

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 600

ISSN 1213-4198

thesis IS

Ing. Jan Barnat

**Analýza chování
ocelových lepených kotev**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ
Ústav kovových a dřevěných konstrukcí

Ing. Jan Barnat

ANALÝZA CHOVÁNÍ OCELOVÝCH LEPENÝCH KOTEV

BEHAVIOUR ANALYSIS OF STEEL BONDED ANCHORS

Zkrácená verze Ph. D. Thesis

Obor: 3607V009 Konstrukce a dopravní stavby

Školitel: Doc. Ing. Miroslav Bajer, CSc.

Oponenti: Prof. RNDr. Ing. Petr Štěpánek, CSc.
Prof. Ing. František Wald, Csc.
Doc. Ing. Alois Materna CSc., MBA.

Datum obhajoby: 31.8.2010

KLÍČOVÁ SLOVA

lepené kotvy, experiment, numerický model, analýza chování, mezní únosnost

KEY WORDS

bonded anchors, experiment, numerical model, behaviour analysis, load carrying capacity

SDĚLENÍ

Práce je k dispozici na Ústavu kovových a dřevěných konstrukcí
Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně.

Výsledky byly získány za finanční podpory projektu MŠMT č.1M0579, v rámci aktivit výzkumného centra CIDEAS a projektů GAČR 103/09/1258

© Jan Barnat, 2010

ISBN 978-80-214-4162-0

ISSN 1213-4198

OBSAH:

1. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY	5
1.1. Obecná charakteristika problematiky kotvení	5
1.2. Kvalita lepeného kontaktu	7
1.3. Únosnost chemických kotev	8
1.3.1. Základní únosnost jedné kotvy při zatížení tahem	8
2. CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE	11
3. EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA	12
3.1. Experimenty s chemickou kotvou zatíženou statickou tahovou silou	12
3.2. Zkoušky ověřující kvalitu lepeného kontaktu	13
4. TEORETICKÁ ČÁST – NUMERICKÁ ANALÝZA	16
5. ANALÝZA VÝSLEDKŮ A ZOBECNĚNÍ PROBLÉMU	18
5.1. Analýza výsledků experimentů a numerických modelů	18
5.1.1. Vliv okrajových podmínek	19
5.1.2. Vliv materiálových charakteristik betonu a lepidla	21
6. ZÁVĚR	25
7. LITERATURA	26
8. CURRICULUM VITAE	27
9. ABSTRACT	28

1 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

1.1 OBECNÁ CHARAKTERISTIKA PROBLEMATIKY KOTVENÍ

Kotvení stavební konstrukce představuje samostatnou problematiku jejího návrhu i realizace. Obecně zasahuje kotvení do celé řady specifických oblastí ve vztahu ke stavební konstrukci. Kotví se různé části konstrukce jako prvky obvodového nebo střešního pláště, prvky stropů a podhledů ale i celé konstrukční dílce. Také základní materiál, do něhož se kotvy aplikují, je různý. Nejčastěji je to prostý nebo vyztužený beton, dále pak zdivo nebo materiály na bázi dřeva.

Disertační práce se blíže věnuje únosnosti běžně používaných lepených kotev do prostého nebo železového betonu. Charakteristickým příkladem použití je vytvoření spoje, který zprostředkovává napojení horní části konstrukce na spodní stavbu. Obecně lze říci, že přibližně 30% poruch konstrukcí nastává právě ve spojích. Jde tedy o jeden z nejdůležitějších detailů konstrukce. Toto spojení totiž musí být schopno přenést veškeré účinky zatížení z konstrukce do základů. Při navrhování je proto třeba brát zřetel na prostý fakt, že konkrétní návrh kotvení má přímou vazbu na tvorbu výpočtového modelu konstrukce. Kotvení totiž téměř vždy určuje okrajové podmínky výpočtového modelu, protože tuhost jeho spojení výrazně ovlivňuje průběhy vnitřních sil a přetvoření na konstrukci.

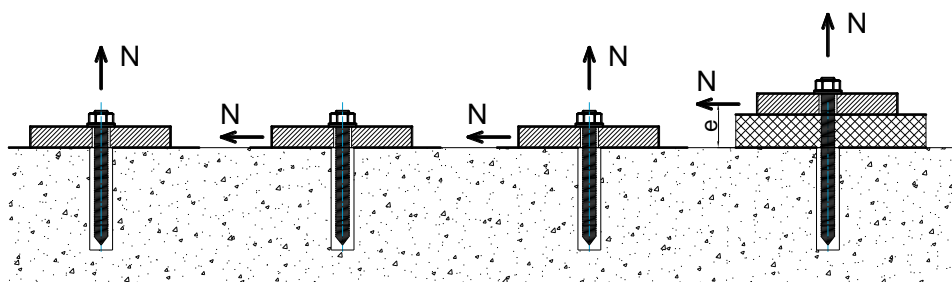
Sledovanou skupinou typů kotvení jsou kotvy chemické (běžně se tyto typy kotev také označují jako lepené či adhezivní). K aktivaci chemické kotvy není zapotřebí vnesení vnější síly. Za aktivaci lze označit chemický proces tuhnutí a tvrdnutí hmoty použité jako lepidlo mezi kotevním šroubem a základním materiálem. Jeho průběh je přitom závislý na chemickém složení konkrétního lepidla a dále pak na vnějších podmínkách. Čas aktivace kotvy, tedy čas od instalace po možnost zatížení, je výrazně vyšší, než u mechanických kotev, především v závislosti na okolní teplotě vzduchu a teplotě základního materiálu. Nejrychleji tuhnoucí používaná lepidla mají dobu tvrdnutí v řádech několika desítek minut.

Zatížení z konstrukce přenáší kotva do spodní stavby - základního materiálu (betonu). Do betonu v oblasti kolem kotvy tedy vnáší napětí. Pokud se takto aktivované zóny betonu kolem kotev ve styčnicku neprolínají, můžeme pro zjednodušení sledovat působení pouze jedné kotvy v reakci na zatížení. Pokud se aktivované oblasti betonu prolínají, je třeba při popisu působení kotevního styčnicku tento fakt zohlednit. Popis působení kotevního systému je obvykle vyjádřen chováním jedné kotvy a zavedením součinitelů podmínek působení, redukujících její únosnost při působení ve skupině, např. dle směrnice pro evropské schválení ETAG.

Kotva ve styčnicku může být namáhána obecným zatížením. Odděleně můžeme sledovat chování kotvy v oblasti pod úrovní hrany betonu, při zatíženích majících následující charakter:

- zatížení tahovou silou,
- zatížení smykovou silou,
- zatížení kombinací tahové a smykové síly.

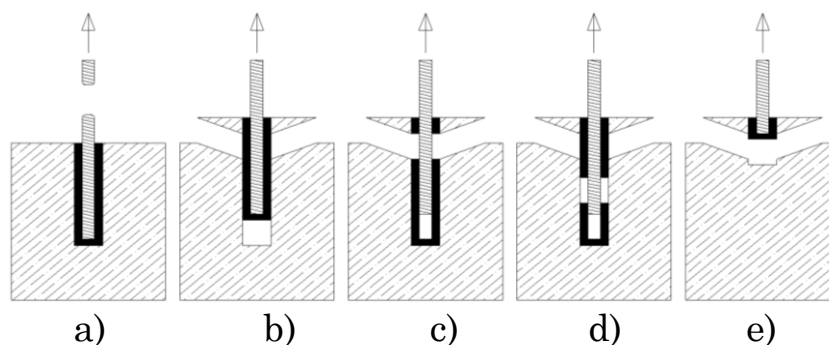
Kotevní šroub potom v části nad úrovní hrany betonu nebo jiného základního materiálu může být namáhán navíc ohybovým momentem, který může vzniknout například posouvajícími silami při nepřímém uložení horní stavby. Obr. 1.01.



Obr. 1.01 – Primární účinky zatížení na jednu kotvu

U lepených kotev je tvar poruchy betonu závislý na více parametrech. Tvar poruchy betonu, vytrhávaného kužele, zde není předem určen žádnou mechanickou částí kotevního šroubu. Pomyslný vrchol kužele betonu může být v různém místě kotevní délky, nejčastěji v dolní polovině. Problematikou mechanismu porušování chemické kotvy ztížené tahem se ve svých pracích zabývá celá řada autorů (Eligehausen, Cook, Malleé, Silva, Rehm a další). Společně tyto autoři spojují mechanismus porušování s parametrem popisujícím soudržnost mezi kotevním šroubem a lepidlem, respektive mezi lepidlem a okolním materiálem – betonem.

Porušení při zatížení tahem je výrazně ovlivněno fyzikálně mechanickými vlastnostmi lepidla. Proto můžeme separovat jednotlivé typy porušení podle hlavních parametrů, majících vliv na jejich mechanismus, a to na pět základních typů, viz Obr. 1.02. Každý z těchto typů porušení (mimo porušení „a“), Obr. 1.02 samostatně nastává pouze v extrémním případě.



Obr. 1.02 Typy porušení lepené kotvy při zatížení tahem

- a) *Porucha kotevního šroubu při dosažení mezní únosnosti materiálu šroubu tahem. Nastává v případě, že únosnost kotevní oblasti betonu je při dané geometrii a konfiguraci materiálů vyšší.*
- b) *Porušení soudržnosti mezi lepidlem a betonem. Může nastat při špatném vyčištění otvoru, nebo nedokonalém vytvrdnutí lepidla.*
- c) *Porušení soudržnosti mezi šroubem a lepidlem. Může nastat při použití šroubu s nevhodnou geometrickou úpravou.*
- d) *Porucha lepidla při namáhání tahem a smykem při špatné volbě nebo aplikaci lepicí hmoty.*
- e) *Porucha betonu. Tato porucha nastává v případě, že únosnost kotevní oblasti betonu je při dané geometrii a kombinaci materiálů výrazně nižší, než únosnost kotevního šroubu a lepidla.*

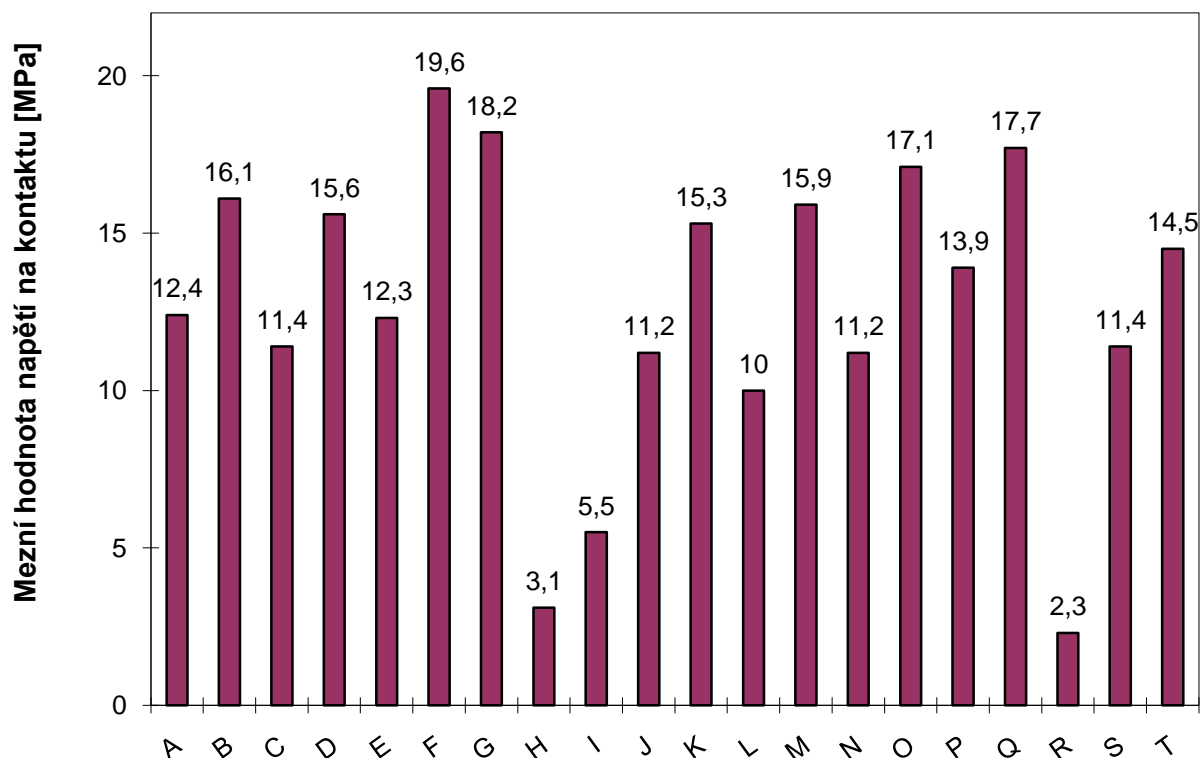
1.2 KVALITA LEPENÉHO KONTAKTU

Pro popis chování a stanovení mezní únosnosti jedné lepené kotvy zatížené tahovou silou je zásadním parametrem kvalita kontaktu mezi lepidlem a betonem, respektive mezi kotevním šroubem a lepidlem. Kontakt mezi lepidlem a kotevním šroubem s hladkou úpravou nedosahuje potřebné kvality, proto je zpravidla kotevní šroub opatřen závitem nebo jemným žebrováním. Tato úprava zajišťuje kromě chemického spojení také mechanický zámek. Tato spára je při tahovém zatížení kotvy namáhána tangenciálním napětím. V takovém případě rozhoduje o kvalitě spojení smyková pevnost vytvrdnutého tmelu či lepidla.

U současných chemických kotev je vrstva lepidla nebo tmelu přibližně 1mm. Z tohoto důvodu nebývá separátně definována kvalita kontaktu na rozhraní beton-lepidlo a šroub-lepidlo, ale často jen na jednom z těchto kontaktů, zpravidla jen na kontaktu mezi ocelovým šroubem a lepidlem. Kvalita kontaktu je nejčastěji vyjádřena soudržností, tedy hodnotou tangenciálního napětí podél kontaktu při mezním zatížení. Pokud však stanovíme toto napětí pro rozhraní mezi šroubem a lepidlem, nejedná se o soudržnost, ale právě o smykovou pevnost vytvrdnutého lepidla.

Rozsáhlá studie publikovaná autory Cook, Bishop, Hagedoorn, Sikes, Richardson, Adams, De Zee (1994), popisuje výsledky jednoho tisíce tahových zkoušek soudržnosti provedených na s 20 druhy tmelů a lepidel. Při těchto zkouškách byly použity kotevní šrouby průměru 15.9 mm, kotvené do hloubky 6.4d, to znamená, že kotevní délka byla 100 mm. Při těchto testech byl použit beton se střední hodnotou válcové pevnosti v tlaku $f_{c,m} = 45 \text{ MPa}$. Vyvrtané otvory byly čištěny ocelovým kartáčem a stlačeným vzduchem. Střední hodnoty mezního napětí na kontaktu odpovídající zjednodušenému konstantnímu průběhu podél kontaktu pro těchto 20 typů lepidel a tmelů jsou uvedeny v grafu na Obr. 1.03. (Jednalo se o různé typy

lepidel, 10 typů epoxidové pryskyřice s tvrdidlem na bázi aminu, 3 epoxidové pryskyřice s tvrdidlem na bázi merceptanu, 2 lepidla na bázi vinyl-esteru, 3 lepidla na bázi polyesteru, 1 vinyl-ester-cementová směs a 1 lepidlo na bázi polyamidu).



Obr. 1.03 Mezní hodnoty soudržnosti pro různé druhy lepidel a tmelů, Cook, Bishop, Hagedoorn, Sikes, Richardson, Adams, De Zee (1994)

Primární vliv na kvalitu kontaktu má především čištění vyvrtného otvoru. Standardní postup čištění pro chemické kotvy předepisovaný výrobcem je čištění ocelovým kartáčem a následné čištění tlakem vzduchu.

1.3 ÚNOSNOST CHEMICKÝCH KOTEV

1.3.1 Základní únosnost jedné kotvy při zatížení tahem

Pro jakýkoli typ kotvy je z hlediska možnosti porušení styčnicku nebezpečné statické a dynamické namáhání tahovou silou. Únosnost při zatížení tahem můžeme vyjádřit odděleně pro jednotlivé typy porušení (Obr. 1.02).

V případě, že při nárůstu zatížení je nejprve vyčerpána únosnost vlastního kotevního šroubu, můžeme stanovit únosnost kotvy stejně jako únosnost šroubu v tahu. Charakteristická únosnost kotvy na mezi porušení při selhání oceli v betonu s trhlinkami i bez trhlinek je dána vztahem (1.01).

$$N_{u,k} = A_s \cdot f_{uk} \quad (1.01)$$

kde A_s je plocha jádra kotevního šroubu,
 f_{uk} charakteristická mez pevnosti oceli šroubu.

Ostatní možné poruchy (Obr. 1.02b-e) samostatně nastávají pouze v extrémních případech. Proto je nutné přistupovat k popisu únosnosti při těchto poruchách komplexněji. V případě selhání jednoho z kontaktů (Obr. 1.02b,c) lze stanovit tahovou sílu na mezi porušení jako funkci plochy kontaktu a mezní hodnoty soudržnosti (tangenciálního napětí) na kontaktu. Pro otvor kruhového průřezu lze vyjádřit charakteristickou únosnost selhání kontaktu lepidlo-beton jako:

$$N_{u,k} = \pi \cdot d_0 \cdot h \cdot \tau_{Rk,0} \quad (1.02)$$

kde d_0 je průměr vyvrtaného otvoru,
 h délka kontaktu (délka kotvení),
 $\tau_{Rk,0}$ charakteristická hodnota mezního napětí na kontaktní ploše otvoru.

Pro poruchu kontaktu mezi kotevním šroubem a lepidlem jako:

$$N_{u,k} = \pi \cdot d \cdot h \cdot \tau_{Rk} \quad (1.03)$$

kde d je průměr kotevního šroubu,
 τ_{Rk} charakteristická hodnota mezního napětí na kontaktu.

Typickou poruchou dodatečně osazovaných kotev je selhání betonu reprezentované vytržením kužele betonu (Obr. 1.02e). V případě chemických kotev se však zpravidla nejedná o samostatnou poruchu betonu dosažením smykové pevnosti betonu na pomyslném plášti kužele, ale o kombinaci selhání betonu a jednoho z kontaktů.

Zavedení vlivu soudržnosti chemických kotev, jako nejobtížněji stanovitelného parametru, do výpočtu únosnosti je přinejmenším problematické. Prvotní publikované vztahy s tímto parametrem vůbec nepracují. Například pro šrouby kotvené pomocí nenasyčené polyesterové pryskyřice o rozměru M8 až M30 používané v betonu běžných pevností lze dle autorů Eligehausen, Rehm, Mallée použít s dostačující přesností pro kotvy těchto parametrů vztah (1.04).

$$N_{u,k} = 0,85 \cdot h^2 \cdot \sqrt{f_{cc,200,k}} \quad (1.04)$$

kde $f_{cc,200,k}$ je charakteristická hodnota krychelné pevnosti betonu v tlaku.

Podobně ETAG striktně odděluje stanovení únosnosti jednotlivé kotvy s ohledem na typ poruchy. Přičemž pro poruchu selháním betonu (vytržení kužele) uvádí jednotný vztah jak pro mechanické kotvy, tak pro chemické kotvy, ačkoli princip působení je pro tyto dvě skupiny zcela odlišný. Charakteristická únosnost kotvy neovlivněna dalšími parametry (1.05) je v betonu s trhlinkami stanovena jako:

$$N_{u,k}^0 = 7,2 \cdot \sqrt{f_{cc,150,k}} \cdot h^{1,5} \quad (1.05)$$

kde $f_{ck,150,cube}$ charakteristická hodnota krychelné pevnosti betonu.

V betonu bez trhlin se vztah (1.05) upravuje vynásobením koeficientem $\psi_{ucr,N}=1,4$.

Jako kotvení v betonu bez trhlin lze problém řešit pouze v případě, pokud celá oblast betonu, v níž je kotveno, je namáhána tlakovým napětím od všech vnějších zatížení (včetně zatížení od samotných kotev) a vnitřních i vnějších deformací (smršťování, dotvarování betonu, teplotních zatížení).

Zavedením problematiky soudržnosti do vztahu pro únosnost chemické kotvy zatížené tahem se zabýval ve své práci Cook (1993). Cook vychází z předpokladu, že na mechanismu porušení se podílí jak charakteristiky betonu, tak soudržnost. Uvádí empiricky odvozený vztah pro výpočet mezní délky kotvení h_c v závislosti na kvalitě kontaktu (1.06). Pro šrouby kotvené na kratší délce než h_c pak potvrzuje platnost vztahu (1.04). Pro delší kotevní délku pak uvádí závislost (1.07).

$$h_c = \frac{\tau_u \cdot \pi \cdot d}{1,8 \cdot \sqrt{f_{cc,200,k}}} \quad (1.06)$$

kde τ_u je mezní hodnota napětí na kontaktu šroub-lepidlo

$$N_{u,k} = 0,85 \cdot h_c^2 \cdot \sqrt{f_{cc,200,k}} + \pi \cdot d \cdot (h - h_c) \cdot \tau_u \quad (1.07)$$

kde h_c je mezní výška povrchového kužele porušeného betonu (1.06).

Alternativním přístupem ke stanovení únosnosti chemických kotev je předpoklad samostatné poruchy jednoho z kontaktů. Pro kotvy průměru $d \leq 50 \text{ mm}$, s plochou kontaktu mezi šroubem a lepidlem $h \cdot d \cdot \pi \leq 55\,000 \text{ mm}^2$, pro které platí $4.5 \leq h/d \leq 20$ uvádí při uvážení rovnoměrného rozdělení napětí po délce kontaktu kolektiv autorů Cook, Kunz, Fuchs, Konz (1998) jako dostatečně přesný vztah pro charakteristickou únosnost kotvy v tahu (1.03).

Návrhové hodnoty jsou stanoveny podělením charakteristických hodnot dílčím součinitelem spolehlivosti materiálu pro kotvy uvedeným v ETAG. Tento

doporučený součinitel je odvozen z dosavadních zkušeností a výsledků s dodatečným kotvením (1.08).

$$\gamma_{Mc} = \gamma_c \cdot \gamma_1 \cdot \gamma_2 \quad (1.08)$$

kde γ_c je dílčí součinitel spolehlivosti pro beton v tlaku uvažovaný hodnotou 1,5,
 γ_1 dílčí součinitel spolehlivosti pro běžně vyráběný a ošetřovaný beton uvažovaný hodnotou 1,2,
 γ_2 dílčí součinitel spolehlivosti pro kotevní systémy s normální instalační spolehlivostí, uvažovaný hodnotou 1,2.

Pro běžné kotevní podmínky je tento součinitel spolehlivosti $\gamma_{Mc} = 2,16$.

2 CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE

Současný přístup k navrhování dodatečně osazovaných lepených kotev není, jak bylo popsáno v kapitole 1, navázán na žádnou jednotnou metodiku. Při návrhu kotvení se stanovení mezní hodnoty únosnosti kotvy zatížené tahem nejčastěji opírá o specifické informace dodávané výrobcí kotev. Tyto parametry vycházejí z experimentů provedených a vyhodnocených na základě předpisů pro atestaci, např. směrnice pro evropské schválení ETAG. Tato metodika je ale z velké části vytvořena především na základě teoretických předpokladů platných pro mechanické kotvy. Pro stanovení mezní únosnosti lepených kotev zatížených tahem je použit předpoklad plné poruchy kontaktu zprostředkovaného lepidlem. Tento předpoklad se ale jeví, ve světle závěrů publikovaných v posledních letech v odborné literatuře, jako nepřesný.

Globálním záměrem této disertační práce je pomocí experimentální analýzy spojené s numerickým modelováním poskytnout hlubší náhled do problematiky působení ocelových lepených kotev se zaměřením na problematikou lepených kotev zatížených statickou tahovou silou.

Experimentální část práce je z velké části zaměřena na sledování parametrů kontaktu zprostředkovaného lepidlem. Cílem je ověřit parametry kontaktu, pro v současné době nejpoužívanější typy lepidel. Další část experimentálního výzkumu sleduje mezní hodnoty statického tahového zatížení pro kotvy instalované pomocí těchto lepidel v betonech běžných pevností. Výsledky obou typů experimentů slouží jako verifikační nástroj pro sestavované numerické modely.

Cílem teoretické části práce (numerické analýzy) je s využitím výsledků experimentů sestavit vhodný výpočtový model lepené kotvy v betonu. Takto sestavený numerický model může rozšířit pohled na vliv jednotlivých parametrů, vstupujících do návrhu kotvení. Sestavený model také umožňuje sledování

mechanismů porušování materiálů v místech, které jsou v reálném experimentu jen velmi těžko analyzovatelná.

Výsledky provedených experimentů a taktéž výsledky obdržené pomocí sestaveného numerického modelu, byly podrobeny analýze. Tato analýza vede k popisu závislosti mezi jednotlivými geometrickými a materiálovými parametry, které se podílejí na výsledném chování kotvy pod zatížením.

Dílním cílem práce je objasnit, jakým způsobem dochází k porušování kotvení v případě, že se porucha nachází v oblasti betonu, jakou měrou ovlivňuje vznik této poruchy kvalita kontaktu zprostředkovaného lepidlem a jaký vliv mají charakteristiky použitého betonu na tuto kvalitu kontaktu a na celkovou únosnost kotvy.

Na výsledcích numerických modelů je znázorněno, jakým způsobem se na hodnotě mezní únosnosti a také na celkovém chování kotevní oblasti odráží poměr mezi kotevní délkou, průměrem kotevního šroubu, kvalitou lepidla a charakteristikami betonu.

Dílním cílem této práce je stanovení mezní hodnoty tahového zatížení lepené kotvy.

Cílem této práce je taktéž poukázat na některé aktuální problémy experimentálního ověřování charakteristik kotvení a jejich vztah k reálné konstrukci.

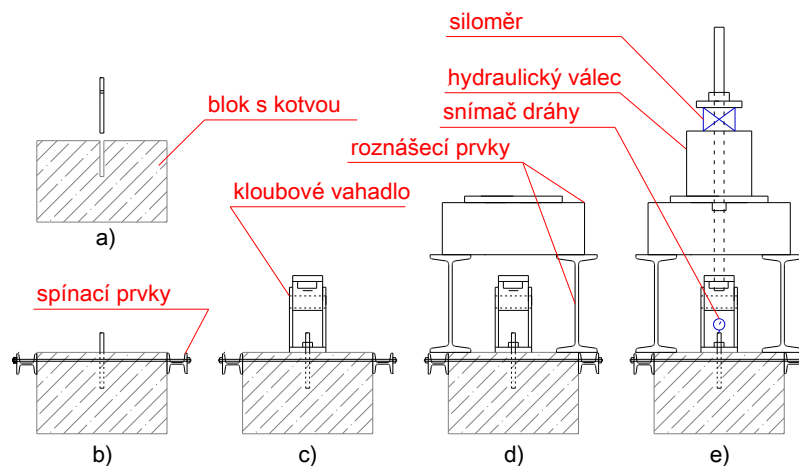
3 EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA

3.1 ZKOUŠKY KOTEV ZATÍŽENÝCH TAHOVOU SILOU

Experimentální analýza byla pro tuto práci stěžejním pilířem. Byly provedeny dva typy experimentů.

Popis skutečného chování lepených kotev byl navázán na základní typ experimentu ověřujícího mezní hodnotu tahové síly – tzv. pull-out test. Při těchto experimentech byly zkoušeny kotvy vhodné do tlačných oblastí betonu (betonu bez trhlin) průměru 10, 12 a 16 mm v betonech třídy C12/15, C20/25 a C35/45. Při těchto experimentech byly použity tři typy lepidel, které lze označit jako v současné době nejpoužívanější. Lepidlo na bázi vinyl-uretanové pryskyřice, lepidlo na bázi polymercementová směsi a lepidlo na bázi epoxidové pryskyřice. Celkem bylo realizováno 65 pull-out testů.

Tyto experimenty byly základem pro následné stanovení závislosti mezi hodnotou mezní tahové únosnosti a některými parametry kotvení, jako kotevní délka, průměr kotevního šroubu, průměr vrtání otvoru a jeho čištění, ale také charakteristikami použitého betonu. Důležitým přínosem výsledků těchto experimentů byla možnost verifikace sestavovaných numerických modelů. Schéma experimentu je vyobrazeno na Obr. 3.01.



Obr. 3.01 – Postup sestavení měřicí sestavy,

- a) vyvrtání otvoru, čištění a osazení kotevního šroubu
- b) sepnutí horního okraje zkušebního tělesa
- c) upevnění kloubového vahadla na kotevní šroub
- d) osazení roznášecích prvků
- e) instalace hydraulického válce a měřících zařízení

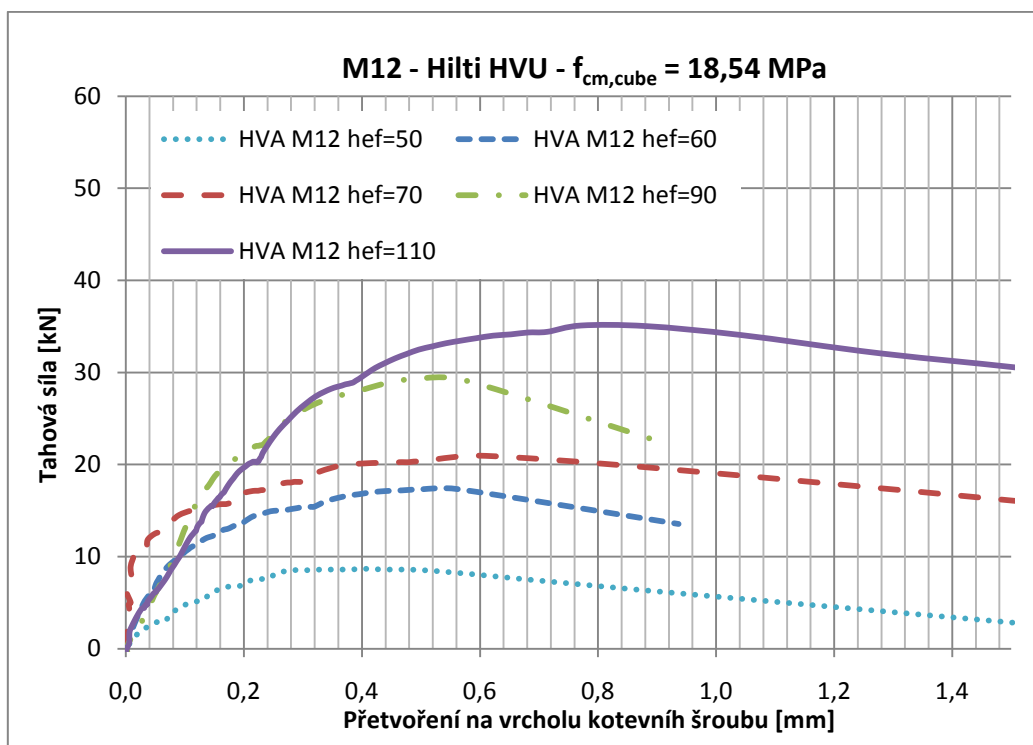
Pro vnesení tahového zatížení byl použit hydraulický dutinový válec KGF H50-75 o celkové zatížitelnosti 500 kN při zdvihu válce 75 mm. Pro měření tahové síly byl použit tenzometrický dutinový siloměr PD 500 (zatížitelnost 500 kN, citlivost 1 kN). Přetvoření (povytažení kotev z betonového bloku, měřená na vrcholu kotevního šroubu) bylo měřeno indukčnostními snímači dráhy HBM WA/2-T o rozsahu 2,0 mm a citlivosti 0,001 mm. Elektricky měřené veličiny byly snímány spojitě měřicí ústřednou HBM SPIDER 8 při frekvenci ukládání 10 Hz.

Hodnoty mezních tahových sil naměřených při celkem uskutečněných 67 testech jsou graficky znázorněny na Obr. 5.04.

Pro možnost dalšího rozšířeného srovnání výsledků jsou v tabulce zde uvedeny normalizované hodnoty maximální naměřené síly. Tyto hodnoty byly normalizovány na velikost šroubu M12 a beton odpovídající třídě C20/25. Vzhledem k uvedeným vztahům popisujícím vliv těchto dvou parametrů na únosnost kotvy (1.03 až 1.07), byla zvolena normalizace dle vztahu (3.01).

$$F_{norm} = F_{Max} \cdot \frac{d_{12}}{d} \cdot \sqrt{\frac{f_{cm,cube (C20/25)}}{f_{cm,cube}}} \quad (3.01)$$

kde	d je	průměr kotevního šroubu,
	d_{12}	průměr šroubu M12
	F_{Max}	mezní tahová síla naměřená při experimentu
	$f_{cm,cube (C20/25)}$	střední hodnota krychelné pevnosti betonu třídy C20/25
	$f_{cm,cube}$	střední hodnota krychelné pevnosti použitého betonu



Obr. 3.02 – Tahové zkoušky M12, C12/15, HILTI HVU

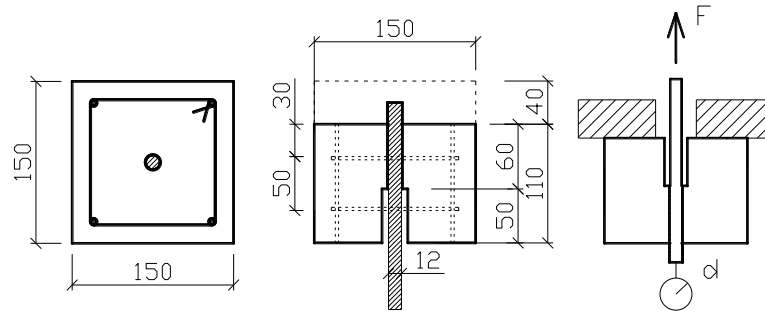
Největší množství experimentů bylo provedeno pro obvyklou kotevní délku, tzn. pro šroub velikosti M10 $h = 90$ mm, M12 $h = 110$ mm a M16 $h = 125$ mm. Z grafického znázornění výsledků experimentů je zřejmý jejich značný rozptyl, způsobený velkým množstvím parametrů, které se na výsledném chování podílejí.

3.2 ZKOUŠKY OVĚŘUJÍCÍ KVALITU LEPENÉHO KONTAKTU

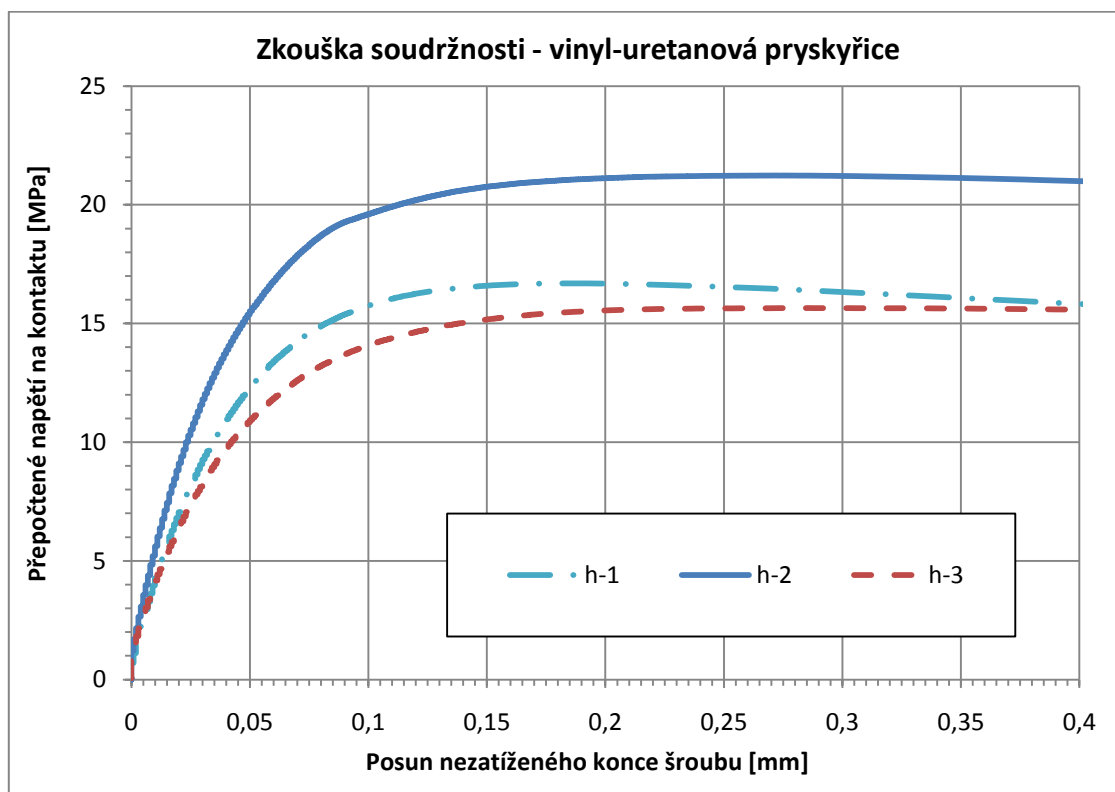
Základním kamenem celé analýzy bylo ověření souhrnného parametru kvality kontaktu zprostředkovaného pomocí výše uvedených, nejrozšířenějších typů lepidel. Tento souhrnný parametr kvality kontaktu označujeme jako soudržnost, a vyjadřujeme jako hodnotu tangenciálního napětí na známé ploše kontaktu (zpravidla mezi lepidlem a betonem) při zatížení kotvy mezní tahovou silou, a to vzhledem k okrajovým podmínkám experimentu, za předpokladu rovnoměrného rozdělení tohoto napětí po délce kontaktu. Vyhodnocením experimentů byla získána střední hodnota soudržnosti lepidla na bázi vinyl-uretanové pryskyřice 17,8 MPa, lepidla na bázi polymercementová směsi 16,72 MPa a pro lepidla na bázi epoxidové pryskyřice 23,42 MPa. Tyto experimenty byly provedeny v betonech třídy C20/25 a C35/45 a prokázalo se, že hodnota soudržnosti je závislá na materiálových charakteristikách betonu. Po normalizaci všech dosažených výsledků na beton třídy C20/25 bylo stanovena střední hodnota soudržnosti pro, k tomuto účelu, v současné době rozšířené typy stavebních průmyslových lepidel na 18,33 MPa a charakteristická

hodnota soudržnosti dle Eurokódu na 14,40 MPa. Tyto hodnoty byly stanoveny z celkového počtu 21 provedených experimentů. V této práci byly tyto průměrné hodnoty lepidel použity při tvorbě numerických modelů při analýze výsledků. Při použití konkrétního typu lepidla v návrhu kotvení je nutné znát soudržnost odpovídající tomuto lepidlu.

Schéma zkoušky a zkušební tělesa dle ČSN 73 1328 je na Obr. 3.03. Obr. 3.04 zobrazuje typický výsledek zkoušky ověřující kvalitu kontaktu.

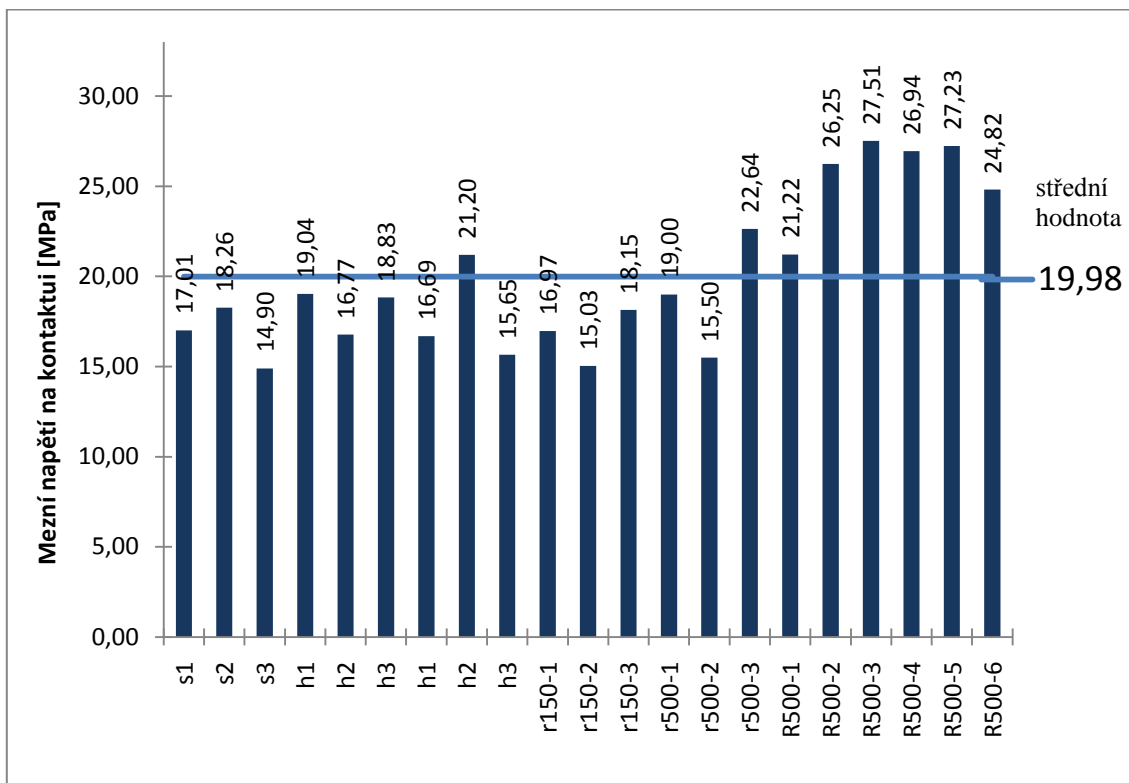


Obr. 3.03 – Zkušební těleso dle ČSN 73 1328



Obr. 3.04 – Zkouška soudržnosti - vinyl-uretanová pryskyřice Hilti HVU,
 $f_{cm, cube} = 29,40 \text{ MPa}$

Souhrnné výsledky zkoušek ověřujících soudržnost jsou uvedeny na Obr. 3.05.



Obr. 3.05 – Souhrn výsledků zkoušek soudržnosti pro všechna použitá lepidla v řádně vyčištěných otvorech, $f_{cm, cube} = 29,40 - 48,31$ MPa

s – vinyl-uretanová pryskyřice Spit Maxima 7
h – vinyl-uretanová pryskyřice HILTI HVU
r150 – polymercementová směs HILTI HIT-HY- R150
R500 – epoxidová pryskyřice HILTI HIT-RE - 500

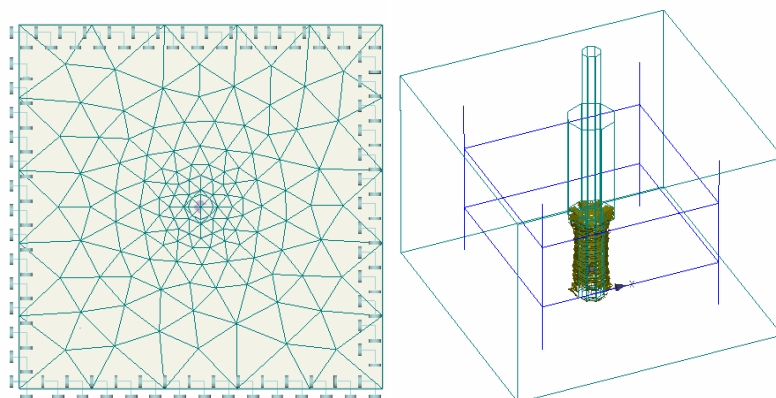
4 TEORETICKÁ ČÁST – NUMERICKÁ ANALÝZA

Vhledem ke skutečně provedenému počtu experimentů (s ohledem na jejich náročnou realizaci) byla pro doplnění a rozšíření poznatků z řešení problematiky využita numerická analýza metodou konečných prvků. Jako vhodný nástroj byl použit software ATENA určený pro modelování nelineárního chování betonu. Kontakt mezi lepidlem a betonem byl modelován pomocí Mohr-Columbova suchého tření, s parametry verifikovanými experimentem. Lepidlo bylo modelováno jako pružný materiál. Model tedy predikoval poruchu mezi lepidlem a betonem.

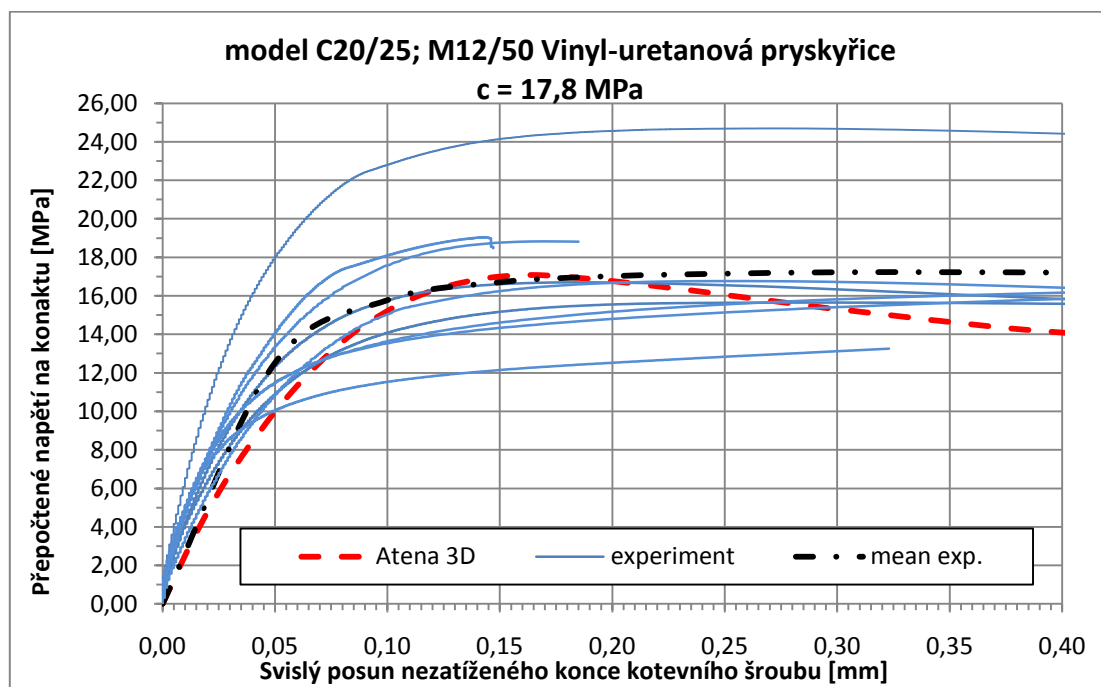
Takto sestavený numerický model byl použit pro simulaci experimentu kotvy zatížené tahem pro různé parametry materiálů, různé kotevní délky a průměry kotev a také pro různé vzdálenosti okrajů betonu od instalované kotvy. Ve všech případech byl model verifikován pomocí experimentu.

Simulacemi s teoretickými hodnotami soudržnosti lepidel bylo prokázáno, že soudržnost je podřízena pevnostním charakteristikám betonu, a že pro stavební průmyslová lepidla může maximálně nabýt hodnoty blíží se 70% krychelné pevnosti betonu v tlaku.

Obr. 4.01 ukazuje model zkoušky ověřující kvalitu kontaktu dle ČSN 73 1328. Porovnání výsledků sestaveného modelu s výsledky experimentů ověřujících soudržnost pro jednu konfiguraci testu je uvedeno v Obr. 4.02. Výsledky experimentů jsou doplněny o z nich stanovenou střední hodnotu.

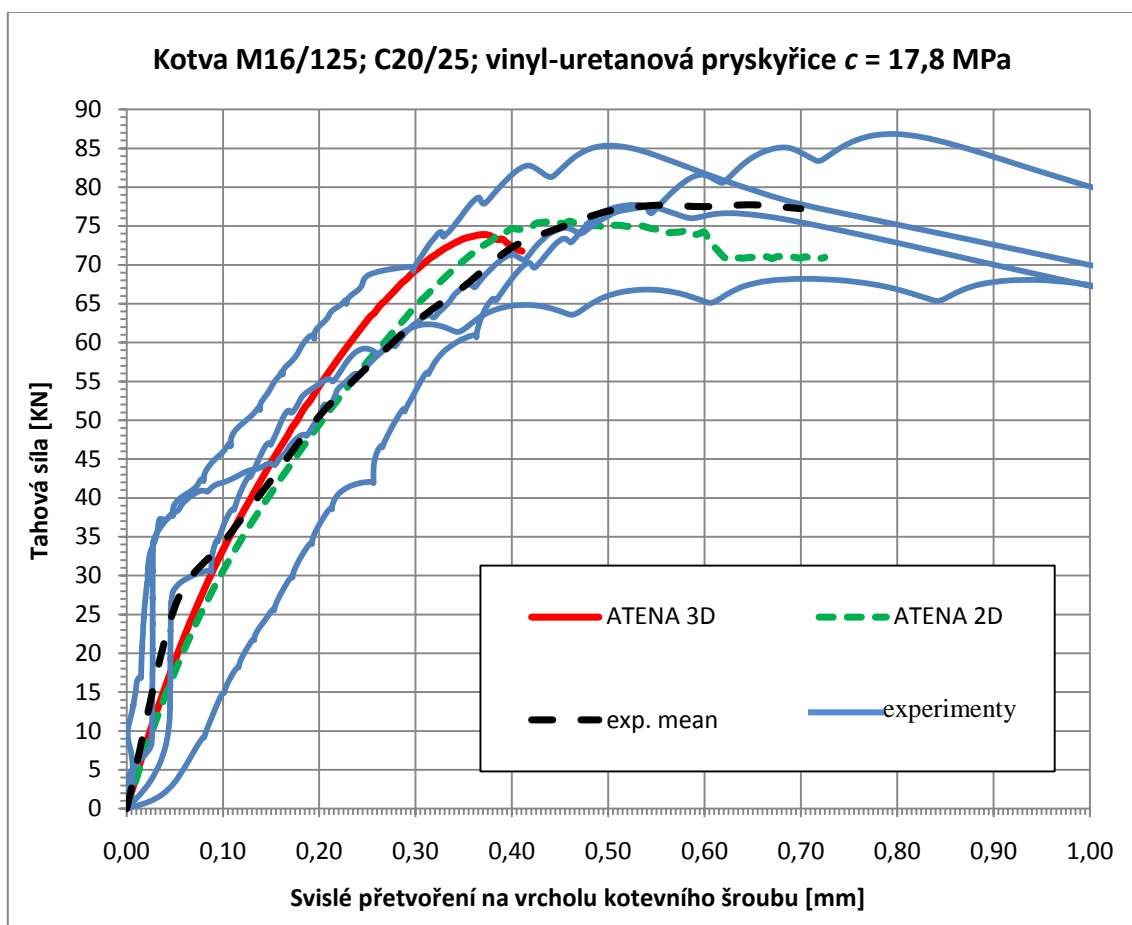


Obr. 4.01 – Numerický model experimentu ověřující mezní hodnotu soudržnosti - ATENA 3D



Obr. 4.02 – Model soudržnosti na kontaktu lepidlo-beton pro vynil-uretanovou pryskyřici HILTI HVU referenční kotva M12/50 v betonu třídy C20/25

Výsledky numerického modelu pro kotvu zatíženou tahovou silou jsou konfrontovány s výsledky experimentů v grafu na Obr. 4.03. Výsledky experimentů jsou v grafu doplněny o z nich získanou střední hodnotu.



Obr. 4.03 – Porovnání pracovních diagramů numerických modelů s experimentálně naměřenými hodnotami. Referenční kotva M16/125 v betonu třídy C20/25, vinyl-uretanová pryskyřice

5 ANALÝZA VÝSLEDKŮ A ZOBECNĚNÍ PROBLÉMU

5.1 ANALÝZA VÝSLEDKŮ EXPERIMENTŮ A NUMERICKÝCH MODELŮ

Pro popis chování lepené kotvy zatížené tahovou silou byla provedena analýza obdržených výsledků experimentů a numerických modelů v závislosti na hlavních parametrech, které ho ovlivňují. Z parametrů, které mají na chování kotev zásadní vliv a vstupují jako veličiny do návrhu kotvení, to jsou: pevnost betonu v tahu, kotevní délka, průměr kotevního šroubu a typ použitého lepidla (za předpokladu

dodržení standardních podmínek kotvení). Vzhledem k rozsahu experimentální části práce a množství nashromážděných dat byla jako vhodný nástroj této analýzy zvolena forma citlivostní studie.

Tato studie byla zaměřena pouze na netriviální typ poruchy kotvy - poruchu betonu v kombinaci s poruchou lepeného kontaktu, tedy poruchu kotevní oblasti.

5.1.1 Vliv okrajových podmínek

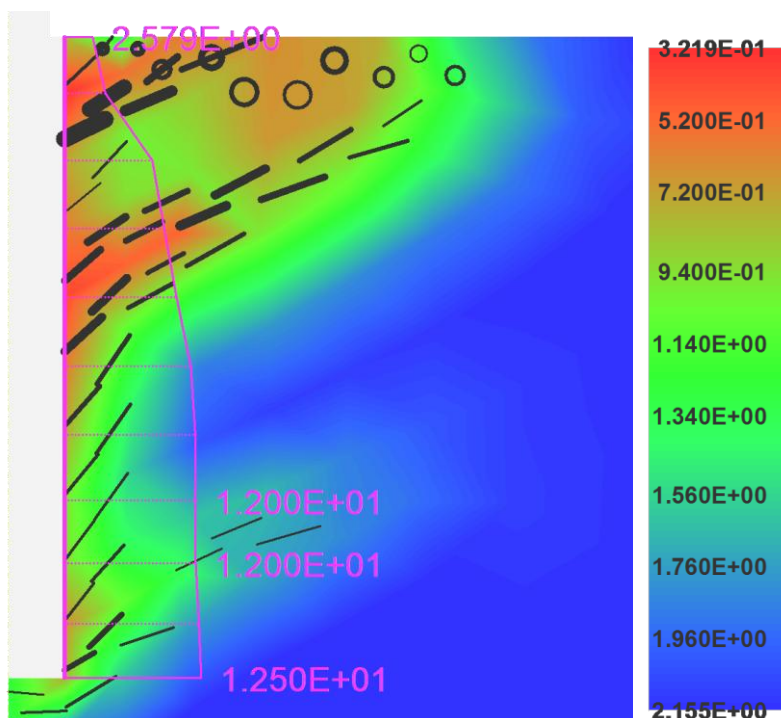
Při namáhání kotvy tahem je tato tahová síla přenášena prostřednictvím lepeného kontaktu do betonu. Tento transfer sil z kotevního šroubu do vrstvy lepidla mění napjatostní stav, v okolí kotevního šroubu dochází k přetváření materiálu lepidla a na něj navázané oblasti betonu. Hlavní tahová napětí v aktivované zóně betonu blízko povrchu směřují směrem k působišti tahové síly. Vzhledem k tomu, že povrch betonu v okolí osazené kotvy není nijak zatížen a může se přetvářet zcela volně, dochází v tomto místě velmi rychle k vyčerpání pevnosti betonu v tahu. Podél kotevní délky směrem od povrchu betonu potom intenzita tohoto napětí klesá.

Vezmeme-li v úvahu fixní hodnoty materiálových charakteristik lepidla, betonu a oceli, pak s rostoucím průměrem šroubu (případně průměrem vrtaného otvoru v případě vztáhneme-li poruchu ke kontaktu mezi lepidlem a betonem), úměrně roste celková přenášaná tahová síla na jednotku kotevní délky a tím i zatížení betonu v oblasti blízko povrchu. V této zóně dochází k tahovému změkčení betonu a tím i k přerozdělování napětí do betonu směrem od povrchu. Takto porušený beton již není schopen přenášet zatížení a tím klesá i smykové napětí na sledovaném kontaktu. Napětí na kontaktu tedy nemá rovnoměrný průběh.

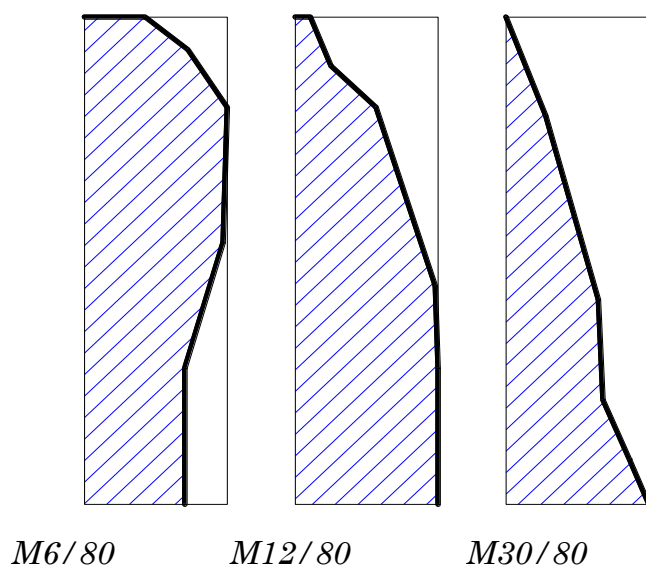
V experimentech ověřujících kvalitu kontaktu, provedených dle schématu na Obr. 3.03 jsou okrajové podmínky odlišné než u tahových zkoušek. Povrch betonu v tomto případě není volný, ale tvoří opěrnou plochu pro zkušební přípravek, přes který je do kotvy vnášeno zatížení. Při takové konfiguraci lze předpokládat rozložení napětí podél kontaktu blízké rovnoměrnému rozložení. Na základě tohoto předpokladu je stanovena hodnota soudržnosti pro zkoušené vzorky lepidla.

Použijeme-li takto stanovené hodnoty soudržnosti pro stanovení mezní únosnosti při poruše plného kontaktu dle vztahu (1.02) obdržíme logicky velmi nepřesné hodnoty. Únosnost bude ve skutečnosti nižší.

Tento problém lze sledovat na výsledcích numerického modelu. Obr. 5.01 a Obr. 5.02 vyobrazují výsledky numerického modelu pro kotvy s konstantní kotevní délkou a charakteristikami materiálů lepidla (soudržnost 12,5 MPa) a betonu (C20/25), ale s rozdílným průměrem šroubu (6, 12 a 30 mm) a tím i průměrem vrtaného otvoru. Společně se znázorněním tvorby tahových trhlin v betonu a průběhem tangenciálního napětí na kontaktních prvcích (v okamžiku dosažení jeho maximální hodnoty), je barevnou škálou znázorněna residuální tahová pevnost betonu v MPa.



Obr. 5.01 – Rozložení tangenciálního napětí na kontaktu mezi lepidlem a betonem v okamžiku dosažení mezí hodnoty soudržnosti a residuální pevnosti betonu v tahu [MPa] pro M12/80, $c = 12,5$ MPa, C20/25



Obr. 5.02 – Porovnání rozložení tangenciálního napětí na kontaktu mezi lepidlem a betonem pro okrajové podmínky experimentu a okrajové podmínky kotvy namáhané tahovou silou získané z numerických modelů

Použijeme-li vztah pro mezí únosnost kotvy pro plnou poruchu kontaktu (s uvážením rovnoměrného napětí na kontaktu) lze zavést vliv volného povrchu betonu

příslušnou redukcí únosnosti kontaktu. Vhodné je vztáhnout tuto redukci ke geometrickým parametrům kotvy, například redukovat kotevní délku v závislosti na průměru vrtaného otvoru.

Míru této redukce lze určit z porovnání ploch rovnoměrného a skutečného průběhů napětí na kontaktu.

Číselně je pak pro tyto modely redukce uvedena v tabulce Tab. 5.01. Je vyjádřena pomocí násobku průměru vrtaného otvoru dle (5.01). Zavedením této redukce obdržíme pro lepené kotvy efektivní kotevní délku jako (5.02).

$$A_{\tau,ef} = \tau \cdot h_{ef} = \tau \cdot (h - k \cdot d_0) \quad (5.01)$$

Kotva	M6/80	M12/80	M30/80
Redukce plochy pro kotevní délku 80 mm [%]	13,85	24,33	54,80
Redukční násobitel průměru vrtaného otvoru k	1,385	1,390	1,370

Tab. 5.01 – Redukce plochy pro kotevní délku, vyjádřená pomocí násobitele průměru vrtaného otvoru

$$h_{ef} = (h - k \cdot d_0) \quad (5.02)$$

Z hodnot uvedených v tabulce Tab. 5.01 je zřejmé, že vhodná redukce kotevní délky se dá vyjádřit přibližně jako 1,4 násobek průměru vrtaného otvoru, $k = 1,4$.

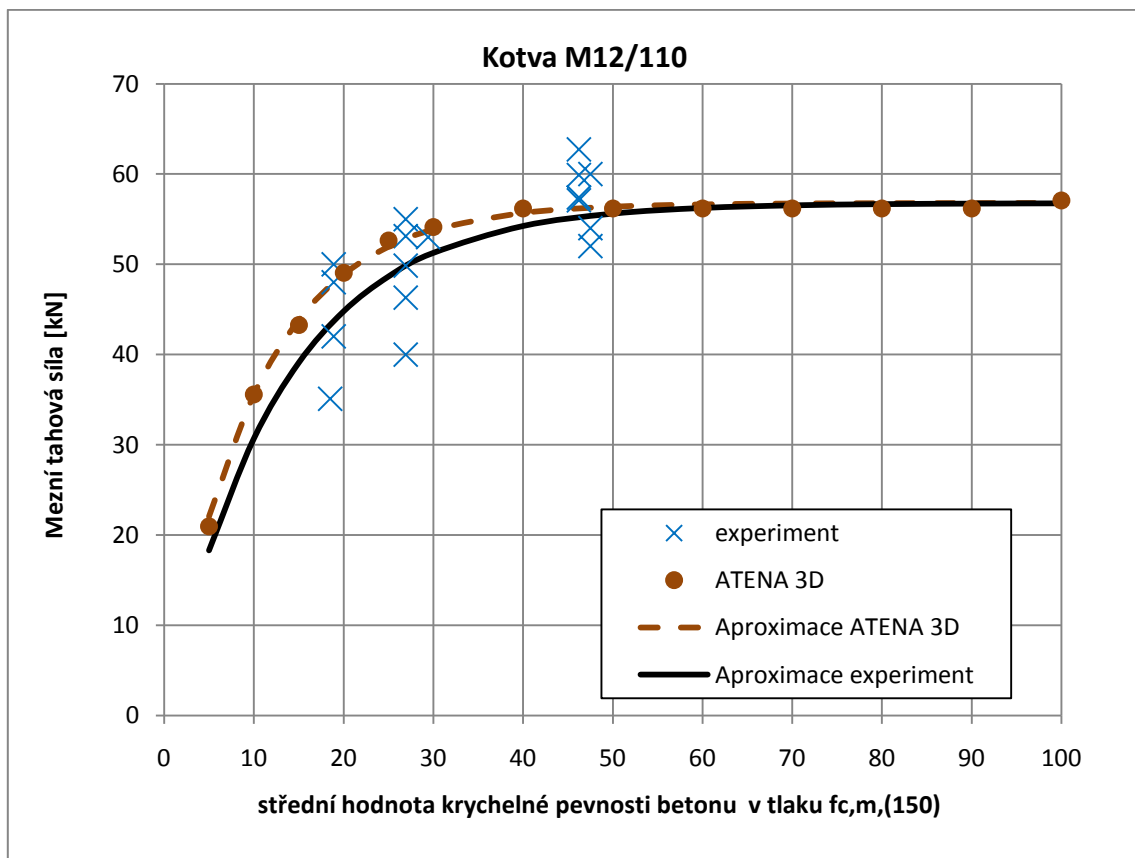
5.1.2 Vliv materiálových charakteristik betonu a lepidla

V případě, že by rozhraní kontaktu mezi betonem a lepidlem bylo ideálně hladké a současně spojení obou materiálů bylo dostatečně pevné, potom by o poruše kotvy rozhodoval materiál s horšími fyzikálně mechanickými vlastnostmi, tedy lepidlo nebo beton. Rozhraní mezi poruchami by bylo ostré.

Rozhraní mezi lepidlem a betonem ale ve skutečnosti hladké není. Stěny otvoru jsou hrubé v závislosti na způsobu vrtání. Beton a lepidlo se tedy na pomyslné ploše kontaktu geometricky prolínají. Navíc i po řádném čištění na kontaktní ploše vždy zůstává určité množství prachových částic betonu, a určité procento prachových částic se nesmísí s lepidlem v procesu jeho instalace. V některých místech kontaktu mohou být zbytky obalu kapsle lepidla.

Všechny tyto faktory způsobují, že rozhraní mezi poruchou betonu a poruchou lepidla není ostré ani v případě, že se materiálové charakteristiky betonu a lepidla výrazněji liší. Ve skutečnosti je porucha vždy kombinací poruchy lepidla a betonu.

O tom jakou mírou se na poruše kontaktu podílí beton a lepidlo rozhoduje relativní rozdíl mezi pevnostními charakteristikami obou materiálů. Experimenty s kotvami zatíženými tahovou silou byly provedeny v betonech třech tříd C12/15, C20/25 a C35/45. Pro kotvu M12 kotvenou na délce 110 mm jsou mezní hodnoty tahových sil uvedeny v grafu Obr. 5.03. Výsledky experimentů samy o sobě nedávají informaci o závislosti mezní tahové síly a pevnosti betonu v tlaku. Tuto závislost je ale možné sledovat na výsledcích numerického modelu.



Obr. 5.03 – Mezní tahová únosnost kotevní oblasti pro kotvu M12/110 v závislosti na pevnosti betonu

Pokud vyjdeme ze vztahu pro plnou poruchu kontaktu mezi lepidlem a betonem (1.02), mezní tahová únosnost by byla na materiálových charakteristikách betonu nezávislá. Vliv materiálových charakteristik betonu zřejmý z výsledků experimentů a numerického modelu můžeme do vztahu (1.02) zavést vhodnou aproximací.

Pro aproximaci závislosti mezní tahové síly na pevnostních charakteristikách betonu a lepidla, která zohledňuje vliv relativního rozdílu těchto charakteristik na kvalitu kontaktu, byla použita funkce ve tvaru (5.03).

$$a \cdot \left(1 - e^{-b \cdot \frac{f_{cm, cube}}{\tau_{mean, C20/25}}} \right) \quad (5.03)$$

Dále je třeba ve vztahu pro mezní tahovou únosnost zohlednit rozdílné okrajové podmínky, při kterých je ověřována soudržnost. Volný povrch betonu při tahovém zatížení kotvy byl zaveden pomocí efektivní kotevní délky stanovené v závislosti na průměru vrtaného otvoru dle (5.02). Pro střední hodnotu mezní únosnosti poruchy kotevní oblasti, stanovené z výběrových průměrů charakteristik materiálů, je možné hledaný vztah vyjádřit jako (5.04).

Koeficienty a , b byly stanoveny metodou nejmenších čtverců. Použijeme-li aproximační funkci na výsledky experimentů, dostaneme vztah pro mezní tahovou únosnost kotevní oblasti s koeficienty $a = 0,74$ a $b = 1,5$, jako (5.04).

$$N_{u,\tau,exp} = \pi \cdot \tau_{mean} \cdot 0,74 \cdot \left(1 - e^{-1,5 \cdot \frac{f_{cm,cube}}{\tau_{mean}}}\right) \cdot d_0 \cdot h_{ef} \quad (5.04)$$

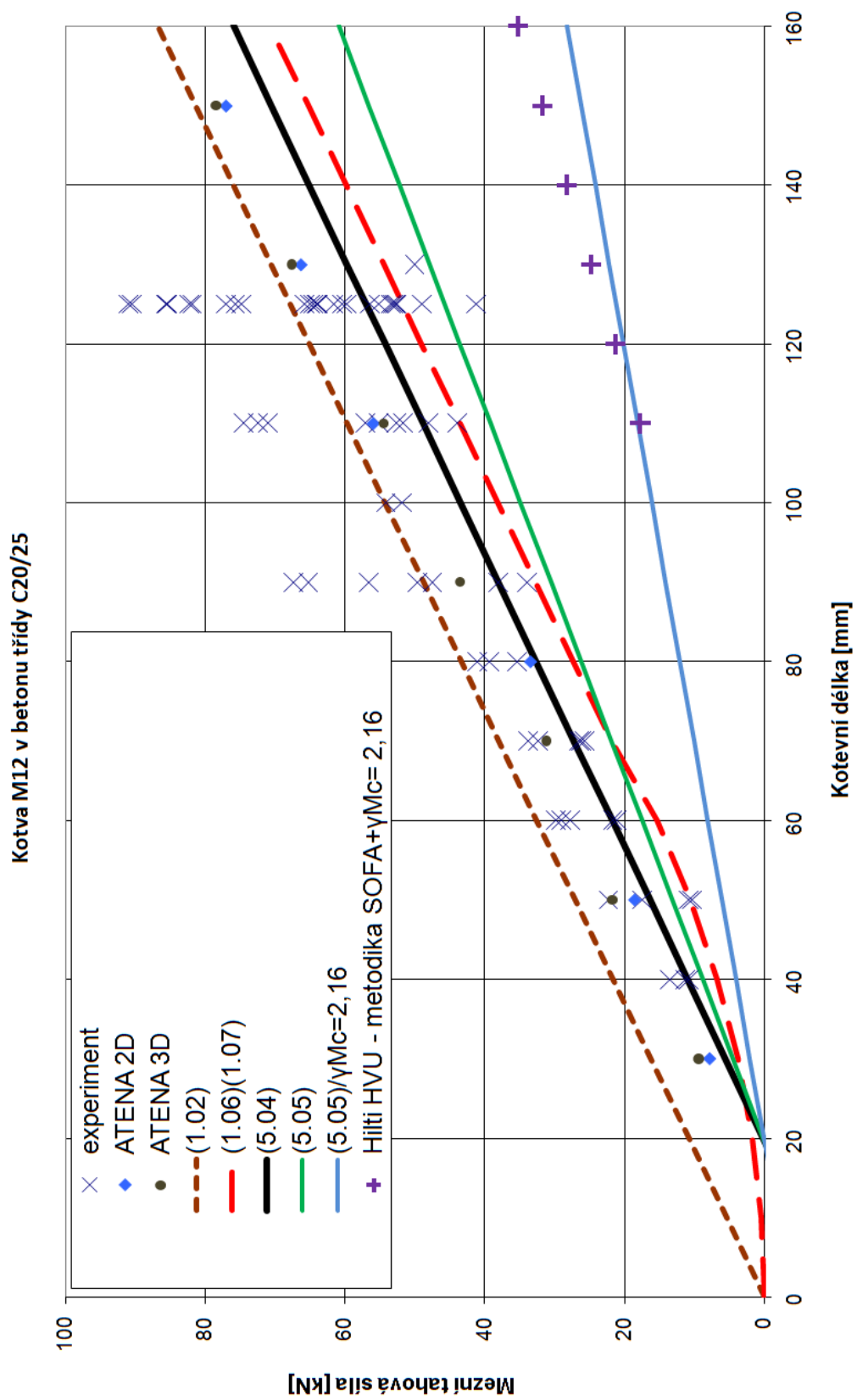
Soudržnost, jako souhrnný parametr kvality kontaktu, je závislý na spolehlivosti betonu. V tomto případě tedy lze použít jeden součinitel spolehlivosti a pro charakteristickou hodnotu mezní tahové únosnosti kotevní oblasti platí vztah (5.05). Vzhledem k množství provedených experimentů není obsahem této práce ověřit spolehlivost lepených kotev při zatížení tahem. Součinitel spolehlivosti, v případě zatížení kotev tahovou silou, lze použít podle směrnice ETAG γ_{Mc} (1.08).

Vztah (5.01) popisuje základní hodnotu mezní tahové únosnosti lepené kotvy při kombinované poruše betonu a lepidla v případě kotvení v betonu bez trhlin, a polohy kotvy tak, že únosnost není ovlivněna jinými kotvami ve skupině, nebo vzdálenostmi okrajů betonového tělesa.

Základní hodnota charakteristické únosnosti lepené kotvy zatížené tahovou silou je pak dána menší z hodnot únosnosti při poruše kotevního šroubu (1.01) a kombinované poruchy betonu a lepidla (5.05).

$$N_{u,\tau,k} = \pi \cdot 0,74 \cdot \tau_{Rk} \left(1 - e^{-1,5 \cdot \frac{f_{c,cube,k}}{\tau_{Rk}}}\right) \cdot d_0 \cdot h_{ef} \quad (5.05)$$

V grafu na Obr. 5.04 jsou uvedeny veškeré výsledky provedených experimentů tahových zkoušek kotev doplněné o výsledky z numerických modelů sestavených v program ATENA 2D a ATENA 3D pro střední hodnoty materiálových charakteristik. Dále je v grafu vynesena střední hodnota mezní tahové síly pro plnou poruchu kontaktu (1.02), pro plnou poruchu betonu (1.05), dále charakteristická hodnota tahové pevnosti lepené kotvy pro poruchu kotevní oblasti podle Cooka (1.06, 1.07), střední a charakteristická hodnota dle vztahů (5.04) a (5.05). Návrhová únosnost je stanovena dle vztahu (5.05) s použitím součinitele spolehlivosti $\gamma_{Mc} = 2,16$ (1.08). Pro srovnání jsou v grafu vyneseny konkrétní návrhové hodnoty kotev HILTI HVA M12 stanovené metodikou SOFA.



Obr. 5.04 – Mezní tahová únosnost kotevní oblasti pro kotvu M12 v betonu třídy C20/25 – souhrn

6 ZÁVĚR

Z vyhodnocení provedených experimentů a numerických simulací vyplývají následující závěry:

Potvrdilo se, že zjednodušený předpoklad poruchy jednoho z materiálů (beton, lepidlo resp. jím zprostředkovaný kontakt) je v některých případech velmi nepřesný, zpravidla na stranu nebezpečnou.

Porucha pouze jednoho materiálu by byla teoreticky možná v případě, že by kontakt byl ideálně hladkou plochou s pevným spojením lepidla a betonu. Vzhledem k charakteristikám těchto materiálů a způsobu instalace kotvy toto ale neplatí, a lepidlo s betonem se v teoretické rovině kontaktu prolínají. O tom, který materiál se svými vlastnostmi bude majoritně podílet na tvorbě poruchy, rozhoduje relativní rozdíl v pevnostních charakteristikách obou materiálů. Čím je tento rozdíl větší, tím se bude skutečná porucha blížit předpokládané poruše jednoho z materiálů, v takové konfiguraci ale nejsou použité materiály efektivně využity.

Analýza numerického modelu poukázala na nepřesnost při použití hodnot soudržností stanovených experimentem ve vztahu pro mezní tahovou únosnost při plné poruše kontaktu, a to vzhledem k ne zcela identickým okrajovým podmínkám experimentu ověřujícího soudržnost kontaktu a skutečně instalované kotvy.

Vlivem volného povrchu betonu v okolí kotvy zatížené tahem dochází k rychlému vyčerpání pevnosti betonu v tahu v oblasti blízké povrchu. V této oblasti nedosahuje soudržnost mezních hodnot naměřených při experimentech, při kterých je povrch betonu v okolí kotvy úložnou plochou pro zatěžovací přípravky. Aby bylo možné počítat s hodnotami soudržnosti naměřenými v experimentu, je nutné redukovat kotevní délku, (6.02).

Kombinovanou poruchu betonu a selhání kontaktu lze popsat zavedením vlivu charakteristik betonu do vztahu pro plnou poruchu kontaktu s respektováním efektivní kotevní délky.

Aproximací výsledků experimentů a numerických modelů byla nalezena závislost mezní hodnoty tahové síly na pevnosti betonu a soudržnosti lepidla. To je jedním z hlavních výsledků této práce. Pro charakteristickou hodnotu mezní tahové únosnosti lepené kotvy při kombinované poruše betonu a lepeného kontaktu platí:

$$N_{u,\tau,k} = \pi \cdot 0,74 \cdot \tau_{Rk} \left(1 - e^{-1,5 \cdot \frac{f_{c,cube,k}}{\tau_{Rk}}} \right) \cdot d_0 \cdot h_{ef} \quad (6.01)$$

$$h_{ef} = (h - 1,4 \cdot d_0) \quad (6.02)$$

Platnost vztahu 6.01 je omezena na lepené kotvy s kotevním šroubem majícím charakter závitové tyče (bez hlavy nebo jiné geometrické úpravy) s průměrem $d < 50 \text{ mm}$ a tenkou vrstvou lepidla, pro niž platí $d_0 < 1,1d$.

7 LITERATURA

ACI 440.3R-04: Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures, *ACI Committee 440, ACI - American Concrete Institute*, 2004

ČSN 73 1328 ZMĚNA Z2, Stanovení soudržnosti oceli s betonem, *Praha ČNI*, 2003

ČSN EN 1992-1-1, Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby, *Praha ČNI*, 2006

ČSN EN 1993-1-1, Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla pro pozemní stavby, *Praha ČNI*, 2006

ČSN EN 1993-1-8, Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-8: Navrhování styčníků, *Praha ČNI*, 2006

ETAG 001 Anchoring design methods, EOTA-European Organisation for Technical Approvals, *Avenue des Arts 40, Kunstlaan, 1040 Brussels* 2006

BAJER, M., KALA, J., BARNAT, J.: Experimental analysis of some types of steel bonded anchors to concrete exposed to specific loads, *Proceedings of 12th International Conference Structural Faults & Repair 2008, Engineering Technics Press 46 Cluny Gardens Edinburgh EH10 6BN, Edinburgh UK, June 2008, ISBN 0-947644-63-5, 0-947644-62-7*

COOK, R. A., BISHOP, M.C., HAGEDOORN, H. S., SIKES, D., RICHARDSON, D. S., ADAMS, T. L., DE ZEE, C. T.: Adhesive bonded anchors: Bond properties and effects of in service and installation conditions. *Report No. 94-2A*, University of Florida, Department of Civil Engineering, College of Engineering, Gainesville 1994

COOK, R. A., KUNZ, J., FUCHS, W., KONZ, R. C.: Behaviour and Design of Single Adhesive ANchors under Tensile Load in Uncracked Concrete, *ACI Structural Journal*, V. 95, No. 1, 1998, pp. 9-26.

COOK, R. A.: Behaviour of Chemically Bonded Anchors, *Journal of Structural Engineering, American Society of Civil Engineers*, V. 119, No.9, pp. 2744-2762, 1993

ELIGEHAUSEN, R., MALLÉE, R., REHM, G.: Befestigungen mit Verbundankern (Fixing with bonded anchors). *Betonwerk + Fertigteil-Technik*, No. 10, pp 686-692, No. 11, pp. 781-785, No. 12, pp. 825-829, 1984

8 CURRICULUM VITAE

Ing. Jan Barnat

Narozen:

10.května 1981 v Ústí nad Orlicí

Vzdělání:

1995 - 1999 Střední průmyslová škola Letohrad

1999 - 2004 Fakulta stavební VUT v Brně,
Studijní program M3607 – SI,
zaměření: konstrukce a dopravní stavby

Odborná praxe:

2004 - 2007 interní doktorand na Ústavu kovových a dřevěných konstrukcí
Fakulty stavební VUT v Brně,
studijní program P3607 – Stavební inženýrství (DK)

2005 - dosud člen výzkumného týmu v rámci výzkumného centra CIDEAS;

2007 - dosud akademický pracovník na Ústavu kovových a dřevěných
konstrukcí Fakulty stavební VUT v Brně;

9 ABSTRACT

The aim of the offered thesis is the analysis of the real behaviour of steel anchors bonded to concrete when they are loaded by tension force. The analysis is focused on the influence of bond quality (between glue and concrete) on the ultimate tensile load-carrying capacity of anchors. In spite of the fact that bonded anchors have been used for a long time no generally used methodology exists for the design of such anchoring systems. Currently used glue types and also the contemporary design approach are summarised in the preface part of this thesis. The ultimate tensile load-carrying capacity is based on the simplified assumption of separate failures of concrete or bond. This assumption is used also in certification regulations for steel post-installed anchors bonded to concrete e.g. ETAG.

The experimental part of the analysis is based on two different trials. The first experiment type was focused on ultimate tensile force on anchors installed in plain concrete of classes C12/15, C20/25 and C35/45. The diameter of the tested anchors was 10, 12 and 16 mm. Contact between the steel anchor bolt and the concrete was performed by three commonly used glue types – vinyl-urethane resin, epoxy resin and polymer cement compound. The second experiment type was focused on the verification of bond quality between concrete and glue. These experiments were carried out for the same glue types. The results of all the experiments were used for verification of the numerical model.

The theoretical part of the thesis is based on numerical analysis by the finite element method (FEM). ATENA software was used as a suitable tool for FEM nonlinear concrete structure analysis. The numerical model provided a closer view on the failure mechanism of bonded anchors. The simulation with theoretical values of bond stress proved that the bond quality is subordinated to the material characteristics of concrete. The element size guaranteeing a stable and effective solution proved to be equal to the gravel aggregate fraction size, and in the critical part of model equal to the sand aggregate fraction size. Also, the deformation load step should not be higher than 0.01 mm.

The results of experimental tests and numerical models were compared and analysed. The analysis proved that the simplified methods assuming the separate failures of materials are not accurate and partially unsafe. Real failures always involve a combination of concrete and glue failure.

The conclusion of the thesis is a relation describing the characteristic value of the ultimate tensile load-carrying capacity of bonded anchors installed in plain non-cracked concrete. The presented relation was obtained by an approximation of experimental and numerical model results, and it is based on full contact failure including the influence of concrete characteristics and also the real boundary conditions.