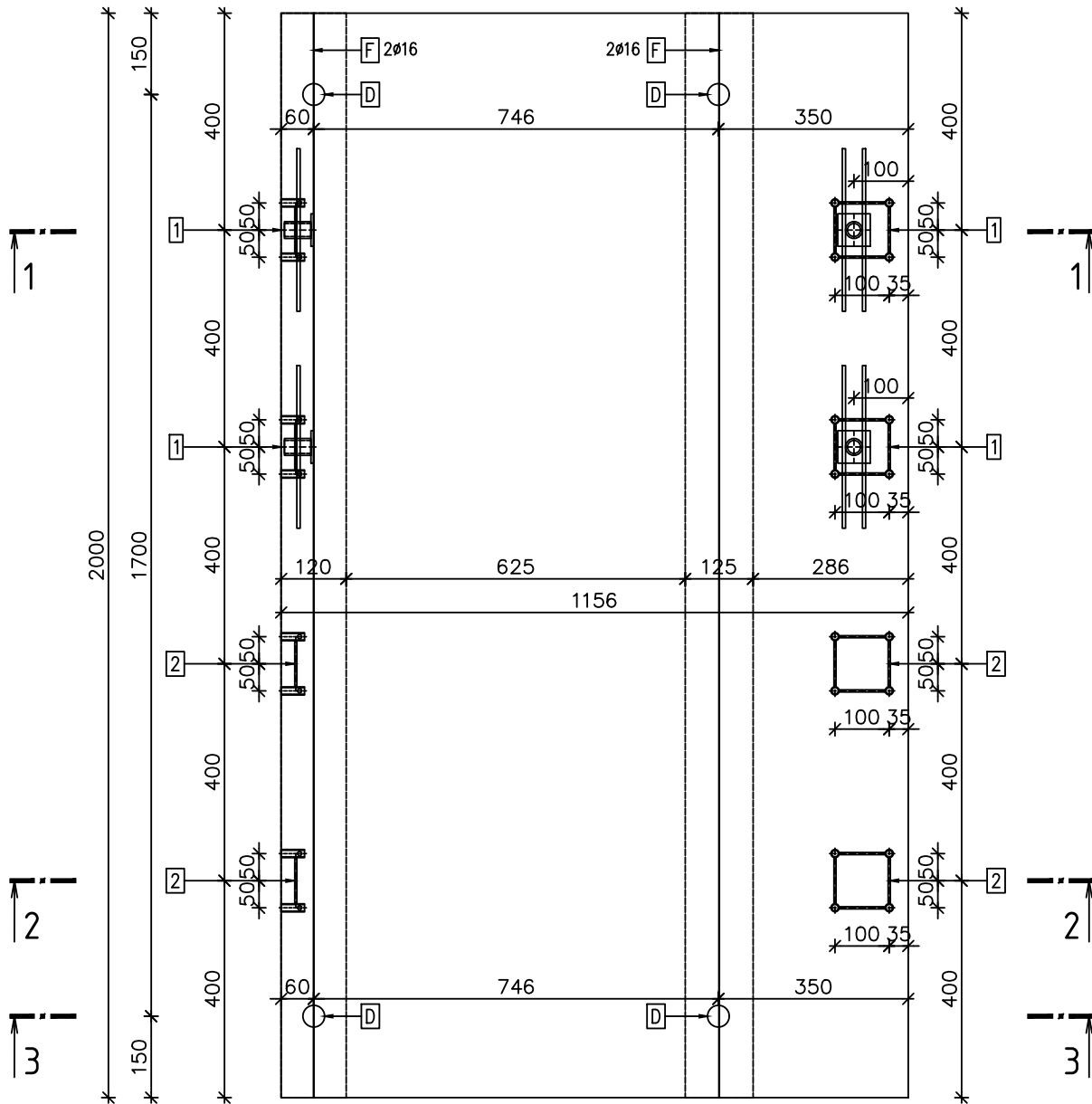
Obr. C-5 Porušení vzorku III-X-A



Obr. C-6 Porušení vzorku I-X-B

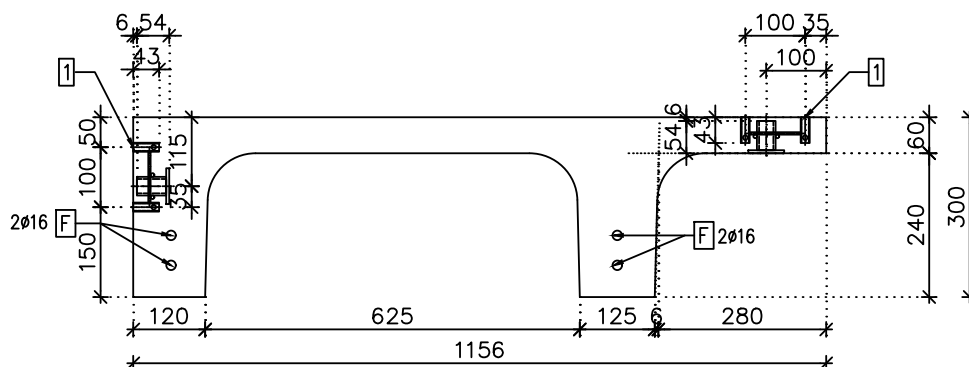
C.2. Výrobní dokumentace

Půdorys LMR1

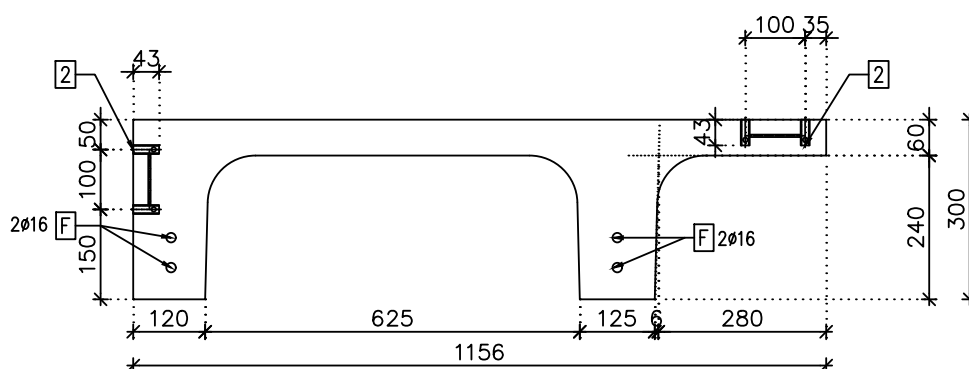


Obr. C-7 VTD, půdorys zkušebního nosníku LMR1

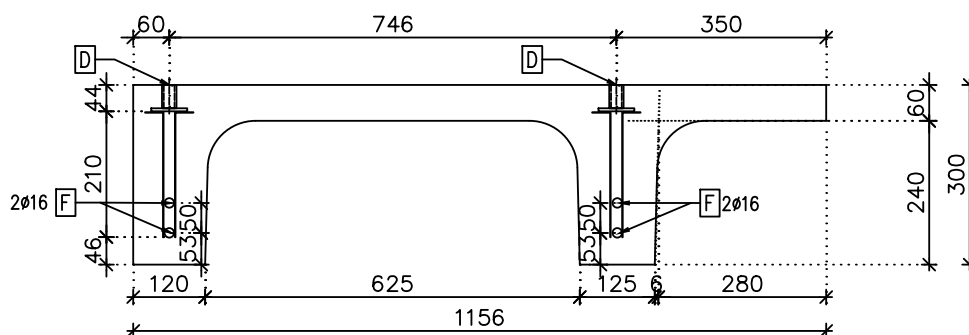
Řez 1-1



Řez 2-2



Řez 3-3

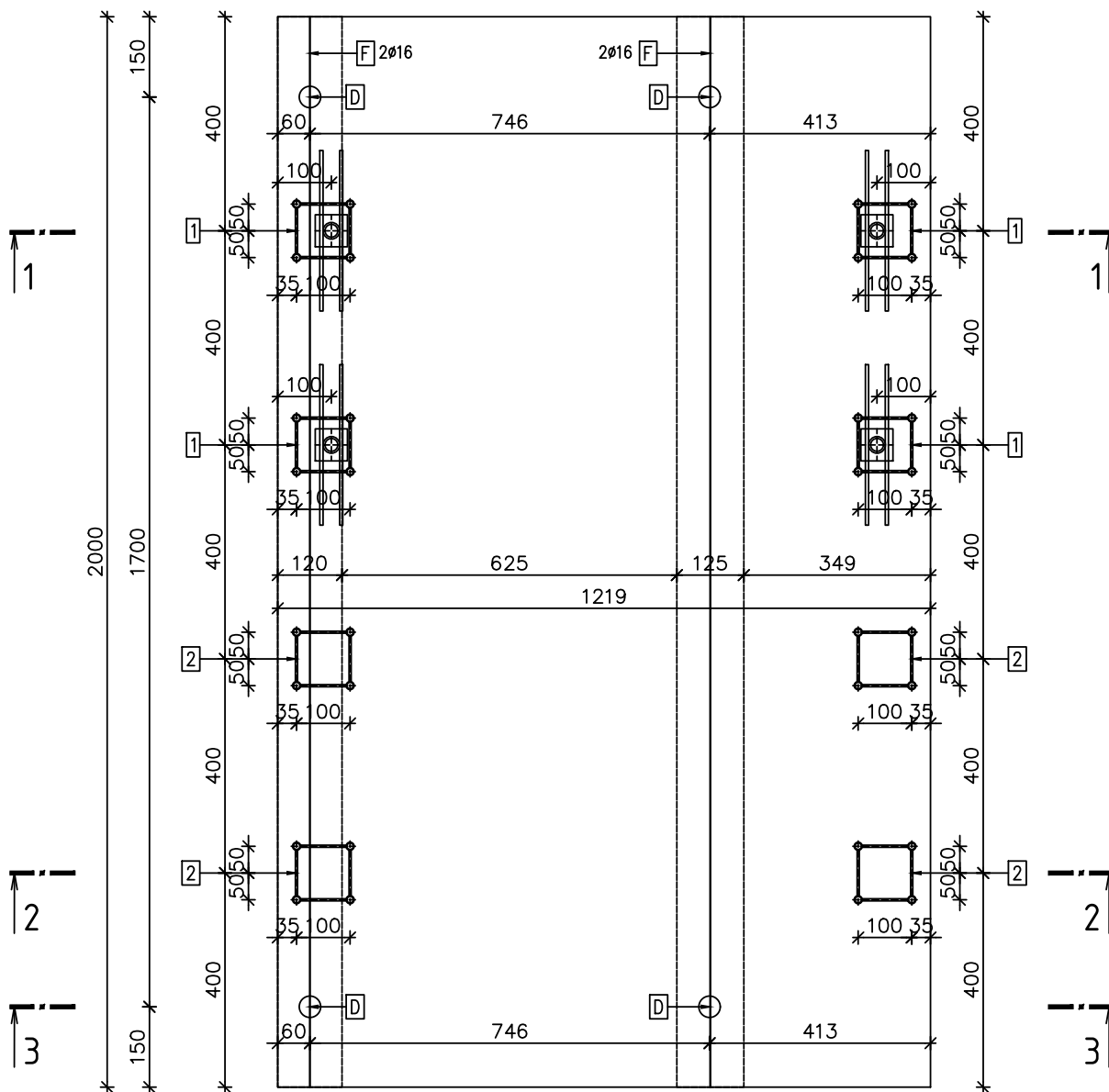


Výpis zabetonovaných součástí pro 1ks

OZNAČENÍ	DOPLŇKY A KOVÁNÍ:	KS	POZNÁMKA
A	Příčně děrovaná nelisovaná objímka Kontakt-SK č. 0050, Rd 12x43 (0,5t)	32	GALVANIZAČNĚ POZINKOVANÁ OCEĽ
B	Plochá kotva Kontakt-SK č. 0360, Rd 24 x 54 (2,5t)	4	GALVANIZAČNĚ POZINKOVANÁ OCEĽ
C	Kulatina Ø4 mm, dl. 85 mm	32	S235 s opoxid. nýtěrem, nebo nerez A2
D	Plochá kotva Kontakt-SK č. 0356, Rd 18 x 44 (1,6t)	4	GALVANIZAČNĚ POZINKOVANÁ OCEĽ
E	Výztuž Ø6 mm, dl. 300 mm	8	B500 B
F	Výztuž Ø16 mm, dl. 2000 mm	4	B500 B
G	Výztuž Ø6 mm, dl. 240 mm	8	B500 B

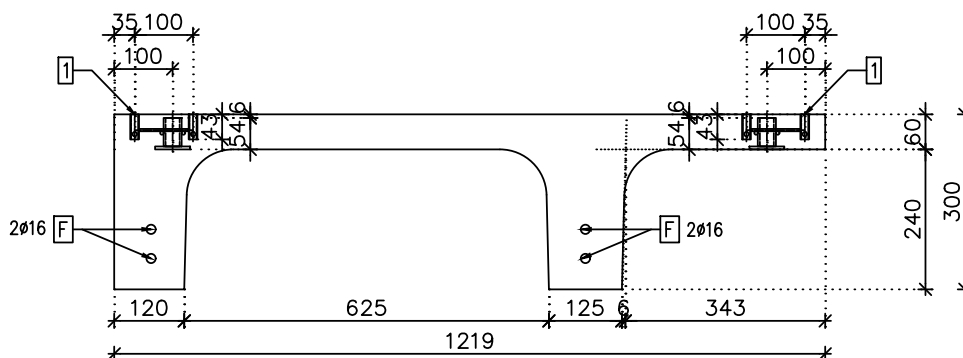
Obr. C-8 VTD, příčné řezy zkušebním nosníkem LMR1

Půdorys LMR2

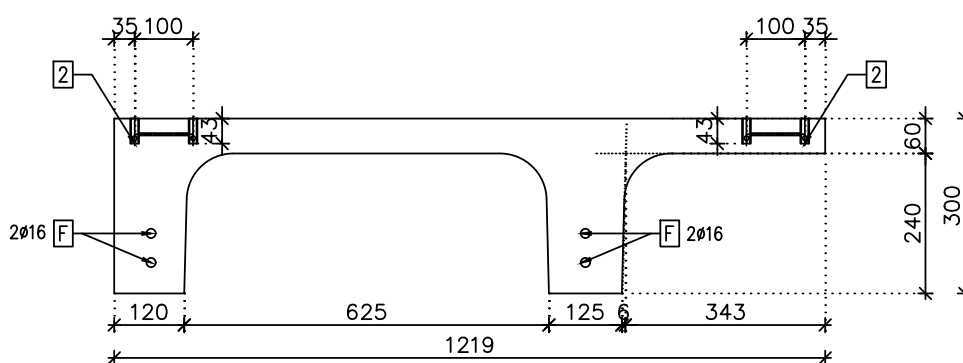


Obr. C-9 VTD, půdorys zkušební nosníku LMR2

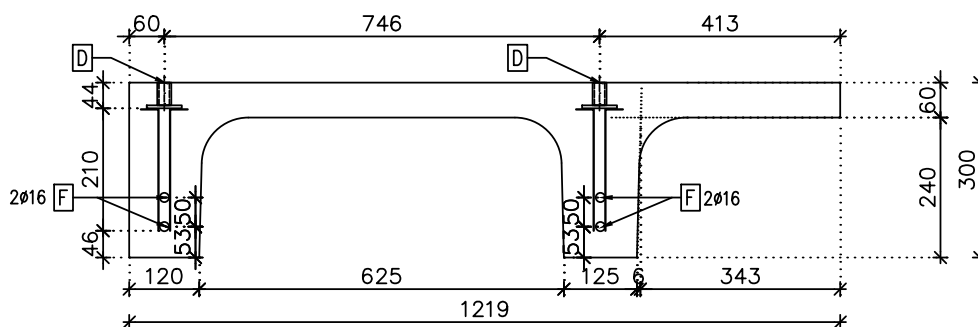
Řez 1-1



Řez 2-2



Řez 3-3



Výpis zabetonovaných součástí pro 1ks

OZNAČENÍ	DOPLŇKY A KOVÁNÍ:	KS	POZNÁMKA
A	Příčně děrovaná nelisovaná objímka Kontakt-SK č. 0050, Rd 12x43 (0,5t)	32	GALVANIZAČNĚ POZINKOVANÁ OCEĽ
B	Plochá kotva Kontakt-SK č. 0360, Rd 24 x 54 (2,5t)	4	GALVANIZAČNĚ POZINKOVANÁ OCEĽ
C	Kulatina Ø4 mm, dl. 85 mm	32	S235 s opoxid. nýtěrem, nebo nerez A2
D	Plochá kotva Kontakt-SK č. 0356, Rd 18 x 44 (1,6t)	4	GALVANIZAČNĚ POZINKOVANÁ OCEĽ
E	Výztuž Ø6 mm, dl. 300 mm	8	B500 B
F	Výztuž Ø16 mm, dl. 2000 mm	4	B500 B
G	Výztuž Ø6 mm, dl. 240 mm	8	B500 B

Obr. C-10 VTD, příčné řezy zkušebním nosníkem LMR2

D. Seznamy

D.1. Seznam ilustrací

Obr. A-1 Pracovní diagramy kotvení v HPFRC, prostý tah, jedna kotva, stáří 1 dní.....	156
Obr. A-2 Pracovní diagramy kotvení v HPFRC, prostý tah, jedna kotva, stáří 7 dní.....	157
Obr. A-3 Pracovní digramy kotvení v HPFRC, prostý tah, dvojice kotev, stáří 1 den	158
Obr. A-4 Pracovní digramy kotvení v HPFRC, prostý tah, dvojice kotev, stáří 7 dní	159
Obr. A-5 Pracovní digramy kotvení v HPFRC, smyk, jedna kotva, stáří 1 den	160
Obr. A-6 Pracovní digramy kotvení v HPFRC, smyk, jedna kotva, stáří 7 dní	161
Obr. A-7 Pracovní digramy kotvení v HPFRC, smyk, dvojice kotev, stáří 1 den.....	162
Obr. A-8 Pracovní digramy kotvení v HPFRC, smyk, dvojice kotev, stáří 7 dní.....	163
Obr. A-9 Pracovní digramy kotvení v HPFRC, smyk, dvojice kotev, stáří 14 dní.....	164
Obr. A-10 Pracovní digramy, kombinované namáhání, dvojice kotev M6 a M8, stáří 1 den	165
Obr. A-11 Pracovní digramy, kombinované namáhání, dvojice kotev M10, stáří 1 den	166
Obr. A-12 Pracovní digramy, kombinované namáhání, dvojice kotev, stáří 7 dní	167
Obr. B-1 Tvar porušení vzorků série 1,5 %, $h_{ef} = 25$ mm	172
Obr. B-2 Tvar porušení vzorků série 1,5 %, $h_{ef} = 35$ mm	172
Obr. B-3 Tvar porušení vzorků série 1,5 %, $h_{ef} = 45$ mm	173
Obr. B-4 Tvar porušení vzorků série 2,0 %, $h_{ef} = 25$ mm; nahoře povrch (H), dole povrch (F) ..	173
Obr. B-5 Tvar porušení vzorků série 2,0 %, $h_{ef} = 35$ mm; nahoře povrch (H), dole povrch (F) ..	174
Obr. B-6 Tvar porušení vzorků série 2,0 %, $h_{ef} = 45$ mm	174
Obr. B-7 Tvar porušení vzorků série 2,5 %, $h_{ef} = 25$ mm; nahoře povrch (H), dole povrch (F) ..	175
Obr. B-8 Tvar porušení vzorků série 2,5 %, $h_{ef} = 35$ mm; nahoře povrch (H), dole povrch (F) ..	175
Obr. B-9 Tvar porušení vzorků série 2,5 %, $h_{ef} = 45$ mm	176
Obr. B-10 Pracovní diagramy kotevních oblastí série 1,5 %	177
Obr. B-11 Pracovní diagramy kotevních oblastí série 2,0 %	178
Obr. B-12 Pracovní diagramy kotevních oblastí série 2,5 %	179
Obr. B-13 VTD, vzorky pro zkoušku kotvení v UHPFRC, 1,5 % (F).....	180
Obr. B-14 VTD, vzorky pro zkoušku kotvení v UHPFRC, 2,0 % (F).....	181
Obr. B-15 VTD, vzorky pro zkoušku kotvení v UHPFRC, 2,0 % (H)	182
Obr. B-16 VTD, vzorky pro zkoušku kotvení v UHPFRC, 2,5 % (F).....	183
Obr. B-17 VTD, vzorky pro zkoušku kotvení v UHPFRC, 2,5 % (H)	184
Obr. C-1 Porušení vzorku I'-X-B	185
Obr. C-2 Porušení vzorku I'-X-A	185
Obr. C-3 Porušení vzorku I'-Y-B	185
Obr. C-4 Porušení vzorku I'-Y-A	186
Obr. C-5 Porušení vzorku III-X-A	186
Obr. C-6 Porušení vzorku I-X-B	187

Obr. C-7 VTD, půdorys zkušebního nosníku LMR1	188
Obr. C-8 VTD, příčné řezy zkušebním nosníkem LMR1	189
Obr. C-9 VTD, půdorys zkušebního nosníku LMR2	190
Obr. C-10 VTD, příčné řezy zkušebním nosníkem LMR2	191

D.2. Seznam tabulek

Tab. A-1 Souhrn výsledků zkoušek kotvení v HPFRC, atypické, jedna kotva, prostý tah	147
Tab. A-2 Souhrn výsledků zkoušek kotvení v HPFRC, jedna kotva, prostý tah.....	148
Tab. A-3 Souhrn výsledků zkoušek kotvení v HPFRC, dvojice kotev, prostý tah	149
Tab. A-4 Souhrn výsledků zkoušek kotvení v HPFRC, jedna kotva, smyk	151
Tab. A-5 Souhrn výsledků zkoušek kotvení v HPFRC, dvojice kotev, smyk.....	152
Tab. A-6 Souhrn výsledků zkoušek kotvení v HPFRC, dvojice kotev, kombinace N+V.....	154
Tab. B-1 Pevnost UHPC v tahu za ohybu dle ČSN EN 14 651+A1, reziduální hodnoty pevnosti, série $v_f = 1,5 \%$, stáří 3 dny	168
Tab. B-2 Pevnost UHPC v tahu za ohybu dle ČSN EN 14 651+A1, reziduální hodnoty pevnosti, série $v_f = 2,0 \%$, stáří 3 dny	168
Tab. B-3 Pevnost UHPC v tahu za ohybu dle ČSN EN 14 651+A1, reziduální hodnoty pevnosti, série $v_f = 2,5 \%$, stáří 3 dny	168
Tab. B-4 Souhrn výsledků tahových zkoušek kotvení v UHPFRC	170