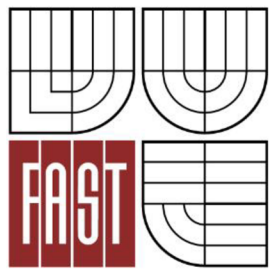




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

Faculty Of Civil Engineering
Institute of Building Testing

VYUŽITÍ ULTRAZVUKOVÉ DEFEKTOSKOPIE VE STAVEBNICTVÍ

THE USE OF ULTRASONIC TESTING IN CONSTRUCTION

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. PETRA SZTULOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JAROMÍR LÁNÍK, Ph.D.

BRNO 2016



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav stavebního zkušebnictví

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. Petra Sztulová
Název	Využití ultrazvukové defektoskopie ve stavebnictví
Vedoucí diplomové práce	Ing. Jaromír Láník, Ph.D.
Datum zadání diplomové práce	31. 3. 2015
Datum odevzdání diplomové práce	15. 1. 2016
V Brně dne 31. 3. 2015	

.....
prof. Ing. Leonard Hobst, CSc.
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

- [1] ČSN 35 6885 „Zkoušení materiálu a výrobků ultrazvukem – Kontrolní měrka K1“
- [2] ČSN 35 6886 „Zkoušení materiálu a výrobků ultrazvukem – Kontrolní měrka K2“
- [3] ČSN 01 5020 „Zkoušení materiálu a výrobků ultrazvukem – Názvosloví“
- [4] HOBST, L.; VÍTEK, L.; KOUDELKA, M.; LÁNÍK, J., Možnosti využití ultrazvukové impulsní metody ve stavební praxi, článek v Materiály pro stavbu, ISSN 1213-0311, Business Media CZ, Praha, 2010
- [5] HOBST, L.; KOUDELKA, M.; LÁNÍK, J.; VÍTEK, L.; MIČKA, T., Zhotovení a diagnostika kotev do betonu - Příklady z praxe, článek v Beton TKS, ISSN 1213-3116, BETON TKS, s.r.o., Praha, 2010
- [6] HOBST, L.; KOUDELKA, M.; LÁNÍK, J.; VÍTEK, L.; MIČKA, T., Diagnostika kotev do betonu, článek v Stavitel, ISSN 1210-4825, Economia,a.s., Praha, 2010

Zásady pro vypracování

Diplomová práce bude obsahovat dvě základní části, část teoretickou a část experimentální. Cílem diplomové práce je ověřit možnosti využití ultrazvukové impulsní metody ve stavebnictví s využitím laboratorních experimentů a simulací. Výstup diplomové práce je požadován formou grafů, schémat a případných teoretických výpočtů. Účelem diplomové práce je poukázat na možnosti rozvoje nedestruktivních metod ve stavebnictví, při řešení specifických problémů, např. kontrola kotevní délky, kontrola tloušťky materiálu, apod.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

.....
Ing. Jaromír Láník, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

Abstrakt

Diplomová práce je rozdělena na dvě části. V první části se zaměřuje na využití ultrazvukové metody ve stavební praxi. Vysvětluje zde, jak funguje ultrazvuk. V druhé části se zaměřuje na možnosti kotvení. Je zde popsáno, co je chemické, mechanické kotvení. Zabývá se tahovými zkouškami dodatečně osazených chemických kotev HILTI. Především se zaměřuje na to, co se stane, pokud se nedodrží správný technologický postup při instalaci chemických kotev.

Klíčová slova

Ultrazvuková metoda, kvalita zhutnění, mechanické a chemické kotvy, tahové zkoušky

Abstract

The thesis is divided into two parts. The first part is focused on the use of ultrasonic methods in building practice. Explains here how ultrasound works. The second part focuses on the possibility of anchoring. It describes what is chemical, mechanical anchoring. It deals with the tensile testing additionally mounted chemical anchors Hilti. Primarily focuses on what happens if it fails to comply with the correct technological procedure when installing chemical anchors.

Keywords

The ultrasonic method, the quality of compaction, mechanical and chemical anchors, tensile tests

Bibliografická citace VŠKP

Bc. Petra Sztulová *Využití ultrazvukové defektoskopie ve stavebnictví*. Brno, 2015. 99 s.
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního
zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Jaromír Láník, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 15. 01. 2016

.....
podpis autora
Bc. Petra Sztulová

Poděkování:

Diplomová práce byla vytvořena v rámci řešení projektu č. LO1408 "AdMaS UP - Pokročilé stavební materiály, konstrukce a technologie" podporovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy v rámci účelové podpory programu „Národní program udržitelnosti I“.

Tímto bych ráda poděkovala svému vedoucímu diplomové práce Ing. Jaromíru Láníkovi, Ph.D. za odbornou pomoc a rady při zpracování diplomové práce. Dále bych chtěla poděkovat firmě HILTI za poskytnuté materiály a pomůcky pro experimentální část této práce. Poděkování patří i mým rodičům a příteli za jejich podporu po celou délku mého studia.

Obsah

1	Úvod	10
2	Ultrazvuková metoda	11
2.1	Charakteristika	11
2.2	Kmitání, doba kmitu, vlnová délka	12
2.3	Druhy ultrazvukových vln	13
2.4	Odraz a lom, akustické rozhraní	14
2.5	Útlum zvuku	17
2.6	Ultrazvukové metody	18
2.7	Ultrazvuková impulzová metoda průchodová	18
2.8	Měření doby průchodu impulsu UZ vlnění zkoušeným materiálem	19
2.9	Způsoby prozvučování při použití dvou sond	21
2.10	Vlivy na přesnost měření	21
2.11	Ultrazvukové sondy	22
2.12	Měřicí přístroje	26
2.13	Kalibrační měřky	29
2.14	Možnosti využití ultrazvukové impulsní metody ve stavební praxi přímou sondou	31
2.15	Možnosti využití ultrazvukové impulsní metody ve stavební praxi úhlovou sondou	34
3	Kotvy	37
3.1	Chemické kotvy	37
3.1.1	Rozdělení chemických kotev	38
3.1.2	Vlastnosti chemických kotev	39
3.1.3	Přenos zatížení	40
3.1.4	Vliv čištění otvoru na soudržnost	41
3.1.5	Smršťování	42
3.1.6	Faktory ovlivňující dobu zpracování	42
3.1.7	Trendy v chemickém kotvení	43
3.1.8	Lepicí hmota HIT – HY 200	44
3.2	Mechanické kotvy	49
3.3	Metoda ověřování kotev	51
4	Experimentální část	54
4.1	Výroba zkušebních těles	54
4.1.1	Návrh směsi betonu	54
4.1.2	Zkoušky čerstvého betonu	55
4.1.3	Uložení a ošetřování zkušebních těles	56

4.2	Zkoušky ztvrdlého betonu	58
4.2.1	Ultrazvuk.....	58
4.2.2	Pevnost v tlaku.....	64
4.2.3	Modul pružnosti v tlaku	65
4.3	Tahové zkoušky dodatečně osázených kotev HILTI	67
4.3.1	Výroba zkušebních těles	67
4.3.2	Provedení tahových zkoušek	72
4.3.3	Vyhodnocení tahových zkoušek	73
4.4	Závěry provedených tahových zkoušek.....	85
5	Závěr	91
6	Seznam použité literatury	94
7	Seznam obrázků	95
8	Seznam tabulek	98
9	Seznam grafů.....	99

1 Úvod

Ultrazvuk je v dnešní době hojně využíván. Potkáme se s ním hlavně ve zdravotnictví, strojírenství, stavebnictví. Používá se při desinfekci vody, mléka a jiných roztoků. Ve stavebnictví je používán pro měření tloušťky materiálu, pro kontrolu homogenity a poruch materiálu.

V praktické části jsme se zabývali ultrazvukovým měřením, jeho fungováním, druhy přístrojů. Také jsme se zaměřili na způsoby kotvení pomocí chemických, mechanických kotev a jejich technologickými postupy při osazování do betonové konstrukce.

Cílem diplomové práce v experimentální části bylo zjistit, jak nedodržení technologického postupu, který předepsal výrobce, může ovlivnit únosnost kotev. Únosnost kotev může ovlivnit nedostatečná hloubka kotvení, nedodržení správného technologického postupu při aplikaci kotvy. V praxi můžeme správnou hloubku kotvení jednoduše ověřit pomocí ultrazvukového měření, ale to nemusí ještě znamenat, že kotva je dostatečně únosná. Proto by se měli provádět na vybraných kotvách kontrolní tahové zkoušky, které jako jediné prověří kvalitu kotvení z hlediska přenosu síly.

Abychom tohle ověřili, vyrobili jsme si betonové krychle, do kterých jsme aplikovali chemické kotvy. Kotvy byly osazeny v různých hloubkách kotvení, od nedostačující hloubky až po typickou hloubku kotvení pro danou kotvu. Část kotev byla osazena správným způsobem. U zbytků kotev jsme záměrně technologický postup nedodrželi. Provedli jsme tahové zkoušky na všech vyrobených betonových krychlích. Porovnávali jsme, o jak velkou hodnotu se zmenší únosnost dodatečně osazených kotev, pokud technologický postup nedodržíme, nebo kotvu aplikujeme správným způsobem dle doporučení od výrobce.

2 Ultrazvuková metoda

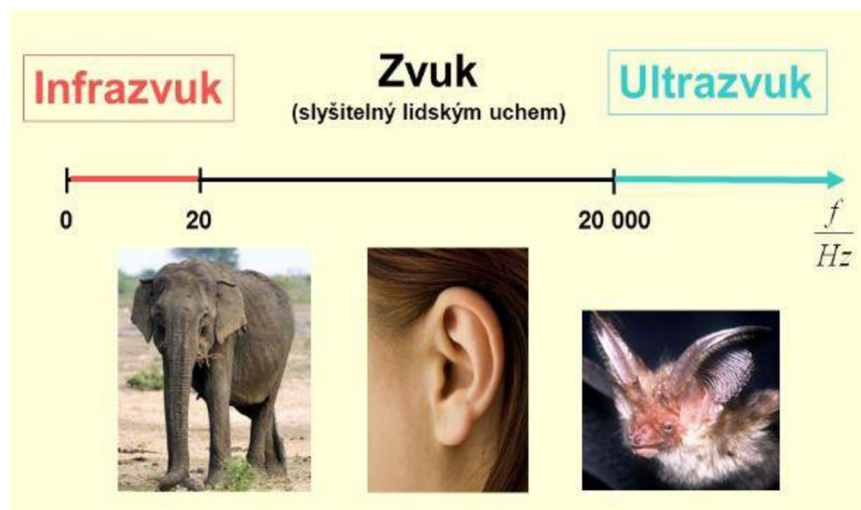
2.1 Charakteristika

V diagnostice rozlišujeme dvojí způsob zkoušení materiálu. Jsou to metody destruktivní a nedestruktivní. Hlavní výhodou nedestruktivních zkoušek je, že nám tato metoda konstrukci nijak nepoškodí. Pouze u některých nedestruktivních metod se zkoušené místo lehce upraví zbrúšením, vrypem nebo vtiskem. Další výhodou je, že na zkušebním místě lze měření vícekrát opakovat. Do této skupiny řadíme ultrazvukovou metodu.

Ultrazvuk je mechanické kmitání částic prostředí, jehož frekvence leží na hranici slyšitelnosti lidského ucha, slyšitelného zvuku, která je přibližně 20 kHz. Z hlediska frekvencí rozlišujeme:

- Infrazvuk < 16 Hz
- Zvuk 16 Hz – 16 kHz
- Ultrazvuk 20 kHz – 100 MHz
- Hyperzvuk > 100 MHz

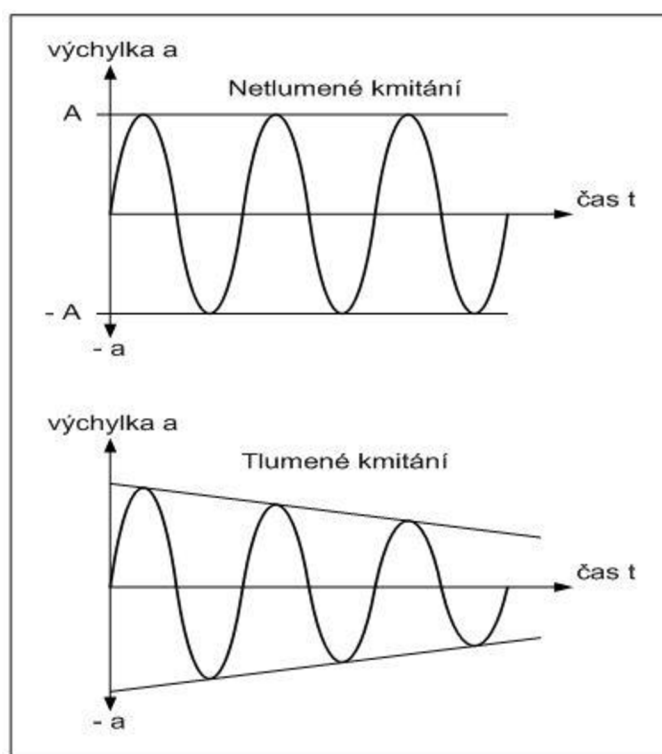
Ve stavebnictví se používá ultrazvukové vlnění s kmitočty od 20 kHz až do 150 kHz (výjimečně do 500 kHz). Ultrazvukové vlnění má tu vlastnost, že se šíří i relativně silnými vrstvami materiálu. [1] [2]



Obrázek 1 – Zvuky z hlediska frekvencí

2.2 Kmitání, doba kmitu, vlnová délka

Základem každého kmitání prostředí je kmit. Kmitání dělíme na tlumené, netlumené. Tlumené kmitání je kmitání, které po určité době ustává a energie kmitů se ztrácí (např. v důsledku tření nebo odporu prostředí). Tyto důsledky ovlivňují kmitání nejčastěji postupným zmenšováním amplitudy. Pro netlumené kmitání se musí dodávat energie, spotřebovaná na překonávání odporu prostředí. Netlumené kmity mají konstantní výchylku. Maximální výchylku nazýváme amplitudou a značíme A .



Obrázek 2 – Tlumené a netlumené kmitání

V ultrazvukové defektoskopii používáme kmity buzené měničem. Takový kmit se nazývá impuls.

Dobu kmitu značíme T . V ultrazvukové defektoskopii existuje vztah mezi dobou kmitu T a frekvencí f , který je:

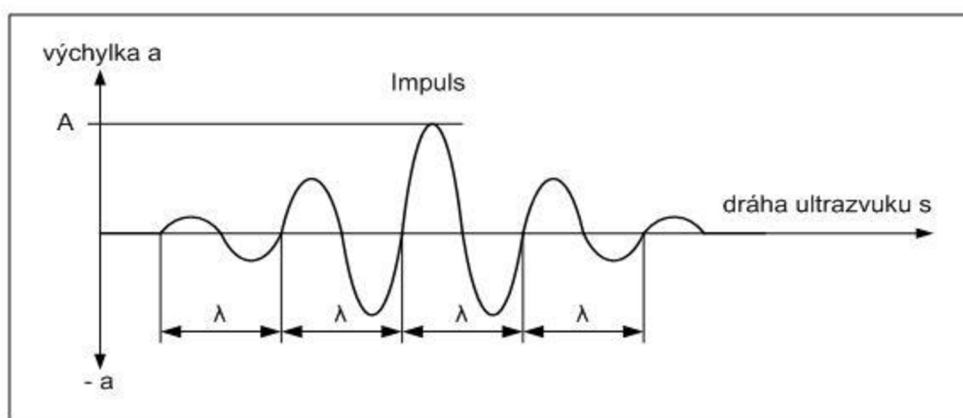
$$T [\mu\text{s}] = \frac{1}{f [\text{MHz}]}$$

Době jednoho kmitu odpovídá dráha ultrazvuku, rovna jedné vlnové délce λ . V praxi nás nezajímá doba kmitu, ale vlnová délka. Mezi vlnovou délkou a dobou kmitu platí vztah, který je vyjádřen s jednotkami pro použití v ultrazvukové defektoskopii.[10]

$$\lambda [\text{mm}] = c [\text{km/s}] \cdot T [\mu\text{s}]$$

$$\lambda [\text{mm}] = \frac{c [\text{km/s}]}{f [\text{MHz}]}$$

kde c je rychlost šíření vln

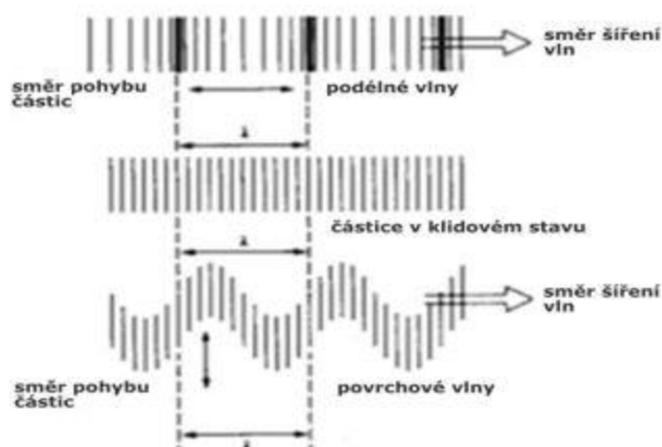


Obrázek 3 – Impuls a vlnová délka

2.3 Druhy ultrazvukových vln

V pevných látkách se mohou zvukové vlny šířit ve čtyřech základních režimech, které jsou založeny na způsobu, jakým částice kmitají. Zvuk se může šířit jako:

- Podélné vlny
- Příčné vlny
- Povrchové (Rayleighovy) vlny
- Deskové vlny (v tenkých materiálech)



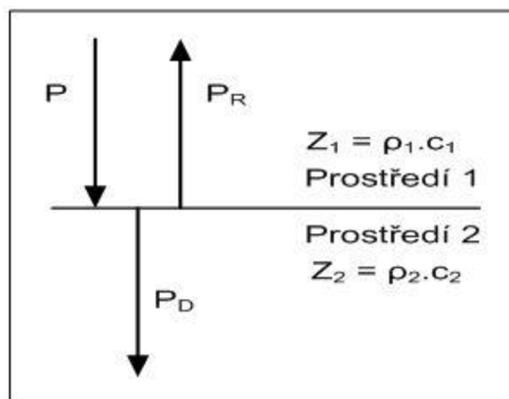
Obrázek 4 – Šíření ultrazvukových vln

Podélné a příčné vlny jsou dva způsoby šíření zvuku, které jsou používány u ultrazvukové kontroly nejvíce. V podélných vlnách se kmitání vyskytuje v podélném směru nebo ve směru šíření vln. Dokud jsou v těchto vlnách aktivní tlakové a detenční síly, jsou tyto vlny také nazývány tlakovými. Někdy jsou také nazývány jako hustotní vlny, protože jejich hustota částic kolísá dle toho, jak se pohybují. Tlakové vlny mohou být vytvořeny jak v kapalinách, tak v pevných látkách, protože energie prochází skrz strukturu atomů v řadách srovnaných či roztažených pohybů. Rychlost [c] šíření ultrazvukové vlny je funkcí vlastností prostředí, tzn. modulu pružnosti v tahu a ve smyku, hustoty, Poissonova čísla a adiabatické stlačitelnosti. Dopadne-li vlna kolmo na rozhraní dvou prostředí, dochází k odrazu vlny. Na rozhraní definujeme koeficient odrazu R jako poměr odraženého akustického tlaku a dopadajícího akustického tlaku. Koeficient průchodu D je definován jako poměr prošlého akustického tlaku a tlaku dopadajícího. [10]

2.4 Odraz a lom, akustické rozhraní

Akustické rozhraní je rozhraní dvou materiálů, přes které se šíří ultrazvuková vlna. Na tomto rozhraní nastává obecně lom, odraz a transformace. V defektoskopii rozlišujeme řešení podmínek šíření vln rozhraním podle úhlu dopadu ultrazvuku na kolmý a šikmý dopad.

U kolmého dopadu ultrazvukové vlny na rozhraní dvou prostředí dochází k odrazu a průchodu vlny rozhraním. Dopadající akustický tlak se pak dělí na odražený P_R a prošlý P_D tlak. Poměr mezi P_R a P_D závisí na akustických vlnových odporech obou prostředí.



Obrázek 5 – Kolmý dopad na rozhraní

Mezi koeficienty odrazu R a průchodu D a akustickými vlnovými odpory Z_1 a Z_2 obou prostředí platí vztahy:

$$R = \frac{P_R}{P} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

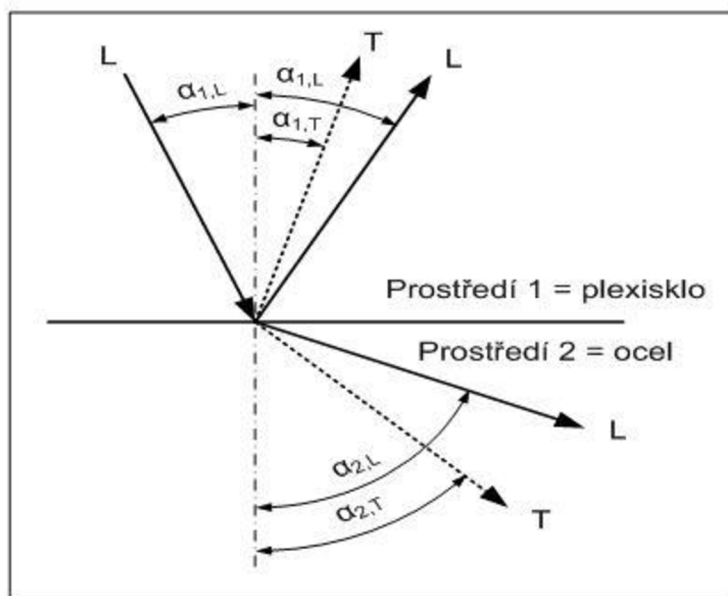
$$D = \frac{P_D}{P} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}$$

$$D = 1 + R$$

Z uvedených vztahů vyplývá, že čím větší je rozdíl mezi akustickými vlnovými odpory, tím větší je koeficient odrazu. Pro praxi to znamená, že je vada lépe lokalizovaná. Například u oceli, která má $Z \approx 45$ se lépe lokalizuje vada vyplněná vzduchem $Z \approx 0$ než vada vyplněná vodou $Z \approx 1,5$. Čím menší je rozdíl mezi akustickými vlnovými odpory, tím menší je koeficient průchodu, více akustického tlaku projde do druhého prostředí a tím je vada hůře lokalizovaná. Z toho vyplývá, že v případě lokalizace vady je dobré, aby byl velký rozdíl mezi akustickými vlnovými odpory

základního materiálu a vady. Naopak pro průchod ultrazvuku rozhraním potřebujeme malý rozdíl mezi vlnovými odpory.

U šikmého dopadu ultrazvukové vlny na rozhraní dvou prostředí dochází k odrazu, lomu a transformaci. Vše závisí na úhlu dopadu ultrazvukové vlny na rozhraní a na rychlostech šíření vln v obou prostředích. V praxi pro defektoskopii mají význam pouze vlny podélné.



Obrázek 6 – Šikmý dopad na rozhraní

Dle obrázku jde vidět, že při šikmém dopadu ultrazvukové vlny na rozhraní dvou prostředí vznikají 4 vlny. Dopadající podélná vlna L, která se odráží zpět do prostředí pod úhlem odrazu $\alpha_{1,L}$, který se rovná úhlu dopadu a transformuje na příčnou vlnu T, která se odráží pod úhlem $\alpha_{1,T}$. Dále se šíří do prostředí 2 jako podélná vlna pod úhlem lomu $\alpha_{2,L}$ a transformuje na příčnou vlnu, která se šíří do prostředí 2 pod úhlem $\alpha_{2,T}$. Podmínky na rozhraní se řídí Snellovým zákonem

$$\frac{\sin \alpha_{1,L}}{c_{1,L}} = \frac{\sin \alpha_{1,T}}{c_{1,T}} = \frac{\sin \alpha_{2,L}}{c_{2,L}} = \frac{\sin \alpha_{2,T}}{c_{2,T}},$$

který v praxi používáme také v upraveném tvaru „poměry sinů se rovnají poměru rychlostí“, například mezi dopadající podélnou vlnou a odraženou transformovanou příčnou vlnou platí vztah

$$\frac{\sin \alpha_{1,L}}{\sin \alpha_{1,T}} = \frac{c_{1,L}}{c_{1,T}}$$

Pro úhel lomu 90° se šíří ultrazvuková vlna rozhraním a vymizí z prostředí $SSU-$.
2. Odpovídající úhly dopadu podélné vlny nazýváme mezní nebo kritické úhly a počítají se z těchto rovnic. [10]

$$\sin \alpha_{1,T} = \frac{c_{1,T}}{c_{1,L}}$$

$$\sin \alpha_{2,L} = \frac{c_{2,L}}{c_{1,L}}$$

$$\sin \alpha_{2,T} = \frac{c_{2,T}}{c_{1,L}}$$

2.5 Útlum zvuku

V každém prostředí, kde se zvuk šíří, dochází k jeho útlumu vlivem absorpce, rozptylu. Útlum značíme κ , útlum absorpcí κ_A a útlum rozptylem κ_R . Mezi nimi platí vztah

$$\kappa = \kappa_A + \kappa_R$$

Absorpce ultrazvukové energie převládá při nízkých frekvencích, kdy se mechanická energie mění na tepelnou. Útlum absorpcí je vyjádřen vztahem, kde a_A je konstanta absorpce

$$\kappa_A = f \cdot a_A$$

Rozptyl převládá při vyšších frekvencích v oblasti MHz v této oblasti je vlnová délka malá a dochází na rozhraní zrn k odrazu, lomu a transformaci vlnění podle úhlu dopadu vln na rozhraní zrn. Rozlišujeme tři typy rozptylu: Rayleigho, stochastický a difúzní. Při růstu zkušební frekvence přechází rozptyl Rayleigho ve stochastický a dále

v difúzní. V defektoskopii pracujeme většinou ve frekvenčním rozsahu 0,5 až 5 MHz a v této oblasti frekvencí převládá pro ocel rozptyl Rayleigho. [10]

2.6 Ultrazvukové metody

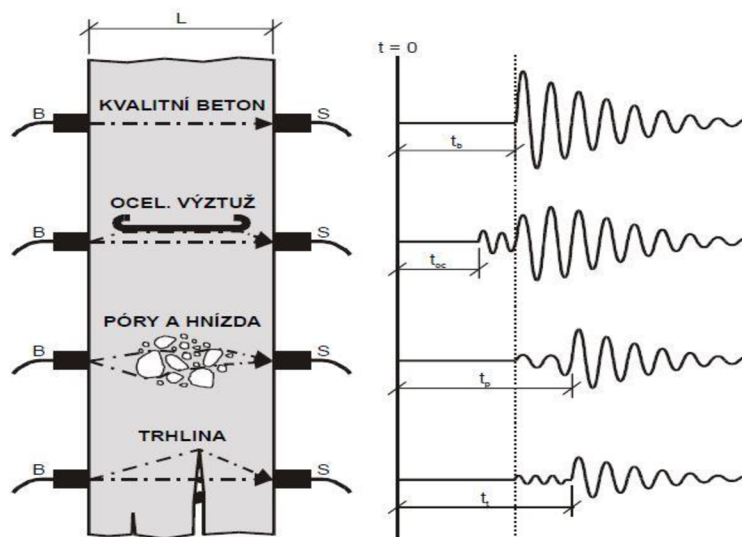
Pro stanovení vlastností materiálu nebo při lokalizaci vad u technických prvků (defektoskopii) se v praxi používá několik UZ metod. Jednou z nich je spojitě vysílané vlnění. Tato metoda se používá především ve strojírenství pro určení tloušťky plechů nebo vad materiálu. Druhou metodou je vysílání impulzové. Tato metoda funguje na principu vysílání krátkých svazečků mechanického tlumeného kmitání, které vzniká v budiči účinkem pravidelného se opakujících elektrických impulzů. U této metody můžeme použít dvě UZ sondy, kde jedna funguje jako budič mechanických impulsů a druhá sonda funguje jako snímač. Snímač mění přicházející případně dopadající mechanické vlnění na jeho elektrický obraz. Může se také použít jen jedna sonda (piezoelektrická). Tato sonda se přikládá na povrch zkoušeného materiálu. Nejprve funguje jako budič, což znamená, že vyšle do materiálu mechanický impuls. Ihned se přepne na snímání, tj. pracuje jako snímač, který po příchodu odražené vlny od protějšího povrchu vzorku nebo jiné překážky ji přemění na elektrický tvar a zobrazí na obrazovce defektoskopu. [1] [2]

2.7 Ultrazvuková impulzová metoda průchodová

Tuto metodu používáme tam, kde chceme zjistit z rychlosti šíření UZ vlnění jakost zkoušeného prostředí např. stejnoměrnost výrobku, nebo mechanické – fyzikální charakteristiky. UZ impulzová metoda průchodová funguje tak, že se opakovanými elektrickými impulzy vytvoří v budiči úzké svazky mechanického tlumeného kmitání. Tyto impulzy se vnesou do zkoušeného prvku a po proběhnutí změřené dráhy L se sejmou snímačem. Přitom měříme dobu průchodu UZ vlnění. Doba průchodu je čas t od vyslání impulzu budičem po zaznamenání jeho dopadu na snímač. Impulzová rychlost je dána vztahem:

$$v_{uz} = L/t \quad [m/s^{-1}]$$

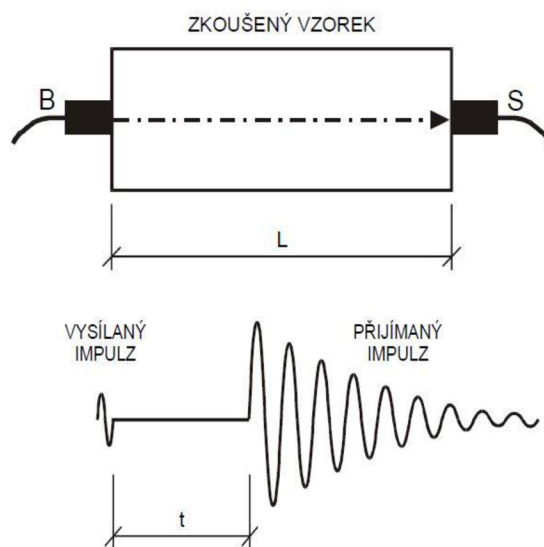
Rychlost je různá pro různé materiály a mění se s jejich vlastnostmi. Příkladem může být beton. U kvalitního betonu je rychlost UZ vlnění vyšší než u méně kvalitního betonu. [1] [2]



Obrázek 7 – Vliv prostředí na rychlost šíření a tvar impulzu UZ vlnění

2.8 Měření doby průchodu impulzu UZ vlnění zkoušeným materiálem

Při měření doby průchodu používáme sondy s akustickým vazebním prostředkem. Pokud by byly sondy přikládány ke vzorku bez akustického prostředku, vznikla by mezi sondou a vzorkem malá vzduchová mezera. Na této dvojí hranici prostředí (kov sondy – vzduch, vzduch – materiál vzorku) by došlo ke značnému odrazu ultrazvukových vln. Dále by prošlo tak málo impulzů UZ vlnění, že by ve většině případů nestačila citlivost snímače k jejich příjmu. Proto je nutné používat akustický vazební prostředek. Jeho tenká vrstva je místo vzduchu mezi sondou a vzorkem. Při použití tohoto prostředku se sníží nežádoucí odraz vln a výrazně se zvýší průchod ultrazvuku přes uvedené rozhraní. Používá se plastelína nebo sklenářský tmel, v co nejtenčí vrstvě. Pokud se znečistí prachem a pískem, přestává plnit svou funkci a musí se vyměnit.



Obrázek 8 – Měření doby průchodu impulzu UZ vlnění zkoušeným materiálem

Když měříme dobu průchodu UZ vlnění, tak impulzy procházejí určitou dobou, vrstvou akustického vazebního prostředku a konstrukcí sondy. Tuto dobu označujeme jako „mrtvý čas“. Tento čas musíme zjistit a při vyhodnocování o něj upravit všechny měřené hodnoty. Mrtvý čas určujeme na kalibračním vzorku (etanolu), jehož časovou charakteristiku přesně známe. Mrtvý čas t_{kor} vypočteme z následujícího vzorce. [1] [2]

$$t_{kor} = t_{ME} - t_E$$

kde t_{ME} je doba průchodu impulzu UZ vlnění etanolem [μs]

t_E je řasová charakteristika etanolu [μs]

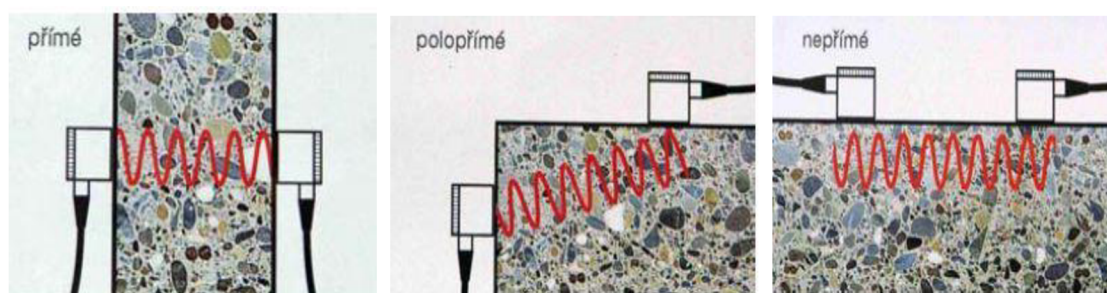
Poté vypočteme rychlost šíření impulzu UZ vlnění v_L podle vzorce:

$$v_L = L / (t_L - t_{kor})$$

kde L je délka měřicí základny [μ]
 t_L je naměřená doba průchodu impulzu UZ vlnění [s]
 t_{kor} je mrtvý čas [s]

2.9 Způsoby prozvučování při použití dvou sond

Způsob prozvučování závisí na přístupnosti povrchů zkoušeného objektu a na umístění sond na zkoušeném objektu. Pokud je konstrukce přístupná z obou stran a sondy můžeme umístit proti sobě v jedné ose, jedná se o prozvučování přímé. Jsou – li sondy umístěné na přilehlých stranách (v rozích konstrukce) jedná se o polopřímé prozvučování. Za polopřímé prozvučování považujeme i případ, kdy sondy jsou umístěné proti sobě, ale ne přímo proti sobě. Pokud sondy umístíme na stejné straně konstrukce, je to prozvučování nepřímé. Tento způsob používáme jen ve výjimečných případech, pokud nelze použít prozvučování přímé nebo polopřímé. [1] [2]



Obrázek 9 – Způsoby prozvučování

2.10 Vlivy na přesnost měření

Na měření rychlosti šíření impulzu ultrazvukového vlnění mají vliv různé faktory. Jsou to:

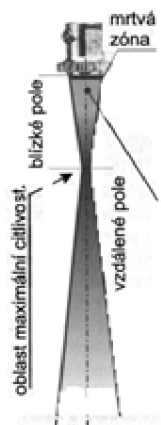
- Vlhkost
- Teplota
- Měřicí základna
- Tvar a velikost těles
- Přítomnost výztuže
- Trhliny a dutiny

Vliv vlhkosti se projevuje fyzikálním nebo mechanickým způsobem. Největší rozdíl nastává u způsobu ošetřování betonu při zrání. To ovlivňuje hydrataci cementu. Důležitý je také obsah volné vody v pórech. Vliv teploty lze zanedbat od 10°C do 30°C. Pokud bude prováděno měření mimo tuto škálu, měly by se provést opravy měření rychlosti šíření impulzu. Na vliv délky měřící základny se doporučuje minimální délka měřící základny. [1] [2]

- 100 mm pro beton s max. zrnem kameniva do 20 mm
- 150 mm pro beton s max. zrnem kameniva od 20 mm do 40 mm

2.11 Ultrazvukové sondy

Ultrazvuková sonda je elektroakustické zařízení, které obsahuje jeden nebo více měničů pro transformaci elektrické energie na mechanickou a naopak (vysílač/přijímač). Měniče sond jsou vyrobeny z piezoelektrických polymerů a piezokeramických materiálů. Ultrazvukové pole sondy vytváří fokusační profil (obr. 10).



Obrázek 10 – Fokusační profil sondy

Ohraničení je dáno body, ve kterých klesne výška echa (odraženého signálu) o 6 dB vzhledem k maximu na ose vyzařujícího svazku sondy. Ultrazvukové vlny v pásmu blízkého pole navzájem interferují (vzájemně se ovlivňují). Proto v této části je možnost vyhodnocení v této oblasti pouze orientační.

Rozdělení sond podle podmínek měření:

- Kontaktní
- Imerzní

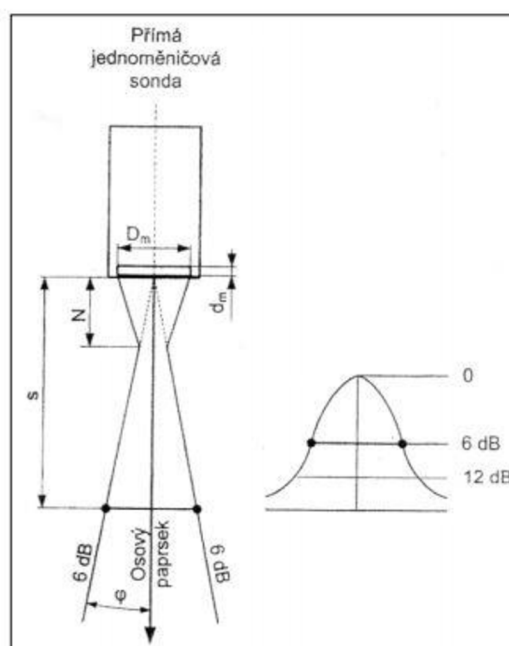
Kontaktní sondy se přímo přikládají na povrch zkoušeného materiálu. Tyto sondy mají pod měničem ochrannou folii nebo destičku z materiálu, který odolává opotřebení. Povrch zkoušeného předmětu je často drsný a měnič by byl jinak brzy zničen. Ultrazvuk se ve vzduchu hned utlumí, a proto pro přenos do zkoušeného materiálu je mezi sondou, zkušebním povrchem vazební prostředek (olej, voda, vazelína a jiné prostředky).

Imerzní sondy se používají pro bezkontaktní zkoušení. Mezi sondou a zkušebním povrchem je sloupec vazebního prostředku, nejčastěji vody nebo řídkého oleje. Tyto sondy nemají chráněný měnič proti opotřebení, pouze proti vniknutí vazebního prostředku. Použijí-li se omylem pro zkoušení s kontaktní vazbou budou brzy zničeny.

Druhy sond:

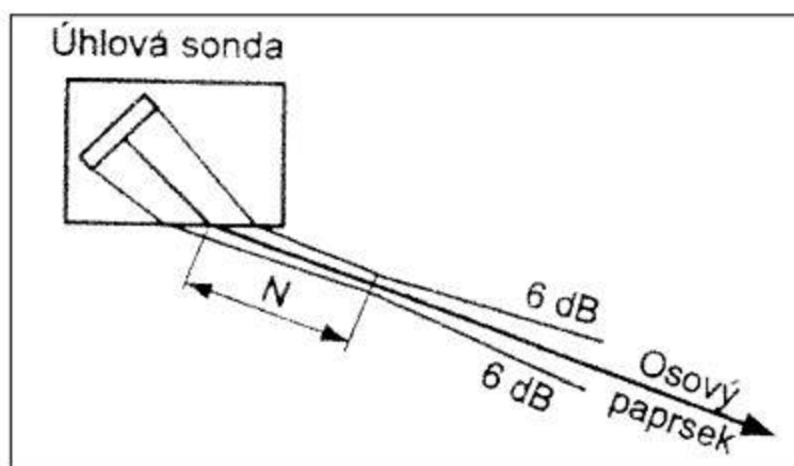
- Přímá
- Úhlová
- Dvojitá
- Fokusující

Přímá sonda (obr. 11) je sonda s jedním měničem pro vysílání nebo přijímání akustických vln s akustickou osou kolmou k povrchu objektu. Při aplikaci přímé sondy jak pro funkci přijímače, tak pro funkci vysílače je generátor impulsů přes oddělovací diody přímo spojen se vstupem zesilovače. Následkem toho dokmitávající impuls prodlouží počáteční echo a způsobí tzv. mrtvou zónu sondy, ve které nelze rozpoznat vadu.



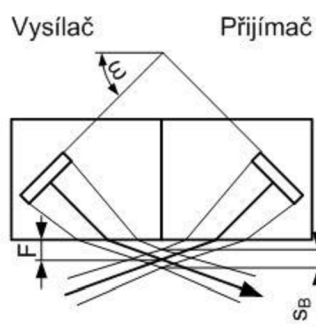
Obrázek 11 – Přímá sonda

Úhlová sonda (obr. 12) vysílá ultrazukový svazek do materiálu pod úhlem. Lomový klín je z materiálu (speciální plexisklo), u kterého je rychlost šíření podélných vln nižší než rychlost v měřeném objektu. Vzhledem k tomu, že při dopadu podélné vlny na rozhraní dochází k transformaci vlny na příčnou vlnu, je nutné zamezit šíření obou vln současně, neboť vlny se šíří různou rychlostí a při lokalizaci vady může docházet k chybám. Tyto klasické úhlové sondy pracují pouze v rozsahu úhlů dopadu mezi 1. a 2. kritickým úhlem. Například pro zkoušení oceli s kontaktní vazbou mezi $27,5^\circ$ až $57,1^\circ$.



Obrázek 12 – Úhlová sonda

Dvojitá sonda obsahuje dva izolované měniče. Jeden měnič je využit jako vysílač, druhý jako přijímač ultrazvukových vln. Tvar měniče je půlkruhový nebo obdélníkový. Měníče jsou připevněny s určitým sklonem na plastové předsádky, které zpožďují průchod vlny mezi měniči a povrchem zkoušeného materiálu. U těchto sond se neuplatňuje mrtvá zóna. Tyto sondy byly vyvinuty pro měření v malých hloubkách, ať jde o lokalizaci vad nebo měření tloušťky.



Obrázek 13 – Dvojitá sonda

Fokusující sonda je sonda, u které je akustický svazek soustředěn do malého prostoru. Výhodou této sondy je zvýšení citlivosti v místě fokusace ultrazvukového signálu.

Ve stavebnictví při zkoušení prvků, dílců a konstrukcí používáme dvě elektroakustické sondy – budič a snímač. Vlastní pracovní kmitočet těchto sond se pohybuje od 20 kHz až 150 kHz, využití jiných frekvencí není příliš časté, ale je možné. Platí, že s vyšší frekvencí se zvyšuje rozlišovací schopnost a tudíž i přesnost měření, ale ultrazvukové kmitočty o vysokých frekvencích jsou během průchodu konstrukcí mnohem výrazněji zeslabovány. Proto z normy ČSN EN 12504-4:2005 vychází toto doporučení:

- Pro krátké měřicí základny (do 50 mm) je vhodné použít sondy s vysokým kmitočtem od 60 kHz až do 200 kHz
- Pro dlouhé měřicí základny (řádově v metrech, až do 15 m) je vhodné použít sondy nízkým pracovním kmitočtem od 10 kHz až do 40kHz
- Pro většinu případů je vhodné použít sondy s pracovním kmitočtem od 40 kHz až do 60 kHz

Použitelnost sond o určité frekvenci není závislá jen na délce měřicí základny, ale i na dalších faktorech jako jsou například rozměry defektu neboli nehomogenity, druh materiálu, výkon přístroje apod. [10]

2.12 Měřicí přístroje

Při měření ultrazvukem pracujeme se speciálními elektronickými přístroji. V dnešní době se používají digitalizované přístroje. Tyto přístroje jsou schopny v určitých časových intervalech vyvozovat impulzy, jejichž důsledkem je vznik mechanického kmitání (signál budiče). Signál projde zkoušeným prvkem a zachytí jej snímač. Pro jeho zesílení ho přístroj registruje.

Existují tři druhy přístrojů:

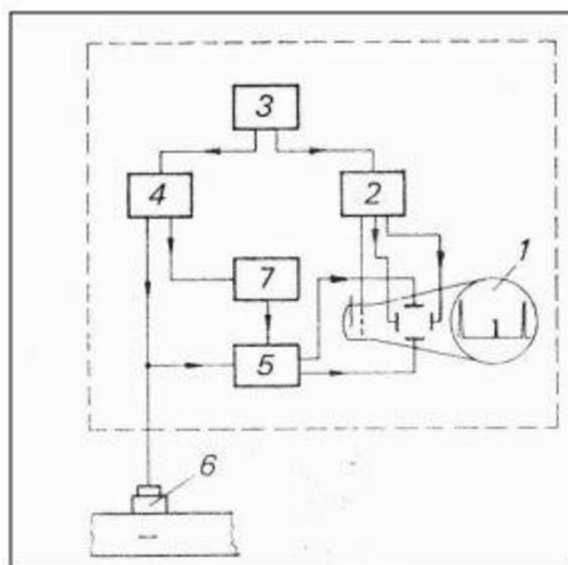
- Přístroje s automatickým měřením času průchodu UZ vlnění (s digitálním výstupem)
- Přístroj s obrazovkou a s ručním nastavením časového znaku na čelo impulsů vlny (většina starších typů přístrojů)
- Přístroje kombinovaná s obou dvou druhů



Obrázek 14 – Měřicí přístroj

Impulzový ultrazvukový přístroj (defektoskop) se skládá z následujících částí:

- Obrazovka
- Zdroj časové základny
- Synchronizátor
- Generátor impulsů
- Zesilovač
- Sondy
- Obvod pro řízení citlivosti zesilovače



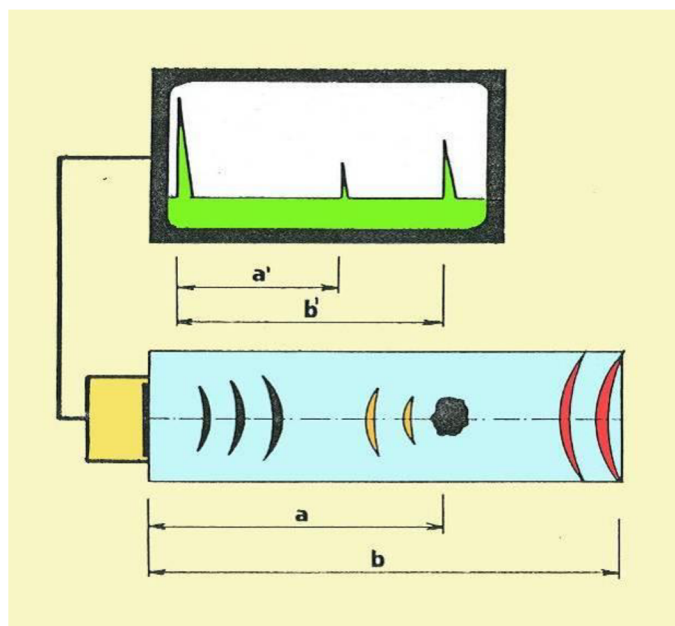
Obrázek 15 - Základní zapojení ultrazvukového přístroje: 1 – obrazovka, 2 – časová základna, 3 – synchronizátor, 4 – generátor impulsů, 5 – zesilovač, 6 – sonda, 7- řízení citlivosti

Princip kontroly pomocí ultrazvukového defektoskopu je založen na pravidelném a opakujícím se vysílání impulsů pomocí ultrazvukové sondy do zkoušeného vzorku. V tomto materiálu se vyslaný impuls šíří rychlostí danou materiálem zkoušeného vzorku. V tabulce jsou uvedeny rychlosti šíření UZ vlnění různými materiály.

Tabulka 1 – Rychlost šíření UZ vlnění různými materiály

Materiál	Rychlost šíření [m.s ⁻¹]
Vzduch	340
Voda	1485
Ocel	5850
Malta MV	800 - 1200
Malta MVC	1200 - 2000
Beton špatný	2000 - 3000
Beton neurčitý	3000 - 3700
Beton v. dobrý	3700 - 4500
Beton výborný	> 4500

Při dopadu impulsu na vadu nebo na protější stranu zkoušeného vzorku se impuls odrazí zpět se sníženou energií a je zaznamenán ultrazvukovou sondou. Po elektronickém zesílení se zobrazí na obrazovce ultrazvukového defektoskopu. Při správné kalibraci ultrazvukového defektoskopu, je pak doba od vyslání impulsu až po návrat do ultrazvukové sondy přímo úměrná vzdálenosti zjišťované vady či protilehlé strany zkoušeného vzorku. [1] [2] [10]

*Obr. 2 - Schéma činnosti ultrazvukového přístroje*

Při výběru ultrazvukového defektoskopu pro zkoušku konstrukce musíme zohlednit několik faktorů:

- Citlivost a výkon přístroje
- Frekvenční rozsah
- Vlastnosti časové základny
- Vlastnosti zesilovače
- Rozlišovací schopnost
- Způsob zobrazení
- Rozměry a hmotnost

2.13 Kalibrační měrky

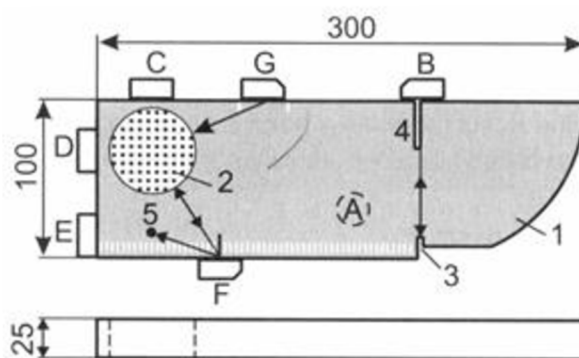
Kalibrační měrky slouží k ověření činnosti a ke kalibraci ultrazvukových přístrojů a sond. Měrky mají definovanou geometrii, materiál, jakost povrchu s příslušnými ČSN EN nebo ANSI/AWS standardy. Mezinárodně používaná je kalibrační měrka K1. Pomocí kalibrační měrky K1 lze kontrolovat:

- Při měření přímými sondami:
 - Kalibrace časové základny
 - Kontrola a nastavení citlivosti
 - Určení maximálního dosahu
 - Odhad délky mrtvé zóny
 - Určení hloubkové rozlišovací schopnosti
- Při měření úhlovými sondami
 - Kalibrace časové základny
 - Kontrola a nastavení citlivosti
 - Určení bodu výstupu svazku
 - Určení úhlu lomu
- Posuzování některých charakteristik přístroje, a to:
 - Linearity zesilovače
 - Linearity časové základny

Časovou základnu kalibrujeme pomocí tloušťky (interval násobných ech). Mrtvé pásmo přímé sondy se ověřuje na základě odrazu od válce 2 nebo otvorů 5 přikládáním do bodu C, D, E a F.

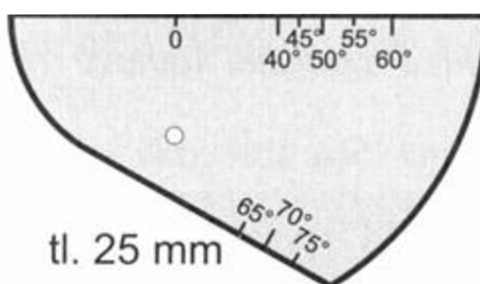
Kalibrační měrka K1 je zhotovena z homogenního materiálu těchto akustických vlastností:

- Rychlost šíření podélných UZ vln $c_l = 5920 \text{ m/s} \pm 30 \text{ m/s}$
- Rychlost šíření příčných UZ vln $c_t = 3255 \text{ m/s} \pm 20 \text{ m/s}$
- Útlum ultrazukových vln $\alpha = 0,05 \text{ dB/mm}$
- Měrná hmotnost materiálu $\rho = (7,85 \pm 0,0785) \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$



Obrázek 16 – Kalibrační měrka K1

Dále se používá kalibrační měrka K2 (obr.), která má stejné parametry jako měrka K1, ale je podstatně menší, lehčí a tedy vhodná pro provozní podmínky. Oproti měrce K1 neumožňuje vyhodnocovat rozlišovací schopnost a maximální dosah vlny. [3]



Obrázek 17 – Kalibrační měrka K2

2.14 Možnosti využití ultrazvukové impulsní metody ve stavební praxi přímou sondou

UZ impulsní metodu můžeme využít při kontrole tloušťky materiálu. Při měření byl použit přístroj SONIC 1200HR s přímou sondou. Tento přístroj funguje tak, že vysílá i přijímá impulsy, které se odrážejí od protější hrany zkoušeného předmětu a měří čas, za který odražený impulz dorazí zpět do přístroje. Ze známé rychlosti šíření UZ vln v oceli ($c_s = 5920$ m/s) přístroj vypočítá dráhu, kterou signál urazí a podle svého nastavení ji vyhodnotí jako tloušťku daného materiálu.

Prvním příkladem je ověření tloušťky patních plechů ocelových zásobníku na tekutá hnojiva. Zde byla použita přímá piezoelektrická sonda se jmenovitou frekvencí 10 MHz. Před měřením byl přístroj kalibrován podle normované kalibrační stupňovité měrky pro měření tloušťky ocelových materiálů. Místa, kde byla použita sonda, se vybrousila úhlovou bruskou na lesklý kov pro navázání akustické vazby. Zkušební místa byla zvolena tak, aby v každé čtvrtině nádrže bylo jedno zkušební místo. Kontrola základových patních plechů neprokázala snížení tloušťky vlivem korozních účinků okolního prostředí. Rozdíly v měření mohly nastat při výrobě, nebo nerovnoměrným vybroušením jednotlivých míst.



Obrázek 18 – Měření tloušťky patních plechů

Dalším příkladem je kontrola délky kotevních šroubů kolejové dráhy sportovní plavby na hrázi VD Orlík. Cílem bylo stanovit celkovou délku šroubů a na základě jejich přesahu přes úroveň železobetonové konstrukce dráhy a ověření jejich zapuštění do železobetonové konstrukce. Kotevní šrouby slouží k připevnění kolejnic dráhy, po které se pohybuje plošinový vozík pro přepravu lodí do hmotnosti 3,5 t. Přístroj byl kalibrován na dostatečný rozsah zapuštění šroubu do 200 mm. K nastavení ultrazvukového přístroje byly použity měrky K1 a K2. Jako kontaktní prostředek akustické vazby byl použit speciální gel. Celkově bylo zkontrolováno 131 kotevních šroubů kolejové dráhy. Měření prokázalo, že pouze 34 kotevních šroubů má předepsanou délku 200 mm. Ostatní šrouby byly různě zkracovány a nedosahují předepsané délky. Nejmenší zjištěná délka kotevního šroubu byla 74 mm, což při přesahu 62 mm znamená, že šroub je uložen pouze 12 mm v ŽB bloku kolejové dráhy.



Obrázek 19 – Měření na hrázi VD Orlík

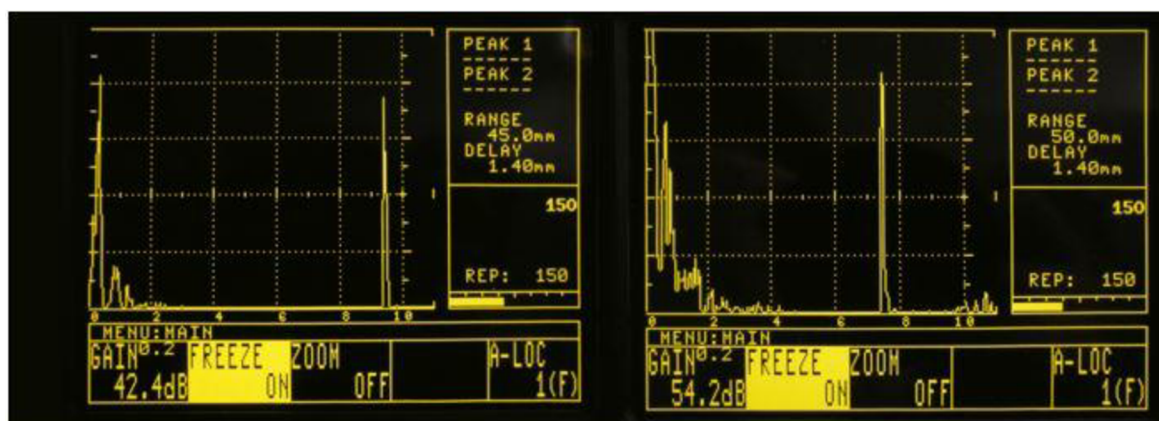
Dále byl ultrazvukový přístroj SONIC 1200HR použit u měření délky kotvení svodidel na mostu č. 438-001 u Hranic. Sloupky, na které jsou připevňovány svodidla, jsou přichyceny k železobetonové konstrukci mostu čtyřmi kotevními šrouby. Ultrazvukovým přístrojem byla stanovena délka kotevních šroubů na 180 mm. Povrch vyčnívajících šroubů musel být před měřením vyhlazen pilníkem nebo elektrickou rozbrušovačkou, aby bylo dosaženo kvalitního akustického kontaktu. Jako akustický vazebný prostředek byl použit speciální gel. Skutečná délka kotevních šroubů byla ověřena jádrovým vývrtem, který prokázal správnost ultrazvukového měření. Na mostě nebyly shledány v délce kotev žádné vady.



Obr. 31 – Měření délky kotvení u svodidel

Obrázek 20 – Měření hloubky kotevních šroubů

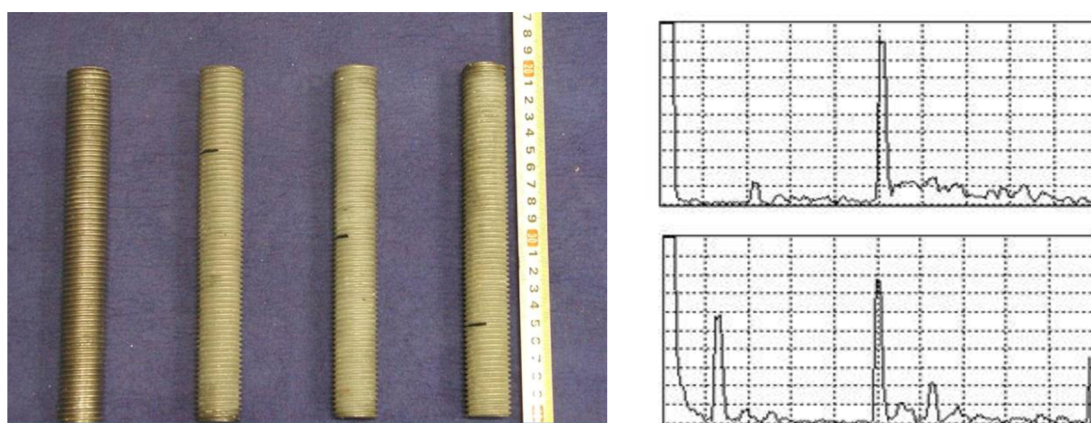
Dalším příkladem využití ultrazvukové impulsní metody je testování šroubů v zásobníku na tekutá hnojiva v Borovanech. Do laboratoře byly dodány neporušené vzorky šroubů, které sloužily pro kalibraci ultrazvukového přístroje a zároveň jako měřítka pro případné odchylky v měření. Měřily se délky kotevních šroubů a poruchy v oblasti závitu, kde je oslaben průřez šroubu. V případě poruchy by se na displeji UZ přístroje objevilo výrazné odrazové echo, které vzniká při přechodu ultrazvukového signálu přes dvě různá rozhraní (ocel/vzduch). Na plášti ocelového zásobníku bylo celkově testováno 50 spojovacích šroubů. Spojovací šrouby byly zkoušeny ve staticky nejvíce namáhaném pásu kruhové nádrže. Ultrazvuková kontrola neprokázala žádné poškození spojovacích šroubů.



Obrázek 21 – UZ měření

Další možností použití ultrazvuku je stanovení příčných trhlin na kotevních šroubech. V dílnách Ústavu stavebního zkušebnictví byly nařezány čtyři závitové tyče průměru 21,20 mm a délky 200 mm. Jedna tyč sloužila jako kalibrační a do zbývajících

byl ruční pilkou vytvořen příčný zářez, který dle výpočtu oslabuje plochu průřezu o 25%. Zářez na tyčích byl vytvořen ve čtvrtině, v polovině a ve tři čtvrtině z pohledu přikládání zkušební sondy. Teoretický předpoklad, že část procházejícího ultrazvukového signálu se odrazí od této umělé poruchy a část bude pokračovat dále k patě trnu, kde se odrazí. Tyto odrazy by se pak měly projevit na časové měřící základně ultrazvukového přístroje. Toto první, vadové, odražené echo může mít několik podob, dle toho jak daná porucha v materiálu vypadá, jaký má tvar. [8]



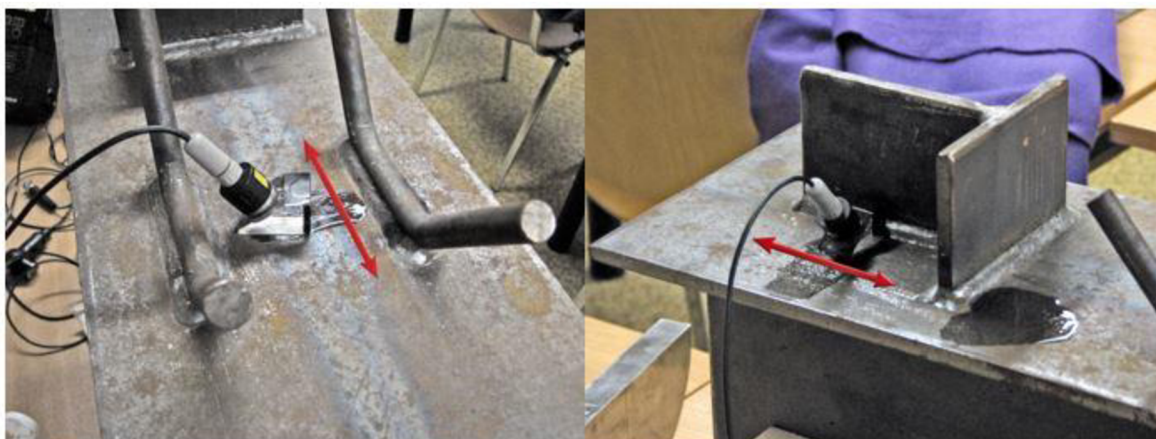
Obrázek 22 - Kotevní šrouby se zářezy, obrázek vpravo nahoře echogram na tyči bez zářezu, obrázek vpravo dole echogram se zářezem v $\frac{1}{4}$ délky tyče

2.15 Možnosti využití ultrazvukové impulsní metody ve stavební praxi úhlovou sondou

Úhlové sondy jsou určeny pro vysílání a příjem UZ vln pod určitým úhlem k povrchu prostředí. Využívají se především pro snímání příčných vln. Úhel se pohybuje v pásmu prvního a druhého kritického úhlu. Součástí sondy je nástavec, nejčastěji z plexiskla nebo polystyrenu, s úhlem nastaveným podle velikosti kritických úhlů pro dané materiálové rozhraní. V defektoskopii se nejčastěji používá nástavců pod úhlem tak, aby do oceli vnikal impulz pod úhlem 35 nebo 45°.

Úhlová sonda SONIC 1200HR s nástavcem pod úhlem 45° byla zkoušena na modelu nosného ocelového T – profilu, který byl opatřen dvěma spřahovacími typy prvků – dvojicí tvarovaných hladkých tyčí a kozlíkem. Nejprve byly simulovány

výrobní kontroly svarů z horního líce nosného profilu. Smysl zkoušky spočívá v tom, aby odhalila kvalitu svařovaného spoje – diskontinuity svaru, vzduchové kaverny. Poté byly svařované spoje kontrolovány ze spodního líce. Tato zkouška se zaměřuje na odhalení přítomnosti stahovacího prvku, popřípadě na kontrolu při podezření na porušení spoje.



Obrázek 23 - Měření úhlovou sondou na modelu T – profilu

Další případ použití úhlové sondy bylo při výstavbě halového objektu. Vznikla zde pochybnost o počtu kotevních trnů zabudovaných kotevních desek v prefabrikovaných střešních nosnících. Projekt předepisoval 6 kotevních trnů průměru 16 mm a délky 350 mm. Vzniklo podezření, že kotevní trny jsou jen dva. Zkoušení proběhlo celkově na 20 kotevních deskách. Každá z těchto desek obsahovala pouze dva kotevní trny, které byly situovány uprostřed desky. Kotvení nebylo provedeno dle projektové dokumentace a nemělo dostatečnou únosnost pro plánovanou zátěž.



Obrázek 24 – Kontrola počtu kotevních trnů na kotevních deskách

Úhlová sonda byla také použita při ověření ukotvení táhlových přípojek. Tento problém nastal v Nitře při výstavbě halového objektu. U zabudovaných panelů se objevil problém s nedostatečným a v několika případech dokonce chybějícím kotvením přípojek táhel. Na testování byla použita sonda SONIC 1200HR s úhlovou sondou s nastavcem pro 45°. Zkouška byla celkem provedena na 8 přípojkách. Projekt předepisoval 6 kotevních trnů průměru 14 mm a délky 200 mm pro 1 táhlovou přípojku. Sonda ukázala, že vše bylo provedeno podle projektové dokumentace. [8]



Obrázek 25 – Ověření ukotvení táhlových přípojek

3 Kotvy

3.1 Chemické kotvy

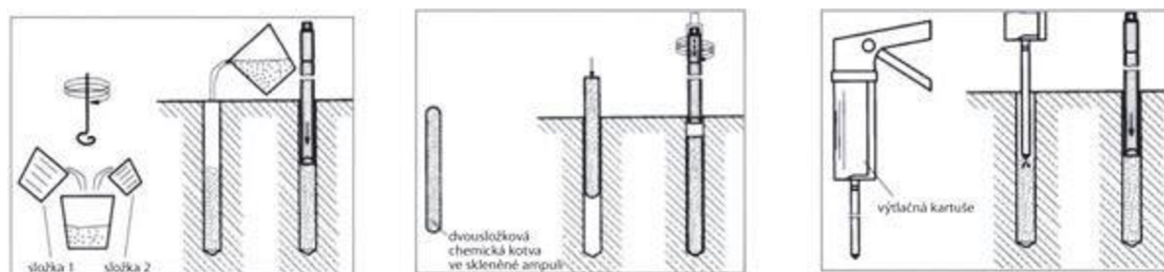
Chemické kotvy jsou jednosložkové nebo dvousložkové materiály, převážně bez obsahu rozpouštědel. Většinou se používají dvousložkové kotvící lepidla, která obsahují pryskyřice nebo hybridní směsi. Mezi hlavní přísady do těchto lepidel patří pryskyřice, aditivum, plnivo, pigment a reaktivní složka. Všechny složky se musí řádně promíchat, aby došlo k potřebné reakci a následně k požadované pevnosti. Mezi základní požadavky jaký druh chemické kotvy zvolit patří:

- výsledná nosnost
- rychlost tuhnutí
- aplikační teploty
- hloubka kotvení
- ekonomie



Obrázek 26 – Řez kotvení sloupku zábradlí chemickou maltou a svorníky

V dřívějších dobách se chemické kotvy dodávaly jako dvě oddělené složky, které se musely promíchat v daném poměru. Později se dvě složky vkládaly do ampulí a pouze se jenom promíchaly. Podmínkou správného promíchání ampulí byla aplikace svorníku do otvoru ampulí a míchání pomalým krouživým pohybem. V této době docházelo k častým reklamacím na špatnou pevnost spoje z důvodu špatného promíchání. V současné době se chemické kotvy vyskytují ve formě plastových kartuší, kde je řádné promíchání dvou složek zaručeno použitím statického směšovače při každé aplikaci. Směšovač uvnitř obsahuje plastovou spirálu o určitém počtu závitů, která toto správné promíchání zaručuje. [5] [6] [9]



Obrázek 27 – Vývoj aplikace

3.1.1 Rozdělení chemických kotev

Základní rozdělení kotev je:

- Polyesterová lepidla
- Epoxiakrylátová hybridní lepidla
- Epoxidová kotvicí lepidla

Polyesterová lepidla mají vysokou rychlost tuhnutí. Při 20°C je to přibližně 50 minut. Jsou schopná reagovat i při nízkých teplotách až do -10°C. Využívají se pro kotvení do betonu, cihlového zdiva i kamene. V některých případech se dají uplatnit i při kotvení do dutých tvárnic i cihel. Pokud zvolíme kotvení do duté tvárnice nebo cihly, musíme před zakotvením vsunout do vrtaného otvoru perforovaná plastová nebo kovová pouzdra.

Epoxiakrylátová hybridní lepidla mají vysokou rychlost tuhnutí. Při 20°C je to přibližně 50 minut. Jsou určena na střední a vyšší zatížení, hlavně pokud se jedná o náročné aplikace. Umožňují kotvení do betonu, kamene nebo cihelného zdiva.

Epoxidová kotvicí lepidla se používají u vysokých zatížení. Umožňují kotvení do otvorů s větším rozdílem průměru vrtaného otvoru a kotvených prvků. Vykazují minimální objemové smršťování. Výhodou je také kotvení do vlhkých podkladů nebo vlepování do dřevěných konstrukcí. [5] [6] [9]

3.1.2 Vlastnosti chemických kotev

Kotvy můžeme použít do většiny stavebních materiálů, jako je například beton, cihla, přírodní kámen a další. Mají výbornou pevnost. Lze ji použít pro lehké až extrémní zatížení, jak je vidět ve srovnávací tabulce č. 2.

Tabulka 2 – Srovnávací tabulka

Produkt	Použití					
	podle požadavků na zatížení				podle vhodnosti materiálu	
	nízké	střední	vysoké	extrémní	dutý	plný
Hřeb	☑	✘	✘	✘	✘	☑
Vrut	☑	✘	✘	✘	✘	☑
Natloukací hmoždinka	☑	☑	✘	✘	✘	☑
Plastová hmoždinka s vrutem	☑	☑	✘	✘	/	☑
Ocelová plášťová kotva	☑	☑	✘	✘	☑	☑
Turbo šroub	☑	☑	✘	✘	/	☑
Šroubová kotva	☑	☑	☑	✘	✘	☑
Pevnostní ocelová kotva	☑	☑	☑	☑	✘	☑
Chemická kotva	☑	☑	☑	☑	☑	☑

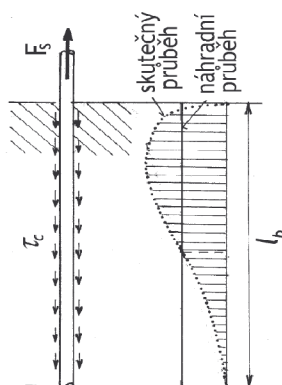
- ✘ Nevhodné
- / Omezeně
- ☑ Vhodné

Můžeme je zařadit mezi vysoce pevnostní spoje. Použití chemických kotev je omezeno požadavkem na pevnost a velikost svorníku. Pevnost je také ovlivněna vlastnostmi kotveného ocelového prvku, podkladovým materiálem, vzdálenostmi od okraje

konstrukce, rozměry a hloubkou kotvení, prasklinami v betonu, podmínkami zatěžování a vlivem okolí (teplota, vlhkost, chemické zatížení). Kotvy jsou vysoce odolné vůči chemikáliím a zároveň tvoří vodotěsný spoj mezi svorníkem a kotveným materiálem. Jsou odolné vůči vibracím a korozi, takže jsou většinou využívány pro kotvení průmyslových prvků a stavebních konstrukcí. Mezi nevýhodu těchto kotev je doba tvrzení materiálu, která je závislá na teplotě podkladu, teplotě okolí a vzdušné vlhkosti. Doba tvrzení se pohybuje mezi deseti minutami až několika hodin (v případě mrazu a vlhkého podkladu). [5] [6] [9]

3.1.3 Přenos zatížení

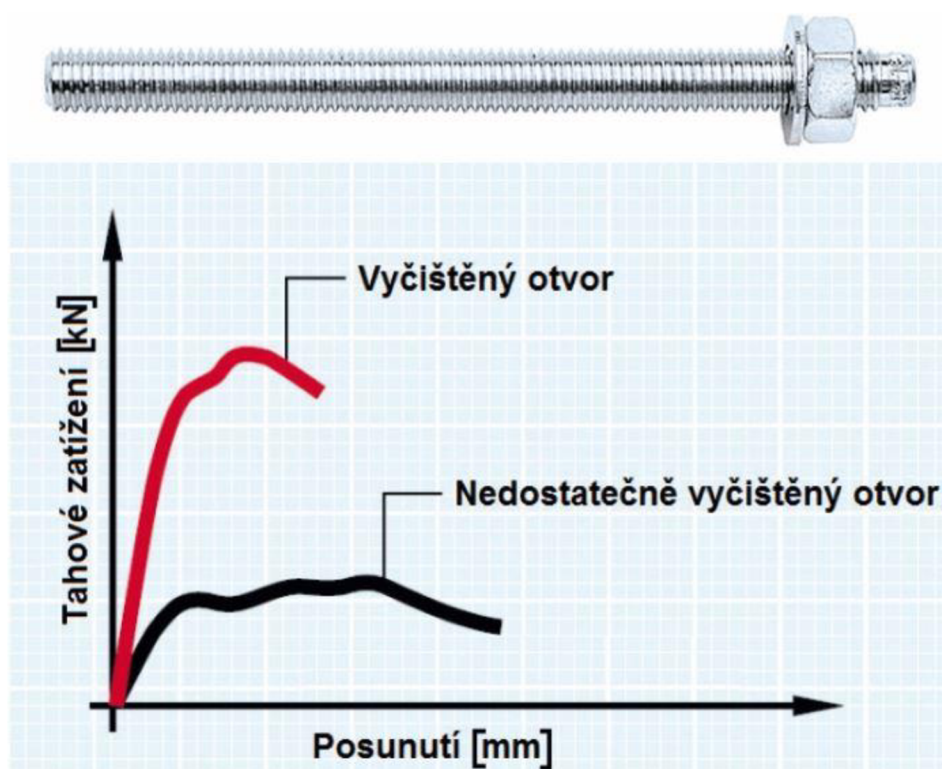
Hlavním kritériem při navrhování chemického kotvení do betonu, je typ zatížení, které bude kotvení přenášet. Měli bychom si dávat pozor na vznik trhlin v betonu v blízkosti kotvení. Pokud se kotvení nachází v tahové zóně betonového prvku, hrozí vysoká pravděpodobnost vzniku trhlin. Mechanismus přenosu zatížení u standardních lepených kotev do betonu spočívá v tom, že kotevní prvky (závitová tyč, závitové pouzdro nebo prut betonářské výztuže, atd.) přenášejí tahové zatížení do betonu pomocí zaklínování na rozhraní mezi kotevním prvkem a lepicí hmotou a pomocí přilnavosti společně s mikrozaklínováním na rozhraní mezi lepicí hmotou a betonem. Tuto vlastnost nazýváme soudržnost, která patří mezi mechanické vlastnosti lepicí hmoty. Určuje se na základě zkoušek a její charakteristické hodnoty jsou uvedeny v Evropských Technických schváleních (ETA). Hodnoty soudržnosti jsou různé pro jednotlivé typy a velikosti kotevních prvků. [5] [6] [9]



Obrázek 28 – Mechanismus přenosu zatížení u lepené kotvy se závitovou tyčí ve vyčištěném kotevním otvoru

3.1.4 Vliv čištění otvoru na soudržnost

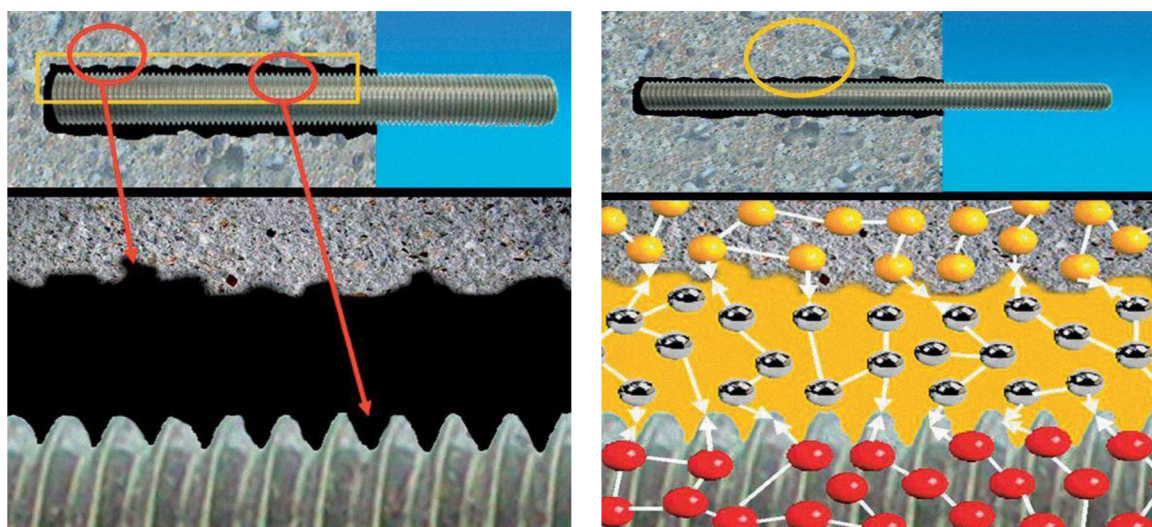
Abychom dosáhli dostatečné soudržnosti u standardních kotevních prvků, je nutné, aby se kotevní otvor dostatečně vyčistil. Když nedojde k dostatečnému vyčištění od prachu, dochází k poklesu soudržnosti a tím i k poklesu únosnosti kotvení. Proto je u těchto kotev důležité, aby byl otvor důkladně mechanicky vyčištěn ocelovým kartáčem a následně vyfoukán v souladu s návodem, který udává výrobce. Pokud se jedná o otvory s větším průměrem nebo s větší kotevní hloubkou, má se otvor vyfoukat stlačeným vzduchem pomocí kompresoru. Účinné čištění je důležité u vlhkého betonu, protože vlhký prach z vrtání má lepší tendenci přilnout k povrchu vrtaného otvoru. Na obrázku je znázorněna křivka závislosti posunu na zatížení ve vlhkém betonu u lepených kotev se závitovou tyčí. Pokud se vyčištění neprovede nebo je nedostatečné, soudržnost se sníží o 60% oproti hodnotě čistého otvoru. Navíc se ovlivní tuhost spoje. [5] [6] [9]



Obrázek 29 – Schematické křivky závislosti posunutí na zatížení u vyčištěných a nevyčištěných vrtaných kotevních otvorů ve vlhkém betonu

3.1.5 Smršťování

Lepidla se při tuhnutí smršťují. Pokud se porovná objem nezduhlého lepidla se zcela zduhlým, může se objemové smrštění lišit o 2% až 20%. Smršťování nepříznivě působí na dobrou přilnavost lepidla. Zmenšuje kontakt mezi lepidlem a podkladem, který je důležitý pro vytvoření mechanické vazby mezi lepidlem a povrchem podkladu. Proto je důležité, aby byl dodržen doporučený maximální rozdíl mezi průměrem vrtaného otvoru a průměrem použitého kotvícího prvku. Musíme dosáhnout co nejmenšího rozdílu. Průměry vrtaných otvorů se mohou lišit od průměru tyče o 1,0 až 2,0 mm, aniž by to mělo výrazný vliv na výslednou nosnost kotvícího systému. Lepidla na bázi epoxidových pryskyřic umožňují díky minimální míře smršťování ukotvit prvky i do větších vyvrtaných otvorů. [5] [6] [9]



Obrázek 30 – Smršťování a vliv vyvrtaného otvoru

3.1.6 Faktory ovlivňující dobu zpracování

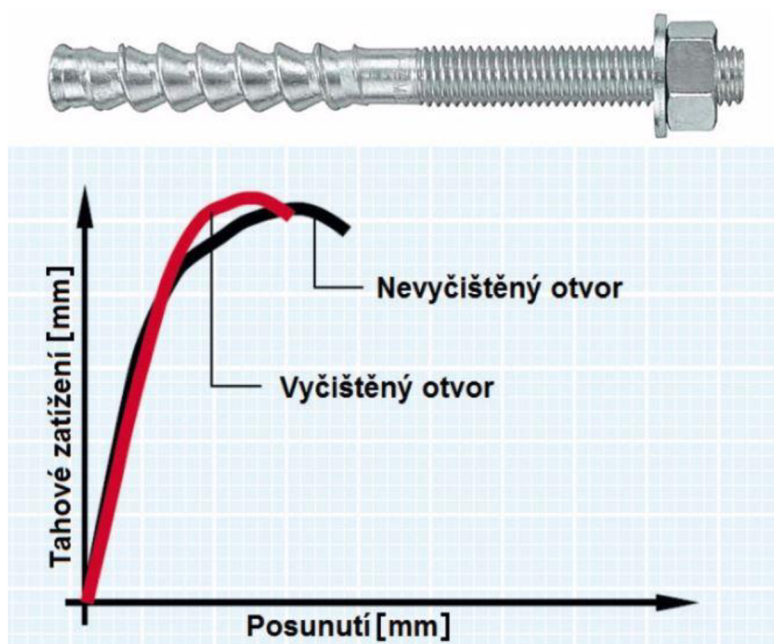
Doba zpracování se pohybuje v rozmezí od několika málo minut až 8 hodin, a to v závislosti na druhu použitého chemického kotvícího lepidla. Platí, že čím delší doba zpracování, tím delší doba tuhnutí. Dobu zpracování ovlivňuje teplota balení lepidla, teplota okolí a teplota podkladu. Vyšší teploty dobu zpracování zkracují, naopak nízké teploty ji prodlužují. Při reakci, která vznikne promícháním dvousložkového kotvícího lepidla, vzniká teplo. Po nanesení lepidla do otvoru

v podkladu se doba zpracování ihned prodlouží, protože vzniklé teplo při reakci se rozptýlí do okolního podkladu, aniž by se zvyšovala teplota lepidla.

Běžným problémem při kotvení je křížení kotvy s výztuží betonu. V současné době existuje několik způsobů, jak předejít tomu, abychom se v betonu střetli s výztuží. Pokud je to možné, mělo by se kotvení přesunout na nové místo. Dalším problémem je vliv vyčištěného vyvrtaného otvoru, kdy nedostatečně čistý otvor snižuje pevnost o 20% až 50%. Obzvláště si musíme dávat pozor na čištění u vlhkého betonu, protože uvolněné částičky se rychle lepí na stěnu otvoru. [5] [6] [9]

3.1.7 Trendy v chemickém kotvení

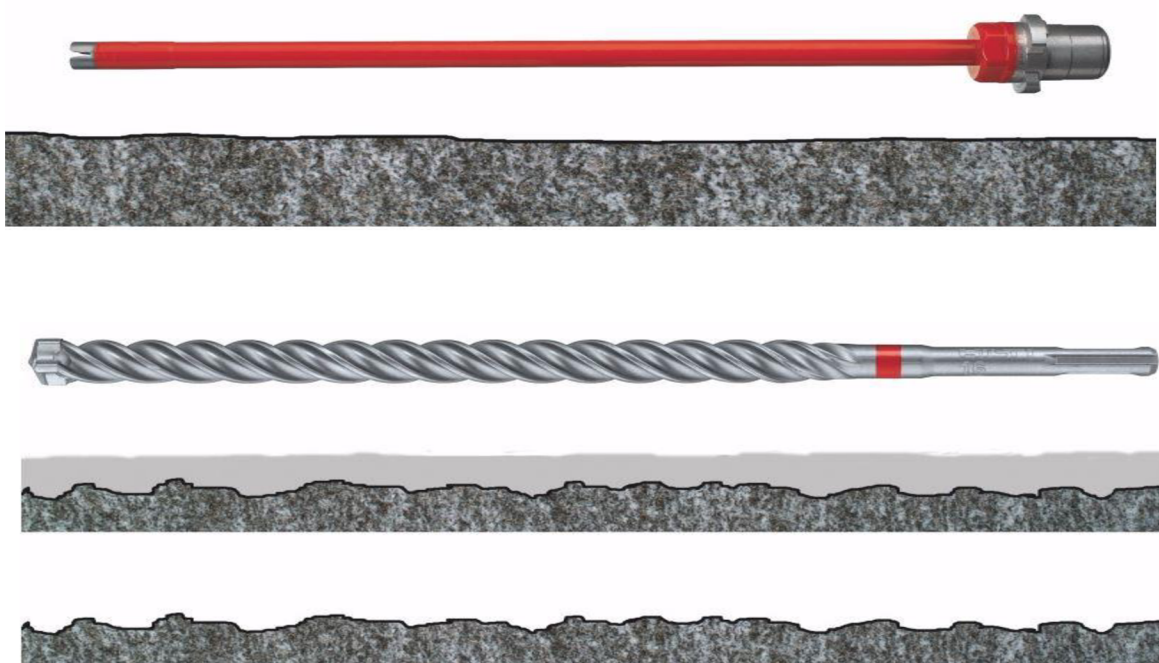
Firma Hilti přišla s novým kotevním systémem HIT-HY 200. Vytlačovací hmota spolu s kotevním šroubem HIT-Z umožňuje kotvení bez nutnosti čištění otvoru po odvrtání. Tím se zvyšuje bezpečnost a spolehlivost kotvení. Hlavní předností jsou vysoké hodnoty soudržnosti a to jak v betonu bez trhlin, tak i v betonu s trhlinami.



Obrázek 31 - Křivky závislosti posunutí na zatížení u vyčištěných a nevyčištěných kotevních otvorů ve vlhkém betonu (lepící hmota Hilti HIT-HY 200 s kotevním prvkem HIT-Z)

Osazení této kotvy se skládá jen z části, kdy se vyvrtá otvor pro kotvení, vytlačí se lepicí hmota a osadí se kotvicí šrouby. Tímto se snižuje riziko nesprávně osazených

kotev a zároveň se kotvení stává rychlejším. Kotevní šroub HIT-Z je vhodný i do otvorů vyvrtaným diamantovým jádrovým vrtákem s vodním výplachem. Povrch takto vyvrtaného otvoru je hladký a geometricky pravidelný. Po odstranění vody z otvoru zůstávají stěny vlhké, což negativně ovlivňuje soudržnost kotev se standardními kotevními prvky. [4] [7]



Obrázek 32 – Rozdíl mezi vyvrtáním kotevního otvoru diamantovým jádrovým vrtáním a vrtacím kladivem

3.1.8 Lepící hmota HIT – HY 200

V této části bych se zaměřila na podrobnější vlastnosti této lepicí hmoty od firmy Hilti, protože bude použita v praktické části diplomové práce. Tato hmota bude použita s kotevním šroubem HIT-V 5.8 velikosti M12. Lepící hmotu můžeme použít pro:

- Kotvení nosných ocelových sloupů, konstrukcí
- Kotvení pomocné ocelové konstrukce, schodiště
- Zábradlí, bezpečnostní bariéry

- Dodatečné vlepování výztuží

Mezi její výhody patří:

- Rychle tuhnoucí hmota s řadou technických certifikací a jednou s největší únosností na trhu
- Variabilní kotevní hloubka závisující na požadované únosnosti – úspora času a nákladů
- Možnost dodatečného vlepování výztuží
- Širší rozsah montážních teplot od -10 °C do +40 °C s HIT-V šroubem
- Neobsahuje nebezpečné chemické látky, splňuje zdravotní a bezpečnostní požadavky pro použití, skladování a přepravu
- Odolnost vůči seizmickému namáhání
- Dvě varianty lepicí hmoty pro různé doby zpracování a vytvrzení dle tab. 3

Tabulka 3 – Doba zpracování lepicí hmoty

Teplota [°C]	HIT-HY 200-A		HIT-HY 200-R	
	Doba pro zpracování T_{gel}	Doba pro vytvrzení T_{cure}	Doba pro zpracování T_{gel}	Doba pro vytvrzení T_{cure}
-10	1,5 h	7 h	3 h	20 h
0	50 min	4 h	2 h	7 h
5	25 min	2 h	1 h	3 h
10	15 min	1 h	40 min	2 h
20	7 min	30 min	15 min	1 h
30	4 min	30 min	9 min	1 h
40	3 min	30 min	6 min	1 h

Základní vlastnosti kotvy HIT – V 5.8:

- Hloubka kotvení dle tab. 4

Tabulka 4 – Hloubka kotvení

Velikost kotvy	M8	M10	M12	M16	M20	M24	M27	M30
Typická hloubka kotvení h_{ef} [mm]	80	90	110	125	170	210	240	270
Tloušťka podkladu h [mm]	110	120	140	165	220	270	300	340

- Konečná odolnost: beton C20/25 dle tab. 5

Tabulka 5 – Konečná odolnost

Velikost kotvy	M8	M10	M12	M16	M20	M24	M27	M30
Beton bez trhlin								
Pevnost $N_{Ru,m}$ [kN]	18,9	30,5	44,1	83,0	129,2	185,9	241,5	295,1
Smyk $V_{Ru,m}$ [kN]	9,5	15,8	22,1	41,0	64,1	92,4	120,8	147,0

- Charakteristická pevnost: beton C20/25 dle tab. 6

Tabulka 6 – Charakteristická pevnost

Velikost kotvy	M8	M10	M12	M16	M20	M24	M27	M30
Beton bez trhlin								
Pevnost N_{Rk} [kN]	18,0	29,0	42,0	70,6	111,9	153,7	187,8	224,0
Smyk V_{Rk} [kN]	9,0	15,0	21,0	39,0	61,0	88,0	115,0	140,0

- Návrhová pevnost: beton C20/25 dle tab. 7

Tabulka 7 – Návrhová pevnost

Velikost kotvy	M8	M10	M12	M16	M20	M24	M27	M30
Beton bez trhlin								
Pevnost N_{Rd} [kN]	12,0	19,3	28,0	39,2	62,2	85,4	104,3	124,5
Smyk V_{Rd} [kN]	7,2	12,0	16,8	31,2	48,8	70,4	92,0	112,0

- Doporučené zatížení dle tab. 8

Tabulka 8 – Doporučená zatížení

Velikost kotvy	M8	M10	M12	M16	M20	M24	M27	M30
Beton bez trhlin								
Pevnost N_{rec} [kN]	8,6	13,8	20,0	28,0	44,4	61,0	74,5	88,9
Smyk V_{rec} [kN]	5,1	8,6	12,0	22,3	34,9	50,3	65,7	80,0

Návrhovou únosnost v tahu určíme jako menší hodnotu z:

- Odporu oceli $N_{Rd,ss}$, která závisí na druhu a velikosti kotevní tyče. Pro náš případ HIT – V 5.8 velikost M12 je hodnota $N_{Rd,s} = 28,0$ kN
- Kombinace vytržení a odolnosti kužele betonu

$$N_{Rd,p} = N_{Rd,p}^0 \cdot f_{B,p} \cdot f_{1,N} \cdot f_{2,N} \cdot f_{3,N} \cdot f_{h,p} \cdot f_{re,N}$$

Kde $N_{Rd,p}^0$ je hodnota, která závisí na velikosti kotvy, typické hloubce kotvení, na tom, zda se jedná o beton bez trhlin nebo beton s trhlinami a také na teplotním rozsahu práce

$f_{B,p}$ je vliv pevnosti betonu v kombinaci na vytržení a odolnosti odporu kužele betonu

$f_{1,N}$ je součinitel, který zohledňuje vliv vzdálenosti od okraje

$f_{2,N}$ je součinitel, který zohledňuje vliv vzdálenosti od okraje

$f_{3,N}$ je součinitel závislý na vzdálenosti mezi kotvami

$f_{h,p}$ je součinitel, který zohledňuje vliv hloubky kotvení v kombinaci na vytržení a odolnosti odporu kužele betonu

$f_{re,N}$ je součinitel, který zohledňuje vliv výztuže

- Odporu kužele betonu $N_{Rd,c} = N_{Rd,c}^0 \cdot f_B \cdot f_{1,N} \cdot f_{2,N} \cdot f_{3,N} \cdot f_{h,N} \cdot f_{re,N}$

kde $N_{Rd,c}^0$ je hodnota, která závisí na velikosti kotvy a na tom, zda se jedná o beton bez trhlin nebo beton s trhlinami

f_B je součinitel vlivu pevnosti betonu na odporu betonového kužele

$f_{1,N}$ je součinitel, který zohledňuje vliv vzdálenosti od okraje

$f_{2,N}$ je součinitel, který zohledňuje vliv vzdálenosti od okraje

$f_{3,N}$ je součinitel závislý na vzdálenosti mezi kotvami

$f_{h,N}$ je součinitel, který zohledňuje vliv hloubky kotvení na odporu kužele betonu

$f_{re,N}$ je součinitel, který zohledňuje vliv výztuže

- Odporu štípaní betonu (pouze beton bez trhlin)

$$N_{Rd,sp} = N_{Rd,c}^0 \cdot f_B \cdot f_{1,sp} \cdot f_{2,sp} \cdot f_{3,sp} \cdot f_{h,N} \cdot f_{re,N}$$

kde $N_{Rd,c}^0$ je hodnota, která závisí na velikosti kotvy a na tom, zda se jedná o beton bez trhlin nebo beton s trhlinami

f_B je součinitel vlivu pevnosti betonu na odporu betonového kužele

$f_{1,sp}$ je součinitel, který zohledňuje vliv vzdálenosti od okraje

$f_{2,sp}$ je součinitel, který zohledňuje vliv vzdálenosti od okraje

$f_{3,sp}$ je součinitel závislý na vzdálenosti mezi kotvami

$f_{h,N}$ je součinitel, který zohledňuje vliv hloubky kotvení na odporu kužele betonu

$f_{re,N}$ je součinitel, který zohledňuje vliv výztuže

Návrhovou únosnost ve smyku určíme jako menší hodnotu z:

- Odolnosti oceli $V_{Rd,s}$, která závisí na druhu a velikosti kotvy. V našem případě je hodnota $V_{Rd,s} = 16,8$ kN
- Odporu vylomení betonu $V_{Rd,cp} = k \cdot$ menší z hodnot $N_{Rd,p}$ a $N_{Rd,c}$

kde k je součinitel odporu vylomení betonu
 $N_{Rd,p}$ je hodnota kombinace vytržení a odolnosti kužele betonu
 $N_{Rd,c}$ je hodnota odporu kužele betonu

- Odporu hrany betonu $V_{Rd,c} = V_{Rd,c}^0 \cdot f_B \cdot f_\beta \cdot f_h \cdot f_l \cdot f_{hef} \cdot f_c$

kde $V_{Rd,c}^0$ je hodnota, která závisí na velikosti kotvy a na tom, zda je beton bez trhlin nebo s trhlinami

f_B je součinitel závislý na pevnosti betonu

f_β je součinitel, který zohledňuje vliv úhlu mezi zatížením a směrem kolmém k volnému okraji

f_h je součinitel, který závisí na vlivu tloušťky základního materiálu

f_l je součinitel, který závisí na vlivu kotev a vzdálenosti od okraje

f_{hef} je součinitel, který zohledňuje vliv hloubky kotvení

f_c je součinitel, který závisí na vzdálenosti od okraje [4]

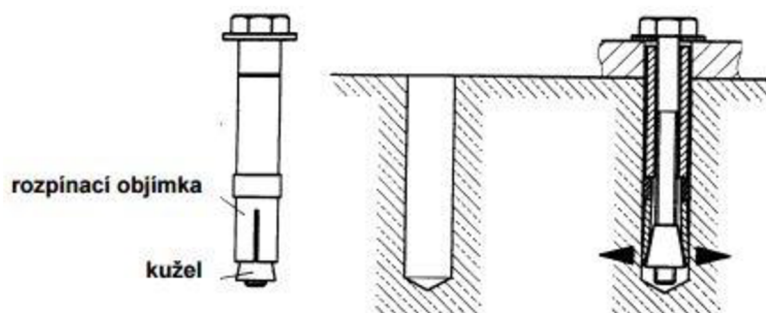
3.2 Mechanické kotvy

Hlavní výhody mechanických kotev patří rychlá instalace a možnost okamžitého zatížení. Odpadá tedy doba, kdy čekáme na vytvrzení lepidla u chemických kotev. Mezi základní druhy mechanických kotev patří:

- Kotvy rozpěrné
- Kotvy zařezávací

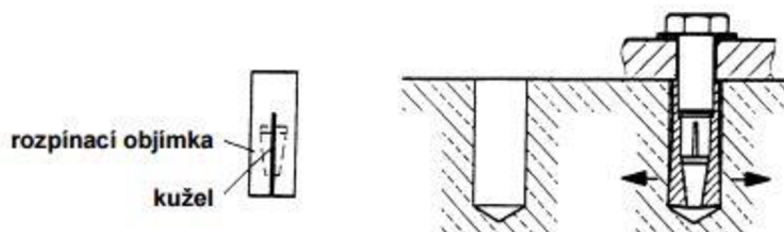
Rozpěrné kotvy jsou upevněny ve vrtaných otvorech nuceným rozepřením. Tahová síla působící na kotvu se přenáší do betonu třením a určitým zaklíněním mezi rozpínací objímkou a betonem. Rozpěrné kotvy aktivujeme:

- Krouticím momentem



Obrázek 33 – Mechanická kotva aktivovaná krouticím momentem

- Deformací

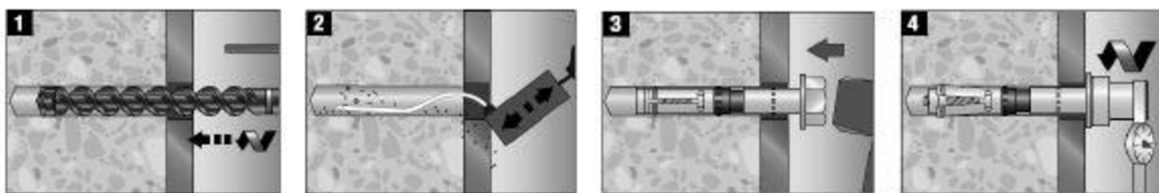


Obrázek 34 – Rozpěrná kotva aktivovaná deformací (objímka se rozepře vtažením kužele)

U kotev aktivovaných krouticím momentem se rozepření dosáhne krouticím momentem působícím na šroub. Síla vyvozená při kotvení je dána tímto krouticím momentem. U kotev aktivovaných deformací se rozepření zpravidla dosahuje rázy působícími na objímku nebo kužel.

Kotvy zařezávací jsou hlavně upevněny mechanickým uzavřením, které vznikne zaříznutím kotvy do rozšířeného konce vyvrtaného otvoru betonu. Tohoto zaříznutí dosáhneme zatlučením nebo otáčením objímky kotvy ve vyvrtaném otvoru s rozšířeným koncem.

Instalace mechanických kotev se dělá obdobně jako u kotev chemických. Nejprve vyvrtáme otvor pro usazení kotvy. Následně se otvor vyčistí kartáčem, aby v něm nezůstal prach a nežádoucí fragmenty. Provede se osazení kotvy a vyvodíme potřebný utahovací moment na aktivaci kotvy. [12]

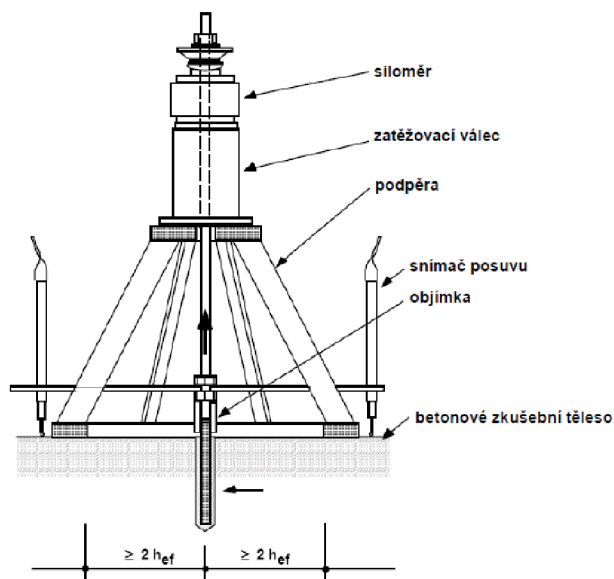


Obrázek 35 – Instalace mechanické kotvy

3.3 Metoda ověřování kotev

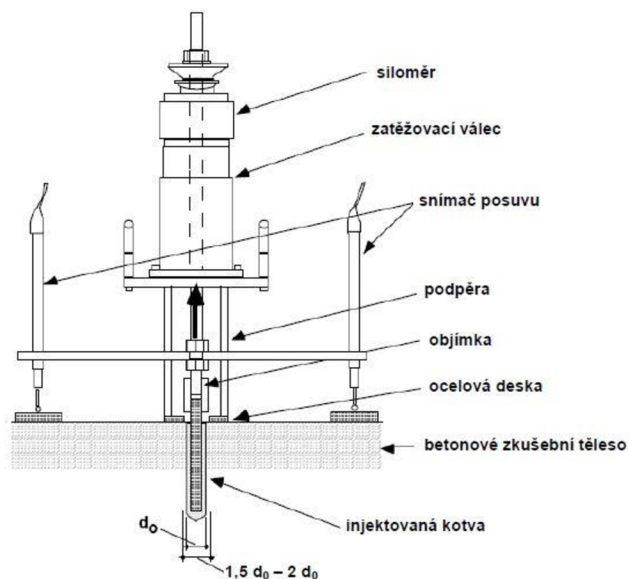
Rozeznáváme dvě zkušební metody. Jsou to zkoušky:

- Bez zamezení vzniku porušení



Obrázek 36 – Příklad zkušebního zařízení pro zkoušku tahem bez zamezení vzniku porušení

- Se zamezením vzniku porušení



Obrázek 37 – Příklad zkušebního zařízení pro zkoušku tahem se zamezením vzniku porušení

Zkoušky bez zamezení vzniku porušení umožňují neomezenou tvorbu kužele porušení betonu. Při zkouškách se zamezením vzniku porušení je tvorba kužele porušení betonu eliminována přenesením reakční síly v blízkosti kotvy do betonu. Ocelová deska zkušebního přípravku při zkouškách se zamezením vzniku porušení musí být tuhá a v oblasti podpěry velká, aby se zabránilo značnému stlačení betonu. Doporučení: pevnost v tlaku pod ocelovou deskou by měla být menší než 0,7pevnosti v tlaku betonu.

Chemické kotvy mohou při zatížení tahem vykazovat:

- Kombinované porušení vytažením a vytržením kužele betonu
- Porušení vytržením kužele betonu
- Porušení oceli
- Porušení prasknutím

Pro způsob porušení kombinovaným porušením vytažením a vytržením kužele betonu je charakteristické vytržení zapuštěné části (s okolní maltou i bez ní) z betonu.

V závislosti na různých působících faktorech mohou jednotlivé kotvy i skupiny kotev vykazovat porušení této kombinace v kterémkoli bodě podél hloubky kotvení.

Při porušení vytržením kužele betonu je charakteristické porušení betonu začínající v nejhlubším bodě ukotvení. Tento způsob porušení může nastat jak u jednotlivých kotev, tak i u skupiny kotev. Vliv vzdálenosti od okraje můžeme brát v úvahu, ale lze to i zanedbat. Způsob porušení vytržením kužele betonu představuje nejvyšší možnou odolnost chemických kotev. Toto porušení lze považovat za typické pro rozpěrné kotvy aktivovaným krouticím momentem nebo u zařezávacích kotev.

Porušení oceli nebo porušení prasknutím může limitovat odolnost chemických kotev v porovnání s odolností v případě kombinovaného porušení vytažením a vytržením kužele betonu nebo porušení vytržením kužele betonu.

V rámci požadovaných zkoušek se ověřují různé faktory, které ovlivňují chování chemických kotev. Pokud se jedná o zkoušku vhodnosti k použití, musí se dbát na správné vyčištění otvoru, na techniku mísení, U zkoušek pro určená použití se ověřují účinky teploty. Tyhle ovlivňující faktory se spojují pouze s odolností kombinovaného porušení vytažením a vytržením kužele betonu, protože při zkouškách tahem s porušením vytržením kužele betonu při 20 °C a 80 °C se projevuje stejné chování. Největší rozdíl v chování se pozoruje, když se zkoušky provádějí takovým způsobem, aby došlo ke „kombinovanému porušení vytažením a vytržením kužele betonu“ (např. při 20 °C a 80 °C). Tento ovlivňující faktor je rozhodující pro hodnocení systému injektovaných kotev. Aby se při zkouškách zabránilo porušení oceli, mohou být použité zapuštěné části vyšší pevnosti, než jaká je specifikovaná výrobcem a uvedena v ETA, pokud tím nebude ovlivněna funkce kotvy. [12]

4 Experimentální část

4.1 Výroba zkušebních těles

4.1.1 Návrh směsi betonu

Před výrobou zkušebních betonových krychlí jsme si museli připravit betonovou směs. Základní směs pro výrobu betonu se skládala z cementu, kameniva o třech různých frakcích (drobné kamenivo s velikostí zrn 0 – 4 mm a hrubé kamenivo s velikostí zrn 8 – 22) a vody. Mezi doplňkovou složku jsme přidali plastifikační přísadu. Množství všech složek na 60 l betonu jsou uvedeny v tabulce č. 9.

Tabulka 9 – Množství složek na jednu záměs

Množství na 60 l		
CEM I 42.5R	kg	13,200
DTK 0-4 (Zaječí)	kg	54,030
HDK 8-16 (Luleč)	kg	32,172
HDK 11-22 (Luleč)	kg	25,494
Voda záměsová	l	6,560
Přísada plastifikační	l	0,069

Všechny složky jsme navážili, nasypali do míchačky a míchali, dokud se všechny složky nespojily v betonovou směs. Celkem jsme vyrobili 4 záměsi po 60 l betonové směsi. Z každé míchačky bylo vyrobeno několik vzorků pro experimentální část. Celý proces probíhal v laboratorních podmínkách.



Obrázek 39 – Míchačka v laboratoři



Obrázek 38 – Jednotlivé složky na přípravu betonu

4.1.2 Zkoušky čerstvého betonu

Mezi základní zkoušky čerstvého betonu patří zkouška sednutím. Postup zkoušky sednutí čerstvé betonové směsi:

- Forma se položila na vodorovnou podkladní desku
- Poté se forma začala plnit betonovou směsí, během plnění se forma přišlápla k podkladní desce pomocí dvou příložek
- Nádoba se plnila ve třech vrstvách, každá vrstva se zhutnila pomocí propichovací tyče 25 vpichy tak, aby mírně zasahovala do předchozí vrstvy
- Poté se odstranil přebytečný beton, forma se oddělila od betonu po 5 až 10 sekundách
- Ihned se změřilo sednutí $h(S)$

Jednotlivá sednutí a vyhodnocení betonové směsi z každé míchačky jsou zaznamenány v tabulce č. 10.

Tabulka 10 – Klasifikace podle sednutí kužele

Sednutí kužele		
Míchačka	Sednutí [mm]	Stupeň
1	110	S3
2	150	S3
3	70	S2
4	70	S2



Obrázek 40 – Zkouška sednutí

4.1.3 Uložení a ošetřování zkušebních těles

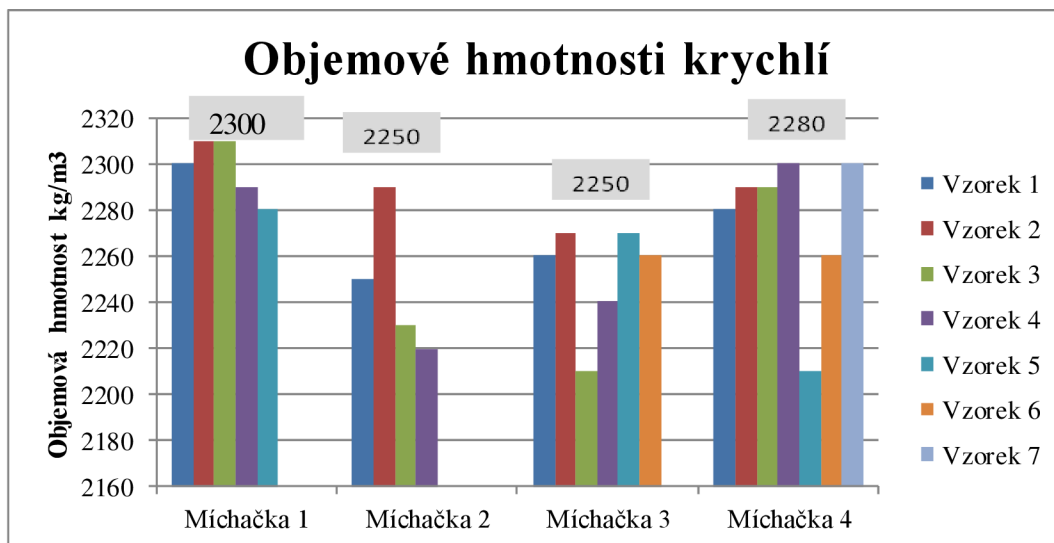
Po zkoušce sednutím se jednotlivé nádoby vymazaly a naplnily betonovou směsí, které se následně zhutnily pomocí vibračního stolku. Hutnilo se do té doby, dokud nebylo patrné zmenšování objemu. Hlavním cílem hutnění bylo to, abychom snížily objem vzduchových pórů v betonu. Po zhutnění na každé krychli bylo poznačeno, z které míchačky byl vzorek pořízen.



Obrázek 42 – Hutnění pomocí
vibračního stolku

Obrázek 41 – Betonové krychle

Poté se beton nechal zrán 28 dní, abychom dosáhli požadované pevnosti betonu v tlaku. Po uplynutí doby zrání betonu se jednotlivé vzorky změřily pomocí posuvného měřítka, zvážily a následně vypočítaly objemové hmotnosti, které jsou zaznamenány v následujícím grafu.



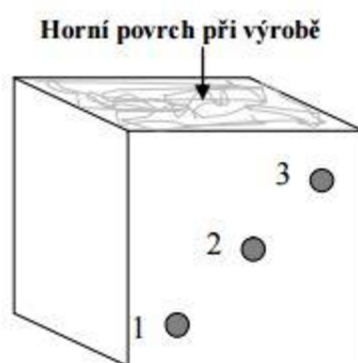
Graf 1 – Objemové hmotnosti krychlí

V grafu jsou zaznamenány průměrné objemové hmotnosti jednotlivých záměsí. Hlavním cílem při výrobě betonové směsi bylo, aby každá směs měla jinou konzistenci. Rozdílné konzistence mohly nastat přidáním jiného množství plasifikátoru a záměsové vody. Dalším ovlivňujícím faktorem mohlo být hutnění betonové směsi.

4.2 Zkoušky ztvrdlého betonu

4.2.1 Ultrazvuk

Kvalitu zhutnění již ztvrdlého betonu jsme zkontrolovali pomocí ultrazvukové impulsní metody. Porovnávali jsme rychlost šíření ultrazvukového vlnění ve třech výškových úrovních.



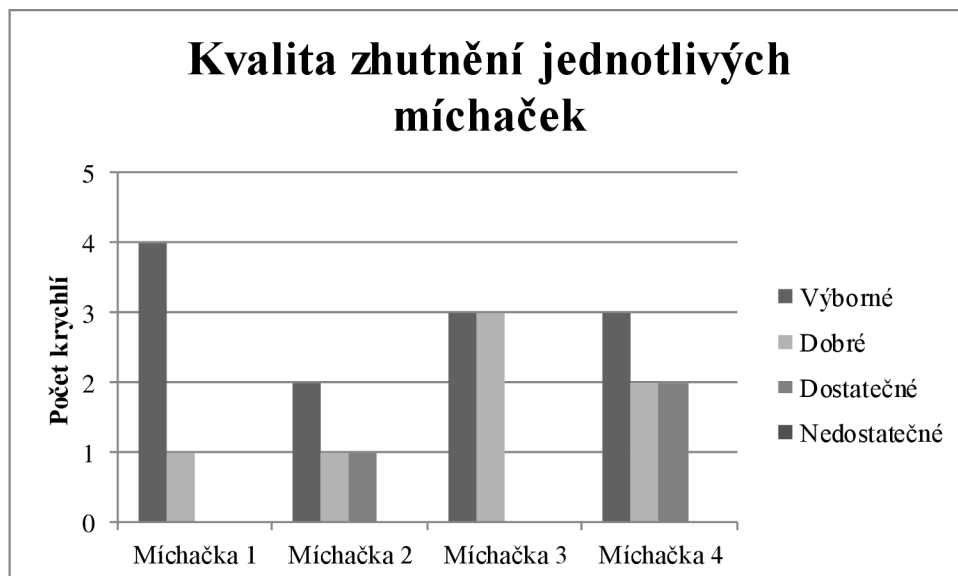
Obrázek 43 – Místa měřená ultrazvukem

Měření bylo provedeno přístrojem TICO se sondami o frekvenci 54 kHz. Dobu průchodu, kterou nám ukázal přístroj, jsme následně upravili o tzv. mrtvý čas.

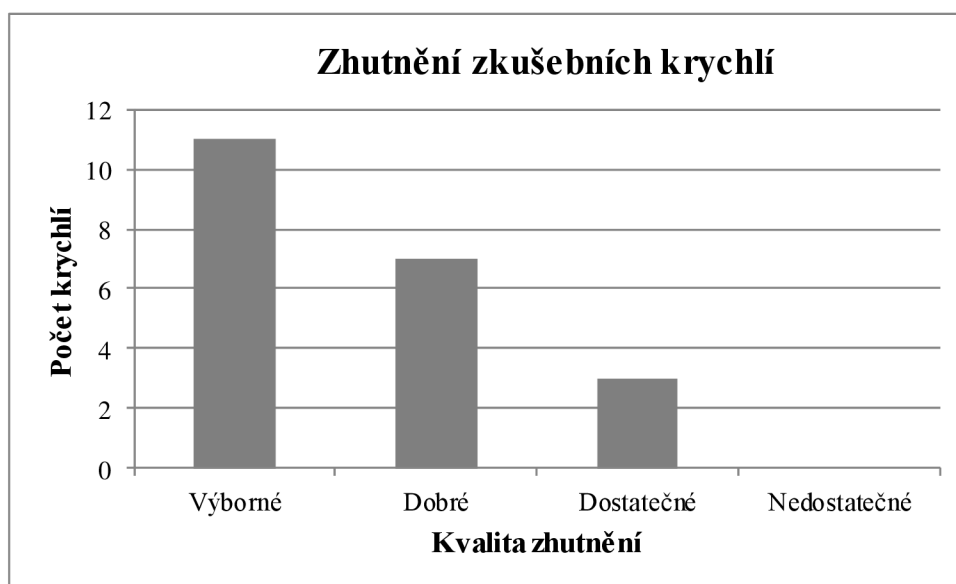


Obrázek 44 - Měření doby průchodu ultrazvukového měření pomocí přístroje TICO

Kvalitu zhutnění jsme vyhodnotili z rozdílu rychlostí v horní a dolní části a poté vše zaznamenali v následujících grafech.



Graf 2 – Zhutnění jednotlivých záměsí



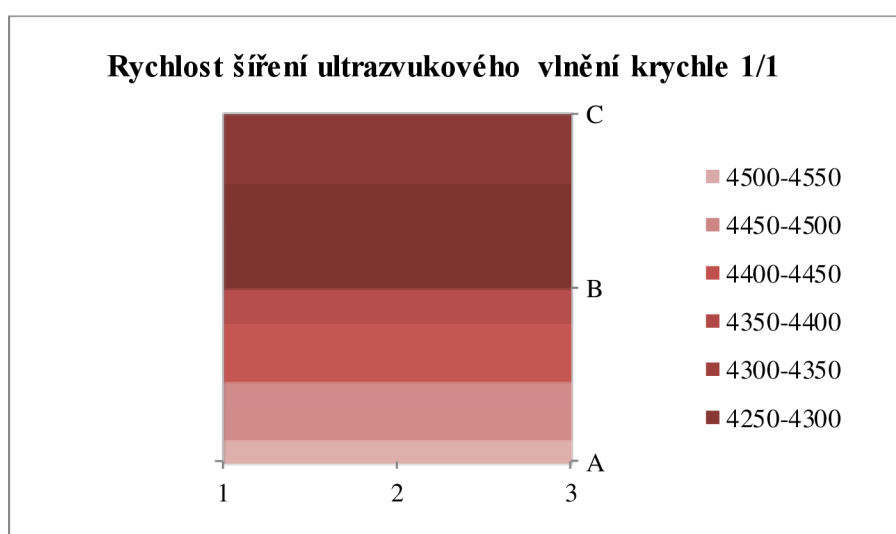
Graf 3 – Celková kvalita zhutnění

Nejlépe zhutněna byla betonová směs v záměsi 1, naopak nejhůře na tom byla směs v záměsi 2. Celkově se dá říct, že zhutnění bylo výborné až dobré. Následně byly rychlosti šíření ultrazvukového vlnění znázorněny v grafu pomocí izovel, což jsou čáry o stejné rychlosti. Z každé záměsi byl na ukázkou vybrán jeden vzorek.

Míchačka 1, vzorek 1

Tabulka 11 – Výpočet rychlosti šíření vlnění záměs 1, vzorek 1

Měřicí základna	Délka zákl. L_i [mm]	Doba průchodu UZ vln		Rychlost šíření v_L [m.s ⁻¹]			
		T_i [ms]	$T_i - T_0$ [ms]	Jednotlivá		Průměrná	
1-1' (dolní)	150,14	33,40	33,20	4522	4520	4437	4440
2-2' (střední)	150,14	34,60	34,40	4365	4370		
3-3' (horní)	150,14	34,20	34,00	4416	4420		
Rozdíl 1-3	-	-	-	-	100	-	-

**Graf 4** – Zobrazení rychlosti šíření pomocí izovel, vzorek 1

Průměrná rychlost šíření ve vzorku 1 byla 4440 m/s. Rychlost šíření při dolním okraji je větší než při horním okraji. To znamená, že v dolní části betonu se nacházel lepší beton než nahoře.

Míchačka 2, vzorek 2

Tabulka 12 – Výpočet rychlosti šíření záměs 2, vzorek 2

Měřicí základna	Délka zákl. L_i [mm]	Doba průchodu UZ vln		Rychlost šíření v_L [m.s ⁻¹]			
		T_i [ms]	$T_i - T_0$ [ms]	Jednotlivá		Průměrná	
1-1' (dolní)	150,33	35,60	35,40	4247	4250	4367	4370
2-2' (střední)	150,33	34,80	34,60	4345	4350		
3-3' (horní)	150,33	33,60	33,40	4501	4500		
Rozdíl 1-3	-	-	-	-	250	-	-



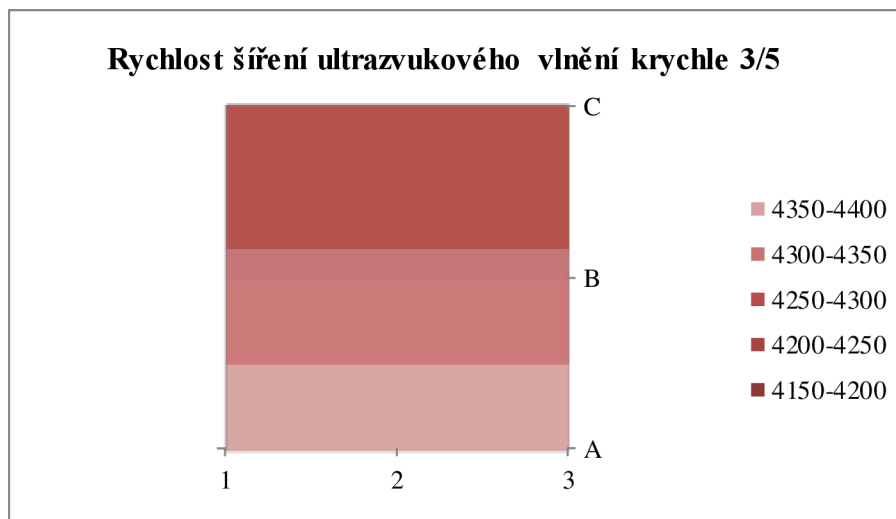
Graf 5 – Zobrazení rychlosti šíření pomocí izovel, vzorek 2

Průměrná rychlost šíření v záměsi 2 pro vzorek 2 byl 4370 m/s. Rychlost šíření při dolním okraji je menší než při horním okraji. Beton je mnohem lepší v horní části.

Míchačka 3, vzorek 5

Tabulka 13 – Výpočet rychlosti šíření záměs 3, vzorek 5

Měřicí základna	Délka zákl. L_i [mm]	Doba průchodu UZ vln		Rychlost šíření v_l [m.s ⁻¹]			
		T_i [ms]	$T_i - T_0$ [ms]	Jednotlivá		Průměrná	
1-1' (dolní)	150,11	34,40	34,20	4389	4390	4317	4320
2-2' (střední)	150,11	35,00	34,80	4314	4310		
3-3' (horní)	150,11	35,50	35,30	4252	4250		
Rozdíl 1-3	-	-	-	-	140	-	-



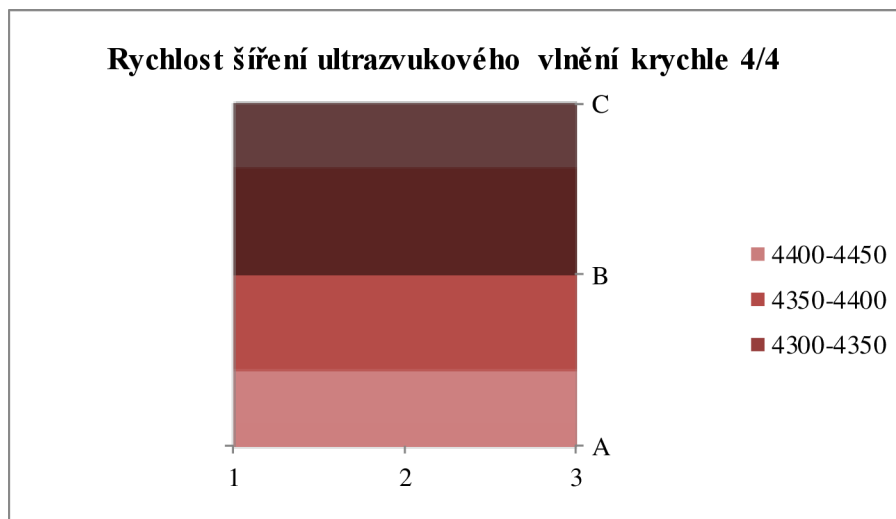
Graf 6 – Zobrazení rychlosti šíření pomocí izovel, vzorek 5

Průměrná rychlost šíření v záměsi 3 pro vzorek 5 byl 4320 m/s. Při dolním okraji je rychlost šíření větší než při dolním okraji. Z toho vyplývá, že v dolní části se nachází lepší beton než v horní části.

Michačka 4, vzorek 4

Tabulka 14 – Výpočet rychlosti šíření záměs 4, vzorek 4

Měřicí základna	Délka zákl. L_i [mm]	Doba průchodu UZ vln		Rychlost šíření v_i [m.s ⁻¹]			
		T_i [ms]	$T_i - T_0$ [ms]	Jednotlivá		Průměrná	
1-1' (dolní)	150,45	34,10	33,90	4438	4440	4407	4410
2-2' (střední)	150,45	34,80	34,60	4348	4350		
3-3' (horní)	150,45	34,20	34,00	4425	4430		
Rozdíl 1-3	-	-	-	-	10	-	-



Graf 7 – Zobrazení rychlosti šíření pomocí izovel, vzorek 4

Průměrná rychlost šíření v záměsi 4 pro vzorek 4 byl 4410 m/s. Rychlost šíření v dolní části byla větší než v horní části. Beton byl lepší v dolní části. V následující tabulce byla vypočtena průměrná rychlost šíření v jednotlivých záměsích. Z těchto rychlostí vyplývá, že nejlepší vzorky jsou ze záměsi 1, naopak horší vzorky jsou ze záměsi 2.

Tabulka 15 – Průměrná rychlost šířená

Průměrná rychlost šíření v_L [m/s]	
Záměs 1	4430
Záměs2	4320
Záměs 3	4340
Záměs 4	4360

4.2.2 Pevnost v tlaku

Očištěnou krychli jsme vložili mezi tlačné desky lisu tak, aby tlak působil kolmo ke směru hutnění betonu. Krychli jsme plynule zatěžovali až do úplného porušení. Poté jsme zaznamenali maximální zatížení při porušení. Zkoušku jsme provedli pro 3 zkušební krychle. Pevnost v tlaku f_c v $[\text{N}/\text{mm}^2]$ je dána vztahem:

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

kde F je maximální zatížení při porušení [N]

A_c je průřezová plocha tělesa, na které působí zatížení $[\text{mm}^2]$

Vyhodnocení pevnosti v tlaku pro tři zkušební krychle je v následující tabulce.

Tabulka 16 – Vyhodnocení pevnosti v tlaku

Vzorek	Rozměr a [mm]	Rozměr b [mm]	Plocha $[\text{mm}^2]$	F [kN]	f_c $[\text{N}/\text{mm}^2]$
Krychle č. 1	150,14	150,11	22538	642,3	28,5
Krychle č. 2	150,33	150,46	22619	689,9	30,5
Krychle č. 3	150,16	150,39	22583	654,9	29,0

Zatřídění betonu dle ČSN EN 206 – 1 bylo C20/25. V následující části jsem provedla posouzení shody pro pevnost betonu v tlaku. Při zatěžovacích zkouškách betonu třídy C20/25 byly zjištěny tyto hodnoty pevnosti v tlaku:

$$f_{c1} = 28,5 \text{ N}/\text{mm}^2, f_{c2} = 30,5 \text{ N}/\text{mm}^2, f_{c3} = 29,0 \text{ N}/\text{mm}^2$$

Kontrola shody byla provedena pomocí dvou kritérií. Průměrná hodnota pevnosti v tlaku ze tří výsledků $f_{c,m} = 29,3 \text{ N}/\text{mm}^2$

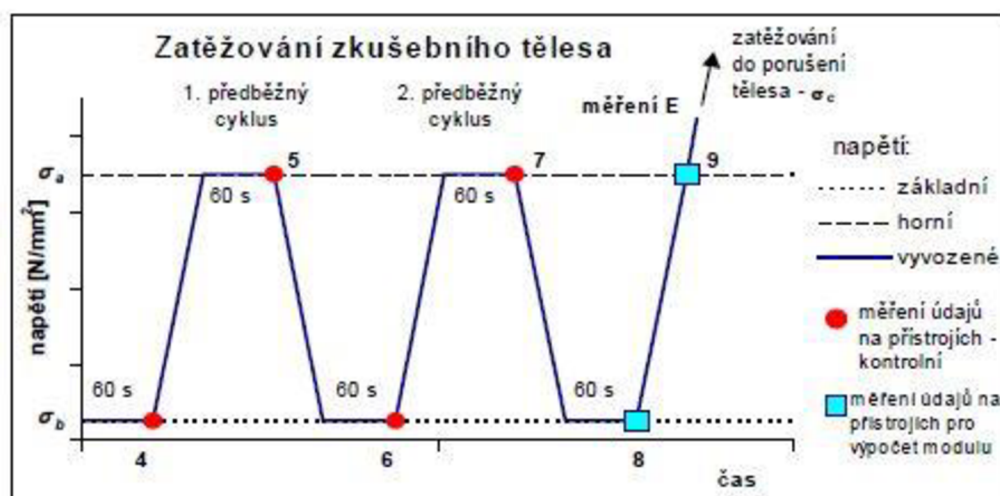
Kritérium 1: průměrná pevnost $f_{c,m} = 29,3 \text{ N}/\text{mm}^2 \geq f_{ck} + 4 = 25 + 4 = 29 \text{ N}/\text{mm}^2$, splněno

Kritérium 2: nejmenší pevnost $f_{c,i} = 28,5 \text{ N}/\text{mm}^2 \geq f_{ck} - 4 = 25 - 4 = 21 \text{ N}/\text{mm}^2$, splněno

Obě podmínky byly splněny, byla prokázána shoda s charakteristickou pevností v tlaku – beton vyhověl požadavkům ČSN EN 206-1 pro třídu C20/25.

4.2.3 Modul pružnosti v tlaku

Modul pružnosti v tlaku jsme zkoušeli na trácích o rozměru 100 x 100 x 400 mm. Měli jsme k dispozici 3 zkušební tělesa, na kterých se provedlo stanovení statického modulu pružnosti. Vypočetli jsme horní zatěžovací napětí σ_a , která se určí jako třetina z aritmetického průměru pevnosti v tlaku. Na těleso se umístí snímací zařízení dle základních podmínek pro umístění. Poté se vše vložilo do hydraulického lisu a odjistila se aretace. Nejprve jsme vyvodili základní napětí σ_b , což je 0,5 N/mm² a odečetli hodnoty na snímačích. Pak jsme postupně zatěžovali až na horní hranici zatěžovacího napětí, která byla stanovena na 150 kN, resp. 15 MPa. Toto napětí jsme udržovali po dobu 60 s a poté odečetli hodnoty na snímačích. Pokud se nám jednotlivá přetvoření lišili od průměrné hodnoty o více jak 20%, museli jsme vzorek znova vycentrovat. Po vycentrování jsme zkušební vzorek střídavě zatěžovali na horní zatěžovací napětí a odlehčovali na počáteční hodnotu σ_b , vždy s výdrží 60 s. Rychlost zatěžování a odlehčování byla stejná, teda 0,4 – 0,6 N/mm²/s. Zatěžovací cyklus se provedl minimálně 2x. Jakmile jsme dokončili měření a odstranili měřicí přístroje, zvětšovali jsme napětí dle předepsané rychlosti až do porušení vzorku.



Obrázek 45 – Grafické zobrazení průběhu zatěžování zkušebního tělesa

Vyhodnocení modulu pružnosti v tlaku pro 3 zkušební trámce je v tabulce č. 17. V porovnání s hodnotami modulu pružnosti pro třídu betonu C20/25, které jsou uvedeny v Eurocode 2 a v ČSN 73 1201 náš beton nevyhovuje těmto požadavkům.

Tabulka 17 – Vyhodnocení modulu pružnosti

Vzorek	Modul pružnosti [MPa]	Eurocode 2 [MPa]	ČSN 73 1201 [MPa]
Trámec 1	24 400	29 000	30 000
Trámec 2	25 100	29 000	30 000
Trámec 3	24 900	29 000	30 000



Obrázek 46 – Zkušební zařízení FormTest



Obrázek 47 – Měření modulu pružnosti

4.3 Tahové zkoušky dodatečně osázených kotev HILTI

4.3.1 Výroba zkušebních těles

V druhé části diplomové práce jsme se zaměřily na únosnost chemické kotvy v tahu, kterou nám poskytla firma HILTI. Náhodně jsme si vybrali 18 krychlí, které byly vyrobeny ze 4 míchaček. Rozdělily jsme si je na dvě skupiny. V první skupině se nacházely krychle, kde následně vyvrtaný otvor pro umístění chemické kotvy nebyl vyčištěn. V druhé skupině se nacházely krychle, kde otvor po vyvrtání byl řádně vyčištěn. Vyčištění bylo provedeno dle přesných postupů, které doporučuje firma HILTI, aby chemická kotva a beton měly dobrou soudržnost a spolupůsobení. Zvolili jsme tři různé hloubky kotvení. První hloubka kotvení byla 40 mm. Druhou hloubku jsme zvolili 70 mm, což je minimální hloubka kotvení pro chemickou kotvu HIT – V 5.8 M12. Poslední hloubka kotvení byla 110 mm, což je pro zvolenou kotvu typická hloubka kotvení. Postup správného osazení kotvy byl proveden následujícím způsobem:

- Nejprve jsme provedli vývrt a to za pomoci rotační vrtačky s vhodnou velikostí vrtáku. Během vrtání jsme se snažili přiblížit podmínkám, které se na stavbách vyskytují. Příkladem může být to, že ne každý vývrt byl vyvrtán dokonale rovně, ale byl trochu šikmý. Další možností je, že se nedodrží stanovená hloubka kotvení, proto jsme zvolily i hloubku 40 mm, která se v tabulkách pro danou kotvu nevyskytuje.



Obrázek 49 – Vrtačka



Obrázek 48 – Uchycení betonových krychlí

- Před osazením kotvy musí být vývrt bez prachu a nečistot. Existují dva způsoby čištění otvoru. Prvním způsob je pomocí kompresoru, který můžeme použít pro všechny průměry vrtu d_0 a všechny hloubky vrtání h_0 . Pomocí stlačeného vzduchu (min. 6 bar při 6 m³/h) celý otvor vyfoukáme 2x ze zadní strany otvoru, dokud nebude vycházet proud vzduchu bez prachu. Poté vložíme ocelový kartáč do zadní části otvoru a 2x krouživými pohyby odstraníme nečistoty. Kartáč musí být dost široký na vyčištění. Pro konečné vyčištění opět použijeme stlačený vzduch a 2x vyfoukáme, dokud nevyjde z otvoru čistý vzduch. Druhým způsobem je manuální čištění, které jsme zvolili my. Manuální čištění se používá pouze pro beton bez trhlin, pro průměry vrtání otvorů $d_0 \leq 20$ mm a hloubkou vrtání $h_0 \leq 10d$. Pro vyčištění jsme použili ruční pumpu. Foukali jsme alespoň 4x ze zadní části otvoru, dokud nevycházel vzduch bez znatelného prachu. Dále jsme použili kartáč, který jsme 4x zasunuli na zadní část otvoru krouživými pohyby. Kartáč musí být odolný a mít správnou velikost do vrtu. Poté jsme opět použili ruční pumpu a 4x vyfoukali otvor, aby se zbavil prachu.



Obrázek 50 – Vyčištění otvoru pomocí ruční pumpy



Obrázek 51 – Vyčištění pomocí kartáče

- Po vyčištění otvoru jsme si připravili pistoli na lepicí hmotu. Nejprve jsme připevnili směšovací trysku. Nesmíme zaměnit směšovací trysky. Nesmíme používat poškozené obaly. Podle toho jak velké balení jsme měli, museli jsme počáteční množství lepidla zlikvidovat

2 tahy pro 330 ml balení

3 tahy pro 500 ml balení

4 tahy pro 500 ml balení a teplota ≤ 5 °C.



Obrázek 52 – Počáteční vytlačení lepicí hmoty

- Po přípravě lepidla jsme nastříkali lepicí hmotu na zadní stěnu vrtu bez vytváření vzduchových pórů. Lepidlo jsme aplikovali na zadní část otvoru pomalu s postupným vytahováním pistole. Otvor jsme vyplnili přibližně do 2/3. Po dokončení aplikace lepicí hmoty jsme zajistili dávkovač.



Obrázek 53 – Aplikace lepicí hmoty

- Poté jsme aplikovali kotvu, která před aplikací musí být suchá a zbavena všech nečistot a mastnoty. Kotva se postupně zasouvala krouživými pohyby do požadované hloubky kotvení a čekali, až lepicí hmota zatvrdne dle požadované doby vytvrzení.



Obrázek 54 – Aplikace kotvy krouživými pohyby



Obrázek 55 – Chemická kotva

4.3.2 Provedení tahových zkoušek

Tahové zkoušky jsme prováděli v na mechanickém lisu FPZ 100/10 , který jsme přizpůsobili pro ověření únosnosti a způsobu porušení kotev, které byly osazeny v krychlích o hraně 150 mm. Při zkouškách jsme uvažovali beton bez trhlin. Zkušební vzorek jsme umístili do lisu na prodlouženou závitovou tyč o větší pevnosti, než byla samotná pevnost kotvy. Prodloužená závitová tyč a kotva byly spojeny pomocí větší spojovací matice. Poté jsme umístili dva indukčnostní snímače dráhy do stojanu a připevnili je tak, aby se dotýkaly povrchu zkušebního tělesa. Úkolem snímačů bylo to, aby měřily povytažení kotvy vůči hornímu líci betonového prvku. Následně jsme provedli zatěžování jednotlivých kotev řízenou deformací 0,15 – 0,20 mm/min až do porušení prvku.



Obrázek 56 – Zkušební zařízení

4.3.3 Vyhodnocení tahových zkoušek

Identifikační údaje:

Název:	Sada 1, vyčištěný otvor
Objekt – konstrukce:	Krychle o hraně 150 mm
Druh kotvy:	Kotva HIT – V 5.8 velikost M12
Počet zkušebních těles:	3 ks
Datum výroby těles:	14. 10. 2015

Charakteristiky zkoušeného materiálu:

Beton:	C20/25
Metoda míchání:	Laboratorní míchačka
Způsob vrtání otvoru:	Příklepová vrtačka
Orientace kotvení:	Svislá
Způsob aplikace kotvicí zálivky:	Automatická dávkovací pistole
Průměr vrtu:	14 mm
Průměr kotvy:	12 mm
Hloubka vrtu:	40 mm
Povrch betonového bloku pro kotvení:	Suchý

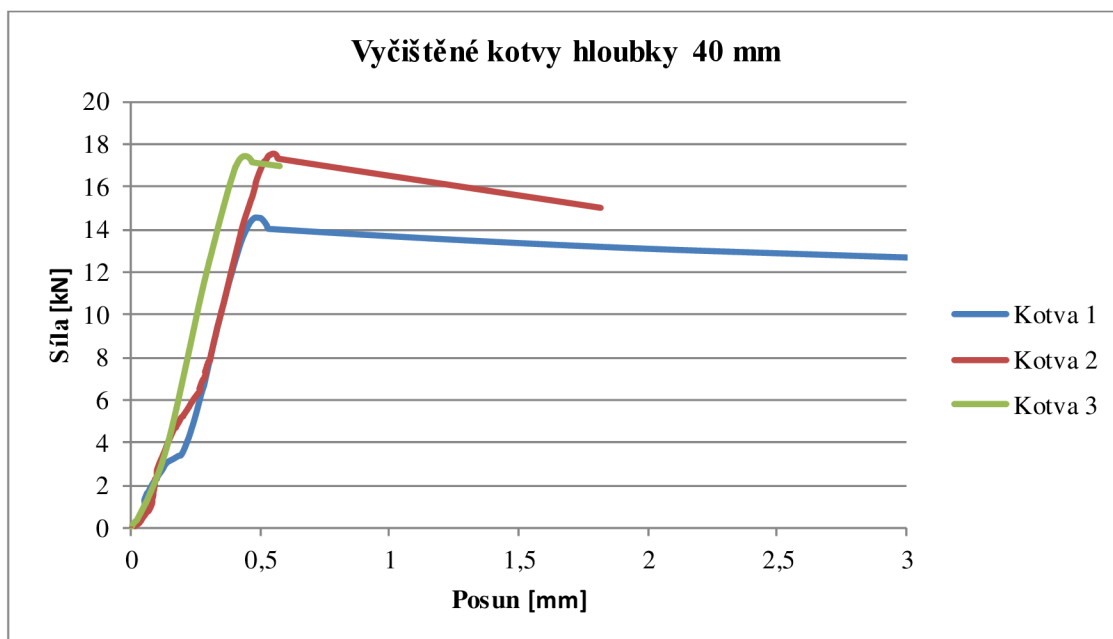
Charakteristika zkoušky:

Datum provedení kotvení:	11. 11. 2015
Datum zkoušky:	13. 11. 2015
Stáří kotvení:	2 dny

Výsledky zkoušky:

	Kotva 1	Kotva 2	Kotva 3
Hodnota maximálního zatížení:	14,55 kN	17,55 kN	17,43 kN
Hodnota posunu při max. zatížením:	0,484 mm	0,552 mm	0,441 mm
Typ porušení: (rozlomení	Porušení betonu)	vytržením betonu)	kužele betonu – porušení betonu

Závislost síly na posunu:



Graf 8 – Závislost síly na posunu hloubky 40 mm, vyčištěná

Poznámka:



Obrázek 57 – Kotva 1, vyčištěná, hloubky 40 mm



Obrázek 58 – Kotva 2, vyčištěná, hloubky 40 mm



Obrázek 59 – Kotva 3, vyčištěná, hloubky 40 mm

Identifikační údaje:

Název:	Sada 2, vyčištěný otvor
Objekt – konstrukce:	Krychle o hraně 150 mm
Druh kotvy:	Kotva HIT – V 5.8 velikost M12
Počet zkušebních těles:	3 ks
Datum výroby těles:	14. 10. 2015

Charakteristiky zkoušeného materiálu:

Beton:	C20/25
Metoda míchání:	Laboratorní míchačka
Způsob vrtání otvoru:	Příklepová vrtačka
Orientace kotvení:	Svislá
Způsob aplikace kotvicí zálivky:	Automatická dávkovací pistole
Průměr vrtu:	14 mm
Průměr kotvy:	12 mm
Hloubka vrtu:	70 mm
Povrch betonového bloku pro kotvení:	Suchý

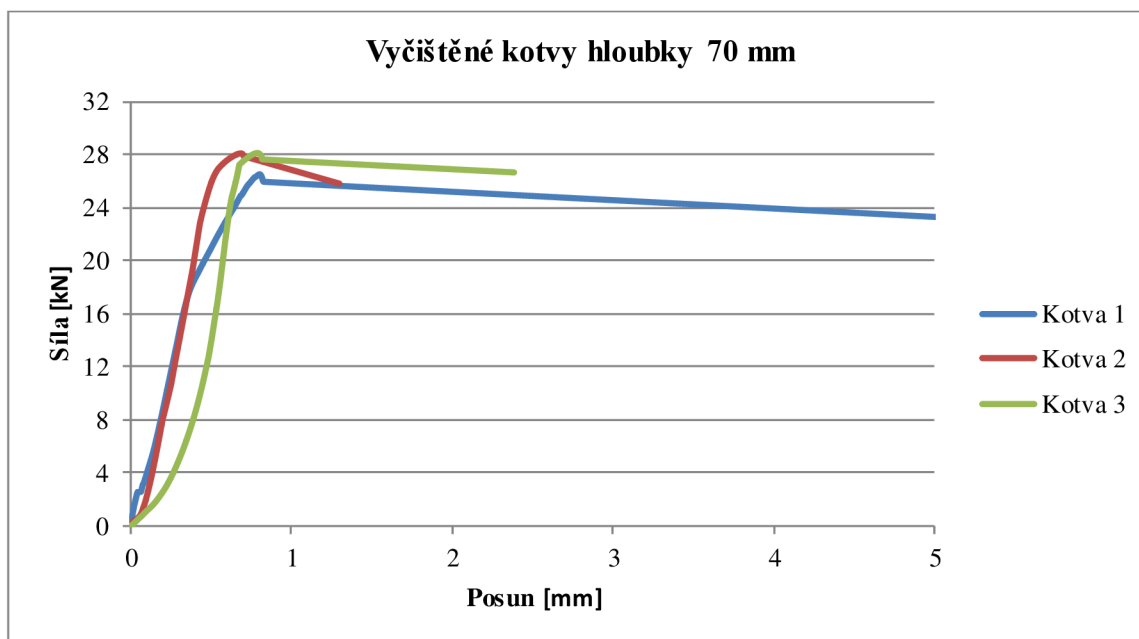
Charakteristika zkoušky:

Datum provedení kotvení:	11. 11. 2015
Datum zkoušky:	13. 11. 2015
Stáří kotvení:	2 dny

Výsledky zkoušky:

	Kotva 1	Kotva 2	Kotva 3
Hodnota maximálního zatížení:	26,50 kN	28,07 kN	28,11 kN
Hodnota posunu při max. zatížením:	0,802 mm	0,684 mm	0,787 mm
Typ porušení: (rozlomení	Porušení betonu)	vytržením betonu) –	kužele porušení betonu

Závislost síly na posunu:



Graf 9 – Závislost síly na posunu hloubky 70 mm, vyčištěná

Poznámka:



Obrázek 61 – Kotva 1, vyčištěná, hloubky 70 mm



Obrázek 62 – Kotva 2, vyčištěná, hloubky 70 mm



Obrázek 63 – Kotva 3, vyčištěná, hloubky 70 mm

Identifikační údaje:

Název:	Sada 3, vyčištěný otvor
Objekt – konstrukce:	Krychle o hraně 150 mm
Druh kotvy:	Kotva HIT – V 5.8 velikost M12
Počet zkušebních těles:	3 ks
Datum výroby těles:	14. 10. 2015

Charakteristiky zkoušeného materiálu:

Beton:	C20/25
Metoda míchání:	Laboratorní míchačka
Způsob vrtání otvoru:	Příklepová vrtačka
Orientace kotvení:	Svislá
Způsob aplikace kotvicí zálivky:	Automatická dávkovací pistole
Průměr vrtu:	14 mm
Průměr kotvy:	12 mm
Hloubka vrtu:	110 mm
Povrch betonového bloku pro kotvení:	Suchý

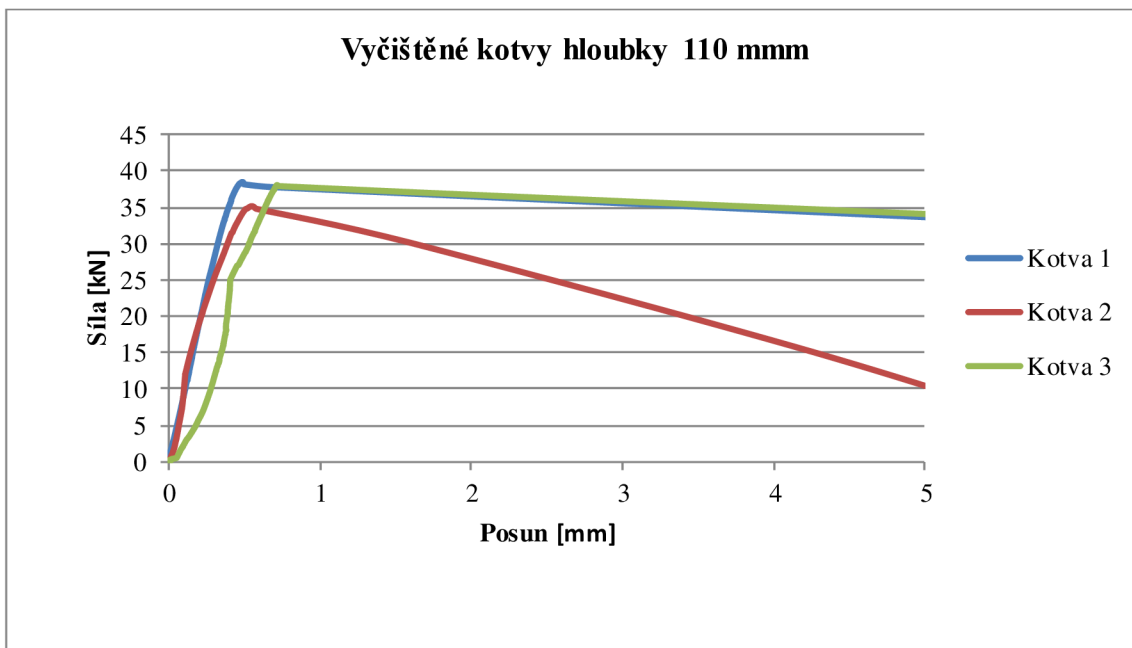
Charakteristika zkoušky:

Datum provedení kotvení:	11. 11. 2015
Datum zkoušky:	13. 11. 2015
Stáří kotvení:	2 dny

Výsledky zkoušky:

	Kotva 1	Kotva 2	Kotva 3
Hodnota maximálního zatížení:	38,48 kN	35,15 kN	38,05 kN
Hodnota posunu při max. zatížením:	0,487 mm	0,550 mm	0,717 mm
Typ porušení: (rozlomení	Porušení betonu) –	vytržením betonu) –	kužele betonu

Závislost síly na posunu:



Graf 10 – Závislost síly na posunu hloubky 110 mm, vyčištěná

Poznámka:



Obrázek 64 – Kotva 1, vyčištěná, hloubky 110 mm



Obrázek 65 – Kotva 2, vyčištěná, hloubky 110 mm



Obrázek 66 – Kotva 3, vyčištěná, hloubky 110 mm

Identifikační údaje:

Název:	Sada 4, nevyčištěný otvor
Objekt – konstrukce:	Krychle o hraně 150 mm
Druh kotvy:	Kotva HIT – V 5.8 velikost M12
Počet zkušebních těles:	3 ks
Datum výroby těles:	14. 10. 2015

Charakteristiky zkoušeného materiálu:

Beton:	C20/25
Metoda míchání:	Laboratorní míchačka
Způsob vrtání otvoru:	Příklepová vrtačka
Orientace kotvení:	Svislá
Způsob aplikace kotvicí zálivky:	Automatická dávkovací pistole
Průměr vrtu:	14 mm
Průměr kotvy:	12 mm
Hloubka vrtu:	40 mm
Povrch betonového bloku pro kotvení:	Suchý

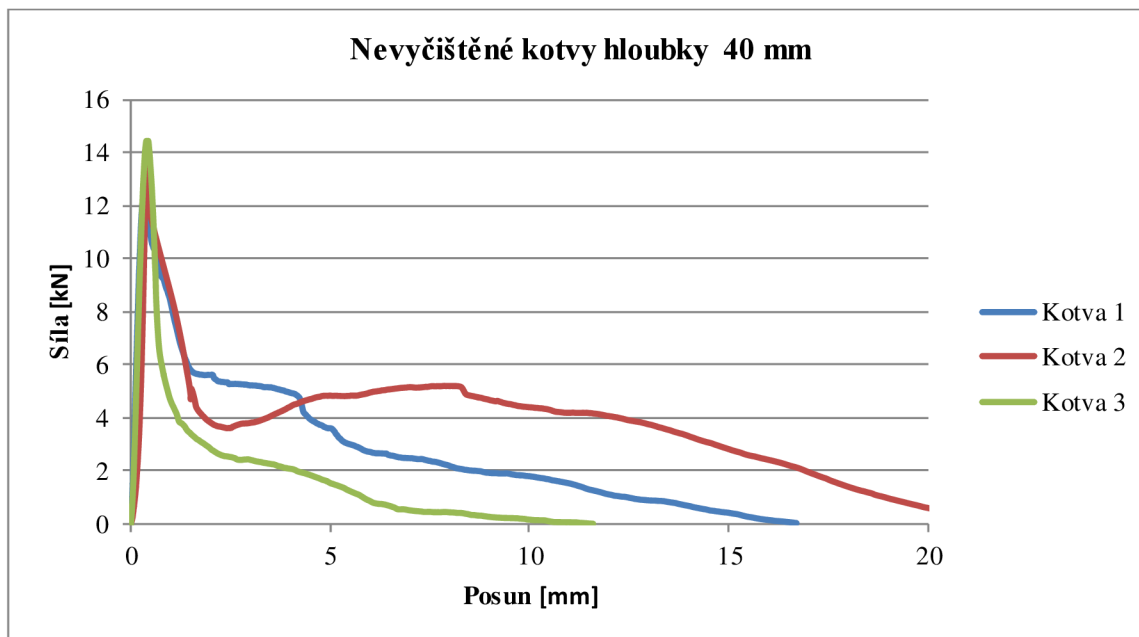
Charakteristika zkoušky:

Datum provedení kotvení:	11. 11. 2015
Datum zkoušky:	13. 11. 2015
Stáří kotvení:	2 dny

Výsledky zkoušky:

	Kotva 1	Kotva 2	Kotva 3
Hodnota maximálního zatížení:	12,30 kN	13,66 kN	14,43 kN
Hodnota posunu při max. zatížením:	0,336 mm	0,405 mm	0,388 mm
Typ porušení:	Porušení soudržnosti mezi betonem a lepicí hmotou		

Závislost síly na posunu:



Graf 11 – Závislost síly na posunu hloubky 40 mm, nevyčištěná

Poznámka:



Obrázek 67 – Kotva 2, nevyčištěná, hloubky 40 mm



Obrázek 68 – Kotva 1, nevyčištěná, hloubky 40 mm



Obrázek 69 – Kotva 3, nevyčištěná, hloubky 40 mm

Identifikační údaje:

Název:	Sada 5, nevyčištěný otvor
Objekt – konstrukce:	Krychle o hraně 150 mm
Druh kotvy:	Kotva HIT – V 5.8 velikost M12
Počet zkušebních těles:	3 ks
Datum výroby těles:	14. 10. 2015

Charakteristiky zkoušeného materiálu:

Beton:	C20/25
Metoda míchání:	Laboratorní míchačka
Způsob vrtání otvoru:	Přiklepová vrtačka
Orientace kotvení:	Svislá
Způsob aplikace kotvicí zálivky:	Automatická dávkovací pistole
Průměr vrtu:	14 mm
Průměr kotvy:	12 mm
Hloubka vrtu:	70 mm
Povrch betonového bloku pro kotvení:	Suchý

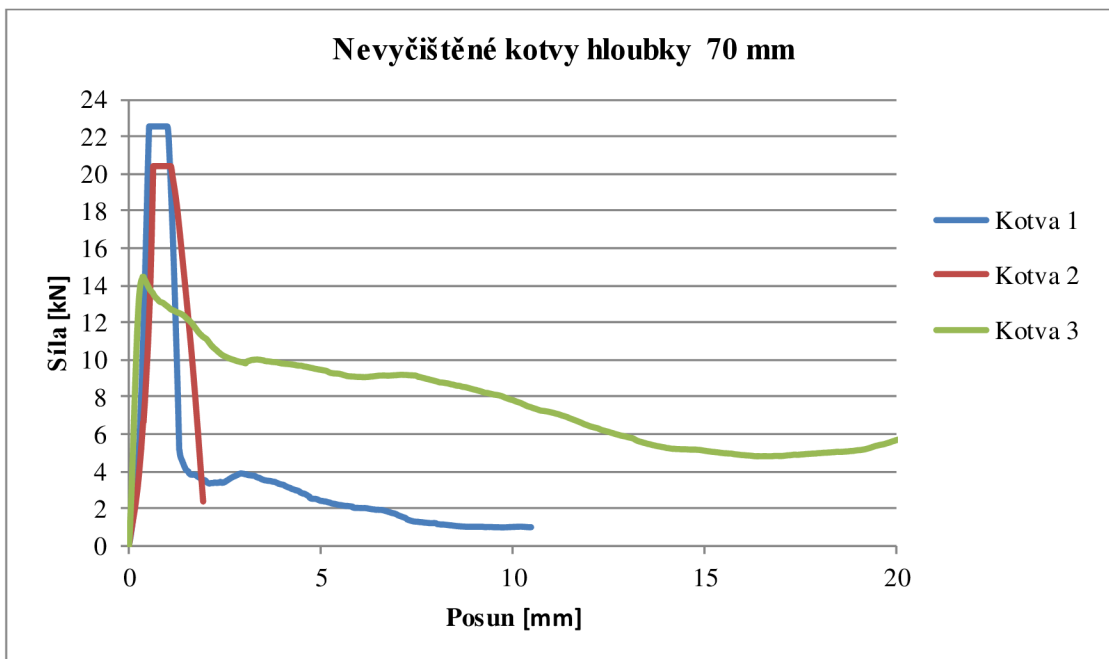
Charakteristika zkoušky:

Datum provedení kotvení:	11. 11. 2015
Datum zkoušky:	13. 11. 2015
Stáří kotvení:	2 dny

Výsledky zkoušky:

	Kotva 1	Kotva 2	Kotva 3
Hodnota maximálního zatížení:	22,55 kN	20,41 kN	14,46 kN
Hodnota posunu při max. zatížením:	0,525 mm	0,633 mm	0,386 mm
Typ porušení:	Porušení soudržnosti mezi betonem a lepicí hmotou		

Závislost síly na posunu:



Graf 12 – Závislost síly na posunu hloubky 70 mm, nevyčištěná

Poznámka:



Obrázek 70 – Kotva 1, nevyčištěná, hloubky 70 mm



Obrázek 71 – Kotva 2, nevyčištěná, hloubky 70 mm



Obrázek 72 – Kotva 3, nevyčištěná, hloubky 70 mm

Identifikační údaje:

Název:	Sada 6, nevyčištěný otvor
Objekt – konstrukce:	Krychle o hraně 150 mm
Druh kotvy:	Kotva HIT – V 5.8 velikost M12
Počet zkušebních těles:	3 ks
Datum výroby těles:	14. 10. 2015

Charakteristiky zkoušeného materiálu:

Beton:	C20/25
Metoda míchání:	Laboratorní míchačka
Způsob vrtání otvoru:	Přiklepová vrtačka
Orientace kotvení:	Svislá
Způsob aplikace kotvicí zálivky:	Automatická dávkovací pistole
Průměr vrtu:	14 mm
Průměr kotvy:	12 mm
Hloubka vrtu:	110 mm
Povrch betonového bloku pro kotvení:	Suchý

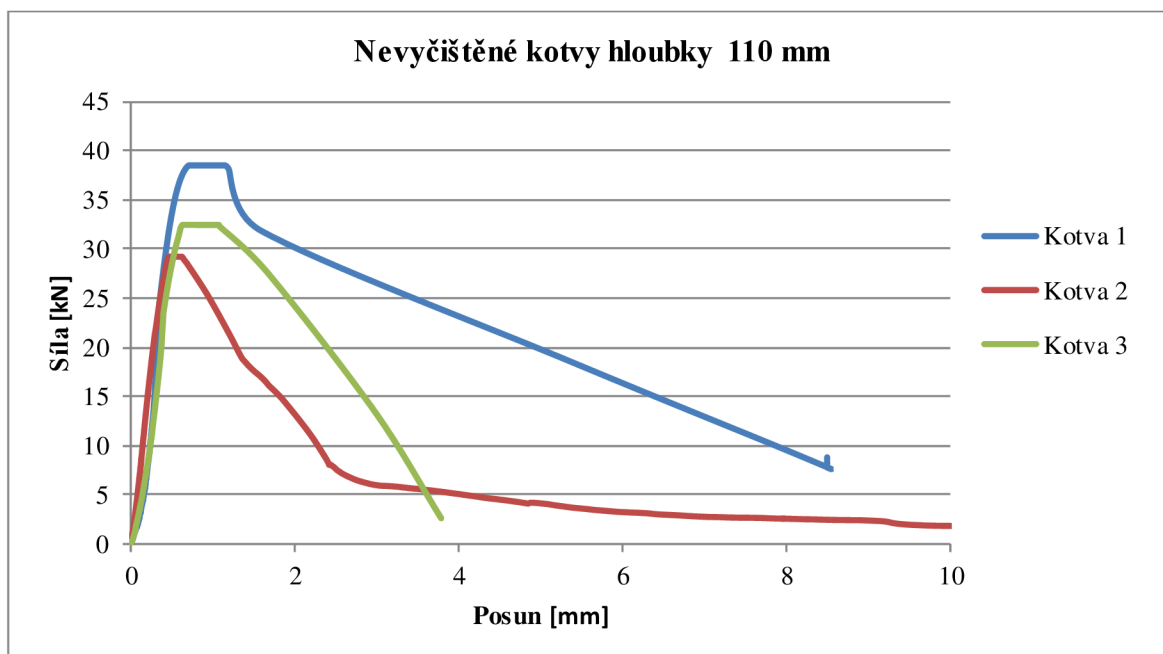
Charakteristika zkoušky:

Datum provedení kotvení:	11. 11. 2015
Datum zkoušky:	13. 11. 2015
Stáří kotvení:	2 dny

Výsledky zkoušky:

	Kotva 1	Kotva 2	Kotva 3
Hodnota maximálního zatížení:	38,49 kN	29,20 kN	32,43 kN
Hodnota posunu při max. zatížení:	0,712 mm	0,475 mm	0,632 mm
Typ porušení:	Porušení soudržnosti mezi betonem a lepicí hmotou		

Závislost síly na posunu:



Graf 13 – Závislost síly na posunu hloubky 110 mm, nevyčištěná

Poznámka:



Obrázek 73 – Kotva 1, nevyčištěná, hloubky 110 mm



Obrázek 74 – Kotva 2, nevyčištěná, hloubky 110 mm



Obrázek 75 – Kotva 3, nevyčištěná, hloubky 110 mm

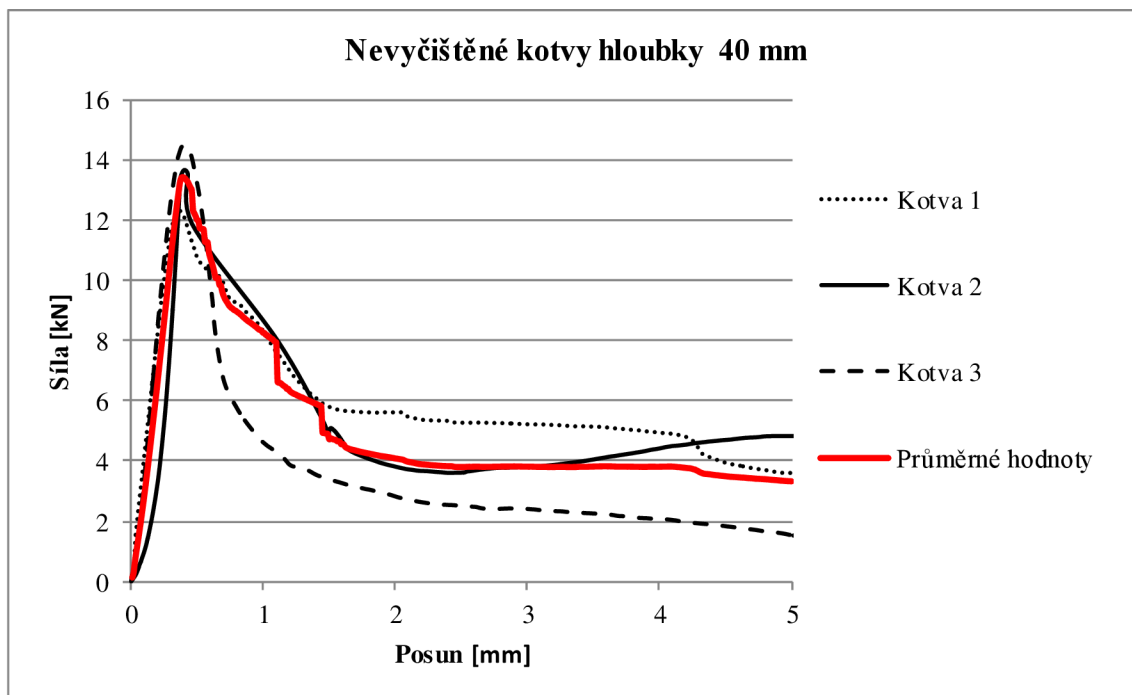
4.4 Závěry provedených tahových zkoušek

Souhrn jednotlivých sil porušení a jejich průměrné hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce:

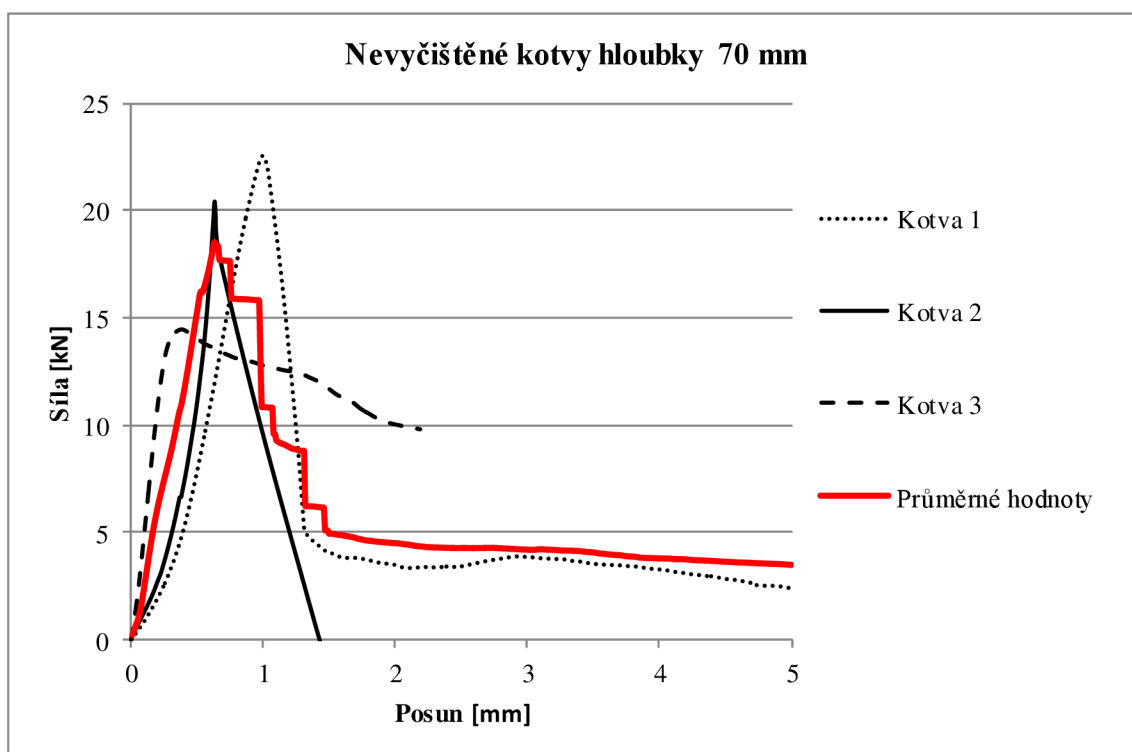
Tabulka 18 – Celkový souhrn jednotlivých porušení

Vyčištěný otvor				
Hloubka	Síla F_1 [kN]	Síla F_2 [kN]	Síla F_3 [kN]	Průměr [kN]
40 mm	14,55	17,55	17,44	16,51
70 mm	26,50	28,07	28,11	27,56
110 mm	38,48	35,15	38,05	37,23
Nevyčištěný otvor				
Hloubka	Síla F_1 [kN]	Síla F_2 [kN]	Síla F_3 [kN]	Průměr [kN]
40 mm	12,30	13,66	14,43	13,46
70 mm	22,55	20,41	14,46	19,14
110 mm	38,49	29,20	32,43	33,38

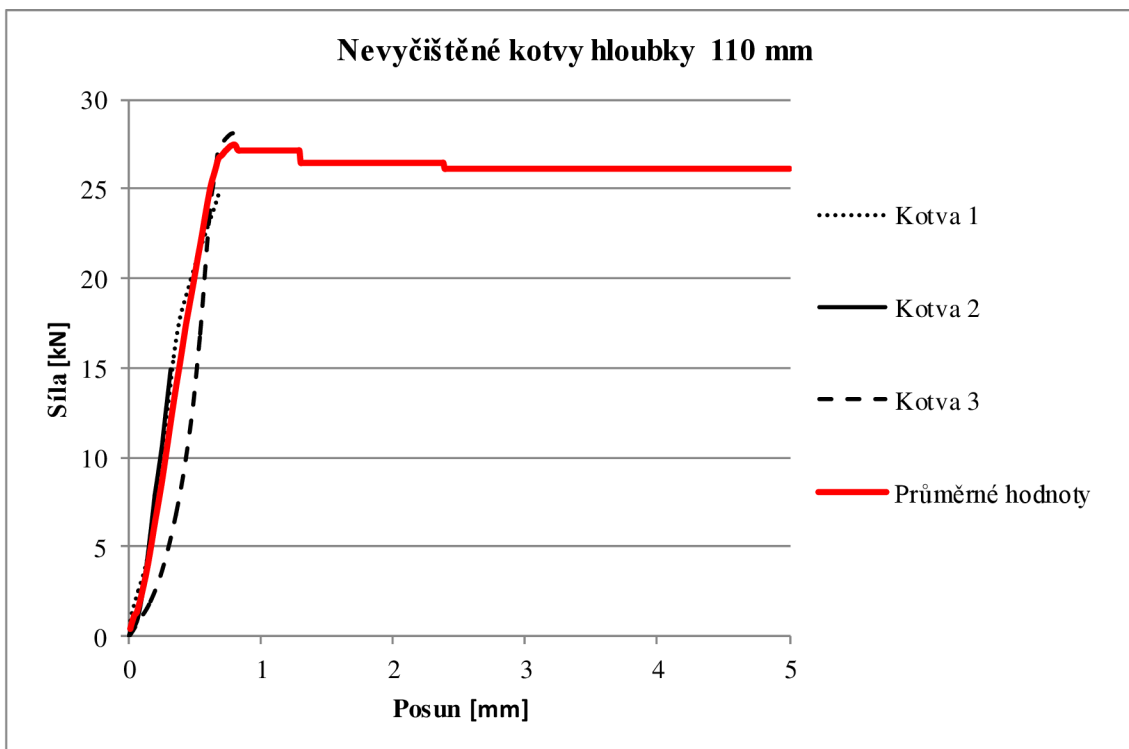
U každé hloubky se jedna hodnota, kdy nastalo porušení, výrazně lišila od zbývajících dvou hodnot, protože zkušební vzorky byly z horšího betonu. Příkladem špatného vzorku může být špatné zhutnění betonu jak je vidět v grafu č. 2. V tabulce vidíme, že s větší hloubkou kotvení se nám síla zvětšovala a to jak u vyčištěného otvoru, tak i u nevyčištěného. Pokud se nedodrží správný technologický postup čištění, hodnota únosnosti se zmenší. U hloubky 40 mm je hodnota menší o 3,05 kN, u hloubky 70 mm se zmenší o 8,42 kN, u hloubky 110 mm je hodnota menší o 3,85 kN. Ve všech případech nastalo porušení betonu. Po vyjmutí kotev z betonu šlo vidět, že u nevyčištěných otvorů beton nepřilnul s lepicí hmotou. U vyčištěného otvoru byla kotva po vyjmutí čistá, protože lepicí hmota měla dobrou soudržnost s betonem. Následují pracovní diagramy všech kotev, kde jsou vykresleny průměrné a charakteristické hodnoty.



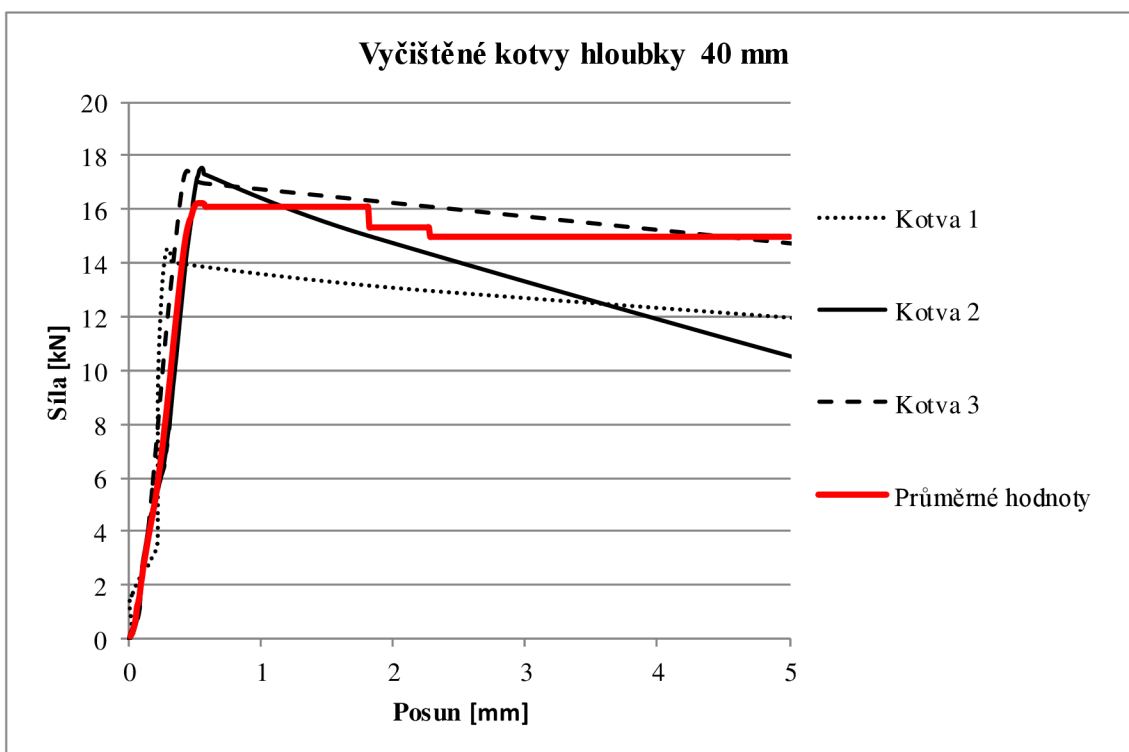
Graf 14 – Srovnání nevyčištěných kotev, hloubky 40 mm



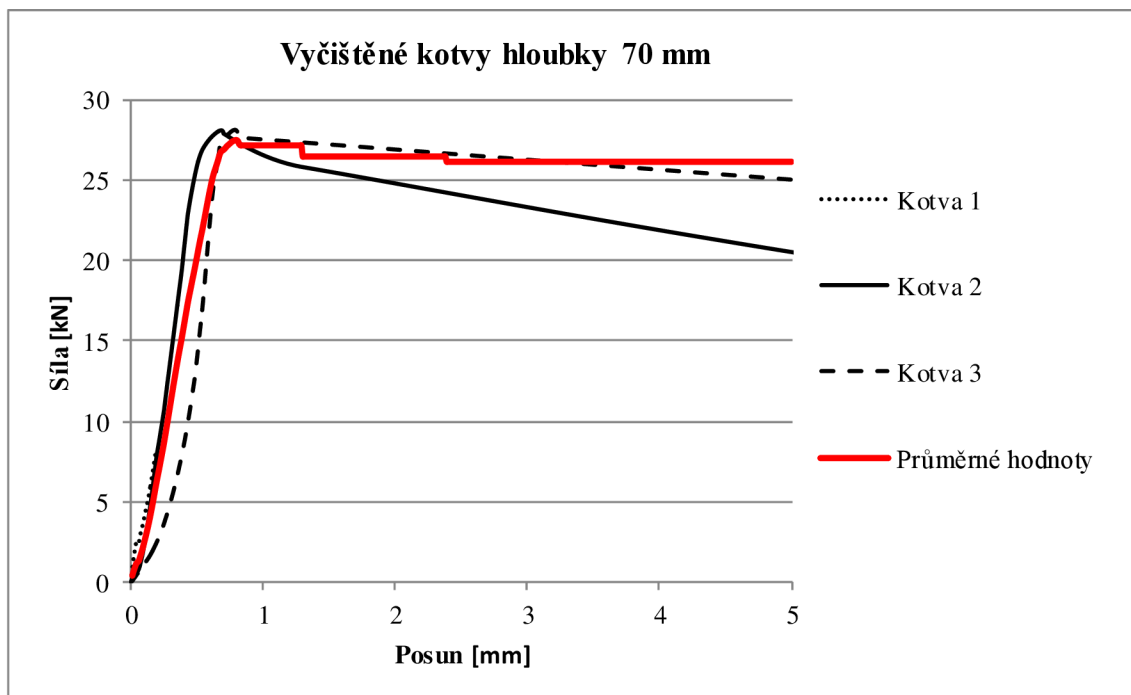
Graf 15 – Srovnání nevyčištěných kotev, hloubky 70 mm



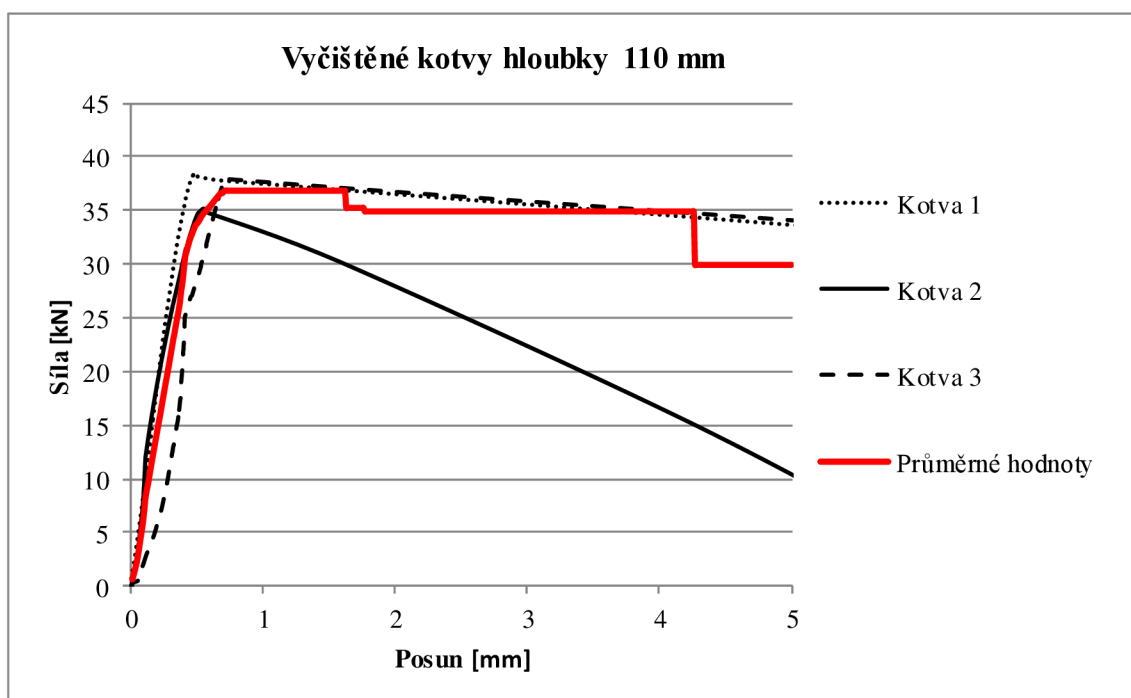
Graf 16 – Srovnání nevyčištěných kotev, hloubky 110 mm



Graf 17 – Srovnání vyčištěných kotev, hloubky 40 mm



Graf 18 – Srovnání vyčištěných kotev, hloubky 70 mm



Graf 19 – Srovnání vyčištěných kotev, hloubky 110 mm

V tabulce č. 19 je porovnání průměrné hodnoty, které nám vyšly ve výpočtu, s průměrnou hodnotou, kterou udává příručka od výrobce kotevního systému Hilti. Z tohoto porovnání vychází lépe kotvy, které byly vyčištěny dle návodu od výrobce. Kotvy s vyčištěným otvorem mají větší procento využití než kotvy, u kterých otvor nebyl zbaven nečistot a prachu. Větší procento využití únosnosti mají kotvy, které byly ukotveny ve vyčištěném otvoru a v typické hloubce kotvení pro danou kotvu M12, která je 110 mm. Procentuální rozdíl v hloubce 110 mm mezi vyčištěnou a nevyčištěnou kotvou je 8,7%.

Tabulka 19 – Porovnání průměrných hodnot

Vyčištěný otvor			
Hloubka	Průměr [kN]	Průměr dle Hilti [kN]	Využití [%]
40 mm	16,51	44,10	37,4
70 mm	27,56	44,10	62,6
110 mm	37,23	44,10	84,4
Nevyčištěný otvor			
Hloubka	Průměr [kN]	Průměr dle Hilti [kN]	Využití [%]
40 mm	13,46	44,10	30,6
70 mm	19,14	44,10	43,3
110 mm	33,38	44,10	75,7

V tabulce č. 20 je vyjádřena charakteristická hodnota pomocí statistických výpočtů dle tohoto vzorce:

$$X_c = m_x (1 - k_n V_x)$$

$$V_x = \frac{s_x}{m_x}$$

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2}$$

Kde X_c je charakteristická hodnota

V_x je variační koeficient

s_x je směrodatná odchylka

m_x je průměrná hodnota

k_n je součinitel závislý na počtu zkoušek n , pravděpodobnosti p , které odpovídá hledaný kvantil

Tabulka 20 – Statistické hodnocení tahových zkoušek

Vyčištěný otvor					
Kotva	Výsledky [kN]	Průměr [kN]	Směr. Odchylka	Var. Koeficient	Char. Hodnota [kN]
1	14,55	16,51	1,70	0,10	13,39
2	17,55				
3	17,44				
Kotva	Výsledky [kN]	Průměr [kN]	Směr. Odchylka	Var. Koeficient	Char. Hodnota [kN]
1	26,50	27,56	0,92	0,03	26,00
2	28,07				
3	28,11				
Kotva	Výsledky [kN]	Průměr [kN]	Směr. Odchylka	Var. Koeficient	Char. Hodnota [kN]
1	38,48	37,23	1,81	0,05	33,71
2	35,15				
3	38,05				
Nevyčištěný otvor					
Kotva	Výsledky [kN]	Průměr [kN]	Směr. Odchylka	Var. Koeficient	Char. Hodnota [kN]
1	12,30	13,46	1,08	0,08	11,42
2	13,66				
3	14,43				
Kotva	Výsledky [kN]	Průměr [kN]	Směr. Odchylka	Var. Koeficient	Char. Hodnota [kN]
1	22,55	19,14	4,19	0,22	11,18
2	20,41				
3	14,46				
Kotva	Výsledky [kN]	Průměr [kN]	Směr. Odchylka	Var. Koeficient	Char. Hodnota [kN]
1	38,49	33,37	4,72	0,14	24,54
2	29,20				
3	32,43				

Větší číslo u směrodatné odchylky nám udává, že hodnoty naměřených sil se od sebe více liší. Naopak menší směrodatná odchylka nám ukazuje, že hodnoty naměřených sil jsou si podobné. U vyčištěných otvorů je směrodatná odchylka menší než u nevyčištěných otvorů. Větší hodnota směrodatné odchylky u nevyčištěných otvorů nám výrazně snižuje charakteristickou hodnotu, tím klesá spolehlivost kotev.

5 Závěr

V teoretické části bylo popsáno využití ultrazvukové metody ve stavebnictví, které má v tomto oboru velmi široké uplatnění, protože je jednoduchá a patří mezi nedestruktivní metody zkoušení. Může se využít pro kontrolu tloušťky materiálu, pro kontrolu délky kotevních šroubů kolejové dráhy. Pomocí ultrazvuku můžeme kontrolovat délku kotvení sloupků, na kterých jsou přichycena svodidla. Sloupky jsou pomocí kotevních šroubů přichyceny k ŽB konstrukci. Ultrazvukem můžeme zjistit příčné trhliny na kotevních šroubech, jak je popsáno v kapitole 2.14.

V první části jsme si vyrobili betonovou směs pomocí míchačky v laboratorních podmínkách. Hotovou betonovou směs jsme naplnili do připravených zkušebních forem o rozměrech 150x150x150 mm. Všechny nádoby jsme zhutnili na vibračním stolku a uložili. Celkem jsme namíchali čtyři záměsi, ze kterých jsme vyrobili 21 zkušebních těles. Betonovou směs jsme po 3 dnech odformovali a uložili zkušební tělesa do klimatizované místnosti po dobu 28 dní, abychom dosáhli požadované pevnosti v tlaku. Po uplynutí dané doby bylo provedeno měření rychlosti šíření ultrazvukových vln materiálem pomocí přístroje TICO. Tato metoda nám pomohla posoudit kvalitu zhutnění jednotlivých záměsí na základě výpočtu rychlosti šíření podélných UZ vln.

Z měření vyplynulo, že průměrná rychlost šíření ultrazvukového vlnění v první záměsi byla 4430 m/s, ve druhé záměsi byla 4320 m/s, ve třetí byla 4340 m/s, v poslední záměsi byla 4360 m/s. Rozdíl v rychlostech šíření ultrazvukového vlnění byl malý. Procentuální rozdíl mezi vyšší a nejnižší hodnotou je 2,48%. Kvalita zhutnění jednotlivých záměsí byla výborná až dobrá.

V druhé části jsme provedli tahové zkoušky dodatečně osazených kotev od firmy HILTI. Zkušební vzorky jsme rozdělili na dvě skupiny. V první skupině jsme osazení kotvy provedli dle technologického postupu, které firma Hilti doporučuje. V druhé skupině jsme technologický postup čištění otvoru nedodrželi. Do všech krychlí jsme vyvrtali otvory pomocí vrtačky. Každý otvor měl různou hloubku kotvení: 40 mm, 70 mm, 110 mm. Čištění otvoru bylo provedeno pomocí ruční pumpy a ocelového kartáče, dokud otvor nebyl zbaven veškerých nečistot a prachu. Poté jsme aplikovali lepicí hmotu HIT – HY 200 do 2/3 výšky otvoru. Kotvu HIT – V 5.8 jsme krouživými

pohyby osadili do otvoru a nechali schnout do druhého dne. Následující den jsme na kotvách provedli tahové zkoušky pomocí mechanického lisu FPZ 100/10.

Pokud nebudeme dodržovat technologické postupy v čištění otvoru, když budeme osazovat kotvy, snížíme tím hodnotu únosnosti. Hodnota u vyčištěného otvoru v hloubce 110 mm byla 37,20 kN, u nevyčištěného otvoru byla 33,40 kN. Rozdíl hodnot v této hloubce byl 3,85 kN. U hloubky 40 mm se hodnota lišila o 3,05 kN, u hloubky 70 mm byla hodnota u nevyčištěného otvoru menší o 8,42 kN. Z toho vyplývá, že čištění otvoru má vliv na lepší soudržnost mezi lepicí hmotou a betonem. Kotvy s vyčištěným otvorem mají větší procento využití únosnosti než kotvy, u kterých otvor nebyl zbaven nečistot a prachu. Větší procento využití únosnosti mají kotvy, které byly ukotveny ve vyčištěném otvoru a v typické hloubce kotvení pro danou kotvu M12, která je 110 mm. Hloubka kotvení nám také ovlivňuje hodnotu únosnosti. S rostoucí hloubkou roste i hodnota únosnosti. Jestliže kotvu u vyčištěného otvoru navrtáme pouze do hloubky 40 mm a nebude ve správné hloubce kotvení, sniží se hodnota únosnosti o 47%. U nesprávně provedeného technologického postupu se hodnota únosnosti sniží o 45,1 %. Procentuální rozdíl využití únosnosti v hloubce 110 mm mezi vyčištěnou a nevyčištěnou kotvou byl 8,7%. Rozdíl v únosnosti mezi těmito kotvami není moc velký. Pokud budeme dodržovat typickou hloubku kotvení pro dané kotvy, které můžeme efektivně zkontrolovat pomocí ultrazvuku a nevyčistíme otvor, můžeme považovat kotvu za spolehlivou. Ale doporučovala bych náhodně vybrané kotvy ověřit tahovou zkouškou. Podle statistických výpočtů dle tab. 20 byla hodnota směrodatné odchylky větší u nevyčištěných kotev. Větší hodnota směrodatné odchylky nám výrazně snižuje velikost charakteristické hodnoty. Díky tomu klesá spolehlivost kotevních systému jako celku.

V dnešní uspěchané době je technologická nekázeň na stavbách běžnou věcí. Každý chce mít všechno rychle hotové a přitom nedbají na dodržení technologických postupů. Z mého pohledu doporučuji dodržovat technologické postupy dané výrobcem na základě experimentální části v diplomové práci, jinak v budoucnu riskujeme velké problémy. Pokud se bude jednat o staticky významné prvky konstrukce a nebude u nich dodržen daný technologický postup, může se stát, že dělník, nebo kdokoliv, kdo se bude pohybovat na stavbě, může přijít k úrazu, v horším případě může zemřít. Ale můžeme provést i jiné řešení, rychlejší, ale o něco dražší. Příkladem může být firma Hilti. Firma

přišla s novým kotevním systémem HIT-HY 200. Vytlačovací hmota spolu s kotevním šroubem HIT-Z umožňuje kotvení bez nutnosti čištění otvoru po odvrtání. Tím se zvyšuje bezpečnost a spolehlivost kotvení. Více o této nové technologii je popsáno v kapitole 3.1.7.

Na základě provedených experimentů a zkušeností z praxe doporučujeme provádět kontrolu soudržných kotevních systémů a to nejen hloubku kotvení (pomocí ultrazvukových přístrojů), ale zároveň i ověřovat osovou tahovou sílu s využitím polních tahových zatěžovacích zkoušek, případně pomocí utahovacího momentu s ověřením působící osové síly ve šroubu. Jedině dostatečná kontrola provedení staticky významných prvků, jako jsou chemické kotvy, může vést ke správné kvalitě provedení a předejít tak v budoucnu závažným poruchám a bezpečnostním rizikům. Nehledě v neposlední řadě na ekonomické ztráty v případě závažných poruch ve výrobních halách a podobných zařízeních s nepřetržitým provozem.

6 Seznam použité literatury

- [1] SCHMID, P. *Zkušebnictví a technologie – Modul BI02-M02 – Stavební zkušebnictví*. Brno: FAST VUT v Brně
- [2] Anton, O. a kolektiv. *Zkušebnictví a technologie – Modul BI02 – M04 – Laboratorní cvičení*. Vydání elektronických opor, Brno, VUT FAST v Brně. Rok vydání neuveden. 63 stran. ISBN neudáno
- [3] ČSN 35 6885. *Zkoušení materiálu a výrobků ultrazvukem – Kontrolní měřka K1*. Praha, Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1970
- [4] Hilti = registered trademark of hilti corp., Schaan. *Anchorfastening technology manual*. Germany, September 2014
- [5] *Použití chemických kotev ve stavebnictví* [online]. [cit. 2009-12-15]. Dostupné z: <http://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/materialy-a-vyrobky/lepidla-natery-tmely/pouziti-chemickych-kotev-ve-stavebnictvi>
- [6] *Chemické kotvy* [online]. [cit. 2008-05-15]. Dostupné z: <http://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/materialy-a-vyrobky/lepidla-natery-tmely/chemicke-kotvy>
- [7] Jonáš, J., *Trendy v chemickém kotvení*, článek v Konstrukce media, ISSN 1803-8433, KONSTRUKCE MEDIA, s.r.o., Ostrava, 2013
- [8] *Možnosti využití ultrazvukové impulsní metody ve stavební praxi* [online]. [cit. 2010-01-12]. Dostupné z http://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/clanky/moznosti-vyuziti-ultrazvukove-impulsni-metody-ve-stavebni-praxi_102260.html
- [9] Hrubý, M., *Chemická kotva funguje v jakémkoliv stavebním materiálu*, článek v Konstrukce media, ISSN 1803-8433, KONSTRUKCE MEDIA, s.r.o., Ostrava, 2011
- [10] www.ndt.cz [online]. [cit. 2009-02-28]. Dostupné z: <http://www.ndt.cz/index.php?mnu=18,0>
- [11] ETAG 001 Řídící pokyn pro evropská technická schválení – Kovové kotvy do betonu, Část 5: Injektované kotvy
- [12] ETAG 001 Řídící pokyn pro evropská technická schválení – Kovové kotvy do betonu, Část 1: Kotvy obecně

7 Seznam obrázků

Obrázek 1 – Zvuky z hlediska frekvencí	11
Obrázek 2 – Tlumené a netlumené kmitání	12
Obrázek 3 – Impuls a vlnová délka	13
Obrázek 4 – Šíření ultrazvukových vln	14
Obrázek 5 – Kolmý dopad na rozhraní	15
Obrázek 6 – Šikmý dopad na rozhraní	16
Obrázek 7 – Vliv prostředí na rychlost šíření a tvar impulsu UZ vlnění	19
Obrázek 8 – Měření doby průchodu impulsu UZ vlnění zkoušeným materiálem	20
Obrázek 9 – Způsoby prozvučování.....	21
Obrázek 10 – Fokusační profil sondy	22
Obrázek 11 – Přímá sonda	24
Obrázek 12 – Úhlová sonda	24
Obrázek 13 – Dvojitá sonda	25
Obrázek 14 – Měřicí přístroj	26
Obrázek 15 - Základní zapojení ultrazvukového přístroje: 1 – obrazovka, 2 – časová základna, 3 – synchronizátor, 4 – generátor impulsů, 5 – zesilovač, 6 – sonda, 7- řízení citlivosti.....	27
Obrázek 16 – Kalibrační měrka K1.....	30
Obrázek 17 – Kalibrační měrka K2.....	30
Obrázek 18 – Měření tloušťky patních plechů.....	31
Obrázek 19 – Měření na hrázi VD Orlik	32
Obrázek 20 – Měření hloubky kotevních šroubů.....	33
Obrázek 21 – UZ měření.....	33
Obrázek 22 - Kotevní šrouby se zářezy, obrázek vpravo nahoře echogram na tyči bez zářezu, obrázek vpravo dole echogram se zářezem v 1/4 délky tyče	34
Obrázek 23 - Měření úhlovou sondou na modelu T – profilu.....	35
Obrázek 24 – Kontrola počtu kotevních trnů na kotevních deskách.....	35
Obrázek 25 – Ověření ukotvení táhlových přípojek	36
Obrázek 26 – Řez kotvení sloupku zábradlí chemickou maltou a svorníky	37
Obrázek 27 – Vývoj aplikace	38

Obrázek 28 – Mechanismus přenosu zatížení u lepené kotvy se závitovou tyčí ve vyčištěném kotevním otvoru	40
Obrázek 29 – Schematické křivky závislosti posunutí na zatížení u vyčištěných a nevyčištěných vyvrtaných kotevních otvorů ve vlhkém betonu	41
Obrázek 30 – Smršťování a vliv vyvrtaného otvoru	42
Obrázek 31 - Křivky závislosti posunutí na zatížení u vyčištěných a nevyčištěných kotevních otvorů ve vlhkém betonu (lepící hmota Hilti HIT-HY 200 s kotevním prvkem HIT-Z)	43
Obrázek 32 – Rozdíl mezi vyvrtáním kotevního otvoru diamantovým jádrovým vrtáním a vrtacím kladivem	44
Obrázek 33 – Mechanická kotva aktivovaná krouticím momentem	50
Obrázek 34 – Rozpěrná kotva aktivovaná deformací (objímka se rozepře vtažením kužele)	50
Obrázek 35 – Instalace mechanické kotvy	51
Obrázek 36 – Příklad zkušebního zařízení pro zkoušku tahem bez zamezení vzniku porušení	51
Obrázek 37 – Příklad zkušebního zařízení pro zkoušku tahem se zamezením vzniku porušení	52
Obrázek 38 – Jednotlivé složky na přípravu betonu	54
Obrázek 39 – Míchačka v laboratoři	54
Obrázek 40 – Zkouška sednutí	55
Obrázek 41 – Betonové krychle	56
Obrázek 42 – Hutnění pomocí vibračního stolku	56
Obrázek 43 – Místa měřená ultrazvukem	58
Obrázek 44 - Měření doby průchodu ultrazvukového měření pomocí přístroje TICO	58
Obrázek 45 – Grafické zobrazení průběhu zatěžování zkušebního tělesa	65
Obrázek 46 – Zkušební zařízení FormTest	66
Obrázek 47 – Měření modulu pružnosti	66
Obrázek 48 – Uchycení betonových krychlí	67
Obrázek 49 – Vrtačka	67
Obrázek 50 – Vyčištění otvoru pomocí ruční pumpy	68
Obrázek 51 – Vyčištění pomocí kartáče	69

Obrázek 52 – Počáteční vytlačení lepicí hmoty	69
Obrázek 53 – Aplikace lepicí hmoty	70
Obrázek 54 – Aplikace kotvy krouživými pohyby	71
Obrázek 55 – Chemická kotva	71
Obrázek 56 – Zkušební zařízení	72
Obrázek 57 – Kotva 1, vyčištěná, hloubky 40 mm	74
Obrázek 58 – Kotva 2, vyčištěná, hloubky 40 mm	74
Obrázek 59 – Kotva 3, vyčištěná, hloubky 40 mm	74
Obrázek 60 – Kotva 2, vyčištěná, hloubky 40 mm	74
Obrázek 61 – Kotva 1, vyčištěná, hloubky 70 mm	76
Obrázek 62 – Kotva 2, vyčištěná, hloubky 70 mm	76
Obrázek 63 – Kotva 3, vyčištěná, hloubky 70 mm	76
Obrázek 64 – Kotva 1, vyčištěná, hloubky 110 mm	78
Obrázek 65 – Kotva 2, vyčištěná, hloubky 110 mm	78
Obrázek 66 – Kotva 3, vyčištěná, hloubky 110 mm	78
Obrázek 67 – Kotva 2, nevyčištěná, hloubky 40 mm	80
Obrázek 68 – Kotva 1, nevyčištěná, hloubky 40 mm	80
Obrázek 69 – Kotva 3, nevyčištěná, hloubky 40 mm	80
Obrázek 70 – Kotva 1, nevyčištěná, hloubky 70 mm	82
Obrázek 71 – Kotva 2, nevyčištěná, hloubky 70 mm	82
Obrázek 72 – Kotva 3, nevyčištěná, hloubky 70 mm	82
Obrázek 73 – Kotva 1, nevyčištěná, hloubky 110 mm	84
Obrázek 74 – Kotva 2, nevyčištěná, hloubky 110 mm	84
Obrázek 75 – Kotva 3, nevyčištěná, hloubky 110 mm	84

8 Seznam tabulek

Tabulka 1 – Rychlost šíření UZ vlnění různými materiály	28
Tabulka 2 – Srovnávací tabulka	39
Tabulka 3 – Doba zpracování lepicí hmoty	45
Tabulka 4 – Hloubka kotvení	46
Tabulka 5 – Konečná odolnost	46
Tabulka 6 – Charakteristická pevnost	46
Tabulka 7 – Návrhová pevnost	47
Tabulka 8 – Doporučená zatížení	47
Tabulka 9 – Množství složek na jednu záměs	54
Tabulka 10 – Klasifikace podle sednutí kužele	55
Tabulka 11 – Výpočet rychlosti šíření vlnění záměs 1, vzorek 1	60
Tabulka 12 – Výpočet rychlosti šíření záměs 2, vzorek 2	60
Tabulka 13 – Výpočet rychlosti šíření záměs 3, vzorek 5	61
Tabulka 14 – Výpočet rychlosti šíření záměs 4, vzorek 4	62
Tabulka 15 – Průměrná rychlost šířená	63
Tabulka 16 – Vyhodnocení pevnosti v tlaku	64
Tabulka 17 – Vyhodnocení modulu pružnosti	66
Tabulka 18 – Celkový souhrn jednotlivých porušení	85
Tabulka 19 – Porovnání průměrných hodnot	89
Tabulka 20 – Statistické hodnocení tahových zkoušek	90

9 Seznam grafů

Graf 1 – Objemové hmotnosti krychlí.....	57
Graf 2 – Zhutnění jednotlivých záměsí	59
Graf 3 – Celková kvalita zhutnění.....	59
Graf 4 – Zobrazení rychlosti šíření pomocí izovel, vzorek 1	60
Graf 5 – Zobrazení rychlosti šíření pomocí izovel, vzorek 2.....	61
Graf 6 – Zobrazení rychlosti šíření pomocí izovel, vzorek 5	62
Graf 7 – Zobrazení rychlosti šíření pomocí izovel, vzorek 4.....	63
Graf 8 – Závislost síly na posunu hloubky 40 mm, vyčištěná	74
Graf 9 – Závislost síly na posunu hloubky 70 mm, vyčištěná	76
Graf 10 – Závislost síly na posunu hloubky 110 mm, vyčištěná	78
Graf 11 – Závislost síly na posunu hloubky 40 mm, nevyčištěná.....	80
Graf 12 – Závislost síly na posunu hloubky 70 mm, nevyčištěná.....	82
Graf 13 – Závislost síly na posunu hloubky 110 mm, nevyčištěná.....	84
Graf 14 – Srovnání nevyčištěných kotev, hloubky 40 mm	86
Graf 15 – Srovnání nevyčištěných kotev, hloubky 70 mm	86
Graf 16 – Srovnání nevyčištěných kotev, hloubky 110 mm	87
Graf 17 – Srovnání vyčištěných kotev, hloubky 40 mm.....	87
Graf 18 – Srovnání vyčištěných kotev, hloubky 70 mm.....	88
Graf 19 – Srovnání vyčištěných kotev, hloubky 110 mm.....	88