



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF BUILDING TESTING

TVRDOMĚRNÉ ZKOUŠENÍ BETONU
V KONSTRUKCI - NOVÉ PŘÍSTROJE A POSTUPY
HARDNESS TESTING OF CONCRETE IN CONSTRUCTION - NEW DEVICES AND
PROCEDURES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Jan Mikulec

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PETR CIKRLE, Ph.D.

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav stavebního zkušebnictví

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Jan Mikulec
Název	Tvrdoměrné zkoušení betonu v konstrukci - nové přístroje a postupy
Vedoucí bakalářské práce	Ing. Petr Cikrle, Ph.D.
Datum zadání bakalářské práce	30. 11. 2011
Datum odevzdání bakalářské práce	25. 5. 2012
V Brně dne 30. 11. 2011	

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

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

Podklady a literatura

Adámek, J., Hobst, L., Cikrle, P., Schmid, P. Diagnostika stavebních konstrukcí. Studijní opora, VUT v Brně FAST, 2005.

Schmidt, P. s kol. Základy zkušebnictví. Brno, CERM, 2001.

ANTON, O., kolektiv autorů, Základy zkušebnictví, Brno, CERM, 2002.

Proceq, Manuál k přístroji Silver Schmidt PC-N, PC-L

Normy ČSN EN 206-1, ČSN EN 13791, ČSN EN 12504-1,2 ČSN ISO 13822, ČSN 73 2011, ČSN 73 1370, ČSN 73 1373.

Zásady pro vypracování

Teoretická část:

Rešerše pramenů - princip metody, druhy přístrojů.

Zpracování přehledu metodik zkoušení podle různých předpisů.

Novinky v oblasti tvrdoměrného zkoušení - Silver Schmidt PC-N, L, kalibrační vztahy.

Vztah mezi tvrdostí a pevností v tlaku, postupy pro získání pevnosti v tlaku betonu v konstrukci.

Praktická část:

Provedení tvrdoměrných měření na vzorcích - modelech.

Porovnání výsledků dosažených pomocí tvrdoměru Schmidt N a Silver Schmidt PC-N s pevností v tlaku jádrových vývrtů.

Statistické vyhodnocení výsledků zkoušek.

Předepsané přílohy

Licenční smlouva o zveřejňování vysokoškolských kvalifikačních prací

.....
Ing. Petr Cikrle, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

V této bakalářské práci je provedena rešerše nedestruktivních tvrdoměrných metod. Jsou zde předvedeny různé přístroje pro měření tvrdosti a jejich materiálové určení. Dále jsou popsány a porovnány dva možné přístupy zpracování naměřených hodnot a jejich vyhodnocení. Detailně se zabývá novinkami mezi tvrdoměry a prací s nimi. Tyto znalosti jsou uplatněny k měření tvrdostí na betonových dílcích pomocí přístroje OriginalSchmidt typ N a SilverSchmidt PC typ N a zpracování naměřených hodnot podle dvou přístupů a jejich srovnání s výsledky na jádrových vývrtech.

KLÍČOVÁ SLOVA

Nedestruktivní zkoušení, tvrdoměrné zkoušení betonu, SilverSchmidt.

ABSTRACT

In this bachelor thesis is carried out a research of non-destructive hardness methods. There are presented different instruments for measuring hardness and their destination for materials. There are also described and compared two possible approaches to processing of measured values and their evaluation. It deals with news in detail of hardness testers and work with them. These knowledge are applied to measure the hardness of concrete components using an instrument OriginalSchmidt type N and SilverSchmidt PC type N and data processing according to the two approaches and their comparison with the results of the cores.

KEYWORDS

Non-destructive testing, hardness testing of concrete, SilverSchmidt.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

MIKULEC, Jan. *Tvrdoměrné zkoušení betonu v konstrukci - nové přístroje a postupy*. Brno, 2011. 60 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Petr Cikrle, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně, a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 23.5.2012

.....
podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Cíkrlovi, Ph.D. za pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Petru Misákovi za rady ohledně statistických vyhodnocení při tvorbě kalibračních vztahů.

V Brně dne 23.5.2012

.....
podpis autora

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	X
SEZNAM TABULEK	XI
1 ÚVOD	12
1.1 ÚVODNÍ SLOVO	12
1.2 CÍLE PRÁCE	12
2 TEORIE TVRDOMĚRNÉHO ZKOUŠENÍ	13
2.1 OBECNÝ PRINCIP	13
2.1.1 Tvrdost.....	13
2.1.2 Pevnost	13
2.1.3 Vztah tvrdosti a pevnosti.....	13
2.1.4 Nepřímé metody zjišťování pevnosti betonu v konstrukci	13
2.1.5 Nedestruktivní zkoušení betonu.....	13
2.1.6 Kalibrační vztahy	14
2.1.7 Karbonatace	14
2.2 RŮZNÉ TVRDOMĚRNÉ METODY	15
2.2.1 Vrypová metoda	15
2.2.2 Vtiskové metody	15
2.2.3 Vnikací metody.....	16
2.2.4 Odrazové metody	16
2.3 DRUHY PŘÍSTROJŮ PRO MĚŘENÍ TVRDOMOSTI BETONU	17
2.3.1 Odrazový tvrdoměr <i>OriginalSchmidt</i>	17
2.3.2 Odrazový tvrdoměr <i>DigiSchmidt</i>	17
2.3.3 Odrazový tvrdoměr <i>SilverSchmidt ST/PC</i>	18
2.3.4 Špičákový tvrdoměr.....	18
3 PŘEHLED RŮZNÝCH PŘEDPISŮ	19
3.1 METODIKA ZKOUŠENÍ DLE ČSN EN.....	19
3.1.1 Podstata zkoušky.....	19
3.1.2 Zkušební zařízení	20
3.1.3 Zkušební plocha	20
3.1.4 Zkušební postup	20
3.1.5 Výsledek.....	21
3.1.6 Vyhodnocení charakteristické pevnosti betonu v tlaku.....	21
3.1.7 Alternativa 1	21
3.1.8 Alternativa 2	22

3.2	METODIKA ZKOUŠENÍ DLE ČSN.....	23
3.2.1	Podstata zkoušky.....	23
3.2.2	Zkušební zařízení	23
3.2.3	Zkušební místa	24
3.2.4	Zkušební postup	24
3.2.5	Výsledek.....	24
3.2.6	Způsoby stanovení pevnosti betonu v tlaku.....	25
3.2.7	Pevnost betonu v tlaku s nezaručenou přesností	25
3.2.8	Pevnost betonu v tlaku upřesněná.....	26
3.2.9	Pevnost betonu v tlaku se zaručenou přesností (charakteristická)	27
3.2.10	Vyhodnocení zkoušek.....	29
3.3	POROVNÁNÍ.....	30
4	NOVINKY V OBLASTI TVRDOMĚRNÉHO MĚŘENÍ.....	32
4.1	POPIS PŘÍSTROJE	32
4.2	MODEL Y SILVERSCHMIDT.....	32
4.2.1	Hřibový píst	33
4.3	OVLÁDÁNÍ SILVERSCHMIDTU.....	33
4.3.1	Navigace v menu.....	33
4.3.2	Volitelné nastavení.....	33
4.4	ODHAD PEVNOSTI V TLAKU SILVERSCHMIDTEM.....	34
4.4.1	Získání odrazových hodnot.....	34
4.4.2	Použití kalibračních křivek.....	35
4.4.3	Zdroje nejistoty	38
5	ZKOUŠENÍ BETONOVÝCH DÍLCŮ	40
5.1	POSTUP MĚŘENÍ	40
5.1.1	Úprava zkoušených bloků.....	40
5.1.2	Měření	41
5.2	ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT.....	43
5.2.1	Platná měření.....	43
5.2.2	Stanovení pevnosti betonu v tlaku pomocí ČSN EN	44
5.2.3	Stanovení pevnosti betonu v tlaku pomocí ČSN	46
5.2.4	Charakteristická pevnost získaná na jádrových vývrtech	48
5.2.5	Tvorba kalibračních křivek.....	50
5.3	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	52
6	ZÁVĚR	56
	LITERATURA.....	58
	SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK	59

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2.1</i>	<i>Indikace karbonátace</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 2.2</i>	<i>OriginalSchmidt</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 2.3</i>	<i>DigiSchmidt</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 3.1</i>	<i>Srovnání kalibračních křivek</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 4.1</i>	<i>SilverSchmidt</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 4.2</i>	<i>SilverSchmidt typ L s hřibovým pístem</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 4.3</i>	<i>Symboly na display v hlavním menu</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 4.4</i>	<i>Referenční kalibrační křivka SilverSchmidt typ N</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 4.5</i>	<i>Referenční kalibrační křivka SilverSchmidt typ L</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 4.6</i>	<i>10-ti % referenční kalibrační křivka SilverSchmidt typ N</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 4.7</i>	<i>Referenční kalibrační křivka SilverSchmidt typ L s hřibovým pístem</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 5.1</i>	<i>Měření přístroji OriginalSchmidt (vlevo) SilverSchmidt (vpravo)</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 5.2</i>	<i>Zkoušení jádrového vývrtu v lisu</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 5.3</i>	<i>Kalibrační křivky pro SilverSchmidt typ N</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 5.4</i>	<i>Kalibrační křivky pro OriginalSchmidt typ N</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 5.5</i>	<i>Srovnání kalibračních křivek přístroje SilverSchmidt</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 5.6</i>	<i>Srovnání kalibračních křivek přístroje OriginalSchmidt</i>	<i>55</i>

SEZNAM TABULEK

Tab. 3.1	Součinitel k_1	23
Tab. 3.2	Součinitel odhadu 5 % kvantilu β_n	29
Tab. 3.3	Součinitel α_t	29
Tab. 3.4	Součinitel α_w	29
Tab. 3.5	Porovnání přístupů ČSN EN a ČSN	30
Tab. 5.1	Receptury betonových směsí	40
Tab. 5.2	Záznam měření SilverSchmidt PC typ N.	42
Tab. 5.3	Záznam měření OriginalSchmidt typ N.	43
Tab. 5.4	Zpracované hodnoty pomocí ČSN EN pro přístroj SilverSchmidt PC typ N. ..	45
Tab. 5.5	Zpracované hodnoty pomocí ČSN EN pro přístroj OriginalSchmidt typ N.	46
Tab. 5.6	Zpracované hodnoty pomocí ČSN, přístroj SilverSchmidt PC typ N.	47
Tab. 5.7	Zpracované hodnoty pomocí ČSN, přístroj OriginalSchmidt typ N.	48
Tab. 5.8	Výpočet pevností na jádrových vývrtech.	49
Tab. 5.9	Stanovení charakteristických pevností betonu v tlaku pomocí jádrových vývrtů.	50
Tab. 5.10	Porovnání pevností zjištěných různými metodami.	53

1 ÚVOD

1.1 Úvodní slovo

Tvrdot je jednou ze základních a snadno zjistitelných vlastností materiálů, avšak pro stavební materiály je vlastností málo významnou. Přesto jsou tvrdoměrné zkoušky jedny z nejrozšířenějších nedestruktivních a semidestruktivních zkoušek stavebních materiálů v konstrukcích díky možnosti zjistit požadované vlastnosti korelačními vztahy. U betonů se s určitou přesností dají použít pro zjištění pevnosti v tlaku nebo modulu pružnosti, rovnoměrnosti kvality a stejnorodosti v konstrukci a vyhledávání místních porušení. K měření tvrdosti je používána řada přístrojů a postupů, každý z nich udává jinou hodnotu, ale neexistuje žádný přesný vztah mezi jednotlivými stupnicemi a hodnotami. Dalším problémem je skutečnost, že se měří tvrdost pouze povrchové vrstvy, která může mít zcela rozdílné vlastnosti než zbytek konstrukce.

Jelikož je tvrdoměrné zkoušení betonu velice rozšířené a v poslední době se objevili nové přístroje a postupy v provádění a vyhodnocování zkoušek, je nutné se jimi zabývat, abychom se vyvarovali případných chyb.

1.2 Cíle práce

Cílem této bakalářské práce je seznámit se s novinkami v tvrdoměrném zkoušení betonu v konstrukcích, především přístrojích pro zjišťování tvrdosti a různými postupy pro její zpracování. Bude uveden i obecný princip metody a různé druhy přístrojů.

Praktická část se zaměří na provedení měření na betonových dílcích, porovnání výsledků různých přístrojů a postupů s pevností zjištěnou na jádrových vývrtech a vytvoření vlastních kalibračních křivek.

2 TEORIE TVRDOMĚRNÉHO ZKOUŠENÍ

2.1 Obecný princip

2.1.1 Tvrdost

Tvrdost je určena odporem zkoušeného materiálu proti plastické deformaci materiálu. Avšak nemá žádnou pevně danou fyzikální veličinu, díky tomu existuje množství veličin tvrdosti, mezi kterými neexistuje přesný převodní vztah. Její pomocí se v diagnostice stavebních konstrukcí dají s určitou přesností odhadnout vlastnosti materiálů, např. u betonu pevnost [7].

2.1.2 Pevnost

Pevnost je jednou z nejdůležitějších vlastností stavebních materiálů. Vyjadřuje se jako poměr síly při porušení vzorku ku zatěžované ploše. Charakteristická pevnost f_{ck} vyjadřuje hodnotu, pro kterou bude pouze 5 % hodnot všech možných výsledků zkoušek nižší, tzv. 5 % kvantit. Charakteristická pevnost krychelná zjištěná na zkušebních krychlích se značí $f_{ck,cube}$ a pevnost stanovená na zkušebních válcích $f_{ck,cyl}$ [6].

2.1.3 Vztah tvrdosti a pevnosti

Mezi tvrdostí a pevností neexistuje žádný obecný vztah, ale lze najít kalibrační vztahy, které vyjadřují závislost mezi tvrdostí a pevností [7].

2.1.4 Nepřímé metody zjišťování pevnosti betonu v konstrukci

Jsou metody, které zjišťují jinou vlastnost než pevnost na vývrtech. Mohou být nedestruktivní nebo semidestruktivní. Pevnost je vyhodnocena podle daného vztahu [5].

2.1.5 Nedestruktivní zkoušení betonu

Je zkoušení, které beton vůbec neporušují nebo ho poruší tak málo, aniž by se změnila statická funkce [1].

2.1.6 Kalibrační vztahy

Kalibrační vztah je závislost mezi charakteristickou veličinou určité nedestruktivní metody, tzv. ukazatel nedestruktivní metody a hodnotou vlastnosti normalizované jiné než nedestruktivní zkoušky, tzv. ukazatel vlastnosti.

- **Obecný kalibrační vztah** – je odvozený z velkého prakticky dosažitelného počtu ukazatelů nedestruktivního měření a ukazatelů sledované vlastnosti zjištěných na zkušebních vzorcích různého složení betonu.
- **Směrný kalibrační vztah** – je odvozený z většího počtu ukazatelů nedestruktivního měření a ukazatelů sledované vlastnosti zjištěných na zkušebních vzorcích z betonů obvyklých pro sledovanou vlastnost.
- **Určující kalibrační vztah** – je vztah mezi ukazateli nedestruktivního měření a ukazateli sledované vlastnosti zjištěných na zkušebních vzorcích zhotovených z betonů ze stejných složek, stejnou technologií, ale pro různé hodnoty sledované vlastnosti betonu. Pro určující kalibrační vztah se předpokládá přibližně pravidelné rozložení hodnot sledované vlastnosti ve stejných intervalech se stejným počtem výskytu v prověřovaném oboru měřené vlastnosti.
- **Úzký určující kalibrační vztah** – je určující kalibrační vztah vytvořený pro rozsah jedné třídy betonu.
- **Široký určující kalibrační vztah** – je určující kalibrační vztah vytvořený pro rozsah dvou nebo více tříd betonu [1].

2.1.7 Karbonatace

Beton karbonatuje v důsledku reakce se vzdušným CO_2 dle rovnice



kde je $Ca(OH)_2$ hydroxid vápenatý obsažený v cementovém tmelu, CO_2 vzdušný oxid uhličitý, $CaCO_3$ uhličitán vápenatý, H_2O voda.

Tato reakce postupuje od povrchu směrem do jádra konstrukce a tvoří na povrchu tvrdší vrstvu, která současně ztrácí své pH a klesá protikorozní ochrana výztuže. Hloubka karbonatace se stanoví buď na jádrovém vývrtnu nebo přímo na povrchu pomocí indikátoru

roztoku fenolftaleinu v ethanolu. Po nastříkání na povrch se vrstva s $pH > 9,2$ zbarví růžově a značí nekarbonatovanou část, pokud je $pH < 9,2$ vrstva zůstane bezbarvá a indikuje karbonatovanou vrstvu viz Obr. 2.1 [9].



Obr. 2.1 Indikace karbonatace, Šedou barvou je znázorněna karbonatovaná vrstva nezbarveným fenolftaleinem, růžovou barvou nekarbonatovaná vrstva kolem výztuže zbarvená růžově reagujícím fenolftaleinem [9].

2.2 Různé tvrdoměrné metody

Pro zjišťování tvrdosti různých materiálů se používají tyto metody.

2.2.1 Vrypová metoda

Tato metoda porovnává tvrdost materiálů vrypem jednoho do druhého. Této metodě náleží Mohsova stupnice tvrdosti: 1.mastek, 2.sůl kamenná, 3.vápenec, 4.kazivec, 5.apatit, 6.živce, 7.křemen, 8.topas, 9.korund, 10.diamant [7].

2.2.2 Vtiskové metody

Nejčastěji spočívají v zjištění velikosti vtisku předepsaného vnikajícího tělíska do zkoušeného materiálu. Mezi nejběžnější metody patří:

- **Tvrdot podle Brinella** – HB , pro kovové předměty větších tloušťek. Kalená ocelová kulička o průměru D se vtlačuje do zkoušeného materiálu silou F .
- **Tvrdot podle Vickerse** – HV , měření tvrdosti kovů. Diamantový jehlan se zatlačuje silou F do zkoušeného materiálu.
- **Tvrdot podle Rockwella** – HR , měření tvrdosti kovů. Ocelová kulička nebo

diamantový kužel se zatlačuje předběžným zatížením F_0 a přidavným zatížením F_1 do zkoušeného materiálu.

- **Tvrдост kladívkem Poldi** – měření tvrdosti kovů. Porovnává průměr vtisku ocelové kalené kuličky do zkoušeného materiálu a do porovnávací tyčinky známé tvrdosti po úderu kladiva.
- **Tvrдост podle Janky – HJ**, měření tvrdosti dřeva. Ocelová kulička o průměru D je silou F zatlačována do zkoušeného materiálu.
- **Tvrдост dle Weitzmanna** – kuličkový tvrdoměr [7].
- **Tvrдост dle Baumanna** – měření tvrdosti betonu a zděných konstrukcí. Měří se průměry dvou kuliček, menší zaražené do srovnávací tyčky a větší do zkoušeného materiálu [8].

2.2.3 Vnikací metody

Jsou založeny na vniknutí tvrdého špičáku opakovanými rázy do měkčího materiálu např. betonu, malty nebo dřeva. Měří se buď hloubka vniknutí špičáku po předepsaném počtu úderů, nebo počet úderů potřebných pro vniknutí do předepsané hloubky [7].

- špičáková metoda Ing. J. Maška
- špičáková metoda Prof. Cigánka
- špičáková metoda Baumannovým kladívkem
- elektromagnetický špičák [7]

2.2.4 Odrazové metody

Spočívají v puštění standardního tělesa z určité výšky nebo jeho vržení určitou energií a měření pružného odrazu od tělesa ze zkoušeného materiálu.

- **měření dle Shora** – tvrdost kovů
- **měření Schmidtovými tvrdoměry** – tvrdost betonů, malt a cihel [7]

2.3 Druhy přístrojů pro měření tvrdosti betonu

2.3.1 Odrazový tvrdoměr OriginalSchmidt

Základní přístroj pro měření tvrdosti je celý mechanický. Skládající se z razníku, beranu, vlečného ukazatele s měřítkem a pružiny, která ovlivňuje označení a použití dle energie dopadu na typy N, L, M viz Obr. 2.2 a NR, LR které mají registrační jednotku zaznamenávající výsledky na papírový proužek [13].

- **typ N** – 2,207 Nm
- **typ L** – 0,735 Nm
- **typ M** – 29,43 Nm [13]



Obr. 2.2 *OriginalSchmidt, odrazový tvrdoměr s mechanickou stupnicí hodnoty odrazu [13].*

2.3.2 Odrazový tvrdoměr DigiSchmidt

Tento odrazový tvrdoměr kombinuje klasický OriginalSchmidt s displejovou jednotkou viz Obr. 2.3. Ta umožňuje čtení a zobrazování výsledků testu, uložení do počítače nebo tisk. Typy jsou dle energie dopadu ND, LD [13].



Obr. 2.3 DigiSchmidt, odrazový tvrdoměr se záznamovou digitální jednotkou [13].

2.3.3 Odrazový tvrdoměr SilverSchmidt ST/PC

Nejnovější a nejpropracovanější odrazový tvrdoměr, který detekuje koeficient odrazu na základě rychlosti před a po odrazu v blízkosti dopadu, což umožňuje měření v různých směrech bez nutnosti korekce. Má integrovaný displej a operační jednotku, která dokáže zaznamenat výsledky testu a případně je vyhodnotit nebo v modifikaci PC nahrát přes USB do počítače. Typy jsou dle energie nárazu ST/PC N a ST/PC L [13].

2.3.4 Špičákový tvrdoměr

Jednoduchý přístroj pro měření tvrdosti. Přístroj je pružinový nebo elektromagnetický s definovanou energií úderu, ta je obvykle 5 J. Zjišťujeme počet rázů pro zaražení kuželové špičky do předepsaných hloubek údery kladiva [2;7].

3 PŘEHLED RŮZNÝCH PŘEDPISŮ

V současné době platí v České republice 2 normativní přístupy pro tvrdoměrné zkoušení betonu:

ČSN EN

- **ČSN EN 12504-2** Zkoušení betonu v konstrukcích – Část 2: Nedeštruktivní zkoušení – Stanovení tvrdosti odrazovým tvrdoměrem
- **ČSN EN 13791** Posuzování pevnosti betonu v tlaku v konstrukcích a prefabrikovaných betonových dílcích

ČSN

- **ČSN 73 1373** Nedeštruktivní zkoušení betonu – Tvrdoměrné metody zkoušení betonu
- **ČSN 73 1370** Nedeštruktivní zkoušení betonu – společná ustanovení
- **ČSN 73 2011** Nedeštruktivne skúšanie betónových konštrukcií

3.1 Metodika zkoušení dle ČSN EN

Dle evropských norem je možné použít nepřímou metodu pro odhad pevnosti betonu v tlaku v konstrukci pokud je nalezen vztah mezi pevností a měřenou veličinou. Tvrdoměrné zkoušení slouží k posouzení stejnoměrného uložení betonu, lokalizaci narušených míst nebo míst s nižší kvalitou. Při použití vhodných korelačních vztahů lze odhadnout pevnost betonu v tlaku [4].

3.1.1 Podstata zkoušky

Plynulé stlačování pístu s ocelovým razníkem dotýkajícím se povrchu betonu napne pružinu a ta vymrští beran proti razníku. V závislosti na tvrdosti povrchu se beran odrazí. Velikost odrazu je výsledek zkoušky [4].

3.1.2 Zkušební zařízení

- **Odrasový tvrdoměr** – skládá se z ocelového beranu, razníku, pružiny, která vymrští beran danou energií a těla se stupnicí odrazu.
- **Kalibrační kovadlina** – její pomocí ověřujeme správné seřízení tvrdoměru. Minimální tvrdost 52 HRC a hmotnost (16 ± 1) kg.
- **Brusný kámen** – jako materiál je použit středně zrnitý karborundový kámen nebo jeho obdoba. (Pro staré konstrukce je většinou pro úpravu povrchu potřeba bruska na beton pro odstranění karbonatované vrstvy) [4].

3.1.3 Zkušební plocha

Zkoušení se provádí na prvcích nebo částech konstrukce o minimální tloušťce 100 mm, které musí být pevně spojeny s konstrukcí nebo podepřeny. Povrch zkušebního místa by neměl být vysoce porézní, mít hrubou texturu, odlupovat se nebo obsahovat šterková hnízda. Rozměry zkušební plochy by měli být přibližně 300 mm x 300 mm.

Pokud není povrch hladký nebo obsahuje uvolněnou maltu obrousí se brusným kamenem. Zároveň se z něj musí odstranit jakákoliv voda [4].

3.1.4 Zkušební postup

- **Předběžná příprava** – před prvním čtením se tvrdoměr pro kontrolu aktivuje nejméně třikrát. Poté se ověří zkušebním odrazem na kalibrační kovadlině, zaznamená se čtení a porovná se s údajem od výrobce. Pokud nepracuje v daném rozsahu, musí se tvrdoměr vyčistit nebo seřídit.
- **Zkoušení** – razník se přiloží kolmo na zkoušený povrch betonu. Plynule se stlačuje razník dokud pružina nevymrští beran. Velikost odrazu se zaznamená. Na každé zkušební ploše musí být nejméně 9 platných měření. Zapiše se směr a poloha tvrdoměru pro každou sadu čtení. Minimální vzdálenost zkušebních bodů je 25 mm od sebe a 25 mm od hrany konstrukce nebo prvku. Po každém rázu se kontroluje vtisk na povrchu, pokud je poškozen nebo rozdrčen, toto čtení se vyřadí.
- **Referenční kontrola** – po provedení zkoušky se tvrdoměr ověří na kalibrační kovadlině, čtení se zaznamená a porovná se s měřením před zkouškou. Pokud se hodnoty liší tvrdoměr by měl být vyčištěn, seřízen a zkouška se musí opakovat [4].

3.1.5 Výsledek

Naměřené hodnoty se upraví dle pokynů výrobce v závislosti na směru působení a vyjádří se z nich aritmetický průměr, pokud se od něj více než 20 % čtení liší o více než 6 jednotek, musí být zamítnuta celá sada měření [4].

3.1.6 Vyhodnocení charakteristické pevnosti betonu v tlaku

Může se použít po kalibraci se zkouškami na jádrových vývrtech buď samostatně, v kombinaci s nepřímými metodami nebo v kombinaci s nepřímými metodami a s přímou metodou. Pro vyhodnocení charakteristické pevnosti betonu v tlaku v konstrukci nepřímými metodami se použijí následující postupy [4].

3.1.7 Alternativa 1

Přímá korelace s vývrty. Tento postup stanoví konkrétní vztah mezi výsledkem nepřímé metody a pevností betonu v tlaku v konstrukci. Vyžaduje minimálně 18 dvojic výsledků zkoušek z jádrových vývrťů s výsledky nepřímou metodou ze stejného místa. Křivka nebo přímka se stanoví regresní analýzou z dvojic výsledků. Zjištěná pevnost je funkcí výsledků nepřímé metody. Zjistí se standardní chyba odhadu a meze pro nejvhodnější křivku a pro jednotlivá měření. Vztah pro odhad pevnosti se určuje jako 90-ti % kvantil, to znamená, že 90 % všech výsledků zkoušek leží nad touto křivkou. Tento vztah je platný pouze pro beton a podmínky, za kterých byl stanoven. Podmínky pro použití: každá oblast musí být posouzena na minimálně 15 zkušebních místech, směrodatná odchylka je větší hodnota z výpočtu z výsledků nebo $3,0 \text{ N/mm}^2$. Charakteristická pevnost betonu v tlaku v konstrukci je nižší hodnota z rovnic

$$f_{ck,is} = f_{m(n),is} - 1,48 \cdot s, \quad (3.1)$$

$$f_{ck,is} = f_{is,min} + 4, \quad (3.2)$$

kde $f_{ck,is}$ je charakteristická pevnost betonu v tlaku v konstrukci, $f_{m(n),is}$ je aritmetický průměr z n výsledků zkoušek pevnosti betonu v tlaku v konstrukci, $f_{is,min}$ je nejnižší výsledek zkoušky betonu v tlaku v konstrukci a s je směrodatná odchylka výsledků zkoušek [5].

3.1.8 Alternativa 2

Vztah stanovený z omezeného počtu vývrtů a ze základní křivky. Tento postup využívá vztahu vytvořeného ze základní křivky a jejího posunu zjištěného z výsledků zjištěných jádrovými vývrty. Minimální počet dvojic výsledků zkoušek jádrových vývrtů a nepřímou metodou je 9. V každém zkušebním místě se provede měření nepřímou metodou dle příslušné normy ČSN EN 12504-2 a ze základní křivky se odečte hodnota pevnosti, odebere a vyzkouší se vývrt podle ČSN EN 12504-1 a stanoví se hodnota pevnosti v tlaku. Dle rovnice (3.3) se stanoví rozdíl mezi výsledkem jádrového vývrtu a výsledku nepřímé metody z jednoho zkušebního místa.

$$\delta f = f_{is} - f_R, \quad (3.3)$$

kde δf je rozdíl jednoho výsledku pevnosti na jádrovém vývrtnu f_{is} a pevnosti zjištěné nepřímou metodou ze základní křivky f_R .

Z n rozdílů se vypočte aritmetický průměr $\delta f_{m(n)}$ a směrodatná odchylka s . Posun základní křivky se vypočítá dle rovnice

$$\Delta f = \delta f_{m(n)} - k_1 \cdot s, \quad (3.4)$$

kde Δf je posun základní křivky, $\delta f_{m(n)}$ je aritmetický průměr rozdílů posunů, s je směrodatná odchylka a k_1 je součinitel závislý na počtu zkušebních dvojic dle Tab. 3.1.

Základní křivka se posune o vypočítanou hodnotu Δf a tím se získá vztah mezi výsledkem nepřímé metody a pevností betonu v tlaku v konstrukci f_{is} . Tyto vztahy platí v rozsahu ± 2 hodnoty tvrdosti mimo rozsah, který byl použit pro zjištění posunu základní křivky a pouze pro beton a podmínky, za kterých byl tento vztah zjišťován. Pro zjištění charakteristické pevnosti betonu v tlaku v konstrukci se použije stejný postup jako u Alternativy 1, rovnice (3.1) a (3.2). Při zkouškách na vývrtech stejné šířky a výšky a při použití základních křivek dle normy ČSN EN 13791 je výsledná ekvivalentní charakteristická pevnost betonu v tlaku v konstrukci brána jako krychelná $f_{ck,is,cube}$. Podle ní se beton zařadí do pevnostních tříd dle tabulky 1 v ČSN EN 206-1 [5].

Tab. 3.1 Součinitel k_1 [5].

Počet výsledků zkušebních dvojic n	Součinitel k_1
9	1,67
10	1,62
11	1,58
12	1,55
13	1,52
14	1,50
≥ 15	1,48

3.2 Metodika zkoušení dle ČSN

V roce 2011 byli uvedeny v platnost aktualizované ČSN, které mohou být používány současně s ČSN EN. Tvrdoměrné zkoušení může být po nalezení těsného korelačního vztahu mezi ukazatelem nedestruktivní zkoušky a měřenou veličinou použito pro zjištění pevnosti betonu v tlaku. Norma ČSN 73 1373 uvádí dva postupy tvrdoměrného zkoušení betonu: Schmidtův odrazový tvrdoměr a špičákový tvrdoměr, ale nevylučuje jiné metody schválené odborným ústavem zabývajícím se prováděním nedestruktivních zkoušek [2].

3.2.1 Podstata zkoušky

Podstata zkoušky pomocí Schmidtova tvrdoměru je totožná s kapitolou 3.1.1. Metoda špičákového tvrdoměru stanovuje pevnost betonu v závislosti na počtu rázů potřebných k zaražení definovaného kuželového hrotu do stanovených hloubek [2].

3.2.2 Zkušební zařízení

- **Odrazový tvrdoměr** – viz 3.1.2
- **Kalibrační kovadlina** – viz 3.1.2
- **Špičákový tvrdoměr** – pružinový nebo elektromagnetický tvrdoměr s kuželovou špicí daných rozměrů dle obrázku B.1 v ČSN 73 1373
- **Brusný kámen** – viz 3.1.2 [2;4]

3.2.3 Zkušební místa

Počet zkušebních míst se odvíjí podle účelu zkoušky, velikosti konstrukce, opakování konstrukčních částí, použité metody, statistické potřeby a množství betonu použitelného k jedné zkoušce. Konstrukce nebo její část se rozdělí na jednotlivé části, kde potřebujeme zjistit vlastnosti betonu a ty se budou zkoušet samostatně. Přesný počet zkoušek a tím i míst se následně stanoví na základě velikosti konstrukce a předpokládaného počtu záměsí použitých při výrobě podle tabulky 1 nebo tabulky 2 u plošných konstrukcí v normě ČSN 73 2011. Hodnoty mezilehlé se stanoví lineární interpolací. Velikost každého zkušebního místa závisí na použitém tvrdoměru, pro Schmidt typ N a L a pro špičákový tvrdoměr je to 0,02 m², pro typ M 0,04 m² a nemělo by se nacházet nad výztuží, případně s dostatečným krytím, aby neovlivnila měření. Nejmenší tloušťka zkoušené betonové vrstvy u Schmidtova tvrdoměru typu L je 60 mm, u typu N a špičákového tvrdoměru je 100 mm a u typu M 200 mm. Povrch zkušebního místa by měl být stejnoměrný, bez šterkových míst a vlhký, přirozené vlhký nebo suchý. Povrch se za sucha zbrousí, aby se zbavil zkarbonatované vrstvy a nerovností dokud nebude zřetelná struktura betonu [2;3].

3.2.4 Zkušební postup

- **Předběžná příprava** – při předběžné přípravě se postupuje podle 3.1.4 [4].
- **Zkoušení** – na zkušebním místě se razník přiloží k povrchu v místě cementové malty. Plynulým pohybem stlačujeme razník dokud beran nevyvodí ráz. Hodnotu odrazu odečteme ze stupnice a zaznamenáme. Vzdálenost zkušebního místa od okraje nebo jiného zkušebního místa závisí na použitém tvrdoměru, pro Schmidtův tvrdoměr typ N a L je to 30 mm, pro typ M a špičákový tvrdoměr je to 60 mm. Vzdálenosti mezi jednotlivými místy rázu/vpichu je pro Schmidt typ N 25 mm, pro typ L 20 mm, pro typ M a špičákový tvrdoměr 60 mm [2].
- **Referenční kontrola** – viz 3.1.4 [4].

3.2.5 Výsledek

Ke každé hodnotě měření se odečte hodnota pevnosti z obecného nebo směrného kalibračního vztahu a vypočítá se z nich aritmetický průměr. Pokud se jednotlivé měření liší o více než 20 % od průměru tak se ze souboru vyloučí a ze zbylých měření se vypočítá nový aritmetický průměr. Na zkušebním místě musí být minimálně 7 platných měření [2].

3.2.6 Způsoby stanovení pevnosti betonu v tlaku

Pevnost betonu v tlaku se určuje jako upřesněná nebo s nezaručenou přesností. Používají se kalibrační vztahy obecné, směrné nebo určující podle následujících pokynů.

Pokud se použije kombinace tvrdoměrné a ultrazvukové metody, stanoví se pevnost pro každou zvlášť a výsledná pevnost f_{bj} se stanoví z rovnice

$$f_{bj} = \frac{f_{bj,I} + f_{bj,II}}{2}, \quad (3.5)$$

kde f_{bj} je výsledná pevnost betonu v tlaku, $f_{bj,I}$ je pevnost stanovená první metodou pro místo j a $f_{bj,II}$ je pevnost stanovená druhou metodou pro místo j .

Pokud stanovujeme pevnost betonu v tlaku na místě které bylo vyšetřované pouze jednou metodou, stanoví se korekční součinitel ζ podle rovnice (3.6.) a pevnost daného místa se stanoví dle rovnice (3.7).

$$\zeta = 0,5 \cdot \left[1 + \frac{\sum_1^{n_2} f_{bj,II}}{\sum_1^{n_2} f_{bj,I}} \right], \quad (3.6)$$

kde ζ je korekční součinitel, n_2 je počet míst, která byla zkoušena oběma metodami, $f_{bj,I}$ je pevnost stanovená první metodou pro místo j a $f_{bj,II}$ je pevnost stanovená druhou metodou pro místo j .

$$f_{bj,I} \cdot \zeta, \quad (3.7)$$

kde $f_{bj,I}$ je pevnost stanovená první metodou pro místo j a ζ je korekční součinitel [2;3].

3.2.7 Pevnost betonu v tlaku s nezaručenou přesností

Pevnost betonu v tlaku s nezaručenou přesností se stanoví z obecného nebo směrného kalibračního vztahu s ohledem na směr tvrdoměru při zkoušce. Pokud je odklon jiný než uvádí kalibrační vztahy zjistí se lineární interpolací mezi dvěma nejbližšími polohami. Obecný kalibrační vztah je pro jednotlivé tvrdoměry určen v normě ČSN 73 1373 pomocí tabulky, grafu i matematického vyjádření např. podle rovnice

$$f_{be} = 1,750A - 29,000, \quad (3.8)$$

kde f_{be} je pevnost betonu v tlaku s nezaručenou přesností pro Schmidtův tvrdoměr typu N, směr zkoušení vodorovný a A je velikost odrazu v rozmezí 25 – 40 (v normě α) [2].

3.2.8 Pevnost betonu v tlaku upřesněná

Pevnost zjištěná upřesněním nedestruktivní zkoušky z jednoho zkušebního místa má stejnou váhu jako pevnost zjištěná pomocí destruktivní zkoušky provedené na tělese odebraném z tohoto místa. Upřesněná pevnost lze zjistit:

- **Z určujícího kalibračního vztahu** – pokud máme k dispozici určující kalibrační vztah vyjádříme upřesněnou pevnost betonu v tlaku z něj.
- **Upřesněním pomocí součinitele α** – nejdříve se z obecného nebo směrného kalibračního vztahu určí pevnost betonu s nezaručenou přesností f_{be} a upřesněním pomocí rovnice (3.9) se zjistí upřesněná pevnost betonu v tlaku f_b .

$$f_b = \alpha \cdot f_{be}, \quad (3.9)$$

kde f_b je upřesněná pevnost betonu v tlaku, f_{be} je pevnost betonu s nezaručenou přesností a α je upřesňující součinitel [1;2].

K získání součinitele α je zapotřebí buď:

- Minimálně 9 krychlí nebo válců ze stejného betonu jako zkoumaná konstrukce nebo dílec ošetřovaných a zhutňovaných stejným způsobem a s dosaženým stejným stářím v rozměrech dle ČSN 73 1370. Krychle o hraně 150 mm, válce s výškou 150 mm a průměrem 150 mm.
- Tělesa vyjmutá ze zkoumané konstrukce nebo dílce podle objemu betonu: Minimálně 3 tělesa pokud je objem do 10 m³ nebo byla konstrukce nebo dílec nedestruktivně zkoušena podle ČSN 73 2011 a pevnost s nezaručenou přesností byla určena z míst, kde byla pevnost nejmenší, průměrná a největší. Pokud je objem do 50 m³, je zapotřebí minimálně 6 těles a minimálně 9 těles pokud je objem větší než 50 m³ [1;2].

Součinitel α se vypočítá z rovnice

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n f_{bi}}{\sum_{i=1}^n f_{bei}}, \quad (3.10)$$

kde α je upřesňující součinitel, f_{bi} je pevnost betonu v tlaku i -tého zkušební vzorku stanovená dle ČSN EN 12390-2, f_{bei} je pevnost betonu v tlaku s nezaručenou přesností na stejném zkušebním vzorku a n je celkový počet použitých zkušebních vzorků [1;2].

3.2.9 Pevnost betonu v tlaku se zaručenou přesností (charakteristická)

V normě ČSN 73 2011 jsou uvedeny způsoby pro získání zaručené přesnosti betonu v tlaku. Zde budou pro názornost uvedeny modifikace pro stejnorodý beton.

- **První způsob** – pevnost betonu v tlaku se zaručenou přesností f_{bg} se určí podle rovnice

$$f_{bg} = \bar{f}_b - \beta_n \cdot s_r, \quad (3.11)$$

kde f_{bg} je pevnost betonu v tlaku se zaručenou pevností, \bar{f}_b je aritmetický průměr z pevností spočítaných z jednotlivých měření, β_n je součinitel odhadu 5 % kvantilu dle Tab. 3.2 závislý na počtu výsledků, s_r je výběrová směrodatná odchylka podle rovnice

$$s_r = \sqrt{s^2 + s_{rez}^2}, \quad (3.12)$$

kde s je výběrová směrodatná odchylka pevností zjištěných nedestruktivní metodou dle rovnice (3.13), s_{rez} je reziduální směrodatná odchylka podle rovnice (3.14).

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum (f_{bki} - \bar{f}_{bki})^2}, \quad (3.13)$$

$$s_{rez} = \sqrt{\frac{1}{n_1 - k_f} \sum (f_{bi} - f_{bei})^2}, \quad (3.14)$$

kde n je počet míst nedestruktivně zkoušených, n_I počet měřených bodů kalibračního vztahu, k_f počet parametrů volené funkce kalibračního vztahu, f_{bki} pevnost betonu zjištěná upřesněnou zkouškou a \bar{f}_{bki} její průměrná hodnota, f_{bi} a f_{bei} viz (3.10).

V případě nedestruktivní zkoušky s nezaručenou přesností se použije směrodatná odchylka s_r dle rovnice

$$s_r = \sqrt{s_x^2 + s_{rez,e}^2}, \quad (3.15)$$

kde s_r je směrodatná odchylka, s_x je výběrová směrodatná odchylka podle rovnice (3.16), $s_{rez,e}$ je reziduální směrodatná odchylka rovna hodnotě 2,5.

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum (f_{bei} - \bar{f}_{bei})^2}, \quad (3.16)$$

kde n , f_{bei} viz (3.10), \bar{f}_{bei} je průměrná pevnost betonu v tlaku s nezaručenou přesností.

- **Druhý způsob** – pevnost betonu v tlaku se zaručenou přesností f_{bg} se určí podle rovnice

$$f_{bg} = \bar{f}_b - \beta_n \cdot s \cdot \psi, \quad (3.17)$$

kde f_{bg} , f_b , β_n viz (3.11) a s viz (3.13), ψ je opravný součinitel, který zohledňuje rozdílné přesnosti při stanovení pevností betonu destruktivní a nedestruktivní metodou a určí se z rovnice

$$\psi = \frac{s_{r,cub}}{s_{r,ned}}, \quad (3.18)$$

kde ψ je opravný součinitel, $s_{r,cub}$ je směrodatná odchylka krychelných pevností zjištěných v lise, $s_{r,ned}$ je směrodatná odchylka pevností zjištěných nedestruktivní metodou při kalibraci.

Hodnota zaručené pevnosti betonu v tlaku je menší z hodnot (3.11) a (3.17) [3].

Tab. 3.2 Součinitel odhadu 5 % kvantilu β_n [3].

Počet získaných výsledků	β_n	Počet získaných výsledků	β_n
6	1,98	20	1,71
7	1,90	25	1,69
8	1,86	30	1,68
9	1,83	40	1,66
12	1,77	50	1,64
15	1,74	více než 50	1,64

3.2.10 Vyhodnocení zkoušek

Pokud je zkoušený beton starší než 56 dnů a pro zjištění kalibračního vztahu nebo pro upřesňující součinitel α nebyli vzorky odebrané z konstrukce nebo prvku, musí se pevnost zjištěná z obecného kalibračního vztahu vynásobit součinitelem α_t podle Tab. 3.3 [2].

Tab. 3.3 Součinitel α_t [2].

Stáří betonu ve dnech	α_t
57 – 180	0,95
181 – 360	0,93
více než 360	0,90

Pokud má zkoušený beton jinou vlhkost než přirozenou nebo vlhkou, pevnost betonu odvozená z obecného kalibračního vztahu se vynásobí součinitelem α_w z Tab. 3.4 [2].

Tab. 3.4 Součinitel α_w [2].

Vlhkost betonu	α_w
Suchý	0,85
Přirozeně vlhký a vlhký	1,00
Nasycený vodou	1,05

Na každém zkušebním místě se pevnost betonu v tlaku zaokrouhlí na celé MPa. Do pevnostních tříd se zařadí dle ČSN EN 13791 [1;2].

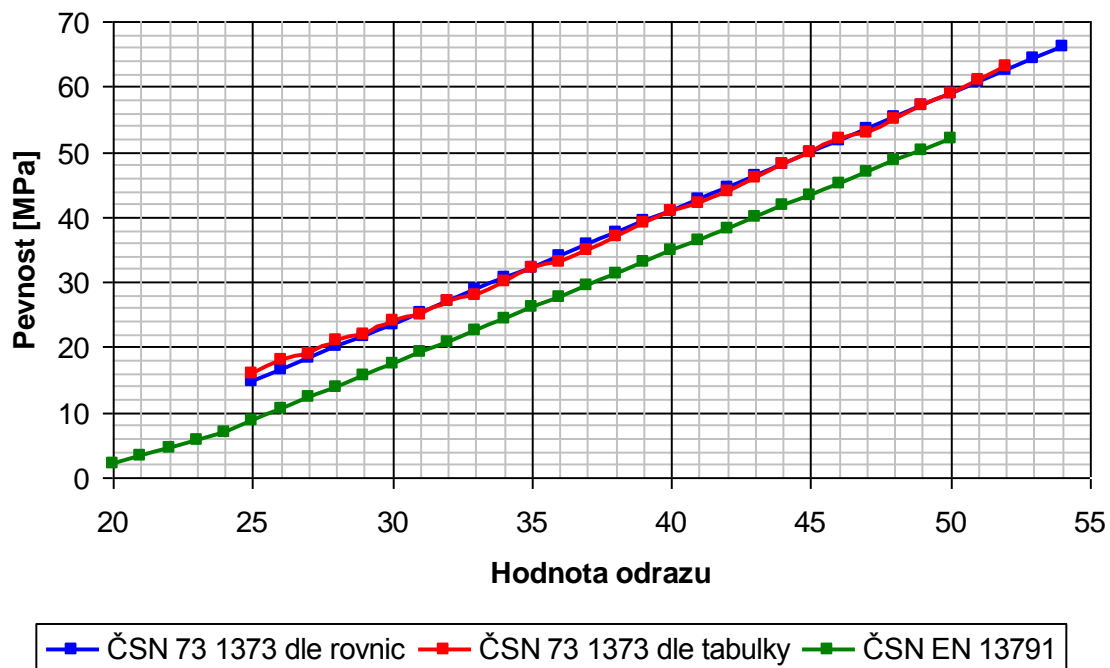
3.3 Porovnání

Porovnání přístupů ČSN EN a ČSN se specifikuje na hlavní rozdíly a je uvedeno v Tab. 3.5. Dále je porovnána základní kalibrační křivka ČSN EN 13791 s křivkami dle ČSN 73 1373 dané rovnicemi a tabulkou na Obr. 3.1 [1;2;3;4;5].

Tab. 3.5 Porovnání přístupů ČSN EN a ČSN [1;2;3;4;5].

Porovnávaná veličina	ČSN EN	ČSN
Zpracovaná metoda tvrdoměrného měření	Odrazový tvrdoměr, nevylučuje jiné	Odrazový tvrdoměr, Špičákový tvrdoměr, nevylučuje jiné
Výstupy	Stejněměrné uložení betonu, Lokalizace narušených míst, nižší kvality, Odhad pevnosti betonu v tlaku.	Stejnorodost Pevnost betonu v tlaku, Pevnost betonu v tahu
Zkušební místo	300 mm x 300 mm	min 0,02 m ² Schmidt typ N, L a špičákový tvrdoměr min 0,04 m ² Schmidt typ M
Vzdálenost zkušebních míst od okraje konstrukce	min 25 mm	min 30 mm Schmidt typ N a typ L min 60 mm Schmidt typ M a špičákový tvrdoměr
Vzdálenost jednotlivých zkušebních bodů (rázů, vpichů)	min 25 mm	min 25 mm Schmidt typ N min 20 mm Schmidt typ L min 60 mm Schmidt typ M a špičákový tvrdoměr
Platné měření	Celá sada zamítne, pokud se více jak 20 % hodnot liší o více než ± 6 jednotek od aritmetického průměru všech měření.	Hodnota je platná, pokud se neliší o více než ± 20 % od aritmetického průměru všech měření.
Minimální počet platných měření ne jednom zkušebním místě	9	7
Vyhodnocení	Alternativa 1 – min 18 dvojic vývrtů s nedestruktivní metodou Alternativa 2 – ze základní křivky a min 9 dvojic vývrtů s nedestruktivní metodou	Pevnost s nezaručenou přesností – z obecného nebo směrného kalibračního vztahu Pevnost upřesněná – z určujícího kalibračního vztahu nebo pomocí součinitele α a min 3 těles odebraných z konstrukce

Srovnání normových kalibračních křivek



Obr. 3.1 Srovnání kalibračních křivek. Modře je znázorněna křivka dle ČSN 73 1373 získaná pomocí rovnic a červeně z hodnot uvedených v tabulce. Zeleně je znázorněna křivka dle rovnic z ČSN EN 13791 [2;5].

4 NOVINKY V OBLASTI TVRDOMĚRNÉHO MĚŘENÍ

Mezi nejnovější přístroje patří dvojice odrazových tvrdoměrů SilverSchmidt ST/PC typ N a typ L s hříbovým nástavcem od firmy Proceq.

4.1 Popis přístroje

Přístroj má modré pogumované tělo, které brání přístupu prachu a nečistot z okolí do vnitřních částí. Na levé straně se nachází razník, který může mít u typu L hříbový nástavec. Ve střední části se nachází LCD display zobrazující výsledky a nastavení. USB port pro připojení nabíječky nebo spojení s PC se nachází na levé straně. Vpravo od displaye je jediné výběrové tlačítko viz Obr. 4.1.



Obr. 4.1 SilverSchmidt, 1 – Razník, 2 – USB konektor, 3 – LCD display, 4 – Výběrové tlačítko [13].

4.2 Modely SilverSchmidt

- **Typ N** – energie rázu 2,207 Nm, rozsah pevností 10 – 100 MPa, konstrukce nebo těleso pevně upevněné o tloušťce minimálně 100 mm.
- **Typ L** – energie rázu 0,735 Nm, betony nižších pevností 5 – 30 MPa, nebo konstrukce o tloušťce menší než 100 mm.
- **ST** – standardní model, software s možností aktualizace firmwaru a výběrem předvoleb statistiky.

- **PC** – rozšířené využití paměti, vlastní kalibrační křivky, možnost stažení dat do PC, plně funkční software Hammerlink [11].

4.2.1 Hříbový píst

Hříbový píst je určen pro práci s přístrojem SilverSchmidt PC typ L, měření se provádí na mladém nebo nízkopevnostním betonu. Neměl by být používán pro betony s větší pevností než je určený rozsah 5 – 30 MPa. Hříbový píst má speciální geometrii díky níž je citlivý na úhel měření, odraz musí být prováděn kolmo na hladký povrch viz Obr. 4.2 [10].



Obr. 4.2 *SilverSchmidt typ L s hříbovým pístem, přístroj je kolmo přiložen k betonové krychli o hraně 150 mm, která je sevřena v lisu a je prováděno stlačování pístu [foto P. Cikrle].*

4.3 Ovládání SilverSchmidtu

4.3.1 Navigace v menu

Navigace se v menu provádí nakloněním přístroje na stranu. Pro pohyb vlevo nakloněním doleva a pro pohyb vpravo nakloněním doprava. V seznamu dat navigujeme pomocí válení přístroje v jeho ose. Stiskem výběrového tlačítka se zvolí vybraná položka v menu [11].

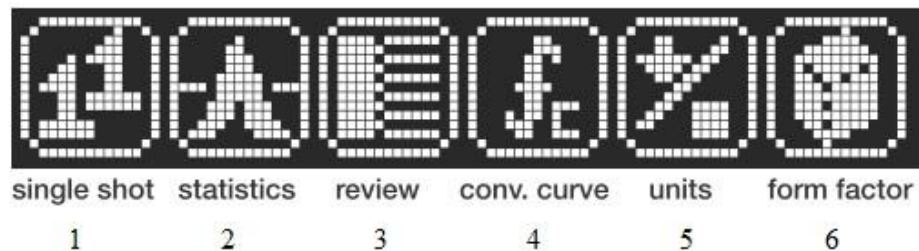
4.3.2 Volitelné nastavení

V hlavním menu volíme podle Obr. 4.3:

- **Jeden odraz** – pokud chceme provést jednotlivý měřicí odraz.

- **Statistika** – nastavení statistických vyhodnocovacích metod: medián – vybere konkrétní střední hodnotu ze souboru hodnot, aritmetický průměr – spočítá aritmetický průměr ze souboru hodnot.
- **Přehled údajů** – zobrazení naměřených hodnot.
- **Kalibrační křivka** – nastavení kalibrační křivky použité pro odhad pevnosti betonu v tlaku.
- **Jednotky** – nastavení jednotek pro zobrazení.
- **Tvarový index** – nastavení tvarového indexu použitého k odhadu pevnosti betonu v tlaku.

Aktuální nastavení lze zjistit kdykoliv lehkým stiskem pístu, tzv. tip [11].



Obr. 4.3 *Symbols na display v hlavním menu, 1: jeden odraz, 2: statistika, 3: přehled údajů, 4: kalibrační křivka, 5: jednotky, 6: tvarový index [11].*

4.4 Odhad pevnosti v tlaku SilverSchmidtem

4.4.1 Získání odrazových hodnot

Odrazová hodnota pro jedno zkušební místo se stanoví dle platných norem. Evropská norma EN 12504-2 požaduje výpočet střední hodnoty z minimálně 9 hodnot platných odrazů. Severoamerická norma ASTM C805 požaduje výpočet průměrné hodnoty z 10 platných odrazů. Čínská norma JGJ T23-2001 požaduje výpočet průměrné hodnoty z 16 platných odrazů. Tyto postupy jsou přednastaveny v přístroji a je možno je nastavit dle potřeby. Normy jsou založeny na klasických tvrdoměrech měřící vzdálenost odrazu, avšak SilverSchmidt měří koeficient odrazové energie, proto by měla být tato odchylka od normy uvedena v protokolu o zkoušce [9].

4.4.2 Použití kalibračních křivek

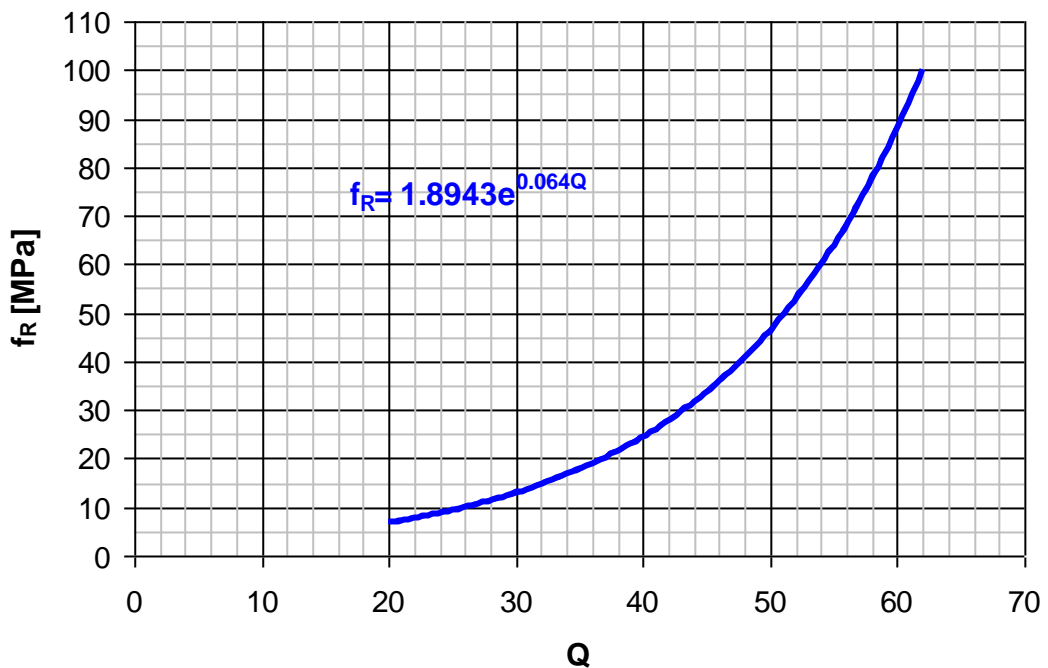
Pro přístroj SilverSchmidt typ N byly vytvořeny dvě a pro SilverSchmidt typ L jedna referenční kalibrační křivka a jedna pro hříbový píst. BAM (Federální institut pro výzkum materiálů a testování v Berlíně, Německo) vytvořil během rozsáhlých testů křivku pro typ N a typ L jako 50-ti % křivky, to znamená, že polovina hodnot leží nad křivkou a polovina hodnot leží pod křivkou.

Rovnice (4.1) 50-ti % kalibrační křivky pro SilverSchmidt typ N s rozsahem odrazového koeficientu $Q = 20-62$ a pevnost $f_R = 10-100$ MPa viz Obr. 4.4.

$$f_R = 1,8943e^{0,064Q}, \quad (4.1)$$

kde f_R vyjadřuje pevnost betonu v tlaku v MPa, e je Eulerovo číslo a Q je hodnota odrazového koeficientu.

Kalibrační křivka SilverSchmidt typ N



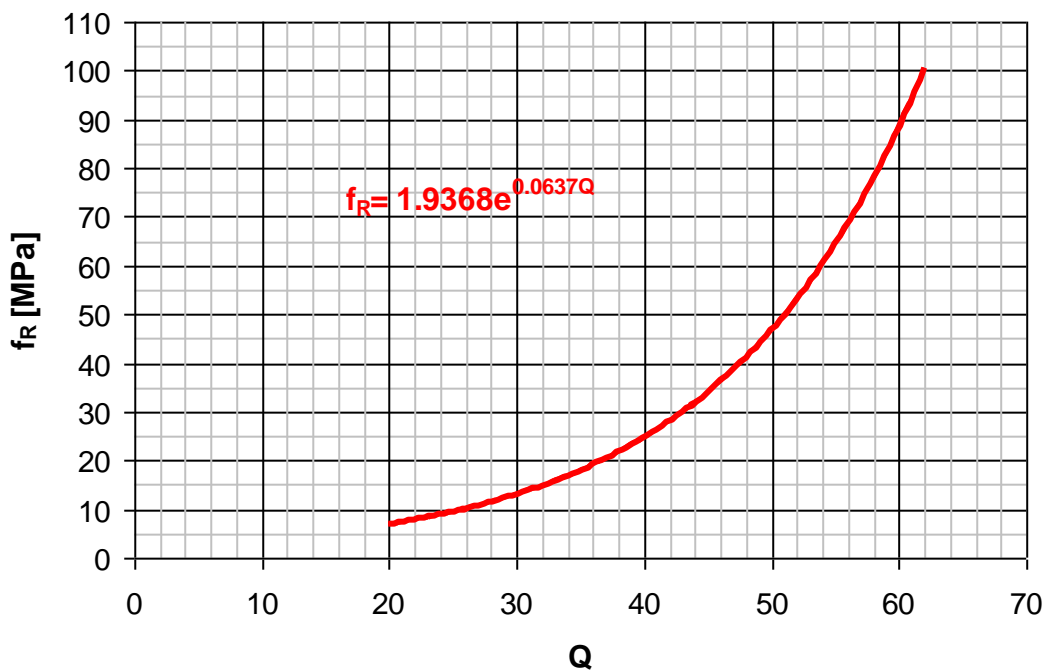
Obr. 4.4 Referenční kalibrační křivka SilverSchmidt typ N, vyjadřuje závislost odrazového koeficientu Q na ose x a pevnosti betonu v tlaku f_R v MPa na ose y.

Rovnice (4.2) 50-ti % kalibrační křivky pro SilverSchmidt typ L s rozsahem odrazového koeficientu $Q = 20-62$ a pevnost $f_R = 10-100$ MPa viz. Obr. 4.5.

$$f_R = 1,9368e^{0,0637Q}, \quad (4.2)$$

kde f_R vyjadřuje pevnost betonu v tlaku v MPa, e je Eulerovo číslo a Q je hodnota odrazového koeficientu.

Kalibrační křivka SilverSchmidt typ L



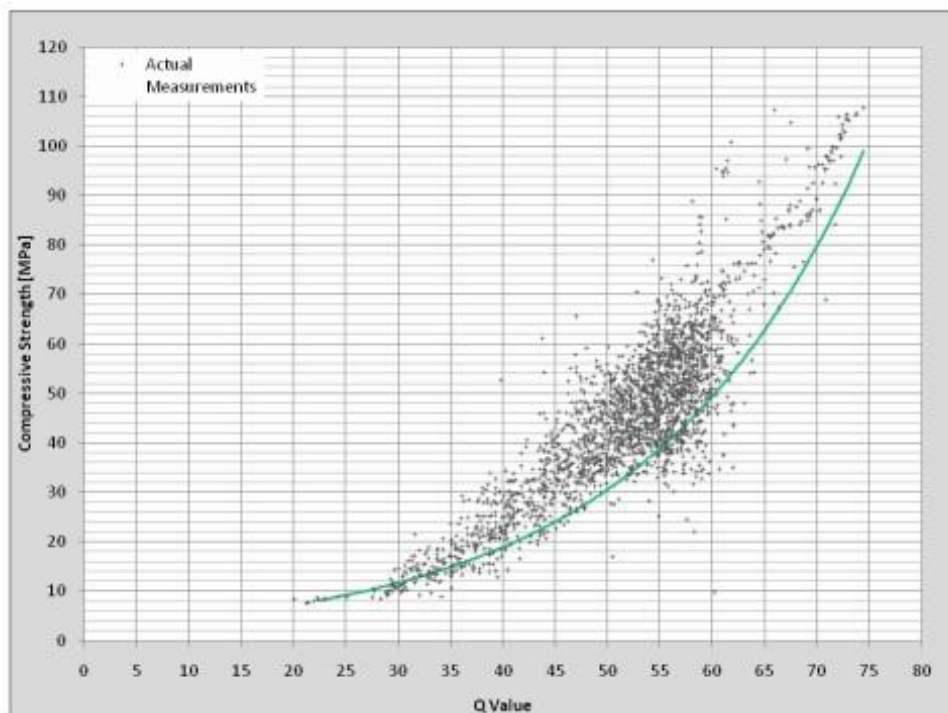
Obr. 4.5 Referenční kalibrační křivka SilverSchmidt typ L, vyjadřuje závislost odrazového koeficientu Q na ose x a pevnosti betonu v tlaku f_R v MPa na ose y .

Díky požadavkům norem EN 13791 a ASTM C805/ACI 228.1 byla z výsledků zkoušek v BAM, Province Construction Science Research Institut Shaanxi v Číně a Hunan University v Číně zpracována 10-ti % křivka, to znamená, že 10 % hodnot leží pod a 90 % nad křivkou.

Rovnice (4.3) 10-ti % kalibrační křivky pro SilverSchmidt typ N s rozsahem odrazového koeficientu $Q = 22-75$ a pevnost $f_R = 8 - 100$ MPa viz. Obr. 4.6.

$$f_R = 2,77e^{0,048Q}, \quad (4.3)$$

kde f_R vyjadřuje pevnost betonu v tlaku v MPa, e je Eulerovo číslo a Q je hodnota odrazového koeficientu [12].



Obr. 4.6 10-ti % referenční kalibrační křivka SilverSchmidt typ N, vyjadřuje závislost mezi koeficientem odrazu Q na ose x a hodnotou pevnosti betonu v tlaku f_R v MPa na ose y . 90 % veškerých výsledků leží nad a 10 % pod křivkou [12].

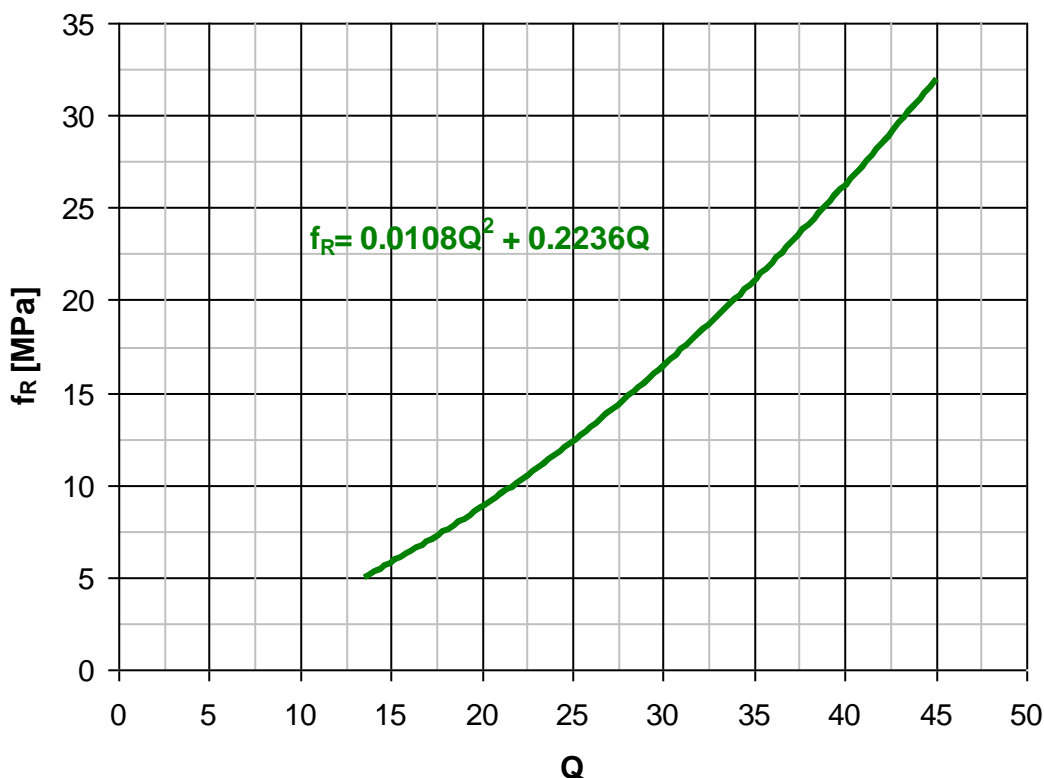
Z dat naměřených v institutu BAM a EMPA (Švýcarské federální laboratoře pro materiálové testování a výzkum) vznikla kalibrační křivka pro SilverSchmidt typ L s hříbovým pístem.

Rovnice (4.4) 50-ti % kalibrační křivky pro SilverSchmidt typ L s hříbovým pístem s rozsahem odrazového koeficientu $Q = 12-45$ a pevnost $f_R = 5-30$ MPa viz Obr. 4.7.

$$f_R = 0,0108 \cdot Q^2 + 0,2236 \cdot Q, \quad (4.4)$$

kde f_R vyjadřuje pevnost betonu v tlaku v MPa a Q je hodnota odrazového koeficientu [10].

Kalibrační křivka SilverSchmidt typ L s hříbovým pístem



Obr. 4.7 Referenční kalibrační křivka SilverSchmidt typ L s hříbovým pístem, vyjadřuje závislost odrazového koeficientu Q na ose x a pevnosti betonu v tlaku f_R v MPa na ose y .

Je však doporučeno vytvořit vlastní kalibrační křivky pro betonové směsi, které chceme zkoušet. Ty lze poté uložit přímo do přístroje SilverSchmidt PC a vyhodnotit pevnost v tlaku in-situ [12].

4.4.3 Zdroje nejistoty

Vyskytuje se mnoho faktorů, které mohou nepříznivě ovlivnit odhad pevnosti pomocí odrazového tvrdoměru SilverSchmidt. Je nutné jim předcházet nebo je zahrnout do odhadu. Patří mezi ně:

- **Receptura** – pokud receptura neodpovídá té, pro kterou byla vytvořena kalibrační křivka, nemusí odrazový koeficient Q odpovídat správné hodnotě pevnosti f_r , a měla by být vytvořena vlastní kalibrační křivka.
- **Stav povrchu** – drsný povrch musí být vyhlazen.

- **Vlhkost** – suchý beton udává vyšší odrazový koeficient Q .
- **Teplota** – zkoušení by nemělo být prováděno na zmrzlém betonu, provozní teplota přístroje je 0-50 °C.
- **Přítomnost výztuže** – měření by se nemělo provádět nad výztuží, pokud není jiná možnost musí být zajištěna dostatečná krycí vrstva betonu.
- **Karbonatace** – před začátkem měření musí být zkarbonatovaná vrstva odstraněna nebo změřena hodnota odrazu před odstraněním a po odstranění a stanovit korekční součinitel [9].

5 ZKOUŠENÍ BETONOVÝCH DÍLCŮ

Praktické tvroměrné zkoušení betonových dílců bylo provedeno na 12 kvádrech zhotovených ze 4 různých receptur. Složení směsí viz Tab. 5.1. Kvádry nesly označení dvojicí čísel, z každé strany jedno.

Měřilo se přístroji OriginalSchmidt typ N a SilverSchmidt PC typ N. Zpracování výsledků bude provedeno dle obou platných výše uvedených postupů ČSN EN i ČSN.

Tab. 5.1 Receptury betonových směsí.

Receptury betonových směsí					
Složky betonu do 1 m ³		I	II	III	IV
Cement CEM I 42.5 R Mokrý		350 kg	394 kg	400 kg	400 kg
Kamenivo	frakce 0-4 mm	785 kg	882 kg	930 kg	930 kg
	frakce 4-8 mm	350 kg	394 kg	315 kg	315 kg
	frakce 8-16 mm	650 kg	731 kg	600 kg	600 kg
Plastifikátor		-	-	3 kg	2 kg
Voda		186 kg	208 kg	180 kg	180 kg

5.1 Postup měření

Měření probíhalo v souladu s předpisy. Před zahájením měření se přístroj třikrát aktivoval a provedl se kontrolní odraz na referenční kovadině, který byl v mezích udávaných výrobcem.

5.1.1 Úprava zkoušených bloků

Bloky se zkoušely na dvou protilehlých stranách. Beton nebyl karbonatovaný, proto se jen pomocí brusného kamene z jeho povrchu odstranila vrstvička volného cementového mléka. Jelikož byly bloky již odvrtné jádrovými vrty, byl nad každým vrtem vyznačen prostor, ve kterém se neměřilo tak, aby byla min. tloušťka betonové vrstvy 100 mm.

5.1.2 Měření

Obě měřené strany se rozdělili na polovinu v podélném směru, aby byl stejný měřený úsek pro oba přístroje. Jednotlivé odrazy se prováděly min. 30 mm od okraje konstrukce a 25 mm od sebe viz. Obr. 5.1. Naměřené hodnoty jednotlivých odrazů se zapisovaly pro jednotlivé strany a směsi. Jejich kompletní výčet je uveden v Tab. 5.2 a Tab. 5.3. Pokud se hodnota výrazně odlišovala nebo místo vtisku vykazovalo poškození, hodnota odrazu se vyloučila a nahradila tak, aby bylo minimálně 10 hodnot pro každou stranu a přístroj. Po dokončení měření byl zkontrolován odraz přístrojů na referenční kovadlině, který byl v mezích udávaných výrobcem.



Obr. 5.1 Měření přístroji OriginalSchmidt (vlevo) SilverSchmidt (vpravo). Na obrázcích je vidět postup měření odrazovými tvrdoměry na betonových dílcích. Jsou vidět označená místa nad vývrty, na kterých se neměřilo.

Tab. 5.2 Záznam měření SilverSchmidt PC typ N.

Směs	Blok		Koeficient odrazu Q									
č.I	1/2	1	66.0	66.0	63.0	67.5	61.0	64.0	70.0	65.5	64.5	64.5
		2	64.5	65.0	65.0	69.0	63.5	66.5	63.0	65.0	68.0	63.5
	3/4	1	63.5	70.0	66.5	67.0	66.0	62.0	64.5	67.0	62.5	63.5
		2	68.5	67.5	66.5	63.0	69.5	73.0	71.5	68.5	72.0	68.5
	5/6	1	64.5	64.5	59.5	63.5	73.5	66.5	69.0	68.5	65.5	68.0
		2	68.0	63.0	70.0	64.5	68.0	64.5	66.5	63.0	62.5	65.5
č.II	7/8	1	58.5	65.5	67.5	58.5	60.5	62.5	65.0	65.5	61.5	66.5
		2	65.5	57.0	63.0	61.5	67.0	67.0	66.0	68.0	66.5	69.0
	9/10	1	62.5	63.0	62.5	62.0	66.5	61.0	64.0	65.0	63.5	69.0
		2	62.5	58.5	62.5	64.5	60.5	54.0	65.0	62.5	65.5	60.5
	11/12	1	66.0	60.0	62.0	62.0	58.5	54.5	55.5	66.0	56.0	60.0
		2	62.5	71.5	64.0	62.0	59.5	66.0	62.5	66.5	66.0	64.0
č.III	13/14	1	68.0	68.5	68.0	68.0	68.5	68.0	70.5	69.0	69.0	67.0
		2	68.5	68.0	68.5	64.0	68.0	69.0	70.5	66.0	70.5	68.0
	15/16	1	63.5	66.5	70.5	71.0	70.0	67.5	67.0	68.5	68.5	65.0
		2	68.5	66.0	67.5	71.5	68.5	68.5	68.0	74.5	69.5	68.0
	17/18	1	66.0	68.5	63.0	67.5	69.0	65.5	61.5	67.5	66.0	69.5
		2	64.0	68.0	69.0	70.5	69.5	70.0	70.0	72.5	69.0	69.0
č.IV	19/20	1	65.0	68.0	65.5	67.0	67.5	70.0	64.0	66.5	71.5	67.0
		2	65.0	65.0	69.0	68.5	69.5	70.0	64.5	69.0	65.0	65.0
	21/22	1	70.5	68.5	71.5	70.0	68.0	69.0	70.5	68.5	69.0	72.0
		2	68.5	68.5	68.0	70.5	67.0	65.5	65.0	67.5	65.5	63.5
	23/24	1	68.0	66.5	67.5	67.0	68.0	73.5	65.0	63.0	62.5	64.5
		2	68.0	66.0	70.0	68.0	65.5	70.0	67.0	66.0	65.0	66.5

Tab. 5.3 Záznam měření OriginalSchmidt typ N.

Směs	Blok		Hodnota odrazu R									
č.I	1/2	1	45	45	48	48	50	51	47	45	50	46
		2	44	42	45	46	44	47	47	49	45	48
	3/4	1	46	48	48	46	43	49	41	48	46	45
		2	47	48	47	49	48	48	46	46	46	45
	5/6	1	42	46	50	49	48	48	46	51	48	47
		2	47	47	46	46	47	48	46	45	52	47
č.II	7/8	1	46	49	45	46	48	44	44	47	40	51
		2	49	49	46	44	46	41	49	50	49	51
	9/10	1	39	45	46	39	42	44	43	37	42	44
		2	45	46	44	49	45	45	44	42	48	39
	11/12	1	48	39	47	44	40	39	40	44	40	48
		2	41	42	36	40	36	37	35	36	39	38
č.III	13/14	1	46	48	51	49	48	49	50	49	48	48
		2	47	50	48	47	48	50	49	47	45	49
	15/16	1	47	49	47	50	50	48	51	51	50	50
		2	47	46	48	48	50	50	49	53	46	50
	17/18	1	44	48	48	49	50	47	48	50	48	50
		2	47	50	52	50	50	51	52	48	50	47
č.IV	19/20	1	45	46	47	47	50	46	48	45	46	46
		2	45	47	46	49	46	47	46	45	47	49
	21/22	1	50	49	49	45	52	48	49	47	47	50
		2	50	47	46	48	49	49	46	45	48	48
	23/24	1	45	43	45	50	47	49	50	48	44	43
		2	46	48	48	47	47	45	46	48	46	44

5.2 Zpracování naměřených hodnot

Naměřené hodnoty byly zpracovány podle postupů výše uvedených v kapitole 3, podle norem ČSN EN a ČSN.

5.2.1 Platná měření

Nejdříve se pro každou sadu měření spočítal aritmetický průměr a dále se postupovalo podle příslušných norem následovně:

- **ČSN EN** – k aritmetickému průměru byla přičtena hodnota ± 6 jednotek. Pokud nějaký odraz nenáležel do takto vzniklého intervalu byl označen. Z celkového počtu 10 odrazů nebylo u žádné sady více než 20 % (2 odrazy) mimo interval a celá sada byla přijata.

- ČSN – k aritmetickému průměru bylo přičteno $\pm 20\%$. Žádný odraz neležel mimo takto vzniklý interval, všechna měření byla platná.

5.2.2 Stanovení pevnosti betonu v tlaku pomocí ČSN EN

K získání pevnosti betonu v tlaku byla použita Alternativa 2 viz. 3.1.8. Pro přístroj SilverSchmidt se použila 10-ti % kalibrační křivka daná výrobcem dle rovnice (4.3). Pro přístroj OriginalSchmidt se použila základní křivka uvedená v normě ČSN EN 13791. Ke každému průměru odrazu (Q nebo R) se vypočítala hodnota pevnosti f_R , ta se odečetla od pevnosti na vývrtu $f_{is,vývrt}$ a zjistila se tak hodnota δf . Vždy dvě směsi měly podobné vlastnosti, proto se pevnost určovala pro tuto dvojici, tím se získalo 12 dvojic hodnot odrazu a pevnosti vývrtu, podle Tab. 3.1 $k_1=1,55$. Pro každou dvojici směsí byl spočítán aritmetický průměr $\delta_{fm(n)}$ a směrodatná odchylka s . Z těchto hodnot se podle rovnice (4.3) spočítal posun křivky Δf . Přístroji SilverSchmidt se určila posunutá křivka $f_{is(n)}$ pro první dvojici směsí daná rovnicí (5.1) a pro druhou dvojici rovnicí (5.2).

$$f_{is(n),1} = 2,77 \cdot e^{0,048Q} - 19,3, \quad (5.1)$$

$$f_{is(n),2} = 2,77 \cdot e^{0,048Q} + 3,5, \quad (5.2)$$

kde $f_{is(n)}$ je pevnost betonu v tlaku v MPa, e je Eulerovo číslo a Q je hodnota odrazu.

Přístroji OriginalSchmidt se určila posunutá křivka $f_{is(n)}$ pro první dvojici směsí daná rovnicí (5.3) a pro druhou dvojici rovnicí (5.4)

$$f_{is(n),1} = 1,73 \cdot R - 33, \quad (5.3)$$

$$f_{is(n),2} = 1,73 \cdot R - 7,7, \quad (5.4)$$

kde $f_{is(n)}$ je pevnost betonu v tlaku a R je hodnota odrazu.

Z těchto hodnot se pro obě dvojice spočítal aritmetický průměr $f_{m(n),is}$, určila se minimální hodnota $f_{is,min}$ a spočítala se směrodatná odchylka. Hodnoty $f_{ck,is,1}$ a $f_{ck,is,2}$ se spočítaly podle rovnic (3.1) a (3.2). Výsledná pevnost betonu v tlaku v konstrukci $f_{ck,is}$ se určila jako minimální hodnota z těchto dvou hodnot, všechny pevnosti jsou uvedeny v MPa viz Tab. 5.4 a Tab. 5.5.

Tab. 5.4 Zpracované hodnoty pomocí ČSN EN pro přístroj SilverSchmidt PC typ N.

Směs	Blok		ΦQ	Interval		$f_{is,vývrt}$	f_R	Φf_R	$\bar{\delta}f$	$f_{is(n)}$	s
č.I	1/2	1	65.2	71.2	59.2	63.2	63.3	62	-0.2	44.0	6.31
		2	65.3	71.3	59.3	68.7	63.6		5.1	44.3	
	3/4	1	65.3	71.3	59.3	61.4	63.5		-2.1	44.2	
		2	68.9	74.9	62.9	49.8	75.5		-25.7	56.2	
	5/6	1	66.3	72.3	60.3	57.2	66.8		-9.6	47.5	
		2	65.6	71.6	59.6	54.5	64.4		-9.9	45.1	
č.II	7/8	1	63.2	69.2	57.2	54.5	57.4		-2.9	38.1	
		2	65.1	71.1	59.1	49.3	62.9		-13.6	43.6	
	9/10	1	63.9	69.9	57.9	49.0	59.5		-10.5	40.2	
		2	61.6	67.6	55.6	48.9	53.3		-4.4	34.0	
	11/12	1	60.1	66.1	54.1	52.3	49.5		2.8	30.2	
		2	64.5	70.5	58.5	50.0	61.1		-11.1	41.8	
č.III	13/14	1	68.5	74.5	62.5	98.5	74.0	72	24.4	77.5	3.66
		2	68.1	74.1	62.1	96.8	72.8		24.0	76.3	
	15/16	1	67.8	73.8	61.8	79.9	71.8		8.1	75.3	
		2	69.1	75.1	63.1	86.1	76.2		9.9	79.7	
	17/18	1	66.4	72.4	60.4	79.1	67.1		12.0	70.6	
		2	69.2	75.2	63.2	73.3	76.6		-3.2	80.1	
č.IV	19/20	1	67.2	73.2	61.2	92.7	69.7		23.0	73.2	
		2	67.1	73.1	61.1	95.6	69.2		26.4	72.7	
	21/22	1	69.8	75.8	63.8	92.9	78.8		14.1	82.3	
		2	67.0	73.0	61.0	93.8	68.9		24.9	72.4	
	23/24	1	66.6	72.6	60.6	86.7	67.6		19.1	71.1	
		2	67.2	73.2	61.2	86.6	69.7		16.8	73.2	
Posun základní křivky				Stanovení pevnosti v tlaku							
n=	12	$k_1=$	1.55								
Oblast	$\bar{\delta}f_{m(n)}$	s	Δf	$f_{m(n),is}$	$f_{is,min}$	$f_{ck,is,1}$	$f_{ck,is,2}$	$f_{ck,is}$			
č.I a č.II	-6.8	8.0	-19.3	42.4	30.2	33.1	34.2	33			
č.III a č.IV	16.6	8.5	3.5	75.4	70.6	69.9	74.6	70			

Tab. 5.5 Zpracované hodnoty pomocí ČSN EN pro přístroj OriginalSchmidt typ N.

Směs	Blok		ΦR	Interval		$f_{is,vy\dot{v}tr}$	f_R	Φf_R	$\bar{\sigma}f$	$f_{is(n)}$	s
č.I	1/2	1	48	54	42	63.2	47.7	44	15.5	49.2	4.76
		2	46	52	40	68.7	44.6		24.2	46.1	
	3/4	1	46	52	40	61.4	45.1		16.3	46.6	
		2	47	53	41	49.8	46.8		3.0	48.3	
	5/6	1	48	54	42	57.2	47.7		9.5	49.2	
		2	47	53	41	54.5	47.0		7.5	48.5	
č.II	7/8	1	46	52	40	54.5	45.1		9.4	46.6	
		2	47	53	41	49.3	47.5		1.8	49.0	
	9/10	1	42	48	36	49.0	38.3		10.7	39.8	
		2	45	51	39	48.9	42.8		6.1	44.3	
	11/12	1	43	49	37	52.3	39.7		12.6	41.2	
		2	38	44	32	50.0	31.2		18.8	32.7	
č.III	13/14	1	49	55	43	98.5	49.6	48	48.9	76.4	1.89
		2	48	54	42	96.8	48.5		48.2	75.3	
	15/16	1	49	55	43	79.9	50.8		29.1	77.6	
		2	49	55	43	86.1	49.8		36.3	76.6	
	17/18	1	48	54	42	79.1	48.9		30.2	75.7	
		2	50	56	44	73.3	51.5		21.9	78.3	
č.IV	19/20	1	47	53	41	92.7	46.1		46.6	72.9	
		2	47	53	41	95.6	46.3		49.4	73.1	
	21/22	1	49	55	43	92.9	49.6		43.4	76.4	
		2	48	54	42	93.8	47.8		45.9	74.6	
	23/24	1	46	52	40	86.7	45.8		40.9	72.6	
		2	47	53	41	86.6	45.9		40.6	72.7	
Posun základní křivky				Stanovení pevnosti v tlaku							
n=	12	$k_1=$	1.55								
Oblast	$\bar{\sigma}f_{m(n)}$	s	Δf	$f_{m(n),is}$	$f_{is,min}$	$f_{ck,is,1}$	$f_{ck,is,2}$	$f_{ck,is}$			
č.I a č.II	11.3	6.3	1.5	45.1	32.7	38.1	36.7	37			
č.III a č.IV	40.1	8.6	26.8	75.2	72.6	70.7	76.6	71			

5.2.3 Stanovení pevnosti betonu v tlaku pomocí ČSN

Ke stanovení pevnosti betonu v tlaku pomocí ČSN byl použit obecný kalibrační vztah upřesněný součinitelem α . Pro přístroj SilverSchmidt se použila 50-ti % kalibrační křivka daná výrobcem dle rovnice (4.1). Pro přístroj OriginalSchmidt se použil obecný kalibrační vztah uvedený v ČSN 73 1373 pro směr svisle dolů. K průměrům hodnoty odrazu se vypočítala hodnota pevnosti f_{bei} z kalibračních vztahů. Pro každou směs se vypočítal

součinitel α podle rovnice (3.10). Spočítal se aritmetický průměr pro každou směs f_{be} . Upřesněná hodnota f_b se spočítala podle rovnice (3.9) a byla vynásobena součiniteli α , α_t a α_w . Vývrty pro zjištění součinitele α byly odebrané z betonových dílců, součinitel $\alpha_t=1,00$ a $\alpha_w=1,00$, všechny pevnosti jsou uváděny v MPa viz Tab. 5.6 a Tab. 5.7.

Tab. 5.6 Zpracované hodnoty pomocí ČSN, přístroj SilverSchmidt PC typ N.

Směs	Blok		ΦQ	Interval		$f_{bi,vývrt}$	f_{bei}	f_{be}	α	f_b
č.I	1/2	1	65.2	78.2	52.2	63.2	122.9	130	0.453	59
		2	65.3	78.4	52.2	68.7	123.7			
	3/4	1	65.3	78.3	52.2	61.4	123.3			
		2	68.9	82.6	55.1	49.8	155.3			
	5/6	1	66.3	79.6	53.0	57.2	131.9			
		2	65.6	78.7	52.4	54.5	125.7			
č.II	7/8	1	63.2	75.8	50.5	54.5	107.8	108	0.471	51
		2	65.1	78.1	52.0	49.3	121.8			
	9/10	1	63.9	76.7	51.1	49.0	113.1			
		2	61.6	73.9	49.3	48.9	97.6			
	11/12	1	60.1	72.1	48.0	52.3	88.4			
		2	64.5	77.3	51.6	50.0	117.2			
č.III	13/14	1	68.5	82.1	54.8	98.5	151.4	149	0.575	86
		2	68.1	81.7	54.5	96.8	148.0			
	15/16	1	67.8	81.4	54.2	79.9	145.2			
		2	69.1	82.9	55.2	86.1	157.3			
	17/18	1	66.4	79.7	53.1	79.1	132.7			
		2	69.2	83.0	55.3	73.3	158.3			
č.IV	19/20	1	67.2	80.6	53.8	92.7	139.7	142	0.642	91
		2	67.1	80.5	53.6	95.6	138.4			
	21/22	1	69.8	83.7	55.8	92.9	164.5			
		2	67.0	80.3	53.6	93.8	137.5			
	23/24	1	66.6	79.9	53.2	86.7	134.0			
		2	67.2	80.6	53.8	86.6	139.7			

Tab. 5.7 Zpracované hodnoty pomocí ČSN, přístroj OriginalSchmidt typ N.

Směs	Blok		ΦA	Interval			$f_{bi,vývrt}$	f_{bei}	f_{be}	α	f_b
č.I	1/2	1	48	57	38	63.2	57.5	56	1.049	59	
		2	46	55	37	68.7	54.5				
	3/4	1	46	55	37	61.4	55.0				
		2	47	56	38	49.8	56.7				
	5/6	1	48	57	38	57.2	57.5				
		2	47	57	38	54.5	56.8				
č.II	7/8	1	46	55	37	54.5	55.0	51	0.996	51	
		2	47	57	38	49.3	57.3				
	9/10	1	42	51	34	49.0	48.5				
		2	45	54	36	48.9	52.8				
	11/12	1	43	51	34	52.3	49.8				
		2	38	46	30	50.0	41.7				
č.III	13/14	1	49	58	39	98.5	59.3	60	1.436	86	
		2	48	58	38	96.8	58.3				
	15/16	1	49	59	39	79.9	60.5				
		2	49	58	39	86.1	59.5				
	17/18	1	48	58	39	79.1	58.7				
		2	50	60	40	73.3	61.2				
č.IV	19/20	1	47	56	37	92.7	56.0	57	1.609	91	
		2	47	56	37	95.6	56.2				
	21/22	1	49	58	39	92.9	59.3				
		2	48	57	38	93.8	57.7				
	23/24	1	46	56	37	86.7	55.7				
		2	47	56	37	86.6	55.8				

5.2.4 Charakteristická pevnost získaná na jádrových vývrtech

Jádrové vývrty z dílců byly zkoušeny podle ČSN EN 12504-1 a vyhodnoceny podle ČSN EN 13791 postupem B. Na vývrtech byl dvakrát změřen průměr d_n v mm a z nich spočítán průměr Φd a plocha A_d . V lisu byla zjištěna síla potřebná k porušení vzorku viz Obr. 5.2 a z těchto hodnot spočítána pevnost na vývrtnu $f_{is,vývrt}$ v MPa viz Tab. 5.8. Charakteristické pevnosti byly vypočítány pro skupinu směsí I a II, pro skupinu III a IV a dále pro jednotlivé směsi. Pro dané rozsahy byl spočítán aritmetický průměr $f_{m(n),is}$ a zjištěna minimální hodnota $f_{is,min}$ a podle rovnice (5.5) a (5.6) spočítány hodnoty $f_{ck,is,1(2)}$. Z nich se určila minimální hodnota $f_{ck,is}$ viz Tab. 5.9.

$$f_{ck, is, 1} = f_{m(n), is} - k, \quad (5.5)$$

$$f_{ck, is, 2} = f_{is, \min} + 4, \quad (5.6)$$

kde $f_{ck, is}$ je charakteristická pevnost betonu v tlaku v konstrukci, k je krajní mez závisující na počtu výsledků zkoušek podle normy ČSN EN 13791, první 2 skupiny mají $k=5$ pro počet zkušebních vzorků 12 a jednotlivé směsi mají $k=7$ pro počet zkušebních vzorků 6 [5].

Tab. 5.8 Výpočet pevností na jádrových vývrtech.

Směs	Blok		d_1	d_2	Φd	A_d [mm ²]	F [kN]	$f_{is, \text{vývrt}}$
č.I	1/2	1	100.10	99.80	99.95	7846.13	495.6	63.2
		2	100.45	100.10	100.28	7897.24	542.9	68.7
	3/4	1	99.85	99.54	99.70	7806.15	479.2	61.4
		2	99.74	99.73	99.74	7812.41	388.8	49.8
	5/6	1	99.76	99.78	99.77	7817.89	446.9	57.2
		2	99.43	99.63	99.53	7780.33	423.8	54.5
č.II	7/8	1	99.60	101.80	100.70	7964.32	434.2	54.5
		2	99.50	102.40	100.95	8003.92	394.5	49.3
	9/10	1	98.97	99.10	99.04	7703.13	377.5	49.0
		2	99.98	99.89	99.94	7844.09	383.7	48.9
	11/12	1	99.76	99.75	99.76	7815.54	408.7	52.3
		2	99.73	99.63	99.68	7803.80	390.3	50.0
č.III	13/14	1	99.57	99.51	99.43	7763.92	753.2	98.5
		2	99.72	99.13	99.54	7781.89	764.4	96.8
	15/16	1	99.60	99.76	99.68	7803.80	623.2	79.9
		2	99.54	99.47	99.51	7776.42	669.2	86.1
	17/18	1	99.00	99.50	99.25	7736.61	611.6	79.1
		2	99.53	99.55	99.54	7781.89	570.8	73.3
č.IV	19/20	1	100.51	100.21	100.36	7910.63	733.4	92.7
		2	99.30	99.20	99.25	7736.61	740.0	95.6
	21/22	1	99.84	99.76	99.80	7822.60	727.0	92.9
		2	99.70	99.42	99.56	7785.02	730.2	93.8
	23/24	1	99.75	99.77	99.76	7816.33	677.7	86.7
		2	99.87	99.32	99.60	7790.49	674.3	86.6



Obr. 5.2 Zkoušení jádrového vývrtu v lisu. Jádrový vývrt nese číselné označení bloku, ze kterého pochází a písmenné označení jeho pořadí. Je upevněn v lisu a zatěžován dle ČSN EN 12504-1.

Tab. 5.9 Stanovení charakteristických pevností betonu v tlaku pomocí jádrových vývrtů.

Směs	$f_{m(n),is}$	$f_{is,min}$	$f_{ck,is,1}$	$f_{ck,is,2}$	$f_{ck,is}$
č. I a II	54.9	48.9	49.9	52.9	50
č. III a IV	88.5	73.3	83.5	77.3	77
č. I	59.1	49.8	52.1	53.8	52
č. II	50.7	48.9	43.7	52.9	44
č. III	85.6	73.3	78.6	77.3	77
č. IV	91.4	86.6	84.4	90.6	84

5.2.5 Tvorba kalibračních křivek

Další zpracování výsledků spočívalo ve vytvoření kalibračních křivek. Hodnotám průměrů odrazového koeficientu Q a velikostem odrazu R byla přiřazena pevnost získána jádrovým vývrtem na stejném prvku. Tyto dvojice byly vyneseny do dvou bodových grafů.

Pro přístroj SilverSchmidt byla zvolena exponenciální spojnice trendu. Takto vznikla 50-ti % kalibrační křivka vhodná pro použití podle ČSN vyjádřená rovnicí (5.7). Křivka 10-ti % byla vytvořena posunutím 50-ti% křivky o 14MPa tak, aby 90 % (22) bodů leželo nad ní. Přidáním spojnice se získala rovnice této kalibrační křivky dle (5.8). Obě křivky jsou zobrazeny na Obr. 5.3.

$$f_R = 0,4893 \cdot e^{0,0749Q}, \quad (5.7)$$

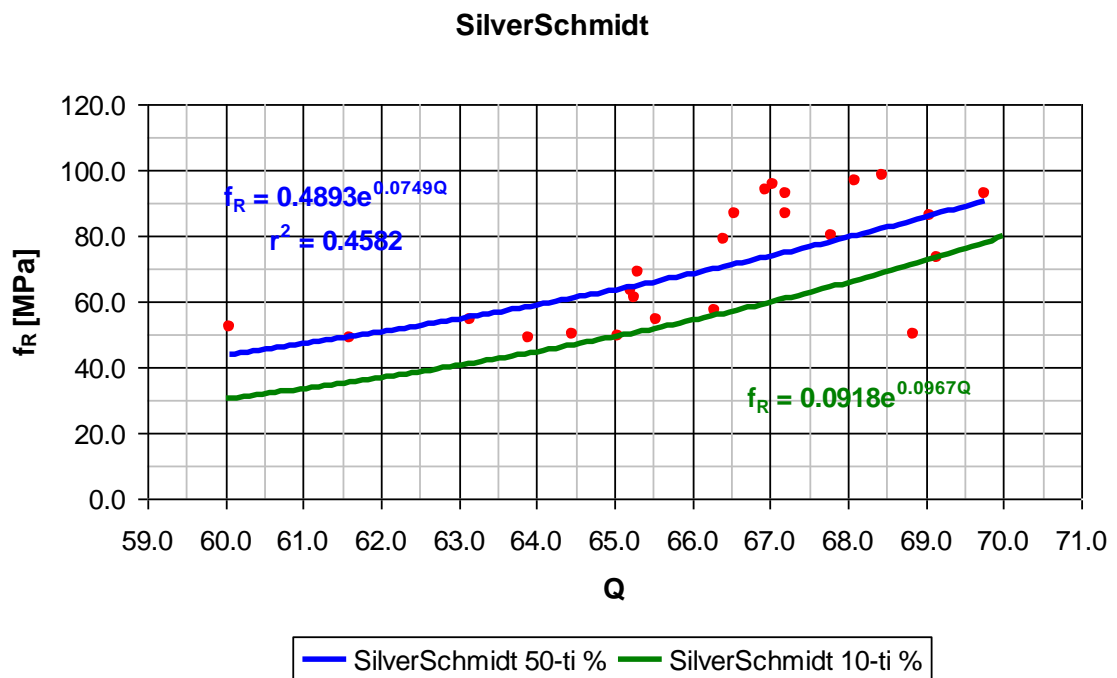
$$f_R = 0,0918 \cdot e^{0,0967Q}, \quad (5.8)$$

kde f_R je pevnost betonu v tlaku v MPa, e je Eulerovo číslo a Q koeficient odrazu.

Součinitel korelace r vychází podle rovnice

$$r = \sqrt{r^2} = \sqrt{0,4582} = 0,6769, \quad (5.9)$$

kde r je součinitel korelace a r^2 je součinitel determinace viz Obr. 5.3.



Obr. 5.3 Kalibrační křivky pro SilverSchmidt typ N. Červeně jsou znázorněny body závislosti pevnosti betonu v MPa na ose y na odrazovém koeficientu Q na ose x, modře je zobrazena 50-ti % kalibrační křivka, zeleně 10-ti % kalibrační křivka.

Pro přístroj OriginalSchmidt byla zvolena lineární spojnice trendu. Takto vznikla 50-ti % kalibrační křivka vhodná pro použití podle ČSN vyjádřená rovnicí (5.10). Křivka 10-ti % byla vytvořena posunutím 50-ti % křivky o 19,6 MPa tak, aby 90 % (22) bodů leželo nad ní. Vyjádření této kalibrační křivky je dáno rovnicí (5.11). Obě křivky jsou zobrazeny na Obr. 5.4.

$$f_R = 3,8998 \cdot R - 109,78, \quad (5.10)$$

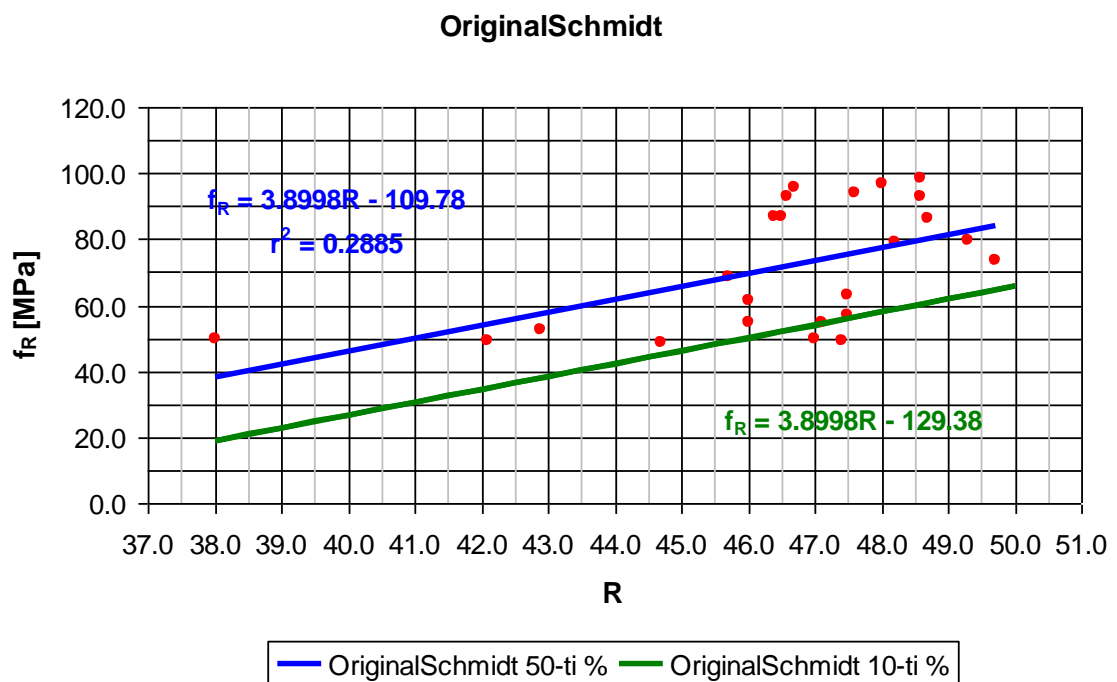
$$f_R = 3,8998 \cdot R - 129,38, \quad (5.11)$$

kde f_R je pevnost betonu v tlaku v MPa a R je hodnota odrazu.

Součinitel korelace r vychází podle rovnice

$$r = \sqrt{r^2} = \sqrt{0,2885} = 0,5371, \quad (5.12)$$

kde r je součinitel korelace a r^2 je součinitel determinace viz Obr. 5.4.



Obr. 5.4 Kalibrační křivky pro OriginalSchmidt typ N. Červeně jsou znázorněny body závislosti pevnosti betonu v MPa na ose y na hodnotě odrazu R na ose x, modře je zobrazena 50-ti % kalibrační křivka, zeleně 10-ti % kalibrační křivka.

5.3 Vyhodnocení výsledků

Porovnáním pevností zjištěných na jádrových vývrtech a pomocí tvrdoměrů z kalibračních vztahů vznikla Tab. 5.10, veškeré pevnosti jsou uváděny v MPa, Δf je posun základní křivky a α je upřesňující součinitel. Je z ní patrné, že každá metoda a přístroj mají různou úspěšnost na jiných druzích betonu. Další srovnání bylo provedeno na tvaru a sklonu vlastních kalibračních křivek s křivkami od výrobce na Obr. 5.5 pro přístroj SilverSchmidt a křivkami normovými na Obr. 5.6 pro přístroj OriginalSchmidt.

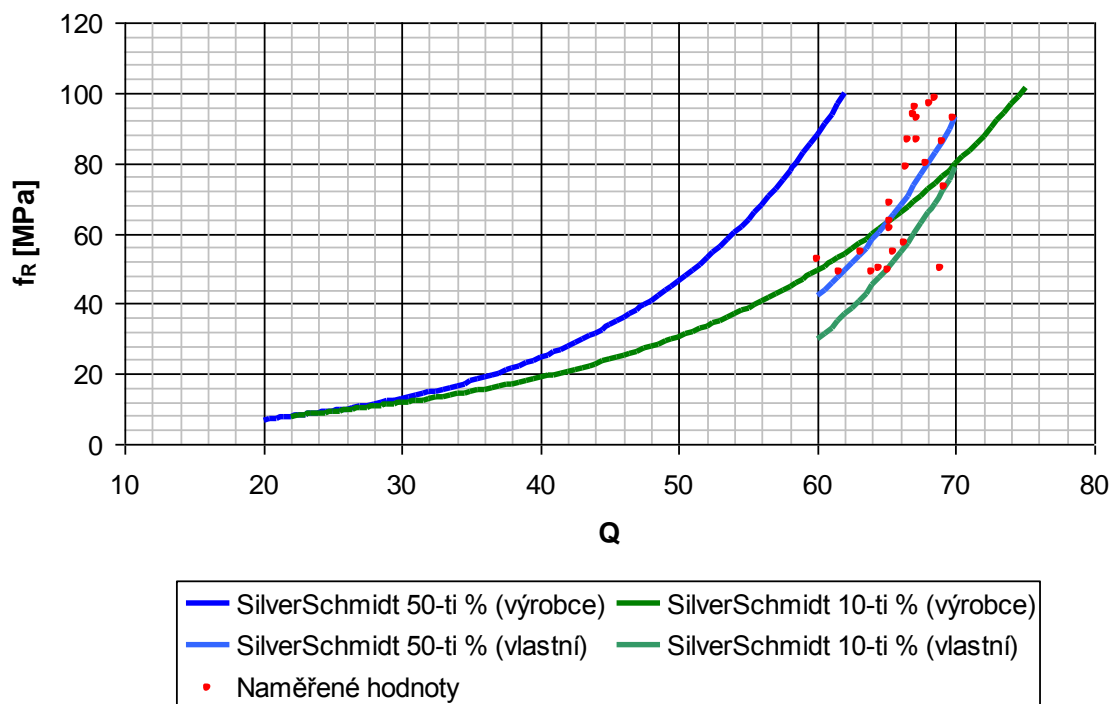
Tab. 5.10 Porovnání pevností zjištěných různými metodami.

Směs	SilverSchmidt		OriginalSchmidt		Vývrt
	ČSN EN	Δf	ČSN EN	Δf	$f_{ck, is}$
č. I a II	62	-19.3	44	1.5	50
č. III a IV	72	3.5	48	26.8	77
Směs	ČSN	α	ČSN	α	$f_{ck, is}$
č. I	130	0.453	56	1.049	52
č. II	108	0.471	51	0.996	44
č. III	149	0.575	60	1.436	77
č. IV	142	0.642	57	1.609	84

Při měření se vyskytl problém s nedostatečným rozsahem a rovnoměrností rozložení naměřených hodnot. Pro přístroj OriginalSchmidt průměrné hodnoty odrazu R vycházely pro všechny směsi v rozsahu 38 až 50, ale s rovnoměrným zastoupením hodnot u každé směsi. Byl zde tudíž minimální rozdíl mezi tvrdostí různých směsí. Průměrné hodnoty koeficientu odrazu Q přístroje SilverSchmidt obsáhly rozsah 60,1 až 69,8. Jejich rozložení však více odpovídalo jednotlivým betonovým směsím.

Problém s tvrdoměrem SilverSchmidt nastal u vyhodnocení podle 50-ti % kalibrační křivky (ČSN), kde se koeficient odrazu Q dostal mimo povolený rozsah. Pro dokončení odhadu pevnosti byl uvažován stejný průběh křivky. V důsledku velké strmosti vyšly příliš velké hodnoty pevnosti, které se však po opravení součinitelem α dostali k přesnějším výsledkům. Při vyhodnocení podle 10-ti % křivky (ČSN EN) se součinitel odrazu Q pohyboval v mezích, ale následný posun křivky vyšel pro menší pevnosti příliš velký.

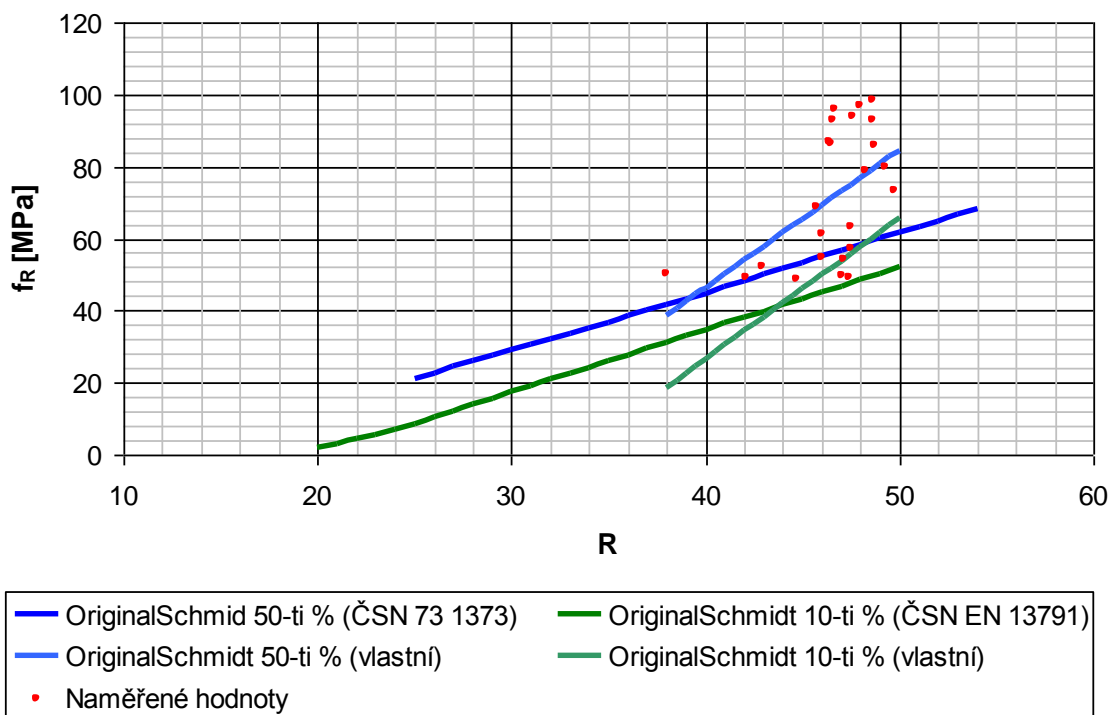
Srovnání kalibračních křivek vlastních a dodaných výrobcem



Obr. 5.5

Srovnání kalibračních křivek přístroje SilverSchmidt. Modrou barvou je zobrazena 50-ti % křivka od výrobce, zeleně 10-ti % křivka od výrobce, světle modře je vlastní 50-ti %, světle zeleně je vlastní 10-ti % křivka a červeně jsou zobrazeny naměřené body závislosti koeficientu odrazu Q na ose x a pevnosti zjištěné z jádrových vývrtů v MPa na ose y .

Srovnání kalibračních křivek vlastních a normových



Obr. 5.6 Srovnání kalibračních křivek přístroje OriginalSchmidt. Modrou barvou je zobrazena 50-ti % normová křivka, zeleně 10-ti % normová křivka, světle modře je vlastní 50-ti %, světle zeleně je vlastní 10-ti % křivka a červeně jsou zobrazeny naměřené body závislosti koeficientu odrazu Q na ose x a pevnosti zjištěné z jádrových vývrtů v MPa na ose y .

Díky nižšímu počtu zkušebních vzorků jsou vytvořené vlastní kalibrační křivky spíše informativní. Součinitelé korelace, pro SilverSchmidt $r = 0,6769$ což je blíže k jedné než u přístroje OriginalSchmidt $r = 0,5371$, jsou hodnoty nízké. Porovnáním křivek pro SilverSchmidt dodaných výrobcem s vlastními však pozorujeme přibližně stejný sklon u 50-ti % křivky, ale výrazný posun ve směru osy Q . 10-ti % vlastní křivka je rozdílně nakloněná, ale nachází se v blízkosti křivky dané výrobcem. Porovnáním křivek přístroje OriginalSchmidt daných v normách s vlastními je patrný jasný rozdíl ve sklonu. Ten je důsledkem zkoušení betonu s vysokou pevností v tlaku, pro kterou není přístroj vhodný a obecné kalibrační vztahy s těmito hodnotami nepočítají. Takto rozdílný sklon není vhodný pro zpracování pomocí ČSN EN za použití posunu základní křivky díky.

6 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo seznámení s novinkami v tvrdoměrném zkoušení betonu. Tato metoda je dlouhodobě používána a zavedena do praxe. Tyto změny, které se v poslední době objevily, zde byly zkoumány a částečně experimentálně ověřeny.

V teoretické části byl popsán obecný princip tvrdoměrného zkoušení a představeno využití různých metod pro jednotlivé materiály a přístroje na měření tvrdosti betonu.

Dále jsou vysvětleny dva platné normativní přístupy pro zjišťování pevnosti betonu v tlaku tvrdoměrnými metodami (ČSN EN a ČSN). Hlavní rozdíl spočívá v určení kalibrační křivky. U ČSN se jedná o průměrnou kalibrační křivku (50 % hodnot se nachází nad a 50 % pod ní). Zatímco ČSN EN požaduje 90-ti % bezpečnost vztahu, to znamená, že pouze 10 % hodnot může ležet pod touto křivkou. Další výrazný rozdíl je ve způsobu upřesnění. ČSN EN posouvá základní křivku ve směru osy y o Δf . Tento způsob je výrazně ovlivněn rozdílem směrnic křivky základní a křivky vzniklé z naměřených hodnot. Pokud je rozdíl výrazný, může posunutá křivka vycházet do záporných hodnot. ČSN základní křivku pouze naklání vynásobením upřesňujícím součinitelem α . Takto lze docílit vyšší přesnosti, jelikož se na konstrukci pohybujeme v úzkém rozsahu pevností (nejčastěji jedna třída betonu).

V další části je detailně popsán nejnovější přístroj na měření tvrdosti betonu SilverSchmidt. Jedná se o značný pokrok v technologii měření při níž odpadá nutnost sledovat směr zkoušení a možnost zkoušet betony vyšších pevností. Díky množství funkcí a snadnému ovládání se může odhad pevnosti provést přímo v přístroji in-situ.

V experimentální části byly zkoušeny hotové betonové dílce vyrobené v rámci výzkumné činnosti na ÚSZK. Bylo porovnáno měření pomocí tvrdoměrů SilverSchmidt PC typ N a OriginalSchmidt typ N s výsledky provedených jádrových vývrtů. U receptur č. I a II bez plastifikátorů OriginalSchmidt N získal nejpřesnější hodnoty (součinitel upřesnění α velice blízký 1). U receptur č. III a IV použitím plastifikátorů výrazně vzrostla pevnost, ale tvrdost zůstala prakticky stejná (součinitel upřesnění α výrazně vzrostl nad 1). Součinitelé upřesnění α u přístroje SilverSchmidt N jsou výrazně nižší než 1, jelikož kalibrační vztahy dodané výrobcem byly tvořeny pro moderní betony a receptury použité na zkoušené dílce jim neodpovídaly svými vlastnostmi. Pokud se však zkoušky upřesní

jádrovými vývrty jsou výsledky blíže realitě.

Další výzkum by měl být zaměřen na chování přístroje SilverSchmidt při zkoušení moderních betonů a zvláště typu L s hříbovým nástavcem pro nízkopevnostní betony a pro zjišťování pevností mladého betonu.

LITERATURA

- [1] ČSN 73 1370. *Nedestruktivní zkoušení betonu - Společná ustanovení*. Praha: Technický a zkušební ústav stavební, 2011.
- [2] ČSN 73 1373. *Nedestruktivní zkoušení betonu - Tvrdoměrné metody zkoušení betonu*. Praha: Technický a zkušební ústav stavební, 2011.
- [3] ČSN 73 2011. *Nedeštruktívne skúšanie betónových konštrukcií*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1986.
- [4] ČSN EN 12504-2. *Zkoušení betonu v konstrukcích - Část 2: Nedestruktivní zkoušení - Stanovení tvrdosti odrazovým tvrdoměrem*. Praha: Český normalizační institut, 2002.
- [5] ČSN EN 13791. *Posuzování pevnosti betonu v tlaku v konstrukcích a v prefabrikovaných dílcích*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [6] ČSN EN 206-1. *Beton - Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [7] SCHMID, Pavel. *Zkušebnictví a technologie: Modul BI02-M02 Stavební zkušebnictví* [online]. Brno: VUT v Brně, FAST, 2004 [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: <https://intranet.study.fce.vutbr.cz/studium/materialy/opory.asp>
- [8] ŽÍDEK, Libor. *Technická měření a diagnostika staveb: 6. Diagnostika betonových a železobetonových konstrukcí* [online]. 2009 [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: http://www.fast.vsb.cz/miranda2/export/sites-root/fast/206/cs/okruhy/resene-projekty/frvs2009-2529/6_diagnostika_betonovych_a_zelezobetonovych_konstrukci.pdf
- [9] PROCEQ. *Concrete Test Hammer: Estimating Compressive Strength with SilverSchmidt* [online]. 2010 [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: http://www.silverschmidt.com/fileadmin/documents/proceq/products/Concrete/SilverSchmidt/Estimating_compressive_strength_with_SilverSchmidt.pdf
- [10] PROCEQ. *Concrete test hammer: SilverSchmidt Mushroom Plunger User Guide* [online]. 2011 [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: <http://www.proceq.com/site/downloads/silverschmidt.html>
- [11] PROCEQ. *Concrete test hammer: SilverSchmidt New Operating Instructions* [online]. 2010 [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: <http://www.proceq.com/site/downloads/silverschmidt.html>
- [12] PROCEQ. *Concrete test hammer: The SilverSchmidt Reference Curve* [online]. 2011 [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: http://www.silverschmidt.com/fileadmin/documents/proceq/products/Concrete/SilverSchmidt/The_SilverSchmidt_Reference_Curve.pdf
- [13] Proceq [online]. 2012 [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: <http://www.proceq.com/en/non-destructive-test-equipment/concrete-testing/concrete-test-hammer.html>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

A	Hodnota odrazu (ČSN)	
A_d	Zatěžovaná plocha jádrového vývrtu	[mm ²]
ASTM	Severoamerická norma	
BAM	Federální institut pro výzkum materiálů a testování v Berlíně	
$Ca(OH)_2$	Hydroxid vápenatý	
$CaCO_3$	Uhličitan vápenatý	
CO_2	Oxid uhličitý	
ČSN	Česká technická norma	
ČSN EN	Česká verze evropské normy	
D	Průměr ocelové kalené kuličky	[mm]
d	Průměr jádrového vývrtu	[mm]
Φd	Průměrná hodnota průměru jádrového vývrtu	[mm]
e	Eulerovo číslo	
EN	Evropská norma	
F	Síla zatlačování, Síla na porušení vzorku	[kN]
f_b	Upřesněná pevnost betonu v tlaku	[MPa]
f_{be}	Pevnost betonu v tlaku s nezaručenou přesností	[MPa]
f_{bei}	Pevnost betonu v tlaku s nezaručenou přesností i-tého zkušební vzorku	[MPa]
f_{bg}	Pevnost betonu v tlaku se zaručenou přesností	[MPa]
f_{bi}	Pevnost betonu v tlaku i-tého zkušební vzorku	[MPa]
f_{bj}	Výsledná pevnost betonu v tlaku	[MPa]
f_{bki}	Pevnost betonu zjištěná upřesněnou zkouškou	[MPa]
f_c	Pevnost betonu v tlaku určená z kalibrační křivky	[MPa]
f_{ck}	Charakteristická pevnost betonu v tlaku	[MPa]
$f_{ck,cube}$	Charakteristická pevnost betonu v tlaku na zkušebních krychelných	[MPa]
$f_{ck,cyl}$	Charakteristická pevnost betonu v tlaku na zkušebních válcích	[MPa]
$f_{ck,is}$	Charakteristická pevnost betonu v tlaku v konstrukci	[MPa]
f_{is}	Pevnost na jádrovém vývrtu	[MPa]
$f_{is,min}$	Nejnižší výsledek zkoušky betonu v tlaku v konstrukci	[MPa]
$f_{is,vývrt}$	Pevnost betonu v tlaku určená z jádrových vývrtů	[MPa]
$f_{m(n),is}$	Aritmetický průměr zkoušek pevnosti betonu v tlaku v konstrukci	[MPa]
f_R	Pevnost betonu v tlaku zjištěná z kalibrační křivky	[MPa]
Φf_R	Průměr pevnosti betonu v tlaku z kalibrační křivky	[MPa]
H_2O	Voda	
HB	Tvrдость podle Brinella	

<i>HJ</i>	Tvrдость podle Janky	
<i>HR</i>	Tvrдость podle Rockwella	
<i>HV</i>	Tvrдость podle Vickerse	
<i>JGJ</i>	Čínská norma	
<i>k_l</i>	Součinitel závislý na počtu zkušebních dvojic	
<i>k_f</i>	Počet parametrů volené funkce kalibračního vztahu	
<i>LCD</i>	Displej z tekutých krystalů (liquid crystal display)	
<i>PC</i>	Osobní počítač (personal computer), SilverSchmidt propojitelný s PC	
<i>pH</i>	Určení kyselosti nebo zásaditosti - potenciál vodíku (potential of hydrogen)	
<i>Q</i>	Odrazový koeficient	
<i>ΦQ</i>	Průměrná hodnota odrazového koeficientu	
<i>R</i>	Hodnota odrazu (ČSN EN)	
<i>r</i>	Součinitel korelace	
<i>r²</i>	Součinitel determinace	
<i>s</i>	Směrodatná odchylka	
<i>s_r</i>	Výběrová směrodatná odchylka	
<i>s_r</i>	Směrodatná odchylka	
<i>s_{r,cub}</i>	Směrodatná odchylka krychelných pevností zjištěných v lise	
<i>s_{r,ned}</i>	Směrodatná odchylka pevností zjištěných nedestruktivní metodou	
<i>s_{rez}</i>	Reziduální směrodatná odchylka	
<i>s_{rez,e}</i>	Reziduální směrodatná odchylka	
<i>ST</i>	Standardní model SilverSchmidt	
<i>s_x</i>	Výběrová směrodatná odchylka	
<i>USB</i>	Univerzální sériová sběrnice (Universal Serial Bus)	
<i>α</i>	Upřesňující součinitel	
<i>α_t</i>	Součinitel závislý na stáří zkoušeného betonu	
<i>α_w</i>	Součinitel závislý na vlhkosti zkoušeného betonu	
<i>β_n</i>	Součinitel odhadu 5 % kvantilu	
<i>δf</i>	Rozdíl mezi pevností jádrového vývrtnu a pevností zjištěné ze základní křivky	[MPa]
<i>Δf</i>	Posun základní křivky	
<i>δf_{m(n)}</i>	Aritmetický průměr rozdílů posunů	[MPa]
<i>ζ</i>	Korekční součinitel	
<i>ψ</i>	Opravný součinitel	