

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 742

ISSN 1213-418X

Jan Barnat

**SOUDRŽNOST DODATEČNĚ OSAZOVANÝCH
CHEMICKÝCH KOTEV A KALIBRACE MODELŮ
PREDIKCE MEZNÍHO ZATÍŽENÍ**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV KOVOVÝCH A DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍ

Ing. Jan Barnat, Ph.D.

**SOUDRŽNOST DODATEČNĚ OSAZOVANÝCH
CHEMICKÝCH KOTEV A KALIBRACE MODELŮ PREDIKCE
MEZNÍHO ZATÍŽENÍ**

BOND STRENGTH OF POST-INSTALLED CHEMICAL ANCHORS
AND CALIBRATION OF MODELS FOR THEIR LOAD BEARING
CAPACITY PREDICTION

TEZE HABILITAČNÍ PRÁCE



BRNO 2022

KLÍČOVÁ SLOVA

Chemická kotva, tahové namáhání, mezní napětí, predikce únosnosti, kontakt

KEYWORDS

Bonded anchor, tensile stress, bond stress, prediction of load bearing capacity, contact.

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veverí 95, Brno

© Jan Barnat, 2022

ISBN 978-80-214-6115-4

ISSN 1213-418X

OBSAH:

1	Úvod a cíle habilitační práce	5
2	Chemické kotva zatížená tahovou silou	6
2.1	Základní typy experimentů pro získání dat	6
2.2	Základní typy porušení tahem zatížené dodatečně osazované chemické kotvy	6
2.3	Vybrané modely predikce mezního zatížení	7
2.3.1	Soudržnost – mezní napětí na rozhraní materiálů	7
2.3.2	Model rovnoměrného rozložení napětí – omezená zkouška	7
2.3.3	Model porušení betonu metoda CCD (Concrete capacity design)	8
2.3.4	Modely kombinovaného porušení betonu a selhání soudržnosti	8
3	Experimentální ověřování kvality vybraných typů lepidel s využitím plniv	9
3.1	Modifikovaná omezená zkouška	9
3.1.1	Zkušební ocelový přípravek	10
3.2	Použití modifikované omezené zkoušky ve vývoji lepidel pro dodatečně osazované chemické kotvy	11
3.3	Testování mezního napětí na kontaktu ocel-lepidlo	12
3.3.1	Vybrané základní receptury lepidel	12
3.3.2	Testování plniv	13
3.3.3	Test vybrané receptury omezenou a modifikovanou omezenou zkouškou	18
3.3.4	Test vybrané receptury při aplikaci v nízké teplotě	20
3.3.5	Test vybrané receptury při dlouhodobém zatížení	21
4	Kalibrace modelů predikujících mezní tahové zatížení	23
4.1	Metriky použité pro hodnocení modelů predikce mezního tahového zatížení	23
4.2	Kalibrace parametrů vybraných modelů predikce mezní tahové síly	25
4.2.1	Primární modely a směr kalibrace	25
4.2.2	Nástroje kalibrace	26
4.3	Srovnání modelů s databází experimentálních dat – provedené kalibrace	29
4.3.1	Kalibrace modelu 1 pro přiléhavost k experimentálním výsledkům	29
4.3.2	Kalibrace modelu 2 pro přiléhavost ke kalibrovanému modelu 1	32
4.3.3	Kalibrace modelu 2 pro přiléhavost k experimentálním výsledkům	34
5	Shrnutí a Závěr	37
5.1	Kontaktní materiály – metodika zkoušení, ověřování vlivu plniv	37
5.2	Kalibrace vybraných modelů predikce mezní tahové síly	38
6	Bibliografie	40

PŘEDSTAVENÍ AUTORA



Ing. Jan Barnat, Ph.D.

narozen: 9. 5. 1981 v Ústí nad Orlicí

bydliště: Měříčkova 1448/52, Brno Řečkovice a Mokrá Hora, 621 00

ženatý, 2 děti

Vzdělání, pedagogické a vědecké hodnosti:

- 1996–1999 SPŠ stavební Letohrad
- 1999–2004 Fakulta stavební VUT v Brně; obor Konstrukce a dopravní stavby
- 2010 Ph.D., obor Konstrukce a dopravní stavby

Zaměstnání, pracovní zařazení a funkce:

- 2005 - dosud asistent, vědecko-výzkumný pracovník, odborný asistent na Ústavu kovových a dřevěných konstrukcí

Další odborná praxe:

- 2009 - dosud OSVČ Konstrukční činnost ve výstavbě

Odborné zaměření:

Navrhování a posuzování dřevěných a kovových konstrukcí, Kotevní styčníky

1 ÚVOD A CÍLE HABILITAČNÍ PRÁCE

Problematika navrhování dodatečně osazovaných chemických kotev do betonu prošla za poslední dvě desetiletí poměrně značným vývojem. Završením tohoto bylo uvedení poměrně komplexních normativních dokumentů (EN 1994-2 a ACI 318-19 [1,2]), které společně s navázanými dokumenty danou problematiku řeší v relativně širokém rozsahu. Přesto lze v této problematice nalézt řadu dalších oblastí, které lze nadále analyzovat a studovat, a tím přispět k získání nových poznatků o skutečném chování tohoto kotevního styčnicku, případně k upřesnění stávajících poznatků.

Habilitační práce se v dané oblasti věnuje dvěma souvisejícím tématům. Experimentální část je zaměřena na hodnotu mezního napětí na kontaktu zprostředkovaného lepidlem. Jde o jeden z hlavních parametrů, který je nezbytný pro popis odolnosti kotvy při tahovém namáhání. Vzhledem k tomu, že v případě typické dodatečně osazované chemické kotvy instalované do betonu se na výsledné odolnosti proti tahovému zatížení podílejí tři materiály, je logickým krokem ke zvýšení odolnosti použití všech těchto materiálů s vyššími hodnotami pevnostních charakteristik. Při použití betonu s pevností v tlaku nad 60 MPa a oceli s pevností v tahu nad 800 MPa může být při běžné geometrické konfiguraci právě zvolený kotevní materiál – lepidlo tím materiálem, který je z tohoto pohledu limitující.

Cílem této části práce bylo sledování možností zvýšení pevnostních charakteristik lepidla nejen vhodnou volbou typu lepidla v různých modifikacích, ale zejména použití různých typů plniv, které by tyto charakteristiky mohly pozitivně ovlivnit. V přípravě vzorků byla použita jako plniva např. odpadní uhlíková vlákna, grafen, či nano trubice. Při vývoji tohoto lepidla byl také kladen důraz na to, aby bylo schopné reakce i v nízkých teplotách blízkých 0 °C. Při realizaci experimentů byla použita modifikovaná metoda zkoušení, zajišťující vyšší rychlost a efektivitu zkoušení použitím ocelového základního tělesa namísto betonového.

Druhá část této práce si klade za cíl porovnat a zhodnotit vybrané publikované modely predikce mezního tahového zatížení pro dodatečně osazovanou chemickou kotvu. K porovnání popsaných modelů byla sestavena rozsáhlá databáze výsledků experimentů od různých autorů, která obsahuje výsledky jak omezených, tak neomezených zkoušek pro kotvy různých průměrů a kotevních délek instalovaných pomocí širokého spektra lepidel do betonu různých pevností. Celkově databáze obsahuje 1720 výsledků testů. Součástí této databáze jsou také již dříve publikované výsledky vlastních experimentů autora. Pro vlastní hodnocení modelů bylo použito několik možných kritérií statistického vyhodnocení. Hodnocena byla zejména přiléhavost funkcí modelů predikce k experimentálním výsledkům.

Dále byly vybrané modely podrobeny hlubší analýze spočívající v kalibraci modelů. Kalibrace spočívala v hledání nevhodnějších hodnot jednotlivých vstupních parametrů pro minimalizaci sledovaných zvolených hodnotících kritérií. Pro nalezení těchto modifikovaných koeficientů byla využita metoda využívající prvky genetických algoritmů. Ta je v tomto kontextu vhodná pro kalibraci modelů s větším množstvím modifikovatelných parametrů.

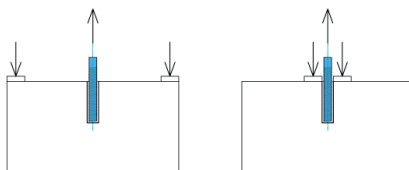
Mezi další cíle práce spadá představení modifikovaného modelu predikce mezní tahové síly publikovaného autorem této práce. Modely, které jsou v současné době nejvíce používané a jsou implementovány v normativních dokumentech jsou postaveny na predikci mezní tahové síly pro oddělené typy poruch kotvy v oblasti betonu. Prezentovaný model popisuje kombinovanou poruchu selhání betonu a lepidla. S využitím stejných vstupních dat tak nahrazuje více vztahů pro více poruch jedním. V rámci kalibrace s využitím uvedené databáze experimentálních výsledků také dosahuje lepší přiléhavosti hodnocené zvolenými kritérii.

2 CHEMICKÁ KOTVA ZATÍŽENÁ TAHOVOU SILOU

Základním reprezentativním a obecně charakteristickým případem dodatečně osazované chemické kotvy je ocelový šroub ve formě závitové tyče, vlepený pomocí průmyslového lepidla do předem vyvrtaného otvoru v betonu. Ocelový šroub je potom namáhán statickou osovou tahovou silou. Takové zatížení je do betonu přenášeno prostřednictvím vrstvy vytvrzeného lepidla.

2.1 ZÁKLADNÍ TYPY EXPERIMENTŮ PRO ZÍSKÁNÍ DAT

S popisem skutečného působení výše popsané typické kotvy se započalo v první polovině sedmdesátých let dvacátého století. Návrh takového kotvení je v podstatě od počátku použití tohoto systému založen na využití výsledků experimentů provedených na jednotlivých konkrétních kotvách vyráběných různými výrobci. Pro ověření únosnosti kotev v tahu se používají dvě základní konfigurace experimentu dle Obr. 2-1 [3]:



Obr. 2-1 Princip neomezené zkoušky (vlevo), princip omezené zkoušky (vpravo)

Při neomezené zkoušce jsou reakce zatěžovacího systému nasměrovány v dostatečné vzdálenosti od zkoušené kotvy. Namáhaná zóna kolem kotevního šroubu není těmito silami ovlivněna a v závislosti na podmínkách působení se může rozvinout jakákoli možná porucha kotevního systému. Zejména je umožněna tvorba tahových trhlin v betonu vedoucí k charakteristické poruše ve formě vytržení kužele betonu.

Při omezené zkoušce jsou reakce zatěžovacího systému svedeny do bezprostřední blízkosti kotevního šroubu. Tím je zamezeno vytvoření betonového kužele a rozvinout se mohou pouze poruchy související přímo s kotevním šroubem či lepidlem, případně poruchy na rozhraní materiálů.

Data získaná výše uvedenými základními experimenty vedly k prvotním poznatkům o únosnosti, typech porušení a jejich tvarech. Dále pak průběžně slouží k verifikaci a validaci vytvořených modelů predikujících únosnost kotvy pro dané typy porušení.

2.2 ZÁKLADNÍ TYPY PORUŠENÍ TAHEM ZATÍŽENÉ DODATEČNĚ OSAZOVANÉ CHEMICKÉ KOTVY

Pro dodatečně osazované lepené kotvy zatížené osovou tahovou silou lze v literatuře nejčastěji nalézt rozlišení mezi pěti základními typy poruch [4-9]:

a) Porucha kotevního šroubu při dosažení mezní únosnosti materiálu šroubu v tahu. Nastává při takové geometrické a materiálové konfiguraci kotvy, ve které je ocel nejslabším článkem. Typická porucha pro velkou kotevní hloubku v poměru k průměru kotevního šroubu. V tom případě je namáhaná zóna betonu i pevnost kontaktů vyšší než mezní únosnost kotevního šroubu.

b) Porušení na rozhraní mezi lepidlem a betonem. Nastává při takové geometrické a materiálové konfiguraci kotvy, ve které je spojení na kontaktu mezi lepidlem a betonem nejslabším článkem. Příčinou této poruchy může být různá kombinace podmínek působení. Např. může nastat při špatně zvolené technologii vrtání otvoru, při nedostatečném čištění otvoru. Jde také o typickou poruchu v případech použití lepidla s nízkou pevností.

c) Porušení na rozhraní mezi lepidlem a ocelovým šroubem. Nastává při takové geometrické a materiálové konfiguraci kotvy, ve které je spojení na kontaktu mezi lepidlem a ocelovým šroubem nejslabším článkem. Může nastat při použití šroubu s nevhodnou geometrickou úpravou, či znečištěným povrchem.

d) Porušení lepidla při namáhání tahem v kombinaci se selháním na rozhraních. Nastává při takové geometrické a materiálové konfiguraci kotvy, při níž je limitujícím faktorem tahová pevnost lepidla. Nejčastěji v souvislosti s nerovnoměrnou aplikací lepicí hmoty.

e) Porušení betonu. Nastává při takové geometrické a materiálové konfiguraci kotvy, při níž je beton nejslabším článkem. Typická porucha pro malé kotevní délky v poměru k průměru kotevního šroubu, a také pro kotvy instalované v betonu s nízkou pevností.

2.3 VYBRANÉ MODELÝ PREDIKCE MEZNÍHO ZATÍŽENÍ

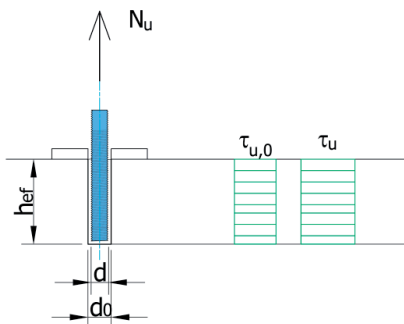
2.3.1 Soudržnost – mezní napětí na rozhraní materiálů

Pro možnost hodnocení kvality spojení kotevního šroubu s betonem (zprostředkovaného lepidlem) byl zaveden náhradní parametr vycházející z omezené zkoušky kotvy tahem. Jde o hodnotu smykového napětí na vybraném kontaktu odvozeného z geometrie kotvy a mezního tahového zatížení kotvy [10-17]. Tento parametr je označen jako soudržnost kotvy. Může být obecně stanoven pro rozhraní mezi lepidlem a betonem nebo mezi lepidlem a kotevním šroubem (2.1).

$$\tau_u = \frac{N_u}{\pi \cdot d \cdot h_{ef}} \quad (2.1)$$

2.3.2 Model rovnoměrného rozložení napětí – omezená zkouška

Vztah (2.1) vychází ze zjednodušeného předpokladu rovnoměrného rozdělení napětí na kontaktu při omezené zkoušce (Obr. 2-2). Mezní tahové zatížení kotvy je za tohoto předpokladu definováno efektivní kotevní délkou, průměrem vrtaného otvoru či kotevního šroubu a rovnoměrným mezním smykovým napětím na ploše příslušného kontaktu (2.2).



Obr. 2-2 Předpoklad rovnoměrného rozložení napětí na kontaktech

$$N_u = \pi \cdot d \cdot h_{ef} \cdot \tau_u \quad (2.2)$$

2.3.3 Model porušení betonu metoda CCD (Concrete capacity design)

Nejvýznamnější doposud publikovaná metoda predikce mezní tahové síly pro dodatečně osazované kotvy je metoda CCD – Concrete capacity design [8,18-20]. Tato metoda je ve své podstatě vhodná jak pro dodatečně osazované mechanické kotvy, tak pro dodatečně osazované chemické kotvy s hlavou i bez hlavy. Mezní tahové zatížení je v tomto případě definováno na základě kotevní hloubky a pevnosti betonu (2.3). Jde tedy o mezní tahové zatížení kotvy pro poruchu typu e), ve které dominuje vytvoření betonového kužele. Výsledná predikce tedy v tomto případě zcela ignoruje vliv lepidla a jím zprostředkované spojení na rozhraní materiálů.

$$N_u = k \cdot h_{ef}^{1,5} \cdot \sqrt{f_c} \quad (2.3)$$

Koeficient k ve vztahu (2.3) se mění v závislosti na geometrických a materiálových podmínkách pro konkrétní kotvy. Jeho hodnota v závislosti na těchto podmínkách se dle současných normativních dokumentů pohybuje v rozmezí $k=7$ až $15,5$.

2.3.4 Modely kombinovaného porušení betonu a selhání soudržnosti

Ve snaze přesněji popsat výše uvedené kombinované poruchy b), c), d) a e), byly vytvořeny modely predikce mezní tahové síly, kombinující odolnost betonu a soudržnost zprostředkovanou lepidlem [8,21-23]. Modely vychází z porušení betonu ve formě vytvoření kužele omezené výšky v kombinaci s porušením na rozhraní mezi lepidlem a betonem (případně mezi lepidlem a ocelovým šroubem) na zbývající části kotevní délky (2.4) a (2.5).

$$N_u = N_{u,cone} + N_{u,bond} \quad (2.4)$$

$$N_u = 0,92 \cdot h_{ef}^2 \cdot \sqrt{f_c} + \pi \cdot d_0 \cdot (h_{ef} - h_{cone}) \cdot \tau_{u,0} \quad (2.5)$$

Součástí habilitační práce je navržená modifikace modelu již dříve publikovaného autorem [24-26]. Tento model vychází z aproximace výsledků experimentálních dat a numerických modelů a popisuje mezní tahové zatížení dodatečně osazované kotvy s použitím jedné exponenciální funkce, která zahrnuje vliv pevnosti betonu i mezní hodnotu soudržnosti na kontaktu (2.6).

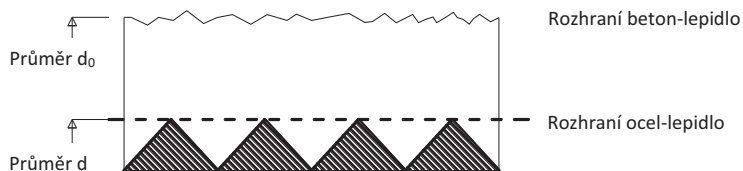
$$N_u = a \cdot \pi \cdot \tau_u \left(1 - e^{-b \cdot \frac{f_c}{\tau_u}} \right) \cdot d \cdot (h_{ef} - c \cdot d) \quad (2.6)$$

Uvedený model pracuje s limitní hodnotou mezní tahové síly dané soudržností kontaktu na rozhraní materiálů za předpokladu rovnoměrného rozložení napětí na redukované kotevní délce. Redukovaná kotevní délka je závislá na průměru kotevního šroubu. Tato hodnota je pak exponenciálně redukována v závislosti na pevnosti betonu v tlaku. Výsledný model predikce je tedy dán jednou spojitou funkcí. Parametry a , b , c byly stanoveny dle experimentů jako ($a=0,74$; $b=1,5$; $c=1,4$). Pro modely predikující mezní tahové zatížení při kombinované poruše betonu a selhání soudržnosti je kvalita lepidla, určující mezní smykové napětí na rozhraní materiálů, klíčovým parametrem.

3 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘOVÁNÍ KVALITY VYBRANÝCH TYPŮ LEPIDEL S VYUŽITÍM PLNIV

3.1 MODIFIKOVANÁ OMEZENÁ ZKOUŠKA

Vzhledem k tomu, že v mnoha případech je třeba ověřit mechanické vlastnosti vyvinutého kontaktního materiálu s co nejmenšími náklady a časovými požadavky, není vždy efektivní použít výše uvedené metodiky zkoušení, které jsou závislé na přípravě betonových těles. Příkladem vhodnosti popsané metodiky může být výzkum v oblasti použití betonu s pevností v tlaku větší jak 60 MPa současně s kotevním šroubem z oceli pevnosti větší jak 800 MPa při požadavku zachování co nejmenších kotevních délek. Na Obr. 3-1 je vyobrazen zvětšený výsek vrstvy lepidla v případě použití kotvy v betonovém tělese. Na rozhraní mezi lepidlem a betonem, které je geometricky dáno průměrem vrtaného otvoru vzniká vzhledem k větší ploše menší hodnota smykového napětí než na rozhraní mezi lepidlem a ocelovým šroubem, které je geometricky definováno průměrem kotevního šroubu d . Vzhledem k řádově vyšším hodnotám pevnostních charakteristik oceli, z které je vyroben kotevní šroub, nelze předpokládat, že by materiál kotevního šroubu přímo ovlivňoval poruchu na rozhraní mezi ocelí a betonem. Porucha na tomto rozhraní je majoritně ovlivněna materiálovými charakteristikami lepidla.



Obr. 3-1 Idealizovaný tvar rozhraní mezi jednotlivými materiály

Na rozhraní mezi lepidlem a betonem je situace jiná. Porucha tohoto rozhraní může být ovlivněna materiálovými charakteristikami betonu, přičemž jejich vliv na výslednou poruchu výrazně stoupá při použití betonu nižší pevnosti. V případě použití betonu s vysokou pevností se při omezené zkoušce pravděpodobnost vzniku poruchy na rozhraní mezi betonem a lepidlem výrazně snižuje. V takovém případě je časově i ekonomicky neefektivní ověřovat mechanické vlastnosti vyvinutého kontaktního materiálu v betonových tělesech.

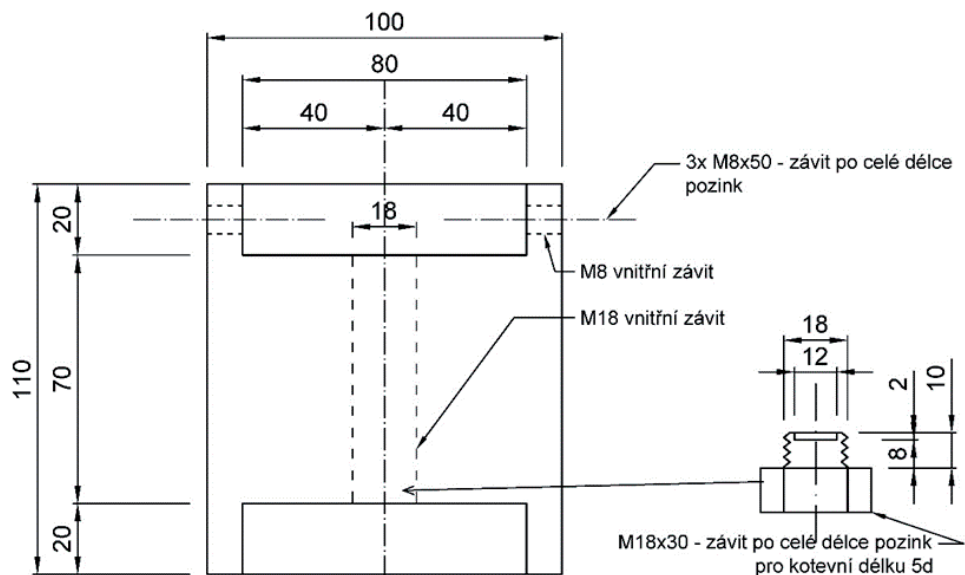
Obdobně neefektivní je ověřovat tyto vlastnosti v betonových tělesech při prvotní fázi vývoje kontaktního materiálu pro některá speciální použití, např. pro kotvení při nízkých teplotách. V situaci, kdy je sledovaným faktorem zejména proces vytvrzování, je vliv pevnosti betonu druhořadý.

Pro realizaci níže popsaných experimentů byla použita modifikovaná metodika omezené zkoušky s vyloučením efektu základního materiálu – betonu. Tato metodika nenahrazuje omezenou zkoušku a nelze ji použít jako plnohodnotnou metodiku ověření kvality spojení zprostředkované kontaktním materiálem. Použití této metodiky je ale vhodné při vývoji kontaktních materiálů pro hodnocení jejich obecné kvality pro případy, kdy je použití betonových zkušebních těles nevhodné, neefektivní, nebo jinak neopodstatněné.

Základním principem použité modifikované omezené zkoušky je využití opakovaně použitelného ocelového zkušebního přípravku, namísto betonového tělesa. Zkouška je vhodná pro obvyklé uspořádání chemických kotev, kde tloušťka vrstvy lepidla nepřesahuje rozmezí 1-2 mm.

3.1.1 Zkušební ocelový přípravek

Pro potřeby uvedené metodiky je navržen nový ocelový zkušební přípravek. Schéma přípravku je na Obr. 3-2. Tento přípravek může být vyroben z oceli běžné pevnosti. Navržený přípravek je určen pro zkoušení kotevních šroubů průměru M12. Přípravek je opatřen vnitřním závitem M18. Toto řešení zajišťuje rovnoměrnou vrstvu kotevního materiálu v tloušťce minimálně 1,3 mm (měřeno mezi vnějšími hranami závitů ocelového zkušebního přípravku a závitu kotevního šroubu). Přičemž tloušťka této vrstvy se mění v závislosti na změně geometrie obou závitů. Vzhledem k materiálovým vlastnostem oceli lze předpokládat, že při testu porucha nastane vždy ve vrstvě kotevního materiálu, a to obvykle na kontaktu s vnější hranou závitu kotevního šroubu.

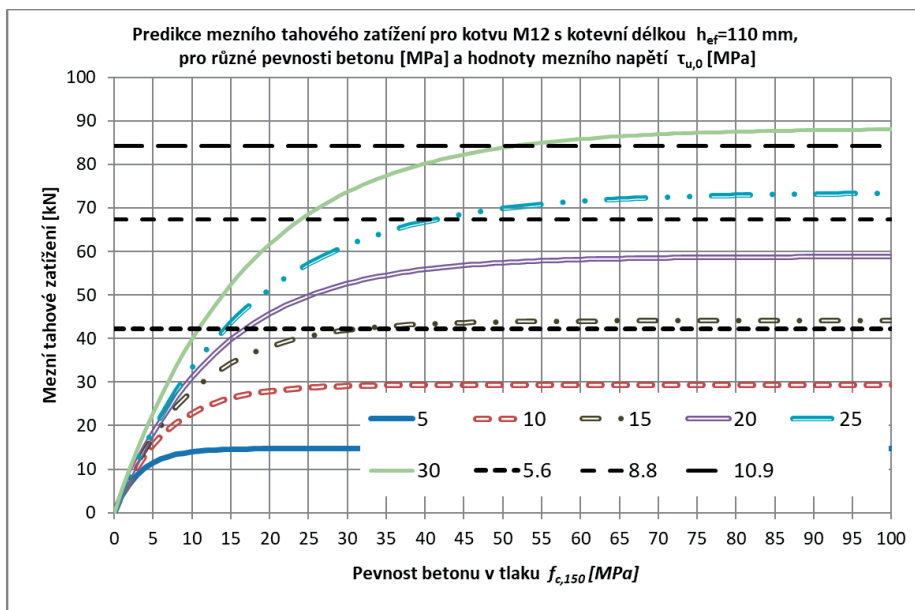


Obr. 3-2 Ocelový zkušební přípravek pro modifikovanou omezenou zkoušku

Těleso ocelového zkušebního přípravku je rotačně symetrické a je také symetrické vůči vodorovné rovině procházející polovinou výšky přípravku. Na obou koncích jsou vytvořeny prohlubně v hloubce 20 mm, které slouží jednak pro rozliti přebytečného množství kotevního materiálu, a zároveň slouží jako kapsa pro schování uzavíracího šroubu, která tak umožňuje vznik rovné dosedací plochy přípravku.

3.2 POUŽITÍ MODIFIKOVANÉ OMEZENÉ ZKOUŠKY VE VÝVOJI LEPIDEL PRO DODATEČNĚ OSAZOVANÉ CHEMICKÉ KOTVY

Motivací pro další vývoj kotevních materiálů, které budou schopny zprostředkovat vysoce pevné spojení mezi kotevním šroubem a betonem, lze demonstrovat za pomoci grafu na Obr. 3-3. Tento graf znázorňuje predikovanou hodnotu mezního tahového zatížení dle vztahu (2.6) pro typickou kotvu průměru M12 s kotevní délkou 110 mm. Jde tedy o typickou kotvu s kotevní délkou rovnou přibližně 9 d. U takovéto geometrické konfigurace kotvy lze použít předpoklad rovnoměrného rozložení smykového napětí po délce kotvy [27-29]. Data jsou vynesena v závislosti na krychelné pevnosti betonu. V grafu je několik křivek predikce, které se liší vstupní hodnotou rovnoměrného mezního napětí na rozhraní mezi lepidlem a betonem. Dále jsou v grafu vyznačeny tři limity mezního tahového zatížení, které odpovídají tahovému porušení oceli kotevního šroubu, a to pro kotevní šroub třídy 5.6, 8.8 a 10.9.



Obr. 3-3 Predikce mezního tahového zatížení kotvy v závislosti na vstupních parametrech dle vztahu (2.6)

Výsledky pro uvedené geometrické a materiálové parametry dobře ukazují možnou efektivitu využití jednotlivých zastoupených materiálů. Při uvážení stejné geometrické konfigurace pro beton s pevností v tlaku do cca 50 MPa je pro stejnou efektivitu využití zastoupených materiálů nutné použít kotevní šroub minimálně třídy 8.8 a takové lepidlo, které bude na daném rozhraní dosahovat mezního smykového napětí alespoň 20 MPa. Pro betony s pevností nad 50 MPa je již nutné použít ocel třídy 10.9 a lepidlo, které je schopné zajistit hodnotu soudržnosti až 30 MPa na rozhraní s betonem a po přepočtu na rozhraní s ocelovým šroubem až 35 MPa. Z Obr. 3-3 také vyplývá, že pro betony vyšších pevností než 50 MPa je jeho vliv na výslednou poruchu upozaděn.

3.3 TESTOVÁNÍ MEZNÍHO NAPĚTÍ NA KONTAKTU OCEL-LEPIDLO

3.3.1 Vybrané základní receptury lepidel

Vzhledem k požadavku vysoké výsledné pevnosti a požadavku na rychlost tuhnutí v nízkých teplotách byly vybrány pro testování modifikovaných lepidel následující dvě základní pryskyřice:

- epoxidová pryskyřice
- vinylesterová pryskyřice

Oba tyto druhy mají jiný mechanismus vytvrzovací reakce. U epoxidové pryskyřice, lze očekávat lepší mechanické vlastnosti. Vinylesterová pryskyřice lze z důvodu jejího reakčního mechanismu jednodušeji upravit pro vytvrzování při teplotách blízkých 0 °C [17,30-32]. Stěžejními požadovanými vlastnostmi byly nízká viskozita, nízké smrštění a vysoká pevnost v tahu a v ohybu. Při porovnání jednotlivých pryskyřic byl zvolen jako nejlepší zástupce vinylesterových pryskyřic Derakane 411. Z epoxidových pryskyřic byla zvolena CHS-EPOXY 531.

Vinylesterová pryskyřice Derakane 411 byla v základní receptuře vytvrzena 1,5 phr (phr = počet dílů na 100 dílů pryskyřice) dibenzoylperoxidové pasty urychlené 0,5 phr- dimethylparatoluidinu Tab. 3-1.

Tab. 3-1 Základní receptura Derakane 411

Název receptury	Látka	phr
Derakane 411	Derakane 411	100
	DBP	1,5
	DMPT	0,5

Pryskyřice CHS-EPOXY 531 je nízkomolekulární epoxidová pryskyřice modifikovaná bifunkčním reaktivním rozpouštědlem na bázi diglycidyl etheru. V první navržené základní receptuře bylo pro vytvrzení této pryskyřice navrženo standardní nízkomolekulární aminové tvrdidlo P11 (Tab. 3-2).

Tab. 3-2 Základní receptura 531

Název receptury	Látka	phr
531	CHS-Epoxy 531	100
	P11	12

Z lepidel vyrobených na základě výše uvedených receptur se z pohledu požadavku na co nejvyšší výslednou pevnost ukázala jako nejvhodnější receptura 531, která však v základní receptuře není schopna přijatelně rychlé reakce při snížených teplotách.

V dalším vývoji byla i tato receptura modifikována pro aplikace v nižších instalačních teplotách. Použita byla kombinace tvrdidel P11 a AN2609 a dále směsi Benzylalkoholu, Triethylfosfátu, Kyseliny borité a 2,4,6-tris (dimethylaminomethyl) fenolu (Tab. 3-3).

Tab. 3-3 Receptura modifikované epoxidové pryskyřice CHS- EPOXY 531 pro použití v nízkých teplotách

Název receptury	Látka	phr
531-AN2609	CHS EPOXY 531	100,00
	AN2609	21,00
	P11	6,00
	Benzylalkohol	7,00
	Triethylfosfát	5,40
	Kyselina boritá	1,80
	2,4,6-tris (dimethylaminomethyl) fenol	1,80

Receptura 531-AN2609 se ze všech testovaných receptur ukázala jako nejperspektivnější a byla podrobena dalším testům.

3.3.2 Testování plniv

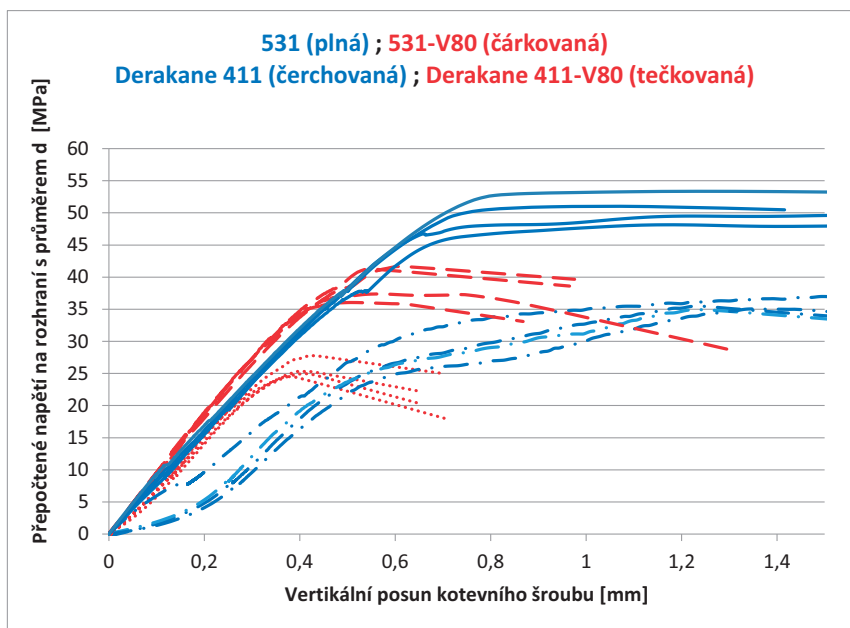
Epoxidové pryskyřice se často používají jako lepidla, a to díky svým vynikajícím mechanickým a fyzikálním vlastnostem, vysoké přílnavosti, tepelné stabilitě, nízkému smršťování a odolnosti vůči rozpouštědlům. S ohledem na cíl dosáhnout co nejvyšších hodnot mechanických vlastností, zejména pevnosti ve smyku, byla v následující analýze použita zejména receptura 531 se základní

epoxidovou pryskyřici CHS EPOXY 531. Cílem níže uvedených testů bylo ověřit možnost zlepšení pevnostních charakteristik výsledného lepidla prostřednictvím přidávku specifických plniv.

Tato plniva se často používají, protože díky své struktuře a různým povrchovým modifikacím jsou schopna ovlivnit mnoho fyzikálních a mechanických vlastností. Často zkoumanými plnivými jsou oxid titaničitý [33], oxid grafenu [34,35], uhlíkové nanotrubičky [36,37], nanohlína [38], karbonová vlákna [39] atd. nebo dokonce jejich kombinace.

3.3.2.1 Plniva – Mletý vápenec

Plniva nepřispívají pouze ke zlepšení parametrů pevnosti, ale také ke stabilizaci a redukci smršťování materiálu a jako druhotný efekt mohou výsledný produkt zlevnit. U vinylesterových pryskyřic je podstatnou nevýhodou při návrhu složení chemické kotvy jejich vysoké smrštění, u použité pryskyřice Derakane 411 je to 7,5 %. Nejběžnější metodou snížení smrštění je právě přidání plniv do směsi, navíc je cena plniv obvykle nižší, než je cena pryskyřice, což vede ke zmíněným ekonomickým úsporám. Následující výsledky (Obr. 3-4) zobrazují zkoušku modifikované receptury Derakane 411-V80, ve které byl jako plnivo použit mletý vápenec frakce 0 – 0,5 mm.



Obr. 3-4 Výsledky modifikované omezené zkoušky pro receptury Derakane 411; Derakane 411-V80; 531 a 531-V80

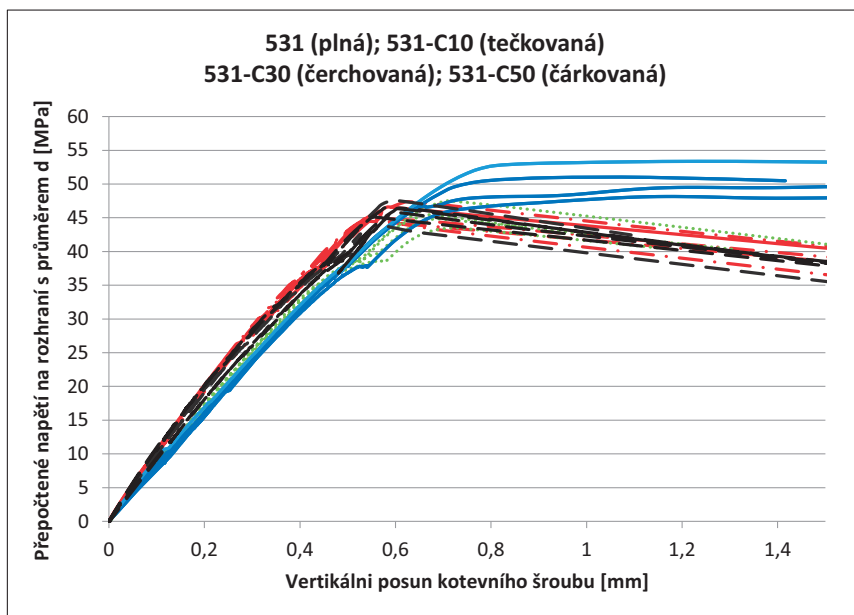
Hmotnostní podíl tohoto plniva ve výsledné receptuře činí 80 %. Z výsledků modifikované receptury Derakane 411-V80 vyplývá snížení mezního napětí na sledovaném kontaktu o cca 20 %. Z průběhu pracovních diagramů z jednotlivých zkoušek lze pozorovat výraznou redukci efektu smrštění lepidla. Pracovní diagram je z hlediska svého průměru ideální s jasnou pružnou částí a zřetelným vrcholem. Rámcově lze také hodnotit poměrné náklady na jednotku hmotnosti lepidla z vyrobených dle uvedených receptur. V době realizace těchto zkoušek byla cena základní pryskyřice minimálně 25x vyšší než cena mletého vápence. Náklady na lepidlo dle receptury Derakane 411-V80 jsou tedy vzhledem k množství použitých komponent při cca 20 % poklesu

pevnosti nižší až o 75 %. Obdobný ekonomický efekt má použití mletého vápence v receptuře s epoxidovou pryskyřicí 531-V80.

3.3.2.1 Plniva – Uhlíková vlákna

V další sadě testů byla zkoumána možnost použít jako plniva recyklovaná mletá uhlíková vlákna o délce 100 μm a průměru 6 μm bez povrchové úpravy. Výhodou recyklovaného uhlíkového vlákna je výrazně nižší cena oproti běžnému uhlíkovému vláknu. Cílem bylo ověřit předpoklad, že by tato uhlíková vlákna vysoké pevnosti mohla působit jako rozptýlená výztuž ve vrstvě lepidla a zároveň, že by mohla plnit také funkci stabilizátoru proti smršťování. Byly navrženy čtyři receptury s různou koncentrací vláken v daném vzorku. Testováno bylo množství 10, 30 a 50 phr. Připraveny byly tři receptury s epoxidovou pryskyřicí CHS Epoxy 531 (531-C10; 531-C30 a 531-C50).

Výsledky těchto testů jsou souhrnně znázorněny na Obr. 3-5, ve srovnání s výsledky jedné sady základní receptury 531-a.



Obr. 3-5 Výsledky modifikované omezené zkoušky pro recepturu 531;531-C10(30)(50)

Použití plniva z recyklovaných mletých uhlíkových vláken v malé koncentraci (10 phr) nemělo na výsledky prakticky žádný vliv, a to jak pro základní vinylesterovou pryskyřici, tak pro epoxidovou pryskyřici. Jak je patrné z Obr. 3-5, nemá tato koncentrace uhlíkových vláken žádný vliv na smršťování lepidla v průběhu vytvrzování.

Při použití vyšší koncentrace recyklovaných mletých uhlíkových vláken (30 phr a 50 phr) výsledky ukazují, že ani v těchto případech nedošlo k dosažení vyšších hodnot mezního napětí na sledovaném rozhraní. Na pracovních diagramech (Obr. 3-5) lze pozorovat velmi malý nárůst tuhosti v pružné části. V pracovním diagramu byla značně redukována jeho nelineární část. Lepidlo s tímto plnivem v dané koncentraci vykazuje ostře bilineární chování s méně duktilním chováním.

Při přípravě těchto vzorků byly také pozorovány změny ve zpracovatelnosti směsi. Vlákna ve vyšší koncentraci směs velmi zahušťují, a navíc tvoří shluky, které jsou jen velmi těžko

rozmíchatelné. Vyšší koncentrace než 50 phr již nebylo možné z důvodu zpracovatelnosti lepidla vyrobit a otestovat.

3.3.2.2 Plniva – Nanoplňniva

V návaznosti na uvedené výsledky, kdy se nepodařilo navýšit mechanické vlastnosti chemické kotvy při použití konvenčních plniv, byl cíl v této oblasti nasměrován do oblasti nanoplňniv. Pro zkoušky byla vytipována ta nanoplňniva, u kterých byl potenciál navýšení především smykových pevností materiálu. Z této kategorie byly testovány následující druhy:

- uhlíkové nanotrubičky (Tubal Matrix 201)
- grafenoid (GO-I.)
- grafenoid (GO-21)
- grafenoid (GO-43)

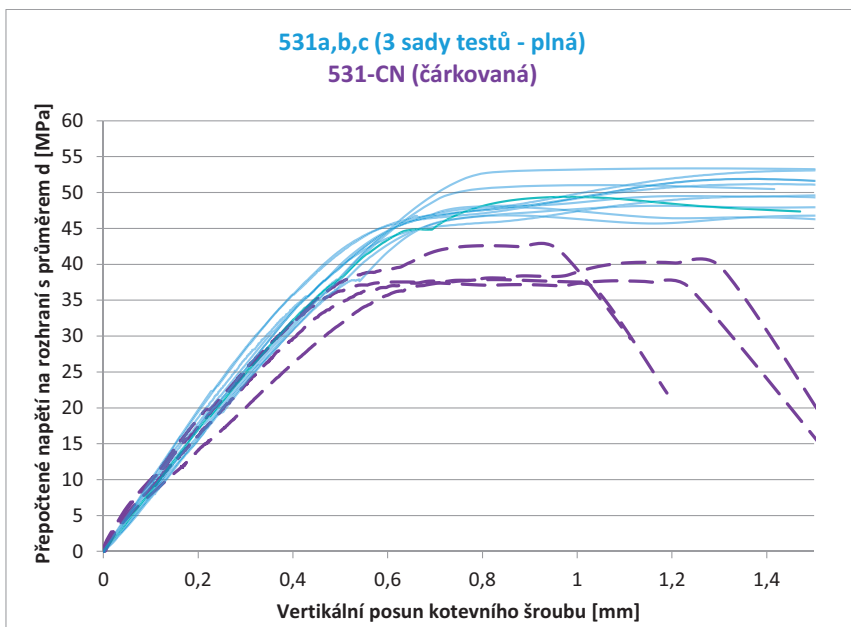
Směsi s nanotrubičkami byly připravovány na laboratorním dispergátoru. Pro zlepšení mechanických vlastností byla použita koncentrace 0,5 %, což je množství doporučené výrobcem nanotrubiček.

Při pokusu o dispergování byla zkoušena přímá dispergace celého množství v epoxidu při 1000 ot./min. Ani po jedné hodině nebylo dosaženo uspokojivých výsledků. Poté byla rychlost navýšena na 2000 ot./min. a směs byla míchána následujících 30 minut, kdy došlo ke zlepšení dispergace, nicméně stále směs netvořila hladký film a během této doby došlo také ke zvýšení teploty vlivem tření na 60 °C. Směs také obsahovala velké množství bublin. Po tomto neúspěchu bylo přistoupeno k metodě postupného ředění, kdy bylo 2,5 % nanotrubiček dispergováno v epoxidu a následně byl tento koncentrát naředěn na požadovaných 0,5 %. Vyšší prvotní koncentrace nebyla z důvodu vysoké viskozity směsi možná. Míchání probíhalo vždy při 2000 ot./min. s přestávkami tak, aby nedošlo k zahřátí směsi na více než 40 °C. Celková doba míchání byla 30 minut pro koncentrát a 30 minut pro ředění. Celková dispergace byla při této metodě výrazně lepší, ale stále ne dostatečná a opět byl přítomen vysoký obsah bublin. Metoda s koncentrátem byla použita znovu za přítomnosti dispergačního činidla Disperbyk 2152, kdy bylo dosaženo dostatečné dispergace nanoplňniva. Problém s přítomností velkého množství bublin přetrvával, nicméně jejich výskyt se snížil přibližně o 50 %.

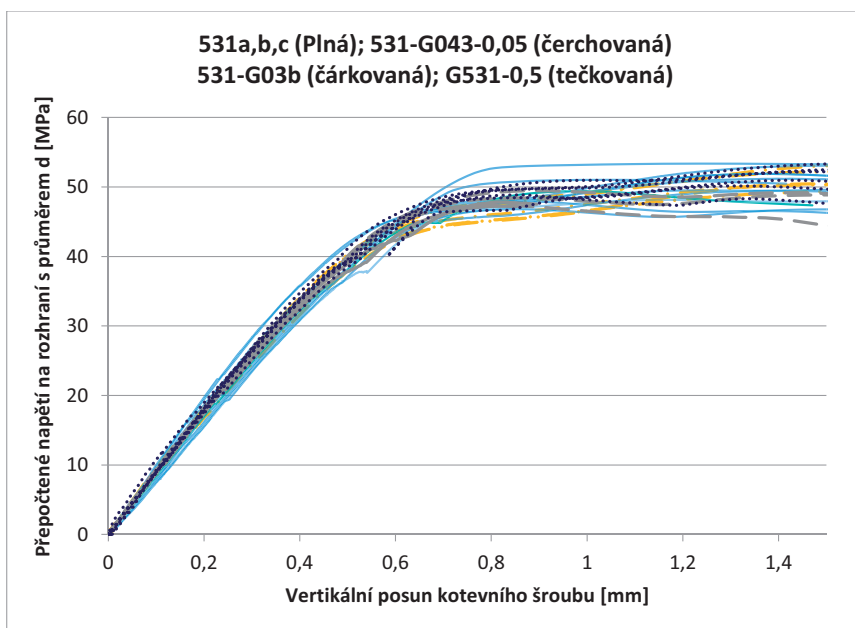
Pro úplné odstranění bublin bylo úspěšně použito odpěňovadlo BYK A530, kdy na základě jeho technického listu byla ještě do metody míchání přidána vždy sekvence dlouhá 10 minut při rychlosti 200 ot./min. Celkové množství bublin bylo sníženo na jednotky procent oproti výchozímu stavu.

Po těchto zjištěních byla připravena receptura 531CN. Z výsledků měření (Obr. 3-6) je patrné, že i přes veškeré vynaložené úsilí nedošlo ke zvýšení mechanických vlastností směsi oproti základní receptuře 531 (v grafu porovnáno se třemi sadami testů základního lepidla receptury 531a,b,c). Ani po prezentaci výsledků výrobcí nanotrubiček a jejich diskuzi nebyla odhalena možná příčina snížených mechanických vlastností.

Metoda přípravy vzorků se ukázala jako úspěšná pro dispergaci nanočástic a byla úspěšně aplikována pro přípravu dalších receptur s využitím různých typů grafenoidů v různých koncentracích (Obr. 3-7).



Obr. 3-6 Výsledky modifikované omezené zkoušky pro recepturu 531a, b, c s 531-CN



Obr. 3-7 Výsledky modifikované omezené zkoušky pro recepturu 531a,b,c; 531-G0,03 (GO-I); 531-G0,03b (GO-21); 531-G43-0,05(GO-43)

Směsi s grafenoidy se ukázaly jako výhodnější z pohledu dispergace, a navíc bylo při přípravě pozorováno výrazně redukované množství bublin zůstávajících ve směsi než v případě

nanotrubiček. Vybrané výsledky testů lepidel těchto receptur jsou vyobrazeny na Obr. 3-7 v porovnání se základní recepturou 531 zkušenu ve třech sadách *a*, *b* a *c*.

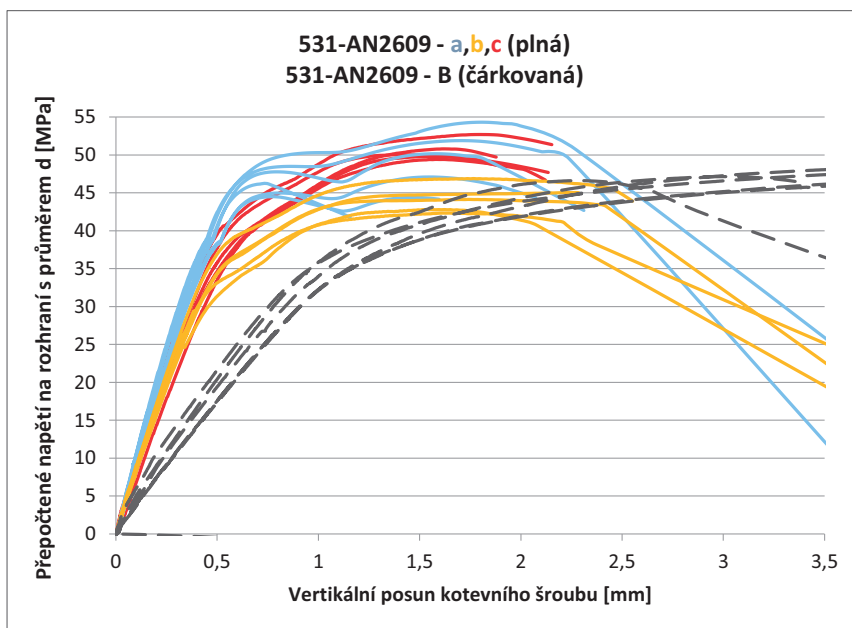
Z výsledků je patrné, že přínos uvedených přísad v daných typech a koncentracích, které v testech byly použity je zanedbatelný. Obdobných výsledků dosahovala lepidla receptur s grafenoidy v jiných koncentracích.

3.3.3 Test vybrané receptury omezenou a modifikovanou omezenou zkouškou

Vzhledem k nepříliš pozitivním výsledkům lepidel receptur s výše uvedenými plnivými, byly další testy provedeny pouze na vzorcích lepidla receptury 531-AN2609, která je modifikována i pro použití v teplotách blízkých 0 °C [16,40].

Pro ověření použitelnosti modifikované omezené zkoušky byla realizována sada testů lepidel receptury 531-AN2609 v betonových tělesech tak, jak předepisuje omezená zkouška dle směrnice pro evropské technické schválení ETAG.

Pro tuto sadu omezené zkoušky byla použita nevyztužená tělesa z betonu s laboratorně ověřenou střední hodnotou krychlenou pevností $f_{c,150} = 80,77 \text{ MPa}$. Dále, vzhledem k delší kotvení délce, která se pohybovala pro jednotlivá tělesa v rozmezí 40 až 64 mm (měno individuálně pro každý vzorek), byla jako kotvení šroub použita závitová tyč pevnostní třídy 12.9 průměru M12 a to z důvodu vyloučení poruchy přetržením kotvení šroubu. Porovnání jednotlivých výsledků omezené zkoušky v betonových tělesech a modifikované omezené zkoušky v ocelových přípravcích je uvedena na Obr. 3-8.



Obr. 3-8 Porovnání 3 sad testů modifikovanou omezenou zkouškou a omezenou zkouškou – receptura 531-AN2609

Z jednotlivých průběhů pracovních diagramů zkoušek (Obr. 3-8) je patrné, že počáteční tuhost vzorků instalovaných v ocelových přípravcích je přibližně dvojnásobná oproti vzorkům

instalovaných v betonových tělesech, přičemž mezní hodnoty napětí na sledovaném rozhraní dosahují obdobných hodnot. Vyšší tuhost vzorků instalovaných v ocelových přípravcích byla očekávána, jelikož na posunu vrcholu kotevního šroubu se podílí významnou měrou pouze přetvoření vrstvy lepidla a menší měrou přetvoření ocelového šroubu. Vzorky instalované v betonovém tělese jsou ovlivněny přetvořením betonu. Největší rozdíl je ale pravděpodobně dán rozdílnou tloušťkou vrstvy lepidla. U ocelových přípravků je nejmenší vrstva 1,3 mm, a u betonových těles je průměrně 2 mm.

Pro bližší porovnání výsledků omezené zkoušky a modifikované omezené zkoušky byla pro jednotlivé vzorky určena mezní síla $N_{u,adh}$ odpovídající počátku nekontrolovaného posunu kotvy (vyhodnocení dle směrnice ETAG). Z geometrie vzorků byla z této síly stanovena hodnota mezního napětí na rozhraní mezi kotevním šroubem a lepidlem $\tau_{u,adh}$. Pro všechny porovnávané testy jsou souhrnně výsledky včetně vyhodnocení charakteristické hodnoty uvedeny v Tab. 3-4.

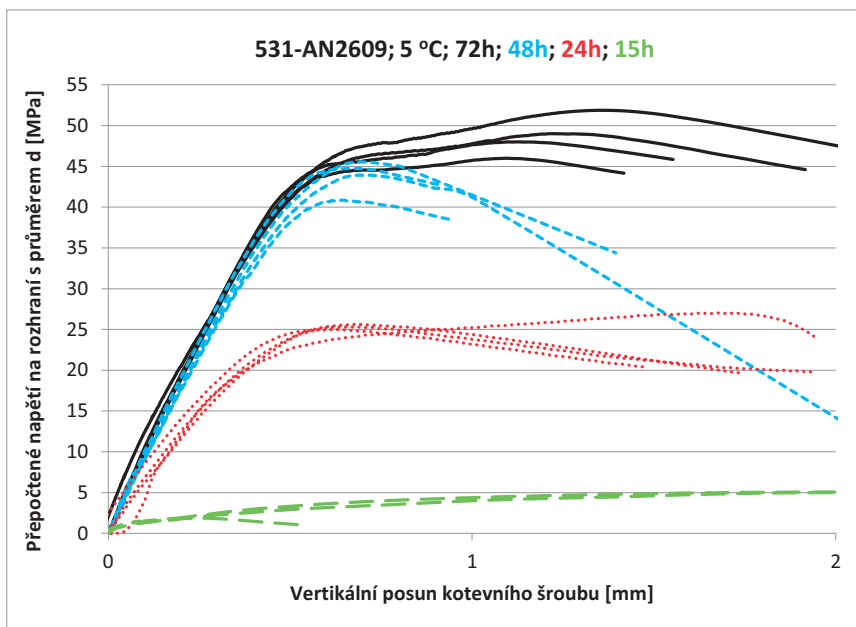
Tab. 3-4 Vyhodnocení charakteristické hodnoty mezního napětí na kontaktu, porovnání omezené zkoušky a modifikované omezené zkoušky

Receptura	Typ zkoušky	Délka kontakt u h_{ef} [mm]	Mezní napětí $\tau_{u,adh}$ [MPa]	Střední hodnota $\tau_{u,mean}$ [MPa]	Směrodatná odchylka s	Variační koeficient v	Koeficient rozšíření k_s	Charakteristická hodnota τ_{Rk} [MPa]
531-AN2609-a	Modifikovaná	48	44,50	42,92	4,14	0,10	2,57	32,27
531-AN2609-a	Modifikovaná	48	45,00					
531-AN2609-a	Modifikovaná	48	46,00					
531-AN2609-a	Modifikovaná	48	47,80					
531-AN2609-a	Modifikovaná	48	48,50					
531-AN2609-a	Modifikovaná	48	50,10					
531-AN2609-c	Modifikovaná	48	41,50					
531-AN2609-c	Modifikovaná	48	42,00					
531-AN2609-c	Modifikovaná	48	42,00					
531-AN2609-c	Modifikovaná	48	42,00					
531-AN2609-c	Modifikovaná	48	45,50					
531-AN2609-c	Modifikovaná	48	46,50					
531-AN2609-b	Modifikovaná	48	36,90					
531-AN2609-b	Modifikovaná	48	35,80					
531-AN2609-b	Modifikovaná	48	37,30					
531-AN2609-b	Modifikovaná	48	39,60					
531-AN2609-b	Modifikovaná	48	39,00					
531-AN2609-b	Modifikovaná	48	42,50					
531-AN2609-B	Omezená	40	46,00	40,03	2,78	0,07	2,57	32,88
531-AN2609-B	Omezená	52	41,50					
531-AN2609-B	Omezená	58	40,10					
531-AN2609-B	Omezená	58	40,80					
531-AN2609-B	Omezená	60	41,20					
531-AN2609-B	Omezená	61	38,60					
531-AN2609-B	Omezená	61	39,60					
531-AN2609-B	Omezená	60	35,50					
531-AN2609-B	Omezená	64	37,40					
531-AN2609-B	Omezená	63	39,60					

3.3.4 Test vybrané receptury při aplikaci v nízké teplotě

Výše popsaná receptura 531-AN2609 byla optimalizována s ohledem na možnost použití v nízké instalační teplotě. Pro realizaci testů byla zvolena běžná hraniční teplota pro postupy standardního betonování, tedy 5 °C. Pro ověření vlastností obou lepidel zmíněných receptur byla použita modifikovaná omezená zkušební příprava. Důvodem této volby jsou relativně malé ocelové zkušební přípravky, které bylo možné v dostatečném počtu umístit do klimatizační komory. Před realizací experimentu byly všechny použité zkušební přípravky, závitové tyče (kotevní šrouby) a také oddělené složky receptury lepidla temperovány v klimatizační komoře po dobu 24 hodin na požadovanou teplotu. Vzorky byly vytaženy do laboratorní teploty 20 °C pouze na dobu nezbytně nutnou k promíchání složek lepidla a následnou instalaci kotevního šroubu (cca 10 minut), poté byly opět umístěny zpět do klimatizační komory. Vzhledem k vysoké schopnosti oceli akumulovat teplo lze předpokládat, že za tuto krátkou dobu nebyla rychlost reakce významně ovlivněna procesem přípravy vzorků ve vyšší teplotě.

Pro sledování počátku reakce a rychlosti vytvrzování bylo nutné zvolit vhodné časové intervaly od instalace kotevního šroubu po realizaci zkoušky. Tyto intervaly bylo nutné také navrhnout tak, aby jednotlivé časy instalace kotev a provedení samotného experimentu bylo možné provést ve vhodnou denní dobu. Pro recepturu 531-AN2609 byly zvoleny intervaly o délce 15, 24, 48 a 72 hodin. Výsledky zkoušek receptury 531-AN2609 jsou zobrazeny na Obr. 3-9.



Obr. 3-9 Výsledky modifikované omezené zkoušky pro recepturu 531-AN2609 při 5 °C

Vzorky zkoušené po nejkratším zvoleném intervalu 15 hodin od okamžiku instalace kotev, vykazovaly již jisté stabilní hodnoty dosaženého mezního napětí na sledovaném rozhraní, dosahující 5 MPa, avšak opět s výrazně nelineárním plastickým chováním. Vzorky z receptury 531-AN2609 po 24 hodinách vykazují již uspokojivé hodnoty sledovaného mezního napětí, které dosahuje cca 50 % hodnot zcela vytvrzeného lepidla při laboratorní teplotě 20 °C a to s přijatelným tvarem pracovního diagramu.

Výsledky vzorků zkoušených po 48 hodinách již dosahují srovnatelných hodnot jako při teplotě 20 °C. Rozdíl v charakteru výsledků po 48 hodinách a po 72 hodinách je z pohledu dosažené mezní hodnoty napětí již velmi malý, přičemž pracovní diagram vzorků zkoušených po 72 hodinách vykazují na rozdíl od 48 hodin jisté zpevnění po dosažení mezních hodnot.

Fotografie na Obr. 3-10 a Obr. 3-11 zobrazují vzorek lepidla receptury 531-AN2609 po provedení zkoušky v době 15 a 72 hodin po instalaci.



Obr. 3-10 Vzorek lepidla receptury 531-AN2609 po zkoušce po 15 hodinách v 5 °C



Obr. 3-11 Vzorek receptury 531-AN2609 po zkoušce po 72 hodinách v 5 °C

3.3.5 Test vybrané receptury při dlouhodobém zatížení

Tato kapitola ukazuje výsledky testů ověřujících odolnost vzorků vyrobených z receptury 531- AN2609, která se ukázala jako nevhodnější z testovaných, schopna dosáhnout spojení vysoké pevnosti a zároveň jako použitelná pro aplikační teploty blízké 0 °C, vůči dlouhodobému zatížení.

Pro ověření této schopnosti byl použit postup udávaný směrnici ETAG. Testované vzorky mají být zatíženy silou N_{sust} dle vztahu (3.1).

$$N_{sust} = \frac{1,1 \cdot N_{Rk,p}}{\gamma_{Mc}} \cdot \frac{1}{\alpha_2} \cdot \frac{1}{\alpha_3} \cdot \frac{1}{\alpha_4} \quad (3.1)$$

Za předpokladu rovnoměrného rozložení napětí na rozhraních lze vztah (3.1) transformovat na vztah (3.2) a vyjádřit tak hladinu napětí na sledovaném rozhraní, která má být při dlouhodobé zkoušce udržována.

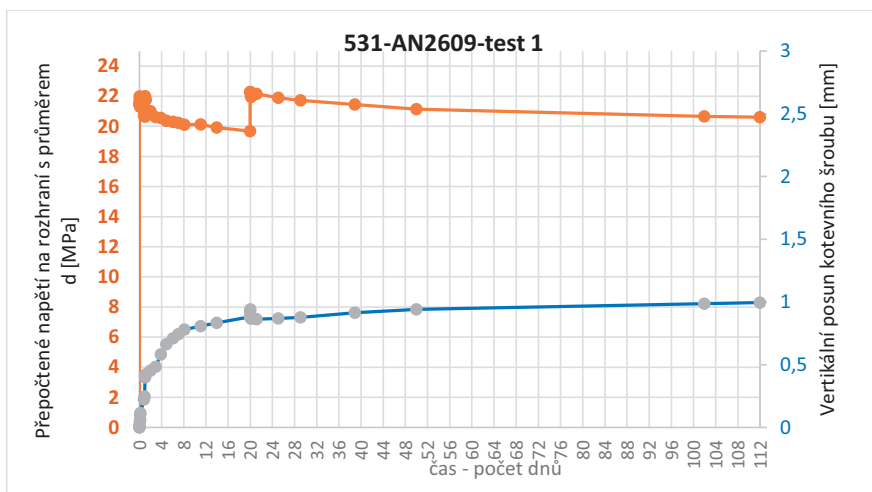
$$\tau_{sust} = \frac{1,1 \cdot \tau_{Rk}}{\gamma_{Mc}} \cdot \frac{1}{\alpha_2} \cdot \frac{1}{\alpha_3} \cdot \frac{1}{\alpha_4} \quad (3.2)$$

Součinitele $\alpha_2; \alpha_3; \alpha_4$ byly (pro tyto provedené testy) všechny uvažovány hodnotou 1,0, jelikož nebyly provedeny zkoušky při krátkodobé nejvyšší teplotě, dlouhodobé nejvyšší teplotě a zkoušky trvanlivosti tmelu. Výsledná úroveň zatížení pro dlouhodobou zkoušku dle vztahu (3.2), hodnoty τ_{Rk} z Tab. 3-4 a předpokladu dílčího stupně spolehlivosti γ_{Mc} pro kotevní systém s normální instalační bezpečností dle ČSN EN 1992-4, byla nastavena na $N_{sust} = 19,72 \text{ kN}$.

Dle uvedené normy se nastavená hodnota zatížení po dobu měření nemá odchytil více jak o 5 %, přičemž toto zatížení má působit alespoň 6 měsíců, pokud nedojde k ustálení měřeného posunu kotevního šroubu dřívě. Nejméně však musí zatížení působit 3 měsíce.

Pro realizaci těchto testů byla opět využita modifikovaná omezená zkouška, s tím rozdílem, že pro trvalé vyvození tahového zatížení byl hydraulický válec nahrazen evolutní pásovou pružinou s odporem až 200 kN. Síla byla do kotevního šroubu vnesena stlačováním evolutní pásové pružiny. Stlačování pružiny bylo docíleno postupným utahováním matice umístěné na kotevním šroubu, podložené axiálním valivým ložiskem.

Nevýhodou tohoto způsobu dlouhodobého zatěžování je to, že při posunu kotevního šroubu dochází souběžně ke zpětné relaxaci pásové pružiny. Předpětí vnesené pružinou bylo nutné v průběhu experimentu korigovat tak, aby zatížení nekolísalo více jak o 5 %. K této korekci došlo v průběhu měření dvakrát, a to u vzorků 1,2 a 3. Celková délka měření byla 112 dní. V tento okamžik byly zkoušky ukončeny z důvodu ustálení deformací. Celkem bylo takto zkoušeno šest vzorků lepidel receptury 531-AN2609. Záznam jednoho z těchto měření je uveden na Obr. 3-12.



Obr. 3-12 Dlouhodobá zkouška 531-AN2609-Test 1

Z výsledků je zřejmé, že bez dotahování předpětí v pružině nebylo možné dodržet pokles síly v rozmezí 5 %. Naopak na začátku testu musela být hladina zatížení nastavena až na úroveň napětí 22 MPa což odpovídá nárůstu o 12 %. S postupným dotahováním lze požadovanou hladinu zatížení udržet. Dále je z výsledků patrný poměrně velký rozdíl v naměřeném konečném posunu kotevního šroubu. V okamžiku aplikace počátečního zatížení došlo u všech vzorků k poměrně rychlému nárůstu posunu kotevního šroubu o cca 0,5 mm. Tento posun se během prvních 100 hodin zatížení zdvojnásobil. Během dalších cca 200 hodin se ale nárůst deformace razantně zpomalil. U testovaných vzorků bylo dosaženo 90 % hodnoty konečného posunu během prvních 30 dní. Tyto dlouhodobé zkoušky prokázaly stabilní chování kotevního systému s použitím lepidel dle receptury 531-AN2609 při zvolené úrovni zatížení, která odpovídá 61 % charakteristické hodnoty zatížení pro poruchu selhání kontaktu. Lze konstatovat, že pro dané lepidlo dle receptury 531-AN2609 lze z hlediska dlouhodobého zatížení použít normou ČSN EN 1994-2 doporučený redukční součinitel $\psi_{sus}^0 = 0,6$.

4 KALIBRACE MODELŮ PREDIKUJÍCÍCH MEZNÍ TAHOVÉ ZATÍŽENÍ

Cílem studie popsané v této kapitole je srovnání výsledků existujících modelů predikce tahové síly pro typickou chemickou kotvu s rozsáhlejší databází výsledků experimentů, u kterých je známo dostatečné množství vstupních parametrů tak, aby bylo možné postihnout vliv parametrů, které se v modelech predikce vyskytují. Zejména se jedná o výsledky testů, pro které jsou známy nejen geometrické a materiálové parametry zkoušených kotev, ale také lze dohledat mezní tahovou sílu při omezené i neomezené zkoušce. Je tedy známa hodnota soudržnosti tzn. mezního smykového napětí na jednom ze sledovaných rozhraní.

Pro hodnocení modelů predikce byla sestavena databáze výsledků experimentů tahových zkoušek chemických kotev publikovaných v odborné literatuře, do které byly také zahrnuty vlastní experimenty autora [10-12,14,24,41-45]. Databáze obsahuje celkem 1722 výsledků zkoušek. Z tohoto počtu je 1252 výsledků neomezené zkoušky a 470 výsledků omezených zkoušek na kotvách stejných parametrů jako u zkoušek neomezených. Ve všech případech se jedná o zkoušky provedené v laboratorních podmínkách na tělesech z betonu bez trhlin. Vstupní geometrické a vstupní parametry zkoušených kotev leží v následujících intervalech.

• Průměr kotevního šroubu	d :	8–24	mm
• Efektivní kotevní délka	h_{ef} :	32–480	mm
• Válcová pevnost betonu v tlaku	f_c :	5–106	MPa
• Mezní napětí na rozhraní lepidlo-kotevní šroub	τ_u :	2–32	MPa

Jednotlivé výsledky byly v některých případech normalizovány na výše uvedené parametry. V případě, že byly vyhodnoceny pro jiné vstupní parametry (krychelná pevnost betonu namísto válcové pevnosti betonu či mezní napětí definované na rozhraní mezi lepidlem a betonem), tak byly tyto hodnoty normalizovány dle postupu uvedeného ve směrnici ETAG.

Dílčím cílem této kapitoly je ukázat možnosti kalibrace publikovaných modelů pro dosažení lepší shody s experimentálními daty.

4.1 METRIKY POUŽITÉ PRO HODNOCENÍ MODELŮ PREDIKCE MEZNÍHO TAHOVÉHO ZATÍŽENÍ

Jednotlivé hodnoty experimentálních výsledků pro dané vstupní parametry kotev y_i je možné srovnat s výsledky modelů predikce mezního tahového zatížení \hat{y}_i . V následující studii je použito $N=1252$ dvojic $[\hat{y}_i, y_i]$, které lze v kartézské soustavě znázornit pomocí bodového grafu. V ideálním případě, kdy funkce modelu predikce popisující mezní tahovou únosnost je přesná a úplná, potom všechny body $[\hat{y}_i, y_i]$ leží na přímce. Z důvodu rozptýlů hodnot jednotlivých vstupních veličin a přítomnosti náhodných chyb při jejich měření jsou tyto body rozptýleny kolem přímky, která je definována úhlem $\theta = \frac{\pi}{4}$.

Pro hodnocení přiléhavosti funkcí modelů predikce mezní tahové síly je možné použít více různých kritérií vycházejících z principů regresní a korelační analýzy. V popisované analýze dat byl jako první kritérium zvolen koeficient determinace r^2 (4.1). Koeficient determinace může nabývat hodnoty maximálně $r^2 = 1$ (v procentech 100 %), která vyjadřuje dokonalou predikci hledané veličiny popsané zvolenou funkcí. Ke stanovení koeficientu determinace se využije součet čtverců jednotlivých reziduí (4.2) a celkový součet čtverců odchylek dat od střední hodnoty (4.3). Jako dobré kritérium pro přijetí funkce zvoleného modelu se často uvádí hodnota $r^2 > 0,95$ [46].

$$r^2 = 1 - \frac{S_{resid}}{S_T} \quad (4.1)$$

$$S_{resid} = \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4.2)$$

$$S_T = \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 \quad (4.3)$$

Ve funkcích modelů predikce se v případě dodatečně osazovaných chemických kotev vyskytuje řada nezávisle proměnných vstupních veličin. Jejich počet je pro potřeby následujícího hodnocení omezen na $p = 4$ (průměr kotevního šroubu, kotevní délka, pevnost betonu a mezní napětí na rozhraní materiálů). Známou charakteristikou koeficientu determinace je, že rostoucímu počtu nezávislých proměnných ve funkci predikce výsledku (závislé proměnné) má tento koeficient tendenci růst, aniž by vyšší počet nezávislých proměnných ve funkci přinášel nové informace o nezávislé proměnné. Pro redukci takto uměle zvýšené hodnoty r^2 lze použít jednu z forem adjustovaného koeficientu determinace r^2_{adj} dle (4.4).

$$r^2_{adj} = 1 - (1 - r^2) \frac{N - 1}{N - p - 1} \quad (4.4)$$

Koeficient determinace a adjustovaný koeficient determinace jsou primárně nástroje regresní analýzy popisující přiléhavost zvolené regresní funkce nezávislých veličin a hledané závislé veličiny. V případě posouzení zvoleného nelineárního modelu na základě párových dvojic může být orientačním ukazatelem vhodnosti modelu, nicméně pro určité situace není vhodný, např. je velmi citlivý na velikost reziduí. Pro vysoké hodnoty reziduí může vycházet záporný.

Dalším zvoleným kritériem pro hodnocení přiléhavosti funkcí modelů predikce jsou normované chyby dle vztahů (4.5), (4.6) a (4.7). Tato kritéria jsou označena jako e_1 , e_2 a e_3 podle toho, v jaké mocnině se ve vztazích sčítají rezidua jednotlivých výsledků. Suma reziduí je pak normována součtem výsledků experimentů v příslušné mocnině. S klesající sumou reziduí mezi predikovaným výsledkem a výsledkem experimentu se všechna tato kritéria blíží k nule. Nižší hodnota kritérií e_1 , e_2 a e_3 ukazuje na lepší shodu výsledků predikovaných modelem s experimentálními výsledky.

$$e_1 = \frac{\sum (|y_i - \hat{y}_i|)}{\sum y_i} \quad (4.5)$$

$$e_2 = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum y_i^2}} \quad (4.6)$$

$$e_3 = \sqrt[3]{\frac{\sum (|y_i - \hat{y}_i|)^3}{\sum y_i^3}} \quad (4.7)$$

Vlastností těchto zvolených kritérií je nesymetrické hodnocení. V případě, že jsou hodnoty modelu vyšší než hodnoty výsledků experimentů, nabývají tato kritéria vyšších hodnot než v případě opačném. Např. pokud by hypoteticky všechny výsledky predikované modelem byly dvojnásobkem hodnot experimentálních výsledků, potom by platilo: $e_1 = e_2 = e_3 = 1$. V opačném případě, pokud by výsledky všech experimentů byly právě dvojnásobkem hodnot predikovaných modelem, potom by platilo: $e_1 = e_2 = e_3 = 0,5$. Kritérium e_1 vycházející z normovaného součtu reziduí je relativně málo citlivé na jednotlivé odlehle výsledky a je nejméně vypovídajícím kritériem o vhodnosti modelu. Kritérium e_2 je nejběžnějším kritériem, které vychází z metody nejmenších čtverců, tedy minima reziduí dle (4.2). Kritérium e_3 je více citlivé právě na odlehle výsledky modelu predikce.

Dalším populárním kritériem hodnocení kvality odhadu je průměrná absolutní procentní chyba (MAPE – Mean absolute percentage error) (4.8) [47]. Podobně jako kritéria e_1 , e_2 a e_3 je i hodnocení pomocí MAPE asymetrické a také stejným způsobem zvýhodňuje modely, které predikují nižší hodnoty než hodnoty výsledků experimentů. Další nevýhodou MAPE je vysoká citlivost na výsledky blízké nule. Výhodou je snadno pochopitelná interpretace kritéria. Alternativou k MAPE je méně asymetrické kritérium SMAPE (Symmetric mean absolute percentage error) (4.9). Tato kritéria neeliminují asymetrii zcela, ale výrazně ji redukuje.

$$MAPE = \frac{1}{N} \cdot \sum \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (4.8)$$

$$SMAPE = \frac{1}{N} \cdot \sum \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{|y_i| + |\hat{y}_i|} \quad (4.9)$$

V hodnocení modelů predikce mezní tahové síly byla použita všechna zmíněná kritéria. Pro optimalizaci modelů bylo jako výchozí kritérium zvoleno kritérium normované chyby e_2 dle (4.6).

4.2 KALIBRACE PARAMETRŮ VYBRANÝCH MODELŮ PREDIKCE MEZNÍ TAHOVÉ SÍLY

4.2.1 Primární modely a směr kalibrace

Pro optimalizaci byly jako primární modely zvoleny dva modely predikce mezní tahové síly na kotvě popsané v kapitole 2.3. Tyto modely popisují mezní zatížení jedné kotvy pro výše uvedené typy poruchy, s výjimkou poruchy přetržením kotevního šroubu. První model (v dalším značení také Model 1) dle vztahu (4.11) vychází z metody CCD popisující poruchu betonu, který je kombinovaný s modelem rovnoměrného rozložení napětí na kontaktech (4.10). Výsledná hodnota mezního zatížení je pak dána minimem z predikcí těchto dvou modelů. Druhý model (v dalším značení také Model 2) vychází z modelu (2.6), který nahrazuje funkce (4.10), (4.11) jednou exponenciální funkcí (4.12). Primární modely tedy nebyly v této kalibraci určené regresní analýzou experimentálních dat použitých pro jejich kalibraci.

Základními vstupními veličinami zvolených kalibrovaných modelů jsou:

- | | |
|---|----------|
| • průměr kotevního šroubu | d |
| • kotevní délka | h_{ef} |
| • válcová pevnost betonu | f_c |
| • mezní napětí na rozhraní mezi kotevním šroubem a lepidlem | τ_u |

Model 1:

$$N_u = \pi \cdot d \cdot h_{ef} \cdot \tau_u \quad (4.10)$$

$$N_u = k \cdot h_{ef}^j \cdot f_c^l \quad (4.11)$$

Model 2:

$$N_u = a \cdot \pi \cdot \tau_u \cdot \left(1 - e^{-b \frac{f_c}{\tau_u}}\right) \cdot d \cdot (h_{ef} - c \cdot d) \quad (4.12)$$

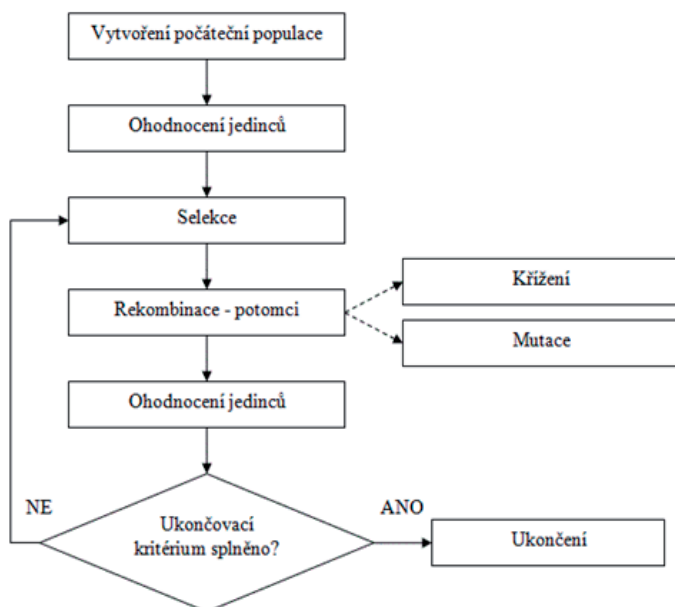
Kalibrovanými parametry funkcí uvedených modelů byly: koeficienty k a mocninné parametry j a l u modelu (4.11) a koeficienty a , b a c u modelu 2 (4.12).

Provedená kalibrace byla zaměřena na tři základní směry:

- Prvním směrem je kalibrace parametrů modelu 1 (parametrů k, j a l) s využitím výše popsané databáze výsledků experimentů, vedoucí k minimalizaci zvolené metriky – kritéria e_2 dle (4.6).
- Druhým směrem kalibrace je zaměřen na nalezení takových parametrů a, b, c modelu 2, aby byl co nejvíce přílehavý k optimalizovanému modelu 1. Cílem tohoto směru je validace modelu 2 modelem 1.
- Třetím směrem je kalibrace parametrů a, b, c modelu 2 s využitím výše popsané databáze výsledků experimentů, vedoucí k minimalizaci zvolené metriky – kritéria e_2 dle (4.6).

4.2.2 Nástroje kalibrace

Vzhledem k vyššímu počtu proměnných parametrů kalibrovaných modelů predikce mezní tahové síly byl jako jeden z vhodných nástrojů pro jejich efektivní určení zvolen algoritmus genetické optimalizace. Genetické algoritmy, patřící do třídy tzv. evolučních algoritmů, jsou vyhledávací algoritmy založené na mechanismu přirozeného výběru a principech genetiky. Jejich velkou výhodou je poměrná jednoduchost programátorské implementace. Evoluční algoritmy jsou netradiční výpočetní postupy, které byly inspirovány vývojovými procesy v přírodě. Používají se k řešení mnoha různých problémů inženýrské praxe, které je možné formulovat jako optimalizační úlohy [48-51]. Principem evolučních algoritmů je použití procesů, napodobujících evoluční jevy známé z biologie – přirozený výběr, mutace, křížení či dědičnost. Základní schéma evolučního algoritmu je uvedeno na Obr. 4-1.



Obr. 4-1 Schéma genetického evolučního algoritmu

Je patrné, že evoluční algoritmy pracují cyklicky, tak jako většina optimalizačních nástrojů. V každém cyklu je vytvářena nová generace jedinců, kteří jsou následně ohodnoceni. Do další generace pak přechází pouze potomci nejlépe ohodnocených jedinců. Kvalita takového algoritmu je založena na co nejlepším způsobu ohodnocení jedinců. Zároveň zásadní roli hraje správně nastavené ukončovací kritérium celého výpočtu. Ukazuje se, že zvláště v úlohách kalibrace modelů (inverzní úlohy) hraje správná volba ukončovacího kritéria zásadní roli.

Z pohledu uživatele je důležitá robustnost použití těchto metod. Při řešení optimalizačního problému totiž není nutné složitě ověřování podmínek konvergence metody, jako je tomu v případě klasických optimalizačních metod.

Problematika kalibrace a validace matematických modelů inženýrských problémů spočívá v aplikaci tzv. inverzní analýzy. Obecně lze říci, že cílem takové analýzy je zpětné určení neznámých vstupů modelu (geometrické a materiálové parametry, počáteční a okrajové podmínky) na základě předem známých (nebo očekávaných) výstupů. Řeší se tedy problém nastavení parametrů matematického modelu tak, aby teoretické řešení (až na nějakou předem danou toleranci určenou např. přesností měření dat, která do modelu vstupují) odpovídalo empirickým datům.

Inverzní analýza má dva základní přístupy: Přímý (někdy v literatuře také dopředný [52]) a zpětný. Přímý postup (forward mode) je založen na formulaci tzv. chybové funkce. Ta se obecně definuje jako odchylka teoretických hodnot (odezva modelu) a empirických dat (výstupy z experimentu). Matematická formulace takovéto úlohy je pak určení minima takto zadané účelové funkce na předem vymezené množině možných hodnot volných parametrů modelu. Otázkou z pohledu teoretické matematiky je, jak pak měřit takovou „odchylku“, jestli nám model dává diskrétní hodnoty, nebo nějakou spojitou závislost atd. Potom pracujeme s vhodně zvolenou normou v předem daném normovaném lineárním prostoru. U přímého postupu se nejčastěji uplatňují právě evoluční

algoritmy. Druhý postup, zpětný (inverse mode), předpokládá, že existuje funkční závislost mezi vstupy a výstupy, u které alespoň lokálně existuje inverzní funkce.

4.2.2.1 Přímý postup inverzní analýzy – formulace problému

Problém inverzní budeme formulovat následovně: Uvažujme experiment E , který na základě zadaných vstupních parametrů x^E vrací výstupy y^E . Formálně lze tento vztah zapsat jako funkci experimentu E (4.13):

$$y^E = E(x^E) \quad (4.13)$$

Při řešení je pak fyzikální experiment nahrazen matematickým modelem M (4.14), (4.15). Dopředu se předpokládá, že matematický model M popisuje reálný experiment E pouze ve zjednodušené podobě, tj. popis není dokonalý, ale pouze dostatečně přesný, např. vzhledem k přesnosti určení (často měření) vstupních nebo výstupních dat.

$$M \approx E \quad (4.14)$$

$$y^M = M(x^M) \quad (4.15)$$

Tato aproximace má zejména význam z hlediska ekonomického. Náklady na výpočet matematického modelu M jsou nesrovnatelně nižší vzhledem k finanční náročnosti fyzikálního experimentu E .

4.2.2.2 Účelová funkce úlohy

Účelová funkce (v tomto případě chybová) je pak definovaná předpisem (4.16).

$$F(x^M) = \|y^E - M(x^M)\|_N \quad (4.16)$$

V této definici je $\|\cdot\|_N$ vhodná norma ve zvoleném normovaném lineárním prostoru. Při takto obecné formulaci problematiky není třeba dopředu předpokládat, jakého datového typu jsou vstupní a výstupní proměnné. Mohou to být aritmetické vektory (např. výstup z metody sítí), resp. spojité funkce více proměnných (splajny z metody konečných prvků) podle toho, jakou numerickou metodou je řešen uvažovaný matematický model. Např. v diskrétním případě aritmetických vektorů nemusí být použita jen např. klasická euklidovská norma. Může se pracovat např. s různými váženými normami, různým způsobem v takovéto vážené normě volit jednotlivé váhy apod., což pro optimalizace dává další stupně volnosti a umožňuje lépe postihnout jednotlivá specifika řešeného inženýrského problému. Následně je třeba, na předem dané množině možných hodnot vstupních parametrů, hledat optimum \hat{x}^M , neboli takové nastavení modelu M , které co nejlépe vystihuje předem daná empirická data y^E (4.17).

$$\hat{x}^M = \operatorname{argmin} F(x^M) \quad (4.17)$$

V provedené kalibraci bylo prvním krokem vhodné zvolení mezních intervalů hodnot kalibrovaných parametrů. Tyto intervaly byly voleny tak, aby v procesu jednotlivých kroků genetického algoritmu jejich optimalizace nemohlo dojít k změně tvaru funkce kalibrovaných modelů predikce mezní tahové síly. Pro vytvoření nulté generace parametrů byly intervaly nastaveny na hodnoty uvedené v Tab. 4-1.

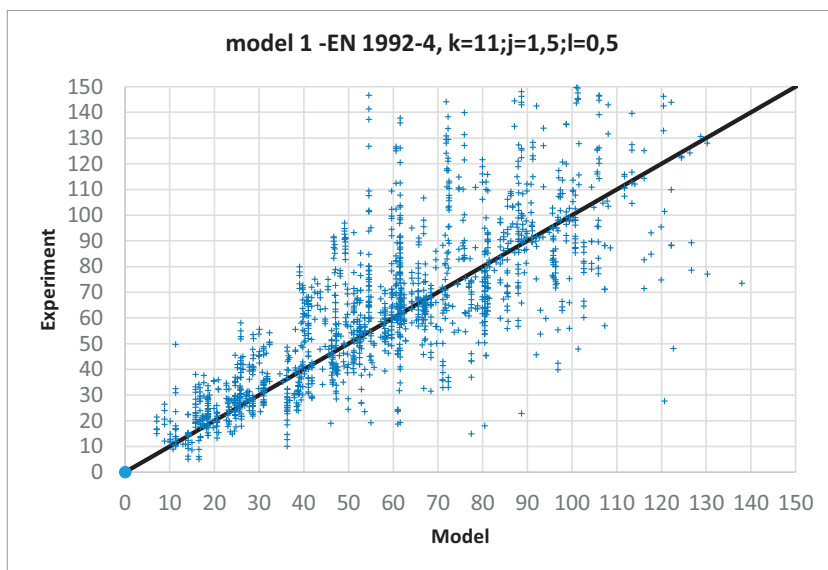
Tab. 4-1 Mezní hodnoty pro nultou generaci kalibrovaných parametrů

optimalizovaný parametr	k	j	l	a	b	c
spodní hranice intervalu	5	1	0,2	0,5	0,1	0,0
horní hranice intervalu	20	2	0,8	1,2	3	1

4.3 SROVNÁNÍ MODELŮ S DATABÁZÍ EXPERIMENTÁLNÍCH DAT – PROVEDENÉ KALIBRACE

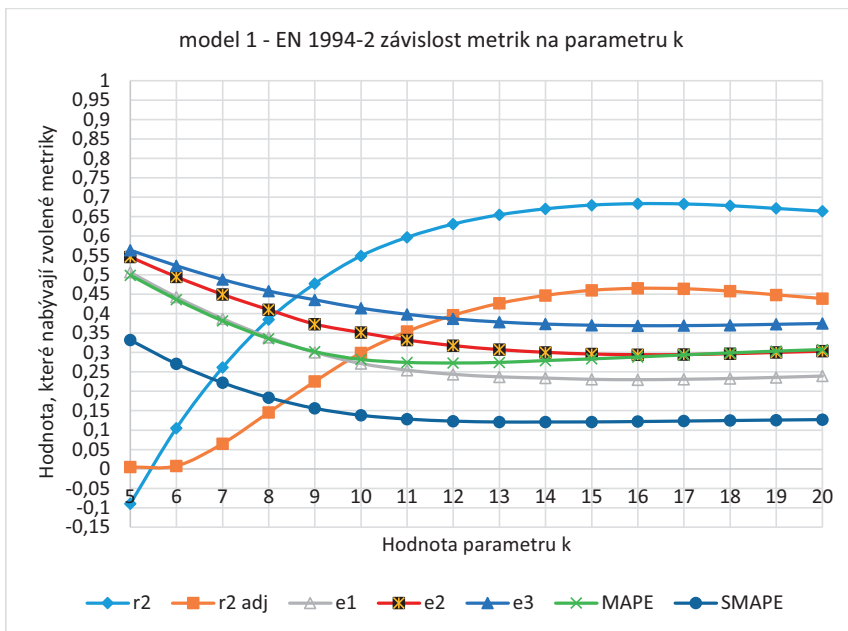
4.3.1 Kalibrace modelu 1 pro přiléhavost k experimentálním výsledkům

Graf na Obr. 4-2 je grafem párových dvojic $[y_i, \hat{y}_i]$ výsledků modelu predikce pro model dle vztahů (4.10) a (4.11), s parametry $k = 11; j = 1,5; l = 0,5$ dle ČSN EN 1992-4. V uvedené normě jsou parametry $j = 1,5; l = 0,5$ funkce predikce poruchy betonu (vycházející z metody CCD) konstantní a pro jednotlivé typy kotev, případně typ betonu, se mění pouze parametr k .



Obr. 4-2 Párový graf výsledků experimentů a modelu predikce dle ČSN EN 1992-4

Obr. 4-3 zobrazuje výsledky metrik (4.1), (4.3), (4.4), (4.5), (4.6), (4.7), (4.8) a (4.9), pro stejný model se změnou parametru k v intervalu $5 \leq k \leq 20$.



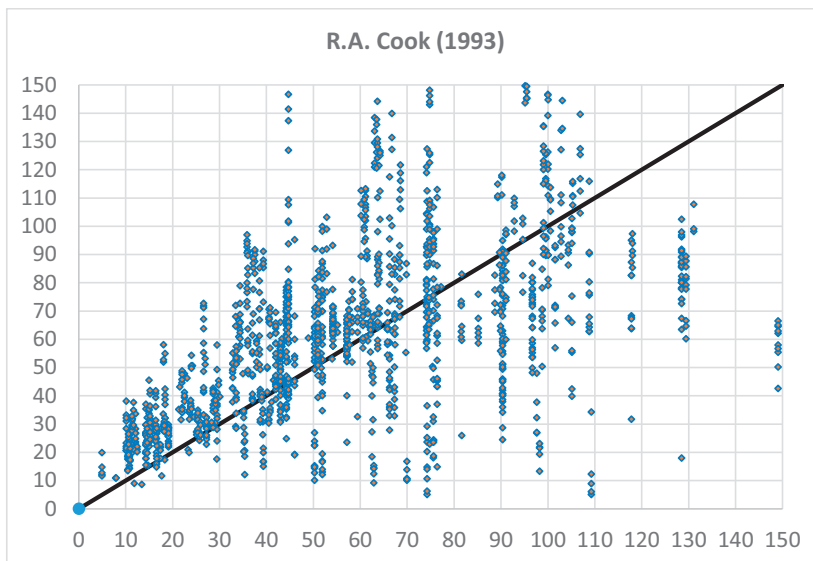
Obr. 4-3 Změna metrik pro model dle EN 1994-2 s různou hodnotou parametru k

Z Obr. 4-3 je patrné, že pro zvolený model a použitou databázi výsledků experimentů všechny použité metriky, s výjimkou MAPE, dosahují zlomových hodnot pro proměnný parametr k mezi hodnotou 16 a 17. Kritérium $e2$ dosahuje minima 0,2943 při hodnotě $k = 16,0$, kritérium MAPE dosahuje minima 0,2728 při hodnotě $k = 12,2$. Zjednodušeně lze o tomto kritériu prohlásit, že výsledky modelu se od experimentů průměrně liší o 27,28 %. Všechny zvolené metriky s rostoucím parametrem k postupně konvergují ke stabilní hodnotě. To je způsobeno tím, že v daném modelu je mezní hodnota zatížení minimem z hodnot dle vztahů (4.10) a (4.11). Při rostoucí hodnotě parametru k se stává rozhodujícím (na něm nezávislý) vztah (4.11), tzn. o mezním tahovém zatížení rozhoduje mezní napětí na kontaktech.

Z vyhodnocení vyplývá, že tento model s parametrem $k = 11$ drobně podhodnocuje výsledky oproti experimentům. Obdobně je tomu i u modelu uvedeného v evropské směrnici pro technické schválení ETAG, který pro kotvu bez hlavy instalovanou v netrhlinovém betonu doporučuje hodnotu parametru $k = 10,2$. Ještě konzervativnější model je obsažen v normě ACI 318-19, která doporučuje použít hodnotu parametru $k = 7$, pro trhlinový beton. Ve všech těchto dokumentech je obsažen tento identický model lišící se pouze hodnotou parametru k .

Pomocí výše popsaných použitých genetických algoritmů byla v rámci popisované analýzy provedena kalibrace parametrů l a j modelu 1 s použitím konzervativně nastavených hranic intervalu výběru jejich nulté generace. V procesu kalibrace se ale ukázalo, že následující generace zvolených parametrů se limitně blížily zvoleným hranicím. Tento fakt obecně svědčí o nevhodném nastavení intervalů. Tento jev se ale projevoval i nadále při použití postupně stále širšího intervalu. Výsledkem řešení pak byla funkce se zcela jiným tvarem než původní funkce modelu predikce (4.11) s použitím doporučených hodnot parametrů $j = 1,5$; $l = 0,5$. Kalibrace modelu 1 změnou parametrů j a l se tedy ukázala jako nepříliš vhodná, jelikož se výsledná funkce vzdalovala původnímu tvaru funkce vycházejícího z experimentálního řešení.

Následující graf na Obr. 4-4 je grafem párových dvojic $[y_i, \hat{y}_i]$ výsledků modelu (2.5) publikovaným R.A. Cookem. Ve srovnání s modelem 1 dle (4.10) a (4.11) (Obr. 4-2) je zřejmý značně větší rozptyl jednotlivých výsledků experimentů s predikcí. Parametry tohoto modelu nebyly kalibrovány, ale byl zahrnut do vzájemného porovnání jednotlivých modelů s experimentálními daty s použitím zvolených metrik.



Obr. 4-4 Párový graf výsledků experimentů a modelu predikce - R. A. Cook (1993)

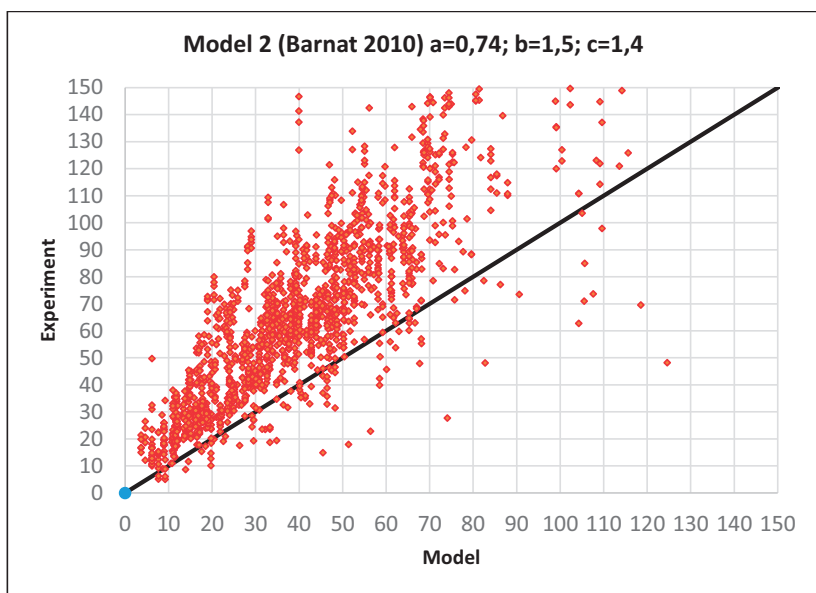
4.3.2 Kalibrace modelu 2 pro přiléhavost ke kalibrovanému modelu 1

Dalším směrem této analýzy je kalibrace modelu 2 dle (4.12) a jeho koeficientů a, b, c .

Graf na Obr. 4-5 je grafem párových dvojic $[y_i, \hat{y}_i]$ výsledků modelu predikce dle (4.12) s původními parametry $a = 0,74; b = 1,5; c = 1,4$. Z grafu je zřejmé, že model s těmito parametry je poměrně velmi konzervativní, jelikož oproti výsledkům experimentů výrazně podhodnocuje predikovanou mezní tahovou únosnost.

Kalibrace parametrů modelu 2 pro nejlepší přiléhavost ke kalibrovanému modelu 1 byla provedena za účelem verifikace vhodně zvolené funkce predikce mezní tahové únosnosti. Tato verifikace spočívala v hledání nalezení parametrů a, b, c pro model 2 (za pomoci výše uvedeného genetického algoritmu) pro co největší přiléhavost k modelu 1 a to pro různé hodnoty jeho parametru k . Jako ověřující chybová funkce bylo opět použito kritérium e_2 dle (4.6). Pro širší hodnocení přiléhavosti funkce modelu 2 k funkci modelu 1 byly následně vyčísleny všechny výše uvedené metriky pro přiléhavost takto kalibrovaných modelů k experimentálním výsledkům (Tab. 4-4). Grafické porovnání těchto modelů pro různá nastavení jsou znázorněna na Obr. 4-6.

Pro vzájemnou kalibraci modelů byly použity náhodně generované vstupní parametry modelů. Pro náhodný výběr těchto hodnot byly použity mezní intervaly uvedené v Tab. 4-2. Tyto intervaly byly zvoleny tak, aby jednotlivé generované hodnoty spadaly do oblasti běžných návrhových situací. Byl použit běžný rozsah průměru kotevního šroubu, kotevní délka v relativně úzkém intervalu odpovídajícímu předpokladu rovnoměrného rozložení napětí na kontaktech a relativně široký rozsah mezního napětí na kontaktu a pevnosti betonu v tlaku.



Obr. 4-5 Párový graf výsledků experimentů a modelu predikce – model 2 (Barnat 2010)

Tab. 4-2 Mezní hodnoty generování vstupů do modelu 1 a modelu 2

parametr	d [mm]	h_{ef} [mm]	τ_u [MPa]	f_c [MPa]
spodní hranice intervalu	8	8 d	10	5
horní hranice intervalu	36	12 d	30	100

Takto generované náhodné vstupy byly dosazeny do funkcí modelů (4.10), (4.11), (4.12). Následně byly pomocí genetického evolučního algoritmu hledány takové vstupní hodnoty parametrů a , b , c modelu 2 tak, aby zvolené kritérium e_2 bylo co nejnižší ve srovnání s výsledky modelu 1 pro vybrané hodnoty parametru k . Pro nalezené parametry byly oba modely dále srovnány ostatními výše popsány kritérii (metrikami).

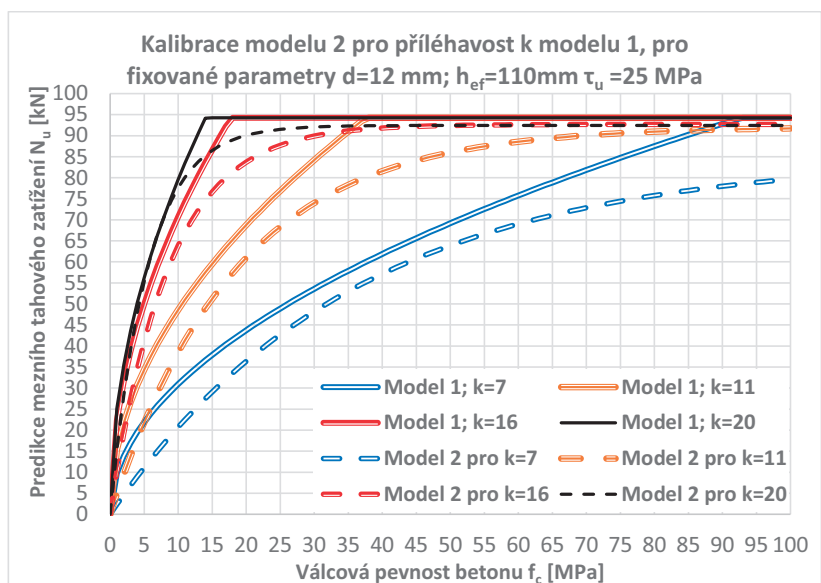
Jednotlivé dosažené hodnoty zvolených metrik (kritérii), po vzájemné kalibraci modelů uvedené v Tab. 4-3 jsou pro oba modely relativně srovnatelné. Trend vývoje těchto metrik je pro oba modely obdobný jako trend metrik při kalibraci modelu 1 pro největší přiléhavost k výsledkům experimentů (Obr. 4-3). Rozdíl v hodnotách metrik je menší v oblasti hodnot parametru k doporučeném dostupnými normativními dokumenty pro kotvy v netrhlinovém betonu a dále je ještě nižší pro hodnotu $k = 16$. Pro tuto hodnotu dosahují kritéria nejlepší hodnoty i pro přímou kalibraci modelu 1 experimentálními výsledky.

Grafy predikce modelů jsou v Obr. 4-6 znázorněny v závislosti na pevnosti betonu s tím, že ostatní vstupní parametry jsou fixovány na zvolených hodnotách. Z tohoto grafického vyjádření kalibrovaných modelů je zřejmé, že model 2 kalibrovaný na základě náhodně generovaných hodnot v rámci intervalů dle (Tab. 4-2) je z hlediska predikované mezní hodnoty tahového zatížení mírně konzervativní pro většinu hodnot, zejména při kalibraci na model 1 s nižší hodnotou parametru k .

Obecně je model 2 konzervativnější v oblasti, kde model 1 vykazuje ostré rozhraní v predikci podle minima vztahů (4.10) a (4.11). Funkce modelu 2 v této oblasti vyhlazuje průběh predikované mezní tahové síly a předpokládá kombinovanou poruchu betonu a selhání kontaktu.

Tab. 4-3 Hodnocení zvolené funkce modelu 2 kalibrované pro nejvyšší přiléhavost k funkci modelu 1

Model	Hodnoty parametrů						Výsledná hodnota zvolených metrik							
	k	j	l	a	b	c	r ²	r ² _{adj}	e ₁	e ₂	e ₃	MAPE	SMAPE	
Model 1	7	1,5	0,5				0,261	0,065	0,387	0,449	0,488	0,381	0,222	
Model 2				0,96	0,42	0,53	0,328	0,104	0,380	0,428	0,380	0,409	0,257	
Model 1	11	1,5	0,5				0,597	0,354	0,254	0,332	0,398	0,274	0,129	
Model 2				1,11	0,81	0,93	0,718	0,514	0,096	0,278	0,330	0,250	0,125	
Model 1	16	1,5	0,5				0,683	0,465	0,230	0,294	0,369	0,288	0,122	
Model 2				1,07	1,75	0,62	0,690	0,475	0,066	0,291	0,376	0,264	0,114	
Model 1	20	1,5	0,5				0,664	0,439	0,239	0,303	0,375	0,308	0,127	
Model 2				1,06	2,75	0,56	0,660	0,433	0,096	0,305	0,386	0,291	0,123	



Obr. 4-6 Grafické srovnání kalibrovaných modelů 1 a 2 pro vybrané parametry

Dále je model 2 konzervativnější zejména pro beton s nízkou pevností. Ze stínovaného zvýraznění metrik pro jednotlivé modely 1 a 2 v Tab. 4-3, (bílé hodnoty vykazují menší chybovost) je vidět, že konzervativnější model 2 vykazuje ve srovnání s databází experimentálních výsledků povětšinou menší chybovost, zejména v oblasti hodnot parametru k modelu 1, pro které jeho chybovost klesá. Na základě uvedených výsledků lze konstatovat, že funkce modelu predikce 2 dle (4.12) je vhodně zvolená. S použitím příslušných parametrů a , b , c je model 2 schopen predikovat srovnatelné hodnoty mezního tahového zatížení jako model 1 dle (4.10) a (4.11).

4.3.3 Kalibrace modelu 2 pro přiléhavost k experimentálním výsledkům

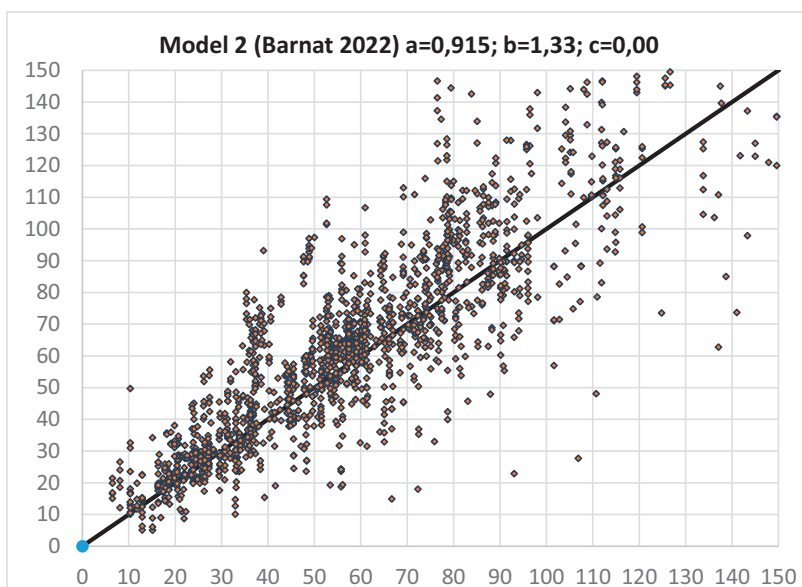
Třetím směrem této analýzy je kalibrace modelu 2 dle (4.12) a jeho koeficientů a , b , c pro co nejlepší přiléhavost k výsledkům experimentů. Výsledky kalibrace získané za pomoci výše

uvedeného genetického algoritmu jsou uvedeny v Tab. 4-4. Jako ověřující chybová funkce bylo opět použito kritérium e_2 dle (4.6). Jako výsledek byla použita desátá generace vstupních parametrů.

Tab. 4-4 Parametry modelu 2 kalibrovaného pro přiléhavost k experimentálním výsledkům

Parametr modelu	a	b	c
model 2 (Barnat 2022)	0,915	1,33	0,00

Pro nejlepší přiléhavost modelu 2 k výsledkům experimentů vychází parametr c modelu 2 velmi blízko až téměř na hranici intervalu zvoleného pro nultou generaci tzn. $c = 0,00$. Parametry a a b , se oproti původní verzi modelu dle (2.6) změnilly v rozsahu 10-25 %. Změnu funkce ale nelze hodnotit na základě změny jednotlivých parametrů, navíc v původním modelu byly použity jinak definované materiálové a geometrické parametry (viz vztahy (2.6) a (4.12)). Graf na Obr. 4-7 je grafem párových dvojic $[y_i, \hat{y}_i]$ výsledků modelu predikce dle (4.12) s hodnotami proměnných parametrů $a = 0,915$; $b = 1,33$; $c = 0,00$.



Obr. 4-7 Párový graf výsledků experimentů a modelu predikce – model 2 (Barnat 2022)

Srovnání vybraných modelů z pohledu dosažených hodnot výše uvedených kritérií (metrik) pro přilnavost modelů k experimentálním výsledkům je souhrnně uvedeno v Tab. 4-5. Porovnávání obsahuje také model 1 ve třech variantách (dle zvolených vstupních parametrů doporučených v normativních), dále model podle R.A. Cooka a model 2 ve variantě původních a kalibrovaných vstupních parametrů. Výsledky hodnot zvolených metrik p uvedené v Tab. 4-5 jsou stínovány škálou barev od nejsvětější (nejlepší hodnota) po nejtmaší (nejhorší hodnota).

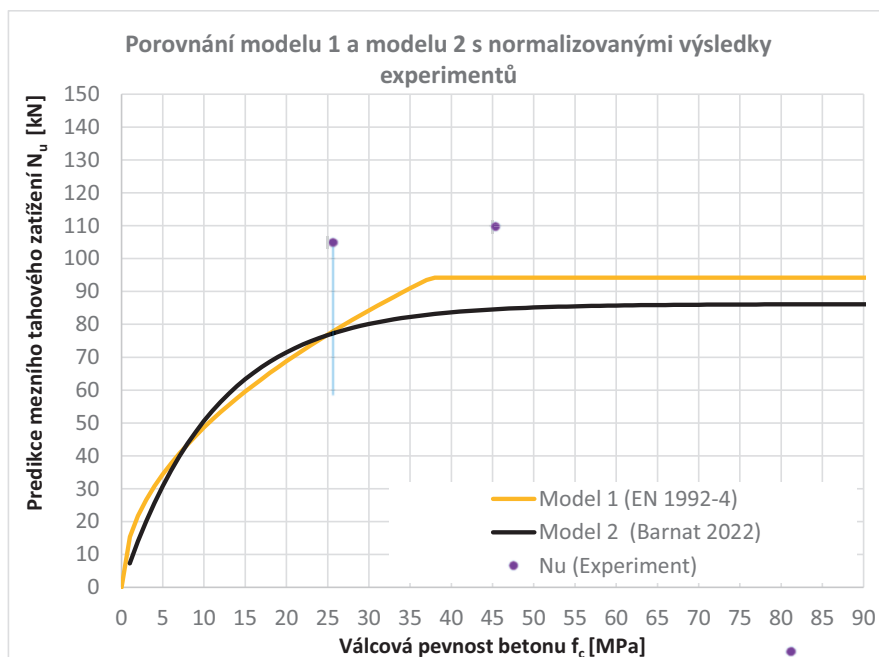
Z výsledků lze vyčíst, že přiléhavost modelu 1 vycházejícího z metody CCD pro použité experimentální výsledky je poměrně dobrá a lze ji ještě zlepšit kalibrací. Nejlepší přilnavost k použitým experimentálním výsledkům vykazuje kalibrovaný model 2 s parametry dle Tab. 4-4. Pro sestavení grafu na Obr. 4-8, zobrazující predikci mezní tahové síly podle uvedených modelů společně s výsledky experimentů v závislosti na válcové pevnosti betonu, byly nashromážděné výsledky normalizovány dle vztahu (4.18) na $d = 12 \text{ mm}$; $h_{ef} = 110 \text{ mm}$; $\tau_u = 20 \text{ MPa}$.

Tab. 4-5 Porovnání jednotlivých kritérií (metrik) pro různě kalibrované modely

Použitý model	Parametry	Výsledná hodnota zvolených metrik						
		r^2	r^2_{adj}	e_1	e_2	e_3	MAPE	SMAPE
Model 1 (EN 1992-4)	k=11; j=1,5; l=0,5	0,597	0,354	0,254	0,332	0,398	0,274	0,129
Model 1 (kalibrovaný)	k=16; j=1,5; l=0,5	0,683	0,465	0,230	0,294	0,369	0,288	0,122
Model 1 (ACI 318-19) pro trhlinový beton	k=7; j=1,5; l=0,5	0,261	0,065	0,270	0,449	0,488	0,381	0,222
Cook 1991		-5,464	29,946	0,308	1,330	1,971	0,710	0,218
Model 2 (Barnat 2010)	a=0,74; b=1,5; c=1,4	0,389	0,149	0,358	0,409	0,416	0,388	0,245
Model 2 (Barnat 2022)	a=0,915; b=1,33,5; c=0,0	0,773	0,596	0,041	0,249	0,303	0,230	0,109

Následující graf na Obr. 4-8 orientačně zobrazuje model 1 s parametrem $k = 11$. Kalibrovaný model 2. S experimentálními výsledky normalizované na vybrané vstupní parametry dle (4.18).

$$N_{u(norm)} = N_u \cdot \frac{12}{d} \cdot \left(\frac{110}{h_{ef}} \right)^{1,5} \cdot \frac{20}{\tau_u} \quad (4.18)$$



Obr. 4-8 Porovnání modelu 1 a modelu 2 s experimentálními daty

Jelikož tato normalizace není zcela platná pro všechny vstupy modelu 1 a modelu 2, je porovnání s výsledky experimentů v tomto grafu pouze orientační a má dokreslovat trend závislosti na pevnosti betonu. Důvodem pro zvolení této normalizace pro tvorbu uvedeného grafu je to, že i přes vyšší počet nashromážděných výsledků experimentů existuje v databázi pouze relativně malé množství dat, které mají rozdílný pouze parametr pevnosti betonu.

5 SHRNUTÍ A ZÁVĚR

Habilitační práce prohlubuje některé poznatky v oblasti působení dodatečně osazovaných chemických kotev zejména pro použití v betonu. V této problematice probíhá poměrně intenzivní výzkum již několik dekád, nicméně vzhledem k trendu vývoje nových vysokohodnotných materiálů je třeba i nadále tyto poznatky aktualizovat.

Problematika řešená v této práci je v souladu se stanovenými cíli rozdělaná na dvě dílčí oblasti. Obdobně je tedy členěna i tato kapitola shrnující a komentující jednotlivé dosažené výsledky.

5.1 KONTAKTNÍ MATERIÁLY – METODIKA ZKOUŠENÍ, OVĚŘOVÁNÍ VLIVU PLNIV

První oblast, kterou se prezentovaný výzkum zabýval je problematika stanovení mezního napětí na rozhraní mezi materiály v souvislosti s vývojem nových kontaktních materiálů se specifickými užitnými vlastnostmi.

V rámci prezentovaného výzkumu byla pro tuto oblast modifikována jedna z nejdůležitějších zkoušek pro ověření mezního napětí na rozhraní – omezená zkouška. Modifikace spočívá v nahrazení betonového tělesa tělesem ocelovým s otvorem opatřeným vnitřním závitem. Takto modifikovaná zkouška eliminuje vliv betonu na výsledné sledované parametry a je tedy vhodná pro sledování výsledných vlastností lepidel při jejich vývoji. Modifikace má i ekonomický efekt, jelikož ocelová tělesa lze po vyčištění použít opakovaně. Takto modifikovaná zkouška má ale svá specifika a limity. Výsledky této zkoušky např. nejsou směrodatné pro kotvy instalované v betonu s nízkou pevností, která má na výsledné chování kotvy zásadní vliv. Porovnáním výsledků dosažených pomocí standardní omezené zkoušky v betonu s vysokou pevností a modifikované omezené zkoušky v ocelových tělesech bylo zjištěno, že výsledky z hlediska zjištěných mezních napětí na rozhraních jsou srovnatelné. Dle očekávání se liší změřené posuny kotevního šroubu v závislosti na tuhosti zkušebního tělesa-přípravku.

Dílčím tématem v rámci této oblasti výzkumu bylo ověření možnosti zlepšení některých užitných vlastností epoxidových a vinyloesterových lepidel pomocí různých plniv. Testovány byly konvenční mechanické přísady a dále zástupci nanoplňiv a grafenoidů.

Z výsledků testů různých mechanických přísad do kontaktních materiálů, se jako neefektivnější jeví použití přísady mletého vápence za účelem stabilizace pracovního diagramu a také za účelem významného snížení celkových nákladů na jednotku objemu výsledného kontaktního materiálu. A to i za cenu přijatelného snížení výsledných pevnostních charakteristik. Např. pro testovaný vzorek epoxidu CHS 531 se jedná o snížení dosaženého mezního napětí na kontaktech cca 30 % při obsahu 80 % mletého vápence ve vzorku. Naopak u přísad ve formě skleněných a uhlíkových vláken mohou přispět ke stabilizaci pracovního diagramu vzorku, ale vliv na výsledné pevnostní charakteristiky byl pro testované typy a koncentrace vláken jen velmi malý. Možnost navýšení mechanických vlastností pomocí konvenčních plniv se tedy u testovaných vzorků ukázala jako neefektivní a tím pádem i neekonomická. Použití nanoplňiv se ukázalo problematické v oblasti přípravy vzorků s ohledem na dosažení dostatečné dispergace nanočástic. Navíc výsledky provedených testů neprokázaly pozitivní vliv použití nanoplňiv na sledované mechanické vlastnosti. Dále byly testovány vzorky se speciálně modifikovanými grafenoidy. Bylo zkoušeno několik typů a koncentrací grafenoidových přísad. Z výsledků je ale patrné, že přínos uvedených přísad v daných typech a koncentracích, které v testech byly použity, je prakticky neznamenný.

Dílčí částí výzkumu byla i modifikace vybraných receptur lepidel pro použití v nízkých teplotách. U takto modifikovaných lepidel je stěžejním problémem rychlost vytvrzování a její akcelerace. Z testovaných postupů se ukázal jako vhodnější postup využívající pro urychlení aktivátory.

V porovnání s postupem spočívajícím v náhradě aminového tvrdidla za thiolové sice nedosahuje takové efektivity urychlení, nicméně nedochází k výraznému ovlivnění mechanických vlastností v porovnání se směsí bez aktivátoru.

V rámci provedené analýzy se podařilo připravit vzorek epoxidové pryskyřice, který při krátkodobém statickém testu byl schopen dosáhnout mezního napětí na rozhraní s kotevním šroubem v hodnotě 30 MPa a je schopen dosáhnout této pevnosti do 48 hodin i při teplotě 5 °C.

5.2 KALIBRACE VYBRANÝCH MODELŮ PREDIKCE MEZNÍ TAHOVÉ SÍLY

Druhá část práce se zabývala kalibrací vybraných primárních modelů predikce mezní tahové síly pro dodatečně osazované chemické kotvy, pro porušení v kotevní oblasti (tzn. vyjma porušení kotevního šroubu přetržením).

Pro kalibraci byla sestavena databáze výsledků z vlastních experimentů autora, a také dostupných publikovaných dat jiných autorů. Databáze výsledků, která obsahuje experimenty s kotvami v širokém rozsahu vstupních geometrických a materiálových charakteristik a zároveň jde o takové konfigurace kotev, ke kterým je k dispozici výsledek omezené i neomezené zkoušky. Tzn. jsou k dispozici informace i o mezní hodnotě napětí na rozhraní materiálů, které je možné z výsledků omezené zkoušky pro danou konfiguraci kotvy určit.

Pro kalibraci na základě sestavené databáze výsledků byl jako první použit model uvedený v aktuálních platných normativních dokumentech jako je EN 1992-4 a ACI 3118-19, který vychází z „Concrete Capacity Design Method“ (CCD). Tento model predikuje mezní tahové zatížení pouze jako funkci pevnosti betonu a geometrických parametrů kotvy a používá se v kombinaci s modelem rovnoměrného napětí na kontaktu mezi materiály, který vychází z geometrických parametrů a hodnoty mezního tahového napětí na kontaktu.

Druhým kalibrovaným modelem je model navržený autorem práce. Tento model používá jednu spojitou funkci pro predikci mezního tahového zatížení, která (podobně jako další typy modelů uvedené v této práci) kombinuje vliv pevnosti betonu a kvality spojení mezi materiály (zprostředkovaným kontaktním materiálem – lepidlem) společně s geometrickými parametry kotvy. Výsledky obecně publikovaných experimentů ukazují, že pro obvyklé vstupní parametry chemických kotev, je porucha v oblasti právě kombinací selhání kontaktů a betonu.

Pro kalibraci těchto modelů s více empiricky nastavitelnými parametry byla použita metoda genetického evolučního algoritmu, společně s několika chybovými funkcemi „normami“ pro hodnocení přiléhavosti modelů k experimentálním výsledkům i k vzájemné přiléhavosti funkcí modelů.

Pro data ze sestavené databáze a intervaly běžných vstupních parametrů dodatečně osazovaných chemických kotev (Tab. 4-2), výsledky kalibrací ukázaly, že:

- Model na bázi CCD lze kalibrovat pro vyšší přiléhavost k experimentálním výsledkům. Ta je dle většiny zvolených hodnotících kritérií lepší pro vyšší hodnoty proměnného parametru (empirické konstanty) k , než je doporučována v normativních dokumentech.
- Funkci navrženého modelu predikce je možné kalibrovat tak, aby predikce přiměřeně odpovídala modelu na bázi CCD.
- Model navržený autorem kalibrovaný pro co nejvyšší přiléhavost k experimentálním výsledkům vykazuje lepší hodnoty zvolených hodnotících kritérií než model na bázi CCD.

6 BIBLIOGRAFIE

1. Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 4: Design of fastenings for use in concrete. **2018**.
2. Building Code Requirements for Structural Concrete ACI 318-19. **2019**, doi:10.14359/51716937.
3. ETAG 001: Guideline for european technical approval of metal anchors for use in concrete. *Annex A: Details of tests* **2013**.
4. Cook, R.A.; Kunz, J.; Fuchs, W.; Konz, R.C. Behavior and design of single adhesive anchors under tensile load in uncracked concrete. *Aci Structural Journal* **1998**, *95*, 9-26.
5. Sell, R. Tragfähigkeit von mit Reaktionsharzmörtelpatronen versetzten Betonankern und deren Berechnung. **1973**, *Die Bautechnik* 1973, *Heft 10*, S. 333 - 340.
6. Sell, R. Über Festigkeit und Verformung mit Reaktionsharzmörtelpatronen versetzten Betonankern. **1973**, *Verbindungstechnik* 1973, *Heft 8*, S. 11 - 16.
7. Kunz, J.; Cook, R.A.; Fuchs, W.; Spieth, H. Tragverhalten und Bemessung von chemischen Befestigungen. **1998**, *Beton - und Stahlbetonbau* 1998, *Hefte 1 und 2*.
8. Eligehausen, R.; Mallée, R.; Rehm, G. Befestigungstechnik. **1997**, *Betonkalender* 1997.
9. Eligehausen, R.; Mallée, R.; Rehm, G. Befestigungen mit Verbundankern. **1984**, *Betonwerk + Fertigteiltchnik* 1984, *Heft 10*, S. 686-692, *Heft 11*, S. 781-785, *Heft 12*, S. 825-829.
10. Cook, R., A.; Bishop, M., C.; Hagedoorn, H., S.; Sikes, D., E.; Richardson, D., S.; Adams, T., L.; De Zee, C., T., Adhesive-Bonded Anchors: Bond Properties and Effects of In-Service and Installation Conditions. **1994**.
11. Meszaros, J.; Eligehausen, R. Ausziehversuche mit Injektionsdübeln HH M12, WW M12 und FXM12, die in feuchten Beton gesetzt wurden. Einfluß der Bohrlochreinigung. **1998**, *IWB-Bericht No. 98/2-2/2*.
12. Meszaros, J.; Pregarnier, T.; Eligehausen, R. Ausziehversuche mit Injektionsdübeln HH M12. Einfluß der Art der Abstützung, der Zuschlagkörnung, der Betonfestigkeit und der Bohrlochrauigkeit auf die maximale Ausziehlast. **1998**, *IWB-Bericht No. 1/99-98/2*.
13. Meszaros, J.; Pergartner, T.; Eligehausen, R. Ausziehversuche mit Injektionsdübeln HH M12. Einfluß der Art der Abstützung, der Zuschlagkörnung, der Betonfestigkeit und der Bohrlochrauigkeit auf die maximale Ausziehlast. **1998**, *IWB-Bericht No. 1/99-98/2*.
14. Meszaros, J.; Eligehausen, R. Ausziehversuche mit Injektionsdübeln HH, SP und WW. Einfluß der Art der Abstützung, der Betonfestigkeit und der Dübelgröße auf die maximale Auszugslast **1998**, *IWB-Bericht No. 98/1-2/1*
15. Meszaros, J.; Eligehausen, R. Einfluss der Bohrlochreinigung und von feuchtem Beton auf das Tragverhalten von Injektionsdübeln (Influence of hole cleaning and of humid concrete on the load-bearing behaviour of injection anchors). **1998**, *Report No. 98/2-2/2*
16. Barnat, J.; Prokes, J.; Bajer, M.; Bezdek, O.; Vild, M. Simplified Testing of the Bond Strength of Adhesives Used for Bonded Anchors. *Materials* **2021**, *14*, 28, doi:10.3390/ma14123298.
17. Mészáros, J. Tragverhalten von Einzelverbunddübeln unter zentrischer Kurzzeitbelastung. *Von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Stuttgart genehmigte Abhandlung zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)* **2002**.
18. Fuchs, W.; Eligehausen, R.; Breen, J.E. CONCRETE CAPACITY DESIGN (CCD) APPROACH FOR FASTENING TO CONCRETE. *Aci Structural Journal* **1995**, *92*, 73-94.
19. Eligehausen, R.; Cook, R.A.; Appl, J. Behavior and design of adhesive bonded anchors. *Aci Structural Journal* **2006**, *103*, 822-831.

20. Eligehausen, R.; Balogh, T. BEHAVIOR OF FASTENERS LOADED IN TENSION IN CRACKED REINFORCED-CONCRETE. *Aci Structural Journal* **1995**, *92*, 365-379.
21. Cook, R.A.; Collins, D.M.; Klingner, R.E.; Polyzois, D. LOAD-DEFLECTION BEHAVIOR OF CAST-IN-PLACE AND RETROFIT CONCRETE ANCHORS. *Aci Structural Journal* **1992**, *89*, 639-649.
22. Cook, R.A.; Doerr, G.T.; Klingner, R.E. BOND STRESS MODEL FOR DESIGN OF ADHESIVE ANCHORS. *Aci Structural Journal* **1993**, *90*, 514-524.
23. Cook, R.A. BEHAVIOR OF CHEMICALLY BONDED ANCHORS. *Journal of Structural Engineering-Asce* **1993**, *119*, 2744-2762, doi:10.1061/(asce)0733-9445(1993)119:9(2744).
24. Barnat, J. Analýza chování ocelových lepených kotev. *Disertační práce* **2010**.
25. Barnat, J.; Bajer, M.; Vyhánková, M. Bond strength of chemical anchor in high-strength concrete. In Proceedings of the Procedia Engineering, 2012; pp. 38-43.
26. Bajer, M.; Barnat, J. The glue-concrete interface of bonded anchors. *Construction and Building Materials* **2012**, *34*, 267-274, doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.02.030.
27. Barnat, J.; Bajer, M. Glue-concrete interface of bonded anchor - Experiment and model. In Proceedings of the Adaptive Modeling and Simulation 2013 - Proceedings of the 6th International Conference on Adaptive Modeling and Simulation, ADMOS 2013, 2013; pp. 89-94.
28. Barnat, J.; Bajer, M. Fibre-reinforced adhesive for structure anchoring. In Proceedings of the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2015.
29. Bajer, M.; Vild, M.; Barnat, J.; Holomek, J. Influence of selected parameters on design optimisation of anchor joint. In Proceedings of the Proceedings of the 12th International Conference on Steel, Space and Composite Structures, 2014; pp. 149-158.
30. Ducháček, V. Polymery, výroba, vlastnosti, zpracování, použití. **2006**.
31. Sheng, H.Q.; Wang, X.J.; Pan, Z.G.; Chen, X. Thermodynamics and kinetics of one-step curing process for vinyl ester-unsaturated polyester resin in low shrinkage. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* **2017**, *130*, 823-833, doi:10.1007/s10973-017-6403-4.
32. Pham, H.Q.; Marks, M.J. Epoxy Resins. In *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*.
33. Kavimani, V.; Prakash, K.S.; Thankachan, T.; Udayakumar, R. Synergistic improvement of epoxy derived polymer composites reinforced with Graphene Oxide (GO) plus Titanium di oxide(TiO₂). *Composites Part B-Engineering* **2020**, *191*, 7, doi:10.1016/j.compositesb.2020.107911.
34. Xie, Y.K.; Liu, C.H.; Liu, W.Q.; Liang, L.Y.; Wang, S.; Zhang, F.Y.; Shi, H.Y.; Yang, M.P. A novel approach to fabricate polyacrylate modified graphene oxide for improving the corrosion resistance of epoxy coatings. *Colloids and Surfaces a-Physicochemical and Engineering Aspects* **2020**, *593*, 10, doi:10.1016/j.colsurfa.2020.124627.
35. Wolk, A.; Rosenthal, M.; Weiss, J.; Voigt, M.; Wesendahl, J.N.; Hartmann, M.; Grundmeier, G.; Wilhelm, R.; Meschut, G.; Tiemann, M.; et al. Graphene oxide as flexibilizer for epoxy amine resins. *Progress in Organic Coatings* **2018**, *122*, 280-289, doi:10.1016/j.porgcoat.2018.05.028.
36. Zamal, H.H.; Barba, D.; Aissa, B.; Haddad, E.; Rosei, F. Failure analysis of self-healing epoxy resins using microencapsulated 5E2N and carbon nanotubes. *Smart Materials and Structures* **2021**, *30*, 12, doi:10.1088/1361-665X/abd005.
37. Wang, E.L.; Dong, Y.B.; Islam, M.Z.; Yu, L.M.; Liu, F.Y.; Chen, S.J.; Qi, X.M.; Zhu, Y.F.; Fu, Y.Q.; Xu, Z.H.; et al. Effect of graphene oxide-carbon nanotube hybrid filler on the mechanical property and thermal response speed of shape memory epoxy composites. *Composites Science and Technology* **2019**, *169*, 209-216, doi:10.1016/j.compscitech.2018.11.022.

38. Wang, M.N.; Wang, B.; Liu, C.; Zhang, G.; Wan, Y.; Zhang, F. Mechanical response and failure mode of large size honeycomb sandwiched composites under in-plane shear load. *Molecules* **2019**, *24*, doi:10.3390/molecules24234248.
39. Basri, A.B.A.; Chae, D.W.; Lee, H. Investigation of the dynamic characteristics of a carbon-fiber-reinforced epoxy with adhesive-jointed structure. *Composite Structures* **2020**, *247*, 16, doi:10.1016/j.compstruct.2020.112499.
40. Prokeš, J., Bezděk, O., Barnat, J., Bajer, M., 2019. *Odborná zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích projektu FV10317za rok 2019* **2019**.
41. Cook, R.A.; Fagundo, F.E.; Biller, M.H. Tensile behavior and design of adhesive-bonded anchors and dowels. **1993**, *Transportation Research Record No. 1392*, 126-133.
42. Lehr, B.; Eligehausen, R. Zusammenfassender Bericht über zentrische Auszieh-versuche mit Verbunddübeln M8, M12 und M16 mit weiter und enger Abstützung **1998**, *IWB-Bericht No. 20/24-98/4*.
43. Cattaneo, S.; Muciaccia, G. Adhesive anchors in high performance concrete. *Materials and Structures* **2016**, *49*, 2689-2700, doi:10.1617/s11527-015-0677-4.
44. Caliskan, O.; Aras, M. Experimental investigation of behaviour and failure modes of chemical anchorages bonded to concrete. *Construction and building materials* **2017**, *156*, 362-375, doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.08.179.
45. Maziligüney, L. Tensile Behavior of Chemically Bonded Post-Installed Anchors in Low-Strength Reinforced Concretes. **2007**.
46. Meloun, M.; Militký, J. Statistická analýza experimentálních dat. **2004**.
47. Makridakis, S. ACCURACY MEASURES - THEORETICAL AND PRACTICAL CONCERNS. *International Journal of Forecasting* **1993**, *9*, 527-529, doi:10.1016/0169-2070(93)90079-3.
48. Goncalves, J.F.; Resende, M.G.C. Biased random-key genetic algorithms for combinatorial optimization. *Journal of Heuristics* **2011**, *17*, 487-525, doi:10.1007/s10732-010-9143-1.
49. Whitley, D. A GENETIC ALGORITHM TUTORIAL. *Statistics and Computing* **1994**, *4*, 65-85.
50. Ahn, C.W.; Oh, S.; Ramakrishna, R.S. On the practical genetic algorithms. In Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference, Washington, DC, Jun 25-29, 2005; pp. 1583-1584.
51. Hanak, T.; Tuscher, M.; Pribyl, O. Hybrid Genetic Algorithm-Based Approach for Estimating Flood Losses on Structures of Buildings. *Sustainability* **2020**, *12*, 16, doi:10.3390/su12073047.
52. Kučerová, A. *Identification of nonlinear mechanical model parameters based on softcomputing methods. PhD thesis* **2007**.

Abstract

The habilitation thesis deals with the topic of bond strength of post-installed chemical anchors in concrete and then calibration of selected models predicting their tensile load bearing capacity. In the introduction of the thesis, the most commonly used systems of chemical anchors and the principles of their use are described. In addition, the introductory part of the thesis focuses on the basic design case of one post-installed chemical anchor loaded by static tensile force, without other geometric influences. This issue has been widely discussed from the beginning of the use of these anchor systems in the second half of the twentieth century until today.

Although it is a relatively simple concept, the fact that three different materials are involved in the final behaviour of a joint formed in this way, which also has two material interfaces between them, makes the description of its actual behaviour an ongoing problem. In the second half of the twentieth century and the first decade of the twenty-first century, research in this field was most intensive in Germany and the USA. Based on the evaluation of experimental research, various models were developed to predict the capacity of post-installed anchors under static tensile loading. One of the most important is the "CCD-Concrete Capacity Design Method", which is the basis for design procedures that are currently implemented in major normative documents.

The habilitation thesis, in its experimental part, focuses in particular on the problem of determining and the possibility of developing one of the basic parameters influencing the resulting capacity of the anchor loaded in tension. This parameter is the ultimate stress at the material interface, often referred to as "bond strength", which is a parameter primarily dependent on the properties of the contact material - the adhesive. The bond strength could be limiting parameter for load bearing capacity, in certain specific conditions.

This aspect is particularly aggregated when using higher strength concrete. The topic of the experimental part of the work was to investigate the possibility of improving the performance properties of commonly used adhesives by using additives in the form of carbon, glass fibres or nanofibres and nanotubes. Also, the goal was to observe the effect of these additives on the resulting anchor load capacity. The research has also been extended to the application of these adhesives at low installation temperatures. In this experimental part of the work, a commonly used "confined test" for determining the load carrying capacity in case of contact failure between materials was modified in order to simplify and streamline it for use, for example, in adhesive development.

In the next section, the key topic is the models for predicting the ultimate tensile load of a single anchor. A sub-objective of this part of the thesis was to compile a wider database of freely available experimental results and then calibrate published models using these data. Two models were calibrated. The first model is the model used in the currently valid normative documents, based on the CCD method. In this model, each possible failure in the anchorage area is monitored separately.

The second calibrated model is the model proposed by the author. The proposed model simplifies the practical design by using a single continuous function to predict the load capacity for an anchor failure in the anchorage region. The aforementioned calibration results in values of the variable parameters of the above models with which the model function has a better fit to the experimental results.