



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

INSTITUTE OF BUILDING TESTING

**TESTOVÁNÍ SYSTÉMU HELIKÁLNÍCH VÝZTUŽÍ
VE VZTAHU K PLÁNOVANÉMU VYUŽITÍ
PŘI ZAJIŠTĚNÍ EXISTUJÍCÍCH KONSTRUKCÍ**

TESTING OF TWISTED STEEL BARS SYSTEM IN RELATION TO THE INTENDED USE
IN STRENGTHENING OF EXISTING STRUCTURES

DISERTAČNÍ PRÁCE

PHD THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. ONDŘEJ BALKANSKÝ

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. Ing. PAVEL SCHMID, Ph.D.

BRNO 2024

Abstrakt

Předkládaná práce popisuje výzkum v oblasti statického zajištění existujících staveb systémem nerezové helikální výztuže se zaměřením na možnosti testování jeho použití. Cíle jsou stanoveny na základě rešerše a na základě doprovodných experimentů zaměřených na jednotlivé komponenty systému i na jejich interakci s vyztuženým prvkem. Hlavním cílem je zjištění, zda a do jaké míry je některá z metod diagnostiky stavebních konstrukcí schopná předpovědět testované chování drážkového spoje helikální výztuže s konstrukčním materiálem. Vedlejším cílem je popis samotného chování výztuže kotvené v drážce a ověření možnosti použití trámčové zkoušky k testování tohoto spoje za použití množství a formy materiálu, které by při odběru nepoškodily stávající konstrukci.

Cílů je dosaženo porovnáváním výsledků diagnostiky vzorků s výsledky chování spojů helikální výztuže získaných trámčovou zkouškou na stejných vzorcích z různě (teplotně) degradovaného betonu. Na straně diagnostiky jsou výsledky pevnosti v tlaku, síly při odtrhové zkoušce, vlastní frekvence zjištěné metodou Impact-Echo, rychlosti šíření ultrazvuku a hodnoty odrazu Schmidtova kladívka. Na straně výsledků trámčové zkoušky je chování drážkových spojů, reprezentované různými indikátory. K porovnání, nalezení vztahů i vyjádření míry korelace je použita vážená lineární regrese metodou nejmenších čtverců.

Hlavním zjištěním je nalezení závislosti tuhosti drážkového spoje na pevnosti v tlaku, rychlosti šíření ultrazvuku a první vlastní frekvenci betonových vzorků. Vedlejším zjištěním je potvrzení možnosti testování spoje v drážce pomocí trámčové zkoušky na malých tělesech o rozměrech jádrových vývrtů. Obě zjištění vedou k možnosti snadného určení tuhosti spoje, a tím umožňují jednoduchý návrh opravy konstrukce pomocí helikální výztuže. Celou práci doplňují doprovodná měření, která buď přímo podporují hlavní experimenty, nebo doplňují znalosti o možnostech testování bez výrazného vlivu na hlavní záměr práce. Do první skupiny patří například tepelná degradace betonu a tradiční zkoušky výztuže, zatímco do druhé skupiny patří měření deformace helikální výztuže systémem pracujícím na principu DIC – „Digital Image Correlation“ a zkoušky kotevní zálivky. Výsledky otevírají možnosti širšího výzkumu v této oblasti, po kterém by mohlo být umožněno využití v běžné praxi.

Klíčová slova

Helikální výztuž, kotvení v drážce, trámčová zkouška, stavební diagnostika

Abstract

The presented thesis describes research in the field of structural strengthening of existing buildings using twisted stainless steel bars with a focus on the possibilities of its testing. The objectives are based on research and accompanying experiments focused on the individual components of the system as well as their interaction with reinforced elements. The main objective is to determine whether and to what extent any of the methods of building structure diagnostics can predict tested behaviour of the groove joint of twisted steel bars with the substrate structure material. A secondary objective is to describe the twisted steel bar groove joint behaviour itself and to investigate the possibility of using a beam test to test this connection using a quantity and form of material that would not cause damage to the existing structure when removed.

The objectives are achieved by comparing the results of specimens diagnostics and the results of twisted steel bars groove joint behaviour obtained by beam testing of the same specimens made of differently (thermally) degraded concrete. On the diagnostics side are the results of compressive strength, pull-off force, first longitudinal frequency determined by Impact-Echo, ultrasonic pulse velocity and Schmidt hammer rebound number value. On the beam test results side are various indicators representing the behaviour of the groove joints. Weighted least squares linear regression is used to find correlations.

The main finding is the existence of dependency of the groove joint stiffness on the compressive strength, ultrasonic pulse velocity and first longitudinal frequency of concrete specimens. A secondary finding is the confirmation of the possibility of testing the groove joint using a beam test on small core-drill-size specimens. Both findings lead to the possibility of easily determining the stiffness of the groove joint, thus allowing simple design of structural repairs using twisted steel bars. Presented work is complemented by accompanying measurements, which either directly support the main experiments or supplement knowledge about testing options without significant influence on the main purpose of the work. The first group includes thermal degradation of concrete and traditional reinforcement tests, and the second group includes the measurement of the deformation of helical reinforcement with a system working on the DIC principle – "Digital Image Correlation" and anchor grout tests. The results open up the possibility of further research in this area, after which it could be possible to use described approaches in the common practice.

Keywords

Twisted steel bar, groove joint, beam test, building diagnostics

Bibliografická citace

BALKANSKÝ, Ondřej. *Testování systému helikálních výztuží ve vztahu k plánovanému využití při zajištění existujících konstrukcí*. Brno, 2024. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Školitel doc. Ing. Pavel Schmid, Ph.D.

Prohlášení o shodě listinné a elektronické formy závěrečné práce

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané disertační práce s názvem „Testování systému helikálních výztuží ve vztahu k plánovanému využití při zajištění existujících konstrukcí“ je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 12. září 2024

.....
Ing. Ondřej Balkanský
autor práce

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci s názvem „Testování systému helikálních výztuží ve vztahu k plánovanému využití při zajištění existujících konstrukcí“ zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 12. září 2024

.....
Ing. Ondřej Balkanský
autor práce

Poděkování

V první řadě chci z celého srdce poděkovat mé rodině za nikdy nekončící podporu a vytvoření vhodného zázemí pro můj rozvoj v jakémkoliv směru. Speciální poděkování patří mé ženě Lucii, která se nejvíce zasloužila o to, že jsem nakonec dokončil potřebné kroky a nyní mohu tuto práci odevzdat.

Děkuji dále mému školiteli doc. Ing. Pavlu Schmidovi, Ph.D. za provedení celým mým studiem, poskytnutí cenných rad a vytvoření výborného tvůrčího zázemí. Svým nejbližším kolegům a přátelům Ing. Ivě Čairovič, Ph.D. a Ing. Richardu Dvořákovi, Ph.D., mému velkému podporovateli a rádci, děkuji za všemožné rady, uskutečnění spousty zajímavých experimentů a publikování o nich a také za zážitky, které se k tomu přidaly. Dále děkuji doc. Ing. Barbaře Kucharczykové, Ph.D. a prof. Ing. Zbyňku Keršnerovi CSc. za možnosti spolupráce na velkých výzkumných projektech s možnostmi publikace i výjezdů do zahraničí. Další dík patří Ing. Václavu Sadílkovi, Ph.D. za umožnění měření systémem ARAMIS a následující úvod do programování, kterým nastartoval nový směr mé pracovní kariéry. Děkuji také Ing. Jiřímu Kubankovi za možnost spolupráce ve firmě, kde jsem si mohl systém nerezové helikální výztuže podrobně osahat, a Ing. Janu Fialovi za poskytnutí informací a materiálu. Dále bych chtěl poděkovat všem lidem na Ústavu stavebního zkušebnictví za vytvoření domovské atmosféry a pomoc v různých oblastech mého snažení. A special thanks goes to Dr Enrique del Rey Castillo for hosting my internship at the University of Auckland, New Zealand and then providing feedback on my research even after I finished my internship.

Dále děkuji projektům, které podpořily můj vědecký růst, ať už v rámci vlastního výzkumu nebo v rámci výzkumu obecně. Tyto projekty jsou: Experimentální studium vlastností spojů nerezové helikální výztuže a betonu vystavenému účinkům vysokých teplot – FAST-J-17-3924; Vliv chování dodatečně vložené nerezové helikální výztuže namáhané tahem na mechanismus porušení a celkovou únosnost spojů této výztuže se základním materiálem – FAST-J-18-5145; Experimentální analýza odezvy betonových prvků se zabudovanou betonářskou, helikální a sklovláknitou výztuží po vystavení vysokým teplotám – FAST-S-18-4824; Experimentální ověření nových způsobů hodnocení mrazuvzdornosti betonu v konstrukcích – FAST-S-19-6002; Objemové změny jemnozrnných kompozitů na bázi silikátových pojiv - FAST-S-16-3125; Experimentální analýza objemových změn cementových kompozitů v raném stádiu tuhnutí – GAČR 17-14302S a program Freemovers.

Děkuji!

Obsah

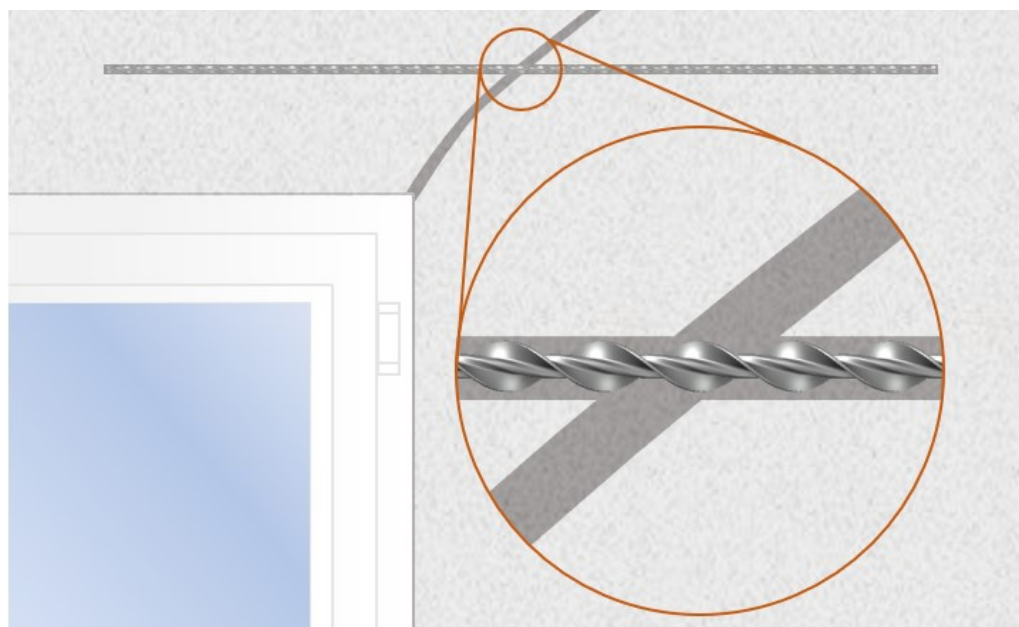
1	Úvod	3
2	Cíle práce	5
3	Současný stav poznání	6
3.1	Analýza vlastností stávajících konstrukcí	6
3.2	Degradace betonu pomocí vysokých teplot	14
3.3	Možnosti zabránění rozšíření trhlin	15
3.3.1	Odstranění příčiny poruch	15
3.3.2	Aktivní změna působení prvků	16
3.3.3	Dodatečné pasivní zesílení	17
3.4	Zesilování pomocí helikální výztuže	19
3.5	Problematika zkoušení helikálních výztuží	23
3.6	Výzkum v oblasti použití helikální výztuže	25
3.6.1	Testy konstrukčních celků	25
3.6.2	Testy kotvení	31
3.6.3	Výpočetní modely konstrukčních celků	33
3.6.4	Výpočetní modely kotvení	37
3.7	Shrnutí současného stavu poznání	38
4	Výzkumné problémy a návrh řešení	40
5	Experimenty a jejich vyhodnocení	42
5.1	Zkoušení kotevní zálivky	42
5.1.1	Tradiční způsob zkoušení	43
5.1.2	Měření smrštění	43
5.2	Zkoušení helikální výztuže	45
5.2.1	Tradiční způsob zkoušení	45
5.2.2	Měření s využitím systému ARAMIS	47
5.3	Materiály	50
5.4	Diagnostika vzorků určených pro testování v drážce	52
5.4.1	Měření pevnosti v tlaku	53
5.4.2	Rychlost průchodu ultrazvuku	54
5.4.3	Metoda Impact-Echo	54
5.4.4	Odrhová zkouška	55
5.4.5	Měření odrazovým tvrdoměrem	56
5.4.6	Výsledky diagnostiky	57
5.4.7	Diskuze výsledků diagnostiky	58

5.5	Zkoušení výztuží v drážce	59
5.5.1	Popis a průběh experimentu	59
5.5.2	Zpracování naměřených dat	61
5.5.3	Výsledky chování výztuže v drážce	63
5.5.4	Diskuze výsledků chování výztuže v drážce a trémcové zkoušky . . .	64
5.5.5	Model chování výztuže v drážce	67
5.5.6	Diskuze modelu chování výztuže v drážce	67
5.6	Korelace diagnostiky a výsledků testování v drážce	68
5.6.1	Výsledky korelace	69
5.6.2	Diskuze výsledků korelace	71
6	Závěry	73
	Literatura	75
	Seznam použitých symbolů	81
	Seznam obrázků	82
	Přílohy	86
A	Veškeré korelace s koeficientem determinace nad 0,5	87

Kapitola 1

Úvod

Disertační práce popisuje systém helikálních výztuží (viz obrázek 1.1), jeho použití, dosavadní výzkum, jeho mezery a vlastní výzkum autora. Systém helikálních výztuží se nejčastěji používá k opravám zděných a betonových staveb a může jít jak o zesílení konstrukce, tak o obnovení strukturální integrity v podobně například fixace trhlin nebo kotvení. Systém se skládá z nerezové helikální výztuže a kotevní zálivky, kdy název „helikální“ odkazuje na šroubovitý tvar výztuže. Helikální výztuž se vkládá do drážky či vrtu a vzhledem k jejímu tvaru a materiálu jsou tyto zásahy poměrně malé. V rámci studia i práce se systémem samotným nebyla nalezena žádná publikace popisující obecnou metodiku testování použití helikálních výztuží ani metodiku testování výztuže samotné. Publikace popisující hranice použití byly nalezeny, ale není z nich patrné, na základě čeho je tento rozsah stanovený, a neexistuje tedy univerzální poučka, do jakého materiálu a konstrukce má cenu použít helikální výztuž. Existují publikace popisující praktický návrh, ale buď je potřebných hodně dat o konstrukci a jejím materiálu, která je těžké obdržet, nebo jde jen o obecné konstrukční poučky.



Obrázek 1.1: Ilustrační příklad použití dodatečně vkládané nerezové helikální výztuže pro sešití trhliny v rohu okna v železobetonovém panelu.

Velké množství staveb (minimálně na území České republiky a Evropy) je zděných nebo betonových, často vyžadujících sanaci či rekonstrukci, ke kterým je možné přispět i použitím nerezové helikální výztuže. Konstrukce z těchto materiálů, stejně jako každá jiná konstrukce, podléhají vnějším vlivům jako například pohyby základové půdy, změny vlhkosti a teplot nebo třeba (technická) seismicita, což přináší rozsáhlé možnosti vzniku trhlin. Vzniklé trhliny je často potřeba sanovat a v případě zděných a betonových konstrukcí to lze snadno pomocí zmíněné helikální výztuže. Jejím vložením do těchto konstrukčních materiálů lze dosahovat zesílení konstrukcí, ať už jde o omezení rozvoje trhlin nebo o zvýšení únosnosti. Vzhledem k množství staveb a jejich aktuálnímu nebo budoucímu stáří je vhodné znát dobře všechny možné způsoby zesílení a v rozhodném okamžiku přistoupit k návrhu efektivně. Každé prohloubení znalosti o chování systému helikální výztuže je tomu prospěšné a mělo by umožnit vždy o něco více rozeznat, která metoda je vhodná, a v případě použití helikální výztuže umožnit její spolehlivý návrh.

Téma helikální výztuže je poměrně probádáno. Jsou popsány experimenty na velkých konstrukčních celcích, jako jsou celé zesílené stěny, klenby nebo trámce. Také jsou popsány menší experimenty zaměřené na detaily, jako je samotné kotvení (většinou do vrtů). Články o zmíněných velkých a malých experimentech často popisují výpočetní modely, které reprezentují experiment a které jsou buď podobného ražení jako běžný návrh železobetonových konstrukcí, nebo jde o řešení napětí ve spoji, nebo o modely počítané metodou konečných prvků, a to jak modely detailů, tak i velkých celků. Mimo to existuje spousta článků, které popisují zesílení a opravy celých staveb, ale bohužel u nich často chybí zpětná vazba o účincích a hlubší odůvodnění návrhu.

Po prozkoumání aktuálního stavu lze říci, že je velká disproporce mezi kvalitou a kvantitou parametrů potřebných k návrhu a skutečností, že se jedná o zesilování existujících konstrukcí, o nichž je často k dispozici málo informací. Výzkum, který umožní návrh na základě co nejmenšího množství zjišťovaných charakteristik, by měl mít šanci nalézt široké uplatnění v praxi. Pokud by existovala metodika, která jasně určí hranice použití helikální výztuže, případně která v nejistotě materiálu existujících konstrukcí umožní stále spolehlivý výpočet, byl by to výborný krok k mnoha efektivním opravám. Právě absence takové metodiky a minimální studium spojů v drážce oproti většímu množství spojů ve vrtu vedly k zaměření této práce. Po rešerši a provedení doprovodných experimentů zaměřených na komponenty systému i na vyztužené malé prvky byly stanoveny cíle práce.

Hlavním cílem práce je zjištění, zda a do jaké míry je některá z metod diagnostiky stavebních konstrukcí schopná předpovědět testované chování drážkového spoje helikální výztuže s konstrukčním materiálem. Vedlejším cílem je popis samotného chování výztuže kotvené v drážce a ověření možnosti použití trámcové zkoušky k testování tohoto spoje za použití množství a formy materiálu, které by při odběru nepoškodily stávající konstrukci. Celou práci doplňují doprovodná měření helikální výztuže, včetně bezkontaktního systému pomocí kamer, a zkoušky kotevní zálivky, přičemž tato doprovodná měření mají za cíl doplnit znalosti o možnostech testování nebo podpořit hlavní experimenty. Výsledky otevírají možnosti širšího výzkumu v této oblasti, po kterém by mohlo být umožněno využití v běžné praxi.

Předkládaná disertační práce postupně seznamuje s cíli práce, teoretickým pozadím, na jehož základě byly cíle stanoveny, nedostatky dosavadního výzkumu a také s provedenými experimenty a závěry, které z nich plynou. Výsledky a závěry v této publikaci jsou svým rozsahem spíše na úrovni studie proveditelnosti a pro širší uplatnění v praxi by bylo nezbytné provést rozsáhlý výzkum při zavedení poznatků získaných v rámci této práce.

Kapitola 2

Cíle práce

Cíle této práce tvoří cíl hlavní, vedlejší a cíle doprovodné. Hlavním cílem je zjištění, zda a do jaké míry je některá z metod diagnostiky stavebních konstrukcí schopná předpovědět chování drážkového spoje helikální výztuže s konstrukčním materiálem. Použité metody stavební diagnostiky jsou: pevnost v tlaku, odtrhová zkouška, Impact-Echo, rychlost šíření ultrazvuku a měření Schmidovým tvrdoměrem. Vedlejším cílem je ověření možnosti použití trámčové zkoušky k testování tohoto spoje za použití množství a formy materiálu, které by při odběru nepoškodily stávající konstrukci. Podrobný popis chování spoje spojuje hlavní i vedlejší cíle, jelikož podmiňuje i možnost korelace výsledků diagnostiky i vysvětlení (a tím pádem validaci) trámčové zkoušky. Hlavní a vedlejší cíl se také navzájem doplňují tím, že se jejich aplikace mohou alternovat nebo se mohou vzájemně zpřesňovat.

Doprovodné cíle zahrnují doprovodné experimenty a také, i když to nebylo doposud zmíněno, rešerši literatury (z oblastí týkajících se helikálních výztuží a diagnostiky konstrukcí). I když se nejedná o cíl v pravém slova smyslu, je rešerše důležitá část této práce, jelikož dosavadní zkoumání je značně roztříštěné a specializované na úzké, zdánlivě nesouvisějící oblasti. Rešerše má za úkol tento nedostatek narovnat a kromě článku o samotné helikální výztuži musí zahrnout rešerši relevantní stavební diagnostiky a také relevantního zkoušení oceli a vyztužených prvků. Vzhledem k charakteru dosavadního zkoumání je předpokládána rešerše obsáhlá natolik, aby bylo možné stanovit výzkumný problém a možnosti jeho řešení. Není tedy předpoklad, že by rešerše sloužila k úzké specializaci v rámci stále se zpřesňujícího poznání v dané oblasti, jak by tomu mělo být u úzce zaměřených témat. Doprovodné experimenty slouží pro zpřesnění charakteru experimentů určených pro naplnění hlavních cílů této práce (tím se také s hlavními experimenty v rámci textu proplétají) nebo případně pro vyzkoušení vlastní proveditelnosti neobvyklých měření v rámci tématu práce. Některé doprovodné experimenty mohou být případně použité i pro doplnění a prohloubení znalostí v budoucí práci, a proto jsou zde uvedeny, i když se třeba pro naplnění hlavních cílů prozatím ukázaly jako nevhodné. Zmíněné prohloubení znalostí může hrát roli v případné rozsáhlejší studii, kdy se může hodit zpřesnění finálních experimentů prezentovaných v této práci a jejich výsledků, a také to otevírá možnosti nového směru studia dané problematiky. Doprovodné experimenty zahrnují zhodnocení zkoušení možností testování samotné helikální výztuže běžným způsobem a také pomocí optického 3D měření, zkoušení kotevní zálivky včetně jejího smrštění a simulaci degradace betonu pomocí vysokých teplot.

Cíle práce byly stanoveny tak, aby vyřešily nalezený výzkumný problém v rozsahu studie proveditelnosti, jelikož zesilování stávajících staveb dává tématu značnou rozmanitost a hlubší studium vyžaduje prvně stanovenou metodiku zkoušení a až poté rozsáhlou studii.

Kapitola 3

Současný stav poznání

Předkládaná disertační práce se zaměřuje na systém nerezových helikálních výztuží, sloužící k zesílení nebo obnovení strukturální integrity stávajících (převážně betonových a zděných) stavebních konstrukcí v místech porušených trhlinou [1, 2, 3, 4, 5]. Použití je znázorněno na obrázku 1.1, v kapitole 1 – Úvod.

Systém nerezových helikálních výztuží (dále jen „helikální výztuže“), je určený pro opravy, což přináší nutnost instalace do starých, často degradovaných materiálů nejisté kvality. Tento materiál může být ovlivněn jeho základní podstatou, ale i vlastnostmi získanými stářím, jako jsou například koroze, deformace a praskliny. Všechny tyto vlastnosti ovlivňují strukturální integritu konstrukce. Správné určení charakteru materiálu je základním předpokladem pro spolehlivý návrh s minimálním zásahem do stávajících konstrukcí.

Metody stavební diagnostiky mohou určit charakter materiálu a dá se předpokládat, že tento charakter do nějaké míry určuje i únosnost spojů helikální výztuže. Je to dáno tím, že určitá část síly přenášené helikální výztuží a následně maltou musí být dále přenesená podkladním materiálem. Tato myšlenka vede na snahu předpovězení vhodnosti použití helikálních výztuží pomocí korelace s výsledky diagnostiky. Pokud by byla tato korelace nalezena, mohlo by to umožnit efektivní návrh zesílení pomocí helikálních výztuží a tím předcházet nevhodným úpravám a tedy ušetřit finanční prostředky.

Tato kapitola je postupně zaměřená na analýzu vlastností stávajících konstrukcí, simulaci degradace materiálu určeného pro testování k napodobení reálného degradovaného materiálu konstrukcí, možnosti zabránění rozšíření trhlin, zesilování pomocí helikální výztuže a shrnutí dosavadního výzkumu v oblasti použití helikální výztuže. Cílem kapitoly je postupně seznámit čtenáře s komponenty systému helikální výztuže, odpovídajícím prostředím a jeho simulací a především s dosavadním výzkumem v této oblasti, aby byl znát výzkumný problém a návrh jeho řešení. Je třeba zdůraznit, že se nejedná o encyklopedický přehled v rámci všech uvedených témat, ale jsou vybrány informace relevantní k tématu disertační práce.

3.1 Analýza vlastností stávajících konstrukcí

Podle výzkumu M. Economidou a kolektivu bylo v roce 2011 v 27 zemích Evropské unie, Švýcarsku a Norsku zhruba 38 % rezidenčních budov postavených před rokem 1960, 45 % mezi léty 1960 a 1990 a 17 % mezi léty 1990 a 2010. [6] Navíc je zřejmé, že se v evropském měřítku jedná hlavně o zděné a železobetonové konstrukce a s orientací na východ Evropy přibývá panelových budov. I když od výzkumu uplynulo mnoho let, je patrné, že

opravy stávajících konstrukcí mají stále své místo a tím i možnosti využití nerezové helikální výztuže.

Pro zajištění spolehlivého návrhu je potřeba uvážit vlastnosti konstrukcí určených k zesílení. Tyto vlastnosti se mohou týkat konstrukce jako celku (například stáří, poškození, způsob vzdorování zamýšlenému i současnému zatížení) nebo se mohou týkat materiálu samotného (od samotné podstaty materiálu až například po způsob jeho degradace a po konkrétní aktuální fyzikálně-mechanické parametry). Je zřejmé, že hodnocení konstrukcí vyžaduje komplexní přístup, který zahrnuje oba pohledy a ideálně i uvažování celé historie působení dané stavební konstrukce. Tento přístup se ve výsledku spojí v odborný odhad vlastností konstrukce na základě očekávání a následně v návrh zjišťování konkrétních údajů na základě dostupné diagnostiky. Po vhodné diagnostice je možné přistoupit k návrhu způsobu oprav a konkrétním výpočtům.

Diagnostika stavebních konstrukcí je klíčová pro detailní zhodnocení aktuálního stavu konstrukce, identifikaci mnoha vad a poškození a poskytnutí vstupů pro návrh optimální údržby, úpravy, opravy či zesílení. Díky množství metod, které jsou schopny detekovat změny uvnitř materiálu, lze testovat stejnorodost konstrukce a identifikovat místa oslabení při minimálním až nulovém destruktivním zásahu. Díky těmto vlastnostem se nepochybně šetří čas a náklady, ale také se zajišťuje, že následná opatření budou lépe cílená a účinná. Navíc, některá měření přímo podmiňují možnost použití nějaké sanační metody – například odtrhová zkouška přímo definuje možnost použití uhlíkových lamel pro zesílení konstrukce (viz například produktové listy uhlíkových lamel [7, 8, 9] i obecná komplexní doporučení [10]) – díky tomu vznikla myšlenka použití diagnostických metod pro předpověď vhodnosti použití helikální výztuže pro opravu stavebních konstrukcí, která je dále rozvinuta v praktické části.

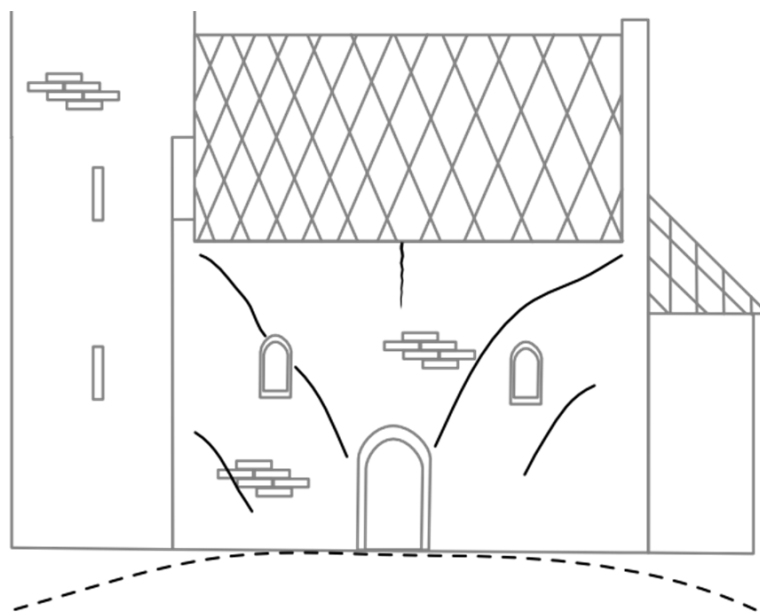
V následujících podkapitolách jsou uvedeny běžné metody stavebně-technického průzkumu a stavební diagnostiky. Je nutno podotknout, že se nejedná o encyklopedický přehled a jsou popsána jen relevantní témata – buď diagnostika přímo použitá v praktické části, vyhodnocená či měřená, a nebo diagnostika, která je pouze relevantní k tématu práce. Druhá zmíněná je tedy buď potenciálně použitelná pro zjištění materiálových charakteristik, ale je v rámci rekonstrukcí příliš komplikovaná a nebo jde o diagnostiku vhodnou například ke zhodnocení výběru metod oprav nebo pro zpětnou vazbu k účinnosti oprav, ale nevhodnou přímo pro navržené experimenty. Přehled diagnostiky v pojetí této práce tedy zahrnuje: prohlídku stavby a popis trhlin, metody hledání výztuže, měření šířky trhlin, zjišťování pevnosti a modulu pružnosti v tlaku a v tahu, zkoušky Impact-Echo, rychlost průchodu ultrazvuku, odtrhovou zkoušku a odhad pevnosti pomocí odrazového tvrdoměru.

Prohlídka stavby

Prohlídkou stavby je myšlena takzvaná vizuální prohlídka vzdušných líců, kdy odborník projde zájmovou stavbu a důkladně zhodnotí její stav na základě vzhledu. I přes osobní návštěvu a prohlídku je stále žádoucí nashromáždit co největší množství dokumentace k objektu, včetně znalostí správců budovy. Zjištění historie výstavby, havárií v době životnosti a období výstavby, může snadno odborníka nasměrovat na možné vady a poruchy a také na návrh další diagnostiky. Celkově se jedná o komplexní proces, který zahrne spoustu aspektů, které se mnohdy ani nemusí zdát související s vlastní konstrukcí. Základní pozornost patří poruchám, které snižují statickou spolehlivost. Vady a poruchy se mohou projevit různě, ale myšleny jsou převážně trhliny, deformace, projevy vlhkosti a viditelná degradace materiálů. Pokud to situace umožní, dají se provést drobné testy, jako například akustické

trasování (klepání na materiál a posлуuchání odezvy), které mohou odhalit skrytá místa vad nebo poruch. Kromě nalezení zjevných vad a poruch musí být pozornost zaměřena na pravděpodobný konstrukční systém objektu, který často prozradí i mechanismus vzniku poruch a tím pádem i možnosti oprav. Konstrukční systém k sobě váže nutnost zjištění způsobu a kvality založení objektu. Dále je vhodné věnovat pozornost přítomnosti vegetace a různého provozu v okolí. Vše by mělo být zdokumentováno pro pozdější zpracování. Prohlídka stavby je základním předpokladem pro úspěšný návrh diagnostiky a následný návrh opatření. Výsledkem prohlídky by měla být podrobná zpráva, která zhodnotí stav a určí další možný postup.

V rámci prohlídky stavby se často uplatní analýza trhlin, kdy ze směru, zakřivení, proměnné tloušťky a tvaru lze odhadovat příčinu jejich vzniku a následně navrhovat možnosti oprav. Například na obrázku 3.1 je ukázka tahových trhlin v důsledku poklesu krajních částí budovy. V praxi by to mohlo být například sednutím navážky na kraji stavby, seschnutím jílových zemin nebo prosednutím sprašových zemin v důsledku úniku vody z vodovodního řadu či kanalizace (zkrátka jakýmkoliv sednutím základové půdy). Analýza trhlin je správná a úplná až po odstranění omítek, ale již z prvního průzkumu může být patrný problém. Kromě zmíněných tahových trhlin, mohou vznikat i trhliny smykové, vše záleží na způsobu namáhání.



Obrázek 3.1: Tahové trhliny při poklesu krajních částí stavby, ilustrační obrázek.

Hledání výztuže

Hledání výztuže souvisí s určováním statického schématu v případech, kdy může skrytá výztuž propojovat celky, které by se jinak daly považovat za nespojené a o kterých není jiný záznam v projektové dokumentaci. Jedná se převážně o detektory kovových materiálů, které případně umí rozpoznat i ostatní materiály, ale hlavně dávají přehled o poloze a tloušťce výztuže. Kromě schopnosti rozpoznat i nekovové materiály se liší hlavně hloubkou dosahu, přesností a typem (dimenzí) zobrazení.

V rámci praxe Ústavu stavebního zkušebnictví na Fakultě stavební VUT v Brně je nejrozšířenější použití elektromagnetických indikátorů výztuže a radarů, které jsou k vidění na obrázku 3.2. Elektromagnetické indikátory výztuže pracují na principu vířivých proudů s pulzní indukcí a radary na principu vysílání vysokofrekvenčních elektromagnetických pulzů do materiálu a detekce jejich odrazu. První skupina přístrojů detekuje změnu v uměle vytvořeném elektromagnetickém poli v blízkosti sondy a druhá skupina detekuje odraz radiových vln (vytvořených pomocí zmíněných elektromagnetických pulzů) ve zkoumaném materiálu.



Obrázek 3.2: Možnosti hledání výztuže: vlevo elektromagnetický indikátor výztuže Proceq PM-630 (Převzato z [11]) a vpravo Skener betonu HILTI PS 1000 X-SCAN (Převzato z [12]).

Měření šířky trhlin

Měření šířky trhlin je potřebné jak pro zhodnocení stavu pro návrh opatření, tak i pro případný dlouhodobý monitoring konstrukce z různých důvodů, například pro zpětnou vazbu k účinnosti sešití trhlin. Tradičními metodami měření trhlin jsou měření pomocí sádrových terčů, měřičů trhlin nebo pomocí deformometru. Trhliny je také možné sledovat automatizovaně, ale pravděpodobně by se často (v případě rekonstrukcí běžných občanských staveb) jednalo o přehnanou investici. Při dlouhodobém měření je důležité brát v potaz změny klimatu, hlavně tedy teploty, ať už v dlouhodobém nebo krátkodobém horizontu a naměřené hodnoty správně interpretovat. V rámci opravy pomocí dodatečně vkládané helikální výztuže může jít o cenná data hned z několika důvodů: za 1) Může se rovnou zjistit, že trhlina je pasivní a není třeba ji nějak řešit; za 2) Může se zjistit jak sledovaná konstrukce reaguje na změny teplot a podle toho vhodně navrhnout aplikaci výztuží pro zajištění celistvosti konstrukce; a za 3) Může se vyhodnotit účinnost použitých výztuží. Měření je možné provádět například pomocí sádrových (skleněných) terčů, měřičů trhlin nebo Hollanova příložného deformometru.

Měření trhlin pomocí sádrových terčů je jednoduché a levné – do očištěného zdiva se v místě trhliny vyseká zářez, aplikuje se hustá sádra, označí se datem a pravidelně se zapisuje šířka vzniklé trhliny, měřená pravítkem na měření trhlin, pakliže nějaká vznikne. V případě měření v exteriéru je možné zvážit podobnou metodu pomocí sklíčka, které je přilepeno na zdivu pomocí lepidla. V obou případech je třeba zapisovat i teplotu, aby bylo možné vyhodnotit rozvoj trhlin v souvislosti s možnou teplotní roztažností konstrukce. Výhodou těchto měření je jednoduchost a nízká cena, nevýhodou může být větší prostor na chybu při měření šířky trhlin (obsluha může pokaždé vybrat nedopatřením trochu jiné místo na trhlíně v sádrovém terčů).

Měřiče trhlin umožňují přímé odečítání pohybu. Jedná se o dva kusy z odolného plastu, které se překrývají a mají na sobě mřížku, která se překrývá s mřížkou protilehlého dílu a slouží k odečtení hodnot. Výhodou je konzistentní způsob čtení v čase a možnost měření pohybu ve dvou směrech, nevýhodou může být nízká přesnost, jelikož mřížka není až tak přesná například i oproti příložnému pravítku na trhliny (použitím v případě měření trhliny na sádrovém terčů).

Hollanův příložný deformetr umožňuje velmi přesné měření (dle přesnosti osazeného měřidla, klidně i s přesností na tisícinu milimetru). Jedná se o sázeční deformetr, pro který se připraví přesná základna, do které zapadnou hroty deformetru. Pokud je potřeba měřit posun ve dvou směrech, stačí osadit tři body základny a měřit vzniklý trojúhelník. Nejlépe je to vidět na obrázku 3.3. Výhodou je vysoká přesnost, nevýhodou může být nižší dostupnost přístroje, větší nároky na přípravu a obsluhu.



Obrázek 3.3: Měření deformací příložným deformetrem. Vlevo základna pro možnost měření ve dvou směrech, vpravo měření příložným deformetrem na jednoduché základně. Obě fotografie převzaty z [[13]].

Měření pevnosti v tlaku

Pevnost v tlaku (pro účely této práce uvažováno měření na jádrových vývrtech) je jednou ze základních charakteristik stavebních materiálů a kromě samotné hodnoty pevnosti tlaku může nepřímo poukazovat na jiné vlastnosti, jako je například pevnost v tahu a míra degradace. Přinejmenším, při dostatečném počtu vzorků, lze mít přehled o stejnorodosti celé konstrukce. Navíc, v kombinaci se znalostí o použití stejného materiálu v době výstavby, lze posoudit vážnost degradačních vlivů v různých místech konstrukce. Jedná se tedy o široce uplatnitelný ukazatel, avšak s nevýhodou, že se jedná o destruktivní zkoušku. I přes její destruktivní charakter se jedná o poměrně jednoduchou a nenákladnou zkoušku, která má své místo v diagnostice a návrhu sanačních opatření v konstrukci. Navíc je možné rozšířit tuto destruktivní zkoušku o nedestruktivní zkoušení na více místech a zjistit tak více informací o více místech konstrukce při minimalizaci počtu zničených zkušebních míst. Znalost pevnosti v tlaku je uplatnitelná v rámci výpočtů zesílení helikální výztuží dle [14], kdy jde o parametr tlačené diagonály při výpočtu metodou vzpěra – táhlo a také dle [15], kde se uplatní ve výpočtu metodou konečných prvků jako jeden z parametrů simulovaného prostředí.

Měření pevnosti v tahu

Měření pevnosti v tahu, opět uvažováno hlavně v rámci zkoušení na odebraných jádrových vývrtech, je cenná zkouška pro posouzení, při jakém namáhání mohou nastat trhliny v posuzované konstrukci. Hodnoty se uplatní například v [16] a [14], kde slouží právě pro zhodnocení napětí na hranici vzniku trhlin. Ve výpočtu metodou konečných prvků v rámci [15] hraje roli jedné z materiálových charakteristik podkladního materiálu.

Velkou nevýhodou měření pevnosti v tahu je složitost uchycení vzorku do zkušebního zařízení. Je potřeba dobře přilepit oba tažené konce, což je problematické i u nově vytvořených vzorků z prostého betonu, natož pak u vývrtů různé kvality odebraných z konstrukce.

Měření statického modulu pružnosti v tahu a v tlaku

Měření statického modulu pružnosti v tahu a tlaku s sebou nese složitosti měření, které jsou typické i pro výše uvedená měření pevnosti v tahu a tlaku. Navíc, oproti těmto, se měření provádí na delších tělesech, což je o to složitější, pokud se jedná o tělesa odebraná z konstrukce a může být složité dostat tělesa požadované délky. Pokud se podaří obdržet a otestovat vhodná tělesa, dostaneme výsledky vhodné pro popis podkladního materiálu například v MKP modelu dle [15] a také v [16], kde výsledky doplní vzorce směřující na výpočet rozevírání trhlin po opravě helikální výztuží.

Rychlost průchodu ultrazvuku

Jedná se o zkoušku, při které se měří rychlost průchodu ultrazvukového pulzu měřeným vzorkem. Výhodou je, že se dá měření provádět přímo na konstrukci (jako je vidět na obrázku 3.4) a jedná se o nedestruktivní zkoušku. Rychlost průchodu ultrazvuku je možné použít přímo, pro měření stejnorodosti konstrukce nebo je možné ji přepočítat na základě dostupných vzorců a odhadnout tak například dynamický modul pružnosti nebo pevnost v tlaku. Díky tomu lze relativně snadno získat odhady výše uvedených charakteristik.

Rychlost průchodu ultrazvuku bude ovlivněna například hustotou materiálu a přítomností pórů, trhlin a kaveren. Je zřejmé, že to jsou také vlastnosti, které mohou výrazně

ovlivnit možnosti vlepění dodatečně vkládané výztuže. Čím vyšší rychlost, tím lepší, stejnorodější a nepoškozený materiál lze předpokládat.



Obrázek 3.4: Rychlost průchodu ultrazvuku v terénu, měřená na hraně konstrukce. Převzato z [17].

Metoda Impact-Echo

Metoda Impact-Echo je nedestruktivní metoda, která využívá měření záznamu vibrace, která je pro tento účel záměrně vybudena (například kladívkem). Výsledky jsou ovlivněny podobnými vlastnostmi, které ovlivňují také měření ultrazvukem, tedy například delaminací, trhlinami, póry a kavernami. Nespornou výhodou této metody je možnost měření pouze z jedné strany, jako je ukázáno na obrázku 3.5. Nejjednodušším použitím může být zjištění dominantní frekvence materiálu, bez dalšího zkoumání celého spektra odezvy, a porovnání této frekvence s frekvencí naměřenou v jiných místech nebo její přepočtení na jiné veličiny.



Obrázek 3.5: Metoda Impact-Echo – ukázka měření v terénu. Převzato z [18].

Odtrhová zkouška

Odtrhová zkouška je důležitá nedestruktivní metoda k diagnostice kvality povrchu zkoumaného materiálu. Často se může jednat o přídržnost povrchových vrstev, jako jsou například omítky, ale také může jít o hodnocení samotného podkladního materiálu, například betonové konstrukce, což je případ zamýšlený pro tuto práci (ukázka na obrázku 3.6). Princip této zkoušky spočívá v připevnění zkušební terče na zkoumaný povrch a měření síly potřebné pro jeho odtržení. Z dosažené síly a plochy terče se vyhodnotí odtrhová pevnost. Důležitá součást hodnocení je posouzení, zda došlo k odtržení použitého lepidla nebo porušení zkoumaného materiálu.

Odtrhová zkouška je zásadní pro rozhodnutí o použití uhlíkových lamel, které se lepí na povrch betonových konstrukcí pro jejich dodatečné zesílení a tato skutečnost vedla k myšlence použití různých diagnostických metod pro rozhodnutí o vhodnosti aplikace helikálních výztuží. V rámci využití metody pro posouzení vhodnosti použití uhlíkových lamel se posuzuje zda je hodnota odtrhové zkoušky v rozmezí daném výrobcem lamel – například uhlíkové lamely „PREFACARB L“ pro dodatečné zesilování konstrukcí vyžadují minimální odtrhovou pevnost 1,5 MPa [7], uhlíkové lamely „CarboLamela“ k tomu navíc vyžadují průměrnou hodnotu odtrhové zkoušky 2,0 MPa [9] a uhlíkové lamely „CarboDur“ vyžadují průměrnou hodnotu odtrhové pevnosti minimálně v rozmezí 1,5 – 2,0 MPa [8]. Odtrhová zkouška je samozřejmě zahrnuta i v normách, v mezinárodní měřítku například v [19] a její významnost podtrhuje i fakt, že s ní počítají i důležité komplexní reporty, jako například report o opravách betonových konstrukcí pomocí uhlíkových lamel od National cooperative highway research program v USA [10].



Obrázek 3.6: Provádění odtrhové zkoušky při diagnostice železobetonového žebra. Převzato z [20].

Měření odrazovým tvrdoměrem

Měření odrazovým tvrdoměrem je levná, rychlá a efektivní metoda pro posouzení tvrdosti materiálu. Na základě tvrdosti a empirických vztahů lze odvodit pevnost zkoumaného materiálu v tlaku. Odrazový tvrdoměr (nebo též Schmidtovo kladívko, Schmidtův tvrdoměr, viz obrázek 3.7) obsahuje kladivo, které po je po odjištění prostřednictvím pružiny vymršťeno na povrch zkoumaného materiálu a udeří do něj prostřednictvím úderníku. Náraz má za následek odražení, které je změřeno. Jelikož je známá energie vymršťení a následně hodnota návratu, lze vyhodnotit energii, která se ztratí v průběhu a tato energie udává tvrdost, kterou lze následně přepočítat na pevnost v tlaku.

Podobně jako u ostatních metod, lze poměrně snadno získat představu o podstatných vlastnostech zkoumané konstrukce. Jelikož je přístroj levný a jednoduchý na ovládání, jedná se o často používanou diagnostickou metodu.



Obrázek 3.7: Odrazový tvrdoměr Original Schmidt. Převzato z [21].

3.2 Degradace betonu pomocí vysokých teplot

V rámci předkládané práce je žádoucí vytvořit vzorky materiálu, který bude mít stejnou podstatu, ale přitom různý stupeň degradace. K tomuto je možné dle dedukce na základě literatury (například [22, 23, 24]) přistoupit pomocí zahřívání původně stejných sad vzorků z betonu na různé teploty a dle výsledků ve zmíněné literatuře se dá očekávat, že je možné tato zhoršení detekovat pomocí metod stavební diagnostiky. Kromě toho již existují publikace, díky kterým lze porovnávat výsledky diagnostiky měřené v rámci této práce na různé degradovaných betonových vzorcích s výsledky těchto publikací. Například pro porovnání pevnosti v tlaku je možné použít publikaci [25], pro rychlost šíření ultrazvuku [26] a [27], pro první vlastní frekvenci [23], pro měření odrazovým tvrdoměrem [28] a [29] a v neposlední řadě pro odtrhovou zkoušku [30]. Změny popsané v rámci zmíněné literatury jsou vcelku logické, jelikož je již pouhým pohledem patrné, že je beton porušen zjevnými trhlinami a to tím více, čím více byl teplotně zatěžován. Trhliny ovlivňují jednak mechanickou odolnost, jelikož je narušena integrita materiálu, ale také výsledky diagnostiky, jelikož trhliny značně ovlivní detekovaný charakter materiálu, jak bylo popsáno v předchozí podkapitole 3.1 u jednotlivých diagnostických metod. Pro dostatečné odlišení materiálu zahříváním v peci by měly být použitelné teploty 400 °C, 600 °C a 800 °C.

3.3 Možnosti zabránění rozšíření trhlin

Jak bylo dříve řečeno, v průběhu životnosti konstrukce (zvláště pak zájmové betonové nebo zděné) mohou vznikat trhliny, které je třeba řešit. Tyto trhliny mohou nepříznivě ovlivnit životnost stavby a tak je potřeba jejich vliv posoudit a případně provést opatření. Pro nalezení nejvhodnějšího řešení se nabízí stavební průzkum a diagnostika popsaná v podkapitole 3.1, na jejichž základě by měla být patrná jednak příčina poškození trhlínami a také vlastnosti materiálu konstrukce. Díky tomu se dá přistoupit ke konkrétnímu návrhu oprav.

Trhliny vznikají nejčastěji mechanickým působením, které může být způsobeno například pohybem v podzákladích, teplotními změnami, technickou seismicitou či nevhodnými stavebními úpravami. V rámci oprav lze potom buď řešit příčinu, zesílit konstrukci proti důsledkům příčiny a nebo tyto dva přístupy zkombinovat. Zesílení je možné provádět různými způsoby v závislosti na tom, co je od opravy očekáváno – může jít o kompletní obnovení spojitosti konstrukce z důvodu zajištění schopnosti odolávat původním účinkům a nebo může jít například o obnovení strukturální integrity spíše z estetických a provozních důvodů. Popis různých přístupů následuje v textu následujících podkapitol.

Metody oprav mohou zahrnovat například nerezové helikální výztuže z tématu práce, uhlíkové lamely nebo bandážování jako dodatečné pasivní zesílení, dále předpínání pomocí lan jako aktivní způsob zesílení a nebo pouze odstranění příčiny poruch horní stavby, jako například zesílení základů (mikropilotami a/nebo rozšířením), rozdělení na dilatační celky a podobně. Popsaný výčet může být širší, ale v rámci textu jsou zvoleny metody, které buď přímo ovlivňují použití metody v zájmu práce nebo které jsou její blízkou alternativou.

3.3.1 Odstranění příčiny poruch

Odstranění příčiny poruch může výrazně eliminovat potřebu jakéhokoliv dalšího zesílení a případně tuto potřebu i vyloučit. Příkladem může být celá řada a právě na nich je nejlepší vysvětlení – pokud se například na zděném objektu objeví trhliny, které svým charakterem jednoznačně odpovídají poklesu jednoho z rohů, je dobré pátrat po příčině pohybu v základech a až poté řešit jiné možnosti zesílení. V tomto konkrétním případě by se například mohlo zjistit, že příčinou byla voda v podzákladích vlivem poruchy (například vodovodního řádu), porucha byla odstraněna a k dalšímu pohybu nedochází. Nebo by se zjistilo, že je roh budovy nadměrně přitížen a provedlo by se zesílení základů rozšířením nebo mikropilotami (jako na obrázku 3.8). Následně, po vyhodnocení, že další pohyb podzákladích nehrozí, by bylo možné přistoupit k sanaci samotných trhlin, například dodatečně vkládanou helikální výztuží. Také by bylo možné provést dodatečné sepnutí lany v případě působení větších sil. Naopak by bylo pravděpodobně špatné nechat základy nezajištěné a snažit se silou sepnout popraskanou budovu.

Dalším příkladem by mohl být příklad střešní konstrukce, která nadměrně a nevhodným způsobem zatěžuje samotnou stavbu – v takovém případě by stálo za zvážení zda zesílovat či předělávat střešní konstrukci nebo zda zesílovat stavbu na které se střešní konstrukce nachází. Možností by mohla být i kombinace řešení. Výměna nebo úprava střešní konstrukce je řešením samo pro sebe, ale zesílení stavby je možné provést opět předpínáním lany, podepřením, rozšířením stěn, doplněním provázání zdiva, vložení dodatečné výztuže a řadou dalších metod i jejich kombinací dle zkušeností osoby provádějící návrh.

Uvedené příklady mají za cíl ukázat, že nic není černobílé, každá metoda opravy má své místo, každá stavba je originál a totéž platí i o odborníkovi navrhujícím opravu. Proto

v následujících odstavcích následuje výčet běžných metod statického zajištění staveb, aby bylo čtenáři jasné v jakém kontextu a možnostech se pohybujeme.



Obrázek 3.8: Ukázka zesilování základů pomocí mikropilot z vnější strany. Převzato z [31].

3.3.2 Aktivní změna působení prvků

Aktivní změna působení prvků může být provedena například změnou statického schématu nebo ovlivněním působení aktuálních prvků přiměřeným dodatečným zásahem ve smyslu zesílení. První způsob znamená spíše přestavbu a netýká se tedy tématu práce, ale provedení druhého způsobu může být výrazným doplňkem (někdy i alternativou) zesílení pomocí helikální výztuže.

Jednoduchým příkladem může být klínování kleneb. Klínování kleneb slouží k obnově působení tlaku v klenbě, ke kterému došlo například posunutím podpor nebo nevhodným zatížením. Podstatou je vrážení klínů do ložných spár klenby tak, aby došlo k jejímu opětovnému vzepření do podpor. Základním předpokladem je, že nevhodné účinky na klenbu jsou již odstraněny. Po vyklínování je potřeba doplnit spáry, dozrát co je třeba, případně ještě jinak klenbu zpevnit. Výhodou klínování je poměrně jednoduchý a levný způsob provedení, jestliže způsob poškození kleneb této opravě odpovídá.

Složitějším příkladem může být předpínání konstrukce. Předpínání se provádí většinou pomocí ocelových lan, která časem nerelaxují (oproti například běžné výztuži nebo závitovým tyčím). Tato lana jsou na koncích zakotvena a je do nich vnesena požadovaná síla, která je dána účelem zpevnění a také vlastnostmi konstrukce, aby nedošlo k jejímu poškození. Princip je stejný jako u předpínání nových konstrukcí, kdy trasováním lan lze ovlivnit vnitřní síly v konstrukci. Oproti novým konstrukcím nejsou při rekonstrukcích takové možnosti vedení lan a vnášení takových sil, jelikož by bylo nutné vést lana v místech na které

konstrukce nemusí být připravena a/nebo to její materiál nemusí vydržet. Metoda často vyžaduje poměrně malý zásah do konstrukce, ale nese s sebou riziko, že ovlivněním vnitřních sil dojde k negativnímu ovlivnění současného chování konstrukce nebo poškození materiálu – proto je vždy potřeba použití pečlivě zvážit. Například na obrázku 3.9 lze vidět hloubku kapes pro vložení lan monostrand a je patrné, že je potřeba pečlivě zvážit, zda nedojde k porušení stěny vlivem hluboké kapsy nebo zda zbylá tloušťka stěny snese radiální zatížení, které lano vyvolá.

Dodatečně vkládané nerezové helikální výztuže mohou být vhodným doplňkem obou zmíněných metod.



Obrázek 3.9: Ukázka předpínání kostela lany monostrand ve dvou úrovních. Převzato z [32].

3.3.3 Dodatečné pasivní zesílení

Tato podkapitola zahrnuje relevantní výčet alternativ dodatečně vkládané nerezové helikální výztuže. Výběr vhodné metody výrazně záleží na zkušenostech osoby provádějící návrh, jelikož stávající stavby přicházejí s různými nástrahami, na které je někdy obtížné se připravit a které je přitom nutné do určité míry „předvídat“. Následující odstavce přináší základní vhled do alternativních metod, s cílem je zároveň představit a zároveň vyvolat představu o nejednoznačnosti výběru té či oné metody.

Zesilování pomocí bandáží

Bandáže mohou být hlavně ocelové a uhlíkové či skleněné. Všechny bandáže fungují v principu stejně, ale liší se provedením. Bandáže obepínají zpevněnou konstrukci (jako je například sloup nebo nosník) a brání tak důsledkům příčného tahu.

Obepnutí v případě ocelových bandáží (viz obrázek 3.10) tvoří ocelové pásy, které je navíc možné před aplikací předeřhřát na určitou teplotu a při jejich chladnutí po aplikaci tak vytvořit určité předeprnutí. Tyto pásy jsou pak většinou napojené například na úhelníky lepené na rozích prvku. Jak z popisu vyplývá, jedná se o řešení výhodné spíše pro konstrukční prvky obdélníkového průřezu.

Uhlíkové a skleněné bandáže spočívají v aplikaci tkanin z uhlíkových či skleněných vláken, které se lepí do epoxidové pryskyřice nanesené na povrch konstrukčního prvku. Princip fungování je stejný jako v případě ocelových bandáží a (jak z popisu provedení vyplývá) jedná se o řešení výrazně vhodné na kruhové a oválné sloupy, i když úplně hranaté sloupy je možné bandážovat také. Jednou z výhod použití může být malá konstrukční tloušťka a tím pádem menší narušení vzhledu než v případě ocelových bandáží.

Určitou formou bandážování může být také ovnutí helikální výztuží, které v základním principu bude fungovat stejně. Výše zmíněné metody však vyžadují oproti zesilování pomocí helikální výztuže menší zásah do zesilované konstrukce, jelikož nevyžadují provedení drážek a jsou také nepochybně více vyzkoušené a probádané.



Obrázek 3.10: Ukázka sloupu zesíleného bandáží pomocí ocelových pásků a úhelníků. Převzato z [33].

Zesilování pomocí dodatečně vkládané výztuže

Jak nadpis napovídá, jedná se o dodatečné vložení výztuží různého charakteru do míst, kde jsou nově potřeba. Výztuž může být například běžná betonářská, nerezová helikální výztuž nebo třeba výztuž v podobě lamel z uhlíkových či skleněných vláken – kompozitní výztuž.

Každá z těchto metod bude mít své výhody i nevýhody a nedá se zřejmě jednoznačně určit, kdy má být která použita.

Podstata zesílení je jednoduchá – v místech trhlin či předpokládaných tahových napětí se doplní výztuž, která tah převezme. Jelikož se jedná o pasivní zesílení, je navíc vhodné uvážení, zda není potřeba vytvořit „počáteční“ stav odstraněním příčiny poruch a uvedením konstrukce do takové polohy, že po aplikaci a zatuhnutí výztuže ve své poloze bude tato moci být následně aktivována opětovným uvolněním konstrukce.

Jednotlivé výztuže se od sebe na první pohled liší svým charakterem – například jejich tvarem a vzhledem materiálu. Při návrhu je potřeba zvážit jaký charakter je potřeba s ohledem na možnosti provedení i přenášenou sílu. Dále je potřeba řešit tuhost výztuže – jaká tuhost je vlastně potřeba a zda případnou tuhou výztuž zvládne přenést okolní zpevněvaná konstrukce v požadované míře. Další rozdílností je chování pracovního diagramu, kdy výztuže na bázi oceli před svým případným porušením vykazují výrazný kluz, zatímco kompozitní výztuže se natahují lineárně až do náhlého porušení. V neposlední řadě se výztuže liší možnostmi aplikace. Pokud neuvažujeme kompletní obetonování, musí se například betonářská výztuž vlepít do takové drážky, která bude po vyplnění kotevní směsí schopna zabránit vzniku koroze a také vhodně podržet její tuhou žebírku. Nerezová helikální výztuž se dá na základě zkušeností vkládat do výrazně menší drážky neboť je výrazně poddajnější a zřejmě nevyvine takový tlak na své bezprostřední okolí jako běžná žebírková ocel, k tomu navíc nekoroduje a z obou důvodů tedy není nutné mít významnou krycí vrstvu. Kompozitní výztuže se oproti těm předchozím lepí prakticky na povrch očištěné konstrukce, což s sebou nese potřebu malého zásahu, ale vyšší vystavení účinkům poškození nějakými vnějšími vlivy.

3.4 Zesilování pomocí helikální výztuže

Systém helikálních výztuží (na obrázku 3.11) je běžně využíván při opravách zděných a betonových staveb a slouží jak k zesílení konstrukcí, tak k obnově jejich celistvosti – strukturální integrity. Tento systém zahrnuje nerezovou helikální výztuž a kotevní zálivku. [1, 2, 3, 4, 5] Termín „helikální“ popisuje šroubovicový tvar výztuže, který je vidět na obrázku 3.12.

Pruty používané v rámci systému jsou vysokopevnostní (díky tomu i subtilní) a nevyžadují velké krytí, což minimalizuje rozměry drážek a vrtů s následným minimálním poškozením konstrukce. Výztuž je dobře tvarovatelná, což umožňuje vysokou variabilitu vyztužení. Díky subtilnosti výztuže lze do jedné drážky nebo vrtu vložit více profilů, čímž se výrazně zvyšuje procento vyztužení při pouze relativně malém zvětšení drážek a vrtů. Spolupůsobení systémových komponent výztuže a malty je zajištěno helikálním tvarem výztuže a vysoce pevnou kotevní maltou. Kotevní malta je vyvinuta tak, že dobře přilne k běžným stavebním materiálům, což zajišťuje kvalitní aplikaci do zděných i betonových konstrukcí. Tixotropnost a lepivost čerstvé malty umožňuje úplné vyplnění drážek a vrtů bez stékání, malta se také při tuhnutí téměř nesmršťuje a rychle získává pevnost. Systém je nenáročný na mechanizaci, praktický, ale vyžaduje přesnost, důslednost a kvalitu práce. [1, 2, 3, 4, 5]

Nejvýznamnějšími světovými producenty tohoto typu výztuže by měly být firmy Helifix, Thor Helical, SureCPS group a Target fixings. Helifix je první společností, která kdy vyráběla tento typ výztuže a výroba probíhala pod licenci Johna a Henryho Ollisových, majitelů patentu na tuto výztuž (EP0171250B1 – [34]), od roku 1986 [2]. Ostatní tři zmíněné firmy také později vyráběly pod zmíněnou licenci. Výroba stále pokračuje a od roku 2005 se výrobě věnují i další společnosti, jelikož patent od roku 2005 není platný. Je nutné

dotat, že parametry výztuže se různě liší a nejedná se o tytéž charakteristiky – jediné co zůstává je šroubovicový tvar výztuže a nerezová ocel jako materiál [2, 3, 4, 5].

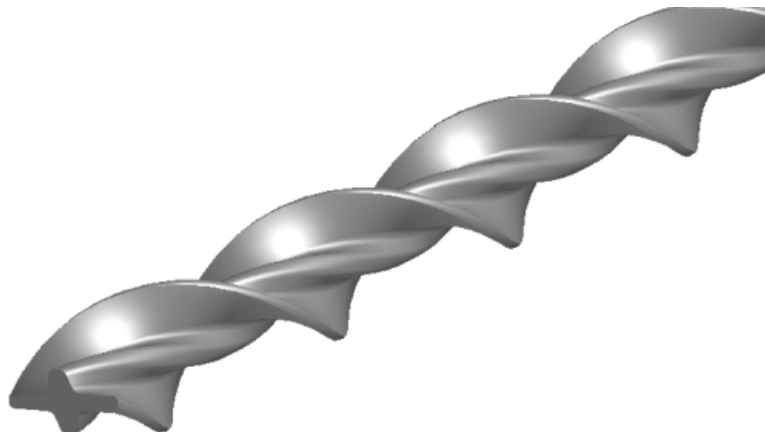
Po prostudování podkladů jednotlivých firem je patrné, že co se týká aplikace dodatečně vkládaných nerezových helikálních výztuží, existují dvě základní skupiny aplikace – završťování „na sucho“ a lepení do vrtu nebo drážek. V rámci českého stavebnictví a v převážné většině článků se používá hlavně systém lepení a ten je také stěžejní v rámci této práce.



Obrázek 3.11: Ilustrační obrázek komponent systému nerezové helikální výztuže v podkladech firmy Helifix. Na obrázku je hlavně k vidění samotná výztuž v desetimetrové roli i v kratších prutech, kotevní zálivka v suché formě v kyblíku a aplikační pistole. Převzato z [35].

Asi jediná souhrnná dostupná literatura, popisující nerezové helikální výztuže a s ní spojené konstrukční zásady v podmínkách českého stavebnictví je „Manuál a metodika navrhování a aplikace systémů dodatečně vkládaných helikálních výztuží při zesilování stavebních konstrukcí v podmínkách stavebnictví ČR“ [1], která shrnuje podstatu systému lepeného do vrtu či drážky a popisuje jeho výhody i použití. Cenná literatura, bohužel zřejmě vydána jen v němčině je „Mauerwerksinstandsetzung mit Spiralankern.“ [16], která navíc, oproti zmíněné české literatuře, přidává hluboké zamýšlení nad výpočty. Dle dostupných zdrojů se zřejmě jedná o jediné dvě ucelené takto zaměřené publikace. Základním rozdílem mezi těmito knihami je v tom, že česká kniha považuje systém helikální výztuže ve velké míře jako systém pro skutečné statické zajištění, kdy vlepená výztuž má přenášet předpokládaná namáhání, zatímco německá kniha s výztuží počítá převážně jako se systémem zamezujícím novému rozevírání trhlin, jejichž původce byl již eliminován jinými způsoby. Výhodou české knihy je široká škála rad pro způsoby zesilování, včetně řady konstrukčních zásad a tipů

na vyztužení v různých podkladních materiálech. Výhodou německé knihy je hluboké zamýšlení nad fungováním systému, včetně teoretického základu, kterému bohužel ubírá fakt, že je teorie založena na hůře dostupných charakteristikách materiálu existující konstrukce. Obě knihy výrazně přispívají k informacím uvedeným v následujících odstavcích.

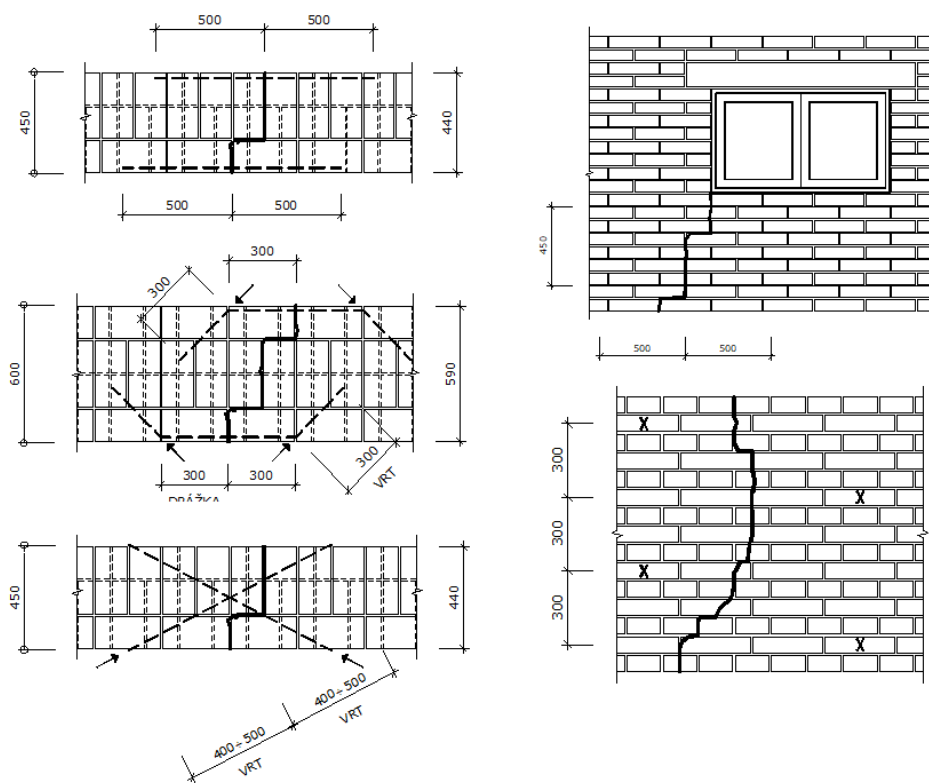


Obrázek 3.12: Detail tvaru nerezové helikální výztuže. Na obrázku jde vidět, že výztuž tvoří středová část a křídélka, která jsou kolem středové části zakroucená

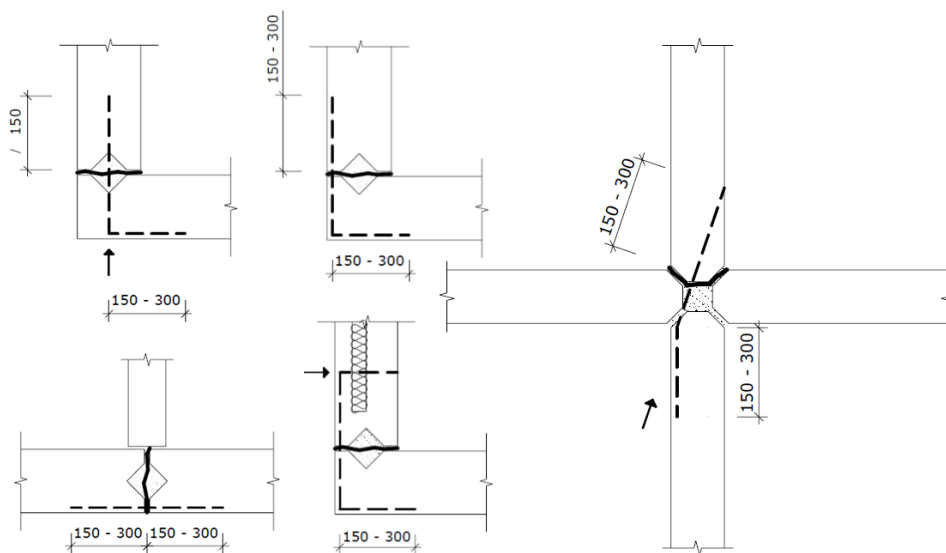
Vzory vyztužování

Vzory vyztužování vyplývají z možností kotvení do vrtu, do drážky nebo kombinace obojího. Při kotvení krátkých prutů do vrtu lze do aplikátoru kotevní zálivky vložit i výztuž a tu pak do vrtu vtlačit zároveň s kotevní zálivkou. V původním (v Česku i výzkumech méně obvyklém pojetí) je možné při kotvení do vrtu použít přímé zavrtávání výztuže pomocí příklepové vrtačky a nástavce. Pro všechny způsoby vyztužení je nutné vyčistit vrt či drážku od prachu před další aplikací. Při zavrtávání na sucho je k tomu nutné striktně dodržet velikost vrtu danou výrobcem výztuže. Před lepením do malty je vždy nutné očištěnou drážku či vrt navlhčit a poté nanášet kotevní zálivku a lepit výztuž.

Asi nejlepší je ukázat možnosti vyztužení na příkladech v obrázcích. Konkrétní použití není nějak striktně dáno a záleží na přístupu a zkušenosti osoby navrhující zesílení. Na obrázku 3.13 lze vidět zesilování zděných stěn, přičemž podobné aplikace jsou uvedeny v [1] i pro betonové konstrukce – betonové panely. Pro aplikaci do zdiva se podle [1] bere jako základní kotevní délka 500 mm a pro aplikaci do betonu je to 300 mm. Taková délka je uvažována pro plné přenesení tahu z výztuže do podkladního materiálu. Na obrázku 3.14 lze vidět možnosti dodatečného provázání betonových panelů, které na sebe nenavazují v jedné rovině. Na uvedených příkladech je ukázána značná variabilita použití systému, která je dále podpořena v podkapitole 3.6, převážně v rámci řešerše článků na téma zesilování kleneb, zděných překladů a zesílení stěn proti příčným účinkům vyvolaným zemětřesením.



Obrázek 3.13: Lokální zesílení a kotvení konstrukčních částí a celků zděných staveb v přímých úsecích. Převzato z [1].



Obrázek 3.14: Lokální zesílení a kotvení konstrukčních částí a celků betonových staveb v místech stěn kolmých a sebe. Převzato z [1].

Možnosti přístupu k návrhu helikální výztuže

V rámci rešerše nebyla nalezena žádná literatura doporučující obecný návrh vyztužení pomocí helikální výztuže, který by zahrnul aplikaci i výpočty. V rámci podkapitoly 3.6 – „Výzkum v oblasti použití helikální výztuže“ jsou sice uvedeny publikace obsahující určité formy výpočtu, nicméně každá z těchto publikací je poměrně omezená buď orientací na konkrétní experiment, nebo jen na únosnost a nebo vyžaduje množství vstupů, které jsou o stávající konstrukci většinou poměrně špatně dostupné. Lze zmínit, že nejbližší praktickému návrhu pro sešití trhlín je kniha od H. Meischnera a T. Jahna „Mauerwerksinstandsetzung mit Spirallankern“ [16] (volně a v kontextu terminologie v této práci přeloženo jako „Opravy zdiva pomocí helikálních výztuží“). Ostatní literatura buď omezeně řeší únosnost dle dostupných norem pro vyztužené zdivo či beton, nebo řeší i deformace, ale buď obtížným modelováním a/nebo velkým množstvím neznámých vstupů. Dále je zde velké množství literatury, která víceméně informuje čtenáře o tom, že se helikální výztuž někam vlepila a to je vše, chybí jakákoliv odezva a zhodnocení a popis přístupu k návrhu – taková literatura není pro účely této práce vůbec uvedena.

3.5 Problematika zkoušení helikálních výztuží

Pro zajištění účinnosti a spolehlivosti v konstrukčních aplikacích je důležité mít přehled o vlastnostech konkrétních použitých prutů, které mají být v systému použity. Je přitom nutné mít stále na paměti, že dodatečně vkládaná nerezová helikální výztuž znamená prakticky celý systém a výsledné vlastnosti zesílení jsou zřejmě dány mnoha dalšími faktory než jen pouhými vlastnostmi výztužného prutu. Testování celého systému je zřejmé z literatury popsané v podkapitole 3.6 – „Výzkum v oblasti použití helikální výztuže“, ale testování výztuže samotné není nikde podrobněji rozebráno, proto je mu věnována tato podkapitola a následně praktické měření v podkapitole 5.2 – „Zkoušení helikální výztuže“. Rozbor problematiky testování helikální výztuže je o to zajímavější, že výztuž má díky svému tvaru a způsobu výroby určitá specifika, která je dobré zmínit.

Tradiční způsob zkoušení

Již pouhým pohledem na helikální výztuž je patrné, že její měření nebude zcela standardní. Například pokud se podíváme do běžně používané normy ČSN EN ISO 6892-1 [36], zjistíme, že tvar průřezu helikální výztuže (viz obrázek 3.12) je dost vzdálený od kruhových, čtvercových a jiných pravidelných tvarů, běžně používaných pro zkoušení. Z tvaru helikální výztuže vyplývá také znesnadnění způsobu jejího uchycení, které se zdá být nejlepší pomocí vlepění do koncovek, například kruhových trubek. Přímé uchycení by totiž mohlo způsobit deformaci výztuže a vruby.

Kromě samotného tvaru výztuže je důležitá další, skrytá, vlastnost a tou jsou vnesená napětí. Výztuž je po válcování uchycena a zkroutena [34, 37], díky tomu dochází ke zkrácení výztuže, stlačení centrální části průřezu a natažení krajních částí. Nejvíce je to patrné u žebírek, která jsou na koncích výrazně natažena.¹

Tvarem a jeho výrobou vneseným napětím vznikají také problémy způsobující nepřesnost při samotném měření při snaze o měření kontinuálního záznamu – je problematické

¹Poznámka autora: Kvůli tomuto stavu napjatosti nemá příliš smysl počítat pevnost v tahu z tohoto zkoušeného průřezu, ale jde o zjištění charakteristického chování celé tyče jako takové, což přináší netradiční pohled na výsledky zkoušení a je to patrné v praktické části této práce.

uchytit cokoliv na samotnou výztuž, jelikož se při namáhání silně kroutí. Totéž logicky platí o optickém sledování bodů na výztuži.

Měření s využitím systému ARAMIS

ARAMIS je bezkontaktní optický systém založený na principu digitální korelace obrazů („Digital Image Correlation“ – DIC), který umožňuje měření vzorků z libovolných materiálů. Tento systém poskytuje řešení pro analýzu povrchových deformací testovaných objektů (jak v diskrétních bodech, tak celoplošně) a výsledkem měření je detailní barevná mapa rozložení deformací na zkoumaném vzorku, přičemž rozsah měření se pohybuje od několika milimetrů čtverečních až po několik metrů. Vzorovou sestavu včetně v obrázku implementované mapy lze vidět na obrázku 3.15. 3D kamera systému ARAMIS je stereo kamera sestávající ze dvou kamer umístěných na společném rameni. Následný výpočet souřadnic probíhá buď na povrchu vzorku opatřeného stochastickým kontrastním vzorem, nebo v referenčních bodech. Systém umožňuje vysoce přesná 3D měření nezávislá na materiálu a teplotě tělesa a je aplikovatelný pro analýzu statických i dynamických dějů. Data získaná pomocí systému ARAMIS jsou klíčová pro určení charakteristik a vlastností zkoumaných materiálů, které se často využívají jako vstupní parametry pro numerické simulace, což významně přispívá k přesnosti a verifikaci výpočtů metodou konečných prvků. [38]

Měření systémem ARAMIS by mělo být schopné odhalit kromě samotného chování prutu helikální výztuže i jeho vlastnosti dané napětím vneseném při výrobě výztuže a samotným tvarem.



Obrázek 3.15: Ukázka měření pomocí systému ARAMIS, založeného na principu digitální korelace obrazů („Digital Image Correlation“ – DIC). Převzato z [39].

Zkoušení in-situ

Jak bylo řečeno, spíše než vlastnosti jednotlivých komponent, může být důležité zjistit vlastnosti při konkrétní aplikaci. I když se zatím jedná pouze o zjištění maximálních sil potřebných k vytržení testovaných prutů ze zesilované konstrukce, může se jednat o velmi cenný podklad, jelikož v sobě výsledek zahrnuje kombinované vlastnosti všech komponent systému. K provedení slouží testovací sady od výrobců, jako například testovací sada od firmy Helifix [40] (viz obrázek 3.16) nebo SureCPS [41].



Obrázek 3.16: Testovací sada od firmy Helifix na zkoušení únosnosti výztuží zabudovaných ve vrtu. Převzato z [40].

3.6 Výzkum v oblasti použití helikální výztuže

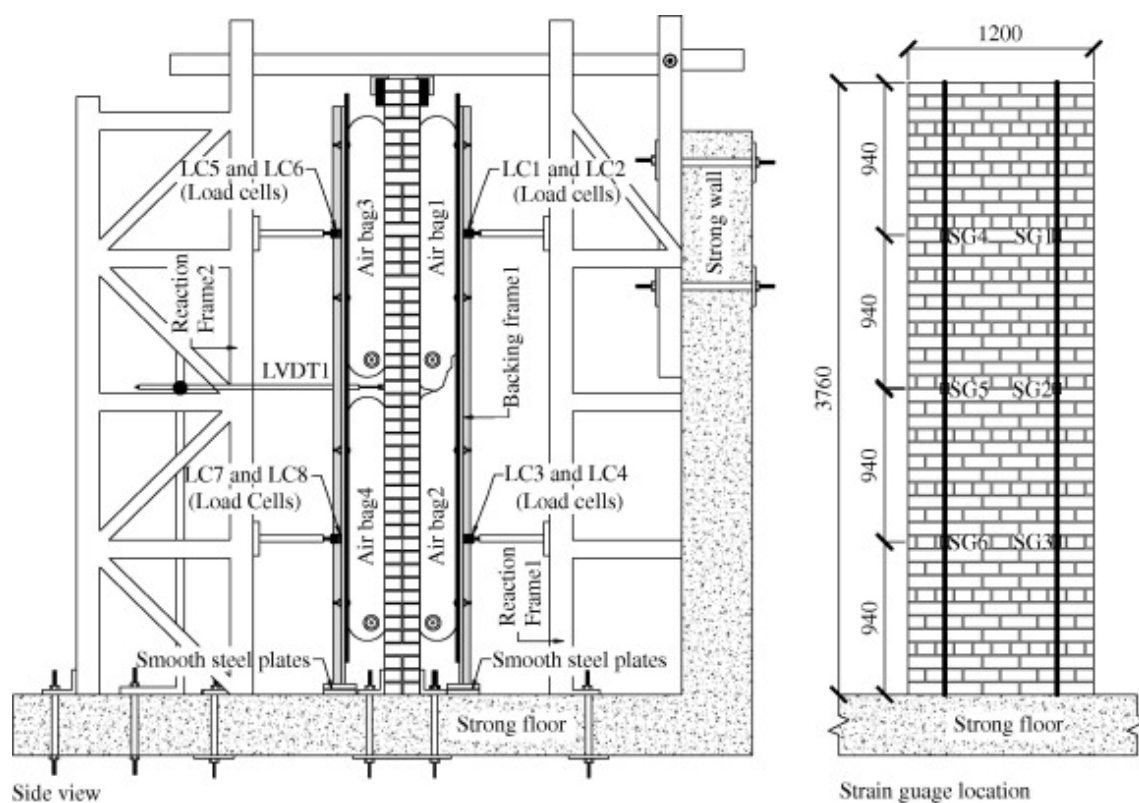
Helikální výztuže jsou poměrně probádány, nicméně výzkum je docela roztříštěný. Část článků o helikální výztuži tvoří ty, které jen popisují kdy, kam a kvůli jaké poruše byla helikální výztuž vlepna, bez jakékoliv zpětné vazby a výpočtu – takové články jsou záměrně vynechány, jelikož postrádají vědeckou podstatu. Tato podkapitola má za cíl seznámit čtenáře s relevantním dosavadním výzkumem, který vedl směrem testů a návrhů použití helikální výztuže pro nalezení výzkumného problému, který je pak shrnutý v kapitole 4 a řešený v kapitole 5.

3.6.1 Testy konstrukčních celků

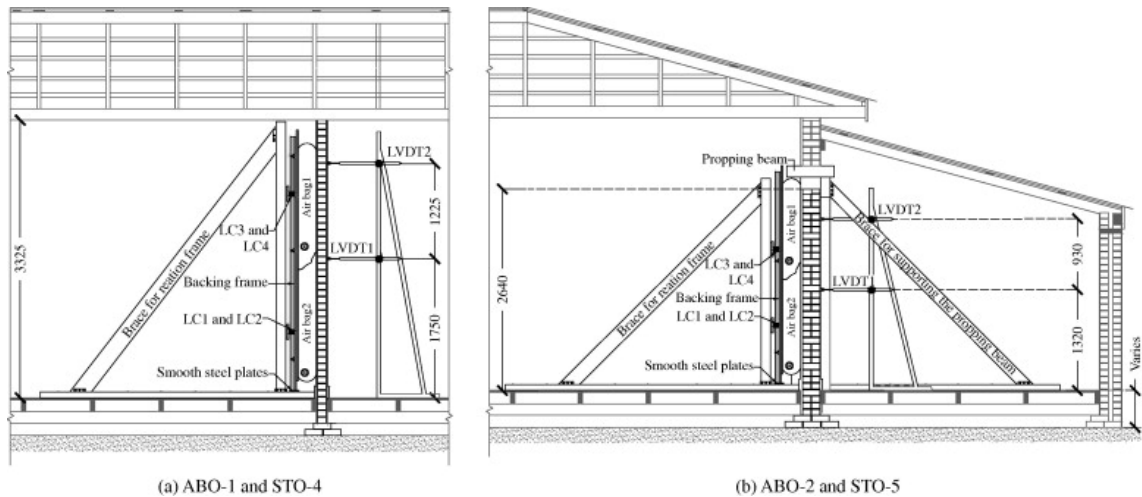
Publikace o testech konstrukčních celků se zaměřily hlavně na zdi, trámy a klenby. Z první skupiny stojí za zmínku práce N. Ismaila [42] a [43].

N. Ismail a J. M. Ingham popisují zkoušení zděných stěn v ohybu. Tyto stěny byly dodatečně vyztužené helikální výztuží a byly podrobeny dvěma sériím testů — v laboratoři (viz obrázek 3.17) a in-situ (viz obrázek 3.18), vždy v plném měřítku, kdy laboratorní testy

simulovaly testy in-situ. V rámci testů byly sledovány mechanismy porušení, odezva na cyklické zatížení, ohybová pevnost stěn, maximální posunutí, pseudoduktilita a přetvoření helikální výztuže. Na závěr byly sledované parametry výsledků na zesílených stěnách porovnány s výsledky neupravených a nevyztužených stěn. Z výsledků vyplynulo, že po zesílení narostla únosnost o 143 – 434 %. Všechny sledované vyztužené stěny vykazovaly duktilní bilineární chování a nedošly do limitního stavu únosnosti před ukončením z důvodu velkých přetvoření. Bylo potvrzeno, že kotevní délky 300 mm dostatečně zaručují plné využití výztuže. Menší z hodnot nárůstu únosnosti (143 %) nastala u dříve porušené stěny – tato stěna sice nevykázala vysoký nárůst únosnosti, ale duktilita byla stále velmi vysoká. Některé stěny byly vyztužené pouze na jedné straně, což vyústilo v nárůst únosnosti na 300 % původní hodnoty na tažené straně tažené výztuže a 125 %, když byla výztuž tlačena. [42]



Obrázek 3.17: Schéma laboratorního zkoušení zděné stěny vyztužené nerezovou helikální výztuží. Stěna je postavená mezi sadou airbagů a je jimi zatěžována. Převzato z [42].

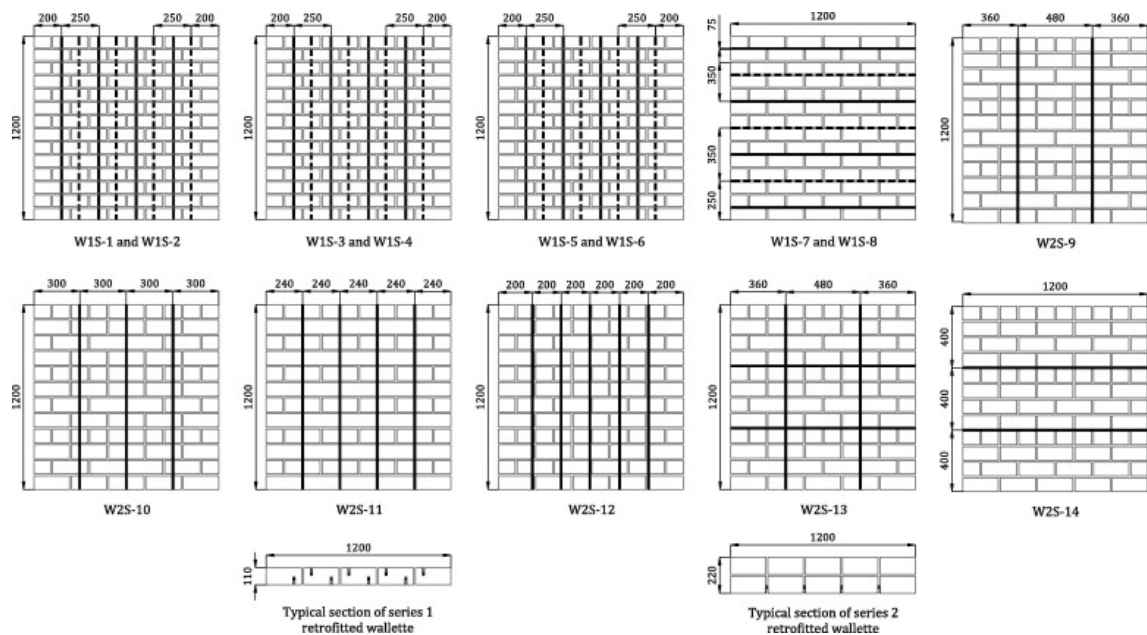


Obrázek 3.18: Schéma zkoušení zděné stěny in-situ – stěna zatížená sadou airbagů z jedné strany. Převzato z [42].

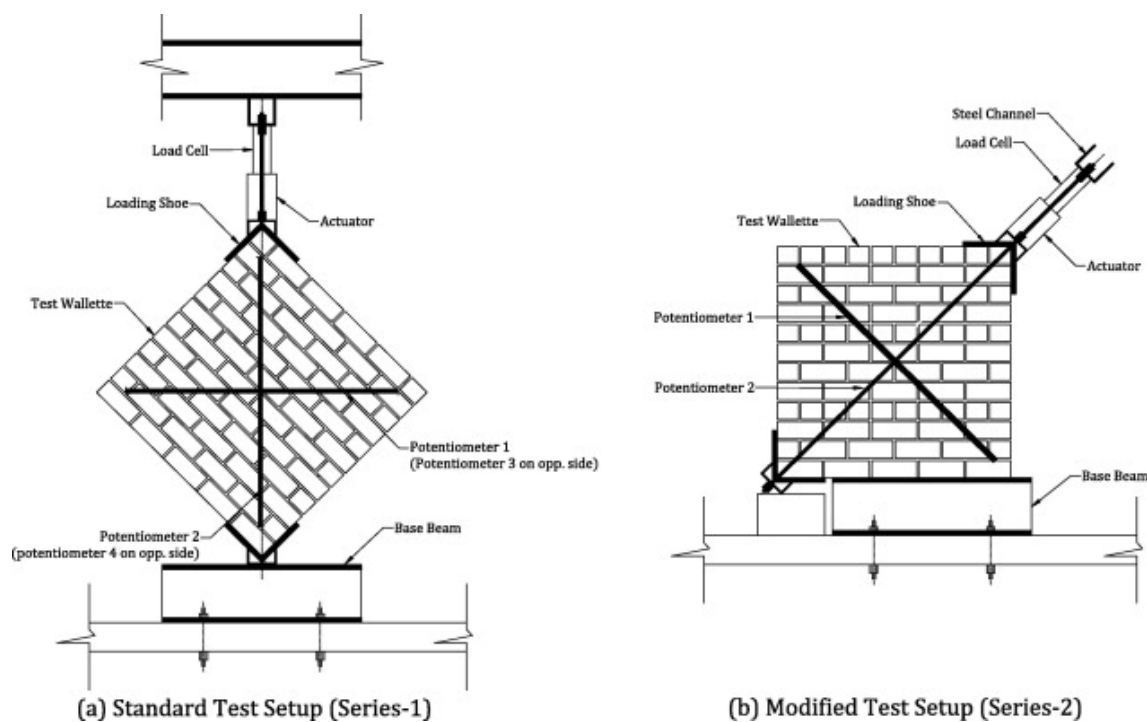
N. Ismail s kolektivem provedli také testy smykového chování nevyztužených cihelných stěn, dodatečně zesílených helikální výztuží. Cílem experimentu bylo zjištění účinnosti různých vzorů vyztužení (schéma na obrázku 3.19) proti působení příčných sil při diagonálním tlaku (schéma na obrázku 3.20).² Zkoumané vzory vyztužení zahrnovaly vyztužení vodorovné, svislé a do kříže. Celkem bylo otestováno 17 stěn o rozměrech 1,2 m × 1,2 m, širokých jednu až dvě cihly, z nichž tři byly testovány nevyztužené a ostatní byly vyztužené různými vzory pomocí helikální výztuže. Byl zkoumán způsob porušení, pevnost ve smyku, maximální posun ve spáře, pseudo duktilita a modul pružnosti v tlaku a ve smyku. Z výsledků bylo zjištěno, že nevyztužené stěny vykazovaly náhlé zhoršení únosnosti po dosažení maxima a porušily se podél vzniklé diagonální trhliny ve směru zatížení, zatímco zesílené stěny se porušily stejně a ve stejném směru s tím rozdílem, že vykazovaly více duktilní chování a větší smykovou pevnost (114–189 %). [43]

Vodorovné vyztužení se ukázalo jako efektivní pro překonání trhlinek vznikajících těsně před dosažením maximálního zatížení, což umožnilo větší deformaci. Únosnost sice výrazně vyšší nebyla, ale za to se výrazně zvýšila pseudo duktilita. Vyztužení svisle a do kříže se ukázalo jako nejlepší ve smyslu zvýšení pevnosti a pružnosti. Přítomnost svislé výztuže zabránila rozevírání trhliny souběžně s úhlopříčkou, což mělo za následek možnost větších posunů při zachování únosnosti proti zatížení působícímu v úhlopříčce. Nárůst smykové síly byl v tomto případě mnohem výraznější než při vodorovném vyztužení. Při zvyšování množství svislé výztuže se snižoval pokles únosnosti po dosažení maxima, zároveň se zvýšením duktility. Hlavním mechanismem vzniklým pomocí vertikálního vyztužení helikální výztuží bylo omezení dilatace vyvolané smykem, což vedlo ke zvýšení třecího odporu ve smyku podél smykových trhlin. Hmoždinkový efekt byl zřejmě nevýznamný, jelikož výztuže byly v místě vzniklé spáry výrazně poohýbané. V neposlední řadě se ukázala výrazná vlastnost helikální výztuže – schopnost skvělého kotvení na krátkých kotevních délkách. [43]

²Poznámka autora: Jedná se o způsob namáhání stěny ke kterému může dojít například při zemětřesení. Zděná stěna tvořící výplň železobetonového skeletu je stlačena ve směru její úhlopříčky, což vyvolává v kolmém směru příčný tah. Zároveň dochází k vybočení stěny z roviny a případně destrukci.

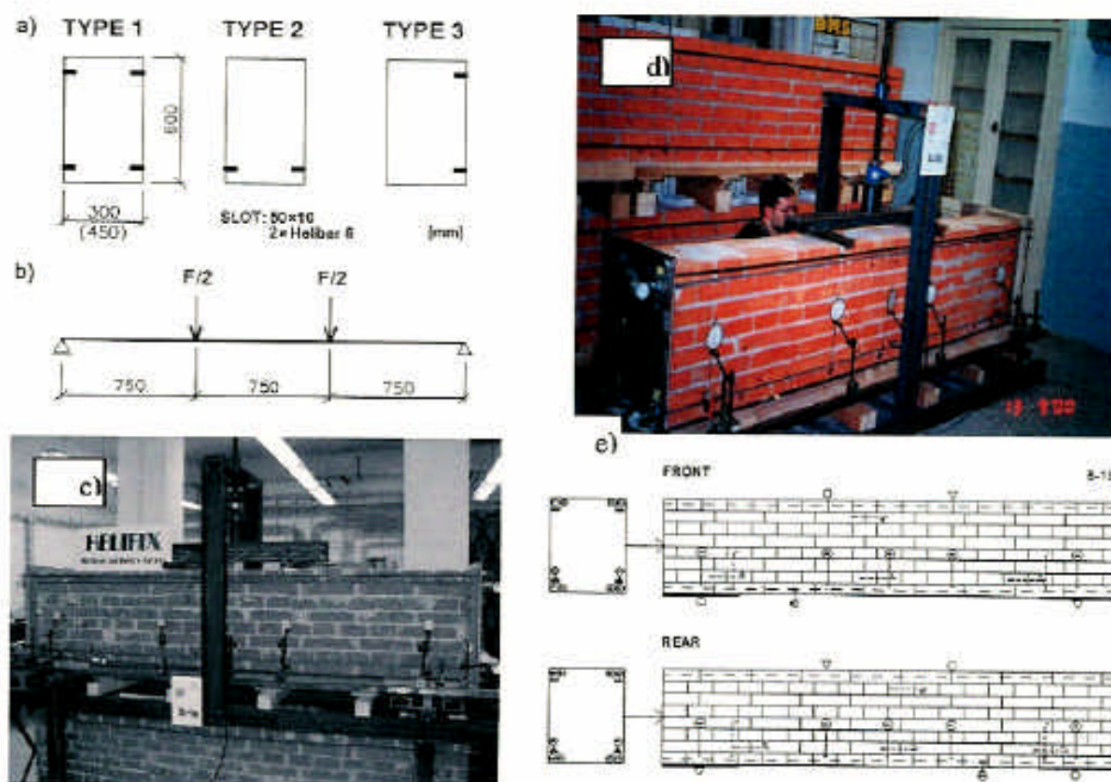


Obrázek 3.19: Vzory vyztužení nerezovou helikální výztuží proti působení příčných sil při působení tlaku v úhlopříčce. Převzato z [43].



Obrázek 3.20: Způsoby zkoušení vyztužení nerezovou helikální výztuží proti působení příčných sil při působení tlaku v úhlopříčce. Modifikovaný test (vpravo) byl prováděn z důvodu, že standardní (vlevo) byl nevhodný pro těžší stěny. Převzato z [43].

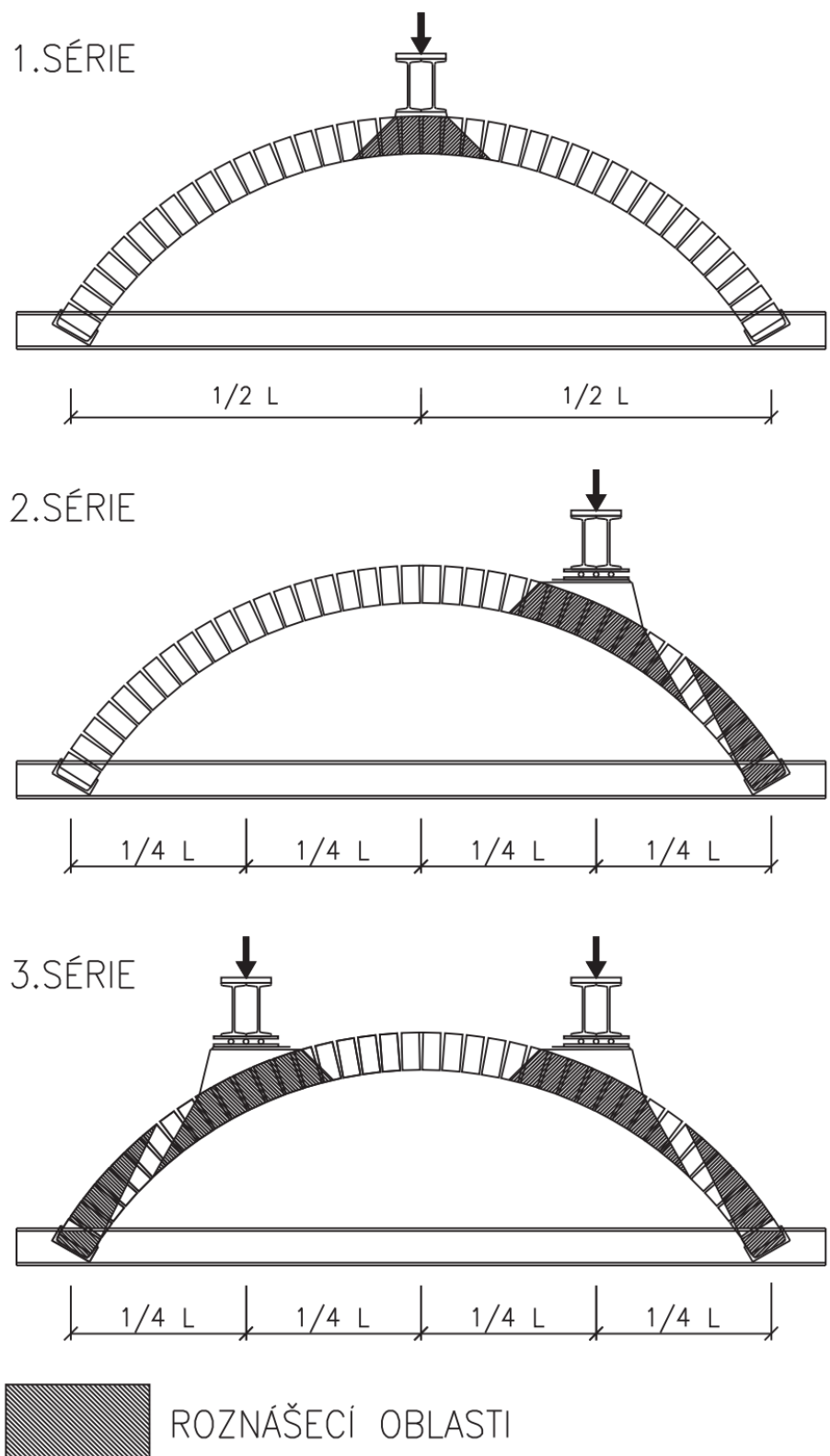
Trámy jsou podrobně řešeny v publikaci P. Štěpánka a J. Czempuela popisující testy téměř třímetrových zděných trámů vyztužených různými způsoby helikální výztuží k prokázání použitelnosti systému pro jejich zesílení (obrázek 3.21). Jeden z testovaných trámů byl referenční, bez vyztužení a tři sady byly různě vyztužené – u tlačného i taženého povrchu, vlevo i vpravo; u tlačného i taženého povrchu na jedné straně; a pouze u taženého povrchu. V rámci testů byla měřena deformace uprostřed rozpětí, působící síla a síla v prutech umístěných podél spodního líce trámů (tyto zmíněné pruty se podílely pouze na měření síly, nikoliv na únosnosti trámů). Všechny vyztužené trámy vykázaly řádově vyšší únosnost než nevyztužený trám, přičemž nejvyšší únosnosti z vyztužených trámů dosáhly ty, které byly vyztuženy symetricky vůči podélné ose. Výsledky byly použity k porovnání s analytickým modelem uvedeným v podkapitole 3.6.3 – „Výpočetní modely konstrukčních celků“. [15]



Obrázek 3.21: Zkoušení různě vyztužených zděných trámů. Převzato z [15].

V neposlední řadě, experimenty na klenbách jsou popsány v publikaci P. Štěpánka a M. Zlámalá, kteří provedli experimenty na zděných klenbách v reálném měřítku (rozpětí 2600 mm, vzepětí 750 mm), které byly zesíleny helikální výztuží ve dvou nebo třech drážkách (obrázek 3.22). Klenby byly při statické zkoušce zatíženy buď uprostřed, v první čtvrtině rozpětí a nebo v první a třetí třetině rozpětí. Podstatný nárůst únosnosti po zatížení byl zaznamenán u klenb zatížených v polovině a jedné čtvrtině. [14]

Tyto experimenty jsou dále rozebrány v podkapitole 3.6.3 – „Výpočetní modely konstrukčních celků“.



Obrázek 3.22: Schéma zkoušení kleneb vyztužených helikální výztuží. Převzato z [14].

3.6.2 Testy kotvení

Testy kotvení se dají v zásadě rozdělit na experimenty na kotvení v drážce a ve vrtu. Kotvení ve vrtu je poměrně probádáno a existují tedy podklady, kterých se dá ve výzkumu chytit. Na druhou stranu, kotvení v drážce má jen jednoho zástupce, který byl pro tento účel nalezen a je využitelný v rámci rešerše. Je docela pravděpodobné a přirozené, že se autoři vyhýbají další nejistotě, která může vzniknout excentrickým zatížením, oproti zkoušení ve vrtu.

Kotvení ve vrtu

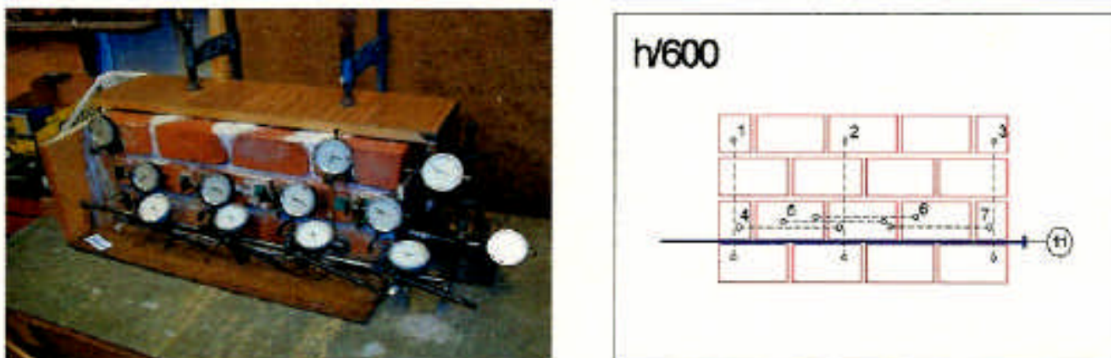
O kotvení do vrtu pojednávají hlavně M. Maragna s kolektivem a dvojice P. Štěpánek a J. Czempiel, přičemž oba autorské týmy mimo jiné zaznamenávali pohyb volného nezatíženého konce zakotvené výztuže, který vypovídá o výhodné soudržnosti helikální výztuže a jejího okolí.

M. Maragna a kolektiv provedli sérii testů výztuží kotvených v maltě v různých kotevních délkách s cílem dát parametry pro definici soudržnosti, potřebnou ve výpočtech. Výsledky byly poté konfrontovány s analytickým modelem, který je zde také zmíněn, v podkapitole 3.6.4 – „Výpočetní modely kotvení“. Za zmínku stojí způsob měření deformace pomocí připevněného plechového talíře, který slouží k pokračování měření bez ohledu na zkroucení výztuže (obrázek 3.23). Experimenty ukázaly výrazný rozdíl mezi posunem výztuže na začátku a na konci kotevní délky a také výrazný rozdíl v maximální síle (odporu) při použití dvou různých kotevních délek, kvůli kterému autoři doporučují zkoušení soudržnosti spíše na kratších kotevních délkách, kdy se výztuž nedostává k hranici její pevnosti. [44]



Obrázek 3.23: Ukázka zkušební sestavy pro zkoušení kotvení ve válci z kotevní zálivky. Na obrázku jde vidět použití plechového talíře pro měření pomocí snímačů. Převzato z [44].

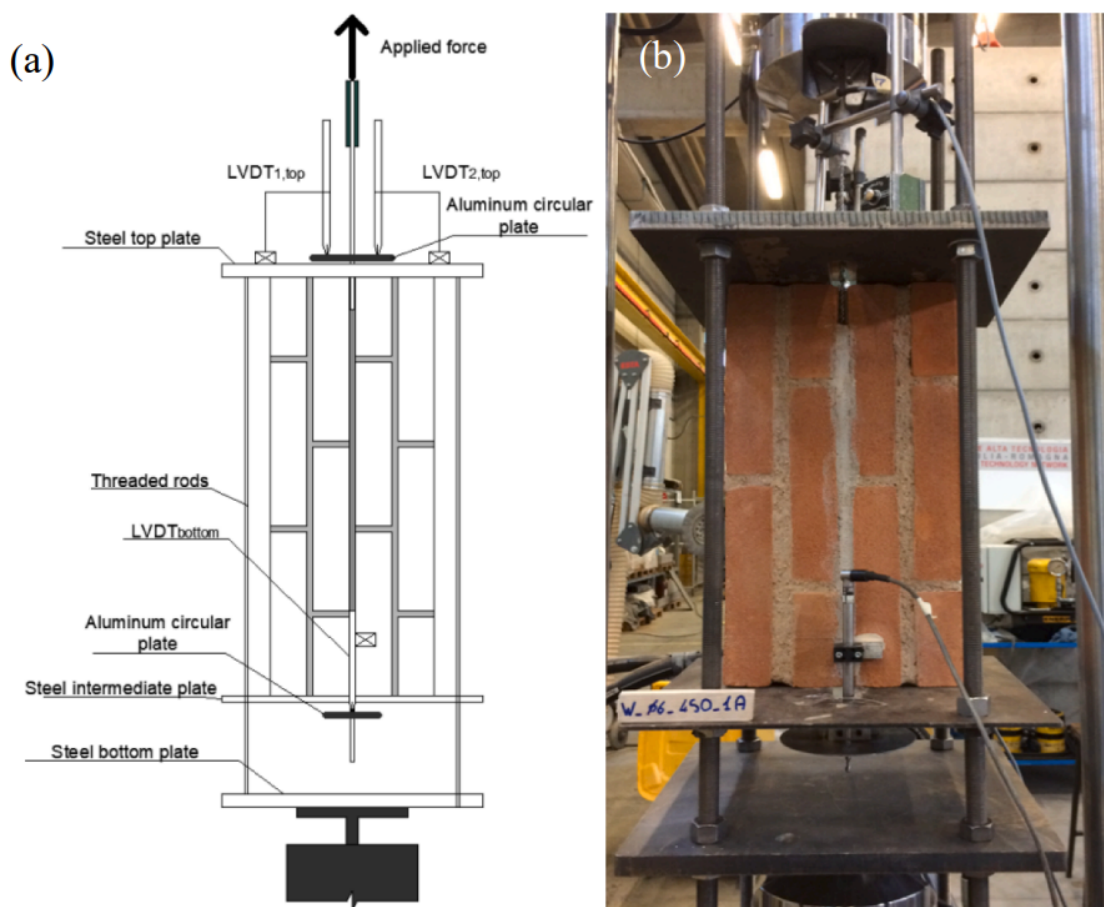
P. Štěpánek a J. Czempiel popisují testy kotevní délky provedené na několika cihelných blocích (obrázek 3.24). Cílem experimentu bylo porovnání výkonu běžné betonářské a helikální výztuže v různých kotevních délkách. V rámci práce se měřilo (mimo jiných vlastností) i posunutí na volném konci výztuže, díky kterému se dá potvrdit vhodnost kotevní délky u každého z provedených experimentů. Experimentem bylo prokázáno, že kotevní délka helikální výztuže ve zkoušeném cihelném bloku je menší než 300 mm a tato hodnota byla porovnána s hodnotami získanými výpočtem, jak je popsáno později v podkapitole 3.6.4 – „Výpočetní modely kotvení“. Zároveň je dobré podotknout, že helikální výztuž byla daleko lépe využita ve vztahu k její možné únosnosti než byla betonářská výztuž. [15]



Obrázek 3.24: Ukázka zkoušení kotvení ve zděném bloku. Převzato z [15].

Kotvení v drážce

Kotvení v drážce, pro tuto práci nejcennější, je zastoupené v publikaci C. Gentilini a kolektivu, kteří se v ní zabývají porovnáním kotvení helikální výztuže centricky ve vrtu (ve válci z kotevní zálivky) a excentricky v drážce ve zdivu (obrázek 3.25) při použití stejných kotevních délek. Autoři článku zjistili, že kotvení v drážce a ve vrtu vykazovalo podobný průběh zatížení v závislosti na deformaci a že tento průběh probíhá ve třech fázích – první pseudo-lineární až nelineární chování do dosažení prvního vrcholu, druhá s poklesem na lokální minimum a třetí fáze s růstem do dalšího maxima. Poslední kotevní délka, která prokázala toto chování byla 550 mm a další (700 mm) už se porušila před porušením spoje. První maximální zatížení rostlo téměř lineárně s kotevní délkou. Výztuže kotvené v drážce ve zdivu se po určité době vysunovaly až do zastavení testu. U některých těles došlo k rozštípnutí a tím pádem k nižšímu špičkovému zatížení. Testy obecně vykazovaly rotaci výztuže během zatížení. [45]

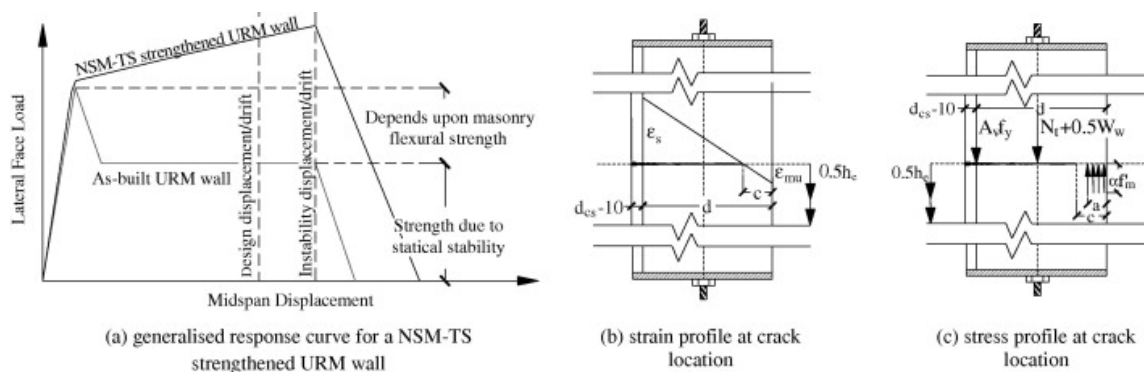


Obrázek 3.25: Schéma a fotografie zkoušení nerezové helikální výztuže v drážce. Převzato z [45].

3.6.3 Výpočetní modely konstrukčních celků

Publikované výpočetní modely konstrukčních celků se dají v základu rozdělit na modely využívající podobný princip jako je využíván při návrhu železobetonových konstrukcí a konstrukcí z vyztuženého zdiva (tedy řešení rovnováhy sil v průřezu), na modely vzpěra - táhlo a na numerické modely metodou končených prvků. Publikace o těchto třech typech jsou postupně rozebrány v následujícím textu.

Princip návrhu železobetonu nebo vyztužených stěn je použitý v publikaci N. Ismaila a J. M. Inghama, kde do návrhu vstupují neznámé jako zatížení, geometrie, vlastnosti helikální výztuže a pevnost zdiva v tlaku, jako jediná neznámá týkající se materiálu konstrukce. Je důležité podotknout, že jde jen o vysvětlení návrhu vyztužení do experimentu (popsaném v podkapitole 3.6.1 – „Testy konstrukčních celků“) a ne o doporučený výpočtový model. Přesto je model v článku v rámci diskuze validován a je shrnuto, že reálné hodnoty únosnosti byly o 10 – 30 % vyšší, častěji u vyšších stěn, kde došlo k větší deformaci výztuže a tím k jejímu vyššímu zapojení. [42] Nákres parametrů výpočtu je možné vidět na obrázku 3.26.



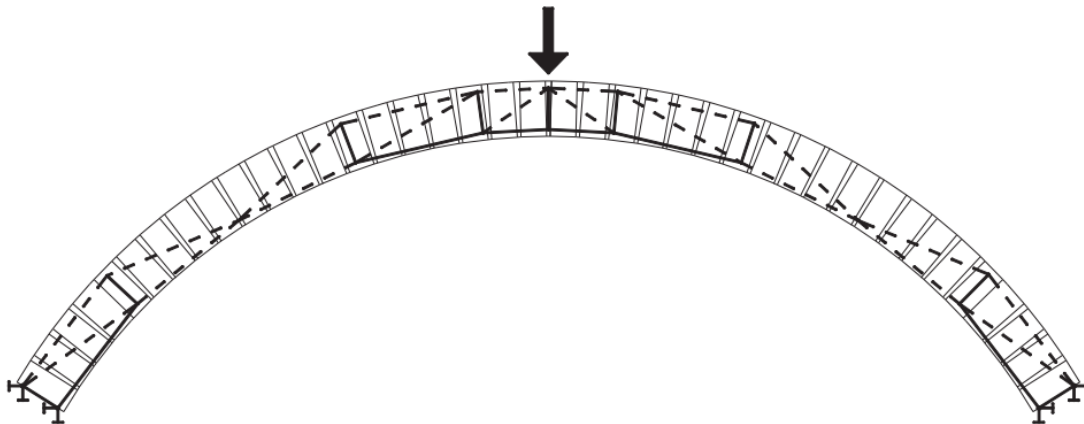
Obrázek 3.26: Předpoklady návrhu vyztužené stěny pro experimenty v [42]. Vlevo diagram fází působení v závislosti na posunutích, uprostřed a vpravo průběhy přetvoření a sil v řezu. Převzato z [42].

P. Štěpánek spolu s J. Czempielem popisují analytický model chování trámů představených v podkapitole 3.6.1 – „Testy konstrukčních celků“. Model je založený na předpokladu, že k porušení dojde ohybem, nikoliv smykem a to ve třech fázích: V první fázi dochází pouze k elastickému chování trámů; Ve druhé fázi je průřez potrhaný a je zapojena i helikální výztuž a to v elastické části jejího chování; Ve třetí fázi je trám držen jen postupně se natahující a uvolňující výztuží. Každá zmíněná fáze má v modelu nastavenou vlastní tuhost. Limit pro první fázi je spočítán na základě pevnosti trámu v tahu za ohybu. Limit pro druhou fázi vychází z reálných měření a to na úrovni limitního protažení výztuže pro tuto fázi a poměr momentu vyztuženého a nevyztuženého trámu v tom daném bodě. Model podporoval měření na trámech vyztužených symetricky vzhledem k podélné ose, zatímco nesymetricky vyztužené trámy vykazovaly odlišné chování (zřejmě vzhledem k přítomnosti kroucení). [15]

P. Štěpánek s M. Zlámalem se zamýšlí nad nemožností použití tradičních norem pro návrh zdiva, jelikož před aplikací výztuže již ve zdivu existuje určitý stav napjatosti, který dané normy nerespektují. Z toho důvodu navrhuje postup vycházející z metody mezní rovnováhy, jako v případě běžného návrhu železobetonové konstrukce při působení momentu a osově síly. Přístup umožňuje superponovat stavy, kterým je konstrukce vystavena a vyžaduje jen malou znalost materiálu konstrukce (pevnost zdiva v tlaku a vlastnosti helikální výztuže). [14]

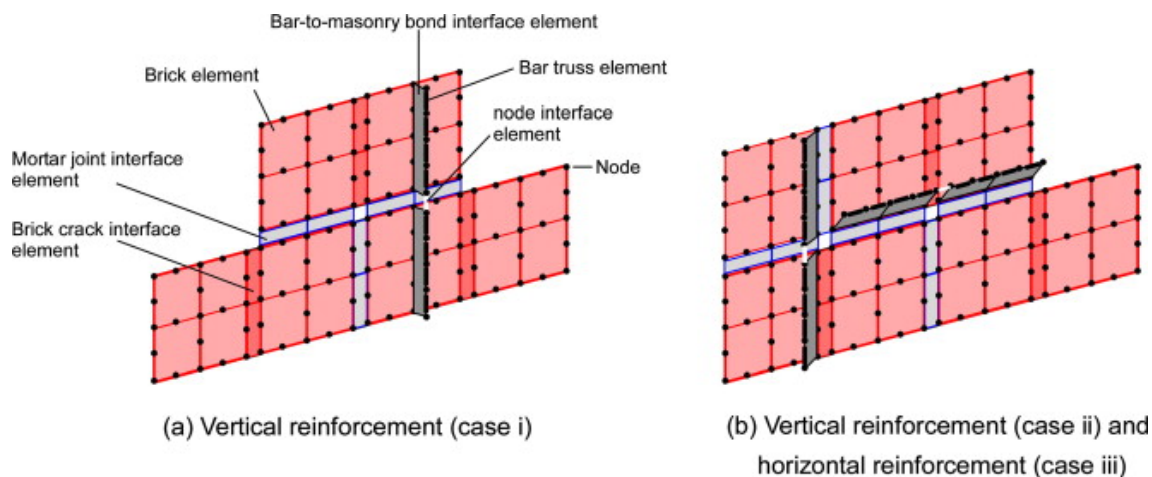
Metoda vzpěra – táhlo je použita v publikaci P. Štěpánka a M. Zlámala, kteří zkoumali experimenty popsané v podkapitole 3.6.1 – „Testy konstrukčních celků“ právě pomocí výpočtu metodou vzpěra – táhlo. Při výpočtu jsou použité předpoklady jako pro tento typ výpočtu v případě železobetonových konstrukcí, nicméně jsou přidány úvahy reflektující charakter zdiva. Smyk je přenášen pouze soudržností zdiva ve smyku, tlak je přenášen pevností zdiva v tlaku a tah je přenášen pevností výztuže v tahu a jen v místech, kde tato výztuž je. Autoři se zamýšlí nad nevhodností modelu vzpěra – táhlo v případě, že by došlo ke snaze napodobit každý detail fungování konstrukce a navrhuje vhodný postup rozdělení kleneb na větší celky a poté jejich řešení. Je počítáno s řešením ve více iteracích, což znamená, že pokud je někde překročena pevnost zdiva v tahu, je zapotřebí v tom místě buď přidat výztuž a nebo dané místo odebrat z modelu jako táhlo a provést nový výpočet. Veškeré sestavy vzpěr a táhel musí být navrženy s ohledem na splnění podmínek rovnováhy. Bylo prokázáno, že model vzpěra – táhlo dobře reflektuje simulovaný experiment. [14] Ukázka

modelu s již vyloučenými částmi je na obrázku 3.27. V článku není uveden výpis jednotlivých použitých materiálových charakteristik zdiva, ale je patrné, že jich je poměrně dost, aby byla reprezentována únosnost zdiva v tahu, tlaku i smyku.

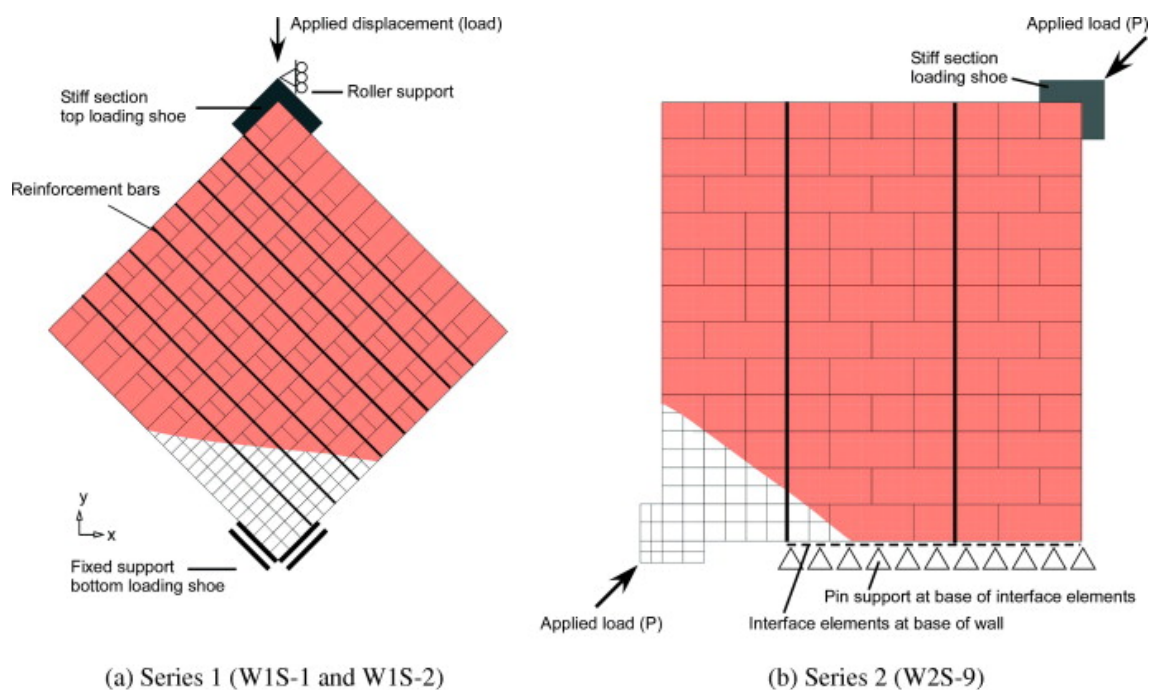


Obrázek 3.27: Rozmístění vzpěr a táhel při výpočtu metodou vzpěra – táhlo s vyloučením táhel v místech taženého zdiva a s vložením kloubů pro klenbu zatíženou uprostřed rozpětí. Převzato z [14].

Výpočty konstrukčních celků metodou konečných prvků využili R. B. Petersen a kolektiv v numerické studii popisu smykového chování stěn vyztužených helikálními výztužemi z dříve publikované studie [43], dříve zmíněné v podkapitole 3.6.1. K popisu byl použit dvourozměrný model, počítaný metodou konečných prvků a měl sloužit k hlubšímu pochopení závěrů dříve publikované studie. Modelování zahrnovalo pouze chování v rovině a případné vybočení, které mohlo v reálu nastat, nebylo simulováno. Prvky byly modelovány jako jednotlivé cihly, včetně počítání s možností rozpůlení cihel pod zatížením. Veškeré spoje byly simulovány tak, aby reflektovaly změnu tuhosti s postupným praskáním stěn pod zatížením. Výztuže byly modelovány jako příhradové lineární prvky o dvou bodech. Okrajové podmínky podepření byly vytvořeny pomocí tuhých prvků. Veškeré uzly a jednotky se podřídily rozměrům cihel. Na obrázku 3.28 je ukázka popsaného modelu v detailu a na obrázku 3.29 jako celku. Model vystihl chování stěn s vysokou přesností a pomohl osvětlit fungování mechanismu vyztužení: obecně je výztuž namáhána tahem a brání otevírání trhlin s tím, že svislá výztuž zabráněním rozevírání pomáhá vytvářet větší třecí sílu ve smykové trhlině. V článku je zdůrazněno, že by se měla věnovat speciální péče výběru stanovení modulu pružnosti mezi výztuží a zdivem. Předkládaný model může simulovat jak chování stěn namáhaných smykem a vyztužených helikálními výztužemi, tak i chování stěn vyztužených uhlíkovými lamelami, pro které byl originálně vytvořen. Výpočetní model obsahuje kromě vlastností helikální výztuže asi 14 různých materiálových charakteristik, týkajících se zdiva a jeho kontaktu s kotevní zálivkou. [46]



Obrázek 3.28: Ukázka detailu výpočetního modelu R. B. Petersena a kolektivu. Na obrázku lze vidět detail napojení prvků tvořících výpočtovou helikální výztuž. Převzato z [46].



Obrázek 3.29: Ukázka celého výpočetního modelu R. B. Petersena a kolektivu. V dolních rozích lze vidět síť konečných prvků. Převzato z [46].

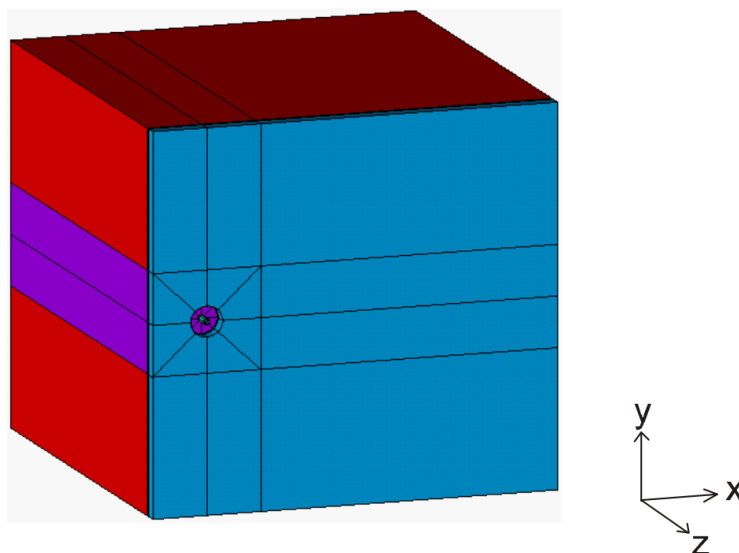
P. Štěpánek a M. Zlámal zkoumali experimenty popsané v podkapitole 3.6.1 – „Testy konstrukčních celků“ také pomocí modelování metodou konečných prvků. Zdicí prvky byly modelovány jako lineárně pružný materiál, malta jako lomově plastický materiál s nelineární tlakovou oblastí, výztuž jako diskretní výztuž ve formě prutových prvků, to celé s doplněním modelů soudržnosti. Detailní výpočty metodou konečných prvků měly výsledky sledující reálné chování zkoušených klenb a potvrdili vhodnost běžně používaných parametrů pro kontaktní úlohy mezi zdicími prvky a maltou. [14] Z článku není patrné jaké

materiálové charakteristiky zdiva byly použity, ale vzhledem ke kontextu je patrné, že jich bylo mnoho.

3.6.4 Výpočetní modely kotvení

Výpočetní modely kotvení často doplňují experimenty prováděné na kotvení helikálních výztuží a to buď přímo ve stejných člancích nebo v dalších publikacích. Ve některých případech se jedná o modely vystihující chování konkrétních vzorků, v jiných případech jde o návrh výpočetního modelu, zatím bez zpětné vazby z experimentu. Všechny modely spojuje potřeba znalosti materiálových charakteristik a liší se jen v míře, v jaké tyto charakteristiky potřebují.

P. Štěpánek a J. Czempiel popisují model řešený metodou konečných prvků (obrázek 3.30), který simuluje kotvení výztuže vytvořením krychle zdiva o hraně 300 mm, ve které je blok kotevní zálivky s vloženou helikální výztuží, a vše je modelováno prostorovými konečnými prvky. Výztuž je konstantně tažena silou a kromě jejích vlastností a vlastností kotevní zálivky vstupuje do modelu asi 5 materiálových charakteristik zdiva. Zdivo a kotevní zálivka kolem helikální výztuže jsou drženy simulovanou ocelovou deskou s otvorem na helikální výztuž. V rámci experimentu byla zjištěna a popsána závislost na různých charakteristikách modelu a tyto charakteristiky byly měněny a porovnávány ve formě 4 modelů. Se zavedenými předpoklady bylo spočítáno, že kotevní délka helikální výztuže by měla být 155 mm pro maltu použitou v experimentu na cihelných blocích popsaných v podkapitole 3.6.2 – „Testy kotvení“, což je o 25 mm více než bylo spočítáno analyticky pro stejné vstupy v rámci stejné publikace. Tento analytický model kotvení výztuže má formu diferenciální rovnice, do které kromě vlastností helikální výztuže vstupuje modul pružnosti v tahu, tloušťka a Poissonův součinitel kotevní zálivky. Se zavedenými předpoklady bylo spočítáno, že kotevní délka helikální výztuže by měla být 130 mm pro maltu použitou v experimentu na cihelných blocích v podkapitole 3.6.2 – „Testy kotvení“. [15]



Obrázek 3.30: Model pro výpočet metodou konečných prvků dle P. Štěpánka a J. Czempieľa. Převzato z [15].

M. Maragna a kolektiv představují analytické řešení pro popis soudržnosti helikální výztuže s kotevní zálivkou v podobě diferenciálních rovnic, nicméně zatím bez závěrů a porovnání s experimenty. [44]

H. Meischner a T. Jahn ve své knize popisují sešívání stěn pomocí helikální výztuže. V knize podrobně popisují praktický přístup k návrhu opravy a zdůrazňují, že helikální výztuž není řešením zesílení, ale pouze opravou trhlin, pro zajištění strukturální integrity konstrukce po odstranění nebo eliminování problému, který trhliny způsobil. Metody výpočtu a návrhu sešití helikální výztuží vychází z předpokladu, že trhlina je nově spojena helikální výztuží, která působí jako pružina, která musí být dostatečně tuhá na to, aby brzdila nové rozevírání trhliny díky vnějším vlivům (jako například teplota) a dostatečně měkká na to, aby zesílená část nebyla příliš tuhá, aby nedošlo k prasknutí za touto částí. Výpočet zahrnuje asi pět materiálových charakteristik zdiva a kontaktu s kotevní zálivkou či výztuží. Stejně jako částí návrhu je výpočet kotevní délky l_{es} , na které je veškeré napětí z výztuže přeneseno do zdiva. Jakmile je tato délka známá, výpočet se zjednoduší na výpočet pružiny o vlastnostech samotného prutu helikální výztuže a jeho deformaci na šířce trhliny a polovině součtu dvou zmíněných kotevních délek l_{es} . Autoři jsou si vědomi nedostatku znalostí o materiálu stávající zesílené konstrukce a přicházejí i se zjednodušujícími předpoklady návrhu. [16]

3.7 Shrnutí současného stavu poznání

Z kapitoly 3 – „Současný stav poznání“ by měla být patrná potřeba využití systému dodatečně vkládané nerezové helikální výztuže a nutnost rozšíření znalostí o tomto systému, zejména v oblasti jeho testování a návrhu. Tato potřeba vzniká jako součást širokého oboru rekonstrukcí staveb a tak je v rámci kapitoly (v podkapitole 3.1) popsána skupina cílových staveb, co od ní lze očekávat a jak lze konstrukce v této skupině diagnostikovat pro účely získání vstupů pro návrh zesílení pomocí helikální výztuže. Dále navazuje popis možného způsobu umělého napodobení vlastností materiálu těchto konstrukcí pro účely testování (3.2). Po skončení popisu konstrukcí a zjišťování jejich stavu jsou popsány metody oprav, které může doplnit a případně i nahradit systém dodatečně vkládaných nerezových helikálních výztuží (3.3). Systém dodatečně vkládaných nerezových helikálních výztuží je pak v následující podkapitole přiměřeně podrobně popsán (3.4) a navazuje podkapitola o problematice jeho testování (3.5). Následují vybrané relevantní publikace současného výzkumu v této oblasti (3.6). Cílem všech zmíněných částí není podrobný a encyklopedický popis všech zmíněných témat, ale spíše jejich širší uchopení, směřující k zasazení hlavního tématu do reálného kontextu. Tvrzení obsažená v této kapitole jsou buď citována a je možné dohledat podrobnosti a nebo se jedná o obecnou odbornou znalost a případně dedukci na jejím základě, což je tím pádem možné dohledat v jiných zdrojích.

Výsledný mix informací sice vede čtenáře k zamýšlenému výzkumnému problému, který bude snaha řešit, ale zároveň je patrné, že výzkum není konzistentní a stále chybí výraznější propojení jednak výzkumů mezi sebou a také možnosti navázání na publikované výzkumy (například z důvodu absence konkrétních informací o výztuži, o kotevní zálivce a podobně).

Výzkum popsáný v podkapitole 3.6 ukazuje dva základní směry – zaměření na konstrukční celky a na kotvení. Testy konstrukčních celků se dále dají dělit dle typu a namáhání konstrukce a testy kotvení se dají dělit dle typu kotvení a pokladního materiálu. Napříč vzájemně cizími autorskými kolektivy a jejich publikacemi je jen málo společného – liší se pokladní materiály a často není jasný ani výrobce a tedy nejsou jasné ani vlastnosti použitého systému. Z výzkumu je hlavně patrné, vzhledem ke stáří publikací, že se ve stavebnictví

jedná o stále aktuální téma a to hlavně v územích, kde lze očekávat zděné a betonové budovy většího stáří, množství a nebo na území se zvýšenou seismickou aktivitou. Veškeré výzkumy spojuje snaha o výpočet situací, které jsou v rámci publikací testovány.

Výpočty popisující výsledky experimentů na konstrukčních celcích z teoretického pohledu jsou založeny buď na metodě konečných prvků nebo na výpočtech obdobných výpočtu železobetonového průřezu. Výpočty kotvení jsou založeny buď opět na metodě konečných prvků nebo na výpočtech napětí mezi komponentami systému. Všechny výpočty spojuje nutnost zjištění materiálových charakteristik materiálu zesilované konstrukce a je nutno dodat, že se často jedná o mnoho materiálových vlastností. Jelikož ani v teoretických přístupech není jednotná shoda, je pravděpodobně vzdálená i možnost normového postupu návrhu.

V neposlední řadě je třeba dodat, že zřejmě neexistuje jednotná metodika testování nerezových helikálních výztuží. To na jednu stranu tvoří téma samo pro sebe a na druhou stranu to případně komplikuje nalezení vztahu mezi výzkumy řešícími vlastnosti kotvení, jelikož je těžké dosáhnout stejných okrajových podmínek.

Kapitola 4

Výzkumné problémy a návrh řešení

Jak nastiňuje shrnutí současného stavu poznání v podkapitole 3.7, byl na základě studia literatury identifikován výzkumný problém: existuje disproporce mezi kvalitou a kvantitou parametrů nezbytných pro navrhování a skutečností, že se jedná o zesilování existujících konstrukcí, o nichž bývá k dispozici málo informací. Na straně návrhu, výpočetních modelů i použití helikální výztuže je těžké získat potřebné návrhové parametry i celou zesilovanou část konstrukce otestovat, a to i přes široké možnosti stavební diagnostiky. Ke zmíněným problémům patří také fakt, že zatím neexistuje normový postup pro zkoušení nerezových helikálních výztuží a přitom je jejich testování poměrně komplikované a interpretace výsledků je nejednoznačná. Podrobnější informace jsou v podkapitolách 3.1 – „Analýza vlastností stávajících konstrukcí“, 3.4 – „Zesilování pomocí helikální výztuže“, 3.5 – „Problematika zkoušení helikálních výztuží“ a 3.6 – „Výzkum v oblasti použití helikální výztuže“.

Předkládaná práce se snaží nabídnout možnost testování výztuží v drážce takovým způsobem, aby bylo možné spoj testovat přímo na materiálu zesilované konstrukce, a k tomu najít možnost predikce chování spoje na základě výsledků metod stavební diagnostiky. V případě úspěchu prezentovaných metod by mohla být značně eliminována zmíněná disproporce a možnosti testování by mohly odpovídat zamýšlenému použití. Za tímto záměrem bylo pro účely této publikace vybráno kotvení helikální výztuže do drážky v betonu, jako běžný a praktický způsob použití (bližší informace v podkapitole 3.4 – „Zesilování pomocí helikální výztuže“, zasazení do kontextu jiných metod v podkapitole „Možnosti zabránění rozšíření trhlin“ – 3.3).

Myšlenka přímo propojit chování spoje helikální výztuže v podkladním materiálu a diagnostiku tohoto materiálu vznikla studiem literatury i autorovou zkušeností s diagnostikou konstrukcí i návrhem statického zajištění budov, včetně právě helikální výztuže. Jako podkladní materiál pro účely testování byl zvolen beton běžné třídy, který byl různě degradován pomocí působení vysokých teplot. Tato volba materiálu vznikla ze záměru vytvořit stejnorodý materiál a vnést do něj různý stupeň degradace, odpovídající reálnému poškození materiálů stávajících stavebních konstrukcí. Dle literatury popsané v podkapitole 3.2 – „Degradace betonu pomocí vysokých teplot“ existuje předpoklad, že se klíčové materiálové vlastnosti zhoršují s různou teplotou a že je možné tato zhoršení detekovat pomocí diagnostiky. Kromě výše uvedeného se práce snaží připojit také prozkoumání možnosti zkoušení samotné výztuže a kotevní zálivky jako doprovodné cíle.

Definice cíle a návrh řešení

Hlavním cílem je zjištění vztahu mezi výsledky metod stavební diagnostiky, aplikovanými na zkoušené vzorky, a chováním spoje helikální výztuže v drážce. Chování je zkoušeno pomocí trámcové zkoušky, přičemž popis chování (včetně zjednodušeného modelu) a validace zkoušky jsou vedlejším cílem. Doprovodné cíle mají podpořit hlavní experimenty, doplnit rešerši literatury a informovat o možnostech zkoušení, případně udat směr dalšího výzkumu.

Kroky k naplnění hlavního a vedlejšího cíle:

- Výroba nevyztužených trámů z prostého betonu
- Tepelná degradace trámů
- Nedestruktivní diagnostika (rychlost průchodu ultrazvuku, metoda Impact-Echo, měření odrazovým tvrdoměrem)
- Vytvoření zářezů pro sledování chování výztuže
- Vyztužení trámů
- Semi-destruktivní diagnostika (odtrhová zkouška)
- Zkoušení výztuží v drážce trámcovou zkouškou
- Destruktivní diagnostika (měření pevnosti v tlaku)
- Zpracování naměřených dat na straně diagnostiky
- Zpracování naměřených dat na straně chování výztuže
- Korelace diagnostiky a výsledků testování v drážce
- Tvorba modelu chování výztuže v drážce

Kroky k naplnění doprovodných cílů:

- Zkoušení kotevní zálivky (pevnost v tlaku, tahu za ohybu a smrštění)
- Zkoušení helikální výztuže (tahová zkouška, měření systémem ARAMIS)

Kapitola 5

Experimenty a jejich vyhodnocení

Hlavní výsledky a jejich vyhodnocení jsou uvedeny v poslední podkapitole 5.6 – „Korelace diagnostiky a výsledků testování v drážce“. Výsledky a popisy experimentů, které umožnily vznik hlavních výsledků předcházejí v podkapitolách 5.5 – „Zkoušení výztuží v drážce“ a 5.4 – „Diagnostika vzorků určených pro testování v drážce“. Před tím vším jsou informace o použitých materiálech v podkapitole 5.3. Celá kapitola začíná popisem možností měření vlastností kotevní zálivky a helikální výztuže, které byly v rámci prací provedeny, a to v podkapitolách 5.1 a 5.2. Řazení podkapitol je záměrně zvoleno chronologicky, pro lepší čtivost textu i přesto, že by obecně bylo lepší „prodat“ hlavní výsledky hned na začátku příslušné kapitoly. Smysl popisu, výsledků a závěrů diagnostiky (v podkapitole 5.4), zkoušení výztuže v drážce (v podkapitole 5.5) a korelace jejich výsledků (v podkapitole 5.6), včetně výsledků navazujících zkoušení materiálů, prezentovaný v následujících podkapitolách je prezentován v článku autora a kolektivu připraveného pro publikování v recenzovaném časopise v kvartilu Q1 [47], v době finálních úprav práce v recenzním řízení.

5.1 Zkoušení kotevní zálivky

Zkoušení kotevní zálivky je nezbytným procesem pro ověření její kvality a vhodnosti pro konkrétní aplikaci. Kotevní zálivka se používá k upevnění výztuže do drážky nebo vrtu v betonových nebo zděných konstrukcích (více v podkapitole 3.4). Zkoušky se provádějí za účelem ověření mechanických vlastností zálivky, jako jsou hlavně pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu a jsou pro tento účel standardizované (v rámci ČR například v [48]). Měření smrštění nebo expanze zálivky během tuhnutí a tvrdnutí jsou důležité, aby se zajistilo, že nedojde k nežádoucím změnám objemu, které by mohly ovlivnit integritu kotvení, přičemž se nabízí zkoušení podle norem ČSN EN 12617-4 a ÖNORM B 3329, popsanych dále. Výsledky těchto zkoušek mohou poskytovat důležité informace hlavně pro výrobce kotevních zálivek, jelikož pravděpodobně není veřejně známé, jaké mají výsledky být a co přesně je testováno. Podle výhod plynoucích z obchodních sdělení a tvrzení v technických listech to vypadá, že pro zajištění bezpečnosti a dlouhodobé spolehlivosti kotvení je důležitá nízká až žádná smrštitelnost, rychlý nárůst pevnosti, vysoká pevnost v tlaku a dobrá možnost injektáže této směsi.

V rámci výzkumných prací byla měřena pevnost v tlaku a v tahu za ohybu a také smrštění. Jak bylo řečeno, není jasné jaké výsledky jsou chtěné, ale přesto jsou pro úplnost a budoucí porovnání prací uvedeny v následujících podkapitolách, včetně způsobu jejich měření.

5.1.1 Tradiční způsob zkoušení

Tradičním způsobem zkoušení v pojetí této práce je myšleno zkoušení zatvrdlých kotevních zálivek podle normy ČSN EN 1015-11 „Zkušební metody malt pro zdivo – Část 11: Stanovení pevnosti zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku“ [48].

Vzorky kotevní zálivky byly připravené ve formách o tří trámečcích v době výroby vzorků ke zkoušení kotvení v drážce (jedná se o úplně stejnou záměš). Výsledné hranoly o rozměrech $40 \times 40 \times 160$ mm byly skladovány ve stejných podmínkách jako právě vzorky pro zkoušení kotvení v drážce, od druhého dne vyjmuty z formy. Zkoušení proběhlo v době zkoušení kotvení v drážce, po více než standardních 28 dnech. Vzorky se umístily do zkušební lisu pro test pevnosti v tahu za ohybu tříbodovým ohybem a po provedení ohybové zkoušky se oba přelomené kusy vzorku použily pro zkoušku pevnosti v tlaku. Obě poloviny byly zatíženy prostřednictvím nástavce, který zajistil, že tlačena část bude přesně 40×40 mm, až do úplného zničení. Výsledky měření jsou uvedeny v podkapitole 5.3 – „Materiály“.

Tradiční zkoušení kotevní zálivky ke zjištění pevnosti v tlaku a tahu za ohybu se ukázalo vhodné i pro kotevní zálivku na helikální výztuže. Nebyla zjištěna žádná odchylka od běžného chování jiných malt.

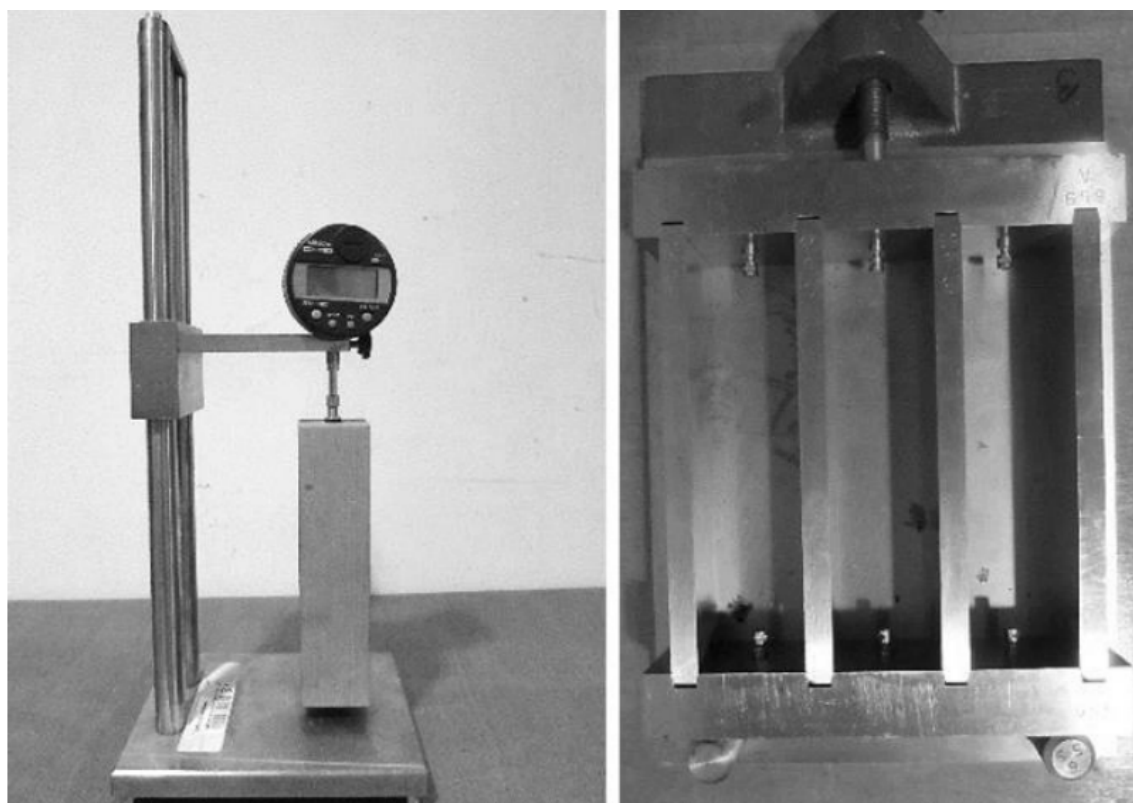
5.1.2 Měření smrštění

V rámci prací na projektu GAČR 17-14302S – Experimentální analýza objemových změn cementových kompozitů v raném stádiu tuhnutí byly vzorky kotevní zálivky vyzkoušeny i z pohledu smrštění. Měření probíhalo podle dvou norem a to ČSN EN 12617-4 – „Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Zkušební metody – Část 4: Stanovení smršťování a rozpínání“ [49] (na obrázku 5.1) a ÖNORM B 3329 – „Vergussmörtel – Anforderungen und Prüfmethode“ [50] (na obrázku 5.2) a výsledky byly publikovány v rámci článku „Comparison of Measurements Methods Intended to Determination of the Shrinkage Development in Polymer Cement Mortars“ [51]. Vzhledem k nemožnosti přímého zhodnocení míry ovlivnění spojů v rámci problematiky řešené v této práci, jsou informace uvedené jen jako součást ukázky možností měření. Citovaný článek obsahuje další zajímavé informace jako je vývoj teploty v raném stádiu tuhnutí, závislosti smrštění na čase a ztrátě hmotnosti. Nicméně pro použití v rámci této práce jsou spíše důležité informace o samotných možnostech měření. Snad, až bude někdy v budoucnu jasné, jak smrštění ovlivňuje vlastnosti spojů, přijdou tyto informace vhod.

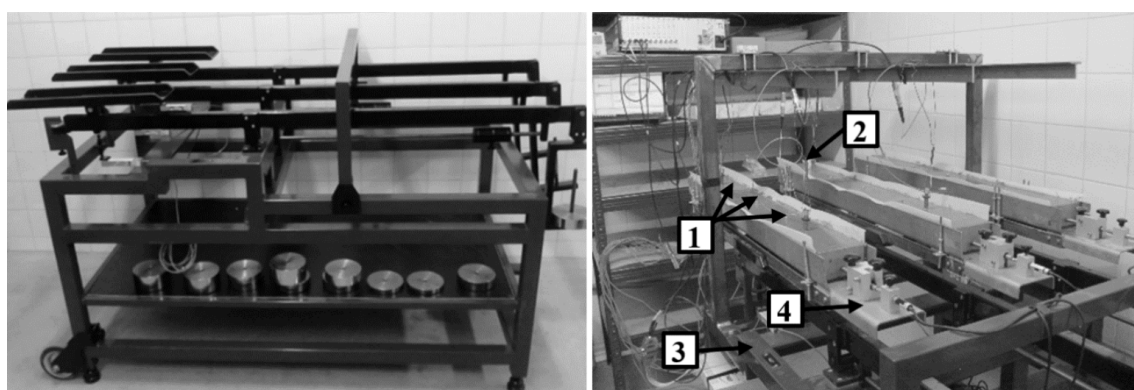
Ze závěru článku vyplývá, že všechna provedená měření vykazovala téměř stejný celkový průběh relativních hmotnostních ztrát bez ohledu na zkušební postup a velikost vzorků. Hlavní výhodou metody podle ČSN EN 12617-4 je skutečnost, že zkušební postup je standardizovaný a všechny zkušební laboratoře, které se specializují na zkoumané malty, jej mohou použít pro deklaraci shody. Existují však určitá omezení, která měření neumožňují během prvních 24 hodin stárnutí materiálu. Hlavní výhodou postupu měření podle ÖNORM B 3329 je schopnost zachytit počáteční změny délky a relativní ztráty hmoty, ke kterým dochází ve velmi rané fázi tuhnutí malt. Dalším přínosem tohoto postupu pro vyhodnocení a interpretaci výsledků je současné měření průběhu teplot a změn vnitřní struktury. Hlavní nevýhodou tohoto postupu je poměrně vysoká pořizovací cena a manipulace s formami a zkušebními tělesy vzhledem k jejich rozměrům a hmotnosti. [51]

Ukázalo se, že běžně používaná kotevní zálivka se během jejího tuhnutí lehce smršťuje, a i přesto se s úspěchem používá. Z toho je zřejmé, že měřená úroveň smrštění příliš nevadí. I přesto by bylo nepochybně zajímavé zjistit, zda existuje vztah mezi únosností spoje a mí-

rou smrštění různých kotevních zálivek. K tomu mohou být použité oba zmíněné postupy, přičemž postup podle ÖNORM B 3329 umožní oproti přístupu podle ČSN EN 12617-4 měření i ve velmi raných stádiích tuhnutí kotevní zálivky.



Obrázek 5.1: Měřicí zařízení a formy podle ČSN EN 12617-4. Převzato z [51].



Obrázek 5.2: Sestava měřících zařízení pro měření podle ÖNORM B 3329 – 1 – značky pro dlouhodobá měření, 2 – teplotní čidlo, 3 – vážicí stůl, 4 – forma k měření smrštění. Převzato z [51].

5.2 Zkoušení helikální výztuže

Jak je zmíněno v předchozím textu, výztuže mají tvar výrazné šroubovice. Zároveň, kvůli výrobě (popsáno v podkapitole 3.5) je průřez v určitém stavu napjatosti, který není rovnoměrný po celé ploše zkoušeného průřezu. To dohromady znamená, že je těžké vzorek uchytit a velmi nepřesné by bylo vzorek zdeformovat do tvaru vhodného k uchycení a až poté testovat. I přes tyto neduhy při testování helikální výztuže získáváme nejpřesnější parametry z celého zesilovacího systému, které pak můžeme filtrovat od chování celého spoje.

Výztuž bylo možné zkoušet tradičním způsobem – běžnou tahovou zkouškou, která je jednoduchá, rychlá a levná. Nebo bylo také možné testovat pomocí přístroje ARAMIS (podrobněji popsánem v podkapitole 3.5) pracujícího na principu DIC – „Digital Image Correlation“, díky kterému můžeme dosáhnout přesnějších výsledků, ale při složitém zpracování dat a větších nárocích na techniku. Tradiční způsob měření byl vybrán jako hlavní pro obdržení parametrů výztuže a měření systémem ARAMIS bylo zvoleno pro otestování samotné možnosti tohoto měření.

5.2.1 Tradiční způsob zkoušení

Kvůli zmíněnému tvaru byly po předchozím vyzkoušení vzorky helikální výztuže opatřeny na obou koncích koncovkou z bezešvé trubky o síle stěny 2,3 mm a vnějšího průměru 21,3 mm. Výztuž byla do trubek vlepena pomocí epoxidové pryskyřice. Trubka byla na straně volné délky výztuže zúžena pro zabránění vyklouznutí výztuže z trubky a pro zabránění prasknutí výztuže přímo v místě napojení do pryskyřice, které u nezúžených trubek nastávalo. Délky koncovek byly 200 mm a volná délka výztuže byla kolem 250 mm.

K měření byl použit mechanický zkušební lis o rozsahu 1000 kN, který se i přes jeho velký rozsah ukázal přesný i v hodnotách měření do 10 kN. Zároveň, díky mechanickému pohonu příčnicku dochází k velmi přesné regulaci a zatěžování je velmi hladké. Zatěžování bylo řízeno deformací rychlostí 0,006 mm/s, přičemž měření probíhalo v rámci posunu samotného příčnicku a také na dvojici potenciometrických snímačů s rozsahem 10 mm, umístěných na základně 100 mm. Snímače byly na výztuži uchyceny přes podložky tvořené dvěma polovinami hliníkové bezešvé trubky vnitřního průměru 8 mm, což odpovídá vnějšímu průměru zkoumané výztuže. Celou sestavu lze vidět na obrázku 5.3.

Při zvoleném způsobu měření nastávaly dva problémy – jakým způsobem výsledky interpretovat a které výsledky odebrat. První problém byl řešen jednoduše, následujícím způsobem: Výsledky byly měřeny v kilonewtonech a deformace v milimetrech. Místo modulu pružnosti bylo zvoleno vyjádření v množství kilonewtonů způsobujících jednotkovou deformaci 1 milimetr a to ze dvou důvodů – jednak kvůli nejednoznačnosti plochy na kterou, kterou by šla síla rozložit a tak získat napětí v tahu a také kvůli zbytečné ztrátě informací, jelikož poměr síly a jednotkové deformace je zcela adekvátní způsobu použití.

Problém výběru výsledků byl řešen o něco hůře. Logicky správné by se mohlo zdát použití informací vrácených potenciometrickými snímači, jenže kvůli kroucení výztuže a jejímu tvaru to byl téměř nemožný úkol. Jednak samotné uchycení snímačů klouzalo a nebylo jasné, zda se v průběhu měření nemění délka základny a také vlivem kroucení došlo u většiny vzorků k pootočení držáků snímačů a následně ke sklouznutí hrotů snímačů z protějších ploch. Nakonec byl zvolen způsob měření deformace na příčnicku zatěžovacího stroje a změna délky byla měřena vůči základně tvořené volnou délkou mezi uchyceními v trubkách. K tomu bylo nutné zhodnotit, zda není toto uchycení porušené, jelikož by to znamenalo i natahování výztuže na délce schované uvnitř trubky, zalité v pryskyřici. Naštěstí je pryskyřice

velmi tuhá a v případě takového posunu bylo vidět, když u nějakého vzorku došlo k jejímu povytažení z trubky. Nakonec, celkem z dvanácti vzorků byly použity tři vzorky helikální výztuže, které nevykazovaly posun v uchycení, průběh měřených pracovních diagramů byl hladký, hodnoty byly v souladu s použitelnými částmi měření ostatních výztuží a hodnoty použitých tří vzorků se vzájemně významně nelišily.

Výsledky jsou uvedeny souhrnně v podkapitole 5.3 – „Materiály“ a byly použity do dalších vyhodnocení popsaných v rámci podkapitoly 5.5 – „Zkoušení výztuží v drážce“. Ukázalo se, že měření popsaným tradičním způsobem je možné, ale je třeba respektovat omezení vyplývající z tvaru výztuže a způsobu její výroby. Jako vhodný způsob uchycení se ukázalo vlepění do koncovek z trubek pomocí epoxidové pryskyřice. Trubky by měly být směrem k volné délce zkoušené výztuže zúženy pro zabránění nežádoucím jevům povytažení výztuže z trubky a porušení výztuže jinde než na volné délce. Co se týká měření deformace, zde je ještě výrazný prostor pro zlepšení, ale i při běžném použití snímačů z každé strany pomocí hliníkových ramínek je to možné, pouze výsledek není vždy zaručen, jelikož se často výztuž nevhodně zkroučí a snímače přestanou měřit k protilehlé základně.



Obrázek 5.3: Ukázka tradičního způsobu zkoušení výztuže, aplikovaného na helikální výztuž.

5.2.2 Měření s využitím systému ARAMIS

V rámci experimentů bylo provedeno měření systémem ARAMIS, teoreticky umožňujícím komplexní měření deformací výztuží, jelikož zkoumá povrch výztuže a lze tedy měřit i rotace a posuny v rámci průřezu. Jak bylo popsáno v podkapitole 3.5, ARAMIS je bezkontaktní optický systém založený na principu digitální korelace obrazů a poskytuje řešení pro analýzu povrchových deformací testovaných objektů jak v diskrétních bodech, tak celoplošně, kdy výsledkem měření je detailní barevná mapa rozložení deformací na zkoumaném vzorku.

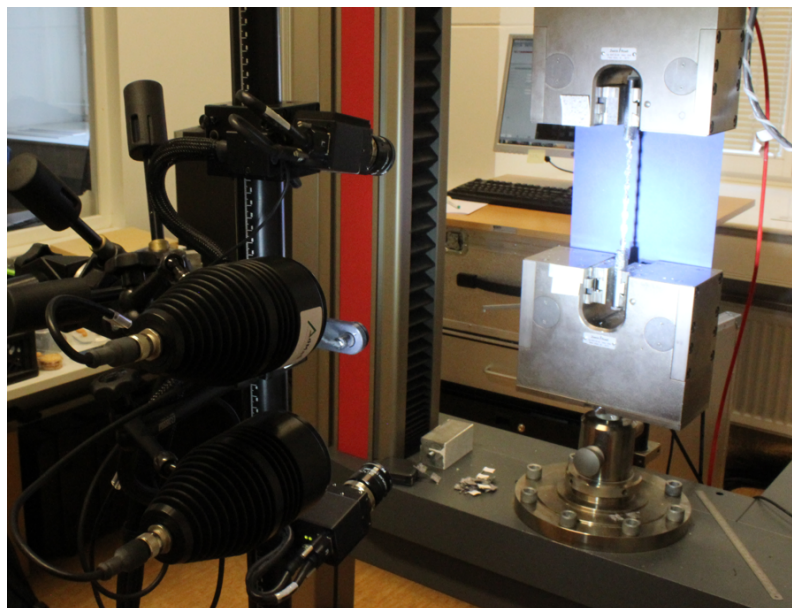
Principem, který systém (včetně software) využívá, je sledování určitých obdélníkových oblastí, takzvaných „facet“, v určitém rastru, ve kterých je spočítán stupeň šedé s předpokladem, že je pro dané místo unikátní. K tomu je potřeba mít vhodné zbarvení povrchu testovaného vzorku a také vhodně nastavit kamery tak, aby v rámci jejich rozlišení byly facetly dostatečně velké, aby na nich bylo co počítat – čím více pixelů na facetě, tím přesnější výpočet stupně šedé. V rámci této práce bylo nastavení experimentálně stanoveno tak, aby na sledovaných plochách žebírek bylo stále množství bodů, které lze sledovat a odpovídal tomu i nástřík barvou. K tomu účelu je v literatuře [52], na jejímž základě měření probíhalo, sada vzorových obrázků, podle kterých lze udělat vhodný vzor s ohledem na nastavení kamer.

Vzor byl nanesen čerstvým nástříkem před každým měřením, aby barva byla stále ještě pružná a nepraskala. Jako první byla sprejem nanášena rovnoměrná vrstva bílé barvy a následně nerovnoměrná vrstva černé barvy (pomocí nedostatečně stlačeného spreje při nástříku tak, aby sprej „prskal“). Jelikož nebylo jisté, zda i přes teoretickou možnost bude sledování na malých plochách úspěšné, byly na boky výztuže přidělané praporky se stejným nástříkem, pro sledování rotace průřezu. Ukázalo se však, že systém je schopný zaznamenat a vyhodnotit rotace i bez těchto praporků, které navíc během měření vlivem pohybu upadají.

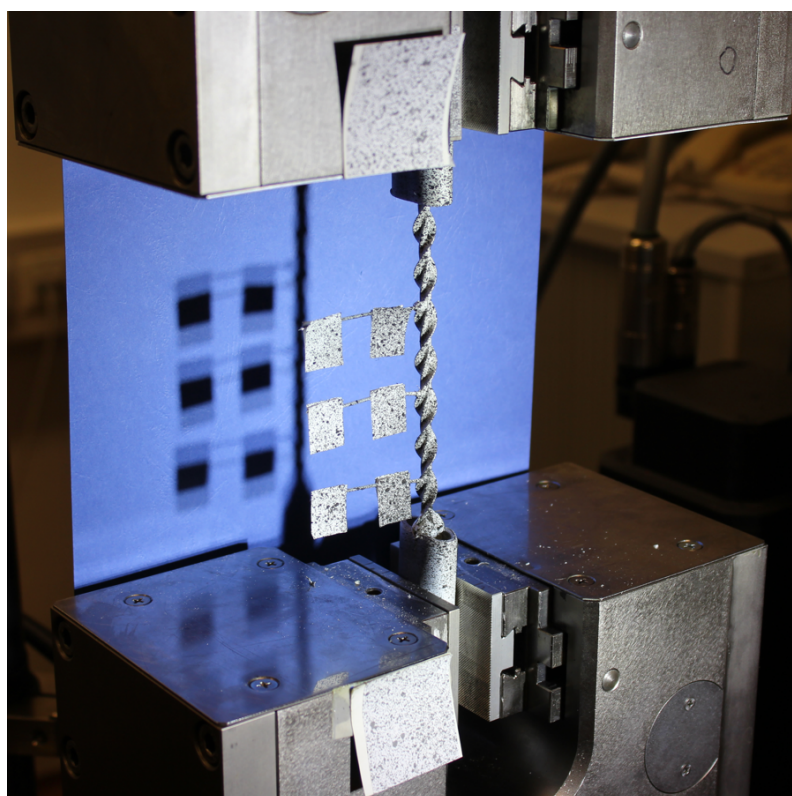
Toto měření sloužilo převážně pro samotné otestování této možnosti měření, zkoumání charakteru chování a případné budoucí srovnání s matematickým modelem. Charakter chování bylo možné sledovat a tím potvrdit, že se celý průřez nechová stejně – například se objevily oblasti (konce křídélek, nejvzdálenější okraje průřezu výztuže) v rámci průřezu, které se v určité chvíli zkracují i když je celý zbytek průřezu tažen. To potvrdilo i vlastnosti vnesené při výrobě výztuží, které jsou popsány v podkapitole 3.5, kdy při výrobě dojde částečně ke stlačení i natažení průřezu vlivem zkroucení.

Závěrem z tohoto měření tedy je, že měření systémem ARAMIS je možné, lze sledovat malé oblasti křídélek výztuže a nemá smysl používat další praporky a značky pro měření pootočení. Další zpracování je poměrně náročné a vzhledem k dalším provedeným experimentům nedávalo vyhodnocení tohoto měření smysl v celém kontextu, proto tedy výsledky nejsou vyhodnoceny a prezentovány v rámci této práce. Určitě je možné (a vřele podporované) od autora měření převzít a vypracovat na něm vlastní práci, která pravděpodobně může dosavadní znalosti značně rozšířit.

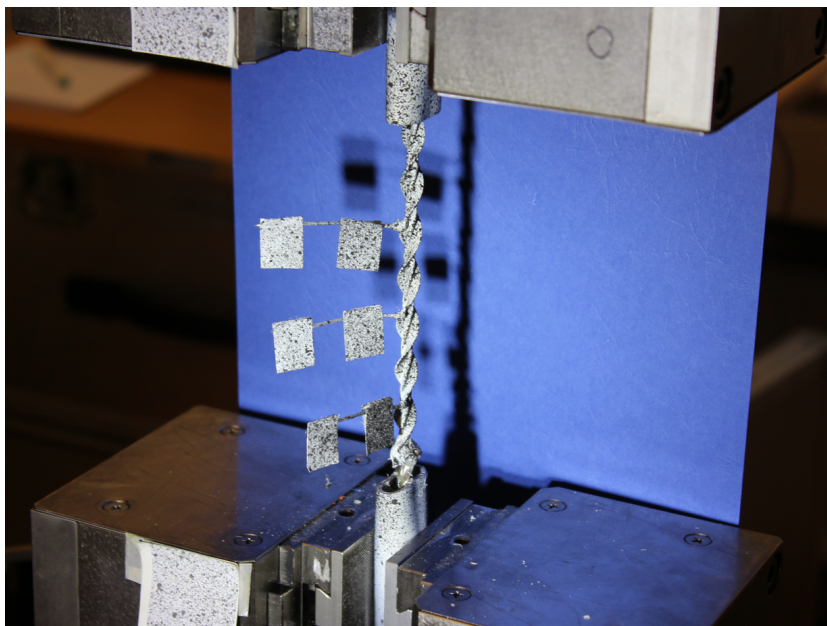
Na následujících obrázcích je možné vidět celou měřicí sestavu (obrázek 5.4) a dále sledovat průběh měření od počátečního stavu (obrázek 5.5), přes zdeformovaný stav (obrázek 5.6) až po možné výstupy (obrázek 5.7).



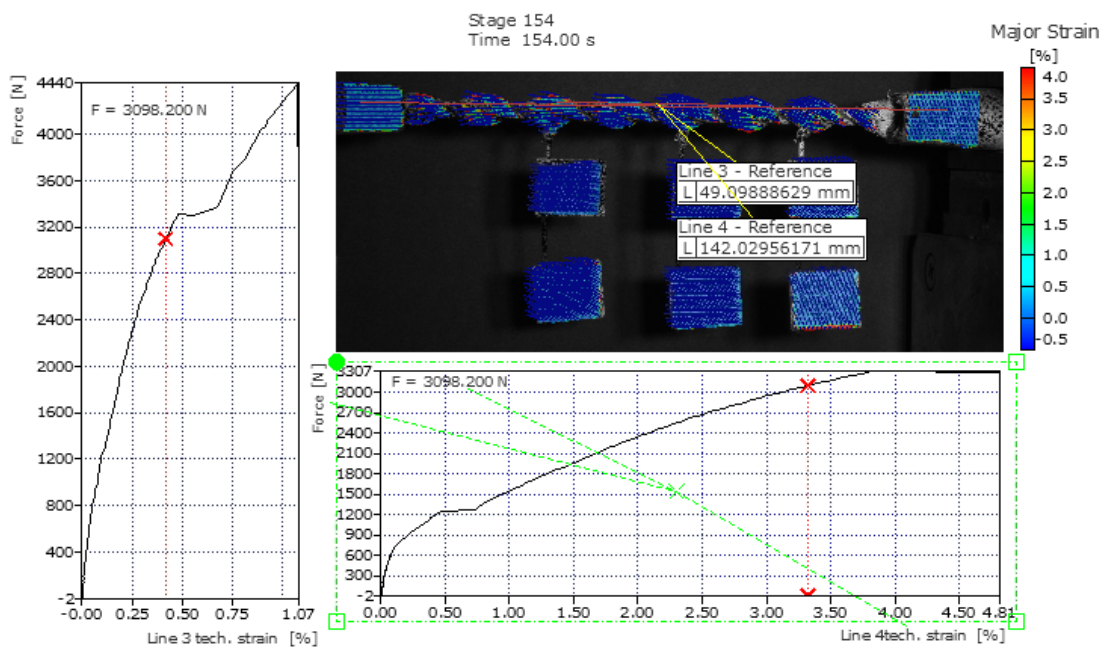
Obrázek 5.4: Pohled na celou sestavu ARAMIS – lze vidět dvojici kamer, které zachycují prostorový pohyb a kamerují celou délku výztuže. Výztuž je v tuto chvíli velmi zkroucená a praporky jsou spadlé na zemi.



Obrázek 5.5: Prvotní stav vzorku výztuže – na obrázku je vidět vzor nanesený na samotnou výztuž, na praporky i na uchycení.



Obrázek 5.6: Zdeformovaný stav – na obrázku je vidět rotace výztuže a ztráta vzoru v záběru kamery v důsledku pootočení.



Obrázek 5.7: Možnost výstupu – jakmile je měření zpracováno v software, je možné si například zvolit linii mezi dvěma body a sledovat různé diagramy těchto linií. V obrázku jsou použité pro zobrazení pracovních diagramů

5.3 Materiály

Základní materiály potřebné k provádění experimentů popsaných v této práci jsou: helikální výztuž, kotevní zálivka a tepelně různě degradovaný beton. První dva materiály jsou včetně způsobu jejich testování popsány v podkapitolách 5.1 a 5.2. Samotný beton, který sloužil jako základní materiál pro testování helikální výztuže je popsán pouze z pohledu jeho složení, tepelné degradace a zbytek jeho popisu tvoří výsledky diagnostiky v následujících podkapitolách.

Helikální výztuž

Testované helikální výztuže průměru 8 mm byly podrobeny tahové zkoušce, přičemž maximální síla v tahu dosáhla 10,5 kN a síla potřebná k vyvolání jednotkové deformace v tyči byla 1375 kN (E_s v následujícím textu). S ohledem na nejednoznačnost ohledně správné plochy pro výpočet napětí se pro E_s používá síla místo jednotek napětí, čímž se eliminuje potenciální nejasnost a zachová přesnost výpočtu (bližší informace v podkapitole 5.2.1). Tyto materiálové charakteristiky jsou připraveny k publikaci v článku [47].

Kotevní zálivka

Kotevní zálivka je vysokopevnostní polymer-cementová malta o pevnosti 32,3 MPa v tlaku a pevnosti 8,2 MPa v tahu za ohybu. Tyto hodnoty byly testovány podle normy „ČSN EN 1015-11: Zkušební metody malt pro zdívo – Část 11: Stanovení pevnosti zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku“ [48], v době provádění hlavních experimentů. Tyto materiálové charakteristiky jsou připraveny k publikaci v článku [47].

Beton

Betonová směs byla záměrně navržena co nejjednodušší, bez přidaných přísad a příměsí (složení je uvedeno v tabulce 5.1). Vzorky ve formě trámčů $400 \times 100 \times 100$ mm zůstaly přikryté a v bednění v pokojové teplotě po dobu jednoho týdne. Po odbednění byly vzorky ponechány v pokojové teplotě a relativní vlhkosti 40 – 60 %, aby se odpařila volná voda, pro zabránění možnému explozivnímu odstřelování během vypalování v peci, snížení počáteční pevnosti po vypálení a podpoření tendence materiálu k projevování křehkého chování.

Tabulka 5.1: Složení betonové směsi

Materiál	Množství	Jednotka
Cement	376	$kg \cdot m^{-3}$
Jemné kamenivo	1058	$kg \cdot m^{-3}$
Hrubé kamenivo	706	$kg \cdot m^{-3}$
Voda	226	$kg \cdot m^{-3}$
Vodní součinitel	0,6	–

Simulace degradace materiálu pomocí vysokých teplot

Materiály konstrukcí časem přirozeně degradují, jak je například popsáno v podkapitole 3.1. Degradace vlivem prostředí se přirozeně děje blíže povrchu, kde působí degradační vlivy. Tento povrch je zpravidla i ten nejdostupnější pro zpevňování (viz kotvení v drážce popsané v podkapitole 3.4). Podobné změny v materiálových vlastnostech, které lze čekat při běžné degradaci se projevují i po vystavení betonových konstrukcí požáru a vysokým teplotám. Například publikace [22], [23] a [24] popisují změny v betonu a v hodnotách získaných stavební diagnostikou po působení vysokých teplot.

Proto, pro napodobení přirozené degradace bylo zvoleno vypalování vzorků v peci různými teplotami, zvolenými podle změn mechanicko-fyzikálních vlastností popsanych v různé literatuře zkoumající teplotní degradaci betonu. Jedna sada (Sada A) byla ponechána v pokojové teplotě po celou dobu a tři další sady byly zahřívány teplotami 400 °C (Sada B), 600 °C (Sada C), a 800 °C (Sada D). Pro tyto účely byla zvolena elektrická pec a vzorky byly páleny v jejich stáří v rozpětí 3 – 4 měsíců. Každá sada byla prvně vysušena 48 hodin ve 110 °C a poté lineárně zahřívána přírůstkem 300 °C za hodinu až do dosažení požadované teploty. Požadovaná teplota byla držena po dobu jedné hodiny a poté byly vzorky ponechány k vychladnutí v uzavřené peci. Na obrázcích 5.8 a 5.9 je vyfocena použitá pec a uspořádání vzorků během zahřívání. *Poznámka:* Vzorky byly páleny i na 1000 °C, jenže byly nepoužitelné – byly příliš měkké, rozpraskané, a při snaze vytvořit drážku docházelo k vytrhávání kameniva. S touto sadou tedy není nikde počítáno.



Obrázek 5.8: Elektrická pec k pálení vzorků.



Obrázek 5.9: Umístění vzorků v peci.

Výsledky zkoušek degradovaných vzorků, včetně diskuze, jsou uvedeny v relevantních místech jako výsledky diagnostiky. Degradace teplotou na 400 °C, 600 °C, a 800 °C se ukázala jako vhodný způsob simulace degradace materiálu, jelikož zájmové mechanické parametry klesaly s rostoucí degradací (viz podkapitoly s výsledky diagnostiky). Degradace teplotou na 1000 °C již způsobuje výrazné poškození betonových vzorků, které potom nejsou použitelné pro další zkoušení. Smysl uvedených postupů je připravený k publikaci v článku [47].

5.4 Diagnostika vzorků určených pro testování v drážce

Diagnostika byla provedena na několik etap. První etapa, zahrnující nedestruktivní diagnostiku, proběhla před vyztužením vzorků. Druhá etapa proběhla na vyztužených vzorcích, na straně kolmé k vyztužení a šlo o odtrhovou zkoušku, tedy semi-destruktivní diagnostiku. Třetí etapu tvořila destruktivní diagnostika – zkoušení pevnosti v tlaku. Výsledky jsou popsány v podkapitole 5.4.6 – „Výsledky diagnostiky“. Smysl následujících uvedených postupů, diskuzí a závěrů je připraven k publikaci v článku [47].

V rámci této práce byla použita: nedestruktivní diagnostika metodou impact echo, měřením rychlosti průchodu ultrazvukového pulzu a odrazovým tvrdoměrem; semi-destruktivní diagnostika odtrhovou zkouškou; a destruktivní diagnostika měřením pevnosti v tlaku. Všechny tyto metody jsou popsány v podkapitole 3.1 – „Analýza vlastností stávajících konstrukcí“ a mohou zachytit různorodé vlastnosti materiálu a jejich změny a jsou světově standardizované a běžně používané (Jako příklad – americké standardy: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens [53]; Standard test method for pulse velocity through concrete [54]; Standard test method for measuring the p-wave speed and the thickness of concrete plates using the impact-echo method [55]; Standard test method for rebound number of hardened concrete [56]; Standard test method for tensile strength of concrete surfaces and the bond strength or tensile strength of concrete repair and overlay materials by direct tension (pull-off method) [19]).

Kromě standardizace lze podpořit význam těchto metod ještě publikacemi jako [57], která popisuje jejich význam pro diagnostiku mostů ve Wisconsinu, dále [58], která navrhuje použití v rámci stavebního průmyslu v Hongkongu a v neposlední řadě [59], která podrobně řeší různorodé aspekty použití metody Impact-Echo, ultrazvukového pulzu a odrazového tvrdoměru.

Diagnostické metody jsou ovlivněny materiálovými charakteristikami v hloubce materiálu jako jsou například trhliny a póry (Impact-Echo a ultrazvuk), dále charakteristikami povrchu (odrazový tvrdoměr a odtrhová zkouška). Měření rychlosti průchodu ultrazvukového pulzu může nepřímo určit pevnost betonu v tlaku, v tahu a dynamický modul pružnosti [54], odtrhová zkouška měří přímo pevnost v tahu a nepřímo pevnost v tlaku [59]. Měření pevnosti v tlaku přímo reflektuje různorodé vlastnosti materiálu, protože trhliny a póry přímo ovlivňují celistvost materiálu, což následně snižuje jeho odolnost k příčným silám.

5.4.1 Měření pevnosti v tlaku

Měření pevnosti v tlaku bylo prováděno podle normy „ČSN EN 12390-3: Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles“ [60]. Zkouška byla provedena na obou polovinách každého vzorku po provedení trámcové zkoušky. Výsledky obou polovin byly zprůměrovány pro každý vzorek. Vzhledem k oslabení vzorku vkládanou výztuží, bylo zkoušení provedeno kolmo na vyztužený povrch, kde byl předpoklad nejmenšího ovlivnění únosnosti – viz obrázek 5.10.



Obrázek 5.10: Sestava zkoušení pevnosti v tlaku – na obrázku lze vidět polovinu zkoušeného trávce, kdy přes nástavec je působeno silou na plochu 100 × 100 mm.

Výsledky měření pevnosti betonu v tlaku jsou uvedeny v tabulce 5.2 níže. Grafy průběhů jednotlivých výsledků diagnostik jsou uvedeny v obrázku 5.14 v podkapitole 5.4.6.

Tabulka 5.2: Pevnost betonu v tlaku

Sada	Střední hodnota [MPa]	Koeficient variace [%]
A	36,6	3,6
B	27,8	3,2
C	23,6	6,3
D	18,6	13,9

5.4.2 Rychlost průchodu ultrazvuku

Rychlost průchodu ultrazvuku byla měřena na trémkách v podélném směru, ještě před přípravou na vyztužení a samotným vyztužením. Měření byla prováděna přístrojem vybaveným sondami s frekvencí 20 kHz a jako akustický vazebný prostředek byla použita plastelína místo gelu. Plastelína byla zvolena z důvodu pórovitosti zkoušených vzorků. Zařízení bylo před měřením zkalibrováno, aby nedocházelo k měření takzvaného mrtvého času. Výsledky byly v souladu s očekáváním podle literatury [28, 27, 26], kdy s rostoucí tepelnou degradací klesala rychlost průchodu ultrazvuku. Toto chování je zároveň logické, jelikož jak bylo popsáno v podkapitole 3.1, měření je ovlivněno jakýmkoliv zvýšením pórovitosti nebo množstvím trhlin a to směrem k nižší rychlosti.

Výsledky měření rychlosti průchodu ultrazvuku jsou uvedeny v tabulce 5.3 níže. Grafy průběhů jednotlivých výsledků diagnostik jsou uvedeny v obrázku 5.14 v podkapitole 5.4.6.

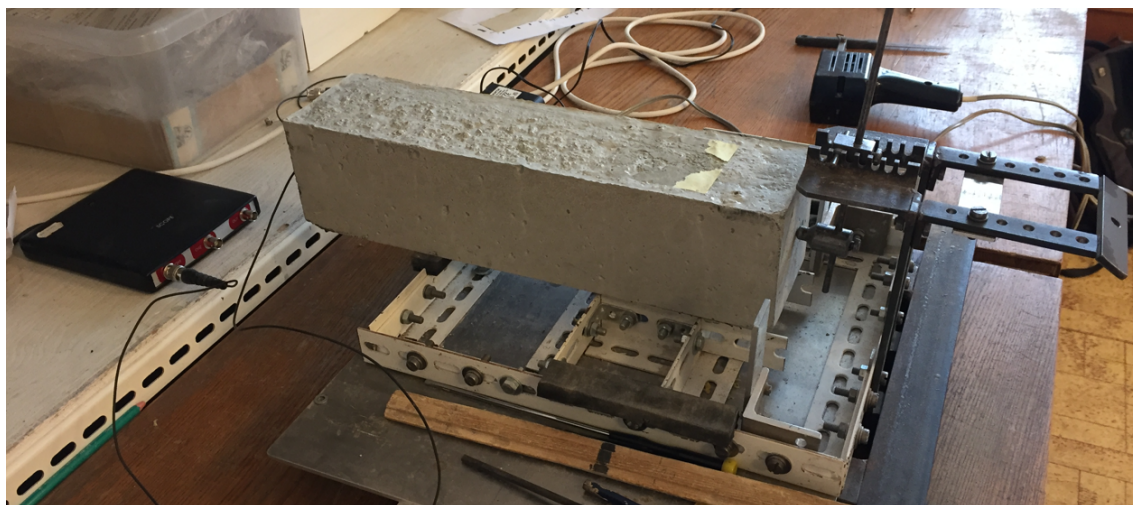
Tabulka 5.3: Rychlost průchodu ultrazvuku u jednotlivých sad

Sada	Střední hodnota [km/s]	Koeficient variace [%]
A	4,07	0,9
B	3,20	5,4
C	2,72	6,4
D	1,93	3,7

5.4.3 Metoda Impact-Echo

Měření metodou Impact-Echo bylo provedeno na zkušebních vzorcích v jejich podélném směru. Předchozími experimenty bylo prokázáno, že podélná odezva je nejsilnější a vykazuje podobný trend jako příčná a torzní odezva. Vzorky byly během měření umístěny na pryžových podložkách. Jako budič mechanické napětové vlny bylo použito kulové kladivo o celkové hmotnosti 25,5 g. Pro záznam vibrací byl použit piezoelektrický snímač a pro zpracování signálu digitální osciloskop se vzorkovací frekvencí nastavenou na 0,2 MHz. Všechny části zkušební sestavy lze vidět na obrázku 5.11. Signál byl po záznamu převeden pomocí rychlé Fourierovy transformace do spektra, které mohlo být analyzováno – na spektru lze totiž vidět špičky v místech, kde se potkaly frekvence buzení s frekvencí vlastní. První, nej-

nižší z těchto frekvencí jsou pak zaznamenány a uvedeny ve výsledcích v tabulce 5.4 vždy souhrnně pro celou sadu.



Obrázek 5.11: Měření metodou Impact-Echo

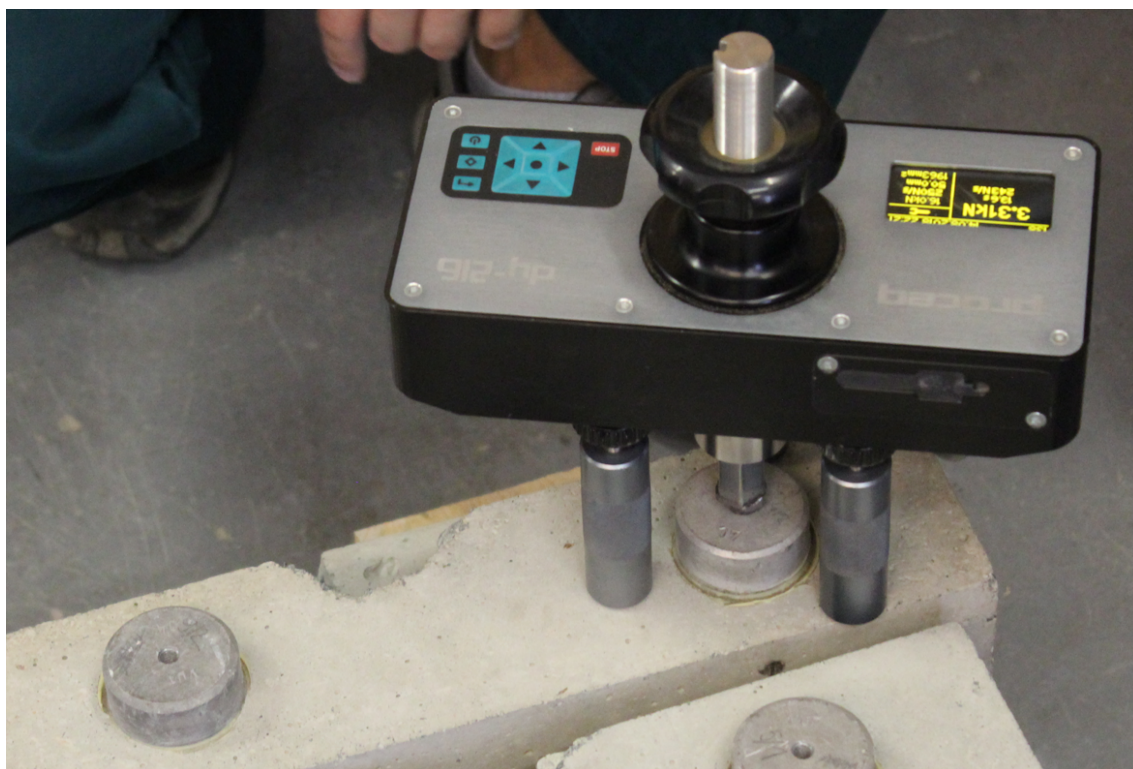
Výsledky měření metodou Impact-Echo jsou uvedeny v tabulce 5.4 níže. Grafy průběhů jednotlivých výsledků diagnostik jsou uvedeny v obrázku 5.14 v podkapitole 5.4.6.

Tabulka 5.4: První podélná vlastní frekvence měřená metodou Impact-Echo

Sada	Střední hodnota [kHz]	Koeficient variace [%]
A	4,54	1,2
B	3,60	5,5
C	3,03	6,8
D	2,08	2,2

5.4.4 Odtrhová zkouška

Odtrhová zkouška byla prováděna podle „ČSN EN 1542: Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Zkušební metody – Stanovení soudržnosti odtrhovou zkouškou“ [61]. Zkouška byla vždy bez broušení a ohrazení oblasti jádrovým vrtákem, jak je vidět v obrázku 5.12, aby se zabránilo poškození vzorku před provedením trámčové zkoušky. Z důvodu poškození zkoušené strany, nebyla odtrhová zkouška vykonávána na vyztužené straně, ale na straně k ní kolmé. Na každém trámci byla dvě zkušební místa, která byla následně zprůměrována.



Obrázek 5.12: Provádění odtrhové zkoušky na trámčích.

Výsledky odtrhové zkoušky jsou uvedeny v tabulce 5.5 níže. Grafy průběhů jednotlivých výsledků diagnostik jsou uvedeny v obrázku 5.14 v podkapitole 5.4.6.

Tabulka 5.5: Síla potřebná k vytržení terče

Sada	Střední hodnota [kN]	Koeficient variace [%]
A	3,61	10,6
B	3,17	11,7
C	3,14	8,3
D	2,70	9,1

5.4.5 Měření odrazovým tvrdoměrem

Měření odrazovým tvrdoměrem, provedená podle „ČSN EN 12504-2: Zkoušení betonu v konstrukcích – Část 2: Nedestruktivní zkoušení – Stanovení tvrdosti odrazovým tvrdoměrem“ [62], cílila na plochy určené pro vyztužení, tedy vždy jednu z podélných stěn, kde vlastnosti betonu a jeho povrchu mohou ovlivnit budoucí spoj. Průběh zkoušky lze vidět na obrázku 5.13, kde je také vidět, že vzorky byly umístěny do zkušebního lisu, aby se zamezilo posunu vzorků během zkoušení. Při měření bylo provedeno deset měření, ze kterých byl vypočten medián. Následně bylo zhodnoceno, zda není více než jedna pětina měření více než 6 jednotek od tohoto mediánu a pokud bylo toto v pořádku, byla sada přijata bez zmíněných měření více než 6 jednotek od mediánu.



Obrázek 5.13: Zkoušení tvrdosti Schmidtovým tvrdoměrem na trámčích.

Výsledky měření odrazovým tvrdoměrem jsou uvedeny v tabulce 5.6 níže. Grafy průběhů jednotlivých výsledků diagnostik jsou uvedeny v obrázku 5.14 v podkapitole 5.4.6.

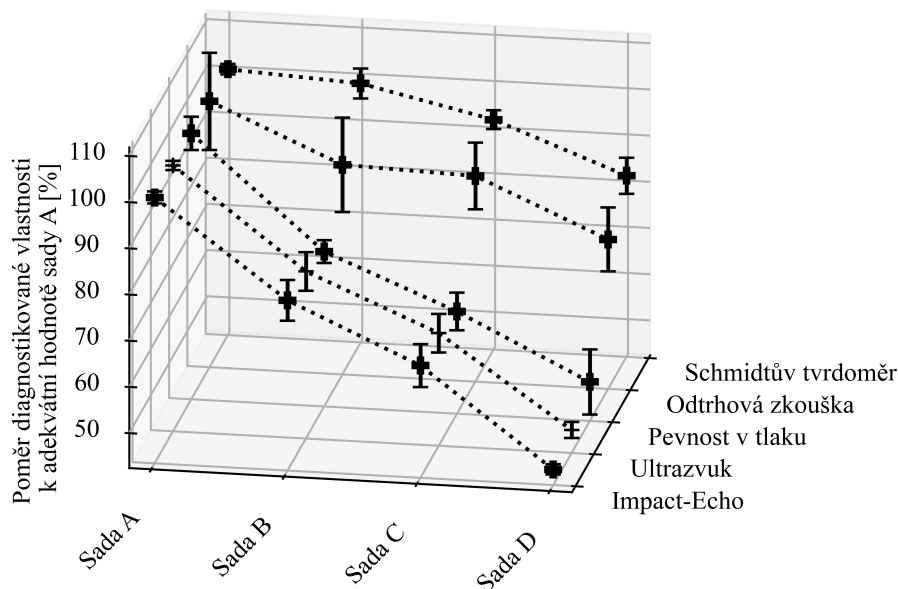
Tabulka 5.6: Odrazové číslo při měření odrazovým tvrdoměrem

Sada	Střední hodnota [-]	Koeficient variace [%]
A	50,1	1,1
B	49,4	3,3
C	46,2	2,2
D	40,9	4,8

5.4.6 Výsledky diagnostiky

Souhrnné výsledky jsou zobrazeny v obrázku 5.14 a pro porovnatelnost jsou vždy staženy k výsledkům dané měřené veličiny na sadě A (z nedegradovaného betonu), jako měřítko – 100 %. Toto měřítko platí jak pro střední hodnoty, tak i pro standardní odchylky. Výsledky mohou být v zásadě rozděleny na výsledky hloubkových a povrchových metod. Do první skupiny patří metoda Impact-Echo, měření rychlosti průchodu ultrazvuku a měření pevnosti v tlaku, do druhé skupiny pak odtrhová zkouška a měření odrazovým tvrdoměrem.

Obecně lze říci, že hloubkové metody zaznamenaly sestupnou tendenci výsledků s rostoucí degradací, přičemž povrchové metody měly dvě sady málo rozlišitelné až nerozlišitelné. Díky tomuto faktu budou pravděpodobně hloubkové metody více korelovatelné s měřenými indikátory, popsány dále, v podkapitole 5.5.4 – „Diskuze výsledků chování výztuže v drážce a trámčové zkoušky“.



Obrázek 5.14: Výsledky diagnostiky – Chybové úsečky na každé straně od střední hodnoty značí standardní odchylku. Veškeré hodnoty jsou v měřítku měřené veličiny pro sadu A. Připraveno k publikaci v [47].

5.4.7 Diskuze výsledků diagnostiky

Rešerše literatury obecně víceméně podporuje naměřené hodnoty. Je však nutné brát v potaz, že jde hlavně o odborný odhad a porovnání trendů, jelikož žádná ze studií nebyla prováděna na stejném materiálu, o stejné míře degradace. Na druhou stranu, pro účely studie popsané v této práci to není příliš důležité a stačí pouze vědět, že naměřené výsledky mají podobné trendy jako v jiných studiích.

Téměř lineární pokles s postupující degradací, který vykazují hloubkové metody je podporovaný ve více studiích. Pro výsledky měření pevnosti v tlaku je to například [25], pro rychlost šíření ultrazvuku [26] a [27], a pro první vlastní frekvenci [23]. Nelineární pokles, při kterém není rozlišeno mezi nepoškozeným betonem a betonem poškozeným působením 400°C teploty, je podpořen v [28] a v [29] pro měření odrazovým tvrdoměrem. Odtrhová zkouška by měla vykazovat víceméně lineární pokles a hodnoty by měly být rozlišitelné pro každou deformaci, například podle [30].

Hloubkové metody si vedly lépe pravděpodobně díky tomu, že jsou schopny zachytit celý objem a nejsou tak náchylné na lokální výkyvy vlastností. Oproti nim, povrchové metody reflektují jen malý objem zkoušeného materiálu a tím mohou být ovlivněny lokálními výkyvy vlastností.

Podle obrázku 5.22 v podkapitole 5.6.2 lze říci, že povrchové metody nekorelují spolu navzájem ani s hloubkovými metodami v takové míře, jako je tomu mezi hloubkovými metodami samotnými. Tento fakt indikuje možnou chybu v měření odtrhovou zkouškou a odrazovým tvrdoměrem, i když studie u druhé zmíněné mluví v její prospěch. Obě metody mohou být ovlivněny polohou v peci a tím pádem jinak zahřátým měřeným povrchem, který potom vykazuje různé hodnoty. U odtrhové zkoušky to může navíc ovlivnit absence broušení a vymezení odtrhového místa jádrovým vrtáním. Právě v případě odtrhové zkoušky, byl pro absenci broušení a vrtání dobrý důvod (popsán u samotné metody výše), nicméně pokud by měl způsobovat zbytečné vyřazení této metody, bylo by dobré vyzkoušet alespoň opatrné broušení a případně pak i vrtání. Vliv polohy v peci v případě měření odrazovým tvrdoměrem by mohl být redukován měřením všech stran a následným průměrováním. Obě metody jsou jednoduché k použití, levné, rychlé a dle výsledků nejsou až tak špatné. Díky tomu stojí za to je dále zahrnovat pro další testování.

Závěrem lze říci, že měření pevnosti v tlaku, rychlosti šíření ultrazvukového pulzu a první vlastní frekvence metodou Impact-Echo dobře rozlišuje mezi jednotlivými sadami (jak mohlo být předvídáno na základě literatury) a díky tomu jsou tyto metody pravděpodobněji korelovatelné s výsledky chování spoje. Měření odrazovým tvrdoměrem a odtrhovou zkouškou vykazovalo malé rozlišení mezi dvěma sadami a díky tomu je menší šance korelace s chováním spoje. I přesto se tyto povrchové metody hodí dále zkoumat. Všechny použité metody byly zhodnoceny a měly by také být zahrnuty v dalších výzkumech. Zatím to ale vypadá, že hloubkové metody mají větší šanci uspět v korelaci k výsledkům chování spoje a řešit daný výzkumný problém.

5.5 Zkoušení výztuží v drážce

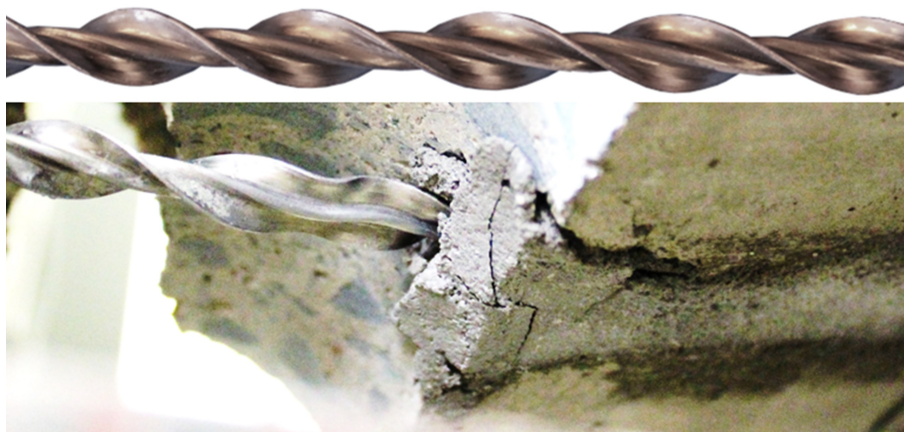
5.5.1 Popis a průběh experimentu

Vzorky pro testování byly navrženy tak, aby splnily dvě zásadní a protichůdná kritéria – dostatečně velké na to, aby byly proporčně vhodné k otestování helikální výztuže a zároveň dostatečně malé na to, aby mohly být případně odebrané z existující konstrukce. Druhý důvod podporuje myšlenku přímého testování na jádrových vývrtech ze zesilované konstrukce, plánovanou jako další možný stupeň výzkumu v této oblasti. Protože běžný trámčový formát pro zkoušení zatvrdlého betonu je betonový trámec o rozměrech $400 \times 100 \times 100$ mm [60], byl zvolen právě tento formát, splňující obě protichůdné podmínky. Zkušební sestava byla inspirována normou „ČSN EN 12269-2: Stanovení soudržnosti ocelové výztuže s autoklátovaným pórobetonem trámčovou zkouškou – Část 2: Dlouhodobá zkouška“ [63], nicméně v menším měřítku a při použití pouze tříbodového ohybu. Smysl následujících uvedených postupů, diskuzí a závěrů je připraven k publikaci v článku [47].

Při zkušebních experimentech, před samotnou přípravou těch publikovaných v této práci, se zjistilo, že od určitého okamžiku se výztuž začne vyšroubovávat směrem ven (podobně jako v obrázku 5.15). Toto chování je pravděpodobně způsobené kombinací tahu a kroucení, nicméně není to zatím hlouběji probádáno. Aby šlo toto chování dále pozorovat, byl na každém prvku proveden půlkruhový zářez o poloměru 25 mm. Tento zářez zároveň sloužil k určení místa, kde se bude prvek lámat. Půlkruhový tvar zářezu byl zvolen proto, aby šlo vidět chování výztuže a zároveň, aby nedocházelo k nějaké výrazné koncentraci napětí v tlačném betonu.

Samotné vyztužení proběhlo v souladu s publikací „Manuál a metodika navrhování a aplikace systémů dodatečně vkládaných helikálních výztuží při zesilování stavebních

konstrukcí v podmínkách stavebnictví ČR“ [1], ze které jsou v podkapitole 3.4 uvedeny i příklady vyztužování na které jsou cíleny právě experimenty zkoumající chování výztuží v drážce. Do každého prvku byly vytvořeny drážky o hloubce 15 mm a šířce 10 mm pomocí drážkovačky (průběh na obrázku 5.16). Následně byla připravena malta, drážky vyfoukané od prachu a navlhčené a položena první vrstva kotevní zálivky. Následovalo vtlačení výztuže a druhá vrstva kotevní zálivky, zarovnání s povrchem a uložení do pokojové teploty a relativní vlhkosti 40 – 60 %. Hotové vzorky před uložení k tunutí jsou vidět na obrázku 5.17.



Obrázek 5.15: Fotografie původního tvaru helikální výztuže (nahore) a tvaru po provedení trámčové zkoušky (dole), kdy došlo k vykroucení výztuže při dosažení velké deformace. Přípraveno k publikaci v [47].



Obrázek 5.16: Výroba zesílených těles – drážkování.



Obrázek 5.17: Vyrobená zesílená tělesa, včetně trámců na zkoušení kotevní zálivky.

Trámcová zkouška na zesílených vzorcích (viz obrázek 5.18) byla řízená deformací uprostřed rychlostí 0,006 mm/s až do úplného porušení, kdy trámec nemohl unést žádné další zatížení. Kvůli prostorovým možnostem a přesnosti měření zatěžovacího prvku byla deformace měřena v jedné čtvrtině rozpětí a deformace uprostřed byla následně dopočítána podle vztahů v následující podkapitole 5.5.2.

5.5.2 Zpracování naměřených dat

Měřený posun v jedné čtvrtině rozpětí a síla působící uprostřed byly použity pro výpočet síly ve výztuži F_s a deformaci výztuže v rámci spoje v drážce d_s . Deformace výztuže se projevuje jak v drážce samotné (trhliny po délce výztuže), tak i ve volné délce výztuže (povytažením z drážky). V drážce samotné tato deformace vymizí na neznámé délce, pro kterou se dá převzít označení l_{es} (na základě literatury [16]). Nominální hodnota l_{es} je pro tento experiment nepodstatná, jelikož je vypočítána nominální hodnota deformace a jelikož se dá ověřit, zda k deformaci došlo v rámci testované kotevní délky nebo až za ní (v tom případě by šlo o vytažení výztuže a výpočet by byl neplatný). Více informací je v podkapitole 5.5.3 a 5.5.4.

Rovnice pro výpočet F_s a d_s jsou uvedeny níže a potřebné proměnné jsou názorně předvedeny v obrázku 5.18, kromě F_s , d_s a E_s uvedených v textu. Rovnice jsou součástí článku autora a kolektivu [47].

Výpočet začíná spočítáním pootočení α (rovnice (5.1)), které je založeno pouze na geometrii a počítá s kloubem uprostřed rozpětí (v místě působení zatížení) a s pohybem vzorku na obou podporách směrem do strany a s rotací kolem těchto podpor. Pootočení α vychází z průhybu d_x ve vzdálenosti l_x od podpory, jak je znázorněno na obrázku 5.18. Pokud by bylo měření prováděno přímo uprostřed, $l/2$ a d_m by nahradilo l_x a d_x .

Výpočet F_s (rovnice (5.2)), kromě rozměrů trámce samotného, využívá α a přidává sílu uprostřed rozpětí F_v a započítává změnu vzdálenosti h_s mezi středem výztuže a povrchem, kde působí síla F_v .

Výpočet d_s v rovnici (5.3) opět využívá geometrie trámce, pootočení α a přidává ještě člen odečítající přetvoření ve volné délce výztuže.

Rovnice lze nejlépe zkontrolovat numericky. Praktický limit rovnice je kolem 15-20° pootočení α . Za tímto limitem se helikální výztuž ohýbá přes hranu a skutečné přetvoření výztuže už není měřeno. Další limit těchto rovnic souvisí se silou ve výztuži F_s – v rovnici (5.3) se odečítá člen, který předpokládá, že výztuž ještě nedosáhla síly na mezi kluzu v porovnání s pracovním diagramem té stejné výztuže. V poslední řadě je numerický limit těchto rovnic, který je kolem 75° pootočení α . Naštěstí jsou všechny limity ověřeny jako dostatečné pro jejich fungování v rámci tohoto experimentu.

$$\alpha = 2 \cdot \arctan \left(\frac{l_x - \sqrt{l_x^2 - 2hd_x + d_x^2}}{2h - d_x} \right) \quad (5.1)$$

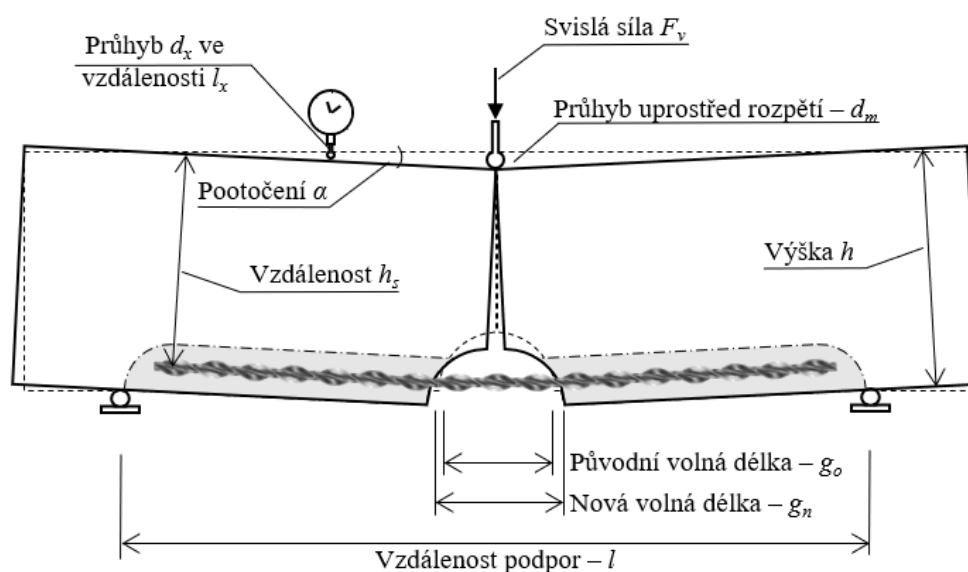
$$F_s = \frac{F_v \cdot l}{4 \cdot \sqrt{\frac{g_o^2}{4} + h_s^2} \cdot \cos \left(\alpha + \arctan \left(\frac{g_o}{2h_s} \right) \right)} \quad (5.2)$$

$$d_s = \sqrt{2 \left(\frac{g_o^2}{4} + h_s^2 \right) \cdot \left(1 - \cos \left(2 \cdot \alpha + \arccos \left(1 - \frac{g_o^2}{2 \left(\frac{g_o^2}{4} + h_s^2 \right)} \right) \right) \right)} - g_o \left(1 + \frac{F_s}{E_s} \right) \quad (5.3)$$

kde:

- α Pootočení v místě podpory [rad]
- l_x Vzdálenost místa měření průhybu od nejbližší podpory [mm]
- h Výška trámce při trámcové zkoušce [mm]
- d_x Průhyb trámce při trámcové zkoušce ve vzdálenosti l_x od podpory [mm]
- F_s Síla v helikální výztuži [kN]
- F_v Svislá síla působící na trámec uprostřed rozpětí [kN]
- l Vzdálenost podpor při trámcové zkoušce [mm]
- g_o Původní volná délka výztuže ve vytvořeném zářezu [mm]
- h_s Vzdálenost mezi horním povrchem trámce a osou helikální výztuže [mm]
- d_s Deformace helikální výztuže [mm]
- E_s Síla potřebná k vyvolání jednotkové deformace v helikální výztuži [kN]

Výsledné grafy zobrazující závislost síly ve výztuži F_s na deformaci d_s byly vyhodnoceny a několik vzorků vykazujících zcela protichůdné chování bylo vyřazeno. Na základě průběhů byly stanoveny indikátory, které jedním číslem vyjadřují nějakou vlastnost grafu, pro pozdější porovnání s výsledky diagnostiky. Detaily k těmto indikátorům lze najít v podkapitole 5.5.4.



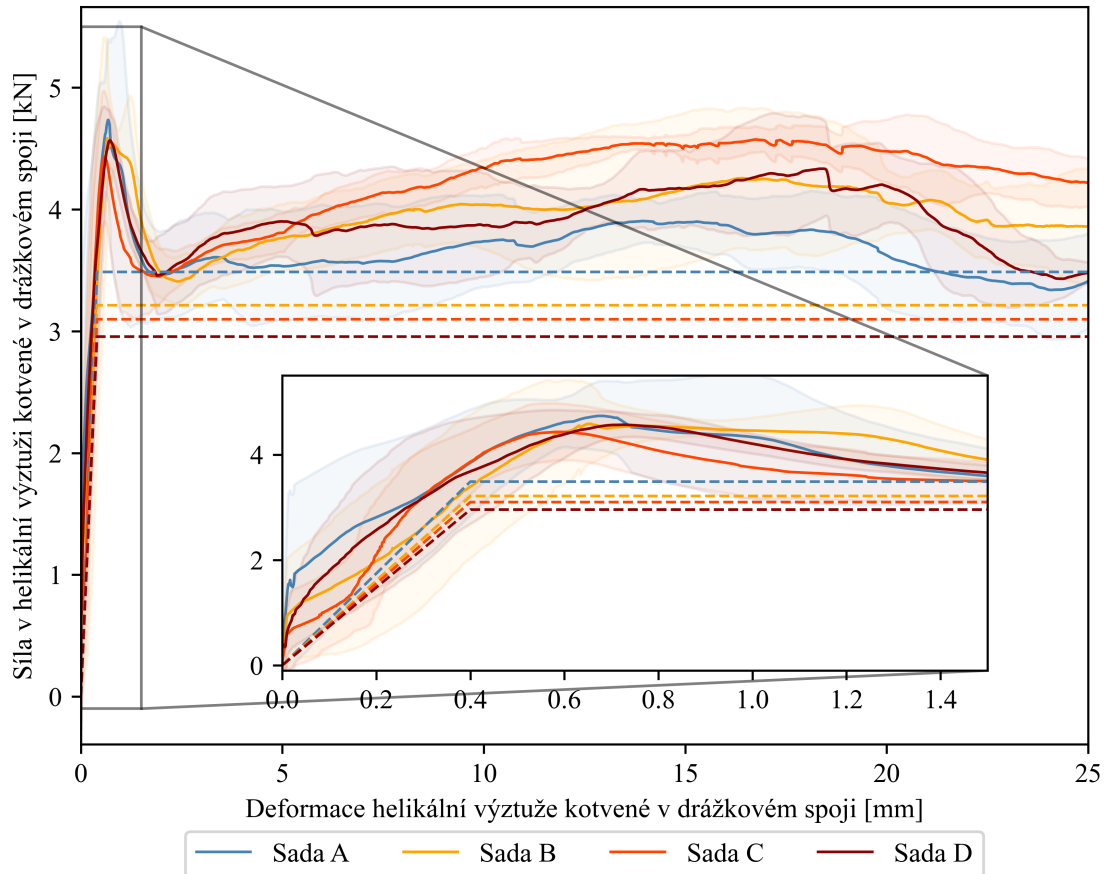
Obrázek 5.18: Schéma sestavené trámčové zkoušky, ukazující použité proměnné (nahore) a její fotografie (dole). Připraveno k publikaci v [47].

5.5.3 Výsledky chování výztuže v drážce

Pracovní diagramy v obrázku 5.19 ukazují chování helikální výztuže během trámčových zkoušek a jsou později porovnány s výsledky diagnostiky. Jejich dalším cílem je ukázat vhodnost zvoleného způsobu testování. Popis chování v rámci této práce je založen na trendech, které vyplývají z průměrných pracovních diagramů, podložených 4 – 5 hodnotami, nicméně chování každého vzorku zvlášť vykazuje stejné tendence.

Pracovní diagramy odhalily fáze chování drážkového spoje na které lze navázat s výběrem indikátorů pro porovnání s výsledky diagnostiky. Celkově lze pozorovat víceméně lineární růst v počáteční fázi, která jde od nulové deformace do zhruba 0,015 mm. Tento růst pokračuje i dále, ale méně lineárně než v první fázi až do dosažení určitého maxima,

ve kterém dochází k prudkému propadu – deformace se výrazně zvětšuje zatímco síla klesá až do dosažení lokálního minima. Po dosažení lokálního minima znovu pokračuje růst až do dosažení dalšího maxima, následovaného dalším poklesem. Tyto poslední dvě fáze pokračují dokud nepovolí některá z částí celého popsaného systému. Toto typické chování bylo pozorováno u 19 z 24 vzorků a 6 vzorků nevykazujících toto chování bylo vyřazeno. Zmíněné „nevykazování tohoto chování“ znamená, že vzorky například praskly téměř okamžitě, což vyústilo v trendy přesně opačné k těm opakujícím se, považovaným za správné. Vyřazení vzorků způsobilo zmenšení počtu testovaných sad z 6 vzorků na 4 u sady D a na 5 u ostatních sad.



Obrázek 5.19: Pracovní diagramy spoje helikální výztuže v drážce. Deformace volné délky výztuže v zářezu je odečtena, což umožňuje zobrazení jen přírůstku deformace, který se odehrává přímo v drážce a na části helikální výztuže vytažené z drážky na obou stranách. Tlustá plná čára značí střední hodnotu a transparentní plochy po jejích stranách standardní odchylku. Čárkované přímé čáry znázorňují výpočetní modely založené na změřeném chování výztuže v drážce, které jsou takřka shodné s těmi odvozenými z výsledků diagnostiky a následné korelace. Připraveno k publikaci v [47].

5.5.4 Diskuze výsledků chování výztuže v drážce a trémcové zkoušky

Zkoušení výztuže trémcovou zkouškou se ukázalo jednoduché a efektivní, podporující výstupy z jiné literatury pojednávající o zkoušení výztuže v drážkách (konkrétně článek od

C. Gentilini a kolektivu [45]). Původní nápad pozorování helikální výztuž na volné délce v zářezu se ukázal dobrý pro počáteční testování, pro kontrolu způsobu porušení. Pro další zkoušení a výpočet chování v drážce by bylo lepší mít tento zářez co nejmenší, kdy volná délka bude teoreticky nulová. Zároveň je dobré zářez zachovat, jelikož jasně určuje místo fiktivní opravené trhliny a pomáhá definovat použitou kotevní délku. Co se týká hloubky zářezu – najít takovou hloubku, kdy zůstane jen ten nejnutnější beton v tlačené oblasti by bylo výhodné pro pozorování chování v rámci první a druhé fáze (popsané v podkapitole 5.5.3), které jsou nyní velmi ovlivněny chováním praskajícího betonu. Když bude odzkoušený a ustanovený formát zářezu, bylo by již teoreticky možné postoupit k testování zesílených jádrových vývrtů. Celkově lze říci, že se trámčová zkouška ukázala jako úspěšná pro testování spojů helikální výztuže v drážce. Budoucí úpravy by měly zahrnovat úpravu zářezu a následně úpravu formy celého trámcu na jádrové vývrty.

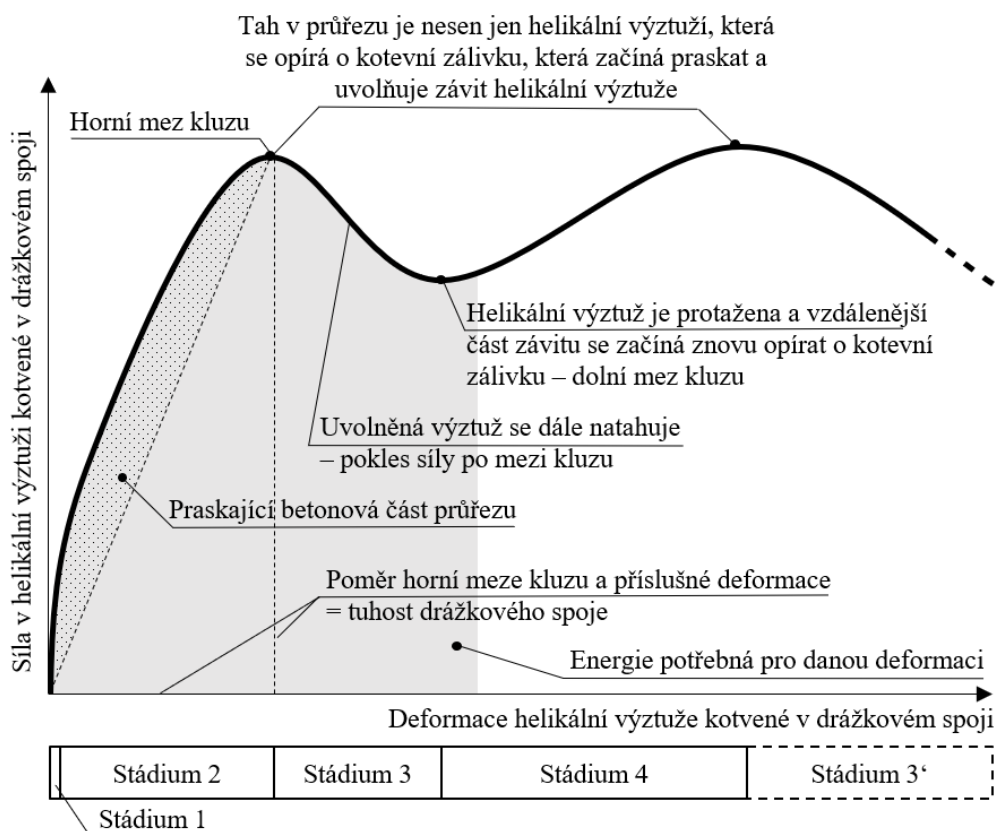
Spoje helikálních výztuží v drážce vykazují konzistentní chování se dvěma vrcholy s maximální silou v rámci pozorovaného rozsahu, podobné chování popsanému v článku [45], který jako jediný z nalezených popisuje právě chování v drážce. Změřené chování umožňuje výběr indikátorů, které mohou být později porovnány s diagnostickým měřením. Jak je nastíněno ve výsledcích v podkapitole 5.5.3, chování spoje helikální výztuže v drážce vykazuje několik stádií: 1) Počáteční stádium, kdy je chování perfektně elastické, v betonu nevznikají žádné trhliny a napětí jsou přenášena celým průřezem; 2) Přejícné stádium, kdy beton postupně praská a více napětí se přenáší na samotnou výztuž; 3) Stádium kluzu, kdy deformace a z ní výsledná síla dosáhly takové hodnoty, že praská kotevní zálivka a umožňuje protažení výztuže na nově vzniklé volné délce, čímž vzniká pokles v síle a nárůst deformace; 4) Zpevňující stádium, kdy se výztuž opět natahuje a postupně opírá o zbylou kotevní zálivku, než kotevní zálivka opět praskne. Kluz a zpevnění se dále opakují dokud se některá část z testovaného systému zcela neporuší. Obrázek 5.20 poskytuje vyobrazení popsaných stavů, včetně značení umožňujícího pochopit dále zmíněné indikátory.

Indikátory jsou založené buď na síle, deformaci, jejich kombinaci nebo energii. Síla a deformace spolu navzájem souvisí a tyto indikátory zahrnují maximální sílu, minimální sílu a rozdíl mezi nimi, příslušné deformace a také poměr mezi maximální silou a příslušnou deformací – tuhost. Indikátory založené na silách a/nebo deformacích byly brány dvěma způsoby – s ohledem nebo bez ohledu na danou deformaci. První způsob bere ohled na fakt, že celý experiment je řízený deformací a všechny odpovídající síly jsou odečteny v místě, kde je maximální síla pro střední hodnotu dané sady. Druhý způsob odečítá hodnoty pro každou křivku každého vzorku zvlášť. Druhý způsob nebere ohled na danou deformaci, ale za to bere v potaz každý vzorek a jeho indikátory zvlášť. Tento způsob vypadal, že by mohl mít potenciál ke korelaci s diagnostickými hodnotami, jelikož silové indikátory vykazovaly pravidelně rostoucí nebo klesající trend s vyšší degradací. Indikátory založené na energii byly počítány ve stejných místech jako ty silové a deformační a bylo předpokládáno, že se v jednom čísle objeví celá historie zatěžování.

Indikátory v počátečním a přejícném stádiu byly rovnou zamítnuty, jelikož jsou velmi ovlivněné únosností betonové části průřezu a jejím praskáním (lze vidět na proplétajících se křivkách v obrázku 5.19). Určit přesnou deformaci pro každý bod byla poměrně výzva, jelikož je to jednoduše dosažitelné jen pro maximální sílu a příslušnou deformaci. Pro minimální sílu lze deformaci odečíst na poměrně dlouhé oblasti, kde síla příliš nekolísa. Na základě těchto skutečností pouze indikátory na základě jednotlivých sil a tuhosti byly favorizovány. I přesto byly všechny zmíněné indikátory dány do sady k určení korelací s hodnotami měřenými diagnostikou.

Druhý vrchol maximální síly (viz obrázek 5.20) byl zcela nepodstatný pro korelaci, ale důležitý pro určení zda došlo k deformaci výztuže během reálné kotevní délky. Absence druhého maxima by vypovídala o tom, že se výztuž protáhla a vykroutila na celé kotevní délce a celý výpočet by ztratil smysl. S touto informací tedy dedukujeme, že měřená deformace reprezentující povytažení helikální výztuže z drážky spolu s jejím prodloužením v rámci drážky nastala v rozmezí dvou kotevních délek (dvou jelikož jsou zde dvě poloviny kotevních). S tímto předpokladem deformace nastala na délce 2×125 mm při trámcové zkoušce oproti délce 2×300 mm doporučené pro kotvení v betonu. Díky tomu lze konstatovat, že experiment je v souladu s běžnou praxí.

Závěrem lze říci, že kotvení výztuže v drážce vykazuje opakující se vzor skrze většinu testovaných experimentů, reflektující podstatu vzorků i navržené zkoušky, a tento vzor chování je také porovnatelný se zahraniční literaturou [45]. Na základě zjištěného chování je možné určit indikátory s potenciálem korelace k výsledkům diagnostiky a také indikátor potvrzující praktičnost experimentu v souladu s praxí. Zkoušení na trámcích o velikosti možného vývrtnu se ukázalo jako vhodné, jen lze pro budoucí experimenty pravděpodobně použít úzký zářez do jedné čtvrtiny výšky vzorku, jelikož půlkruhový zářez se ukázal jako zbytečně komplikovaný jak pro provedení, tak i vyhodnocení.



Obrázek 5.20: Vysvětlení chování spoje helikální výztuže v drážce a indikátorů použitých pro korelaci s výsledky diagnostiky. Přípraveno k publikaci v [47].

5.5.5 Model chování výztuže v drážce

Modely, vyobrazené čárkovanými čarami v obrázku 5.19, mají za cíl předpověď velikosti trhliny (délka výztuže vytažené ze spoje v drážce, včetně délky sečtené v trhlinách podél délky na které působí zatížení) na základě tuhosti spoje. Deformace na které dochází k přechodu na vodorovnou větev je 0,4 mm a je tak zatím nastavena na základě teoretické největší přípustné délky trhliny z estetického hlediska, přičemž v následující podkapitole 5.5.6 jsou diskutovány i jiné možné přístupy. Nicméně pro konkrétní experiment je 0,4 mm adekvátní šířka trhliny. K získání síly v bodě zlomu je tato hodnota násobena tuhostí drážkového spoje K_s odvozené z chování během trémové zkoušky.

5.5.6 Diskuze modelu chování výztuže v drážce

Modely (čárkovanými čarami v obrázku 5.19) ukazují potenciální bilineární diagramy pro výpočet chování helikální výztuže v drážce. K předpovědi modely v obrázku využívají tuhost měřenou popsány trémovými zkouškami na vyztužených trémcích, ale mohou využívat i tuhost odhadnutou pomocí diagnostických metod (popsáno podrobněji v jedné z následujících podkapitol – 5.6.2). Největší nevýhodou popsáných modelů je jejich závislost na hodnotě šířky trhliny určené bez bližší souvislosti s technickou podstatou řešeného detailu. Určená hodnota šířky trhliny sice odpovídá modelům popsáným v této práci, ale nemusí odpovídat jiným kombinacím helikálních výztuží, kotevní zálivky a podkladního materiálu.

Alternativy použité limitní hodnoty mohou vycházet i z použití síly a následného dopočítání deformace v bodě zlomu. Například je možné vzít limitní hodnotu trhliny z estetického hlediska (0,4 mm jako je to již prezentováno) a limitní hodnotu vytažení z vývrtu (pozor, nebyl nalezen výrobce udávající tuto hodnotu v drážce) udanou výrobcem na základě jeho zkoušek. Následně lze spočítat limitní sílu z deformace a také deformaci z limitní síly udané výrobcem a zjistit který vypočtený zlom je na bezpečné straně a tu hodnotu použít. V případě popsáném zde je to právě postup založený na deformaci, jelikož 3.8 kN únosnosti výztuže ve vrtu udané výrobcem z 10.1 kN únosnosti výztuže samotné udané výrobcem by způsobilo lom na vyšší hodnotě, tedy na nebezpečnější straně, větší trhlina a již by došlo ke kolizi z naměřenými hodnotami reálného chování.

Pokud je limit specifikovaný dodavatelem (výztuže i zálivky) nedostupný, alternativně by mohlo dojít k porovnání s hodnotou síly ve výztuži při které dochází k odchýlení od čistě lineárního chování (něco jako velmi striktní mez úměrnosti), v našem naměřeném případě by hodnota této síly byla 4,1 kN a při jejím použití by stoupající větev bilineárního diagramu zůstávala stále ve stádiu přechodu, tedy na relativně bezpečné straně. Tento poslední postup je čirá spekulace na základě pozorování a předpokladu, že kotevní zálivka je tak tuhá, že neodvolí žádný větší posun (než adekvátní k mezi úměrnosti helikální výztuže) bez jejího prasknutí. I přesto, že se jedná o spekulaci, může jít o kompromisní řešení, když je k dispozici pracovní diagram helikální výztuže a provádění jiných testů nepřichází v úvahu.

Po přijetí bilineárního modelu pro danou kombinaci helikální výztuže, kotevní zálivky a podkladního materiálu stačí, aby osoba navrhuující řešení posoudila, zda navržený počet helikálních výztuží unese sílu odpovídající použití nebo zda deformace způsobená odpovídající silou je v mezích požadovaných výsledků. Druhé řešení více odpovídá smyslu použití helikální výztuže k obnově strukturální integrity konstrukce. Výhoda modelu spočívá v jeho závislosti pouze na pár hodnotách při zachování kvalitního návrhu. Návrh musí samozřejmě v první řadě respektovat doporučení výrobce, například o kotevních délkách, minimálním vyztužení, vzdálenosti prutů, rozměrech drážky a podobně.

Závěrem lze říci, že model založený na tuhosti spoje helikální výztuže vypočtené na základě testů nebo vztahu diagnostiky a chování spoje může být po dalším zkoumání efektivně použitý pro návrh oprav trhlin. Model má výraznou výhodu v použití málo hodnot, ale také určitá omezení v nutnosti odhadu vhodného bodu zlomu. K řešení tohoto omezení jsou však nabídnuty různé přístupy.

5.6 Korelace diagnostiky a výsledků testování v drážce

Na základě popisu v podkapitolách 5.5.4 a 5.4.7, diskutujících chování spoje v drážce, byly vybrány následující diagnostické metody a indikátory, které byly podrobeny testování hypotézy o jejich možné vzájemné korelaci:

Hodnoty na straně diagnostiky:

- Rychlost šíření ultrazvukového pulzu [km/s]
- První vlastní podélná frekvence měřená metodou Impact-Echo [kHz]
- Hodnota odrazu při měření odrazovým tvrdoměrem [-]
- Síla odtrhu při odtrhové zkoušce [kN]
- Krychelná pevnost v tlaku [MPa]

Hodnoty na straně chování drážkového spoje:

- Tuhost drážkového spoje [kN/mm]
- Tuhost drážkového spoje pro střední hodnotu pracovního diagramu [kN/mm]
- Horní mez kluzu drážkového spoje [kN]
- Dolní mez kluzu drážkového spoje [kN]
- Pokles síly po mezi kluzu u drážkového spoje [kN]
- Deformace spoje na horní mezi kluzu [mm]
- Deformace spoje na dolní mezi kluzu [mm]
- Deformace spoje mezi horní a dolní mezi kluzu [mm]
- Horní mez kluzu drážkového spoje pro střední hodnotu pracovního diagramu [kN]
- Dolní mez kluzu drážkového spoje pro střední hodnotu pracovního diagramu [kN]
- Pokles síly po mezi kluzu u drážkového spoje pro střední hodnotu pracovního diagramu [kN]
- Deformace spoje na horní mezi kluzu pro střední hodnotu pracovního diagramu [mm]
- Deformace spoje na dolní mezi kluzu pro střední hodnotu pracovního diagramu [mm]
- Změna deformace za horní mezi kluzu spoje pro střední hodnotu pracovního diagramu [mm]

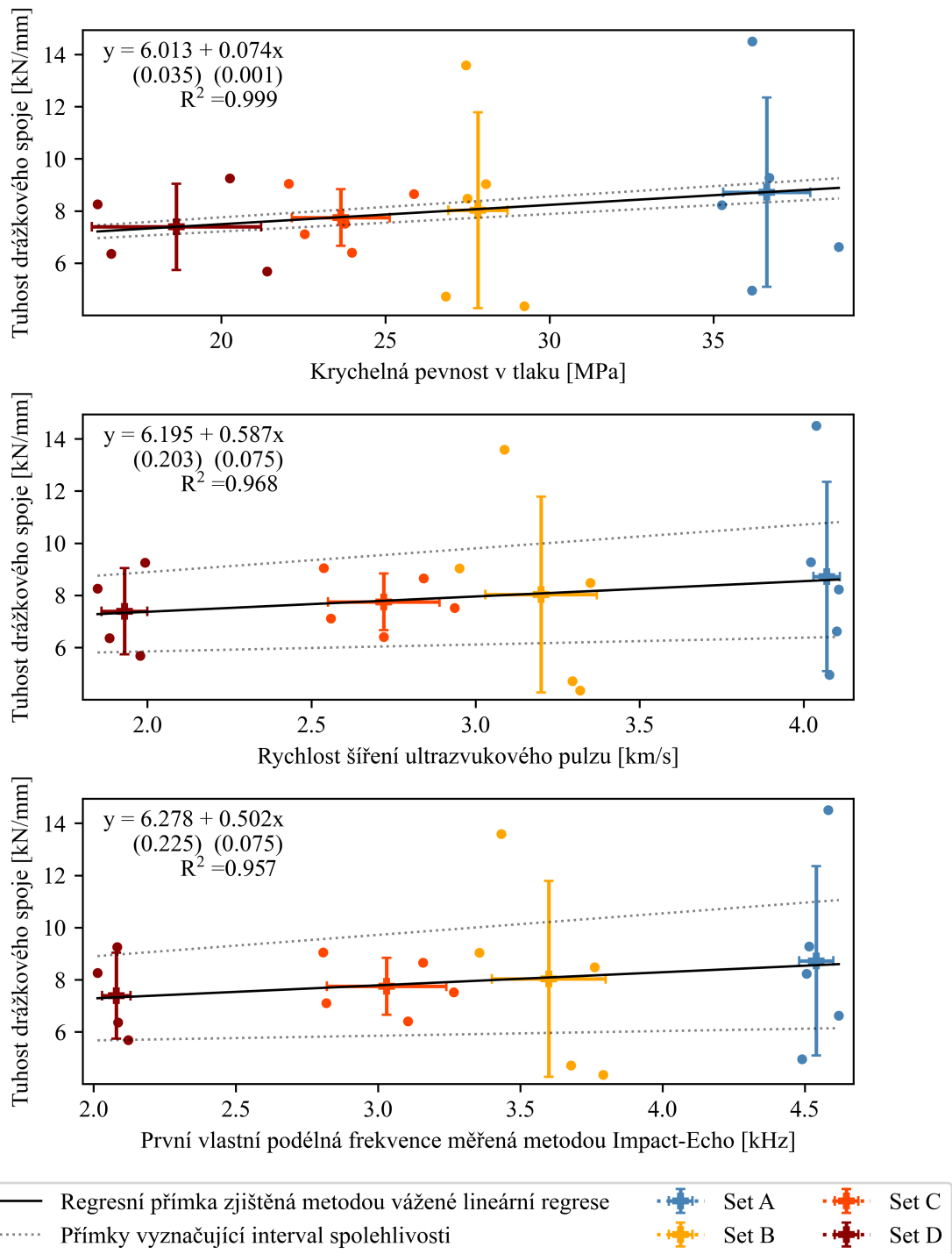
- Energie pro horní mez kluzu drážkového spoje [J]
- Energie pro dolní mez kluzu drážkového spoje [J]

Smysl následujících uvedených postupů, diskuzí a závěrů je připraven k publikaci v [47].

5.6.1 Výsledky korelace

Výsledky diagnostiky a indikátory chování drážkového spoje byly vyhodnoceny s použitím vážené lineární regrese metodou nejmenších čtverců za pomoci python knihovny `statmodels` [64]. Doporučené váhy dle webu této knihovny jsou proporční převrácené hodnotě rozptylu pozorování. Proto pro každou sadu a hodnotu na každé ose byla spočítána standardní odchylka a střední hodnota, z toho byly určeny rozptyly a normalizovány k sadě A jako referenční hodnotě o velikosti jedné jednotky. Následně knihovna `statmodels` bere druhé odmocniny těchto hodnot pro každou sadu, což má za následek váhu každého bodu převrácenou k délce přepony tvořenou standardními odchylkami v obou osách pro každou sadu.

Obrázek 5.21 ukazuje statisticky významné korelace (p-hodnota ≤ 0.05 a $R^2 \geq 0.9$), obdržené výpočtem vážené lineární regrese metodou nejmenších čtverců. Korelace mezi tuhostí drážkového spoje helikální výztuže (poměr maximální síly, kterou unese a příslušné deformace) a pevností betonu v tlaku, rychlostí průchodu ultrazvukového pulzu a první vlastní frekvencí měřenou metodou Impact-Echo splnila zmíněná kritéria. Výsledky korelace povrchových metod nedosáhly požadovaných výsledků, ani v případě kombinace s jinými indikátory (indikátory blíže popsány v podkapitole 5.5.4).



Obrázek 5.21: Grafy ukazující výsledky vážené lineární regrese metodou nejmenších čtverců na čtyřech různě degradovaných sadách zahrnutých v rámci této práce. Interval spolehlivosti značí oblast, kde by byla střední hodnota další náhodné sady očekávána na hladině významnosti 5 %, kdyby výsledky diagnostik na této sadě ležely v pozorovaném rozpětí. Hodnoty v závorkách uvádějí standardní odchylku pro každý z koeficientů. Připraveno k publikaci v [47].

5.6.2 Diskuze výsledků korelace

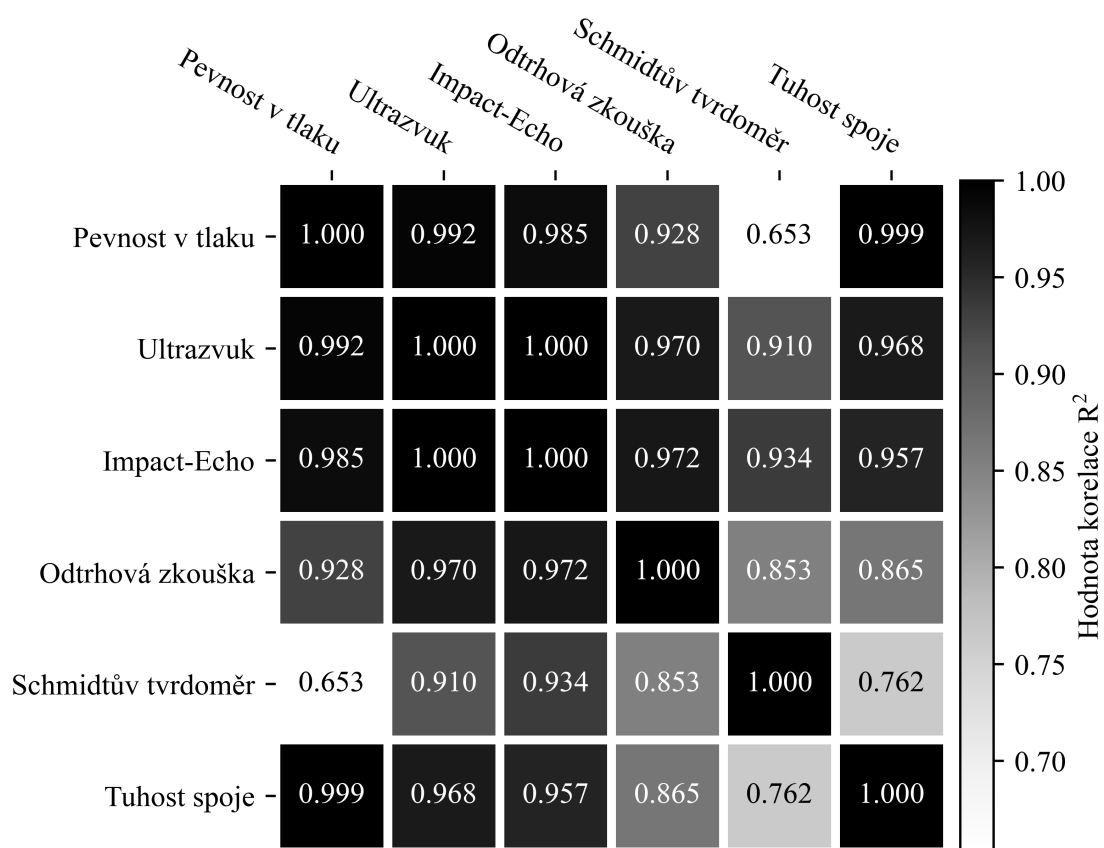
V rámci testovaných sad byly nalezeny statisticky významné korelace (p -hodnota ≤ 0.05 a $R^2 \geq 0.9$). Konkrétně se jedná o korelaci tuhosti drážkového spoje helikální výztuže a hloubkových metod diagnostiky (pevnost betonu v tlaku, rychlost průchodu ultrazvukového pulzu a první vlastní frekvence měřená metodou Impact-Echo), jako je ukázáno v obrázku 5.21 výše. Dle autorova nejlepšího vědomí a svědomí zatím takový vztah nebyl popsán a tím pádem nelze výsledky porovnat s jinými. Dále je nutné dodat, že by výsledky mohly být jiné, pokud by byly použité násobně větší sady, jelikož by bylo méně prostoru pro odchylky.

V případě této konkrétní práce, větší důraz v rámci hodnocení výsledků může jít na zhodnocení potenciálních chyb výsledků na obou stranách korelace, například výsledků povrchových metod, jelikož měly oproti hloubkovým metodám slabý výsledek korelace i samotné diagnostiky. Jejich výsledky byly nerozlišitelné mezi některými sadami (obrázek 5.14) a i když byly porovnávány s indikátory vykazujícími téměř lineární trendy, tak stejně snížily výrazně procento vysvětleného rozptylu. Navíc, všechny diagnostické metody by měly být do určité míry korelovatelné mezi sebou a jak je vidět v obrázku 5.22, tak se tak neděje právě pro povrchové metody ve stejné míře jako pro hloubkové, což indikuje možnou chybu právě v povrchových metodách. Nejpravděpodobnější příčinou nespolehlivosti těchto metod může být proces degradace pálením v peci, kdy mohlo dojít k různému stupni degradace různých povrchů vzorků. Toto by mohlo být příště řešeno zvolením degradace, která probíhá přirozeně rovnoměrně po povřích nebo použitím různých materiálů, které jsou ve své podstatě podobné, jen jsou jinak poddajné / zdegradované. Hloubkové metody nebyly pálením zřejmě znatelně zasaženy.

Další prostor pro možnou chybu by mohl být na straně indikátorů, jelikož jejich střední hodnoty nebyly vždy striktně rostoucí nebo klesající s degradací, jak je vidět na obrázku 5.19. Tento fakt může být potlačen použitím většího množství vzorků k nalezení přesnějšího průběhu s menším rozptylem a tím získání přesnějších indikátorů. Také použití více homogenního materiálu může být výhodné.

S nalezenou korelací se nabízí otázka intervalu ve kterém tato korelace platí. Na relativně malém množství sad a vzorků se zdá závislost lineární a výsledky jsou na tom založené. Není ale jasné, jaký vztah by platil mimo měřený rozsah. Vzhledem k velikosti sady dat není zřejmě vhodná extrapolace z uvedených rozsahů a tyto rozsahy by měly být $-16.2 - 38.8$ MPa pro pevnost v tlaku, $1.85 - 4.11$ km/s pro rychlost šíření ultrazvuku a $2.01 - 4.62$ kHz pro první vlastní frekvenci měřenou metodou Impact-Echo. I přes určité popsané nedokonalosti, zjištění korelace umožňuje předpovídat tuhost drážkového spoje helikální výztuže a použití této tuhosti v modelech, místo tuhosti měřené přímo na vzorcích. Výsledky získané takto jsou velmi blízké těm získaným přímo, asi do relativní chyby 1,82 %. Tuhost odhadnutá na základě pevnosti betonu v tlaku, rychlostí průchodu ultrazvukového pulzu a první vlastní frekvencí měřenou metodou Impact-Echo se lišila postupně v rozmezích 0.07 až 0.43 %, 0.50 až 1.53 % a 0.70 až 1.82 %, v porovnání s tuhostí obdrženou přímým testováním. Vše na hladině významnosti 5 %.

Závěrem lze říci, že korelace diagnostiky a chování výztuže v drážce existuje. Minimálně tuhost drážkového spoje helikální výztuže může být v rámci daných mezí předpovězena na základě výsledků pevnosti betonu v tlaku, rychlosti průchodu ultrazvukového pulzu a první vlastní frekvence měřené metodou Impact-Echo. Tento objev umožní efektivní návrh těchto spojů, je ale nutné udělat další výzkumy na dalších materiálech a tyto výstupy zpřesnit.



Obrázek 5.22: Korelace vyjádřená pomocí R^2 spočteného váženou lineární regresí metodou nejmenších čtverců. Připraveno k publikaci v [47].

Kapitola 6

Závěry

Hlavním cílem disertační práce bylo zjištění vztahu mezi výsledky metod stavební diagnostiky, aplikovanými na zkoušené vzorky, a chováním spoje helikální výztuže v drážce. Chování bylo zkoušeno pomocí trámčové zkoušky, jejíž validace byla vedlejším cílem. Doprovodným cílem bylo doplnit rešerši literatury a informovat o možnostech zkoušení, případně udat směr dalšího výzkumu. Tyto výsledky jsou nyní shrnuty v následujících odstavcích, řazené od hlavních a významných zjištění k zjištěním vedlejším a méně významným. Smysl závěrů diagnostiky, zkoušení výztuže v drážce a korelace jejich výsledků popsany v následujících řádcích je prezentovaný také v článku autora a kolektivu připraveného k publikaci v recenzovaném časopise v kvartilu Q1 [47], v době finálních úprav práce v recenzním řízení.

- Korelace diagnostiky a chování výztuže v drážce existuje. Minimálně tuhost drážkového spoje helikální výztuže může být v rámci daných mezí předpovězena na základě výsledků pevnosti betonu v tlaku, rychlosti průchodu ultrazvukového pulzu a první vlastní frekvence měřené metodou Impact-Echo. Tento objev umožní efektivní návrh těchto spojů, je ale nutné udělat další výzkumy na dalších materiálech a tyto výstupy zpřesnit.
- Model založený na tuhosti spoje helikální výztuže vypočtené na základě testů nebo vztahu diagnostiky a chování spoje může být po dalším zkoumání efektivně použitý pro návrh oprav trhlin. Model má výraznou výhodu v použití málo hodnot, ale také určitá omezení v nutnosti odhadu vhodného bodu zlomu. K řešení tohoto omezení jsou však nabídnuty různé přístupy.
- Kotvení výztuže v drážce vykazuje opakující se vzor skrze většinu testovaných experimentů, reflektující podstatu vzorků i navržené zkoušky, a tento vzor chování je také porovnatelný se zahraniční literaturou. Na základě zjištěného chování je možné určit indikátory s potenciálem korelace k výsledkům diagnostiky a také indikátor potvrzující praktičnost experimentu v souladu s praxí. Zkoušení na trámčích o velikosti možného vývrtu se ukázalo jako vhodné, jen lze pro budoucí experimenty pravděpodobně použít úzký zářez do jedné čtvrtiny výšky vzorku, jelikož půlkruhový zářez se ukázal jako zbytečně komplikovaný jak pro provedení, tak i vyhodnocení.
- Měření pevnosti v tlaku, rychlosti šíření ultrazvukového pulzu a první vlastní frekvence metodou Impact-Echo dobře rozlišuje mezi jednotlivými sadami (jak mohlo být předvídáno na základě literatury) a díky tomu jsou tyto metody pravděpodobněji

korelovatelné s výsledky chování spoje. Měření odrazovým tvrdoměrem a odtrhovou zkouškou vykázalo malé rozlišení mezi dvěma sadami a díky tomu je menší šance korelace s chováním spoje. I přesto se tyto povrchové metody hodí dále zkoumat. Všechny použité metody byly zhodnoceny a měly by také být zahrnuty v dalších výzkumech. Zatím to ale vypadá, že hloubkové metody mají větší šanci uspět v korelaci k výsledkům chování spoje a řešit daný výzkumný problém.

- Degradace teplotou na 400 °C, 600 °C, a 800 °C se ukázala jako vhodný způsob simulace degradace materiálu, jelikož zájmové mechanické parametry klesaly s rostoucí degradací (viz podkapitoly s výsledky diagnostiky). Degradace teplotou na 1000 °C již způsobuje výrazné poškození betonových vzorků, které potom nejsou použitelné pro další zkoušení.
- Měření helikální výztuže tradičním způsobem je možné, ale je třeba respektovat omezení vyplývající z tvaru výztuže a způsobu její výroby. Jako vhodný způsob uchycení se ukázalo vlepění do koncovek z trubek pomocí epoxidové pryskyřice. Trubky by měly být směrem k volné délce zkoušené výztuže zúženy pro zabránění nežádoucím jevům povytažení výztuže z trubky a porušení výztuže jinde než na volné délce. Co se týká měření deformace, zde je ještě výrazný prostor pro zlepšení, ale i při běžném použití snímačů z každé strany pomocí hliníkových ramínek je to možné, pouze výsledek není vždy zaručen, jelikož se často výztuž nevhodně zkroutí a snímače přestanou měřit k protilehlé základně.
- Měření helikální výztuže systémem ARAMIS je možné, lze sledovat malé oblasti křídlek výztuže a nemá smysl používat další praporky a značky pro měření pootočení. Další zpracování je však poměrně náročné a vzhledem k dalším provedeným experimentům nedávalo vyhodnocení tohoto měření smysl v celém kontextu, proto tedy výsledky nejsou vyhodnoceny a prezentovány v rámci této práce. Určitě je možné (a vřele podporované) od autora měření převzít a vypracovat na něm vlastní práci, která pravděpodobně může dosavadní znalosti značně rozšířit.
- Tradiční zkoušení kotevní zálivky ke zjištění pevnosti v tlaku a tahu za ohybu se ukázalo vhodné i pro kotevní zálivku na helikální výztuže. Nebyla zjištěna žádná odchylka od běžného chování jiných malt.
- Při měření smrštění se ukázalo, že běžně používaná kotevní zálivka se během jejího tuhnutí lehce smršťuje, a i přesto se s úspěchem používá. Z toho je zřejmé, že měřená úroveň smrštění příliš nevádí. I přesto by bylo nepochybně zajímavé zjistit, zda existuje vztah mezi únosností spoje a mírou smrštění různých kotevních zálivek. K tomu mohou být použité oba zmíněné postupy, přičemž postup podle ÖNORM B 3329 umožní oproti přístupu podle ČSN EN 12617-4 měření i ve velmi raných stádiích tuhnutí kotevní zálivky.

Literatura

- [1] KUBANEK, J. a SCHMID, P. *Manuál a metodika navrhování a aplikace systémů dodatečně vkládaných helikálních výztuží při zesilování stavebních konstrukcí v podmínkách stavebnictví ČR*. 1. vyd. Brno, Česká republika: Munipress, 2006. ISBN 2-88394-054-1.
- [2] *Helifix*. London, United Kingdom: Leviat, 2023. Dostupné z: <https://www.helifix.co.uk/>.
- [3] *Thor Helical Australia*. Sydney, Australia: Thor Helical Australia, 2023. Dostupné z: <https://www.thorhelical.com.au/>.
- [4] *Construction Products Solutions International*. Bishop's Stortford, United Kingdom: Construction Products Solutions International, 2023. Dostupné z: <https://www.surecps-group.com/>.
- [5] *Target Fixings Construction Solutions*. Thatcham, United Kingdom: Target Fixings Construction Solutions, 2024. Dostupné z: <https://targetfixings.co.uk/>.
- [6] ECONOMIDOU, M., ATANASIU, B., STANIASZEK, D., MAIO, J., NOLTE, I. et al. *Europe's buildings under the microscope. A country-by-country review of the energy performance of buildings*. říjen 2011. ISBN 9789491143014.
- [7] *Uhlíkové lamely PREFACARB L pro dodatečné zesilování konstrukcí*. Dostupné z: <https://www.prefa-kompozity.cz/wp-content/uploads/2015/09/katalog-letak-prefacarb-cs.pdf>.
- [8] *Metodická příručka – Zesilování konstrukcí – Sika CarboDur systém*. Dostupné z: <https://cze.sika.com/dam/dms/cz01/0/MP-cz-Sika%20CarboDur.pdf>.
- [9] *Technický list – Sanax CarboLamela*. Dostupné z: https://www.sanax.cz/static/files/product/TL/TL_CarboLamela_5.pdf.
- [10] MIRMIRAN, A., SHAHAWY, M., NANNI, A. a KARBHARI, V. M. *NCHRP report 514: Bonded repair and retrofit of concrete structures using FRP composites: Recommended construction specifications and process control manual*. Washington, D.C., USA: Transportation Research Board, 2004. ISSN 0077-5614.
- [11] *Profometer 630AI PM-630 Rebar Locator And Covermeter*. Dostupné z: <https://certifiedmtp.com/profometer-630ai-pm-630-rebar-locator-and-covermeter/>.
- [12] *Skener betonu HILTI PS 1000 X-SCAN*. Dostupné z: https://www.hilti.cz/c/CLS_MEA_TOOL_INSERT_7127/CLS_CONCRETE_SCANNERS_SENSORS_7127/r6436760.

- [13] CIKRLE, P., OLEJKOVÁ, S., SINGROVÁ, V. a OŠČATKOVÁ, Z. Metodika měření poruch panelových domů. *TZB-info*. 2019, sv. 2019, č. 1, s. 1–9. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/regenerace-domu/20067-metodika-mereni-poruch-panelovych-domu>.
- [14] ZLÁMAL, M. a ŠTĚPÁNEK, P. Zesilování zděných kleneb dodatečně vkládanou výztuží. *Stavební obzor*. 2011, sv. 2011, č. 8, s. 225–232. ISSN 1210-4027.
- [15] ŠTĚPÁNEK, P. a CZEMPIEL, J. Additional reinforcement in the masonry of historical buildings tests, numerical analysis, practical application. In: *3rd International seminar on historical constructions. Guimarães, Portugal: University of Minho*. 2011, s. 1013–22.
- [16] MEISCHNER, H. a JAHN, T. *Mauerwerksinstandsetzung mit Spiralankern*. 1. vyd. Stuttgart, Germany: Fraunhofer IRB Verlag, 2014. ISBN 978-3816792130.
- [17] *Pundit Lab (+)*. Dostupné z: <https://www.screeningeagle.com/en/products/pundit-lab>.
- [18] *Mirador*. Dostupné z: <https://www.germanninstruments.com/impact-echo-test-mirador/>.
- [19] *ASTM C1583: Standard test method for tensile strength of concrete surfaces and the bond strength or tensile strength of concrete repair and overlay materials by direct tension (pull-off method)*. West Conshohocken, Pennsylvania, USA: ASTM International, 2013.
- [20] *Statické zajištění HV, ČS Velké Meziříčí*. Dostupné z: <https://www.helikalni.cz/reference-cs-velke-mezirici.html>.
- [21] *Original Schmidt*. Dostupné z: <https://www.screeningeagle.com/en/products/original-schmidt>.
- [22] ALBREKTSSON, J., FLANSBJER, M., LINDQVIST, J. E. a JANSSON, R. *Assessment of concrete structures after fire*. Borås, Sweden: SP Technical Research Institute of Sweden, 2011. ISSN 0284-5172.
- [23] KRZEMIENÍ, K. a HAGER, I. Post-fire assessment of mechanical properties of concrete with the use of the impact-echo method. *Construction and Building Materials*. 2015, sv. 96, s. 155–163. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.007>. ISSN 0950-0618. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815302245>.
- [24] TOUMI, B. a RESHEIDAT, M. Influence of high temperatures on surface cracking of concrete studied by image scanning technique. *Jordan Journal of Civil Engineering*. 2010, sv. 4, č. 2, s. 155–163. ISSN 2225-157X.
- [25] MA, Q., GUO, R., ZHAO, Z., LIN, Z. a HE, K. Mechanical properties of concrete at high temperature—A review. *Construction and Building Materials*. 2015, sv. 93, s. 371–383. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.131>. ISSN 0950-0618. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815006765>.

- [26] YANG, H., LIN, Y., HSIAO, C. a LIU, J.-Y. Evaluating residual compressive strength of concrete at elevated temperatures using ultrasonic pulse velocity. *Fire Safety Journal*. 2009, sv. 44, č. 1, s. 121–130. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2008.05.003>. ISSN 0379-7112. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037971120800057X>.
- [27] HWANG, E., KIM, G., CHOE, G., YOON, M., GUCUNSKI, N. et al. Evaluation of concrete degradation depending on heating conditions by ultrasonic pulse velocity. *Construction and Building Materials*. 2018, sv. 171, s. 511–520. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.178>. ISSN 0950-0618. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818306974>.
- [28] SAVVA, A., MANITA, P. a SIDERIS, K. Influence of elevated temperatures on the mechanical properties of blended cement concretes prepared with limestone and siliceous aggregates. *Cement and Concrete Composites*. 2005, sv. 27, č. 2, s. 239–248. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.013>. ISSN 0958-9465. Cement and Concrete Research in Greece. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946504000289>.
- [29] PANEDPOJAMAN, P. a TONNAYOPAS, D. Rebound hammer test to estimate compressive strength of heat exposed concrete. *Construction and Building Materials*. 2018, sv. 172, s. 387–395. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.179>. ISSN 0950-0618. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181830672X>.
- [30] ROZSYPALOVA, I., DANEK, P. a KAREL, O. The bond strength by pull-off and direct tensile strength of concrete damaged by elevated temperatures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing. 2018, sv. 385, č. 1, s. 012047. DOI: 10.1088/1757-899X/385/1/012047. Dostupné z: <https://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/385/1/012047>.
- [31] *Saron, Statické zajištění – Mikropiloty*. Dostupné z: <https://www.statickezajisteni.cz/staticke-zajisteni.html#prettyPhoto/54/>.
- [32] *Saron, Statické zajištění – Reference*. Dostupné z: https://www.statickezajisteni.cz/photo/stredolesi_02.jpg.
- [33] *Stado special construction – Statika staveb – Carbo systém*. Dostupné z: <http://www.stado.cz/images/reference/carbo-system/podebr-praha/3.jpg>.
- [34] OLLIS, W. J. B. a OLLIS, W. H. *Method of making a wall tie and tie made by the method*. European patent specification EP0171250B1, Únor 1986.
- [35] *Helifix – The Helibeam System*. Dostupné z: <https://www.helifix.com/uploads/images/products/Helibeam%20System.jpg>.
- [36] *ČSN EN ISO 6892-1: Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. 4. vyd. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.
- [37] *Thor Helical Wire Design Brief*. Dostupné z: <https://thorhelical.com.au/wp-content/uploads/2020/07/Thor-Helical-Design-Briefing-Notes.pdf>.

- [38] *Analýza deformací ARAMIS*. Dostupné z: <https://www.mcae.cz/produkty/aramis/>.
- [39] *ARAMIS Technologie pro 3D optické měření pohybu a deformací*. Dostupné z: https://www.mcae.cz/wp-content/uploads/2020/10/GOM_brochure_ARAMIS_CZ_nahled_.pdf.
- [40] *Helifix Load Test Unit*. Dostupné z: <https://www.helifix.com/products/retrofit-products/drilling-testing-guide/>.
- [41] *Suretwist Load Test Unit*. Dostupné z: <https://www.surecps-group.com/products/load-test-unit-pull-out-tester/>.
- [42] ISMAIL, N. a INGHAM, J. M. In-situ and laboratory based out-of-plane testing of unreinforced clay brick masonry walls strengthened using near surface mounted twisted steel bars. *Construction and Building Materials*. 2012, sv. 36, s. 119–128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.087>. ISSN 0950-0618. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061812002899>.
- [43] ISMAIL, N., PETERSEN, R. B., MASIA, M. J. a INGHAM, J. M. Diagonal shear behaviour of unreinforced masonry wallettes strengthened using twisted steel bars. *Construction and Building Materials*. 2011, sv. 25, č. 12, s. 4386–4393. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.063>. ISSN 0950-0618. Masonry Research and Practice. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061811002066>.
- [44] MARAGNA, M., GENTILINI, C., CASTELLAZZI, G. a CARLONI, C. Bond of steel bars to masonry mortar joints: Test results and analytical modelling. In: *Mechanics of Masonry Structures Strengthened with Composite Materials II*. Trans Tech Publications Ltd, 2017, sv. 747, s. 319–325. Key Engineering Materials. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.747.319.
- [45] GENTILINI, C., FINELLI, F. a CARLONI, C. An experimental study of the bond behavior of twisted steel bars embedded in mortar cylinders and in the joints of masonry wallettes. *Construction and Building Materials*. 2022, sv. 316, s. 125795. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125795>. ISSN 0950-0618. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821035285>.
- [46] PETERSEN, R. B., ISMAIL, N., MASIA, M. J. a INGHAM, J. M. Finite element modelling of unreinforced masonry shear wallettes strengthened using twisted steel bars. *Construction and Building Materials*. 2012, sv. 33, s. 14–24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.01.016>. ISSN 0950-0618. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061812000396>.
- [47] BALKANSKÝ, O., DVOŘÁK, R., ČAIROVIĆ, I., REY CASTILLO, E. del a SCHMID, P. *Predicting twisted steel bar joint behaviour using diagnostic methods*. 2024. [V době finálních úprav práce je článek v recenzním řízení. / During the final revisions of the thesis, the article is under peer review.].
- [48] *ČSN EN 1015-11: Zkušební metody malt pro zdivo - Část 11: Stanovení pevnosti zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku*. 2. vyd. Praha, Česká republika: Český normalizační institut, 2020.

- [49] ČSN EN 12617-4: *Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Zkušební metody - Část 4: Stanovení smršťování a rozpínání*. 1. vyd. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [50] ÖNORM B 3329: *Vergussmörtel - Anforderungen und Prüfmethoden*. 1. vyd. Rakousko: Austrian Standards International, 2009.
- [51] KUCHARCZYKOVÁ, B., KAREL, O., DANĚK, P., KOCÁB, D. a PÓSSL, P. Comparison of Measurements Methods Intended to Determination of the Shrinkage Development in Polymer Cement Mortars. *Procedia Engineering*. 2017, sv. 195, s. 17–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.518>. ISSN 1877-7058. CRRB 2016 – 18th International Conference on Rehabilitation and Reconstruction of Buildings. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817320702>.
- [52] ARAMIS - *User Manual - Software*. 6. vyd. Německo: GOM mbH, 2009.
- [53] *ASTM C39/C39M-21: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*. West Conshohocken, Pennsylvania, USA: ASTM International, 2023.
- [54] *ASTM C597: Standard test method for pulse velocity through concrete*. West Conshohocken, Pennsylvania, USA: ASTM International, 2009.
- [55] *ASTM C1383: Standard test method for measuring the p-wave speed and the thickness of concrete plates using the impact-echo method*. West Conshohocken, Pennsylvania, USA: ASTM International, 2006.
- [56] *ASTM C805: Standard test method for rebound number of hardened concrete*. West Conshohocken, Pennsylvania, USA: ASTM International, 2018.
- [57] GHORBANPOOR, A. a BENISH, N. *Non-destructive testing of wisconsin highway bridge: Wisconsin highway research program—final report*. Wisconsin Highway Research Program, 2003.
- [58] KWAN, A. K. H. a NG, P. L. Building Diagnostic Techniques and Building Diagnosis: The Way Forward. In: TSE, P. W., MATHEW, J., WONG, K., LAM, R. a KO, C., ed. *Engineering Asset Management - Systems, Professional Practices and Certification*. Cham: Springer International Publishing, 2015, s. 849–862. ISBN 978-3-319-09507-3.
- [59] MALHOTRA, V. M. a CARINO, N. J. *Handbook on nondestructive testing of concrete*. 2. vyd. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2003. ISBN 978-1-4200-4005-0.
- [60] ČSN EN 12390-3: *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. 2. vyd. Praha, Česká republika: Český normalizační institut, 2009.
- [61] ČSN EN 1542: *Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Zkušební metody - Stanovení soudržnosti odtrhovou zkouškou*. 1. vyd. Praha, Česká republika: Český normalizační institut, 2000.

- [62] *ČSN EN 12504-2: Zkoušení betonu v konstrukcích - Část 2: Nedestruktivní zkoušení - Stanovení tvrdosti odrazovým tvrdoměrem*. 2. vyd. Praha: Český normalizační institut, 2013.
- [63] *ČSN EN 12269-2: Stanovení soudržnosti ocelové výztuže s autoklávovaným pórobetonem trámcovou zkouškou - Část 2: Dlouhodobá zkouška*. 2. vyd. Praha: Český normalizační institut, 2010.
- [64] *Weighted Least Squares – statsmodels.regression.linear_model.WLS*. 2023. Dostupné z: https://www.statsmodels.org/devel/generated/statsmodels.regression.linear_model.WLS.html.

Seznam použitých symbolů

E_s	Síla potřebná k vyvolání jednotkové deformace v helikální výztuži
F_s	Síla v helikální výztuži
F_v	Svislá síla působící na trámec uprostřed rozpětí
K_s	Tuhost spoje helikální výztuže
α	Pootočení v místě podpory
d_m	Průhyb trámce při trémcové zkoušce uprostřed
d_s	Deformace helikální výztuže
d_x	Průhyb trámce při trémcové zkoušce ve vzdálenosti l_x od podpory
g_o	Původní volná délka výztuže ve vytvořeném zářezu
h	Výška trámce při trémcové zkoušce
h_s	Vzdálenost mezi horním povrchem trámce a osou helikální výztuže
l	Vzdálenost podpor při trémcové zkoušce
l_{es}	Délka kotvení na které vymizí síla a deformace helikální výztuže
l_x	Vzdálenost místa měření průhybu od nejbližší podpory

Seznam obrázků

1.1	Ilustrační příklad použití dodatečně vkládané nerezové helikální výztuže pro sešití trhliny v rohu okna v železobetonovém panelu.	3
3.1	Tahové trhliny při poklesu krajních částí stavby, ilustrační obrázek.	8
3.2	Možnosti hledání výztuže: vlevo elektromagnetický indikátor výztuže Proceq PM-630 (Převzato z [11]) a vpravo Skener betonu HILTI PS 1000 X-SCAN (Převzato z [12]).	9
3.3	Měření deformací příložným deformetrem. Vlevo základna pro možnost měření ve dvou směrech, vpravo měření příložným deformetrem na jednoduché základně. Obě fotografie převzaty z [[13]].	10
3.4	Rychlost průchodu ultrazvuku v terénu, měřená na hraně konstrukce. Převzato z [17].	12
3.5	Metoda Impact-Echo – ukázka měření v terénu. Převzato z [18].	12
3.6	Provádění odtrhové zkoušky při diagnostice železobetonového žebra. Převzato z [20].	13
3.7	Odrazový tvrdoměr Original Schmidt. Převzato z [21].	14
3.8	Ukázka zesilování základů pomocí mikropilot z vnější strany. Převzato z [31].	16
3.9	Ukázka předpínání kostela lany monostrand ve dvou úrovních. Převzato z [32].	17
3.10	Ukázka sloupu zesíleného bandáží pomocí ocelových pásků a úhelníků. Převzato z [33].	18
3.11	Ilustrační obrázek komponent systému nerezové helikální výztuže v podkladech firmy Helifix. Na obrázku je hlavně k vidění samotná výztuž v desetimetrové roli i v kratších prutech, kotevní zálivka v suché formě v kyblíku a aplikační pistole. Převzato z [35].	20
3.12	Detail tvaru nerezové helikální výztuže. Na obrázku jde vidět, že výztuž tvoří středová část a křídélka, která jsou kolem středové části zakroucená	21
3.13	Lokální zesílení a kotvení konstrukčních částí a celků zděných staveb v přímých úsecích. Převzato z [1].	22
3.14	Lokální zesílení a kotvení konstrukčních částí a celků betonových staveb v místech stěn kolmých a sebe. Převzato z [1].	22
3.15	Ukázka měření pomocí systému ARAMIS, založeného na principu digitální korelace obrazů („Digital Image Correlation“ – DIC). Převzato z [39]. . . .	24
3.16	Testovací sada od firmy Helifix na zkoušení únosnosti výztuží zabudovaných ve vrtu. Převzato z [40].	25
3.17	Schéma laboratorního zkoušení zděné stěny vyztužené nerezovou helikální výztuží. Stěna je postavená mezi sadou airbagů a je jimi zatěžována. Převzato z [42].	26

3.18	Schéma zkoušení zděné stěny in-situ – stěna zatížená sadou airbagů z jedné strany. Převzato z [42].	27
3.19	Vzory vyztužení nerezovou helikální výztuží proti působení příčných sil při působení tlaku v úhlopříčce. Převzato z [43].	28
3.20	Způsoby zkoušení vyztužení nerezovou helikální výztuží proti působení příčných sil při působení tlaku v úhlopříčce. Modifikovaný test (vpravo) byl prováděn z důvodu, že standardní (vlevo) byl nevhodný pro těžší stěny. Převzato z [43].	28
3.21	Zkoušení různě vyztužených zděných trámů. Převzato z [15].	29
3.22	Schéma zkoušení kleneb vyztužených helikální výztuží. Převzato z [14].	30
3.23	Ukázka zkušební sestavy pro zkoušení kotvení ve válci z kotevní zálivky. Na obrázku jde vidět použití plechového talíře pro měření pomocí snímačů. Převzato z [44].	31
3.24	Ukázka zkoušení kotvení ve zděném bloku. Převzato z [15].	32
3.25	Schéma a fotografie zkoušení nerezové helikální výztuže v drážce. Převzato z [45].	33
3.26	Předpoklady návrhu vyztužené stěny pro experimenty v [42]. Vlevo diagram fází působení v závislosti na posunutích, uprostřed a vpravo průběhy přetvoření a sil v řezu. Převzato z [42].	34
3.27	Rozmístění vzpěr a táhel při výpočtu metodou vzpěra – táhlo s vyloučením táhel v místech taženého zdiva a s vložením kloubů pro klenbu zatíženou uprostřed rozpětí. Převzato z [14].	35
3.28	Ukázka detailu výpočetního modelu R. B. Petersena a kolektivu. Na obrázku lze vidět detail napojení prvků tvořících výpočtovou helikální výztuž. Převzato z [46].	36
3.29	Ukázka celého výpočetního modelu R. B. Petersena a kolektivu. V dolních rozích lze vidět síť konečných prvků. Převzato z [46].	36
3.30	Model pro výpočet metodou konečných prvků dle P. Štěpánka a J. Czempiela. Převzato z [15].	37
5.1	Měřicí zařízení a formy podle ČSN EN 12617-4. Převzato z [51].	44
5.2	Sestava měřících zařízení pro měření podle ÖNORM B 3329 – 1 – značky pro dlouhodobá měření, 2 – teplotní čidlo, 3 – vážící stůl, 4 – forma k měření smrštění. Převzato z [51].	44
5.3	Ukázka tradičního způsobu zkoušení výztuže, aplikovaného na helikální výztuž.	46
5.4	Pohled na celou sestavu ARAMIS – lze vidět dvojici kamer, které zachycují prostorový pohyb a kamerují celou délku výztuže. Výztuž je v tuto chvíli velmi zkroucená a praporky jsou spadlé na zemi.	48
5.5	Prvotní stav vzorku výztuže – na obrázku je vidět vzor nanesený na samotnou výztuž, na praporky i na uchycení.	48
5.6	Zdeformovaný stav – na obrázku je vidět rotace výztuže a ztráta vzoru v záběru kamery v důsledku pootočení.	49
5.7	Možnost výstupu – jakmile je měření zpracováno v software, je možné si například zvolit linii mezi dvěma body a sledovat různé diagramy těchto linií. V obrázku jsou použité pro zobrazení pracovních diagramů	49
5.8	Elektrická pec k pálení vzorků.	51
5.9	Umístění vzorků v peci.	52

5.10	Sestava zkoušení pevnosti v tlaku – na obrázku lze vidět polovinu zkoušeného trámce, kdy přes nástavec je působeno silou na plochu 100×100 mm. . . .	53
5.11	Měření metodou Impact-Echo	55
5.12	Provádění odtrhové zkoušky na trácích.	56
5.13	Zkoušení tvrdosti Schmidovým tvrdoměrem na trácích.	57
5.14	Výsledky diagnostiky – Chybové úsečky na každé straně od střední hodnoty značí standardní odchylku. Veškeré hodnoty jsou v měřítku měřené veličiny pro sadu A. Připraveno k publikaci v [47].	58
5.15	Fotografie původního tvaru helikální výztuže (nahore) a tvaru po provedení trácové zkoušky (dole), kdy došlo k vykroucení výztuže při dosažení velké deformace. Připraveno k publikaci v [47].	60
5.16	Výroba zesílených těles – drážkování.	60
5.17	Vyrobená zesílená tělesa, včetně tráců na zkoušení kotevní zálivky.	61
5.18	Schéma sestavené trácové zkoušky, ukazující použité proměnné (nahore) a její fotografie (dole). Připraveno k publikaci v [47].	63
5.19	Pracovní diagramy spoje helikální výztuže v drážce. Deformace volné délky výztuže v zářezu je odečtena, což umožňuje zobrazení jen přírůstku deformace, který se odehrává přímo v drážce a na části helikální výztuže vytažené z drážky na obou stranách. Tlustá plná čára značí střední hodnotu a transparentní plochy po jejích stranách standardní odchylku. Čárkované přímé čáry znázorňují výpočetní modely založené na změřeném chování výztuže v drážce, které jsou takřka shodné s těmi odvozenými z výsledků diagnostiky a následné korelace. Připraveno k publikaci v [47].	64
5.20	Vysvětlení chování spoje helikální výztuže v drážce a indikátorů použitých pro korelaci s výsledky diagnostiky. Připraveno k publikaci v [47].	66
5.21	Grafy ukazující výsledky vážené lineární regrese metodou nejmenších čtverců na čtyřech různě degradovaných sadách zahrnutých v rámci této práce. Interval spolehlivosti značí oblast, kde by byla střední hodnota další náhodné sady očekávána na hladině významnosti 5 %, kdyby výsledky diagnostik na této sadě ležely v pozorovaném rozpětí. Hodnoty v závorkách uvádějí standardní odchylku pro každý z koeficientů. Připraveno k publikaci v [47].	70
5.22	Korelace vyjádřená pomocí R^2 spočteného váženou lineární regresí metodou nejmenších čtverců. Připraveno k publikaci v [47].	72
A.1	Závislost tuhosti drážkového spoje na krychelné pevnosti v tlaku, hlavní prezentovaný výsledek korelace.	87
A.2	Závislost tuhosti drážkového spoje na rychlosti šíření ultrazvukového pulzu, hlavní prezentovaný výsledek korelace.	88
A.3	Závislost tuhosti drážkového spoje na první vlastní podélné frekvenci měřené metodou Impact-Echo, hlavní prezentovaný výsledek korelace.	88
A.4	Závislost tuhosti drážkového spoje na síle odtrhu při odtrhové zkoušce. . . .	89
A.5	Závislost tuhosti drážkového spoje na hodnotě odrazu při měření odrazovým tvrdoměrem.	89
A.6	Závislost poklesu síly po mezi kluzu u drážkového spoje na krychelné pevnosti v tlaku.	90
A.7	Závislost poklesu síly po mezi kluzu u drážkového spoje na rychlosti šíření ultrazvukového pulzu.	90

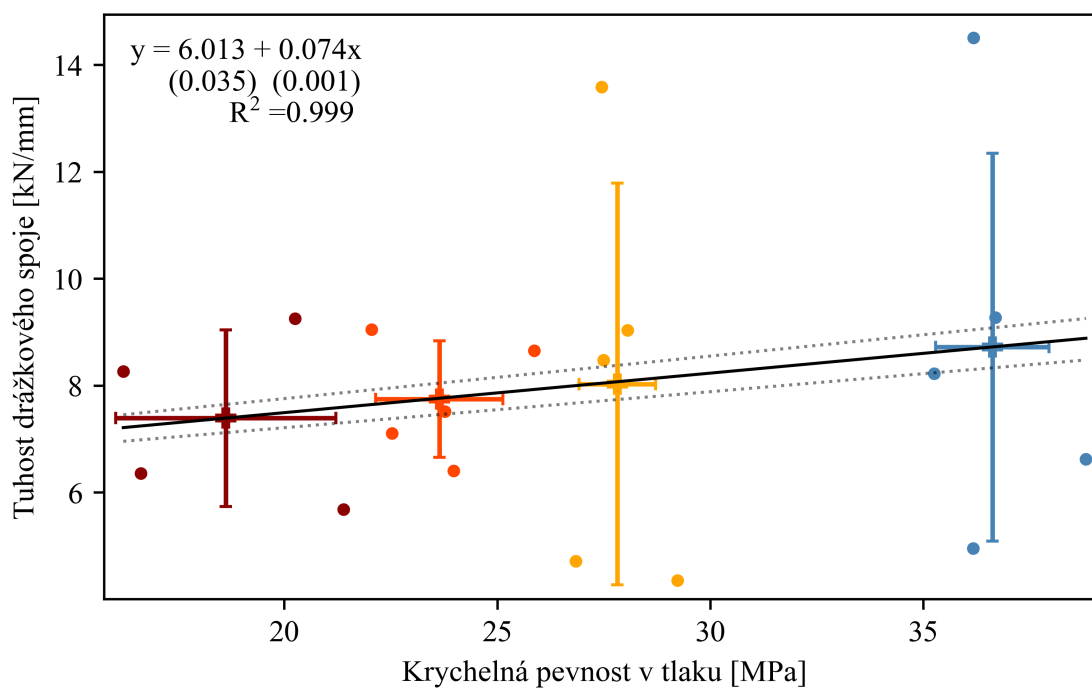
A.8	Závislost poklesu síly po mezi kluzu u drážkového spoje na první vlastní podélné frekvenci měřené metodou Impact-Echo.	91
A.9	Závislost horní meze kluzu drážkového spoje na první vlastní podélné frekvenci měřené metodou Impact-Echo.	91
A.10	Závislost horní meze kluzu drážkového spoje na rychlosti šíření ultrazvukového pulzu.	92
A.11	Závislost horní meze kluzu drážkového spoje na krychelné pevnosti v tlaku.	92
A.12	Závislost poklesu síly po mezi kluzu u drážkového spoje na hodnotě odrazu při měření odrazovým tvrdoměrem.	93
A.13	Závislost tuhosti drážkového spoje vypočtené z poměru horní meze kluzu a příslušné deformace na hodnotě odrazu při měření odrazovým tvrdoměrem. Horní mez kluzu v tomto případě odpovídá hodnotě na deformaci, kde průměrný diagram sady dosahuje horní meze kluzu.	93
A.14	Závislost poklesu síly po mezi kluzu u drážkového spoje na síle odtrhu při odtrhové zkoušce.	94
A.15	Závislost energie pro dolní mez kluzu drážkového spoje na hodnotě odrazu při měření odrazovým tvrdoměrem.	94
A.16	Závislost tuhosti drážkového spoje vypočtené z poměru horní meze kluzu a příslušné deformace na první vlastní podélné frekvenci měřené metodou Impact-Echo. Horní mez kluzu v tomto případě odpovídá hodnotě na deformaci, kde průměrný diagram sady dosahuje horní meze kluzu.	95
A.17	Závislost horní meze kluzu drážkového spoje na hodnotě odrazu při měření odrazovým tvrdoměrem.	95
A.18	Závislost tuhosti drážkového spoje vypočtené z poměru horní meze kluzu a příslušné deformace na síle odtrhu při odtrhové zkoušce. Horní mez kluzu v tomto případě odpovídá hodnotě na deformaci, kde průměrný diagram sady dosahuje horní meze kluzu.	96
A.19	Závislost tuhosti drážkového spoje vypočtené z poměru horní meze kluzu a příslušné deformace na rychlosti šíření ultrazvukového pulzu. Horní mez kluzu v tomto případě odpovídá hodnotě na deformaci, kde průměrný diagram sady dosahuje horní meze kluzu.	96
A.20	Závislost horní meze kluzu drážkového spoje pro střední hodnotu pracovního diagramu na krychelné pevnosti v tlaku.	97

Přílohy

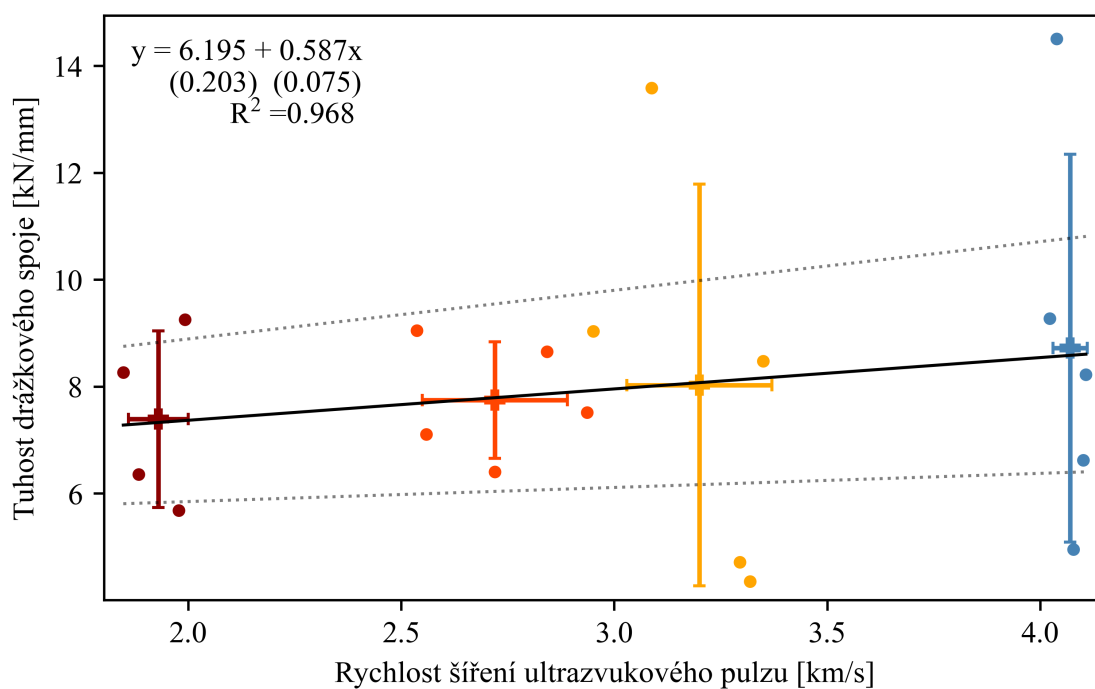
Příloha A

Veškeré korelace s koeficientem determinace nad 0,5

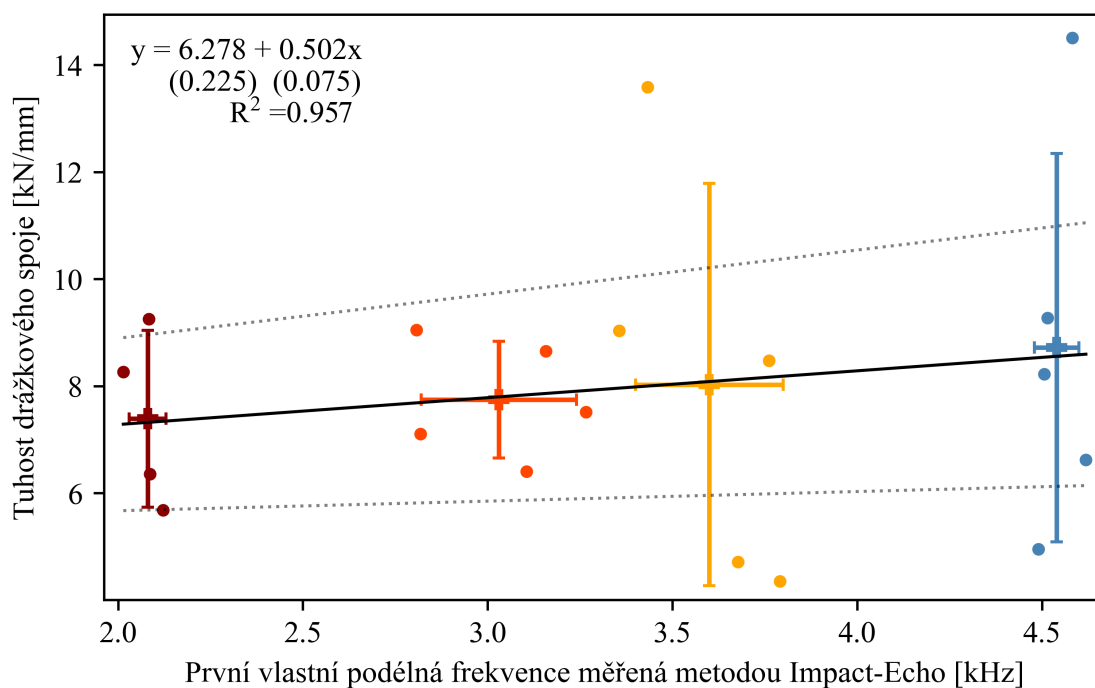
Vysvětlení jednotlivých ukazatelů na svislých osách je v podkapitole 5.5.4 – „Diskuze výsledků chování výztuže v drážce“ a hlavně na obrázku 5.20.



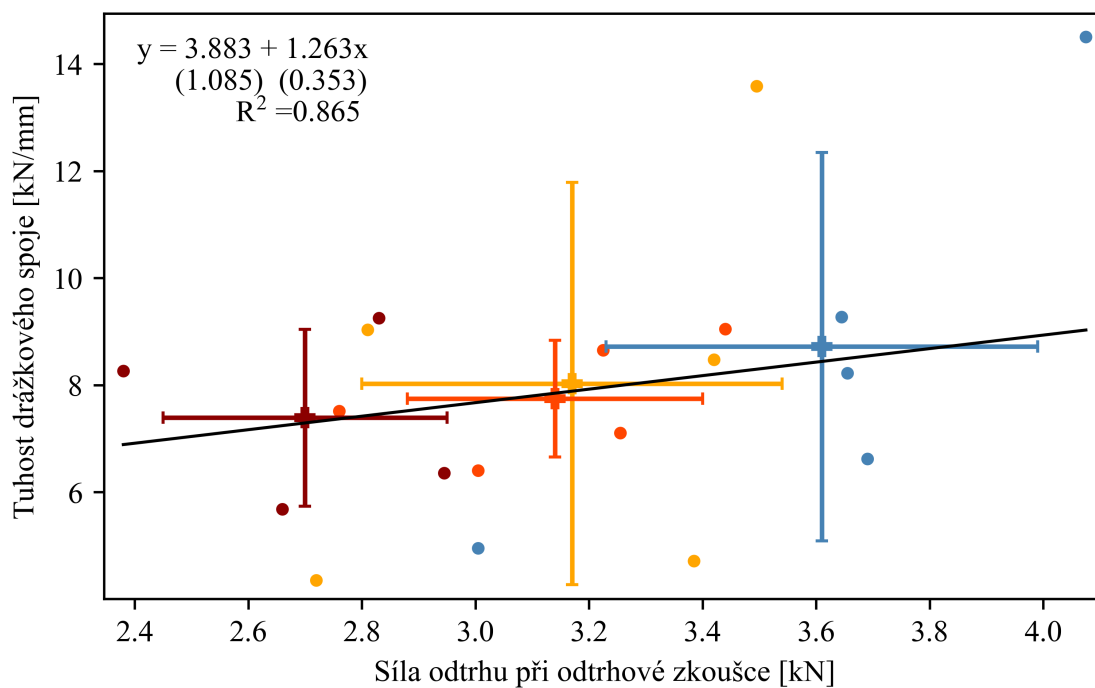
Obrázek A.1: Závislost tuhosti drážkového spoje na krychelné pevnosti v tlaku, hlavní prezentovaný výsledek korelace.



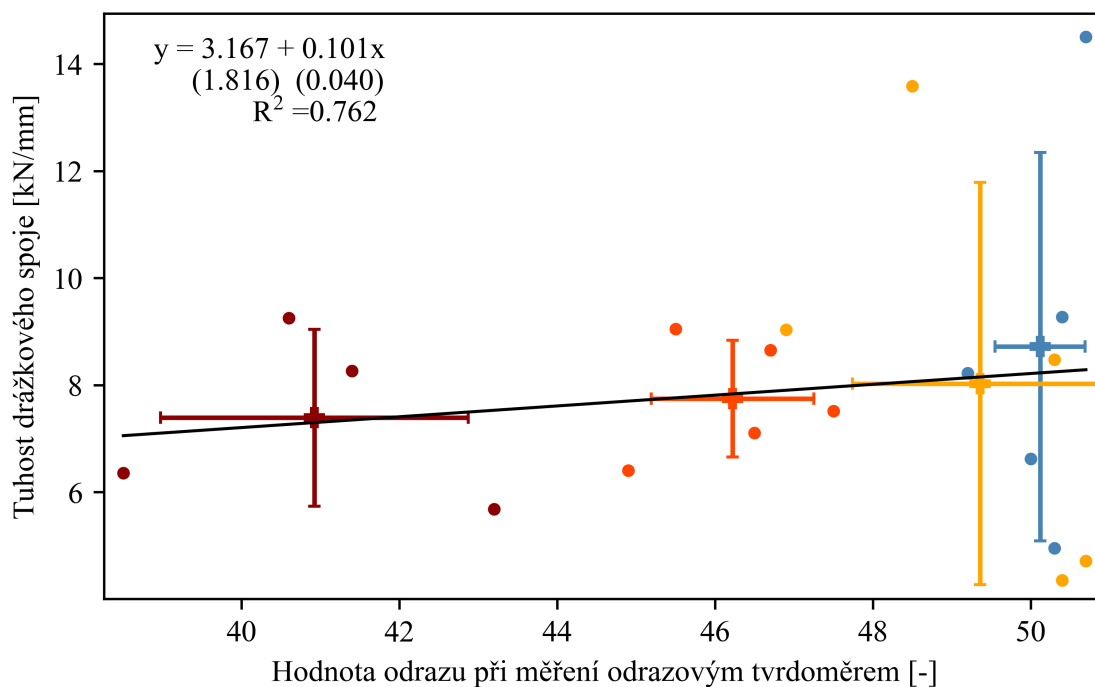
Obrázek A.2: Závislost tuhosti drážkového spoje na rychlosti šíření ultrazvukového pulzu, hlavní prezentovaný výsledek korelace.



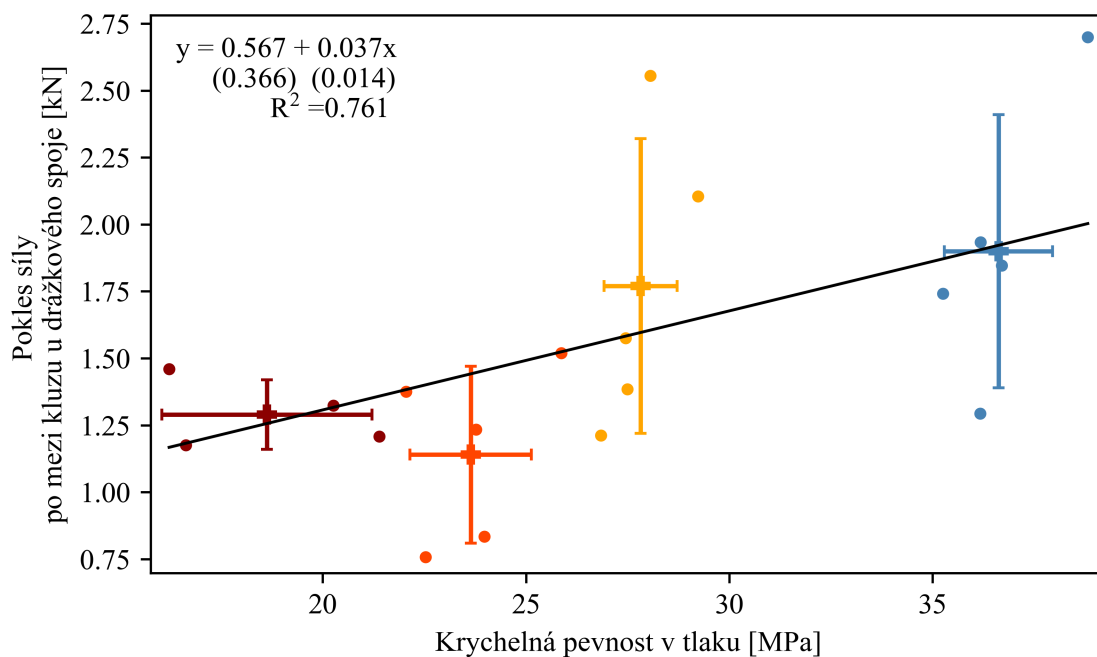
Obrázek A.3: Závislost tuhosti drážkového spoje na první vlastní podélné frekvenci měřené metodou Impact-Echo, hlavní prezentovaný výsledek korelace.



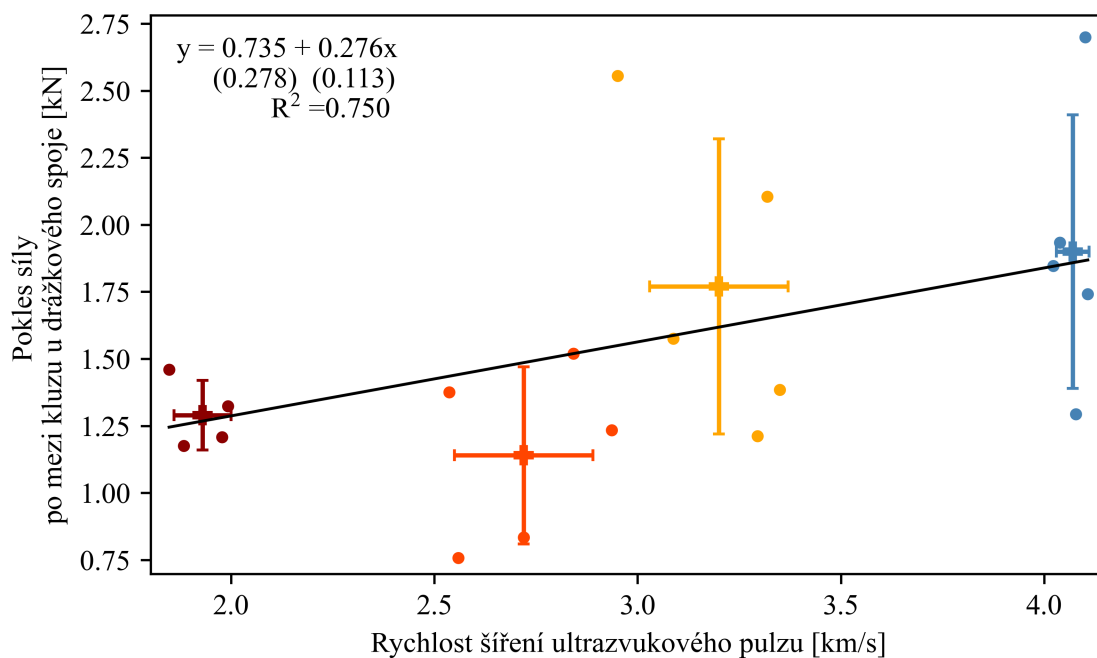
Obrázek A.4: Závislost tuhosti drážkového spoje na síle odtrhu při odtrhové zkoušce.



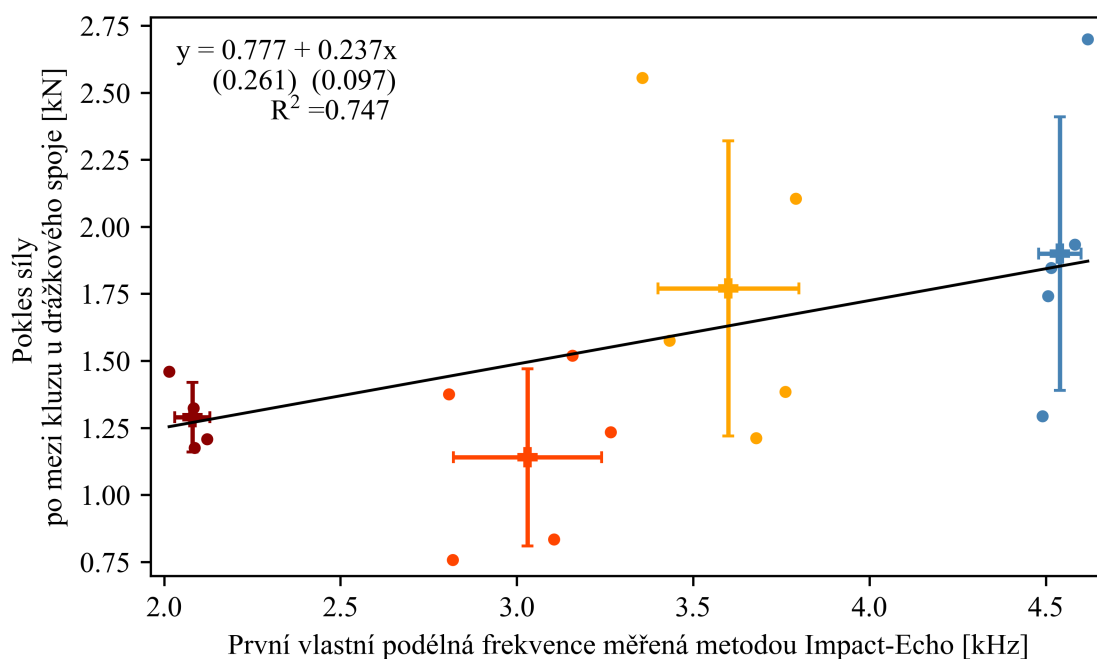
Obrázek A.5: Závislost tuhosti drážkového spoje na hodnotě odrazu při měření odrazovým tvrdoměrem.



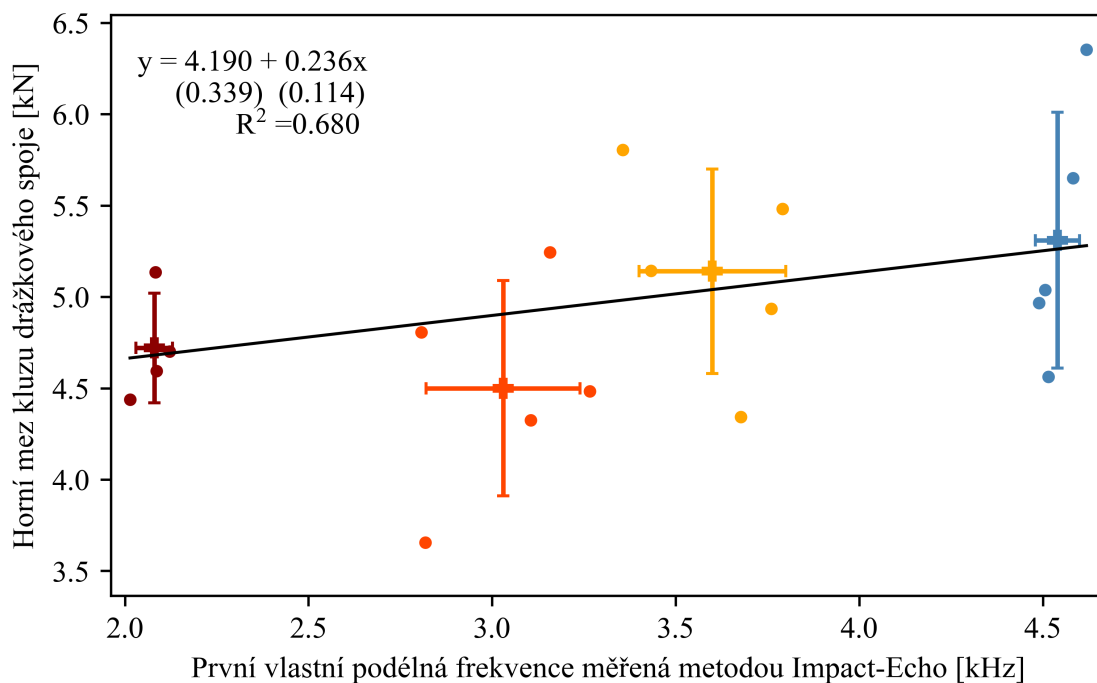
Obrázek A.6: Závislost poklesu síly po mezi kluzu u drážkového spoje na krychelné pevnosti v tlaku.



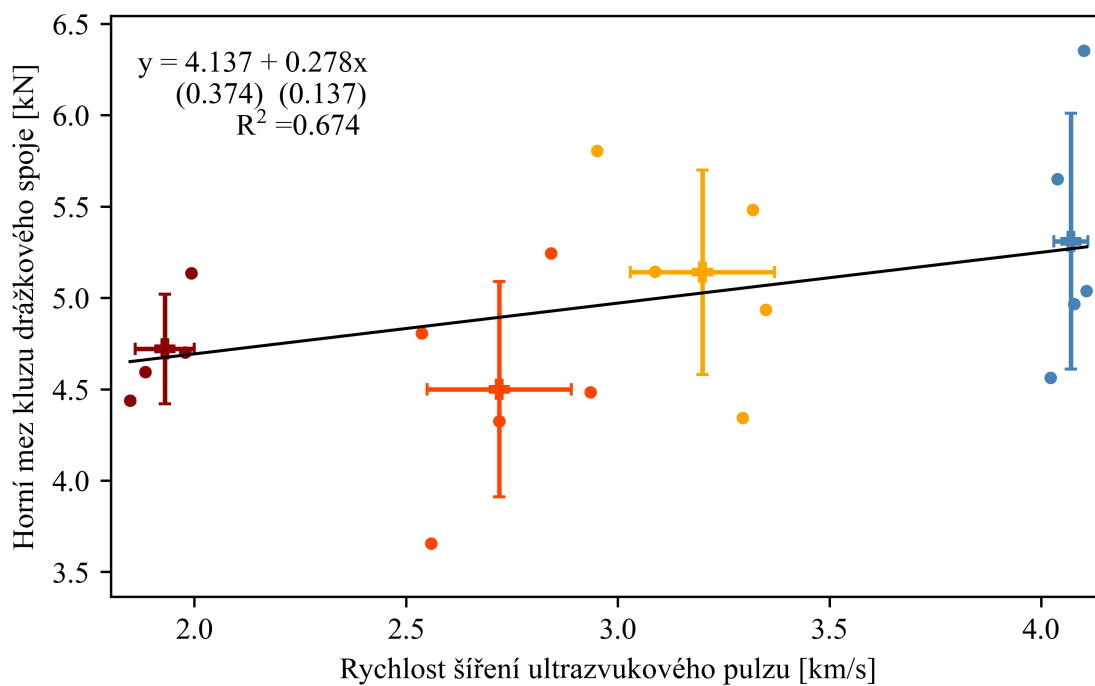
Obrázek A.7: Závislost poklesu síly po mezi kluzu u drážkového spoje na rychlosti šíření ultrazvukového pulzu.



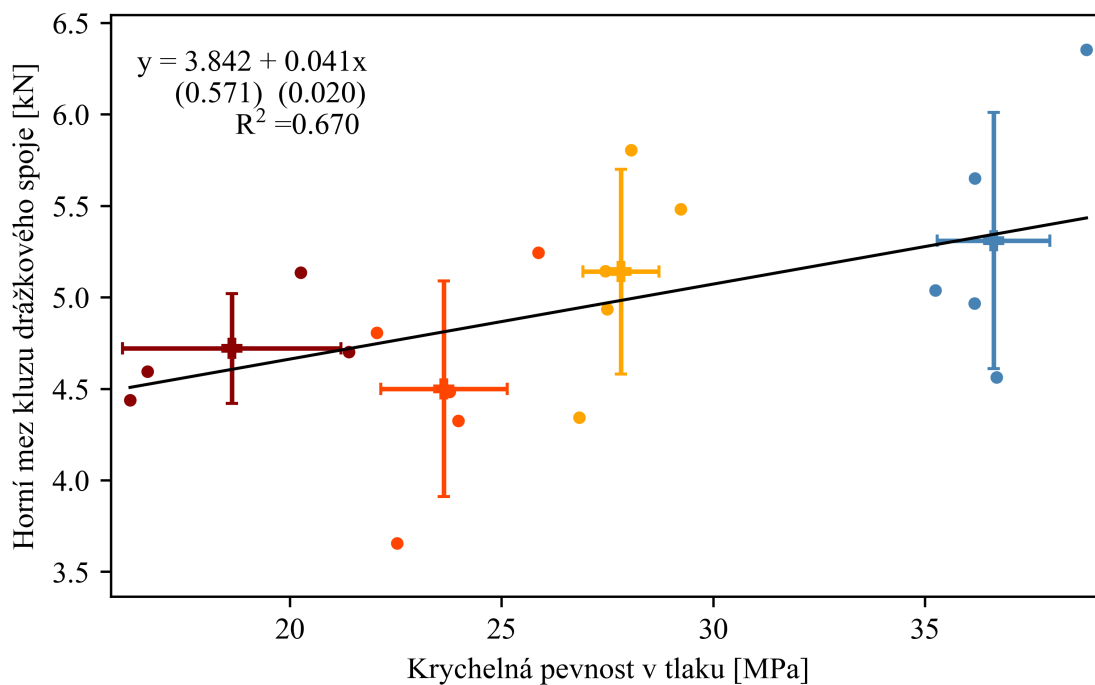
Obrázek A.8: Závislost poklesu síly po mezi kluzu u drážkového spoje na první vlastní podélné frekvenci měřené metodou Impact-Echo.



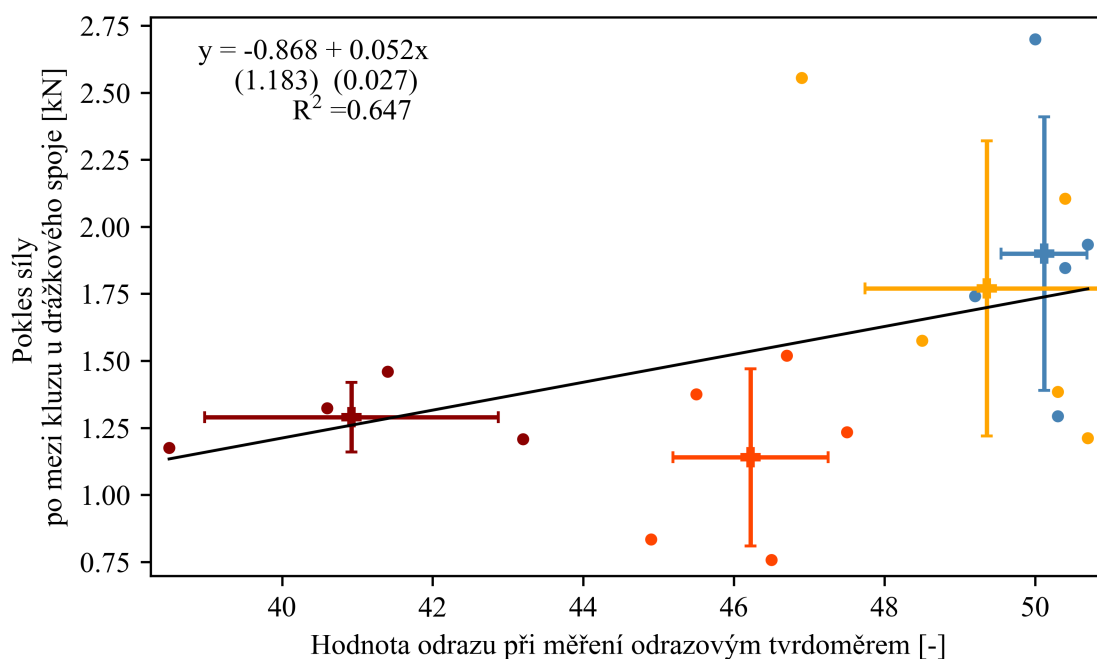
Obrázek A.9: Závislost horní meze kluzu drážkového spoje na první vlastní podélné frekvenci měřené metodou Impact-Echo.



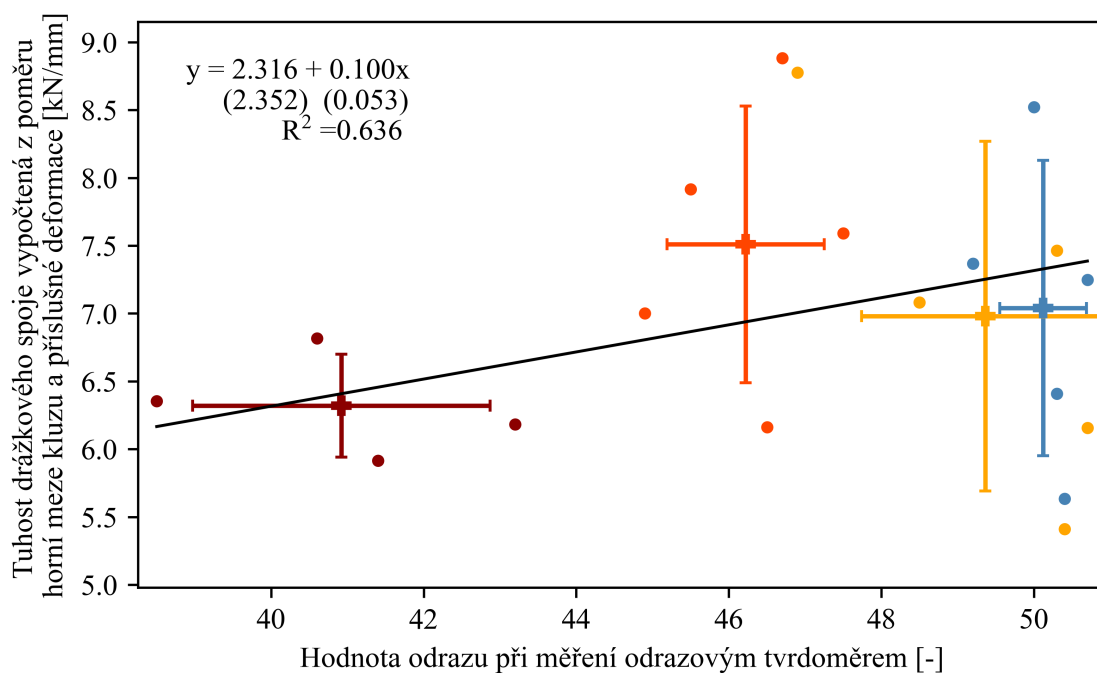
Obrázek A.10: Závislost horní meze kluzu drážkového spoje na rychlosti šíření ultrazvukového pulzu.



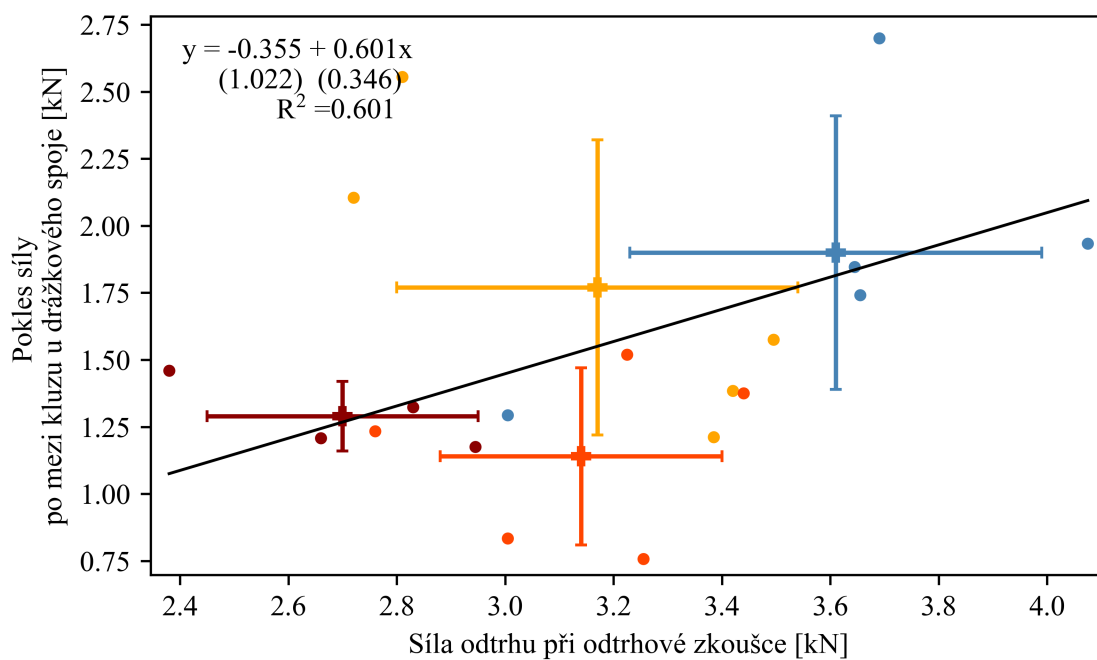
Obrázek A.11: Závislost horní meze kluzu drážkového spoje na krychelné pevnosti v tlaku.



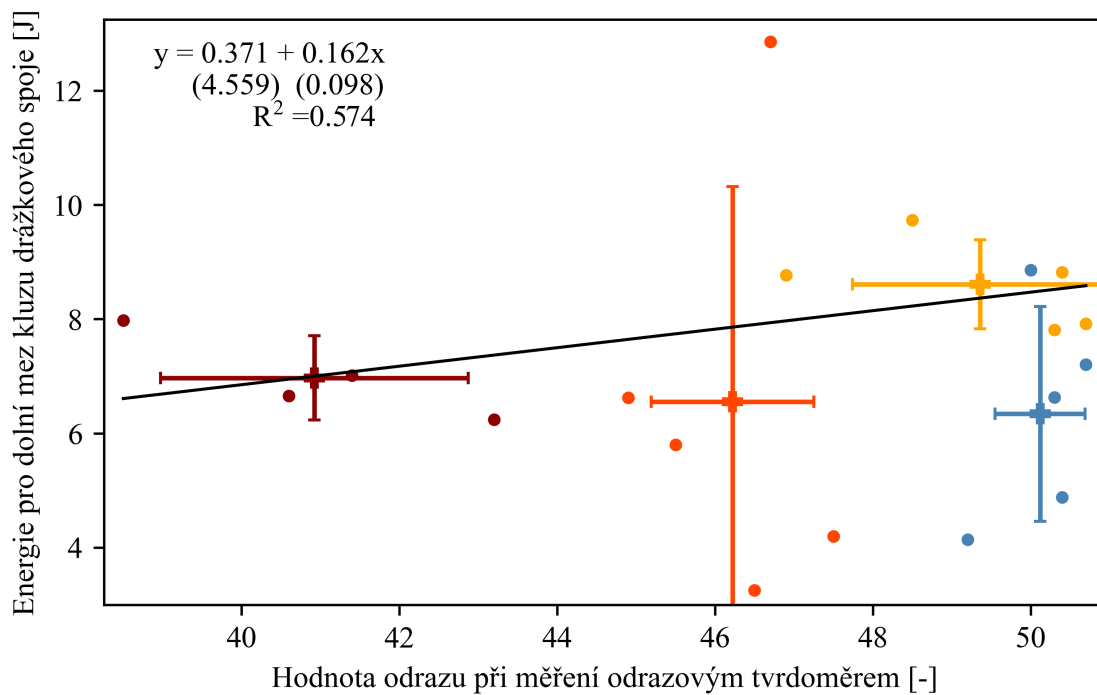
Obrázek A.12: Závislost poklesu síly po mezi kluzu u drážkového spoje na hodnotě odrazu při měření odrazovým tvrdoměrem.



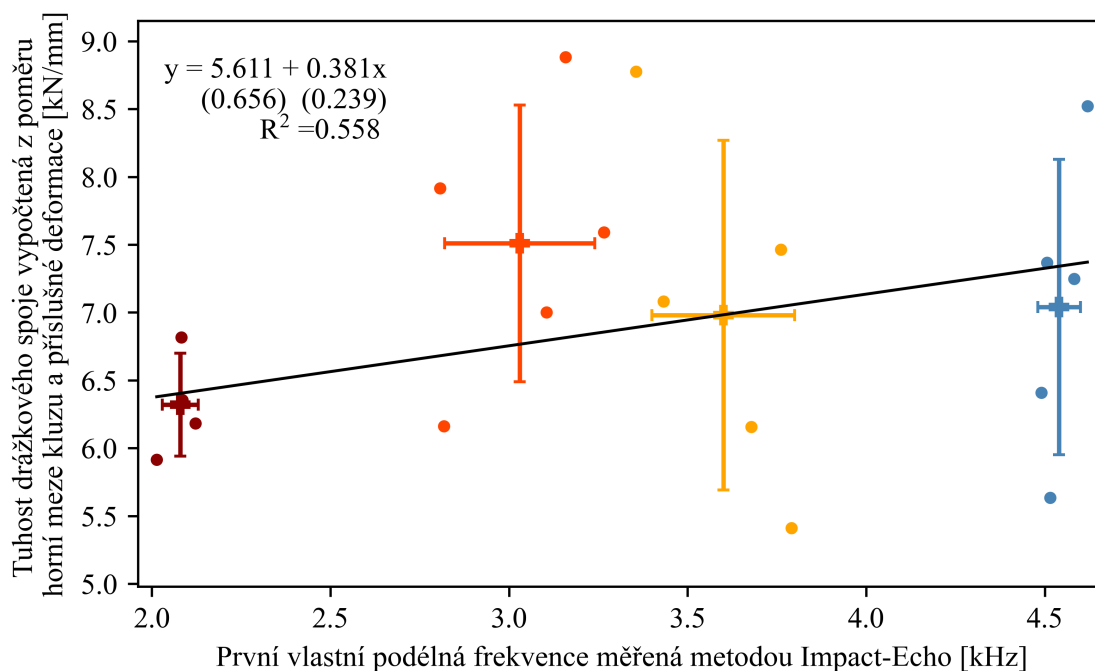
Obrázek A.13: Závislost tuhosti drážkového spoje vypočtené z poměru horní meze kluzu a příslušné deformace na hodnotě odrazu při měření odrazovým tvrdoměrem. Horní mez kluzu v tomto případě odpovídá hodnotě na deformaci, kde průměrný diagram sady dosahuje horní meze kluzu.



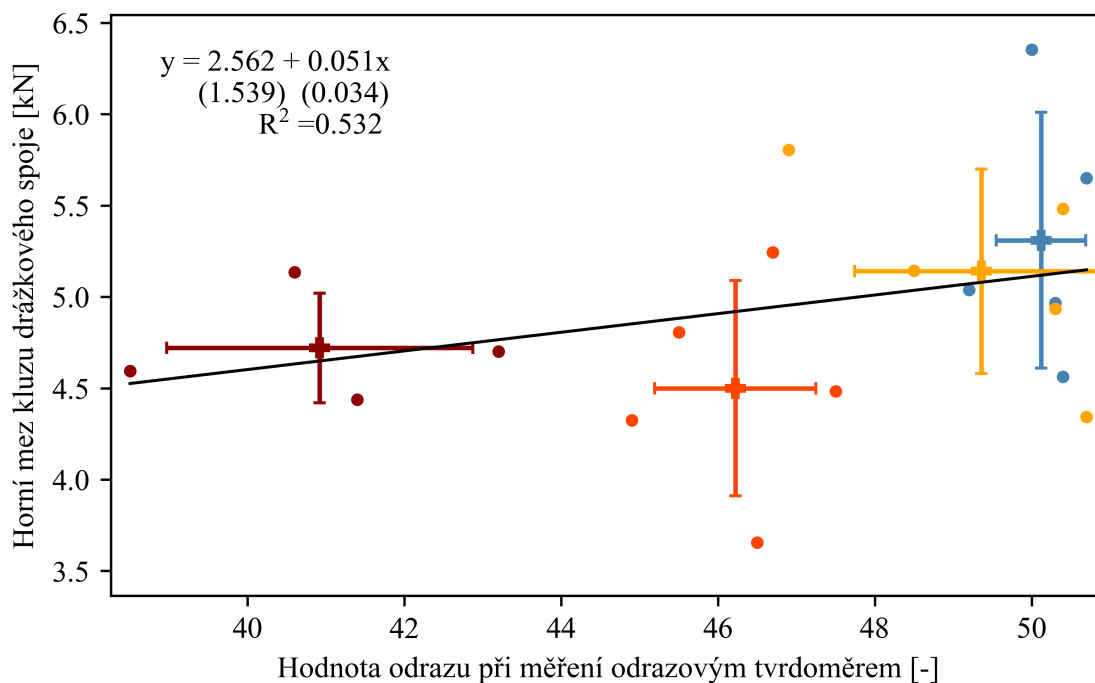
Obrázek A.14: Závislost poklesu síly po mezi kluzu u drážkového spoje na síle odtrhu při odtrhové zkoušce.



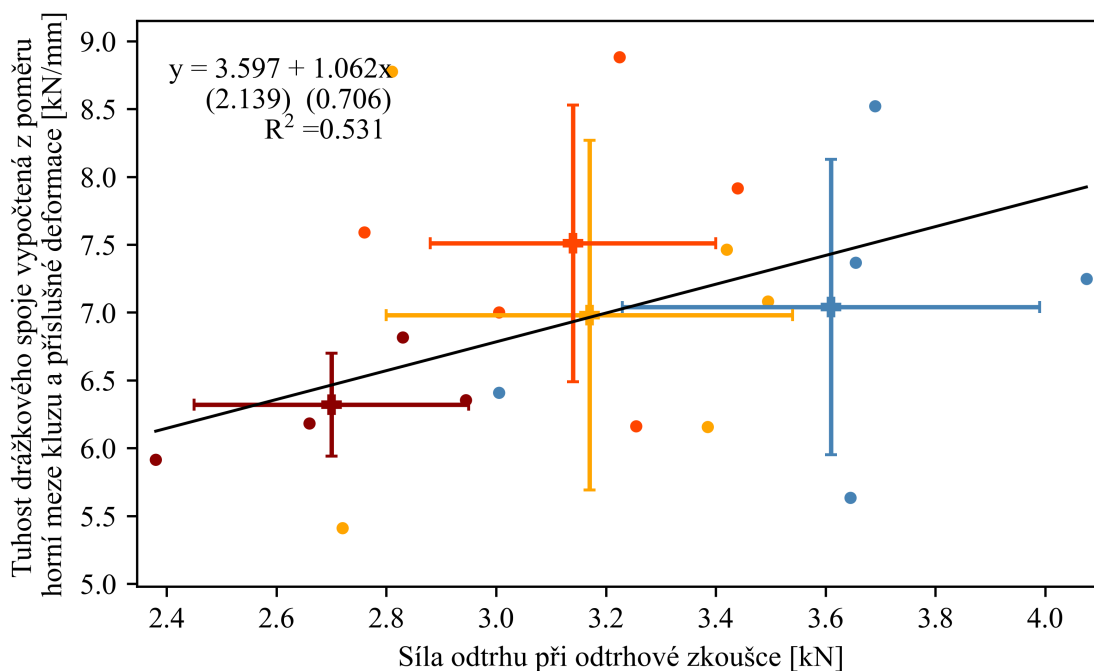
Obrázek A.15: Závislost energie pro dolní mez kluzu drážkového spoje na hodnotě odrazu při měření odrazovým tvrdoměrem.



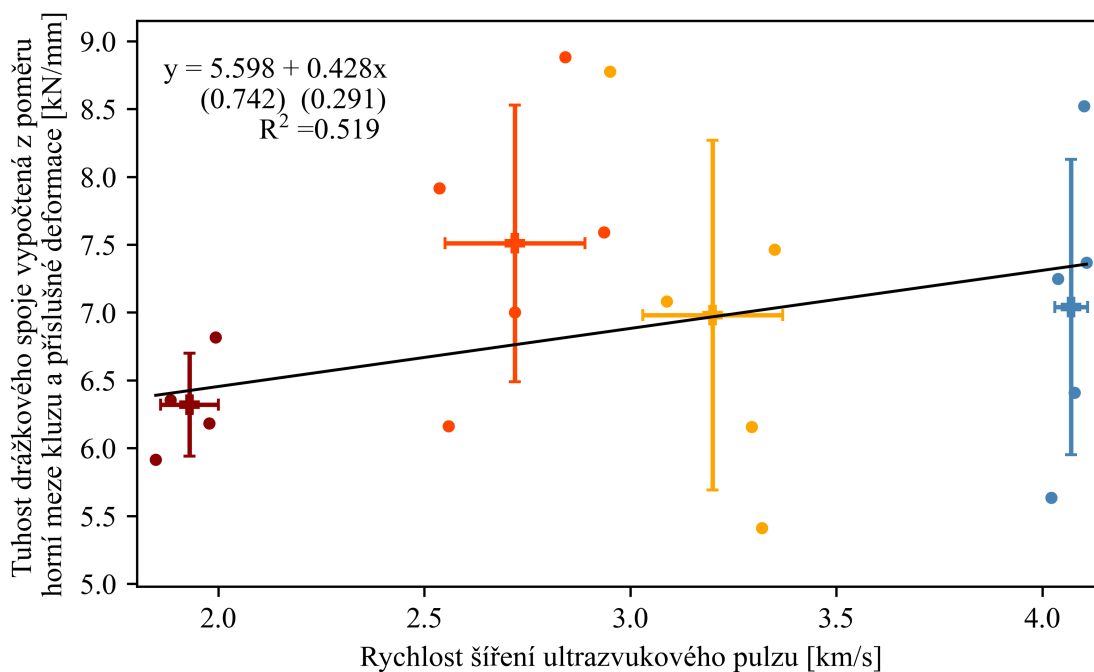
Obrázek A.16: Závislost tuhosti drážkového spoje vypočtené z poměru horní meze kluzu a příslušné deformace na první vlastní podélné frekvenci měřené metodou Impact-Echo. Horní mez kluzu v tomto případě odpovídá hodnotě na deformaci, kde průměrný diagram sady dosahuje horní meze kluzu.



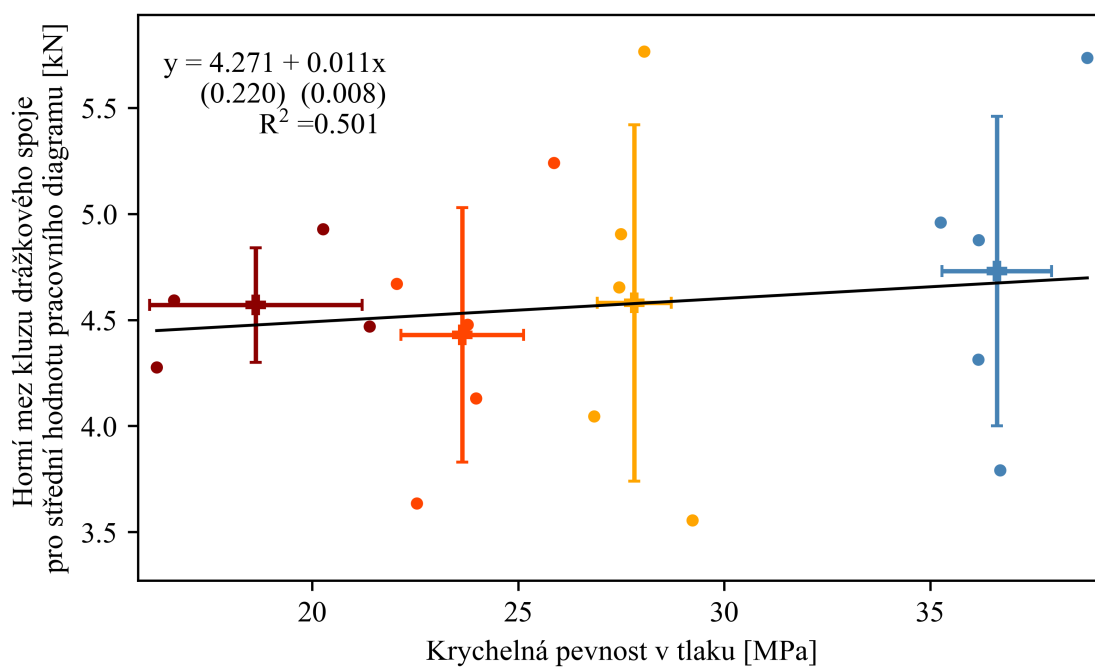
Obrázek A.17: Závislost horní meze kluzu drážkového spoje na hodnotě odrazu při měření odrazovým tvrdoměrem.



Obrázek A.18: Závislost tuhosti drážkového spoje vypočtené z poměru horní meze kluzu a příslušné deformace na síle odtrhu při odtrhové zkoušce. Horní mez kluzu v tomto případě odpovídá hodnotě na deformaci, kde průměrný diagram sady dosahuje horní meze kluzu.



Obrázek A.19: Závislost tuhosti drážkového spoje vypočtené z poměru horní meze kluzu a příslušné deformace na rychlosti šíření ultrazvukového pulzu. Horní mez kluzu v tomto případě odpovídá hodnotě na deformaci, kde průměrný diagram sady dosahuje horní meze kluzu.



Obrázek A.20: Závislost horní meze kluzu drážkového spoje pro střední hodnotu pracovního diagramu na krychelné pevnosti v tlaku.