

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
*BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY*

FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND  
COMPONENTS

# POROVNÁNÍ KALIBRAČNÍCH VZTAHŮ PRO STANOVENÍ PEVNOSTI V TLAKU RŮZNÝCH TYPŮ BETONŮ Z NEDESTRUKTIVNÍCH ZKOUŠEK

COMPARISON OF CALIBRATION RELATIONSHIPS FOR DETERMINING THE COMPRESSIVE STRENGTH OF  
VARIOUS TYPES CONCRETE OF NON-DESTRUCTIVE TESTING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**VÁCLAV KAPLAN**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. JIŘÍ BROŽOVSKÝ, CSc.**

*BRNO 2015*



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

**Studijní program** B3607 Stavební inženýrství  
**Typ studijního programu** Bakalářský studijní program s prezenční formou studia  
**Studijní obor** 3607R020 Stavebně materiálové inženýrství  
**Pracoviště** Ústav technologie stavebních hmot a dílců

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

**Student** Václav Kaplan

**Název** Porovnání kalibračních vztahů pro stanovení pevnosti v tlaku různých typů betonů z nedestruktivních zkoušek

**Vedoucí bakalářské práce** doc. Ing. Jiří Brožovský, CSc.

**Datum zadání bakalářské práce** 30. 11. 2014

**Datum odevzdání bakalářské práce** 29. 5. 2015

V Brně dne 30. 11. 2014

.....  
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Vedoucí ústavu

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

## **Podklady a literatura**

AĪTCIN, P.-C. Vysokohodnotný beton., ĀKAIT, 2005. ISBN 80-86769-39-9.

ANTON, O. a kol. Základy zkušebnictví. Návody do cviĀen. Brno: Vysok uĀen technické v Brně, Fakulta stavební, 2002,. ISBN 80-214-2079-0.

1954, 624 str. III-4-B3-L17.

BUNGEY, J. H. Determining concrete strength by using small diameter cores. Magazine of Concrete Research,

CEMBUREAU. Lightweight aggregate concrete –technology and world applications. 1974.

Ālnky v odborných Āasopisech a z konferencí zahraniĀn a tuzemsk.

Pslušn Āesk a zahraniĀn technické normy.

## **Zásady pro vypracování**

Cílem práce je porovnání kalibraĀnch vztahů pro urĀen pevnosti v tlaku i z nedestruktivních zkoušek betonů různých typů uvedených technických normách a odborné literatuře. Budou studovány vztahy pro metodu odrazového tvrdoměru, ultrazvukovou impulsovou metodu a pro metodu SonReb.

Pro naplnn zadání práce je třeba :

Uvést stručnou charakteristiku jednotlivých druhů betonů.

Uvést základních charakteristiky jednotlivé typů pevnosti betonu.

Uvést základní popis nedestruktivních metod (metoda odrazového tvrdoměru, ultrazvukov impulsov metoda a kombinovan metoda SonReb).

Provést rešerši technických norem národních a zahraniĀnch a odborné literatury pro získání pslušnch vztahů pro jednotlivé nedestruktivní metody. Pro nalezen vztahy uvést podmínky jejich použit, v ppd, že budou uvedeny.

Provést analýzu a porovnání kalibraĀnch vztahů pro jednotlivé nedestruktivní metody ve vztahu ke kalibraĀnm vztahům uvedenm v existujících normách zahrnutých v systému Āeskch technických norem.

Rozsah práce cca 40 stran.

## **Struktura bakalárské/diplomov práce**

VŠKP vypracujte a rozĀleňte podle dále uveden struktury:

1. Textov Āst VŠKP zpracovan podle Směrnice rektora "prava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikaĀnch prací" a Směrnice děkana "prava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikaĀnch prací na FAST VUT" (povinn souĀst VŠKP).
2. Plohy textov Āsti VŠKP zpracovan podle Směrnice rektora "prava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikaĀnch prací" a Směrnice děkana "prava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikaĀnch prací na FAST VUT" (nepovinn souĀst VŠKP v ppd, že plohy nejsou souĀst textov Āsti VŠKP, ale textovou Āst doplňují).

.....

doc. Ing. Jiří Brožovský, CSc.

Vedoucí bakalárské práce

## **Abstrakt**

Bakalářská práce se zabývá porovnáním kalibračních vztahů pro určení pevnosti betonu v tlaku z nedestruktivního zkoušení. Uvádí postupy stanovení pevnosti betonu v tlaku ze zkoušení nedestruktivními metodami, mezi které patří metoda odrazových tvrdoměrů, ultrazvuková impulsová metoda a kombinovaná metoda SonReb pro různé druhy betonu. V rámci práce jsou popsány zkoušené druhy betonů, mezi které patří betony obyčejné, vysokohodnotné a vysokopevnostní, lehké a samozhutitelné. V práci jsou dále popsány použité nedestruktivní metody určené k výpočtu pevnosti betonu v tlaku, podmínky jejich použití a české technické normy vztahující se k nedestruktivnímu zkoušení. K porovnání jsou využity kalibrační vztahy uvedené v technických normách, výrobci zkušebních zařízení a z odborné literatury. V práci jsou dále popsány použité nedestruktivní metody určené k výpočtu pevnosti betonu v tlaku, podmínky jejich použití a české technické normy vztahující se k nedestruktivnímu zkoušení. K porovnání jsou využity kalibrační vztahy uvedené v technických normách, výrobci zkušebních zařízení a z odborné literatury.

## **Klíčová slova**

Pevnost betonu v tlaku, nedestruktivní zkoušení, kalibrační vztah, metoda odrazových tvrdoměrů, ultrazvuková impulsová metoda, kombinovaná metoda SonReb.

## **Abstract**

The bachelor thesis deals with the comparison of calibration relationships for compressive strength of concrete by non-destructive testing. The work describes the methods for the determination of compressive strength of concrete obtained by non-destructive methods, including rebound hammer method, ultrasonic pulse method and combined SonReb method for various types of concrete. In thesis are described species tested concretes obtained normal-weight concrete, high-performance and high-strength concrete, light-weight concrete and self-compacted concrete. In this work are described below used types of non-destructive testing, terms of use and czech technical standards related with non-destructive testing. For the comparisons are utilized calibration relationships of technical standards manufacturers of test equipment and specialised literature.

## **Keywords**

Compressive strength of concrete, non-destructive testing, calibration relationships, rebound hammer test method, ultrasonic pulse method and combined SonReb method.

## **Bibliografická citace VŠKP**

Václav Kaplan *Porovnání kalibračních vztahů pro stanovení pevnosti v tlaku různých typů betonů z nedestruktivních zkoušek*. Brno, 2015. 81 s., 2 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Brožovský, CSc.

**Prohlášení:**

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

V Brně dne 25.5.2015

.....  
podpis autora  
Václav Kaplan

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Jiřímu Brožovskému CSc. za pomoc, cenné rady, připomínky a přínosné konzultace, které mi poskytl při zpracování této práce.

Dále bych chtěl poděkovat Mgr. Tereze Podzimkové za podporu po celou dobu zpracování práce a závěrečnou korekturu.

Tato bakalářská práce byla zpracována s využitím infrastruktury Centra AdMaS.

# OBSAH

1 Úvod.....	10
2 Cíle práce.....	11
3 Základní charakteristiky různých druhů betonů.....	12
3.1 Rozdělení a definice betonů .....	12
3.2 Obyčejné betony .....	12
3.3 Lehké betony .....	12
3.4 Těžké betony .....	13
3.5 Vysokopevnostní betony.....	13
3.6 Vysokohodnotné betony .....	13
3.7 Samozhutnitelné betony .....	13
4 Základní vybrané nedestruktivní metody využívané pro zkoušení betonů.....	14
4.1 Parametry z nedestruktivního zkoušení, ze kterých se stanovuje pevnost betonu v tlaku. .....	14
4.1.1 Metoda odrazového tvrdoměru .....	14
4.1.2 Ultrazvuková impulsová metoda.....	15
4.1.3 Kombinovaná metoda SonReb .....	16
4.2 Druhy pevností betonu v tlaku .....	16
4.3 Metoda odrazových tvrdoměrů systému Schmidt .....	17
4.3.1 Princip metody mechanického tvrdoměru systému Schmidt .....	18
4.3.2 Typy tvrdoměrů .....	18
4.4 Ultrazvuková impulsová metoda.....	18
4.4.1 Princip .....	18
4.5 Kombinovaná metoda: SonReb.....	19
4.5.1 Princip .....	19
4.5.2 Vyhodnocení výsledků zkoušek .....	19
5 Kalibrační vztahy – zpracování a typy.....	20
5.1 Druhy kalibračních vztahů .....	20
5.2 Zpracování kalibračního vztahu .....	21
5.3 Posouzení vhodnosti kalibračního vztahu .....	21
5.3.1 Posouzení vhodnosti kalibračního vztahu podle koeficientu korelace.....	21
5.3.2 Posouzení vhodnosti kalibračního vztahu podle reziduální směrodatné odchylky ..	21
6 Kalibrační vztahy pro určení pevnosti v tlaku betonu ze zkoušení odrazovým tvrdoměrem systému Schmidt.....	22
6.1 Obyčejné betony .....	23
6.1.1 Kalibrační vztahy z ČSN 73 1373 .....	23
6.1.2 Kalibrační vztahy z ČSN EN 13791.....	26
6.1.3 Kalibrační vztahy z JGJ/T 23-2011 .....	26
6.1.4 Kalibrační vztahy uváděné k tvrdoměrům firmou Proceq .....	27
6.1.5 Pevnostní kalibrační vztahy z odborné literatury .....	28
6.2 Vysokopevnostní a vysokohodnotné betony .....	30
6.3 Lehké betony .....	32
6.4 Samozhutnitelné betony .....	35



6.5 Zhodnocení .....	35
7 Kalibrační vztahy pro určení pevnosti v tlaku betonu ze zkoušení ultrazvukovou impulsovou metodou.....	35
7.1 Obyčejné betony .....	36
7.1.1 Kalibrační vztah z ČSN EN 13791 .....	36
7.1.2 Kalibrační vztah z ČSN 73 1371 .....	36
7.1.3 Kalibrační vztahy z odborné literatury .....	36
7.2 Vysokopevnostní a vysokohodnotné betony .....	38
7.3 Samozhutnitelné betony .....	40
7.4 Zhodnocení .....	40
8 Kalibrační vztahy pro určení pevnosti v tlaku betonu ze zkoušení kombinovanou metodou SonReb.....	41
8.1 Kalibrační vztah z ČSN 73 2011 .....	41
8.2 Kalibrační vztahy z odborné literatury .....	41
8.3 Zhodnocení .....	43
9 Porovnání kalibračních vztahů pro výpočet pevnosti betonu v tlaku.....	43
9.1 Metoda odrazových tvrdoměrů systém Schmidt .....	44
9.1.1 Obyčejné betony .....	44
9.1.2 Vysokopevnostní a vysokohodnotné betony .....	48
9.1.3 Lehké betony .....	50
9.1.4 Samozhutnitelné betony .....	52
9.2 Ultrazvuková metoda .....	54
9.2.1 Obyčejné betony .....	54
9.2.2 Vysokopevnostní a vysokohodnotné betony .....	58
9.2.3 Samozhutnitelné betony .....	60
9.3 Kombinovaná metoda.....	62
9.4 Diskuze k výsledkům porovnání kalibračních vztahů.....	63
9.4.1 Metoda odrazových tvrdoměrů .....	63
9.4.2 Ultrazvuková impulsová metoda.....	66
9.4.3 Kombinovaná metoda.....	68
10 Závěr.....	70
11 Seznam použité literatury.....	72
12 Seznam použitých zkratk a symbolů.....	75
13 Seznam tabulek.....	76
14 Seznam obrázků.....	79
15 Seznam příloh.....	80
16 Přílohy.....	81

# 1 Úvod

Kontrola kvality staveb je jedním ze základních požadavků ve stavebnictví. Vzhledem k tomu, že v České republice převažují betonové konstrukce, je jednou z hlavních sledovaných veličin při kontrole staveb pevnost betonu v tlaku.

Pevnost betonu v tlaku je možné zkoumat přímými i nepřímými metodami. U přímých metod se pevnost v tlaku zkouší destruktivně, odebráním zkušební vzorku ze sledované konstrukce a zatěžováním ve zkušebním lisu. Tento způsob zkoušení je přesný, avšak při odběru vzorků dochází k narušení, respektive oslabení, vyšetřované konstrukce. Z tohoto důvodu jsou v praxi využívány nedestruktivní metody zkoušení, které nezpůsobují žádné nebo zanedbatelné poškození stavební konstrukce.

Mezi nejvíce používané nedestruktivní metody ke zjištění pevností betonů v tlaku patří metoda odrazových tvrdoměrů systému Schmidt, ultrazvuková impulsová metoda, případně jejich kombinace, tzv. metoda SonReb.

Vzhledem k tomu, že přesnost nedestruktivního zkoušení je ovlivňována různými faktory (např. vlhkost, stáří, stupeň karbonatce, objemová hmotnost, hutnost betonu, velikost zrn kameniva), tak pro různé typy betonů mohou stejné hodnoty parametrů nedestruktivního zkoušení znamenat různé hodnoty pevnosti v tlaku.

Pro určení pevnosti v tlaku z nedestruktivních zkoušek je třeba mít k dispozici kalibrační vztahy. Kalibrační vztahy je nutné vypracovat pro jednotlivé druhy betonu, ale i pro betony různého stáří, vlhkosti či jiných vlastností, které mohou ovlivnit zkoušený parametr nedestruktivního zkoušení. Pro použití kalibračních vztahů je třeba zajistit dostatečnou těsnost korelace mezi pevností betonu v tlaku a parametrem z nedestruktivního zkoušení. Hodnoty pevnosti v tlaku vypočítané z těchto kalibračních vztahů mají však charakter neupřesněné pevnosti.

Pro upřesnění pevnosti v tlaku z nedestruktivních zkoušek se odebírá omezený počet jádrových vývrtů, na kterých se zkouší pevnost v tlaku destruktivně, a stanovuje se upřesňující součinitel.

## 2 Cíle práce

Cílem práce je porovnání kalibračních vztahů pro určení pevnosti betonu v tlaku, z různých typů nedestruktivních zkoušek, pro různé druhy betonů, uvedených v technických normách a odborné literatuře.

V práci jsou uvedeny základní charakteristiky obyčejných, lehkých, vysokopevnostních, vysokohodnotných, těžkých a samozhutnitelných betonů. Dále jsou uvedeny základní popisy a principy metody odrazových tvrdoměrů systému Schmidt, metody SonReb a ultrazvukové impulsové metody.

Součástí práce je také vyhledání kalibračních vztahů pro určení pevnosti betonu v tlaku, z národních a zahraničních technických norem a odborné literatury. Kalibrační vztahy jsou uvedeny a rozčleněny podle druhu betonu a typu nedestruktivního zkoušení. U jednotlivých kalibračních vztahů jsou připojeny podmínky jejich použití, pokud jsou uvedeny autory. Na zpracovaných kalibračních vztazích je provedeno porovnání kalibračních vztahů pro jednotlivé nedestruktivní metody a druhy betonů.

Výstupem práce je vyhodnocení a porovnání hodnot pevností betonu v tlaku ve vztahu k existujícím normám zahrnutým v systému českých technických norem, případně ke kalibračním vztahům zpracovaným v českých podmínkách.

## 3 Základní charakteristiky různých druhů betonů

### 3.1 Rozdělení a definice betonů

Beton je kompozitní materiál ze směsi cementu, hrubého a drobného kameniva a vody, s přísadami, příměsemi nebo bez nich. Beton získává své základní vlastnosti hydratací cementu.

Betony můžeme rozdělit podle typu na [1]:

- *Obyčejný beton (Normal-weight concrete);*
- *Lehký beton (Lightweight Concrete);*
- *Těžký beton (Heavy-weight Concrete);*
- *Vysokohodnotný beton (High Performace Concrete);*
- *Vysokopevnostní beton (High Strenght Concrete);*
- *Samozhutnitelný beton (Self Compacted Concrete).*

### 3.2 Obyčejné betony

Dle normy ČSN EN 206 [2] se za obyčejný beton považuje takový beton, který má po vysušení v sušárně objemovou hmotnost v rozmezí 2000–2600 kg/m<sup>3</sup>. Dle této normy se za obyčejný beton považuje beton tříd od C 8/10 do C 100/115 (včetně).

### 3.3 Lehké betony

Lehké betony jsou definovány na základě své objemové hmotnosti v suchém stavu, která se může pohybovat v rozmezí od 300 kg/m<sup>3</sup> do 2000 kg/m<sup>3</sup> [3].

Pro lehké betony vyhovující ČSN EN 206 [2] je ovšem požadovaná spodní hranice 800 kg/m<sup>3</sup>. Dle této normy se za lehký beton považuje takový, který má po vysušení v sušárně objemovou hmotnost mezi 800 kg/m<sup>3</sup> a 2000 kg/m<sup>3</sup>. Pevnostní třídy těchto betonů jsou v rozmezí od LC 8/9 do LC 80/88, betony vyšších pevnostních tříd jsou považovány za vysokopevnostní betony.

### **3.4 Těžké betony**

Norma ČSN EN 206 [2] definuje těžký beton jako takový, který má po vysušení v sušárně objemovou hmotností vyšší než  $2600 \text{ kg/m}^3$ .

Pevnostní třídy jsou zde obdobné jako u obyčejného betonu, resp. vysokopevnostních betonů.

### **3.5 Vysokopevnostní betony**

V současné ČSN EN 206 [2] nejsou vysokopevnostní betony definovány, ale ve znění platném do 1. 7. 2014 se za vysokopevnostní beton považuje beton pevnostních tříd od C 55/67 výše a LC 50/55 výše [4].

### **3.6 Vysokohodnotné betony**

Dle předpisu TP 226 [5] (Vysokohodnotné betony pro mosty PK), který v českých podmínkách obsahuje zřejmě nejobsáhlejší terminologii této skupiny materiálů, se za vysokohodnotný beton považuje beton pevnostních tříd C 55/67 až C 90/105. Vysoká pevnost ale není jedinou vlastností vysokohodnotných betonů. Za vysokohodnotný beton považujeme takový, který má alespoň jednu vylepšenou vlastnost, například pevnost, trvanlivost, odolnost, nasákavost, permeabilitu atd.

Obecně lze tvrdit, že vysokohodnotné betony nejsou ničím jiným než betony s velmi nízkou pórovitostí, které je dosaženo použitím menšího množství záměsové vody (vodní součinitel  $w = 0,35-0,40$ ) než v obyčejném betonu za použití superplastifikátorů [6].

### **3.7 Samozhutnitelné betony**

Dle normy ČSN EN 206 [2] se za samozhutnitelný beton považuje takový beton, který teče jen svou vlastní váhou, vyplňuje bednění s umístěnou výztuží, kabely a podobně, při čemž zůstává stále homogenní.

Samozhutnitelný beton může být vyroben ve stejných pevnostních třídách jako obyčejné a vysokopevnostní betony.

## **4 Základní vybrané nedestruktivní metody využívané pro zkoušení betonů**

Pro zjišťování pevnosti betonu v tlaku se užívá řada nedestruktivních a semidestruktivních metod. Pro sledování vlastností materiálů, a to jak při laboratorních zkouškách, tak i pro hodnocení materiálů zabudovaných v konstrukci, jsou nedestruktivní metody kodifikovány v platných českých technických normách.

Nejčastěji využívané nedestruktivní metody pro stanovení pevnosti betonu v tlaku zabudovaného v konstrukci jsou:

- metoda odrazového tvrdoměru;
- ultrazvuková impulsová metoda;
- kombinovaná metoda SonReb.

### **4.1 Parametry z nedestruktivního zkoušení, ze kterých se stanovuje pevnost betonu v tlaku.**

#### **4.1.1 Metoda odrazového tvrdoměru**

Tato metoda je uvedena ve dvou českých technických normách:

- ČSN EN 12504-2 „Zkoušení betonu v konstrukcích – Část 2: Nedestruktivní zkoušení – Stanovení tvrdosti odrazovým tvrdoměrem“
- ČSN 73 1373 „Nedestruktivní zkoušení betonu – Tvrdoměrné metody zkoušení betonu“

ČSN EN 12504-2 [7] uvádí požadavky na zkušební zařízení, plochu, zkušební postup, vyhodnocení výsledků zkoušky a protokol o zkoušce pro zkoušení betonu v konstrukcích odrazovým tvrdoměrem systému Schmidt.

ČSN 73 1373 [8] obsahuje požadavky na zkušební místo, použití tvrdoměrných metod, zkušební postup, způsoby vyhodnocení a úpravu výsledků v důsledku stáří a vlhkostního stavu betonu. Uvádí kalibrační vztahy pro vypočtení pevnosti betonu v tlaku s nezaručenou pevností z hodnoty odrazu. Uvádí postup pro upřesnění výsledků nedestruktivních zkoušek.

Parametrem, ze kterého se určuje pevnost betonu v tlaku, je:

- hodnota odrazu
  - *hodnota indikovaná na zařízení přístroje (měřená délka vratné dráhy úderného zařízení přístroje – beranu, kyvadla), která je závislá na pružné reakci betonu.*

#### **4.1.2 Ultrazvuková impulsová metoda**

Tato metoda je uvedena ve dvou českých technických normách:

- ČSN EN 12504-4 „Zkoušení betonu – Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu“
- ČSN 73 1371 „Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulsová metoda zkoušení betonu“

ČSN EN 12504-4 [9] obsahuje požadavky na zkušební zařízení, provádění zkoušek, zkušební postup, vyjádření výsledků a protokol o zkoušce. V informativní příloze jsou uvedeny faktory ovlivňující měření.

ČSN 73 1371 [10] uvádí postupy nedestruktivního zkoušení ultrazvukovou impulsovou metodou, nároky na zkušební zařízení, způsob vyhodnocení výsledků zkoušky. Pod čarou je také uveden kalibrační vztah pro výpočet pevnosti betonu v tlaku s nezaručenou pevností. Norma také uvádí postupy pro stanovení dynamického modulu pružnosti v tlaku a tahu.

Parametrem, ze kterého se určuje pevnost betonu v tlaku, je:

- rychlost šíření ultrazvukového impulsu
  - rychlostí šíření se rozumí doba, za kterou projde svazek vln ultrazvukového vlnění zkoušeným vzorkem po délce měřicí základny. Hodnota je uváděna v  $\text{km/s}^2$ . nebo  $\text{m/s}$ .

Rychlost šíření ultrazvukového impulsu se stanoví z:

- doby průchodu
  - *doba šíření ultrazvukového impulsu vyslaného budičem a přijímaného snímačem při průchodu vloženým betonem.*

- délky měřící základny
  - *nejkratší přímá spojnice středů dotykových ploch sond zkušebního přístroje; je ukazatelem určitých měřených veličin vyčíslených jako průměr z hodnot naměřených na jednom zkušebním místě.*

### 4.1.3 Kombinovaná metoda SonReb

Kombinovaná metoda SonReb je kombinací ultrazvukové impulsové metody a metody odrazových tvrdoměrů systému Schmidt, zpravidla se jedná o typ N. Metoda SonReb není kodifikována v samostatné české technické normě, ale je uvedena v příloze C ČSN 73 2011 [12] s poznámkou informativní. Dle této normy lze získat hodnoty krychelné pevnosti betonu v tlaku bez zkoušení na porovnávacích zkušebních tělesech. V takovém případě však výsledky nemají váhu zkoušek upřesněných ve smyslu ČSN 73 1370 [11]. Norma uvádí, na jakých zkušebním místech mají být provedeny zkoušky, a také kalibrační vztah pro výpočet pevnosti betonu v tlaku pomocí kombinované metody.

Parametrem, ze kterého se určuje pevnost betonu v tlaku, je:

- rychlost šíření ultrazvukového impulzu
  - rychlostí šíření se rozumí doba, za kterou projde svazek vln ultrazvukového vlnění zkoušeným vzorkem po délce měřící základny. Hodnota je uváděna v  $\text{km/s}^2$  [10].
- hodnota odrazu
  - *jde o hodnotu indikovanou na zařízení přístroje (měřená délka vratné dráhy úderného zařízení přístroje – beranu, kyvadla), která je závislá na pružné reakci betonu [7].*

## 4.2 Druhy pevností betonu v tlaku

V českých technických normách se můžeme setkat s několika druhy pevností betonu v tlaku.

V ČSN EN 12504-1 [41] je uvedena tento typ pevnosti:

- pevnost betonu v tlaku stanovená na zkušební krychli nebo válci
  - jde o pevnost na zkušebních tělesech v poměrech délky k výšce 1:1 (krychle) a 1:2 (válce), kdy se pevnost v tlaku určí jako podíl maximálního



zatížení při porušení a průřezové plochy zkušební tělesa, na kterou působí zatížení v tlaku. Je udávána v MPa nebo N/mm<sup>2</sup>.

V ČSN 73 1373 [8] jsou uvedeny tyto typy pevností:

- pevnost betonu v tlaku s nezaručenou přesností
  - jde o takovou pevnost betonu v tlaku při níž se ukazatel tvrdoměrného zkoušení vyhodnotí podle obecného nebo směrného kalibračního vztahu.
- pevnost betonu v tlaku upřesněná
  - tato pevnost v tlaku je definována jako taková, při níž se ukazatel tvrdoměrného zkoušení vyhodnotí podle úzkého nebo širokého určujícího kalibračního vztahu, případně podle obecného či směrného kalibračního vztahu upřesněného součinitelem  $\alpha$ .

V ČSN EN 13791[13] se uvádí tyto definice pevností betonu v tlaku:

- normová pevnost betonu v tlaku
  - *pevnost betonu v tlaku stanovená na normových zkušebních tělesech, které jsou odebrány, zhotoveny, ošetřeny a zkoušeny dle ČSN EN 12350-1, ČSN EN 12350-2 a ČSN EN 12350-3.*
- pevnost betonu v tlaku vývrtu
  - *pevnost v tlaku vývrtu stanovená dle ČSN EN 12504-1.*
- pevnost betonu v tlaku v konstrukci
  - *pevnost v konstrukčním prvku nebo v prefabrikovaném betonovém dílci vyjádřena jako ekvivalentní pevnost normové zkušební krychle nebo válce.*
- charakteristická pevnost betonu v tlaku v konstrukci
  - *hodnota pevnosti betonu v tlaku, pod kterou může být nejvýše 5 % všech možných výsledků pevnosti základní souboru daného objemu betonu.*

### **4.3 Metoda odrazových tvrdoměrů systému Schmidt**

Metoda odrazových tvrdoměrů systému Schmidt je jednou ze základních metod pro nedestruktivní určení pevnosti v tlaku z betonových konstrukcí. Nejčastěji jsou využívány mechanické tvrdoměry systému Schmidt a v poslední době také elektronické tvrdoměry systému Silver Schmidt.

Na základě pružné reakce na povrchu betonu se pomocí tvrdoměru určí hodnota odrazu, které se pomocí kalibračního vztahu přiřadí pevnost v tlaku [14].

### 4.3.1 Princip metody mechanického tvrdoměru systému Schmidt

Mechanické tvrdoměry systému Schmidt všech typů jsou zkonstruovány na stejném principu. Při uvolnění pružiny vrhají hmotu beranu na razník tvrdoměru, opřeného kulovou plochou o beton. Pružností betonu se beran odrazí a unáší sebou vlečný ukazatel, který na škále pouzdra tvrdoměru ukáže velikost odskoku. Velikost odskoku je vázána na poloze tvrdoměru při zkoušení. Základní poloha kladívka je vodorovná a platí pro ni obecné kalibrační vztahy [15].

### 4.3.2 Typy tvrdoměrů

Mechanické tvrdoměry systému Schmidt jsou vhodné pro zkoušení betonu v konstrukcích a jednotlivé typy se liší v energii úderu [15]:

Typ N = 2,25 J

Typ L = 0,75 J

Typ M = 30 J

V současné době se již mechanický tvrdoměr typu M nevyrábí a je používán pouze zřídka.

## 4.4 Ultrazvuková impulsová metoda

Ve stavebním zkušebnictví se často využívá ultrazvukové impulsové metody. Tato metoda je využívána pro stanovení pevnosti betonu v tlaku méně často, z důvodu vlivu faktorů, které ovlivňují výsledky měření. Častěji je využívána pro nedestruktivní stanovení dynamického modulu pružnosti, porušení vnitřní struktury nebo stanovení změn těchto vlastností v čase [14].

### 4.4.1 Princip

Ultrazvuková impulsová metoda je založena na měření doby průchodu impulsů ultrazvukového vlnění materiálem. Při známé délce měřicí základny vypočítá rychlost šíření ultrazvukového vlnění, která je závislá na kvalitě zkoumaného materiálu. V budiči se vyvolá mechanické tlumené kmitání, které se po průchodu předem známé měřicí základny, zaznamená na snímači [14].

Podle uspořádání sond (budiče a snímače) se rozlišuje prozvučování:

- přímé, kdy jsou budič a snímač umístěny na protilehlých stranách proti sobě;

- polopřímé, kdy jsou budič a snímač umístěny na protilehlých stranách ne přímo proti sobě, anebo na sousedních stranách;
- nepřímé, kdy budič a sonda jsou na stejné straně, v tomto případě se měří povrchové vlny.

## 4.5 Kombinovaná metoda: SonReb

### 4.5.1 Princip

Podstatou kombinované metody SonReb je určení pevnosti betonu v tlaku ze zkoušení ultrazvukovou impulsovou metodou a metodou odrazového tvrdoměru systému Schmidt na jednom zkušebním místě. Tento způsob umožňuje získat přesnější výsledky než ze samostatných zkoušek. Protože tvrdoměrné metody a ultrazvukové impulsové metody jsou ovlivněny různými faktory (např. vlhkost, stáří, karbonatace), spolehlivější odhady lze získat použitím obou metod a následným vypočítáním vhodného kalibračního vztahu [16].

Beton se zkouší na zkušebních místech, která jsou sdružená pro měření ultrazvukovou impulsovou metodou a metodou odrazového tvrdoměru systému Schmidt a která musí být upravená podle platných předpisů a norem pro obě tyto metody, tak aby byly splněny požadavky obou metod [12].

### 4.5.2 Vyhodnocení výsledků zkoušek

Pevnost betonu v tlaku lze získat z provedených zkoušek mechanickým tvrdoměrem systému Schmidt a ultrazvukovou impulsovou metodou vypracováním kalibračního vztahu pomocí metod matematické statistiky, [12].

Kalibrační vztah je zpravidla vyjádřen ve tvaru:

$$f_{ce} = x \cdot v^y \cdot u \cdot R^z \quad (1)$$

Kde:

$f_{ce}$             pevnost betonu v tlaku v MPa

$v$                 rychlost šíření čela podélných ultrazvukových vln v trojrozměrném prostředí  
v km/s

$R$                 hodnota odrazu tvrdoměru systému Schmidt

$x; y; z; u$       hodnoty kalibračního vztahu vypočtené např. regresní analýzou

## 5 Kalibrační vztahy – zpracování a tipy

Kalibrační vztahy vychází z naměřených bodů a stanovují se metodami matematické statistiky např. regresní analýzou. Rozsah kalibračního vztahu dle ČSN 73 1370 musí být takový, aby umožňoval stanovení hodnot sledované vlastnosti všech velikostí, které při zkoušení mohou přicházet v úvahu [11].

### 5.1 Druhy kalibračních vztahů

Dle ČSN 73 1370 [11] se rozlišují následující kalibrační vztahy, které jsou dále popsány:

- obecné;
- směrné;
- určující s úzkým nebo širokým rozsahem.

#### Obecný kalibrační vztah

Pokud není stanoven výrobcem zkušebního přístroje, odvodí se z vyhodnocených zkoušek provedených nejméně na 300 zkušebních vzorcích z betonů různého složení a s použitím různé technologie tak, aby hodnoty sledované vlastnosti byly stejnoměrně rozložené v pravidelných intervalech v celém oboru sledované vlastnosti.

#### Směrný kalibrační vztah

Pokud není stanoven výrobcem zkušebního přístroje, odvodí se z vyhodnocených zkoušek provedených nejméně na 100 zkušebních vzorcích, které byly vyrobeny z volených druhů betonu různého složení, jež přicházejí v úvahu pro sledovanou vlastnost, a volené technologie tak, aby hodnoty sledované vlastnosti byly stejnoměrně rozložené v pravidelných intervalech v celém oboru sledované vlastnosti.

#### Úzký určující kalibrační vztah

Úzký určující kalibrační vztah se pro beton dané třídy odvodí z vyhodnocených zkoušek provedených na takovém počtu zkušebních vzorků, které umožňují stanovení tří nebo čtyř sdružených bodů nebo k nim příslušejícího počtu měřených bodů stejnoměrně rozložených v oboru měřené vlastnosti.

Široký určující kalibrační vztah

Široký určující kalibrační vztah se pro beton daného rozsahu tříd odvodí z vyhodnocených zkoušek, které umožňují stanovení pěti až šesti sdružených bodů nebo k nim příslušejícího počtu měřených bodů stejnoměrně rozložených v oboru měřené vlastnosti.

## 5.2 Vypracování kalibračního vztahu

Dle ČSN 73 1370 [11] se kalibrační vztah vypracovává následujícím způsobem. Z provedených zkoušek na zkušebních tělesech se stanoví hodnota ukazatele nedestruktivního měření podle použité metody a hodnota pevnosti betonu v tlaku stanovená destruktivní zkouškou. Tyto dvojice hodnot se se zpracují pomocí metod matematické statistiky.

## 5.3 Posouzení vhodnosti kalibračního vztahu

Vhodnost kalibračního vztahu lze posuzovat buď podle hodnoty koeficientu korelace, nebo podle hodnoty reziduální směrodatné odchylky.

### 5.3.1 Posouzení vhodnosti kalibračního vztahu podle koeficientu korelace

Ve statistických tabulkách [17] jsou hodnoceny kalibrační vztahy dle koeficientu korelace následovně:

- $r < 0,30$  – nízký stupeň těsnosti vztahu a není příliš významný, zvláště pro malé soubory;
- $0,30 \leq r < 0,50$  – mírný stupeň těsnosti vztahu;
- $0,50 \leq r < 0,70$  – význačná těsnost vztahu;
- $0,70 \leq r < 0,90$  – vysoký stupeň těsnosti vztahu;
- $0,90 \leq r$  – vysoká těsnost mezi proměnnými.

Za prakticky využitelný je považován kalibrační vztah s  $r \geq 0,85$ .

### 5.3.2 Posouzení vhodnosti kalibračního vztahu podle reziduální směrodatné odchylky

V současné době platná ČSN 73 1370 [11] již neuvádí postup pro hodnocení vhodnosti kalibračního vztahu podle reziduální směrodatné odchylky. Tento postup je uveden v již

neplatné ČSN 73 1370: 1982 [18].

Postup pro výpočet směrodatné reziduální odchylka je následující:

Z provedených zkoušek se pro každé zkušební těleso stanoví hodnota ukazatele nedestruktivního zkoušení  $f_{bd}$ , dle příslušné metody a hodnota pevnosti betonu v tlaku stanovená destruktivní metodou  $f_b$ . Reziduální směrodatná odchylka se vypočítá dle vztahů (2–4).

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_i - D_m)}{n - k}} \quad (2)$$

kde

$$D_i = \left| \frac{f_{bi} - f_{bdi}}{f_{bdi}} \right| \quad (3) \quad D_m = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{n} \quad (4)$$

Kde:

n počet měřených bodů kalibračního vztahu;

k počet parametrů volené funkce kalibračního vztahu;

$f_{bi}$  pevnost betonu v tlaku pro i-tý bod kalibračního vztahu z destruktivního zkoušení;

$f_{bdi}$  pevnost betonu v tlaku pro vypočtená z ukazatele nedestruktivního zkoušení pro i-tý bod.

Za vhodný se považuje kalibrační vztah, který uvnitř svého rozsahu nenabývá extrémních hodnot a reziduální směrodatná odchylka  $S \leq 0,12$ .

## 6 Kalibrační vztahy pro určení pevnosti v tlaku betonu ze zkoušení odrazovým tvrdoměrem systému Schmidt

V této kapitole jsou uvedeny kalibrační vztahy pro určení pevnosti betonu v tlaku ze zkoušení mechanickým odrazovým tvrdoměrem systému Schmidt, které byly převzaty z technických norem, návodu výrobce a z odborné literatury. Pro kalibrační vztahy jsou uvedeny podmínky jejich použití, pokud je autoři uvádějí.

## 6.1 Obyčejné betony

Pro obyčejné betonu jsou kalibrační vztahy uvedeny v kap. 6.1.1 až 6.1.5.

### 6.1.1 Kalibrační vztahy z ČSN 73 1373

Kalibrační vztahy uvedené v ČSN 73 1373 [8] jsou zpracovány pro měření pevnosti betonu v rozsahu pevností 13 MPa až 60 MPa pro mechanický tvrdoměr typů N, L a M, případně pro přístroje od jiných výrobců pracující na stejném principu.

Při použití tvrdoměrných metod se předpokládá, že pevnost betonu v tlaku je stejná do hloubky minimálně 200 mm.

Obecné kalibrační vztahy uvedené v ČSN 73 1373 [8] platí pro zkoušení obyčejného hutného betonu, který je zhotoven z běžně používaného hutného kameniva a z portlandského cementu. Tyto vztahy platí pro betony vlhké a přirozeně vlhké ve stáří 14–56 dní. Pro jiný vlhkostní stav a stáří betonu se hodnoty pevnosti v tlaku násobí součinitelem  $\alpha_w$  (součinitel vlhkostního stavu betonu) a  $\alpha_t$  (součinitel zohledňující stáří stavu betonu). Tyto kalibrační vztahy neplatí pro betony z kameniv a cementů neobvyklých vlastností nebo betony injektážní, zhutněné nebo mezerovité.

Kalibrační vztahy z ČSN 73 1373 [8] jsou uvedeny v tabulkách 1, 2 a 3. Jsou rozdělené dle typu tvrdoměru (N, L, M) a také podle směru zkoušení.

Tabulka 1. Kalibrační vztahy uvedené v ČSN 73 1373 pro tvrdoměr Schmidt typ N

<b>Schmidt N</b>			
<b><i>Kalibrační vztahy uvedené v ČSN 73 1373</i></b>			
Vodorovný směr zkoušení	Svisle dolů	Směr svisle nahoru	
$A f_{be} = 1,750 \cdot R - 29,000$ (5)	$A f_{be} = 1,562 \cdot R - 17,813$ (7)	$A f_{be} = 1,850 \cdot R - 40,708$ (9)	
$B f_{be} = 1,786 \cdot R - 30,440$ (6)	$B f_{be} = 1,667 \cdot R - 21,667$ (8)	$B f_{be} = 1,923 \cdot R - 43,611$ (10)	
Oblast použití:	Přímka A je pro odrazy v rozmezí 25 – 40 Přímka B je pro odrazy v rozmezí 41 – 54		
<b><i>Kalibrační vztahy zpracované z tabelárních hodnot v ČSN 73 1373</i></b>			
Směr zkoušení vodorovně	Oblast použití:		Koeficient korelace
$F_c = 0,0095 \cdot R^2 + 1,0046 \cdot R - 14,988$ (11)	$f_c \in \{16; 63\}$	$R \in \{25; 52\}$	$r = 0,9997$
Směr zkoušení svisle dolů	Oblast použití:		Koeficient korelace
$F_c = 0,0065 \cdot R^2 + 1,2249 \cdot R - 13,93$ (12)	$f_c \in \{19; 64\}$	$R \in \{24; 52\}$	$r = 0,9996$
Směr zkoušení dolů pod úhlem 45°	Oblast použití:		Koeficient korelace
$F_c = 0,0076 \cdot R^2 + 1,166 \cdot R - 14,626$ (13)	$f_c \in \{18; 62\}$	$R \in \{24; 50\}$	$r = 0,9997$
Směr zkoušení svisle nahoru	Oblast použití:		Koeficient korelace
$f_c = 0,0081 \cdot R^2 + 1,1346 \cdot R - 24,717$ (14)	$f_c \in \{14; 62\}$	$R \in \{28; 55\}$	$r = 0,9996$
Směr zkoušení nahoru pod úhlem 45°	Oblast použití:		Koeficient korelace
$f_c = 0,0109 \cdot R^2 + 0,9354 \cdot R - 19,136$ (15)	$f_c \in \{16; 63\}$	$R \in \{28; 54\}$	$r = 0,9998$



Tabulka 2. Kalibrační vztahy uvedené v ČSN 73 1373 pro tvrdoměr Schmidt typ L

<b>Schmidt L</b>			
<i>Kalibrační vztahy zkoušení z tabelárních hodnot v ČSN 73 1373</i>			
Směr zkoušení vodorovně	Oblast použití:		Koeficient korelace
$f_c = 0,0061 \cdot R^2 + 1,2187 \cdot R - 9,2771$ (16)	$f_c \in \{9; 60\}$	$R \in \{14; 46\}$	$r = 0,9998$
Směr zkoušení svisle dolů	Oblast použití:		Koeficient korelace
$f_c = 0,0034 \cdot R^2 + 1,3609 \cdot R - 5,9793$ (17)	$f_c \in \{14; 64\}$	$R \in \{14; 46\}$	$r = 0,9998$
Směr zkoušení dolů pod úhlem 45°	Oblast použití:		Koeficient korelace
$f_c = 0,0082 \cdot R^2 + 1,1095 \cdot R - 4,3925$ (18)	$f_c \in \{13; 63\}$	$R \in \{14; 45\}$	$r = 0,9996$
Směr zkoušení svisle nahoru	Oblast použití:		Koeficient korelace
$f_c = 0,0085 \cdot R^2 + 1,1248 \cdot R - 15,908$ (19)	$f_c \in \{9; 57\}$	$R \in \{17; 48\}$	$r = 0,9997$
Směr zkoušení nahoru pod úhlem 45°	Oblast použití:		Koeficient korelace
$f_c = 0,0072 \cdot R^2 + 1,1248 \cdot R - 13,994$ (20)	$f_c \in \{9; 60\}$	$R \in \{19; 48\}$	$r = 0,9997$

Tabulka 3. Kalibrační vztahy uvedené v ČSN 73 1373 pro tvrdoměr Schmidt typ M

<b>Schmidt M</b>			
<i>Kalibrační vztahy zkoušení z tabelárních hodnot v ČSN 73 1373</i>			
Směr zkoušení vodorovně	Oblast použití:		Koeficient korelace
$f_c = 0,0031 \cdot R^2 + 0,0951 \cdot R - 1,2073$ (21)	$f_c \in \{18; 60\}$	$R \in \{23; 43\}$	$r = 0,9995$
Směr zkoušení dolů svisle	Oblast použití:		Koeficient korelace
$f_c = 0,0171 \cdot R^2 + 1,1203 \cdot R - 10,765$ (22)	$f_c \in \{24; 61\}$	$R \in \{23; 40\}$	$r = 0,9997$
Směr zkoušení dolů pod úhlem 45°	Oblast použití:		Koeficient korelace
$f_c = 0,0188 \cdot R^2 + 0,9868 \cdot R - 10,503$ (23)	$f_c \in \{22; 59\}$	$R \in \{23; 40\}$	$r = 0,9998$
Směr zkoušení nahoru svisle	Oblast použití:		Koeficient korelace
$f_c = 0,0272 \cdot R^2 + 0,2538 \cdot R - 12,37$ (24)	$f_c \in \{18; 59\}$	$R \in \{29; 47\}$	$r = 0,9996$
Směr zkoušení nahoru pod úhlem 45°	Oblast použití:		Koeficient korelace
$f_c = 0,0027 \cdot R^2 + 0,3023 \cdot R - 10,679$ (25)	$f_c \in \{21; 60\}$	$R \in \{29; 46\}$	$r = 0,9994$

### 6.1.2 Kalibrační vztahy z ČSN EN 13791

Norma ČSN EN 13791 [13] uvádí kalibrační vztahy, které však nejsou omezeny typem tvrdoměru, druhem pevnosti (krychelná, válcová) a směr zkoušení se zohledňuje dle údajů uváděných výrobcem. Tyto faktory limitují využití uvedených kalibračních vztahů pro hodnocení pevnosti betonu v konstrukci pouze z nedestruktivních zkoušek.

Vyhodnocení zkoušení pevnosti odrazovým tvrdoměrem dle ČSN EN 13791 [13] pro posouzení betonu v tlaku v konstrukci se provádí dle základní křivky a jejího posunu k příslušné úrovni zjištěné ze zkoušek vývrtů. Kalibrační vztah uvedený v normě včetně oblasti použití je uveden v tabulce 4.

Tabulka 4. Kalibrační vztah uvedený v ČSN EN 13791

Kalibrační vztah	Oblast použití
$f_c = 1,25 \cdot R - 23$ (26)	$f_c = 1,73 \cdot R - 34,5$ (27)
$R \in \{20; 24\}$	$R \in \{24; 50\}$

### 6.1.3 Kalibrační vztahy z JGJ/T 23-2011

Pevnost betonu v tlaku je dle této čínské normy [19] zjišťována pomocí Schmidtova tvrdoměru typu N při vodorovném směru zkoušení. Norma uvádí v tabelární podobě pevnosti v tlaku v závislosti na hloubce karbonatace, která je uvažována v intervalu 0–6 mm. Jednotlivé kalibrační vztahy, které byly vypočteny podle zmíněné normy, jsou uvedeny v tabulce 5.

Tabulka 5. Kalibrační vztahy uvedené v JGJ/T 23-2011 pro tvrdoměr Schmidt typ N

<i>Kalibrační vztahy zpracované z tabelárních hodnot v JGJ/T 23-2011, zohledňující hloubku karbonatace povrchu betonu</i>			
Hloubka karbonatace :		0 mm	
$f_c = 0,0263 \cdot R^2 - 0,0181 \cdot R + 0,1448$ (28)			
Oblast použití:	$R \in \{20; 48\}$	Koeficient korelace	$r = 1$
	$f_c \in \{10,3; 60\}$		
Hloubka karbonatace :		3 mm	
$f_c = 0,0199 \cdot R^2 - 0,048 \cdot R + 2,0611$ (29)			
Oblast použití:	$R \in \{22; 55\}$	Koeficient korelace	$r = 0,9999$
	$f_c \in \{10,1; 59,9\}$		
Hloubka karbonatace :		6 mm	
$f_c = 0,0181 \cdot R^2 - 0,2364 \cdot R + 5,4382$ (30)			
Oblast použití:	$R \in \{24; 60\}$	Koeficient korelace	$r = 0,9999$
	$f_c \in \{10,1; 56,4\}$		

#### 6.1.4 Kalibrační vztahy uváděné k tvrdoměrům firmou Proceq

Firma Proceq vyrábí a vyvíjí odrazové tvrdoměry systému Schmidt, ke kterým dodává i zpracované kalibrační vztahy pro tvrdoměr typu N. Základní kalibrační vztahy (30–33) byly zpracovány firmou Proceq, kalibrační vztahy pro specifické druhy betonu (34–36) byly převzaty z Japonského betonářského institutu [20]. Tyto vztahy jsou uvedeny v tabulce 6.

Tabulka 6. Kalibrační vztahy uváděné firmou Proceq

Oficiální křivka pro typ N od Proceq 14-56 dní	Oblast použití:	Tvar:	Pevnost betonu [MPa]
$f_c = 4,513 \cdot e^{0,0526 \cdot R}$ (31)	$R \in \{20; 55\}$	Krychle	$f_c \in \{10; 69\}$
Oficiální křivka pro typ N od Proceq 7 dní	Oblast použití:	Tvar:	Pevnost betonu [MPa]

$f_c = 4,931 \cdot e^{0,0519 \cdot R}$ (32)	$R \in \{20; 50\}$	Krychle	$f_c \in \{12; 59\}$
Oficiální křivka pro typ N od Proceq 14-56 dní	Oblast použití:	Tvar:	Pevnost betonu [MPa]
$f_c = 5,2115 \cdot e^{0,0465 \cdot R}$ (33)	$R \in \{25; 52\}$	Válec	$f_c \in \{16; 60\}$
Oficiální křivka pro typ N od Proceq 7 dní	Oblast použití:	Tvar:	Pevnost betonu [MPa]
$f_c = 4,931 \cdot e^{0,0519 \cdot R}$ (34)	$R \in \{20; 50\}$	Válec	$f_c \in \{14; 67\}$
Portlandský cement	Oblast použití:		Pevnost betonu [MPa]
$f_c = 0,1330 \cdot R^2 + 8,82 \cdot R - 122$ (35)	$R \in \{20; 46\}$		$f_c \in \{10; 60\}$
Mladý beton z portlandského cementu	Oblast použití:		Pevnost betonu [MPa]
$f_c = -0,0803 \cdot R^2 + 20 \cdot R - 253$ (36)	$R \in \{20; 49\}$		$f_c \in \{10; 60\}$
Beton s cementem z obsahem vysokopecních popílků	Oblast použití:		Pevnost betonu [MPa]
$f_c = 0,20 \cdot R^2 + 1,83 \cdot R + 22,4$ (37)	$R \in \{20; 49\}$		$f_c \in \{10; 60\}$
Typická křivka	Oblast použití:		Pevnost betonu [MPa]
$f_c = 0,0485 \cdot R^2 + 12,3R - 146$ (38)	$R \in \{20; 49\}$		$f_c \in \{12; 60\}$

### 6.1.5 Pevnostní kalibrační vztahy z odborné literatury

Problematikou určování pevnosti betonu v tlaku pomocí odrazových tvrdoměrů systému Schmidt se zabývala řada výzkumných týmů. V tabulce 7 jsou uvedeny kalibrační vztahy (35–41) z odborných článků a odborné literatury [21; 22; 23; 24; 25] pro výpočet pevnosti v tlaku ze zkoušení metodou odrazových tvrdoměrů systému Schmidt.

Tabulka 7. Kalibrační vztahy z odborné literatury pro Schmidtův tvrdoměr typu N

Autor:	<b>Gonçalves (1995)</b>
$f_c = 1,73 \cdot R - 34,3$ (39)	
Rozsah platnosti vztahu:	$f_c \in \{18; 42\}$ [MPa]
Zkušební tělesa:	Jádrový vývrt o průměru 70 mm
Stáří zkoušeného betonu:	28-84 dní
Autor:	<b>Qasrawi (2000)</b>
$f_c = 1,353 \cdot R - 17,393$ (40)	
Rozsah platnosti vztahu:	$f_c \in \{6; 42\}$ [MPa]
Zkušební tělesa:	Krychle kde $a = 150$ mm
Složky betonu: kamenivo může být různé	
Autor:	<b>Soshiroda and Voraputhaporn (1999)</b>
$f_c = 1,47 \cdot R - 16,85$ (41)	
Rozsah platnosti vztahu:	$f_c \in \{20; 65\}$ [MPa]
Zkušební tělesa:	Krychle kde $a = 150$ mm
Stáří zkoušeného betonu:	28 dny
Složky betonu: drcené kamenivo do maximálního zrna 32mm	
Autor:	<b>Soshiroda and Voraputhaporn (1999)</b>
$f_c = 1,61 \cdot R - 1,37$ (42)	
Rozsah platnosti vztahu:	$f_c \in \{20; 65\}$ [MPa]
Zkušební tělesa:	Krychle kde $a = 150$ mm
Stáří zkoušeného betonu:	28 dny
Složky betonu: drcené kamenivo do maximálního zrna 32mm	

Autor:	<b>Lima and Silva (2000)</b>
$f_c = 0,0501 \cdot R^{1,8428}$ (43)	
Rozsah platnosti vztahu:	$f_c \in \{25,1; 33,1\}$ [MPa]
Zkušební tělesa:	Válec
Autor:	<b>Evangelista M1 (2002)</b>
$f_c = 0,033 \cdot R \cdot e^{2,02}$ (44)	
Rozsah platnosti vztahu:	$f_c \in \{11; 53\}$ [MPa]
Zkušební tělesa:	Válec 150 x 300 mm
Stáří betonu	28 dní
Složky betonu: kamenivo rula	
Autor:	<b>Evangelista M3 (2002)</b>
$f_c = 0,0252 \cdot R \cdot e^{2,128}$ (45)	
Rozsah platnosti vztahu:	$f_c \in \{8; 49\}$ [MPa]
Zkušební tělesa:	Válec 150 x 300 mm
Stáří betonu	28 dní
Složky betonu: kamenivo Sienit do maximální frakce 19mm	

## 6.2 Vysokopevnostní a vysokohodnotné betony

Pro stanovení pevnosti v tlaku odrazovým tvrdoměrem systému Schmidt vysokopevnostních a vysokohodnotných betonů je četnost kalibračních vztahů podstatně menší než pro obyčejné betony. V tabulce 8 a 9 jsou uvedeny kalibrační vztahy zpracované Brožovským [26] pro Schmidtův tvrdoměr typu N a L a v tabulce 10 jsou uvedeny kalibrační vztahy ze zahraničních publikací. [27, 28]

Tabulka 8. Kalibrační vztahy pro Schmidtův tvrdoměr typu N pro vysokohodnotné a vysokopevnostní betony z odborné literatury [26]

Brožovský 1	Stáří betonu:		1–60 dní
Schmidtův tvrdoměr typu N	Oblast použití:		Koeficient korelace
$f_c = 0,0315 \cdot R^{1,975}$ (46)	$R \in \{15; 64\}$	$f_c \in \{7; 116\}$	$r = 0,97$
Brožovský 2	Stáří betonu:		2–60 dní
Schmidtův tvrdoměr typu N	Oblast použití:		Koeficient korelace
$f_c = 0,0549 \cdot R^{1,8326}$ (47)	$R \in \{30; 64\}$	$f_c \in \{28; 112\}$	$r = 0,94$
Brožovský 3	Stáří betonu:		7–60 dní
Schmidtův tvrdoměr typu N	Oblast použití:		Koeficient korelace
$f_c = 0,0096 \cdot R^2 + 1,4231 \cdot R - 21,8$ (48)	$R \in \{30; 64\}$	$f_c \in \{29; 109\}$	$r = 0,9$
Brožovský 4	Stáří betonu:		2–60 dní
Schmidtův tvrdoměr typu N	Oblast použití:		Koeficient korelace
$f_c = 0,0561 \cdot R^{1,8098}$ (49)	$R \in \{30; 56\}$	$f_c \in \{26; 82\}$	$r = 0,94$
Brožovský 5	Stáří betonu:		2–60 dní
Schmidtův tvrdoměr typu N	Oblast použití:		Koeficient korelace
$f_c = 0,0561 \cdot R^{1,8098}$ (50)	$R \in \{15; 56\}$	$f_c \in \{8; 82\}$	$r = 0,94$

Tabulka 9. Kalibrační vztahy pro Schmidtův tvrdoměr typu L pro vysokohodnotné a vysokopevnostní betony z odborné literatury [26]

Schmidtův tvrdoměr typu L	Stáří betonu:	1–7 dní
	Oblast použití:	Koeficient korelace
$f_c = 0,0914 \cdot R^{1,7443}$ (51)	$R \in \{15; 50\}$	$r = 0,97$
Schmidtův tvrdoměr typu L	Stáří betonu:	2–7 dní
	Oblast použití:	Koeficient korelace
$f_c = 0,03517 \cdot R^{1,3762}$ (52)	$R \in \{25; 56\}$	$r = 0,95$
Schmidtův tvrdoměr typu L	Stáří betonu:	7–60 dní

	Oblast použití:	Koeficient korelace
$f_c = 0,0727 \cdot R^2 - 4,1545 \cdot R + 109,1$ (53)	$R \in \{34; 56\}$	$r = 0,85$

Tabulka 10. Kalibrační vztahy pro vysokohodnotné a vysokopevnostní betony pro Schmidtův tvrdoměr typu N ze zahraniční odborné literatury [27, 28]

Autor:	<b>Almeida (1993)</b>	
$F_c = 1,0407 \cdot R^{1,155}$ (54)		
Rozsah platnosti vztahu:	$f_c \in \{40,1; 120,3\}$ [MPa]	
Zkušební tělesa:	Krychle kde $a = 150$ mm	
Složky betonu: Žulové kamenivo o maximálním zrně 25 mm		
Autor:	<b>Almeida (1993)</b>	
$f_c = 1,041 \cdot R^{1,155}$ (55)		
Rozsah platnosti vztahu:	$f_c \in \{40,1; 120,3\}$ [MPa]	
Zkušební tělesa:	Krychle kde $a = 150$ mm	
Složky betonu: Žulové kamenivo o maximálním zrně 25 mm		
Autor:	<b>Pascale et al (2000)</b>	
$f_c = 0,000135 \cdot R^{3,4424}$ (56)		
Rozsah platnosti vztahu:	$f_c \in \{30; 150\}$ [MPa]	
Zkušební tělesa:	Krychle kde $a = 150$ mm	
Složky betonu: Vápencové kamenivo o maximálním zrně 15 mm		

### 6.3 Lehké betony

Pro stanovení pevnosti v tlaku odrazovým tvrdoměrem systému Schmidt lehkých betonů byly nalezeny vztahy zpracované v ČR Brožovským [29] a vztahy zpracované čínskými výzkumníky, publikované v [30]. V tabulce 11 jsou uvedeny kalibrační vztahy zpracované Brožovským [29] pro Schmidtův tvrdoměr typu N a L a v tabulce 12 jsou



uvedeny kalibrační vztahy publikované v [30] – jsou zde uvedeny kalibrační vztahy pro stanovení pevnosti betonu v tlaku pro různé objemové hmotnosti betonu i kameniva – vztah (83–88). Vztah (89) je souhrnný; zahrnuje všechny typy zkoumaných betonů.

Tabulka 11. Kalibrační vztahy pro Schmidtův tvrdoměr typu N a L pro lehký beton ze zahraniční odborné literatury

Schmidtův tvrdoměr typ N	Počet zkušebních vzorků:		Stáří betonu:
	150		7–180 dní
	Oblast použití:		Koeficient korelace
$f_c = 0,0946 \cdot R^{1,6484}$ (57)	$R \in \{17; 47\}$	$f_c \in \{10; 53\}$	$r = 0,963$
Schmidtův tvrdoměr typ N	Počet zkušebních vzorků:		Stáří betonu:
	45		28 dní
	Oblast použití:		Koeficient korelace
$f_c = 0,321 \cdot R^{1,3146}$ (58)	$R \in \{23; 47\}$	$f_c \in \{19; 51\}$	$r = 0,962$
Schmidtův tvrdoměr typ L	Počet zkušebních vzorků:		Stáří betonu:
	140		7–180 dní
	Oblast použití:		Koeficient korelace
$f_c = 0,2695 \cdot R^{1,3754}$ (59)	$R \in \{26; 42\}$	$f_c \in \{23; 46\}$	$r = 0,939$

Tabulka 12. Kalibrační vztahy pro Schmidtův tvrdoměr typu N pro lehký beton z odborné literatury

Schmidtův tvrdoměr typ N	Objemová hmotnost betonu	Objemová hmotnost lehkého kameniva v betonu
	< 1400	500
	Oblast použití:	
$f_c = 0,0184 \cdot R^{2,0546}$ (60)	$R \in \{27; 39\}$	
Schmidtův tvrdoměr typ N	Objemová hmotnost betonu	Objemová hmotnost lehkého kameniva v betonu
	1400 - 1500	500

	Oblast použití:	
$f_c = 0,0085 \cdot R^{2,2606}$ (61)	$R \in \{27; 39\}$	
Schmidtův tvrdoměr typ N	Objemová hmotnost betonu	Objemová hmotnost lehkého kameniva v betonu
	1500 - 1600	800
	Oblast použití:	
$f_c = 0,0107 \cdot R^{2,2094}$ (62)	$R \in \{27; 41\}$	
Schmidtův tvrdoměr typ N	Objemová hmotnost betonu	Objemová hmotnost lehkého kameniva v betonu
	1600 - 1700	800
	Oblast použití:	
$f_c = 0,0105 \cdot R^{2,1043}$ (63)	$R \in \{27; 46\}$	
Schmidtův tvrdoměr typ N	Objemová hmotnost betonu	Objemová hmotnost lehkého kameniva v betonu
	1700 - 1800	800
	Oblast použití:	
$f_c = 0,0021 \cdot R^{2,6676}$ (64)	$R \in \{27; 46\}$	
Schmidtův tvrdoměr typ N	Objemová hmotnost betonu	Objemová hmotnost lehkého kameniva v betonu
	1800 - 1900	900
	Oblast použití:	
$f_c = 0,0092 \cdot R^{2,2554}$ (65)	$R \in \{27; 46\}$	
Schmidtův tvrdoměr typ N	Objemová hmotnost betonu	Objemová hmotnost lehkého kameniva v betonu
	1400 - 1900	500 - 900
	Oblast použití:	
$f_c = 0,0043 \cdot R^{2,485}$ (66)	$R \in \{27; 46\}$	

## 6.4 Samozhutnitelné betony

Zjišťování pevností v tlaku samozhutnitelných betonů je věnována malá pozornost. K dispozici jsou pouze dva kalibrační vztahy v literatuře [31], které jsou uvedeny v tabulce 13.

Tabulka 13. Kalibrační vztahy pro Schmidtův tvrdoměr typu N pro samozhutnitelné betony

SCC 1	Oblast použití:		Koeficient korelace r
$f_c = 2,61 \cdot R - 39,2$ (67)	$R \in \{21; 37\}$	$f_c = \{16; 57\}$	$r = 0,98$
SCC 2	Oblast použití:		Koeficient korelace r
$f_c = 2,08 \cdot R - 36,3$ (68)	$R \in \{24; 39\}$	$f_c = \{14; 45\}$	$r = 0,96$

## 6.5 Zhodnocení

Ze zhodnocení rešerše technických norem, předpisů výrobce a odborných publikací vyplývá:

- V největší míře jsou zpracovány kalibrační vztahy pro obyčejné betony. Některé jsou uvedeny i v technických normách (ČSN 73 1373, ČSN EN 13791, JGJ/T 21-2993).
- Kalibrační vztah uvedený v ČSN EN 13791 je použitelný pouze při kombinaci s pevnostmi v tlaku zjištěnými na odebraných vývrtech.
- V odborné literatuře jsou uvedeny kalibrační vztahy pro určení krychelné i válcové pevnosti. U části vztahů nejsou k dispozici údaje o jejich zpracování a oblasti použití.

## 7 Kalibrační vztahy pro určení pevnosti v tlaku betonu ze zkoušení ultrazvukovou impulsovou metodou

V této kapitole jsou uvedeny kalibrační vztahy pro určení pevnosti betonu v tlaku ze zkoušení ultrazvukovou impulsovou metodou, které byly převzaty z technických norem odborné literatury. Pro kalibrační vztahy jsou uvedeny podmínky jejich použití, pokud je autoři uvádějí.

## 7.1 Obyčejné betony

Pro obyčejné betonu jsou kalibrační vztahy uvedeny v kap. 7.1.1 až 7.1.3.

### 7.1.1 Kalibrační vztah z ČSN EN 13791

Norma ČSN EN 13791 [13] uvádí kalibrační vztah pro výpočet pevnosti betonu v tlaku ze zkoušení ultrazvukovou impulsovou metodou. Oproti české verzi normy ČSN EN 13791 je ve vztahu umocněn první člen na druhou, tak aby odpovídal grafickému znázornění základní křivky pro výpočet pevnosti v tlaku z rychlosti šíření ultrazvukového impulsu. Kalibrační vztah je uveden v tabulce 14.

Tabulka 14. Kalibrační vztah z ČSN EN 13791 pro ultrazvukovou impulsovou metodu

Z ČSN EN 13791		
Kalibrační vztah	Oblast použití:	
$f_c = 62,5 \cdot v^2 - 497,5 \cdot v + 990$ (69)	$v \in \{4; 4,8\}$	$f_c \in \{0; 42\}$

### 7.1.2 Kalibrační vztah z ČSN 73 1371

ČSN 73 1371 [10] je pod čarou uveden kalibrační vztah pro výpočet pevnosti betonu v tlaku z rychlosti šíření ultrazvukových impulsů, který je v tabulce 15.

Tabulka 15. Kalibrační vztah Uvedený v ČSN 73 1371

Z ČSN 73 1371		
Kalibrační vztah	Oblast použití:	Zkoušené těleso
$f_c = 9,9 \cdot v^2 - 56 \cdot v + 87,8$ (70)	$v \in \{3,2; 5,1\}$	Krychle kde $a = 200$ mm
	$f_c \in \{10; 60\}$	

### 7.1.3 Kalibrační vztahy z odborné literatury

Problematika určování pevnosti betonu v tlaku z parametrů měření ultrazvukovou impulsovou metodou je řešena v řadě odborných publikací. V tabulce 16 jsou uvedeny kalibrační vztahy (71–78) [32; 21; 23; 33; 34; 25] z odborných článků a odborné literatury pro výpočet pevnosti v tlaku ze zkoušení ultrazvukovou impulsovou metodou.

Tabulka 16. Kalibrační vztahy pro výpočet pevnosti betonu v tlaku ze zkoušení ultrazvukovou impulsovou metodou z odborné literatury pro obyčejné betony

Autor:	<b>Galan A.</b>	
$f_c = 9,6601 \cdot v^2 - 54,0228 \cdot v + 87,3$ (71)		
Rozsah platnosti vztahu:	$f_c \in \{15; 50\}$	
Zkušební tělesa:	Krychle s $a = 150$ mm	
Autor:	<b>Gonçalves (1995)</b>	
$f_c = 0,02 \cdot v - 65,4$ (72)		
Rozsah platnosti vztahu:	$f_c \in \{18; 42\}$ [MPa]	
Zkušební tělesa:	Jádrový vývrt o průměru 70 mm	
Stáří betonu	28 – 84 dní	
Autor:	<b>Soshiroda and Voraputhaporn (1999)</b>	
$f_c = 54,18 \cdot v - 206,27$ (73)		
Rozsah platnosti vztahu:	$f_c \in \{30; 65\}$ [MPa]	
Zkušební tělesa:	Krychle s $a = 150$ mm	
Stáří betonu	28 dní	
Složky betonu: drcené kamenivo do maximálního zrna 32 mm		
Autor:	<b>Soshiroda and Voraputhaporn (1999)</b>	
$f_c = 44,52 \cdot v - 126,83$ (74)		
Rozsah platnosti vztahu:	$f_c \in \{20; 65\}$ [MPa]	
Zkušební tělesa:	Krychle s $a = 150$ mm	
Stáří betonu	28 dní	
Složky betonu: drcené kamenivo do maximálního zrna 32 mm		

Autor:	<b>Elvery and Ibrahim(1976)</b>	
$f_c = 0,012 \cdot e^{2,27 \cdot v} + 6,4$ (75)		
Rozsah platnosti vztahu:	$f_c \in \{15; 60\}$ [MPa]	
Zkušební tělesa:	Krychle s a = 100 mm	
Složky betonu: Drcené štěrkové kamenivo do maximálního zrna 19 mm		
Autor:	<b>Teodoru (1988)</b>	
$f_c = 0,0259 \cdot e^{1,612 \cdot v}$ (76)		
Rozsah platnosti vztahu:	$f_c \in \{2; 24\}$ [MPa]	
Stáří betonu	28 dní	
Autor:	<b>Evangelista M1 (2002)</b>	
$f_c = 0,0025 \cdot e^{2,138 \cdot v}$ (77)		
Rozsah platnosti vztahu:	$f_c \in \{11; 53\}$ [MPa]	
Zkušební tělesa:	Válec 150 x 300 mm	
Stáří betonu	28 dní	
Autor:	<b>Evangelista M3 (2002)</b>	
$f_c = 0,0031 \cdot e^{2,062 \cdot v}$ (78)		
Rozsah platnosti vztahu:	$f_c \in \{8; 49\}$ [MPa]	
Zkušební tělesa:	Válec 150 x 300 mm	
Stáří betonu	28 dní	

## 7.2 Vysokopevnostní a vysokohodnotné betony

Pro stanovení pevnosti v tlaku ultrazvukovou impulsovou metodou pro vysokopevnostní a vysokohodnotné betony je zpracováno méně kalibračních vztahů (79–82) [27; 28; 29] než pro obyčejné betony. Tyto vztahy jsou uvedeny v tabulce 17.

Tabulka 17. Kalibrační vztahy pro výpočet pevnosti betonu v tlaku ze zkoušení ultrazvukovou impulsovou metodou pro vysokopevnostní a vysokohodnotné betony z odborné literatury

Autor:	<b>Almeida 1 (1993)</b>	
$f_c = 0,0133 \cdot v^{5,543}$ (79)		
Rozsah platnosti vztahu:	$f_c \in \{40,1; 120,3\}$ [MPa]	
Zkušební tělesa:	Krychle s a = 150 mm	
Složky betonu: Žulové kamenivo o maximálním zrně 25 mm		
Autor:	<b>Almeida 2 (1993)</b>	
$f_c = 0,011 \cdot v^{5,654}$ (80)		
Rozsah platnosti vztahu:	$f_c \in \{40,1; 120,3\}$ [MPa]	
Zkušební tělesa:	Krychle s a = 150 mm	
Složky betonu: Žulové kamenivo o maximálním zrně 25 mm		
Autor:	<b>Pascale et al (2000)</b>	
$f_c = v^{8,1272} \cdot 10^{-28}$ (81)		
Rozsah platnosti vztahu:	$f_c \in \{30; 150\}$ [MPa]	
Zkušební tělesa:	Krychle s a = 150 mm	
Složky betonu: Vápencové kamenivo do maximálního zrna 15 mm		
Autor:	<b>Ravindrajah et al (1988)</b>	
$f_c = 0,060 \cdot e^{1,44 \cdot v}$ (82)		
Rozsah platnosti vztahu:	$f_c \in \{15; 80\}$ [MPa]	
Zkušební tělesa:	Krychle s a = 100 mm	
Složky betonu: Žulové kamenivo o maximálním zrně 20 mm		

### 7.3 Samozhutnitelné betony

Zjišťování pevností v tlaku samozhutnitelných betonů je věnována malá pozornost. K dispozici jsou pouze dva kalibrační vztahy (83; 84) zahrnuté v literatuře [36], tyto jsou uvedeny v tabulce 18.

Tabulka 18. Kalibrační vztahy pro výpočet pevnosti samozhutnitelných betonů v tlaku ze zkoušení ultrazvukovou impulsovou metodou

<b>Scc beton s popílkem</b>	Oblast použití:	Koeficient korelace
$f_c = 0,0015 \cdot e^{2,1121 \cdot v}$ (83)	$V \in \{4,5; 5,0\}$	$r = 0,94$
<b>Scc beton s křemičitými úlety</b>	Oblast použití:	Koeficient korelace
$f_c = 0,0031 \cdot e^{2,07 \cdot v_c}$ (84)	$V \in \{4,4; 4,9\}$	$r = 0,86$

### 7.4 Zhodnocení

Ze zhodnocení rešerše technických norem, předpisů výrobce a odborných publikací vyplývá:

- V největší míře jsou zastoupeny kalibrační vztahy pro obyčejný beton. Některé jsou uvedeny i v technických normách (ČSN 73 1371 [10], ČSN EN 13791 [13]).
- Kalibrační vztah uvedený v ČSN EN 13791 [13] je sice použitelný pouze při kombinaci s pevnostmi v tlaku zjištěných na odebraných vývrtech, ale jeho oblast použití je omezena na rychlosti šíření ultrazvukového impulsu v rozpětí 4,0 až 4,8 km/s; tento interval však neodpovídá realitě, protože u betonů nižších pevnosti jsou hodnoty rychlosti menší než 4 km/s. Navíc je nutno umocnit první člen na druhou, tak aby odpovídal grafickému znázornění základní křivky.
- V odborné literatuře jsou uvedeny kalibrační vztahy pro určení krychelné i válcové pevnosti. U části vztahů nejsou k dispozici údaje o jejich zpracování a oblasti použití.



## 8 Kalibrační vztahy pro určení pevnosti v tlaku betonu ze zkoušení kombinovanou metodou SonReb

V této kapitole jsou uvedeny kalibrační vztahy pro určení pevnosti betonu v tlaku ze zkoušení kombinovanou metodou SonReb pro obyčejné betony. Tyto kalibrační vztahy byly převzaty z technické normy ČSN 73 2011 a z odborné literatury. U kalibračních vztahů jsou uvedeny podmínky jejich použití, pokud je autoři uvádějí.

### 8.1 Kalibrační vztah z ČSN 73 2011

Norma ČSN 73 2011 [12] je jedinou českou normou pro zkoušení betonu v tlaku, kde se uvádí kalibrační vztah pro kombinovanou metodu. Kalibrační vztah (85) je uveden v tabulce 19.

Tabulka 19. Kalibrační vztah pro výpočet pevnosti betonu v tlaku pomocí kombinované metody SonReb pro obyčejný beton z ČSN 73 2011

<b>Vztah z ČSN 73 2011</b>	
$f_c = 0,0286 \cdot v^{1,85} \cdot R^{1,246}$ (85)	
Rozsah platnosti vztahu:	$f_c \in \{12; 70\}$ [MPa]
Zkušební tělesa:	Krychle 150 mm

### 8.2 Kalibrační vztahy z odborné literatury

Pro stanovení pevnosti v tlaku metodou SonReb je v odborné literatuře uvedeno několik kalibračních vztahů. Vztahy byly vypracovány pro obyčejné betony a pro obyčejné betony s rychlým náběhem pevností. V tabulce 20 jsou uvedeny vztahy (86–89) [24; 23; 37] pro obyčejné betony a v tabulce 21 je uveden kalibrační vztah (90) [38] zpracovaný pro obyčejné betony s rychlým náběhem pevností.

Tabulka 20. Kalibrační vztahy pro výpočet pevnosti betonu v tlaku ze zkoušení kombinovanou metodou SonReb pro obyčejné betony

Autor:	<b>Evangelista M1 (2002)</b>	
$f_c = e^{(-1,554+0,0584R + 0,775v)} \quad (86)$		
Rozsah platnosti vztahu:	$f_c \in \{11; 53\}$ [MPa]	
Zkušební tělesa:	Válec 150 x 300 mm	
Stáří betonu	28 dní	
Autor:	<b>Evangelista M3 (2002)</b>	
$f_c = -35,95+0,507 \cdot R+11,022 \cdot v \quad (87)$		
Rozsah platnosti vztahu:	$f_c \in \{8; 49\}$ [MPa]	
Zkušební tělesa:	Válec o rozměrech 150 x 300 mm	
Stáří betonu	28 dní	
Autor:	<b>Tanigava et al</b>	
$f_c = 1,47 \cdot R+15,9 \cdot v-82,2 \quad (88)$		
Rozsah platnosti vztahu:	$f_c \in \{15; 43\}$ [MPa]	
Zkušební tělesa:	Krychle kde $a = 100$ mm	
Koeficient korelace	$r = 0,94$	
Složky betonu: Žulové kamenivo o maximálním zrně 20 mm		
Autor:	<b>Soshiroda and Voraputhaporn</b>	
$f_c = 0,63 \cdot v+1,46 \cdot R-19,31 \quad (89)$		
Rozsah platnosti vztahu:	$f_c \in \{20; 65\}$ [MPa]	
Zkušební tělesa:	Krychle kde $a = 150$ mm	
Stáří betonu	28 dní	
Koeficient korelace	$r = 0,96$	
Složky betonu: drcené kamenivo do maximálního zrna 32mm		

Tabulka 21. Kalibrační vztah pro výpočet pevností betonu v tlaku ze zkoušení kombinovanou metodou SonReb pro obyčejný beton s rychlým náběhem pevností

Autor:	<b>Domingo hiroshé</b> (přímé prozvučení)
$f_c = -24,1 + 1,24 \cdot R + 0,058 \cdot v^4$ (90)	
Rozsah platnosti vztahu:	$f_{ce} \in \{40; 58\}$ [MPa]
Zkušební tělesa:	Krychle kde $a = 150\text{mm}$
Koeficient korelace	$r = 0,98$

### 8.3 Zhodnocení

Ze zhodnocení rešerše technických norem a odborných publikací vyplývá:

- Pro kombinovanou metodu jsou zpracovány kalibrační vztahy pouze pro obyčejné betony, v českých technických normách je uveden jeden vztah, a to v ČSN 73 2011.
- V odborné literatuře jsou uvedeny kalibrační vztahy pro určení pevnosti v tlaku pro krychelné i válcové zkušební tělesa, pro obyčejné betony a betony s rychlým náběhem pevností.

## 9 Porovnání kalibračních vztahů pro výpočet pevnosti betonu v tlaku

V této kapitole jsou uvedena porovnání jednotlivých kalibračních vztahů pro výpočet pevnosti betonu v tlaku z nedestruktivního zkoušení. Pro porovnání byly jako srovnávací kalibrační vztahy brány vztahy uvedené v ČSN, kalibrační vztahy z odborné literatury zpracované na základě zkoušek betonů tuzemské provenience nebo vztahy z odborné literatury.

Pro srovnání kalibračních vztahů se srovnávacím byla vypočítána odchylka  $\Delta f_{ce}$  [MPa] a  $\delta f_{ce}$  [%] dle vztahu:

$$\Delta f_{ce} = |f_{cer} - f_{cep}| \quad (91)$$

$$\delta f_{ce} = \left| \frac{100 \cdot \Delta f_{ce}}{f_{cer}} \right| \quad (92)$$

Kde:

$\Delta f_{ce}$       odchylka pevnosti betonu v tlaku udaná v MPa

$\delta f_{ce}$	odchylka pevnosti betonu v tlaku udaná v %
$f_{cer}$	pevnost v tlaku srovnávacího kalibračního vztahu v MPa
$f_{cep}$	pevnost v tlaku porovnávaného kalibračního vztahu v MPa

## 9.1 Metoda odrazových tvrdoměrů systém Schmidt

### 9.1.1 Obyčejné betony

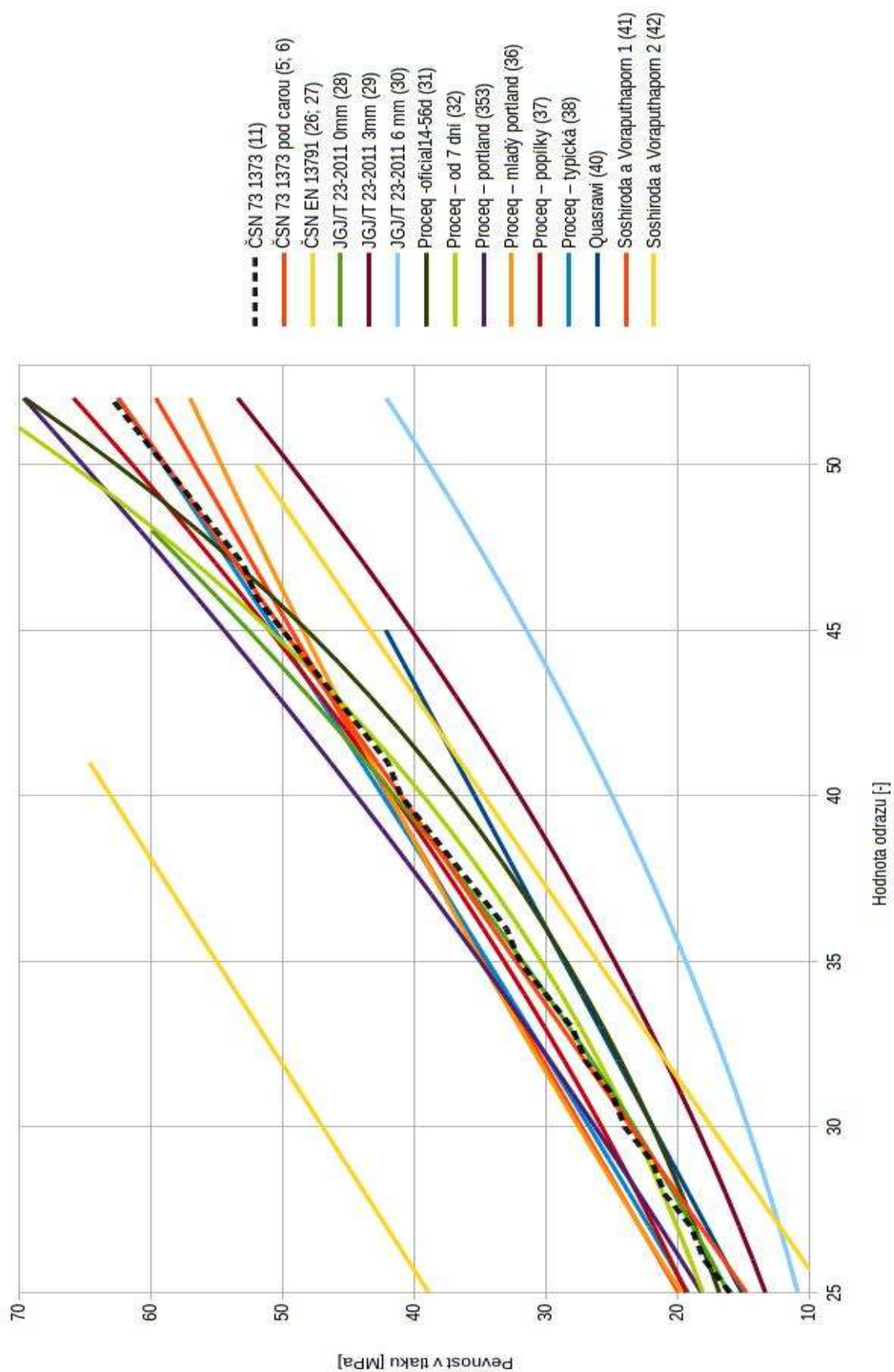
#### a) Vztahy pro určení krychelné pevnosti

Pro Schmidtův tvrdoměr typu N při zkoušení vodorovným směrem jsou jako referenční hodnoty pevnosti v tlaku použity hodnoty z kalibračního vztahu (11) uvedeného v ČSN 73 1373 [8], který je platný pro rozmezí hodnot odrazu 25–52, to znamená pro pevnost betonu v tlaku 16 – 63 MPa.

V tabulce 22 jsou uvedeny rozdíly krychelných pevností obyčejných betonů vypočítaných z kalibračních vztahů (5; 6; 26–32; 35–38; 40–42) vztažené ke krychelným pevnostem vypočítaným dle srovnávacího kalibračního vztahu (11). Porovnání kalibračních vztahů je graficky znázorněno v obrázku 1.

Tabulka 22. Rozdíly mezi krychelnými pevnostmi  $\Delta f_{ce}$  a  $\delta f_{ce}$  vypočítanými podle referenčního kalibračního vztahu (11) a pevnostmi dle kalibračních vztahů (5; 6; 26–32; 35–38; 40–42) – obyčejné betony, Schmidtův tvrdoměr typu N

Vztah z normy/ literatury/výrobce	Číslo k.vz.	$\Delta f_{ce}$ [MPa]			$\delta f_{ce}$ [%]		
		Průměr	min	max	Průměr	min	max
ČSN 73 1373 pod čarou	5; 6	0,5	0,0	1,5	1,8	0,0	8,3
ČSN EN 13791	26; 27	6,3	5,2	7,5	20,0	11,7	45,3
JGJ/T 23-2011 karbonatace 0 mm	28	1,2	0,1	4,9	2,8	0,2	8,9
JGJ/T 23-2011 karbonatace 3 mm	29	7,5	2,7	10,0	19,9	15,3	22,8
JGJ/T 23-2011 karbonatace 6 mm	30	14,1	5,2	20,9	37,0	32,2	39,6
Proceq 14-56 dní	31	2,5	0,3	6,6	6,7	0,9	11,1
Proceq 7 dní	32	2,2	0,1	10,3	5,0	0,1	16,3
Proceq beton z portlandského cementu	35	3,9	1,7	6,6	10,2	8,2	13,5
Proceq mladý beton z portlandského cementu	36	2,9	0,1	6,0	9,2	0,3	23,0
Proceq beton z popílkového cementu	37	1,8	0,6	3,3	5,8	1,4	20,7
Proceq typická křivka	38	1,9	0,0	3,3	6,8	0,0	19,9
Quasrawi	40	2,1	0,1	5,9	5,7	0,7	12,2
Soshiroda a Voraputhaporn 1	41	2,3	0,2	3,9	8,1	0,4	24,4
Soshiroda a Voraputhaporn 2	42	23,0	22,0	23,8	87,0	53,7	143,0



Obrázek 1. Grafické porovnání průběhu jednotlivých kalibračních vztahů pro určení krychelné pevnosti obyčejných betonů ze zkoušení odrazovým tvrdoměrem systému Schmidt typ N

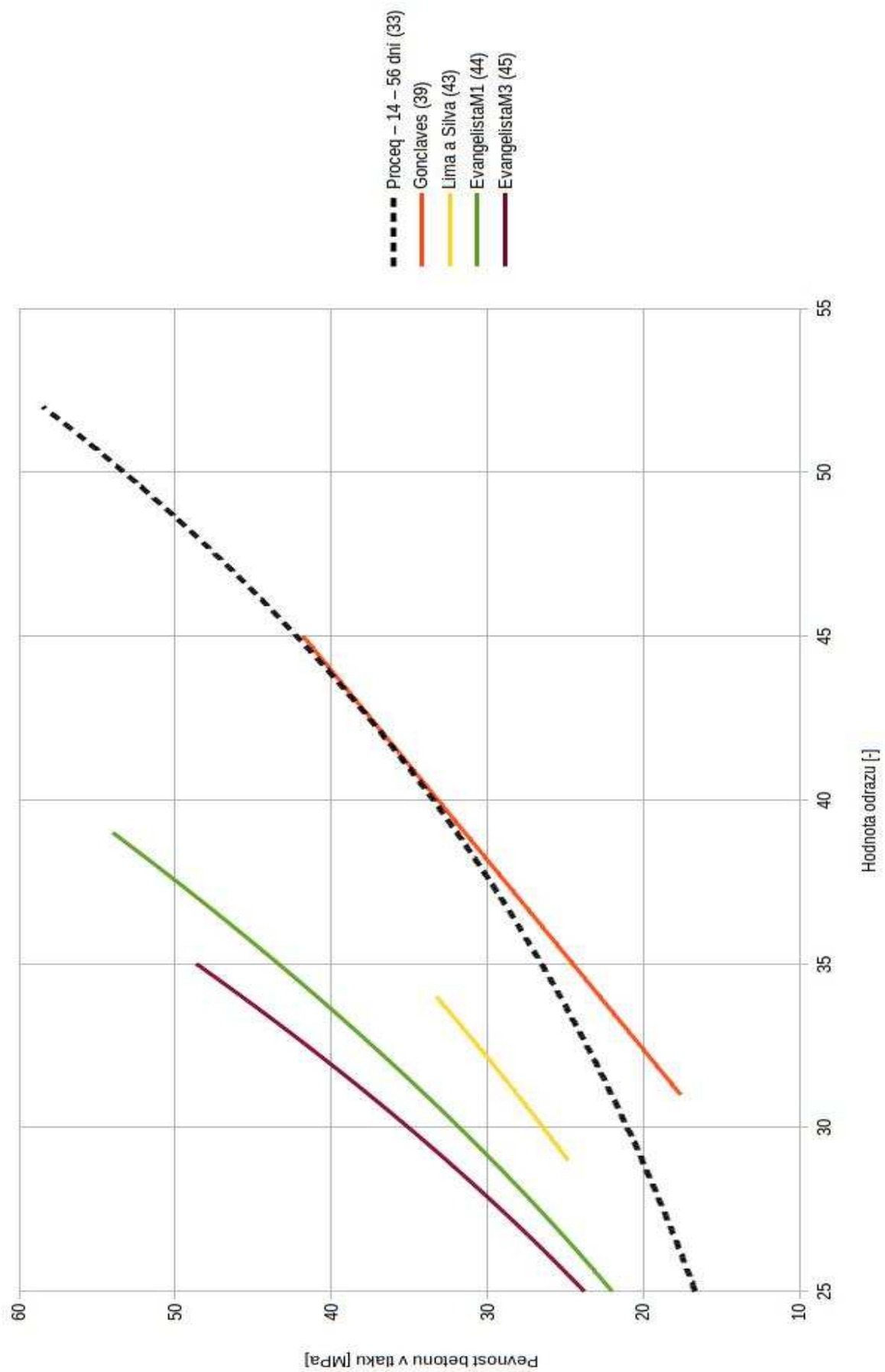
## b) Vztahy pro určení válcové pevnosti

Výrobce odrazového tvrdoměru firma Proceq i některé publikace uvádí kromě kalibračních vztahů pro určení krychelné pevnosti i vztahy pro určení válcové pevnosti ze zkoušení odrazovým tvrdoměrem Schmidt typ N.

V tabulce 22 jsou uvedeny rozdíly válcových pevností obyčejných betonů vypočítaných z kalibračních vztahů (39; 43–45) vztažené ke krychelným pevnostem vypočítaným dle srovnávacího kalibračního vztahu (33 – tabelované hodnoty od firmy Proceq pro válcová tělesa stáří 14–56 dní) [20]. Porovnání kalibračních vztahů je graficky znázorněno v obrázku 2.

Tabulka 23. Rozdíly mezi krychelnými pevnostmi  $\Delta f_{ce}$  a  $\delta f_{ce}$  vypočítanými podle referenčního kalibračního vztahu (32) a pevnostmi dle kalibračních vztahů (39; 43–45) – obyčejné betony, Schmidtův tvrdoměr typu N

Vztah z normy/ literatury/výrobce	Číslo k.vz.	$\Delta f_{ce}$ [MPa]			$\delta f_{ce}$ [%]		
		<b>Průměr</b>	min	max	<b>Průměr</b>	min	max
Gonclaves	39	2,3	0,2	3,5	8,1	1,2	11,3
Lima a silva	43	8,8	7,2	10,4	43,5	40,9	45,2
Evangelista M1	44	15,7	7,7	24,2	72,6	54,2	81,3
Evangelista M3	45	16,7	9,5	24,5	86,9	66,7	101,5



Obrázek 2. Grafické porovnání průběhu jednotlivých kalibračních vztahů pro určení válcové pevnosti obyčejných betonů ze zkoušení odrazovým tvrdoměrem systému Schmidt typ N

### 9.1.2 Vysokopevnostní a vysokohodnotné betony

Pro vysokopevnostní a vysokohodnotné betony nejsou v technických normách uvedeny kalibrační vztahy pro určení jejich pevností ze zkoušení odrazovým tvrdoměrem. Jsou uvedeny pouze v odborných publikacích.

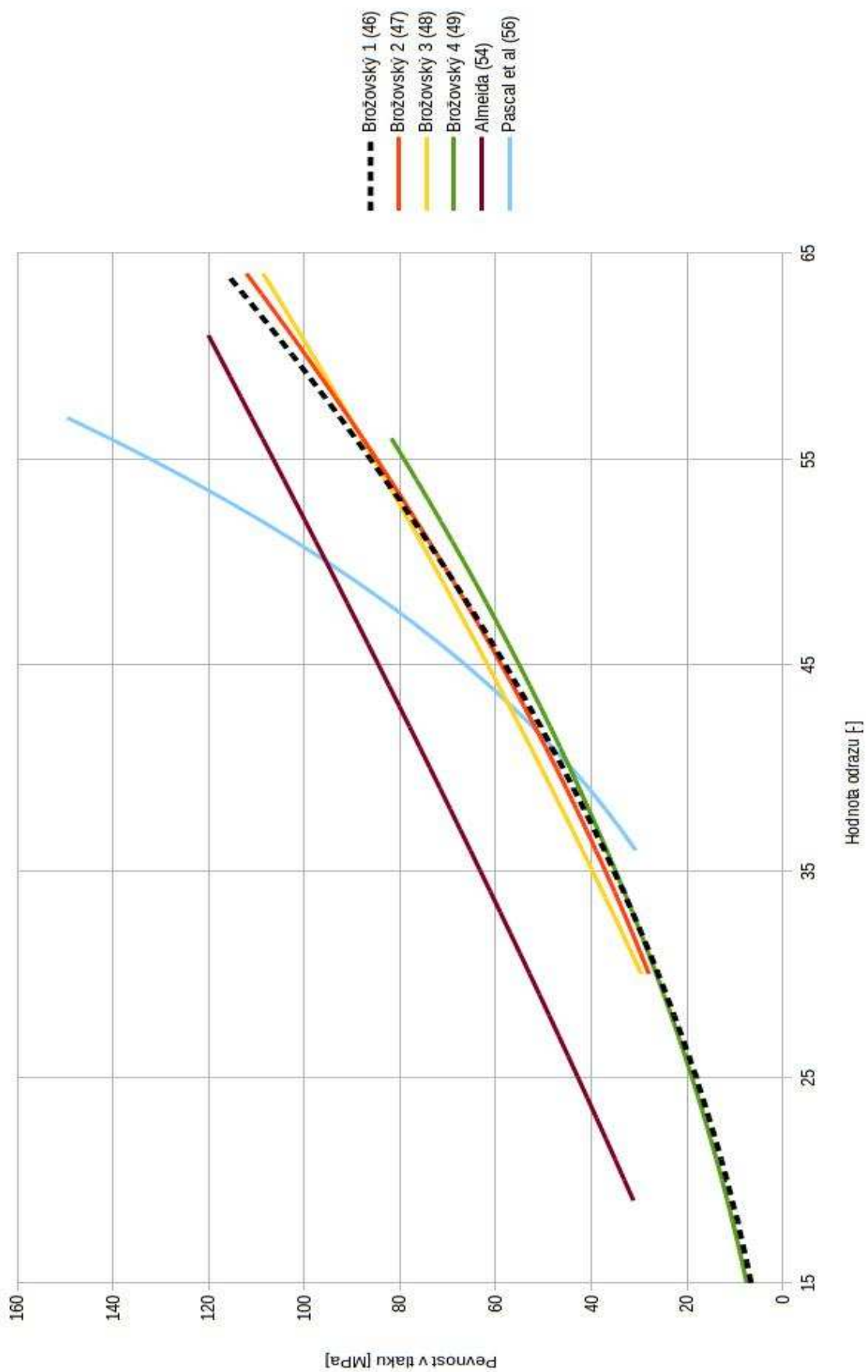
V tabulce 24 jsou uvedeny rozdíly krychelných pevností vysokopevnostních a vysokohodnotných betonů vypočítaných z kalibračních vztahů (47–49; 54; 56) vztažené ke krychelným pevnostem vypočítaným dle srovnávacího kalibračního vztahu (46) [26]. Druhý kalibrační vztah od Almeidy (55) [27] nebyl zahrnut do výsledků porovnání, a to z důvodu téměř identických hodnot tohoto vztahu s prvním kalibračním vztahem tohoto autora (54).

Porovnání kalibračních vztahů je graficky znázorněno v obrázku 3.

Tabulka 24. Rozdíly mezi krychelnými pevnostmi  $\Delta f_{ce}$  a  $\delta f_{ce}$  vypočítanými podle referenčního kalibračního vztahu (46) a pevnostmi dle kalibračních vztahů (47–49; 54; 56) – vysokohodnotné a vysokopevnostní betony, Schmidtův tvrdoměr typu N

Vztah z normy/ literatury/výrobce	Číslo k.vz.	$\Delta f_{ce}$ [MPa]			$\delta f_{ce}$ [%]		
		Průměr	min	max	Průměr	min	max
Brožovský 2	47	1,5	0,1	4,2	2,8	0,1	7,4
Brožovský 3	48	2,7	0,1	7,7	6,7	0,1	13,5
Brožovský 4	49	5,3	0,0	7,5	5,3	0,0	13,9
Almeida	54	21,1	14,3	28,0	74,3	13,6	195,5
Pascal et al	56	31,4	0,2	57,0	25,6	0,3	61,7





Obrázek 3. Grafické porovnání průběhu jednotlivých kalibračních vztahů pro určení krychelné pevnosti vysokopevnostních a vysokohodnotných betonů ze zkoušení odrazovým tvrdoměrem systému Schmidt typ N

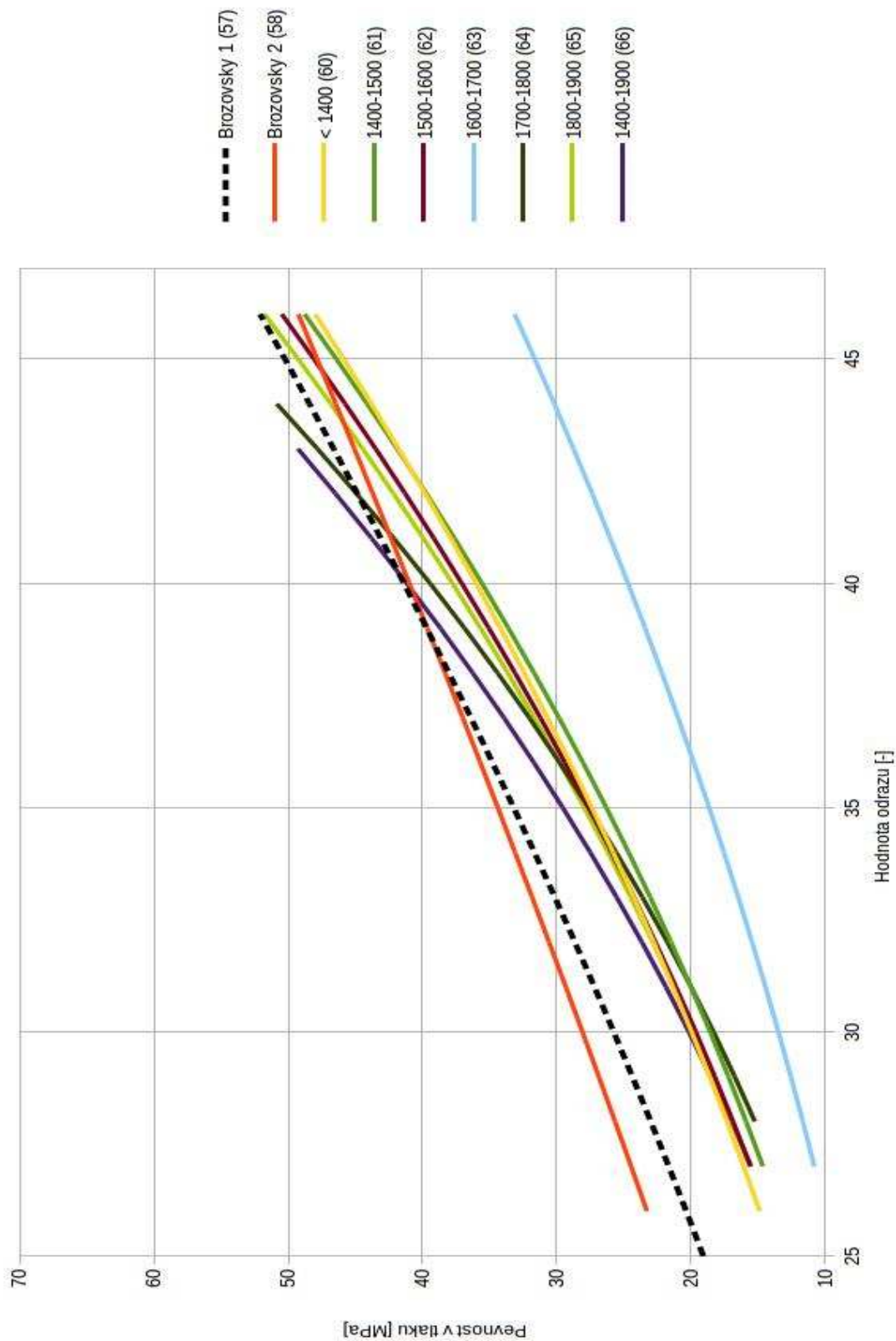
### 9.1.3 Lehké betony

Pro lehké betony jsou uvedeny kalibrační vztahy pro určení pevnosti v tlaku ze zkoušení odrazovým tvrdoměrem pouze v odborné literatuře.

V tabulce 25 jsou uvedeny rozdíly krychelných pevností lehkých betonů vypočítaných z kalibračních vztahů (58; 60–66), vztažené ke krychelným pevnostem vypočítaným dle srovnávacího kalibračního vztahu (57) – kalibrační vztah pro lehké betony s keramickým kamenivem pro stáří 7–180 dní publikovaný v [29]. Porovnání kalibračních vztahů je graficky znázorněno v obrázku 4.

Tabulka 25. Rozdíly mezi krychelnými pevnostmi  $\Delta f_{ce}$  a  $\delta f_{ce}$  vypočítanými podle referenčního kalibračního vztahu (57) a pevnostmi dle kalibračních vztahů (58; 60 – 66) – lehké betony, Schmidtův tvrdoměr typu N

Vztah z normy/ literatury/výrobce	Číslo k. vz.	$\Delta f_{ce}$ [MPa]			$\delta f_{ce}$ [%]		
		<b>Průměr</b>	min	max	<b>Průměr</b>	min	max
Brožovský 2	58	1,6	0,0	2,8	5,5	0,1	14,4
< 1400	60	5,4	4,1	5,9	16,9	7,9	26,9
1400-1500	61	6,1	3,3	7,2	19,0	6,4	32,4
1500-1600	62	4,8	1,6	6,1	15,2	3,1	28,1
1600-1700	63	15,1	10,9	19,0	43,0	36,4	50,1
1700-1800	64	4,6	0,1	7,8	15,3	0,2	33,7
1800-1900	65	4,3	0,3	6,1	13,9	0,6	28,1
1400-1900	66	3,5	0,2	6,1	12,4	0,5	28,4



Obrázek 4. Grafické porovnání průběhu jednotlivých kalibračních vztahů pro určení krychelné pevnosti lehkých betonů ze zkoušení odrazovým tvrdoměrem systému Schmidt typ N

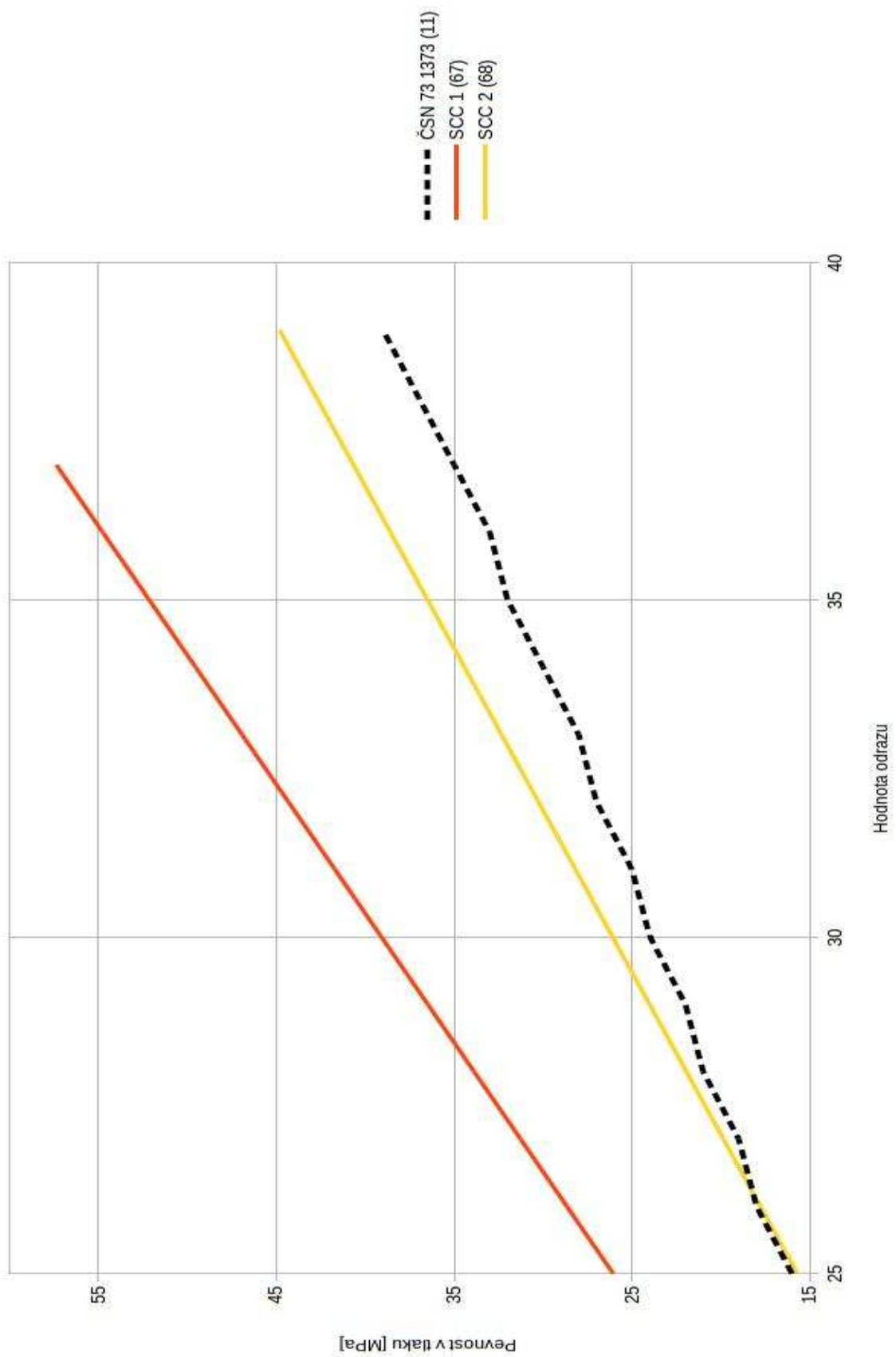
### 9.1.4 Samozhutnitelné betony

Kalibrační vztahy pro určení pevnosti v tlaku samozhutnitelných betonů nejsou uvedeny v českých technických normách. V porovnání jsou použity pouze vztahy z odborné literatury. Jako srovnávací vztah byl použit vztah z ČSN 73 1373 [8], protože v českých normách ani českých odborných publikacích není vztah pro samozhutnitelný beton uveden.

V tabulce 26 jsou uvedeny rozdíly krychelných pevností samozhutnitelných betonů vypočítaných z kalibračních vztahů (67; 68), vztažené ke krychelným pevnostem vypočítaným dle srovnávacího kalibračního vztahu (11) [8]. Porovnání kalibračních vztahů je graficky znázorněno v obrázku 5.

Tabulka 26. Rozdíly mezi krychelnými pevnostmi  $\Delta f_{ce}$  a  $\delta f_{ce}$  vypočítanými podle referenčního kalibračního vztahu (11) a pevnostmi dle kalibračních vztahů (67; 68) – samozhutnitelné betony, Schmidtův tvrdoměr typu N

Vztah z normy/ literatury/výrobce	Číslo k.vz.	$\Delta f_{ce}$ [MPa]			$\delta f_{ce}$ [%]		
		<b>Průměr</b>	min	max	<b>Průměr</b>	min	max
SCC 1	67	16,3	10,1	22,4	64,1	59,2	67,6
SCC 2	68	2,9	0,2	5,7	10,8	1,2	16,9



Obrázek 5. Grafické porovnání průběhu jednotlivých kalibračních vztahů pro určení krychelné pevnosti samozhutnitelných betonů ze zkoušení odrazovým tvrdoměrem systému Schmidt typ N

## 9.2 Ultrazvuková metoda

### 9.2.1 Obyčejné betony

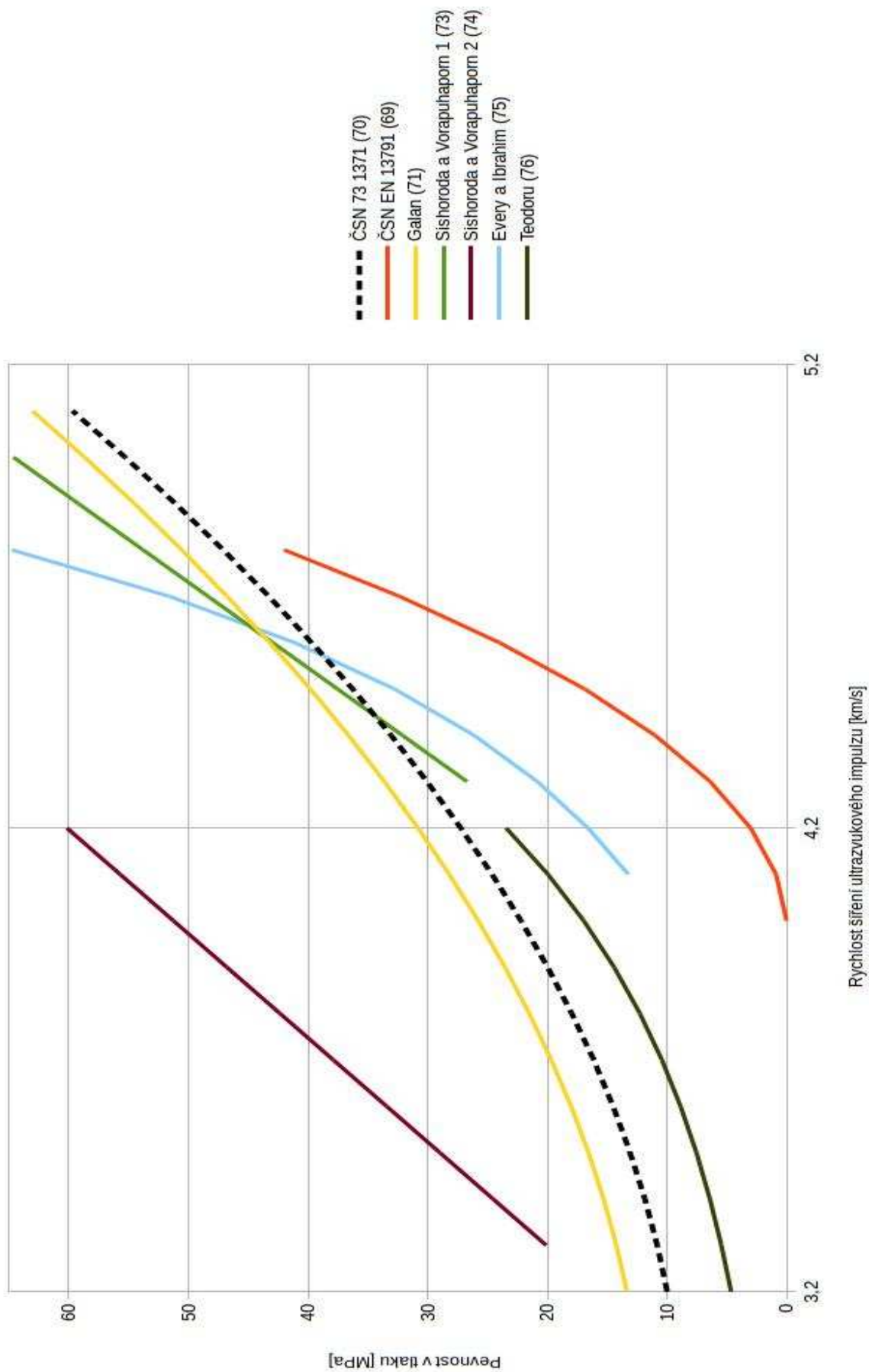
#### a) Vztahy pro určení krychelné pevnosti

Při porovnávání kalibračních vztahů pro výpočet pevnosti betonu v tlaku při zkoušení obyčejných betonů ultrazvukovou impulsovou metodou na krychelných tělesech byl použit jako referenční kalibrační vztah uvedený v ČSN 73 1371 [10].

V tabulce 27 jsou uvedeny rozdíly krychelných pevností obyčejných betonů vypočítaných z kalibračních vztahů (69; 71; 73–76), vztažené ke krychelným pevnostem vypočítaným dle srovnávacího kalibračního vztahu (70) [10]. Porovnání kalibračních vztahů je graficky znázorněno v obrázku 6.

Tabulka 27. Rozdíly mezi krychelnými pevnostmi  $\Delta f_{ce}$  a  $\delta f_{ce}$  vypočítanými podle referenčního kalibračního vztahu (70) a pevnostmi dle kalibračních vztahů (69; 71; 73–76) – obyčejné betony, ultrazvuková impulsová metoda

Vztah z normy/ literatury/výrobce	Číslo k.vz.	$\Delta f_{ce}$ [MPa]			$\delta f_{ce}$ [%]		
		Průměr	min	max	Průměr	min	max
ČSN EN 13791	69	18,6	5,1	24,2	62,2	10,8	100,0
Galan	71	3,5	3,3	3,6	16,2	5,6	33,8
Sishoroda a Vorapuhaporm 1	73	5,0	0,9	9,3	10,5	2,8	16,9
Sishoroda a Vorapuhaporm 2	74	22,3	9,3	32,9	122,8	85,8	135,8
Every a Ibrahim	75	8,6	1,4	17,7	25,9	3,6	46,3
Teodoru	76	5,3	3,8	5,7	34,7	13,9	49,6



Obrázek 6. Grafické porovnání průběhu jednotlivých kalibračních vztahů pro určení krychelné pevnosti obyčejných betonů ze zkoušení ultrazvukovou impulsovou metodou

## b) Vztahy pro určení válcové pevnosti

Kromě kalibračních vztahů pro krychelné pevnosti některé publikace uvádí také vztahy pro určení pevností zkoušené ultrazvukovou impulsovou metodou i na válcových tělesech. Jako srovnávací kalibrační vztah zde byl použit vztah uvedený v ČSN 73 1371 [10], který je určený pro pevnosti krychelné. Pro potřeby srovnání bych tento vztah přepočten na pevnosti válcové pomocí korekčního součinitele, který má hodnotu 0,8.

$$f_{ce,cy} = 0,8 f_{ce,cu} \quad (93)$$

kde

$f_{ce,cy}$  válcová pevnost v tlaku

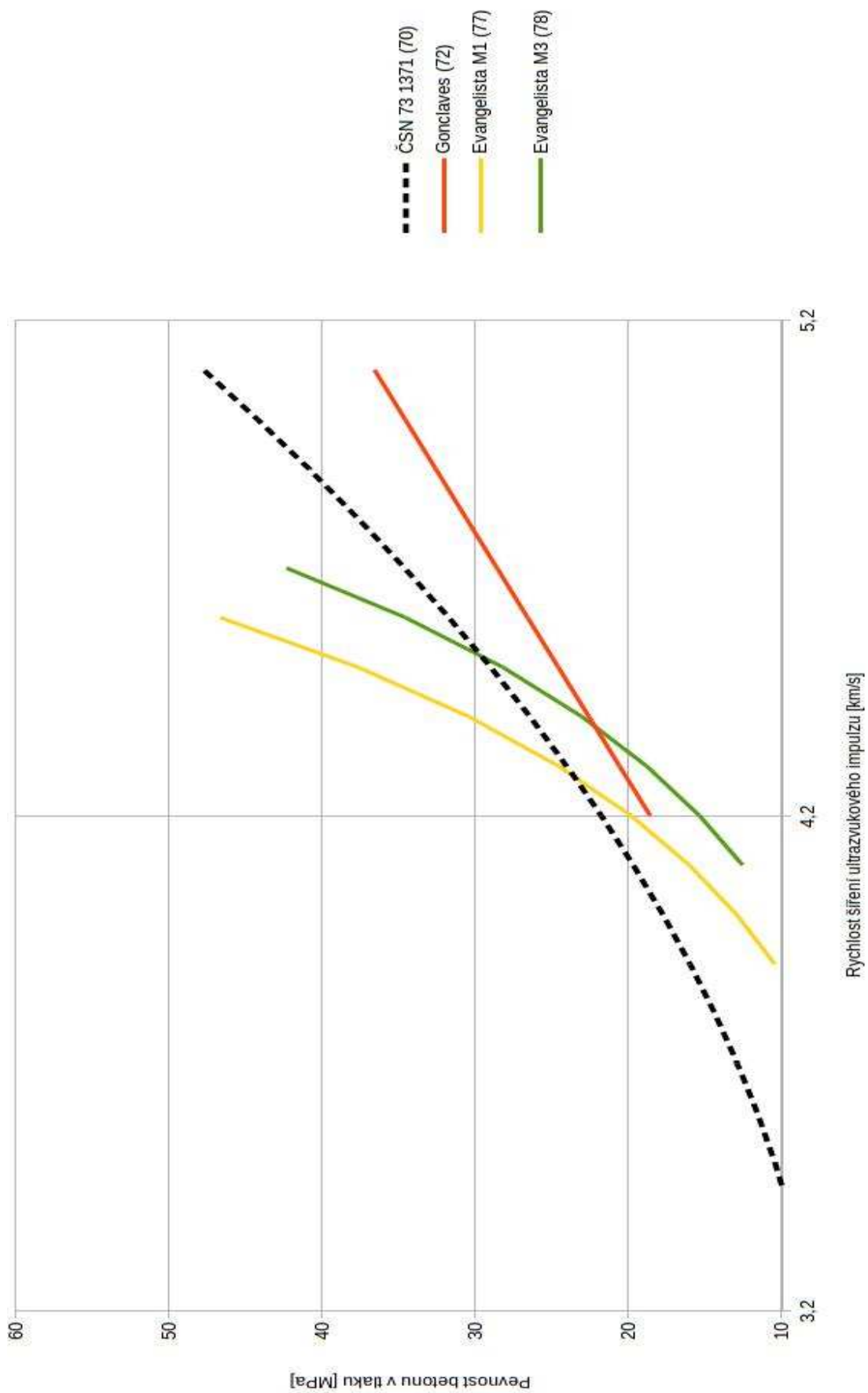
$f_{ce,cu}$  krychelná pevnost v tlaku

V tabulce 28 jsou uvedeny rozdíly válcových pevností obyčejných betonů vypočítaných z kalibračních vztahů (72; 77; 78), vztažené k pevnostem vypočítaným dle srovnávacího kalibračního vztahu (70) [10]. Porovnání kalibračních vztahů je graficky znázorněno v obrázku 7.

Tabulka 28. Rozdíly  $\Delta f_{ce}$  a  $\delta f_{ce}$  mezi válcovými pevnostmi (přepočítanými z krychelné pevnosti) ze vztahu (70) a pevnostmi vypočítanými z kalibračních vztahů (72, 77, 78) – obyčejné betony

Vztah z normy/ literatury/výrobce	Číslo k.vz.	$\Delta f_{ce}$ [MPa]			$\delta f_{ce}$ [%]		
		<b>Průměr</b>	min	max	<b>Průměr</b>	min	max
Goncalves	72	5,7	3,2	9,6	17,0	14,4	21,8
Evangelista M1	77	5,5	0,5	14,9	18,4	1,8	37,6
Evangelista M3	78	4,8	0,8	7,7	15,3	2,2	29,0





Obrázek 7. Grafické porovnání průběhu jednotlivých kalibračních vztahů pro určení válcové pevnosti obyčejných betonů ze zkoušení ultrazvukovou impulsovou metodou

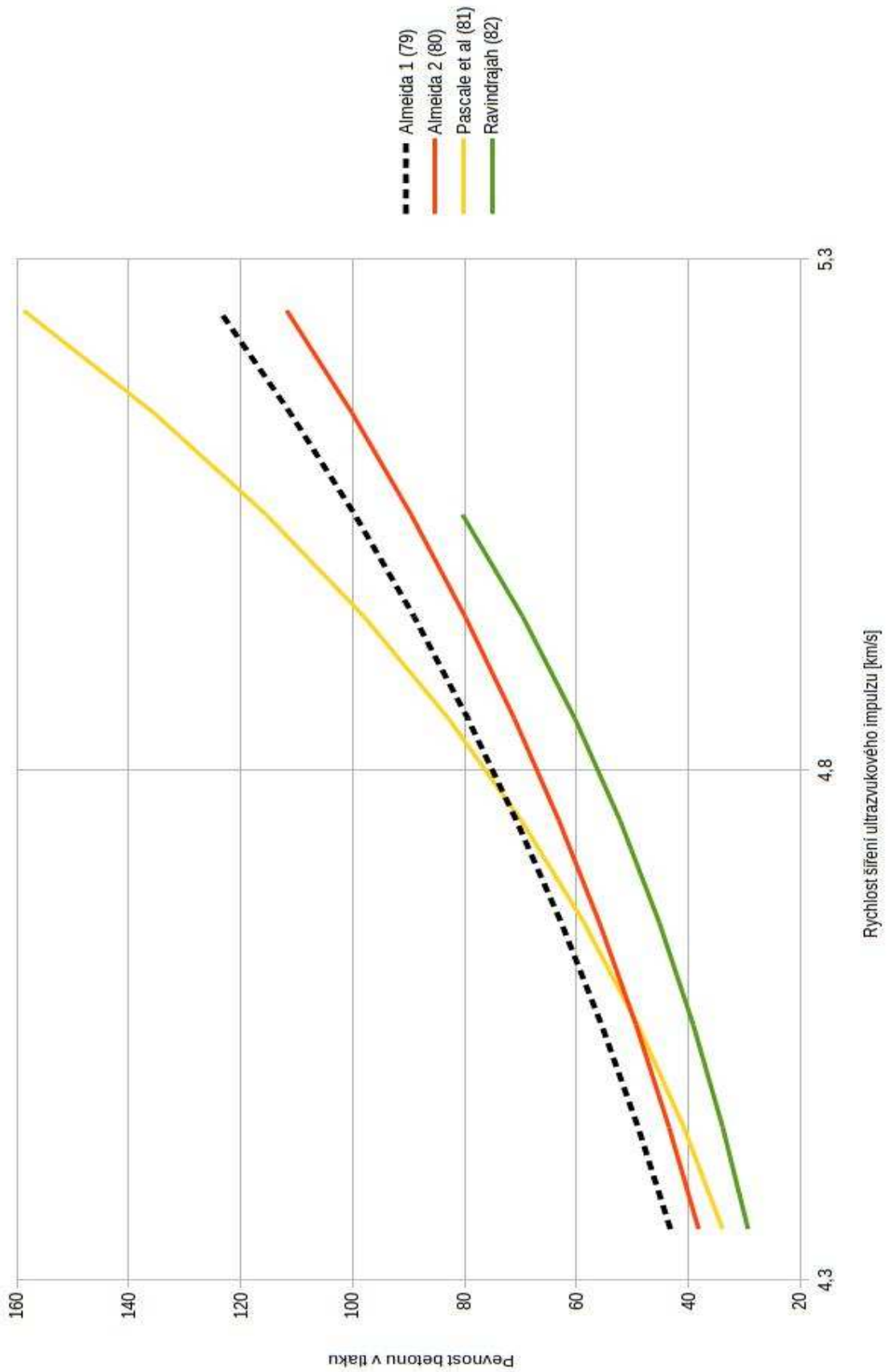
## 9.2.2 Vysokopevnostní a vysokohodnotné betony

Pro vysokopevnostní a vysokohodnotné betony nejsou v českých technických normách zpracovány kalibrační vztahy pro určení jejich pevností ze zkoušení ultrazvukovou impulsovou metodou. Jsou uvedeny pouze v zahraničních odborných publikacích.

V tabulce 29 jsou uvedeny rozdíly krychelných pevností vysokopevnostních a vysokohodnotných betonů vypočítaných z kalibračních vztahů (80–82) vztažené ke krychelným pevnostem vypočítaným dle srovnávacího kalibračního vztahu (79) [27]. Porovnání kalibračních vztahů je graficky znázorněno v obrázku 8.

Tabulka 29. Rozdíly mezi krychelnými pevnostmi  $\Delta f_{ce}$  a  $\delta f_{ce}$  vypočítanými podle referenčního kalibračního vztahu (79) a pevnostmi dle kalibračních vztahů (80–82) – vysokopevnostní a vysokohodnotné betony, ultrazvuková impulsová metoda

Vztah z normy/ literatury/výrobce	Číslo k.vz.	$\Delta f_{ce}$ [MPa]			$\delta f_{ce}$ [%]		
		<b>Průměr</b>	min	max	<b>Průměr</b>	min	max
Almeida 2	80	8,2	5,0	12,0	10,6	9,7	11,7
Pascal at al	81	11,6	0,9	34,9	13,8	1,3	28,2
Ravindraha	82	17,1	13,9	19,4	27,5	21,8	32,1



Obrázek 8. Grafické porovnání průběhu jednotlivých kalibračních vztahů pro určení krychelné pevnosti vysokopevnostních a vysokohodnotných betonů ze zkoušení ultrazvukovou impulsovou metodou

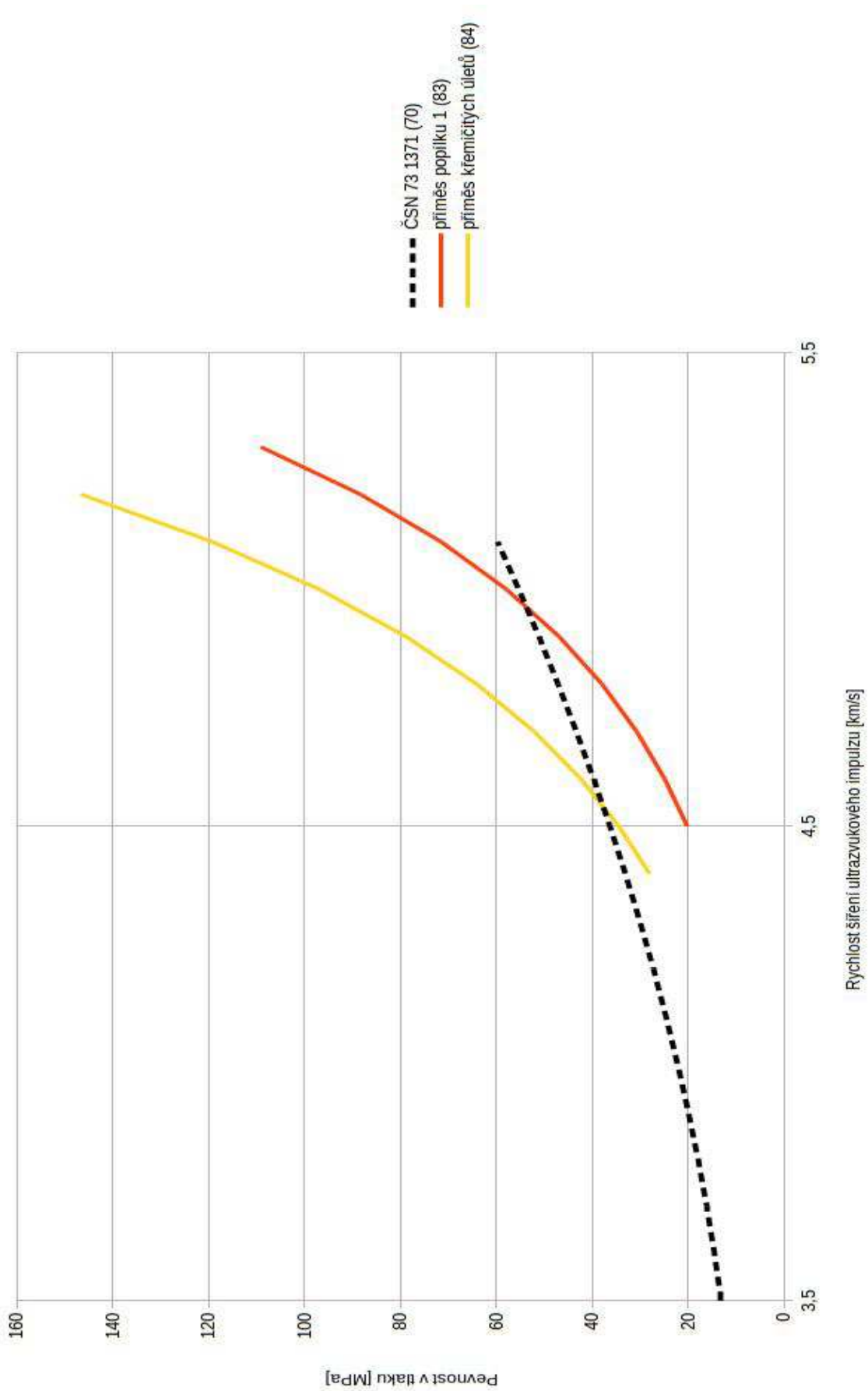
### 9.2.3 Samozhutnitelné betony

Kalibrační vztahy pro určení pevnosti v tlaku samozhutnitelných betonů nejsou uvedeny v českých technických normách. V porovnání jsou použity pouze vztahy z odborné literatury. Jako srovnávací vztah byl použit vztah z ČSN 73 1371 [10], protože v českých normách ani českých odborných publikacích není vztah pro samozhutnitelný beton uveden.

V tabulce 30 jsou uvedeny rozdíly krychelných pevností vysokopevnostních a vysokohodnotných betonů vypočítaných z kalibračních vztahů (83; 84) vztažené ke krychelným pevnostem vypočítaným dle srovnávacího kalibračního vztahu (70) z ČSN 73 1371[10]. Porovnání kalibračních vztahů je graficky znázorněno v obrázku 9.

Tabulka 30. Rozdíly mezi krychelnými pevnostmi  $\Delta f_{ce}$  a  $\delta f_{ce}$  vypočítanými podle referenčního kalibračního vztahu (70) a pevnostmi dle kalibračních vztahů (83; 84) – samozhutnitelné betony, ultrazvuková impulsová metoda

Vztah z normy/ literatury/výrobce	Číslo k.vz.	$\Delta f_{ce}$ [MPa]			$\delta f_{ce}$ [%]		
		<b>Průměr</b>	min	max	<b>Průměr</b>	min	max
SCC s příměsí popílku	83	6,1	2,6	16,1	23,3	4,6	44,5
SCC s příměsí křemičitých úletů	84	20,5	1,9	59,5	39,1	5,1	99,6



Obrázek 9. Grafické porovnání průběhu jednotlivých kalibračních vztahů pro určení krychelné pevnosti samozhutnitelných betonů ze zkoušení ultrazvukovou impulsovou metodou

### 9.3 Kombinovaná metoda

Při výpočtu pevnosti z měření kombinovanou metodou vstupují do výpočtu dvě proměnné, hodnota odrazu a rychlost šíření ultrazvukového impulsu, při tom pro jednu hodnotu proměnné může existovat více hodnot druhé proměnné. Z tohoto důvodu byly pro porovnání nalezených kalibračních vztahů využity hodnoty odrazu a rychlosti šíření ultrazvukového impulsu získané ze zkoušek obyčejných betonů v rámci diplomových prací [39; 40] pevnostní třídy betonů C 25/30 až C 40/50; kde k hodnotám parametrů z nedestruktivního zkoušení existují exaktní hodnoty pevnosti v tlaku zjištěné na zkušebních krychlích s délkou hrany 150 mm. Hodnoty odrazu, rychlosti šíření ultrazvukového impulsu a pevnosti v tlaku jsou uvedeny v tabulce P1 a P2 v příloze 1 bakalářské práce.

V tabulkách 31 a 32 je uvedeny rozdíly krychelných pevností obyčejných betonů vypočítaných z kalibračních vztahů (85; 88; 89) vztažené ke krychelným pevnostem zjištěných při destruktivní zkoušce zkušebních těles.

Tabulka 31. Rozdíly mezi pevnostmi v tlaku zjištěnými destruktivně na krychlích a pevnostmi  $\Delta f_{ce}$  a  $\delta f_{ce}$  vypočítanými z kalibračních vztahů (85; 88; 89) – obyčejné betony, Pevnostní třída C 30/37 až C 40/50 [39]

Vztah z normy/ literatury/výrobce	Číslo k.vz.	$\Delta f_{ce}$ [MPa]			$\delta f_{ce}$ [%]		
		<b>Průměr</b>	min	max	<b>Průměr</b>	min	max
ČSN 73 2011	85	6,3	0,1	10,4	12,3	0,1	23,5
Tanigava et al.	88	4,1	0,4	8,1	8,2	0,8	19,4
Soshiroda and Voraputhaporn	89	7,6	1,3	11,4	14,4	2,7	22,2

Tabulka 32. Rozdíly mezi pevnostmi v tlaku zjištěnými destruktivně na krychlích a pevnostmi  $\Delta f_{ce}$  a  $\delta f_{ce}$  vypočítanými z kalibračních vztahů (84–89) – obyčejné betony, Pevnostní třída C 25/30 a C 30/37[40]

Vztah z normy/ literatury/výrobce	Číslo k.vz.	$\Delta f_{ce}$ [MPa]			$\delta f_{ce}$ [%]		
		<b>Průměr</b>	min	max	<b>Průměr</b>	min	max
ČSN 73 2011	85	3,3	0,1	9,9	9,2	0,4	23,3
Tanigava et al.	88	3,5	0,1	11,5	10,6	0,1	56,2
Soshiroda and Voraputhaporn	89	3,0	0,1	7,1	10,0	0,3	35,8

V tabulkách 33 a 34 je uvedeny rozdíly válcových pevností obyčejných betonů vypočítaných z kalibračních vztahů (86; 87) vztažené ke krychelným pevnostem zjištěných při destruktivní zkoušce zkušebních těles přepočítaných dle vztahu (93) na pevnosti válcové.

Tabulka 33. Rozdíly  $\Delta f_{ce}$  a  $\delta f_{ce}$  mezi válcovými pevnostmi (přepočítanými z krychelné pevnosti) a pevnostmi vypočítanými z kalibračních vztahů (86; 87) – obyčejné betony, Pevnostní třída C 30/37 až C 40/50 [39]

Vztah z normy/ literatury/výrobce	Číslo k.vz.	$\Delta f_{ce}$ [MPa]			$\delta f_{ce}$ [%]		
		Průměr	min	max	Průměr	min	max
Evangelista M1	86	20,3	2,3	46,8	37,7	5,4	76,0
Evangelista M3	87	8,6	4,9	14,5	20,3	13,0	27,3

Tabulka 34. Rozdíly  $\Delta f_{ce}$  a  $\delta f_{ce}$  mezi válcovými pevnostmi (přepočítanými z krychelné pevnosti) a pevnostmi vypočítanými z kalibračních vztahů (86; 87) – obyčejné betony, Pevnostní třída C 25/30 a C 30/37[40]

Vztah z normy/ literatury/výrobce	Číslo k.vz.	$\Delta f_{ce}$ [MPa]			$\delta f_{ce}$ [%]		
		Průměr	min	max	Průměr	min	max
Evangelista M1	86	19,9	0,9	59,1	51,6	3,0	149,1
Evangelista M3	87	4,5	0,3	12,6	14,4	1,3	37,1

## 9.4 Diskuze k výsledkům porovnání kalibračních vztahů

Do porovnání bylo zahrnuto 52 kalibračních vztahů, které byly porovnány s 8 srovnávacími vztahy.

### 9.4.1 Metoda odrazových tvrdoměrů

#### a) Obyčejné betony – krychelná pevnost

Kalibrační vztahy pro Schmidtův tvrdoměr typu N byly srovnávány s kalibračním vztahem (11) uvedeném v ČSN 73 1373 [8].

Kalibrační vztahy pro obyčejné betony se vyznačují různou oblastí použití; nejčastěji se jedné o rozmezí pevností 10 až 60 MPa. Některé vztahy z odborné literatury jsou však pro užší rozsahy, např. vztah (40), který je zpracován pro oblast pevností od 6 do 42 MPa.

Porovnávané kalibrační vztahy (celkem 14) byly podle průměrné odchylky pevnosti od srovnávacího kalibračního vztahu rozděleny do 3 skupin:

- *Vztahy s rozdílem pevností do 5 % od pevnosti srovnávacího kalibračního vztahu:* vztah (28) z JGJ/T 23-2011 [19] – nezkarbonatovaný beton, vztah (32) zpracovaný firmou Proceq pro obyčejný beton zkoušený ve stáří 7 dní a vztahy (5 a 6), které jsou

matematickým vyjádřením tabelárních hodnot uvedených v ČSN 73 1373 [8]. Přímková závislost vztahů (5 a 6) není ideálním vyjádřením tabelárních hodnot uvedených pro Schmidtvův tvrdoměr typu N v ČSN 73 1373 [8] – jestliže je těmito hodnotami proložen polynom druhého stupně, těsnost korelace této závislosti je vyšší a průměrný rozdíl v pevnostech je 0,8 %.

- *Vztahy s rozdílem pevností 5,1 % až 10 % od pevnosti srovnávacího kalibračního vztahu:* kalibrační vztahy (31, 36–41), průměrná odchylka se pohybuje v rozmezí 5,7 % až 8,1 %.
- *Vztahy s rozdílem pevností nad 10 % od pevnosti srovnávacího kalibračního vztahu:* vztah (35) – Proceq beton z portlandského cementu, vztahů (29 a 30) z JGJ/T 23-2011 [19], které zohledňují vliv hloubky karbonatice betonu, vztah (26 a 27) z ČSN EN 13791 [13] a vztah (42) Soshiroda a Voraputhaporn 2.

Jednoznačně největší rozdíly vykazuje vztah (42), který je určený pro prognózování pevnosti betonu ve stáří 3 dny; nelze vyloučit i chybu zápisu v publikaci tohoto vztahu. Základní křivka z ČSN EN 13791 [13], která je matematicky vyjádřena vztahy (26 a 27), je univerzální a nerozlišuje krychelnou a válcovou pevnost.

Z provedeného porovnání je zřejmá rozdílnost v kalibračních vztazích pro určení krychelné pevnosti betonu ze zkoušení Schmidtvým tvrdoměrem typu N. Toto lze vysvětlit zejména tím, že byly zpracovány, pro betony různého, v některých případech specifického, složení, či pro různá stáří zkoušeného betonu.

## **b) Obyčejné betony – válcová pevnost**

Pro odhad válcové pevnosti betonu ze zkoušení Schmidtvým tvrdoměrem typu N byl jako srovnávací kalibrační vztah použit vztah (33) od firmy Proceq, z důvodu neexistence vztahu kodifikovaném v českých normách; v České republice není válcová pevnost betonu běžně zjišťovaným typem pevnosti v tlaku betonu.

K dispozici jsou kromě srovnávacího vztahu (33) ještě 4 kalibrační vztahy z odborné literatury.

Vztah (39) vykazoval průměrný rozdíl v pevnosti 8,1 % ve srovnání se srovnávacím kalibračním vztahem.

Ostatní vztahy (43–45) vykazují rozdíly nad 40 %. Nejvyšší odchylku pevností vykazují vztahy (44, 45) od autora Evangelista [25], která průměrně nabývá hodnot 72,6 % (44), resp. 86,9 % (45). Autorem Gonçalves [21] byla využívána válcová zkušební tělesa připravená z jádrových vývrtů o průměru 70 mm. Rozdílnost ve tvaru zkušebních těles i ve



způsobu jejich přípravy ovlivňuje i výslednou pevnost stanovenou destruktivně zatěžováním v lisu.

### **c) Vysokohodnotné a vysokopevnostní betony**

Pro vysokopevnostní a vysokohodnotné betony nejsou uvedeny v normách kalibrační vztahy pro určení pevnosti z hodnoty odrazu tvrdoměru systému Schmidt. Tyto lze nalézt pouze v odborných publikacích. V České republice se touto problematikou zabýval Brožovský, který publikoval v BetonTKS 6/2011 [26] několik kalibračních vztahů (46 až 49).

Jako srovnávací kalibrační vztah byl zvolen vztah (46) pro stáří betonu 1 až 60 dní s koeficientem korelace 0,97. Porovnávané kalibrační vztahy mají korelační koeficient buď vyšší než 0,85 a lze je považovat za použitelné k určení pevnosti v tlaku, nebo je autoři neuvádějí.

Porovnávané vztahy zpracované Brožovským (47–49) jsou pro stanovení pevnosti vysokopevnostních betonů pro různá období zrání a mají průměrné odchylky od 2,8 % srovnávacího vztahu do 6,7 %.

Zbývající dva kalibrační vztahy vykazují průměrné odchylky 25,6 % (56) a 74,3 % (54). Tyto značné odchylky mohou být dány jednak tím, že jsou pro betony o vyšších pevnostech než betony ve srovnávacím kalibračním vztahu, jednak odlišným složením betonů, zejména použitými příměsemi a ztekucujícími či jinými přísadami.

### **d) Lehké betony**

Obdobně jako pro vysokopevnostní/vysokohodnotné betony, tak i pro lehké betony s keramickým kamenivem, nejsou uvedeny v normách kalibrační vztahy pro určení pevnosti z hodnoty odrazu tvrdoměru systému Schmidt. Tyto vztahy lze nalézt pouze v odborných publikacích.

V České republice se touto problematikou zabýval Brožovský, který publikoval v BetonTKS 6/2009 [29] kalibrační vztahy (57 až 58).

Jako srovnávací kalibrační vztah byl zvolen vztah (57) pro stáří betonu 7 až 180 dní s koeficientem korelace 0,96.

Kalibrační vztahy (60–66) zpracované výzkumníky vykazují kromě vztahu (63) průměrnou odchylku v pevnostech od 11,4 % do 16,9 %, přičemž hodnoty odchylky se snižují se zvyšující se objemovou hmotností; kalibrační vztah (63) pro objemové hmotnosti betonu v rozmezí 1600–1700 kg/m<sup>3</sup> vykazuje diametrálně odlišnou průměrnou odchylku v pevnostech, a to 43,87 %.

Rozdíly mezi pevnostmi vypočítanými podle kalibračních vztahů (57–58) a podle

kalibračních vztahů (60–62, 64–66) mohou být způsobeny různým složením lehkých betonů a různými vlastnostmi lehkého keramického kameniva. Pevnosti vypočítané dle vztahu (63) se diametrálně liší nejen od pevností vypočítaných dle vztahů (57–58), ale i od pevností vypočítaných dle ostatních vztahů zpracovaných čínskými výzkumníky, a proto nelze vyloučit chybu v zápise matematického vyjádření tohoto vztahu.

#### e) Samozhutnitelné betony

Pro samozhutnitelné betony v tuzemských zdrojích neexistují kalibrační vztahy a v odborné literatuře jsou pouze ve velmi omezeném počtu.

Z tohoto důvodu byl jako srovnávací zvolen kalibrační vztah (11) z ČSN 73 1373 [8] pro obyčejné betony.

Kalibrační vztahy (67; 68) z odborné literatury mají sice vysoké hodnoty korelačních koeficientů 0,98 (67) a 0,96 (68), ale vykazují diametrální rozdíly mezi hodnotami pevností při stejné hodnotě odrazu. Kalibračnímu vztahu (11) se přibližuje vztah (68), avšak se zvyšujícími se hodnotami odrazu se zvyšuje rozdíl mezi pevnostmi. Vztah (67) se diametrálně liší od obou výše hodnocených vztahů. Rozdíl mezi pevnostmi vypočítanými podle srovnávacího vztahu a vztahu (67) je v průměru 64,1 %.

Zjištěné rozdíly lze vysvětlit jednak tím, že vztah z ČSN 73 1373 [8] je zpracován pro obyčejné betony, jednak rozdílným složením a pružnostními vlastnostmi samozhutnitelných betonů.

### 9.4.2 Ultrazvuková impulsová metoda

#### a) Obyčejné betony – krychle

Kalibrační vztahy pro ultrazvukovou impulsovou metodu byly srovnávány s kalibračním vztahem (70) uvedeném v ČSN 73 1371 [10], který byl zpracován pro krychle s délkou hrany 200 mm. Pro hodnocené kalibrační vztahy nejsou uvedeny koeficienty korelace.

Porovnávané kalibrační vztahy (celkem 6) byly podle průměrné odchylky pevnosti od srovnávacího kalibračního vztahu rozděleny do 3 skupin:

- *Vztahy s rozdílem pevností 10–17 % od pevnosti srovnávacího kalibračního vztahu:* vztah (73) z Sishoroda a Vorapuhaporm 1 [23], vztah (71) z Galan [32] pro krychle s délkou hrany 150 mm. Nejnižší odchylku v MPa vykazuje vztah (71), kde průměrná odchylka od srovnávacího vztahu má hodnotu 3,5 MPa, tato odchylka (s rozdílem 0,1 MPa) je v celé oblasti rozsahu platnosti kalibračního vztahu.

- *Vztahy s rozdílem pevností 20 % až 40 % od pevnosti srovnávacího kalibračního vztahu:* kalibrační vztahy (75 a 76), průměrná odchylka pevností se pohybuje v rozmezí 25,9 % až 34,7 %.
- *Vztahy s rozdílem pevností nad 50 % od pevnosti srovnávacího kalibračního vztahu:* vztah (69) z ČSN EN 13791 [13] a vztah (74) – Soshiroda a Voraputhaporn 2 [23].
- Jednoznačně největší rozdíly vykazuje vztah (74), který je určený pro prognózování pevnosti betonu ve stáří 1 den; u tohoto vztahu nelze vyloučit chybu v zápisu v publikaci. Základní křivka z ČSN EN 13791 [13], která je matematicky vyjádřena vztahem (69), je nereálná jednak z důvodu oblasti použití 4,0 až 4,8 km/s, jednak proto, že při rychlosti 4,0 km/s je považována pevnost betonu za nulovou.

Z provedeného porovnání je zřejmá rozdílnost v kalibračních vztazích pro určení krychelné pevnosti betonu ze zkoušení ultrazvukovou impulsovou metodou.

Rozdíly mezi pevnostmi vypočítanými z uvedených kalibračních vztahů lze vysvětlit faktory, které ovlivňují výsledky měření ultrazvukovou metodou, jako jsou vlastnosti a poměr složek, vlhkost při zkoušení, frekvence sond a stáří betonu.

#### **b) Obyčejné betony – válce**

Jako srovnávací kalibrační vztah pro válcové pevnosti byl použit vztah (70) z ČSN 73 1371 [11], ze kterého se vypočítává krychlená pevnost betonu. Pro potřeby srovnání bych tento vztah přepočten na pevnosti válcové pomocí korekčního součinitele, který má hodnotu 0,8.

Rozdíly v pevnostech porovnávaných kalibračních vztahů se pohybují v rozmezí od 17,0 % (72) do 28,2 % (78).

Autorem Gonçalves [21] byla využívána válcová zkušební tělesa připravená z jádrových vývrtů o průměru 70 mm. Rozdíly mezi pevnostmi vypočítanými z uvedených kalibračních vztahů lze vysvětlit jednak faktory, které ovlivňují výsledky měření ultrazvukovou metodou, jako jsou vlastnosti a poměr složek, vlhkost při zkoušení, frekvence sond, jednak rozdílným tvarem zkušebních těles i způsobem jejich přípravy ovlivňujícím i výslednou pevnost stanovenou destruktivně zatěžováním v lisu.

#### **c) Vysokopevnostní a vysokohodnotné betony**

Pro vysokopevnostní/vysokohodnotné betony nejsou uvedeny v normách kalibrační vztahy pro určení pevnosti z rychlosti šíření ultrazvukového impulsu. Tyto lze nalézt pouze v odborných publikacích.

Jako srovnávací kalibrační vztah byl zvolen vztah (79) zpracovaný Almeidou [27], pro který, stejně jako pro ostatní, nejsou autory uvedeny korelační koeficienty či jiné parametry popisující těsnost jejich korelace.

Rozdíly v pevnostech porovnávaných kalibračních vztahů (80 a 81) jsou od 10,6 % do 13,8 %.

Největší průměrný rozdíl vykazuje vztah (82) s hodnotou 27,5 % a užším rozsahem oblasti pevností (15–80 MPa).

Rozdíly mezi pevnostmi vypočítanými z uvedených kalibračních vztahů lze vysvětlit faktory, které ovlivňují výsledky měření ultrazvukovou metodou, a v případě vztahu (82) i jiným tvarem zkušebního tělesa (krychle s délkou hrany 100 mm).

#### **d) Samozhutnitelné betony**

Pro samozhutnitelné betony v tuzemských zdrojích neexistují kalibrační vztahy a v odborné literatuře jsou ve velmi omezeném počtu.

Z tohoto důvodu byl jako srovnávací vztah zvolen kalibrační vztah (70) z ČSN 73 1371 [11] pro obyčejné betony.

Kalibrační vztahy (83, 84) z odborné literatury mají sice hodnoty korelačních koeficientů, podle kterých splňují požadavky na jejich praktickou využitelnost,  $r = 0,94$  (83), resp.  $r = 0,86$  (84), ale se zvyšující se hodnotou rychlosti šíření ultrazvukového impulsu se zvyšuje rozdíl v pevnostech.

Rozdíl mezi pevnostmi vypočítanými z porovnávaných vztahů (83, 84) a ze srovnávacího vztahu (70) jsou poměrně vysoké, u vztahu (83) 23,3 %, u vztahu (84) 39,1 %.

Zjištěné rozdíly lze vysvětlit tím, že vztah z ČSN 73 1371 [11] je zpracován pro obyčejné betony, rozdílným složením samozhutnitelných betonů a faktory ovlivňující výsledky měření ultrazvukovou impulsovou metodou.

Rozdíly mezi pevnostmi vypočítanými z kalibračních vztahů (83) a (84) lze vysvětlit i použitím různých příměsí, které sice významně ovlivňují pevnosti betonu, avšak vliv na rychlost šíření ultrazvukového impulsu není tak významný.

#### **9.4.3 Kombinovaná metoda**

V případě kombinované metody byly kalibrační vztahy porovnávané s experimentálně naměřenými hodnotami krychelných pevností pro betony třídy C 25/30 až C 40/50, které byly převzaty z prací [39] [40] a jsou uvedené v tabulkách P1 a P2 v příloze 1 bakalářské práce.

### **a) Obyčejné betony – krychle**

Pro kalibrační vztahy (88 a 89) je uveden koeficient korelace, který je 0,94–0,96. Při porovnání vypočtených hodnot z porovnávaných kalibračních vztahů (85, 88, 89) krychelnými pevnostmi pro betony třídy C 30/37 až 40/50 převzatých z [39] se rozdíly mezi pevnostmi pohybují v intervalu 8,2–14,4 % a pro betony C 25/30–30/37 jsou tyto rozdíly v rozmezí 9,2–10,6 %.

Rozdíly v pevnostech vypočítaných dle kalibračních vztahů (85, 88, 89) ve srovnání s hodnotami experimentálně zjištěných jsou vyšší pro betony pevnostní třídy C 30/37–40/50 než u betonů pevnostní třídy C 25/30–30/37.

### **b) Obyčejné betony – válce**

Vzhledem k tomu, že z experimentálních prací byly k dispozici pouze krychelné pevnosti, byly tyto pevnosti přepočítány na válcové pomocí vztahu (93).

Při porovnání vypočtených hodnot z porovnávaných kalibračních vztahů (86, 87) pro krychelné pevnosti pro betony tříd C 30/37–40/50 převzatých z [39] vykazují rozdíly mezi pevnostmi hodnoty 37,7 % (86) a 20,3 % (87) a pro betony C 25/30–30/37 mají kalibrační vztahy odchylky 51,6 % (86) a 14,4 % (87).

Kalibrační vztah (86) vykazuje větší odchylku ve srovnání s experimentálně zjištěnými hodnotami pro betony tříd C 25/30–30/37 než u betonů tříd C 30/37–40/50 na rozdíl od vztahu (87), který ačkoliv byl zpracován stejnými autory, je přesnější pro nižší ze zkoumaných tříd betonů.

## 10 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo porovnání kalibračních vztahů pro určení pevnosti betonu v tlaku z nedestruktivního zkoušení betonů různých typů uvedených v technických normách, odborných člancích a odborné literatuře. Konkrétně se jednalo o porovnání kalibračních vztahů pro metodu odrazového tvrdoměru systému Schmidt, ultrazvukovou impulsovou metodu a kombinovanou metodu SonReb (kombinace odrazového tvrdoměru systému Schmidt typ N a ultrazvukové impulsové metody).

Na základě rešerše norem a odborných publikací byl zpracován přehled kalibračních vztahů pro uvedené metody a jednotlivé druhy betonu (obyčejný, vysokohodnotný, vysokopevnostní, lehký s keramickým kamenivem, samozhutnitelný). Do přehledu kalibračních vztahů nebyly zahrnuty vztahy uváděné v literatuře, kde bylo zjištěno, že byly zpracovány na základě statisticky nevýznamného souboru vzorků. Ne vždy byly k nalezeným kalibračním vztahům k dispozici všechny průvodní informace. Četnost kalibračních vztahů pro jednotlivé typy betonů a nedestruktivní metody je různá. Nejvíce kalibračních vztahů je k dispozici pro zkoušení obyčejného betonu, a to odrazovým tvrdoměrem Schmidt typu N a ultrazvukovou impulsovou metodou. Pro ostatní druhy betonu je počet těchto kalibračních vztahů podstatně menší.

Porovnávalo bylo 52 kalibračních vztahů pro určení pevnosti v tlaku betonu s 8 srovnávacími vztahy. Jako srovnávací vztahy byly primárně použity vztahy z českých technických norem nebo vztahy vypracované v českých podmínkách; pouze ve dvou případech, kdy nebyly k dispozici vztahy z českých technických norem či odborných publikací, byly použity srovnávací vztahy ze zahraniční literatury. Pevnosti v tlaku vypočítané z hodnocených kalibračních vztahů vykazují převážně významné až velmi významné odchylky od pevností vypočítaných dle vztahů srovnávacích. Tyto rozdíly jsou způsobeny řadou faktorů, zejména různým složením a parametry ztvrdlých betonů, podmínkami zrání, termíny zkoušení, faktory ovlivňujícími výsledky měření použité metody (zejména se tyto faktory projevují při měření ultrazvukovou impulsovou metodou), v ojedinělých případech nelze vyloučit i nesprávně uvedený matematický zápis vztahu v odborné publikaci. Řada kalibračních vztahů, zpravidla z odborné literatury, nemá dostatečné průvodní informace (např. hodnoty síly při zatěžování vzorku ve zkušebním lisu, rozměry zkušebních těles, koeficient korelace, údaje o podmínkách zkoušení a způsobu vyhodnocení).

Při využívání kalibračních vztahů z odborných publikací je třeba přistupovat obezřetně k jejich používání v praxi. Jedná se zejména o vztahy pro jiné než obyčejné betony, v tomto případě je třeba ověřit jejich použitelnost srovnávacími zkouškami na zkušebních tělesech

(zjištění pevnosti v tlaku z parametrů nedestruktivního zkoušení a pevnosti destruktivně ve zkušební lisu).

Předložená bakalářská práce splnila své stanovené cíle popsat vybrané postupy nedestruktivního zkoušení, porovnat kalibrační vztahy pro stanovení pevnosti v tlaku betonu z měření uvedenými nedestruktivními metodami a zhodnotit jejich praktickou využitelnost.

## 11 Seznam použité literatury

- [1] HELA, Rudolf. Technologie betonu II. Brno: CERM, 2007
- [2] ČSN EN 206. *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha, 2014.
- [3] DROCHYTKA, Rostislav, Matulová Pavla. *Lehké stavební látky*, Brno: 2006.
- [4] ČSN EN 206 – 1. *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví 2008.
- [5] TP 226. *Vysokohodnotné betony pro mosty PK. Technické podmínky*, Praha, 2010.
- [6] AĪTCIN, P.–C. *Vysokohodnotný beton.*, ČKAIT, 2005. ISBN 80-86769-39-9.
- [7] ČSN EN 12504-2. *Zkoušení betonu v konstrukcích – Část 2: Nedestruktivní zkoušení – Stanovení tvrdosti odrazovým tvrdoměrem*, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha, 2013.
- [8] ČSN 73 1373. *Nedestruktivní zkoušení betonu – Tvrdoměrné metody zkoušení betonu*, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha 2011.
- [9] ČSN EN 12504-4. *Zkoušení betonu – Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha, 2005.
- [10] ČSN 73 1371. *Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulsová metoda zkoušení betonu*, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha 2011.
- [11] ČSN 73 1370. *Nedestruktivní zkoušení betonu – Společná ustanovení*, 2011.
- [12] ČSN 73 2011. *Nedestruktivní zkoušení betonových konstrukcí*, 2012.
- [13] ČSN EN 13791. *Posuzování pevnosti betonu v tlaku v konstrukcích a v prefabrikovaných betonových dílcích*, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha, 2007.
- [14] ANTON, O. a kolektiv. *Základy zkušebnictví. Návody do cvičení*, Brno CERM, 2002, 63 str. ISBN 80-214-2079-0.
- [15] PAVLÍK, A. – Doležel, J. *Nedestruktivní vyšetřování betonových konstrukcí*, SNTL, 1977.
- [16] PUCINOTTI, Raffaele. *THE USE OF MULTIPLE COMBINED NON DESTRUCTIVE TESTING IN THE CONCRETE TRENGHT ASSESSENT: APPLICATIONS ON LABORATORY SPECIMENS* [online].7 [cit.2015-01-16]. Dostupné z: <http://www.ndt.net/article/hsndt2007/files/Pucinotti.pdf>



- [17] JANKO, Jaroslav. *Statistické tabulky*. Praha, 1958.
- [18] ČSN 73 1370. *Nedestruktivní zkoušení betonu – Společná ustanovení*, Praha, 1982.
- [19] JGJ/T 23-2011. *Technical specification for inspecting of concrete compressive strength by rebound method*. 2011. Ministry of Housing and Urban, People's Republic of China.
- [20] Operation instructions of Concrete test hammer: Original Schmidt. 2006. Proceq. Dostupné také z [http://www.proceq.com/fileadmin/documents/proceq/products/Concrete/OriginalSchmidt/English/proceq\\_operating\\_instructions\\_Original\\_Schmidt\\_e.pdf](http://www.proceq.com/fileadmin/documents/proceq/products/Concrete/OriginalSchmidt/English/proceq_operating_instructions_Original_Schmidt_e.pdf)
- [21] GONCALVES, A. , 1995, "In situ concrete strength estimation. Simultaneous use of cores, rebound hammer and pulse velocity", International Symposium NDT in Civil Engineering, Germany, pp.977–984.
- [22] QASRAWI, H. Y., "Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliably predicted". *Cement and Concrete Research*, May, 2000, pp.739–746.
- [23] SOSHIORDA, T. and Voraputhaporn, K., "Recommended method for earlier inspection of concrete quality by non-destructive testing", *Concrete durability and repair technology*, September, Dundee, 1999, pp.27–36.
- [24] LIMA, F.B. and SILVA M.F.B., "Correlação entre a resistência à compressão do concreto e a sua dureza superficial (Portuguese)", *Proceedings, IV Congresso de Engenharia Civil*, Ed. Interciência, Juiz de Fora , 2000, pp. 429–44.
- [25] EVANGELISTA, Ana Catarina Jorge. 2002. *AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO USANDO DIFERENTES ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS*. RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.
- [26] BROŽOVSKÝ J.: *Hodnocení pevnosti v tlaku vysokohodnotných betonů odrazovými tvrdoměry*. *Beton TKS 6/2011*, 2011.
- [27] ALMEIDA, I. R., "Emprego do esclerômetro e do ultra-som para efeito da avaliação qualitativa dos concretos de alto desempenho (Portuguese)", *Professorship thesis*, Universidade Federal Fluminense, Niterãi, Brasil, 1993, 124pp.
- [28] PASCALE, G, et al., "Evaluation of actual compressive strength concrete by NDT", *15<sup>th</sup> World Conference on Non-Destructive Testing* , Roma, 2000.
- [29] BROŽOVSKÝ J. : *Nedestruktivní zjišťování pevnosti lehkého betonu s keramickým kamenivem odrazovými tvrdoměry systému Schmidt*. *Beton TKS 6/2009*, 2009.
- [30] RONG Hui<sup>1</sup>, QIAN Chunxiang<sup>1</sup>, GAO Lixiong<sup>2</sup>, HAN Jiande<sup>1</sup>, WANG Caihui<sup>1</sup>. *The Testing Strength Curves of Lightweight Aggregate Concrete by Rebound Method and Ultrasonic-rebound Combined Method*, (1. School of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China; 2. School of Materials

- Science and Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China), 2011.
- [31] BERGOL L. FORNASIER G. FAVA C. "Hormigones autocomapactantes: alternativa de utilización en elementos estructurales viales" příspěvek na konferenci „XIII congreso argentino de vialidad y tránsito“ Buenos Aires, 2011.
- [32] GALAN A. *Kombinované ultrazvukové metody skúšania betónu*, Veda, Bratislava. 1984.
- [33] ELVERY, R.H. and IBRAHIM, L.A.M., Ultrasonic assessment of concrete strength at early ages, Magazine of Concrete Research, 1976, pp.181–190.
- [34] TEODORU, G. V, The use of simultaneous nondestructive tests to predict the compressive strength of concrete, Nondestructive Testing, Special Publication SP-112, American Concrete Institute, Detroit, 1988, pp.137–152.
- [35] RAVINDRAJAH et al, "Strength evaluation of recycled-aggregate concrete by in situ tests", Materials and Structures, 1988, V.21, pp.289–295.
- [36] COTA F. P., PANZERA T. H., CHRISTOFORO A. L., BORGES P. H. R., BOWER C. R. Ultrasonic pulse velocity evaluation of cementitious materials.; Advances in Composite Materials - Analysis of Natural and Man-Made, 2011.
- [37] TANIGAWA Y, Baba K., Mori H. Estimation of Concrete Strength by Combined Nondestructive Testing Method, ACI, SP-82, pp.57–65.
- [38] DOMINGO, R. (2011). Correlation Between Concrete Strength and Combined Nondestructive Tests for Concrete Using High-Early Strength Cement. Scientific Research and Essays 6, pp. 213–220.
- [39] GONSIOR M. *Vliv jakosti drobného kameniva na vlastnosti betonů pevnostní třídy C 30/37 s přísadou na bázi polykarboxylátů*. Brno, 2007. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Brožovský, CSc.
- [40] LACOURT P. *Zhodnocení vlivu způsobu uložení zkušebních těles na fyzikálně - mechanické charakteristiky betonů třídy C 25/30 a 30/37*. Brno, 2008. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Brožovský, CSc.
- [41] ČSN EN 12504-1. *Zkoušení betonu v konstrukcích – Část 1: Vývrty – odběr, vyšetření a zkoušení v tlaku* Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha, 2013.

## 12 Seznam použitých zkratk a symbolů

$f_{ce}$	pevnost betonu v tlaku v MPa
$v$	rychlost šíření čela podélných ultrazvukových vln v trojrozměrném prostředí
$R$	je hodnota odrazu tvrdoměru systému Schmidt
$r$	koeficient korelace
$f_b$	pevnost betonu v tlaku stanovená destruktivní metodou
$\beta_e$	hodnota ukazatele nedestruktivního zkoušení
$S$	směrodatná odchylka
$D_i$	poměrná odchylka pro $i$ -tý bod kalibračního vztahu
$n$	počet měřených bodů kalibračního vztahu
$k$	počet parametrů volené funkce kalibračního vztahu
$f_{bi}$	pevnost betonu v tlaku pro $i$ -tý bod kalibračního vztahu z destruktivního zkoušení
$f_{bdi}$	pevnost betonu v tlaku pro vypočtená z ukazatele nedestruktivního zkoušení pro $i$ -tý bod
$\Delta f_{ce}$	odchylka pevnosti betonu v tlaku udaná v MPa
$\delta f_{ce}$	odchylka pevnosti betonu v tlaku udaná v %
$f_{cer}$	pevnost v tlaku srovnávacího kalibračního vztahu
$f_{cep}$	pevnost v tlaku porovnávaného kalibračního vztahu
$f_{ce,cy}$	válcová pevnost v tlaku
$f_{ce,cu}$	krychelná pevnost v tlaku

## 13 Seznam tabulek

- Tabulka 1. Kalibrační vztahy uvedené v ČSN 73 1373 pro tvrdoměr Schmidt typ N
- Tabulka 2. Kalibrační vztahy uvedené v ČSN 73 1373 pro tvrdoměr Schmidt typ L
- Tabulka 3. Kalibrační vztahy uvedené v ČSN 73 1373 pro tvrdoměr Schmidt typ M
- Tabulka 4. Kalibrační vztah uvedený v ČSN EN 13791 pro tvrdoměr Schmidt typ N
- Tabulka 5. Kalibrační vztahy uvedené v JGJ/T 23-2011 pro tvrdoměr Schmidt typ N
- Tabulka 6. Kalibrační vztahy uváděné firmou Proceq
- Tabulka 7. Kalibrační vztahy z odborné literatury pro Schmidtův tvrdoměr typu N
- Tabulka 8. Kalibrační vztahy pro Schmidtův tvrdoměr typu N pro vysokohodnotné a vysokopevnostní betony z odborné literatury
- Tabulka 9. Kalibrační vztahy pro Schmidtův tvrdoměr typu L pro vysokohodnotné a vysokopevnostní betony z odborné literatury
- Tabulka 10. Kalibrační vztahy pro Schmidtův tvrdoměr typu N pro vysokohodnotné a vysokopevnostní betony ze zahraniční odborné literatury
- Tabulka 11. Kalibrační vztahy pro Schmidtův tvrdoměr typu N a L pro lehký beton z odborné literatury
- Tabulka 12. Kalibrační vztahy pro Schmidtův tvrdoměr typu N pro lehké betony ze zahraniční odborné literatury
- Tabulka 13. Kalibrační vztahy pro Schmidtův tvrdoměr typu N pro samozhutnitelné betony
- Tabulka 14. Kalibrační vztah z ČSN EN 13791 pro ultrazvukovou impulsovou metodu
- Tabulka 15. Kalibrační vztah Uvedený v ČSN 73 1371
- Tabulka 16. Kalibrační vztahy pro výpočet pevnosti betonu v tlaku ze zkoušení ultrazvukovou impulsovou metodou z odborné literatury pro obyčejné betony
- Tabulka 17. Kalibrační vztahy pro výpočet pevnosti betonu v tlaku ze zkoušení ultrazvukovou impulsovou metodou pro vysokopevnostní a vysokohodnotné betony z odborné literatury
- Tabulka 18. Kalibrační vztahy pro výpočet pevnosti samozhutnitelných betonů v tlaku ze zkoušení  
ultrazvukovou impulsovou metodou
- Tabulka 19. Kalibrační vztah pro výpočet pevnosti betonu v tlaku pomocí kombinované metody SonReb pro  
obyčejný beton z ČSN 73 2011

Tabulka 20. Kalibrační vztahy pro výpočet pevnosti betonu v tlaku pomocí kombinované metody SonReb pro obvyčejné betony

Tabulka 21. Kalibrační vztah pro výpočet pevností betonu v tlaku pomocí kombinované metody SonReb pro obvyčejný beton s rychlým náběhem pevností

Tabulka 22. Rozdíly mezi krychelnými pevnostmi  $\Delta f_{ce}$  a  $\delta f_{ce}$  vypočítanými podle referenčního kalibračního vztahu (11) a pevnostmi dle kalibračních vztahů (5; 6; 26–32; 35–38; 40–42) obvyčejné betony, Schmidtův tvrdoměr typu N

Tabulka 23. Rozdíly mezi krychelnými pevnostmi  $\Delta f_{ce}$  a  $\delta f_{ce}$  vypočítanými podle referenčního kalibračního vztahu (32) a pevnostmi dle kalibračních vztahů (39; 43–45) – obvyčejné betony, Schmidtův tvrdoměr typu N

Tabulka 24. Rozdíly mezi krychelnými pevnostmi  $\Delta f_{ce}$  a  $\delta f_{ce}$  vypočítanými podle referenčního kalibračního vztahu (46) a pevnostmi dle kalibračních vztahů (47–49; 54; 56) vysokohodnotné a vysokopevnostní betony, Schmidtův tvrdoměr typu N

Tabulka 25. Rozdíly mezi krychelnými pevnostmi  $\Delta f_{ce}$  a  $\delta f_{ce}$  vypočítanými podle referenčního kalibračního vztahu (57) a pevnostmi dle kalibračních vztahů (58; 60–66) lehké betony, Schmidtův tvrdoměr typu N

Tabulka 26. Rozdíly mezi krychelnými pevnostmi  $\Delta f_{ce}$  a  $\delta f_{ce}$  vypočítanými podle referenčního kalibračního vztahu (11) a pevnostmi dle kalibračních vztahů (67; 68) samozhutnitelné betony, Schmidtův tvrdoměr typu N

Tabulka 27. Rozdíly mezi krychelnými pevnostmi  $\Delta f_{ce}$  a  $\delta f_{ce}$  vypočítanými podle referenčního kalibračního vztahu (70) a pevnostmi dle kalibračních vztahů (69; 71; 73–76) obvyčejné betony, ultrazvuková impulsová metoda

Tabulka 28. Rozdíly  $\Delta f_{ce}$  a  $\delta f_{ce}$  mezi válcovými pevnostmi (přepočítanými z krychelné pevnosti) ze vztahu (70) a pevnostmi vypočítanými z kalibračních vztahů (72, 77, 78) – obvyčejné betony

Tabulka 29. Rozdíly mezi krychelnými pevnostmi  $\Delta f_{ce}$  a  $\delta f_{ce}$  vypočítanými podle referenčního kalibračního vztahu (70) a pevnostmi dle kalibračních vztahů (80–82) vysokopevnostní a vysokohodnotné betony, ultrazvuková impulsová metoda

Tabulka 30. Rozdíly mezi krychelnými pevnostmi  $\Delta f_{ce}$  a  $\delta f_{ce}$  vypočítanými podle referenčního kalibračního vztahu (70) a pevnostmi dle kalibračních vztahů (83; 84) samozhutnitelné betony, ultrazvuková impulsová metoda

Tabulka 31. Rozdíly mezi pevnostmi v tlaku zjištěnými destruktivně na krychlích a pevnostmi

$\Delta f_{ce}$  a  $\delta f_{ce}$  vypočítanými z kalibračních vztahů (84–89) – obyčejné betony, pevnostní třída C 30/37 až C 40/50

Tabulka 32. Rozdíly mezi pevnostmi v tlaku zjištěnými destruktivně na krychlích a pevnostmi  $\Delta f_{ce}$  a  $\delta f_{ce}$  vypočítanými z kalibračních vztahů (84–89) – obyčejné betony, pevnostní třída C 25/30 a C 30/37

Tabulka 33. Rozdíly  $\Delta f_{ce}$  a  $\delta f_{ce}$  mezi válcovými pevnostmi (přepočítanými z krychelné pevnosti) a pevnostmi vypočítanými z kalibračních vztahů (86; 87) – obyčejné betony, pevnostní třída C 30/37 až C 40/50

Tabulka 34. Rozdíly  $\Delta f_{ce}$  a  $\delta f_{ce}$  mezi válcovými pevnostmi (přepočítanými z krychelné pevnosti) a pevnostmi vypočítanými z kalibračních vztahů (86; 87) – obyčejné betony, pevnostní třída C 25/30 a C 30/37

## 14 Seznam obrázků

Obrázek 1. Grafické porovnání průběhu jednotlivých kalibračních vztahů pro určení krychelné pevnosti obyčejných betonů ze zkoušení odrazovým tvrdoměrem systému Schmidt typ N

Obrázek 2. Grafické porovnání průběhu jednotlivých kalibračních vztahů pro určení válcové pevnosti obyčejných betonů ze zkoušení odrazovým tvrdoměrem systému Schmidt typ N

Obrázek 3. Grafické porovnání průběhu jednotlivých kalibračních vztahů pro určení válcové pevnosti obyčejných betonů ze zkoušení odrazovým tvrdoměrem systému Schmidt typ N

Obrázek 4. Grafické porovnání průběhu jednotlivých kalibračních vztahů pro určení krychelné pevnosti lehkých betonů ze zkoušení odrazovým tvrdoměrem systému Schmidt typ N

Obrázek 5. Grafické porovnání průběhu jednotlivých kalibračních vztahů pro určení krychelné pevnosti samozhutnitelných betonů ze zkoušení odrazovým tvrdoměrem systému Schmidt typ N

Obrázek 6. Grafické porovnání průběhu jednotlivých kalibračních vztahů pro určení krychelné pevnosti obyčejných betonů ze zkoušení ultrazvukovou impulsovou metodou

Obrázek 7. Grafické porovnání průběhu jednotlivých kalibračních vztahů pro určení válcové pevnosti obyčejných betonů ze zkoušení ultrazvukovou impulsovou metodou

Obrázek 8. Grafické porovnání průběhu jednotlivých kalibračních vztahů pro určení krychelné pevnosti vysokopevnostních a vysokohodnotných betonů ze zkoušení ultrazvukovou impulsovou metodou

Obrázek 9. Grafické porovnání průběhu jednotlivých kalibračních vztahů pro určení krychelné pevnosti samozhutnitelných betonů ze zkoušení ultrazvukovou impulsovou metodou

## **15 Seznam příloh**

Příloha P1. Tabulka naměřených hodnot odrazu, rychlosti šíření ultrazvukového impulsu a pevnosti v tlaku pro obyčejné betony tříd C 30/37 – C 40/50

Příloha P2. Tabulka naměřených hodnot odrazu, rychlosti šíření ultrazvukového impulsu a pevnosti v tlaku pro obyčejné betony tříd C 20/25 – C 30/37