

7 ZTVRDLÝ BETON 1

Beton jako jeden ze základních stavebních materiálů (mnoho pramenů uvádí, že se celosvětově jedná o nejpoužívanější materiál ve stavebnictví vůbec) je pochopitelně nutné kontrolovat. Kvalitu betonu, přesněji skutečnost, zda jeho vlastnosti odpovídají deklarovaným hodnotám, je možné kontrolovat ve stavu čerstvém nebo ve stavu ztvrdlém.

Norma ČSN EN 206+A2 a s ní spjatá norma ČSN P 73 2404 uvádějí požadavky na beton v kapitole 6.2 „Specifikace typového betonu“. Typový beton se musí specifikovat:

- základními požadavky, které se musí uvádět vždy,
- doplňujícími požadavky, které se uvádějí podle potřeby (tedy vždy, když jsou požadovány).

Základní požadavky jsou:

- požadavek, aby beton vyhovoval normě ČSN EN 206+A2,
- třída pevnosti betonu,
- stupeň vlivu prostředí,
- D_{upper} a D_{lower} (maximální jmenovitá mez frakce kameniva),
- stupeň obsahu chloridů,
- pro lehký beton navíc třídu objemové hmotnosti nebo určenou objemovou hmotnost,
- pro těžký beton navíc určenou objemovou hmotnost,
- pro transportbeton a beton vyráběný na staveništi navíc stupeň konzistence nebo určenou hodnotu konzistence.

Doplňující požadavky definují složení betonu (např. zvláštní druhy nebo třídy cementu, zvláštní druhy nebo třídy kameniva apod.), určité vlastnosti čerstvého betonu (obsah vzduchu u čerstvého provzdušněného betonu, obsah vláken u čerstvého stříkaného betonu nebo objemová hmotnost), ovšem co se týká zkoušení ztvrdlého betonu, jedná se o:

- odolnost proti průsaku vody [ČSN EN 12390-8] (viz úloha ZB2, kap. 9.1),
- odolnost proti obrušování [ČSN 73 1324],
- pevnost v příčném tahu [ČSN EN 12390-6],
- odolnost proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek [ČSN 73 1326] vždy pro stupeň vlivu prostředí XF2 a XF4 (viz úloha ZB2, kap. 9.2),
- mrazuvzdornost [ČSN 73 1322] vždy pro stupeň vlivu prostředí XF1 a XF3 (viz kap. 8.3),
- smršťování [ČSN 73 1320 nebo ČSN EN 12390-16], viz úloha B2, kap. 6.2.2,
- tuhnutí [ČSN 73 1332],
- statický modul pružnosti [ČSN ISO 1920-10 nebo ČSN EN 12390-13] (viz úloha E, kap. 11.2),
- obsah vzduchových pórů [ČSN EN 480-11] vždy pro životnost 100 let a stupeň vlivu prostředí XF1, XF2 a XF3.

Z výše uvedeného výčtu vyplývá, že pokud je požadováno, provádějí se nejrůznější kontrolní zkoušky čerstvého i ztvrdlého betonu. Jediná vlastnost ztvrdlého betonu, která se zkouší vždy, je vlastnost betonu základní a nejdůležitější – **pevnost v tlaku**.

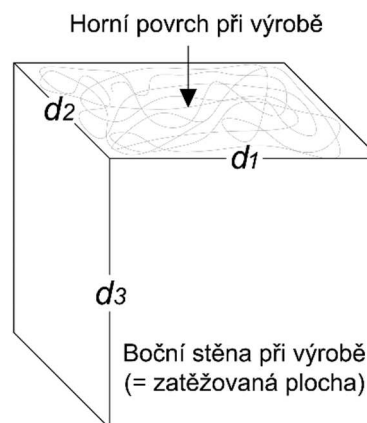
Do této chvíle byla řeč pouze o zkouškách buď na vzorcích čerstvého betonu, anebo na zkušebních tělesech ztvrdlého betonu – tedy o vlastnostech, které řeší a předepisuje norma ČSN EN 206+A2. V případě potřeby zjistit vlastnosti ztvrdlého betonu přímo v konstrukci může být situace obtížná. Vlastnosti betonu se mohou od betonu vyzrálého ve formách z různých důvodů lišit, navíc mnohdy nejsou zkušební tělesa pro některé zkoušky vůbec k dispozici. Při posuzování betonu v konstrukcích se postupy již neřídí normou ČSN EN 206+A2. Pro tento účel je možné využít buď normu ČSN 73 2011, anebo normu ČSN EN 13791.

ČSN 73 2011 pro stanovení pevnosti betonu v tlaku preferuje nedestruktivní – převážně tvrdoměrné – zkoušení betonu a jádrové vývrtky v ní hrají doplňkovou a upřesňující roli. ČSN EN 13791 naopak preferuje při vyhodnocování pevnosti v tlaku zkoušky jádrových vývrtů, ovšem i nedestruktivní zkoušky mají důležitou roli. Jádrové vývrtky jsou nutným základem, ale zejména u větších konstrukcí jsou nedestruktivní zkoušky efektivním a levnějším nástrojem pro získání statisticky významného množství výsledků.

7.1 Kontrola rozměrů zkušební tělesa

Každé zkušební těleso musí vyhovět svými rozměry (Obr. 7.1) a tvarem požadavkům normy ČSN EN 12390-1. Každé zkušební těleso by tedy mělo být před zahájením zkoušení zkontrolováno, přičemž musí být dodrženy následující mezní odchylky od zvoleného rozměru zkušební tělesa d :

- tolerance rozměrů ploch, které byly ve formě (tedy rozměrů d_1 , d_2) od zvoleného rozměru d je $\pm 1,0 \%$;
- tolerance rozměru definovaného vzdáleností horní plochy, urovnané hladítkem, a dolní plochy zkušební tělesa (tedy rozměru d_3) od zvoleného rozměru d je $\pm 1,5 \%$;
- tolerance rovinnosti předpokládaných zatěžovaných ploch je $\pm 0,0006 \cdot d$ [mm];
- tolerance kolmosti bočních stěn krychle, vzhledem k dolní základně při výrobě, je $0,5 \text{ mm}$.



Obrázek 7.1: Systém značení rozměrů zkušební krychle.

7.2 Odhad pevnosti v tlaku pomocí tvrdoměrného zkoušení

7.2.1 Princip metody

Tvrdoměrné (sklerometrické) zkoušení betonu je zkoušení povrchové a rozhodujícím parametrem je tvrdost povrchu betonu. Při zkoušce se měří a vyhodnocuje předepsaný počet reakcí povrchu betonu od do něj vyvozeného úderu. Reakcí povrchu může být např. průměr vtisku po kuličce, či hloubka kráteru po zarážení špičáku, ale to jsou spíše historické záležitosti. V současné době se téměř výhradně měří parametr odrazu od povrchu betonu.

Metoda odrazových tvrdoměrů je nejpoužívanější nedestruktivní metodou pro ověření kvality betonu a stanovení jeho pevnosti v tlaku. Je nutné si však uvědomit, že pevnost v tlaku se určuje na základě tvrdosti povrchu betonu – a mezi těmito veličinami neexistuje fyzikální závislost. Tvrdost je mechanická vlastnost materiálu, vyjadřující odpor proti vnikání jiného tělesa do jeho povrchu, a v případě betonu se nejedná o fyzikální veličinu. Právě proto není možné, aby mezi tvrdostí betonu a jeho pevností v tlaku byla jasná fyzikální závislost. Ke zjištěnému parametru tvrdoměrného měření lze přiřadit pevnost v tlaku pouze na základě určitých vztahů (vytvořených na základě zkušeností a mnoha provedených zkoušek), které ale nemusí vždy poskytovat relevantní výsledky. Jedná se v podstatě o odhad pevnosti betonu v tlaku. Existuje řada faktorů, které mohou výsledky tvrdoměrných zkoušek ovlivnit – u starších konstrukcí je obvykle odlišná tvrdost betonu na povrchu a v hloubce, u nových konstrukcí při použití plastifikátorů zase může pevnost betonu růst jinak než jeho tvrdost. Pokud se však tvrdoměrné měření provádí správně, jedná se o poměrně spolehlivou metodu. Základem úspěšného použití tvrdoměrné metody je upřesnění výsledků pomocí normových zkoušek pevnosti v tlaku na zkušebních tělesech. Výjimkou je příloha B normy ČSN EN 13791, jak bude ukázáno dále.

7.2.2 Tvrdoměr Original Schmidt

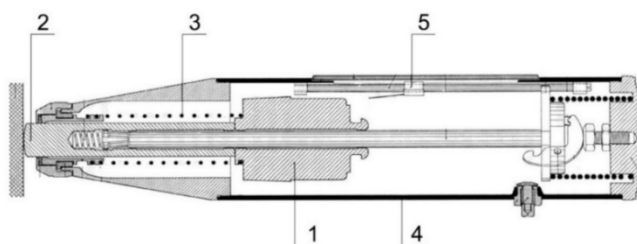
Průkopníkem této metody je švýcarský inženýr Ernst Schmidt, který s prvním typem odrazového tvrdoměru přišel již v roce 1950. Original Schmidt v dodnes nezměněné podobě byl poprvé vyroben již před téměř 60 lety, v roce 1965 (!), a doposud v podstatě nebyl překonán žádným jiným typem tvrdoměru.

Tvrdoměrné měření lze provádět pomocí několika typů tvrdoměrů v závislosti na zkoušeném betonu (zejména jeho pevnosti) a na zkoušené konstrukci (zejména na velikosti zkoušených prvků). Jednotlivé tvrdoměry se liší energií úderu, velikostí i mechanickou konstrukcí. Největší sortiment tvrdoměrů lze nalézt u firmy Proceq, výrobce originálního tvrdoměru Schmidt (po

vypršení platnosti patentové ochrany však princip a systém tvrdoměru okopírovala řada výrobců z Evropy a zejména z Asie – na český trh jsou tak dodávány tvrdoměry i v nižších cenových relacích, a to zpravidla díky použitým materiálům, ze kterých jsou funkční části tvrdoměrů vyrobeny: kvalita těchto tvrdoměrů je značně rozdílná a často je podstatně nižší, než je tomu u původních výrobků). Podle velikosti energie vyvinuté při zkušebním rázu dělíme odrazové tvrdoměry na:

- typ N s energií přibližně 2,25 J,
- typ L s energií přibližně 0,75 J,
- typ M s energií přibližně 30,0 J (již se nevyrábí).

Odrazový tvrdoměr se skládá z beranu s pružinou, která po uvolnění vymrští beran na ocelový razník. Na Obr. 7.2 je zjednodušeně znázorněna funkce odrazového tvrdoměru. Velikost odrazu (délka vratné dráhy beranu) závisí na tvrdosti zkoušeného betonu. Při zpětném pohybu beran posune značku na stupnici, což je výsledek měření – velikost odrazu se značí a nebo R (v závislosti na normě). Ve cvičení bude hodnota odrazu značena písmenem R a pro měření se bude používat tvrdoměr Original Schmidt N.



Obrázek 7.2: Schéma odrazového tvrdoměru: 1 – beran, 2 – razník, 3 – tažná pružina, 4 – pouzdro, 5 – stupnice.

Drobnou nevýhodou tvrdoměru Schmidt je skutečnost, že hodnota odrazu je ovlivněna směrem zkoušení. Existují proto vztahy mezi hodnotou odrazu a pevností v tlaku pro směr zkoušení kolmo dolů, šikmo dolů pod úhlem 45°, vodorovně, šikmo nahoru pod úhlem 45° a kolmo nahoru.

7.2.2 Tvrdoměr SilverSchmidt

Tvrdoměr SilverSchmidt, který je zobrazen na Obr. 7.3, je modernější variantou tvrdoměru Original Schmidt N. Jedná se o digitální přístroj, změřené hodnoty se zobrazují na displeji a mohou být automaticky převedeny na pevnost v tlaku (pomocí navoleného vztahu). SilverSchmidt již neměří hodnotu odrazu R jako Original Schmidt, ale hodnotu Q , která představuje koeficient odrazu daný vztahem:

$$Q = 100 \cdot \frac{\text{energie obnovená}}{\text{energie vstupní}} \quad 7.1$$

Moderní tvrdoměr SilverSchmidt pomocí optických čidel měří rychlost razníku těsně před dopadem na povrch betonu a poté okamžitě po odrazu. Ze zjištěných rychlostí vypočítá množství energie, která se vrací. Hodnota Q je tedy poměrné vyjádření vrácené energie a platí, že čím je její hodnota vyšší, tím je povrch betonu tvrdší. Hodnota Q je proti odrazu R méně závislá na tření vodící tyče či na gravitaci – tím pádem nevyžaduje žádnou korekci v závislosti na směru zkoušení. Rozsah pevnosti betonu v tlaku, kterou SilverSchmidt dokáže určit, je dle výrobce 10 až 100 MPa.



Obrázek 7.3: Tvrdoměr SilverSchmidt N.

7.2.3 Postup měření

Pro stanovení tvrdosti betonu, odhadu pevnosti betonu v tlaku a také pro určení pevnostní třídy betonu budou použity dva typy odrazových tvrdoměrů – **Original Schmidt N** (originální přístroj dle původního patentu od firmy Proceq), který je celosvětově nejčastěji používaným typem tvrdoměru, a také modernější **SilverSchmidt N** (také od firmy Proceq).

Tvrdoměr se přiloží na zkušební plochu tak, aby se razník opřel kolmo na zkoušený povrch betonu. Poté se plynule bez přírazů zvyšuje tlak na razník, dokud ocelový beran nevyvodí ráz. Zaznamenaná se velikost odrazu R , případně hodnota Q .

V závislosti na zvoleném postupu (v závislosti na normě, viz následující podkapitola) je nutné provést minimálně 7, respektive minimálně 8 platných měření. Vždy je výhodnější provést měření více. Na každém místě (na boční ploše zkušební krychle, která je upnuta do zkušebního lisu a zatížena na 1/10 předpokládané pevnosti v tlaku) se proto provede **9 nebo 10 čtení** jedním tvrdoměrem. Měření pomocí druhého tvrdoměru se aplikuje na protilehlou stranu krychle. Místa úderu musí být vzdálena nejméně 25 mm od kraje krychle i od sebe (požadavek normy ČSN EN 12504-2, pokyny normy ČSN 73 1373 jsou v tomto ohledu nejednoznačné). Nejlépe je vyznačit na vzorku pravidelnou síť. Tvrdoměr bude během zkoušení ve vodorovné poloze. Při vyhodnocování se berou v úvahu pouze výsledky, při jejichž měření byla zkouška provedena do cementové malty betonu. Každé místo je nutné po úderu vizuálně zkontrolovat, zda se těsně pod povrchem nenacházelo větší zrna kameniva, anebo dutina – většinou by v takovém případě došlo v místě zkoušky k patrné destrukci povrchu.

7.2.4 Vyhodnocení zkoušky

V současné době lze tvrdoměrné měření, provedené pomocí tvrdoměru Original Schmidt N, vyhodnotit dvěma způsoby:

- pomocí normy ČSN 73 1373,
- pomocí normy ČSN EN 12504-2 a s ní spojenou ČSN EN 13791.

Vyhodnocení podle ČSN 73 1373

Vyhodnotit tvrdoměrné měření podle normy ČSN 73 1373 lze pouze v případě, že je použit tvrdoměr Original Schmidt. Vyhodnocení se provádí tak, že je ke každé hodnotě odrazu R nutné nejdříve přiřadit dle vztahu, uvedeném v normě, hodnotu pevnosti v tlaku. Pro zkoušení ve vodorovném směru je vztah uveden v Tab. 7.1. Hodnotám odrazu $R > 52$ se doporučuje přiřadit maximální hodnotu $f_{be} = 63$ MPa, nedoporučuje se hodnoty extrapolovat.

Hodnota jednotlivých pevností v tlaku se nesmí lišit od aritmetického průměru všech měření na témže zkušebním místě o více než ± 20 %. Pevnosti, které nevyhovují mezím, jsou neplatným měřením a z dalšího vyhodnocení se vyloučí. Pokud platných měření zůstane alespoň 7, je celá sada platná a ze všech platných měření se vypočte znovu aritmetický průměr pevnosti v tlaku, který se zaokrouhlí s přesností 1 MPa. Pokud platných měření zůstane méně než 7, je nutné celou sadu měření na daném zkušebním místě zamítnout.

Ukázka vyhodnocení tvrdoměrného měření na jednom zkušebním místě pomocí normy ČSN 73 1373 je uvedena v Tab. 7.2.

Tabulka 7.1: Vztah pro stanovení pevnosti v tlaku f_{be} z hodnoty odrazu R tvrdoměru Original Schmidt N (vodorovný směr zkoušení).

Odraz R	f_{be} [MPa]	Odraz R	f_{be} [MPa]	Odraz R	f_{be} [MPa]	Odraz R	f_{be} [MPa]
25	16	32	27	39	39	46	52
26	18	33	28	40	41	47	53
27	19	34	30	41	42	48	55
28	21	35	32	42	44	49	57
29	22	36	33	43	46	50	59
30	24	37	35	44	48	51	61
31	25	38	37	45	50	52	63

Tabulka 7.2: Příklad vyhodnocení tvrdoměrného měření dle ČSN 73 1373.

Číslo úderu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Hodnota odrazu R_i	40	41	38	36	40	39	52	30	40	42
Hodnota pevnosti $f_{be,i}$	41	42	37	33	41	39	63	24	41	44
Průměrná pevnost f_{be}'	40,5									
Meze intervalu	$0,8 \times f_{be}' = 32,4$					$1,2 \times f_{be}' = 48,6$				
Platná měření (vyřazená jsou přeškrtnutá):	41	42	37	33	41	39	63	24	41	44
Vyhodnocení zk. místa:	platných měření: 8					Sada přijata / zamítnuta				
Nový aritmetický průměr pevnosti f_{be} [MPa]	39,75 => 40									

Výsledkem je pevnost betonu v tlaku **s nezaručenou přesností**.

Vyhodnocení podle ČSN EN 12504-2

Oproti předchozímu postupu je výpočet dle ČSN EN 12504-2 jednodušší a lze použít i pro tvrdoměr SilverSchmidt. Ze zjištěných hodnot odrazu se určí medián a poté se zhodnotí celá sada 9 měření (= jedno zkušební místo) – pokud se více než 20 % všech čtení liší od mediánu o více než 25 %, musí být celá sada čtení zamítnuta. Pokud je platných čtení 80 % a více, všechny hodnoty se ponechají (nový medián se tedy neurčuje). Výsledkem zkoušky je medián ze všech čtení, který vyjadřuje tvrdost betonu a který se uvádí zaokrouhlený na celé číslo. Ukázka vyhodnocení tvrdoměrného měření na jednom zkušebním místě pomocí normy ČSN EN 12504-2 je uvedena v Tab. 7.3.

Tabulka 7.3: Příklad vyhodnocení tvrdoměrného měření dle ČSN EN 12504-2.

Číslo úderu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Hodnota odrazu R_i	40	41	38	36	40	39	52	30	40	42
Medián R	40									
Meze intervalu	$0,75 \times R = 30$					$1,25 \times R = 50$				
Počet odlehlých měření	2 → 20 % ≤ 20 % (z počtu všech 10 měření)					Sada přijata / zamítnuta				
Hodnota tvrdosti R	40									

Další postup již norma ČSN EN 12504-2 neobsahuje a případná pevnost v tlaku se určí dle normy ČSN EN 13791 – pomocí přepočtových vztahů (regresní analýzy).

Vyhodnocení podle ČSN EN 13791

Aktualizované vydání normy ČSN EN 13791 striktně odděluje určení pevnosti v tlaku betonu v neznámé (ve smyslu stávající, staré) konstrukci a určení pevnosti v tlaku betonu konstrukce nové, pokud se během výstavby vyskytly pochybnosti o kvalitě betonu. V případě pochybností u nové konstrukce jsou při ověření pevnosti v tlaku betonu preferovány nedestruktivní metody. Norma obsahuje poměrně zajímavou přílohu B, ve které se uvádí:

- zkoušky musí provádět osoba, která byla náležitě vyškolená v používání tvrdoměrů,
 - hodnoty odrazu pro všechna zkušební místa ve zkoušené oblasti se použijí ke stanovení mediánu hodnot odrazu pro zkoušenou oblast,
 - pokud jsou splněny všechny následující podmínky:
 - jedná se o obyčejný hutný beton (ne lehký nebo těžký),
 - nebylo použito speciální bednění, které ovlivňuje propustnost nebo tvrdost povrchu betonu,
 - k měření hodnot odrazu (buď odraz R nebo hodnota Q , popisující vrácenou energii) byl použit tvrdoměr typu N, mající rázovou energii dopadu 2,25 J,
 - hloubka karbonace nepřesahuje 5 mm,
 - hodnoty odrazu splňují jak kritéria ve sloupci 1, tak ve sloupci 2 tabulky B.1 (odraz R), anebo obě kritéria ve sloupci 1 a sloupci 2 tabulky B.2 (hodnota Q),
- lze předpokládat pevnostní třídu betonu, uvedenou ve sloupci 3 předmětných tabulek.

Tabulky B.1 a B.2 z normy ČSN EN 13791 jsou přepsány do Tab. 7.4 a Tab. 7.5.

*Tabulka 7.4: Hodnota **odrazu R** a přiřazená pevnostní třída obyčejného hutného betonu dle normy ČSN EN 206+A2 (tabulka B.1 z normy ČSN EN 13791).*

Minimální hodnota ze všech míst zkoušené oblasti	Medián hodnot ze všech míst zkoušené oblasti	Pevnostní třída betonu dle ČSN EN 206+A2
≥ 26	≥ 30	C 8/10
≥ 30	≥ 33	C 12/15
≥ 32	≥ 35	C 16/20
≥ 35	≥ 38	C 20/25
≥ 37	≥ 40	C 25/30
≥ 40	≥ 43	C 30/37
≥ 44	≥ 47	C 35/45
≥ 46	≥ 49	C 40/50
≥ 48	≥ 51	C 45/55
≥ 50	≥ 53	C 50/60
≥ 53	≥ 57	C 55/67
≥ 57	≥ 60	C 60/75
≥ 62	≥ 65	C 70/85
≥ 66	≥ 69	C 80/95

*Tabulka 7.5: Hodnota **odrazu Q** a přiřazená pevnostní třída obyčejného hutného betonu dle normy ČSN EN 206+A2 (tabulka B.2 z normy ČSN EN 13791).*

Minimální hodnota ze všech míst zkoušené oblasti	Medián hodnot ze všech míst zkoušené oblasti	Pevnostní třída betonu dle ČSN EN 206+A2
≥ 25	≥ 34	C 8/10
≥ 29	≥ 40	C 12/15
≥ 36	≥ 45	C 16/20
≥ 42	≥ 49	C 20/25
≥ 46	≥ 52	C 25/30
≥ 51	≥ 56	C 30/37
≥ 56	≥ 60	C 35/45
≥ 58	≥ 62	C 40/50
≥ 60	≥ 64	C 45/55
≥ 62	≥ 66	C 50/60
≥ 64	≥ 68	C 55/67
≥ 66	≥ 71	C 60/75
≥ 69	≥ 73	C 70/85
≥ 71	≥ 75	C 80/95

7.3 Stanovení pevnosti betonu v tlaku

Na krychli bude po tvrdoměrném měření pomocí Original Schmidtu N a SilverSchmidtu N stanovena pevnost betonu v tlaku f_c v N/mm² (MPa), která je dána vztahem:

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

7.2

kde F je maximální zatížení při porušení v N a A_c je průřezová plocha zkušebního tělesa, na kterou působí zatížení, v mm². Plocha se vypočte ze změřených rozměrů d_1 a d_3 (viz kap. 7.1). Pevnost v tlaku se zaokrouhlí **na nejbližších 0,1 N/mm²**.

7.4 Rovnoměrnost betonu

Jedním z důležitých bodů normy ČSN EN 13791 je statistické posouzení zjištěných výsledků, zda beton konstrukce vykazuje ve svém objemu podobné vlastnosti (je rovnoměrný), či zda se jedná o více statisticky odlišných souborů dat (tedy že různé části konstrukce jsou zhotoveny z různě kvalitních betonů). Nejvhodnější metodou pro stanovení rovnoměrnosti betonu v konstrukci či jejím určitém prvku je ultrazvuková impulzová metoda.

7.4.1 Ultrazvuková impulzová metoda – základní popis

Jednou ze základních nedestruktivních metod využívaných ve stavebním zkušebnictví je právě ultrazvuková impulzová (dále UZ) metoda. Ta je založena na opakovaném vysílání ultrazvukových impulzů do zkoušeného materiálu a následném stanovení rychlosti šíření impulzů ultrazvukového vlnění. Tato rychlost je odlišná pro různé materiály a mění se s jejich vlastnostmi – klesá např. s horší kvalitou zkoušeného materiálu nebo v místech výskytu poruch (včetně mikroporuch). Zjištění rychlosti UZ impulzů se může využít pro stanovení:

- rovnoměrnosti (homogenity) betonu,
- přítomnosti trhlin nebo dutin (omezeně),
- materiálových charakteristik – modulu pružnosti, ovšem i pevnosti v tlaku či tahu,
- změn výše uvedených vlastností v čase (např. v případě degradace betonu).

Mezi hlavní výhody UZ metody patří její čistě nedestruktivní charakter zkoušení, možnost opakovat měření na stejném místě v čase či jednoduchá a rychlá aplikace v laboratoři i přímo v terénu. Měření UZ metodou lze provádět podle normy ČSN 73 1371, anebo podle normy ČSN EN 12504-4. Druhá zmiňovaná norma měla při svém českém vydání nahradit původní československou normu ČSN 73 1371, k čemuž ale nikdy nedošlo. Důvodem je především skutečnost, že novější evropská norma neobsahuje ustanovení o výpočtu dynamického modulu pružnosti betonu E_{cu} . Původní norma ČSN 73 1371 (text byl ve slovenštině) byla proto přepracována a nově vydána pod stejným číselným označením (nyní již v češtině). Aktualizací došlo k tzv. harmonizaci s evropskou normou, což znamená, že obě normy nyní nejsou v rozporu (ČSN 73 1371 se na evropskou normu ČSN EN 12504-4 dokonce v některých bodech odkazuje), a tím pádem mohou obě existovat souběžně. Přínosem normy ČSN EN 12504-4 je rozbor aspektů, které mohou ovlivnit měření rychlosti šíření impulzu. Je proto výhodné znát text obou norem a při měření se řídit oběma předpisy.

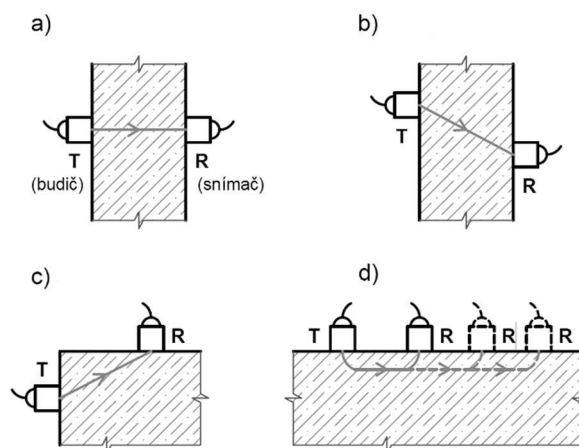
7.4.2 Ultrazvuková impulzová metoda – podstata měření

Měření funguje na principu vysílání opakovaných UZ impulzů do materiálu a jejich následné detekci. V případě měření betonu a podobných materiálů je častějším způsobem aplikace UZ metody způsob průchodový, který využívá dvou sond – budiče a snímače – umístěných nejlépe na protilehlých stranách tělesa či konstrukce. Pro aplikaci jsou tedy ideální prvky pravidelných průřezů s rovnoběžnými stěnami.

Sleduje se čas T , za jaký dorazí impulz UZ vlnění od jedné sondy ke druhé. Ultrazvukové vlnění má nejvyšší energii ve směru kolmém na plochu budiče, ale v případě špatného či nemožného přístupu k oběma stranám tělesa či konstrukce lze měřit impulzy i v jiných směrech. Podle umístění sond se rozlišují následující způsoby prozvučení (měření), viz též Obr. 7.4:

- (a) přímé prozvučení – sondy jsou kolmo proti sobě na protilehlých stranách prvku, jde o nejvhodnější variantu,

- (b) polopřímé prozvučení – používá se v případě, kdy je konstrukce přístupná z obou stran, ale sondy nelze umístit přesně naproti sobě,
- (c) šikmé prozvučení – sondy vůči sobě nejsou orientované přímo, ale kolmo,
- (d) nepřímé prozvučení – rovněž nazývané povrchovým. Snímač je umísťován rovnoběžně s budičem na stejné straně konstrukce. Měření se několikrát opakuje s posouváním snímače po pravidelných intervalech a je sledován rozdíl naměřených hodnot mezi jednotlivými vzdálenostmi sond. Při tomto způsobu je měření značně citlivé na vnější vlivy, proto se používá, jen pokud je přístupná pouze jedna strana konstrukce nebo při důkladné kontrole povrchu.



Obrázek 7.4: Způsoby prozvučování materiálu UZ vlněním při měření průchodovým způsobem.

Norma ČSN 73 1371 nerozlišuje mezi polopřímým a šikmým prozvučením a uvádí obojí v jedné kategorii, norma ČSN EN 12504-4 zmiňuje rozdíl mezi těmito způsoby prozvučení, ale rovněž je sdružuje do jedné položky.

7.4.3 Měření rychlosti ultrazvukového vlnění betonem

Měření pomocí přímého prozvučování bude probíhat na měřicích základnách o známé délce. Sondy s akustickým vazebním prostředkem budou umístěny na protilehlých značkách pro měření. Značky budou tvořit rastr se stejnými roztečemi. Sondy je nutné lehce přitlačit k povrchu betonového prvku. Mírným pootočením lze opravit akustický kontakt.

Určitou dobu prochází ultrazvuk i vrstvičkou akustického vazebního prostředku (např. gelu, plastelíny) a konstrukcí sondy. Tato doba je označována jako „mrtvý čas T_0 “ a při měření musí být vždy stanovena. Všechny naměřené údaje je nutné o tuto dobu při vyhodnocení opravit. Mrtvý čas se zjišťuje pomocí etalonu – jedná se o těleso (většinou plastové), jehož časová charakteristika E je přesně známa. Nejdříve se změří doba T_e průchodu ultrazvuku etalonem a následně se vypočte mrtvý čas:

$$T_0 = T_e - E, \quad 7.4$$

kde T_0 je mrtvý čas v μs , T_e je doba průchodu ultrazvuku etalonem v μs a E je časová charakteristika etalonu, také v μs .

Pro každou měřenou základnu se vypočte rychlost UZ vlnění podle vztahu:

$$v_L = \frac{L_i}{T_i - T_0}, \quad 7.5$$

kde v_L je rychlost šíření ultrazvuku v m/s, L_i je délka měřicí základny v m, T_i je naměřená doba průchodu betonem v s a T_0 je mrtvý čas v s.

Ve cvičení bude prováděno měření pomocí ultrazvukového přístroje Pundit PL-200, který umožňuje kalibraci pomocí etalonu. Pokud bude provedena kalibrace přístroje, mrtvý čas nebude nutné počítat, neboť bude roven nule.

7.4.4 Stanovení rovnoměrnosti betonu

Norma ČSN EN 13791 řeší rovnoměrnost betonu konstrukce nebo její části vzhledem k vyhodnocování vlastností betonu. Pro korektní zhodnocení kvality betonu nebo jeho vlastností je nezbytné vědět, zda je posuzovaná část konstrukce zhotovena ze stejného

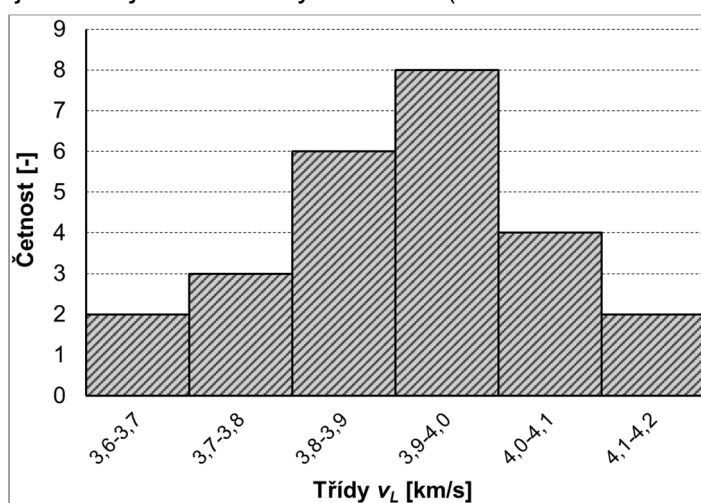
betonu v celém svém objemu. Pokud je totiž zjištěno, že určitá část posuzované konstrukce nebo dílce je z betonu jiné kvality (což může být způsobeno již při výrobě, anebo také při rozdílném působení okolního prostředí během životnosti), musí se při vyhodnocení postupovat odlišně, než když je celá posuzovaná oblast z betonu stejné kvality.

Pro posouzení rovnoměrnosti betonu (rovnoměrnosti kvality betonu) v konstrukci je velmi výhodná ultrazvuková impulzová metoda. Ideální je, pokud je posuzovaná oblast (část konstrukce) přístupná z obou protilehlých stran (např. sloupy, stěny apod.). V tomto případě se na konstrukci znázorní vhodný rastr měřicích bodů, v nichž je stanovena rychlost ultrazvukového vlnění v_L . Získaná data jsou následně statisticky posouzena – pokud variační součinitel souboru V_x a rozdíl sousedních hodnot Δ nepřesahuje mezní hodnoty dle normy ČSN 73 2011, viz Tab. 7.6, je možné beton prohlásit za rovnoměrný.

Tab. 7.6: Meze vyhodnocení ultrazvukového měření rovnoměrného betonu konstrukce dle normy ČSN 73 2011.

Třída betonu	Statistické vyhodnocení	
	Variační součinitel V_x [%]	Rozdíl sousedních míst Δ [%]
C 12/15	4,0	7,5
C 16/20	4,0	7,5
C 25/30	3,5	7,5
C 30/37 až C 50/60	3,0	7,5

Ke znázornění údajů o počtu výskytů jednotlivých hodnot rychlostí v_L (v m/s nebo v km/s) lze vytvořit histogram četností. Pro vytvoření vypovídajícího histogramu je nutné správně zvolit hranice tříd. Velikost třídy závisí na naměřených hodnotách rychlosti v_L a většinou se jedná o „kulatá“ čísla, tedy dělení např. po 100 či 200 m/s (nebo po 0,1 či 0,2 km/s) v rozsahu měření. Příklad měření a vyhodnocení rovnoměrnosti betonové stěny postavené z betonu pevnostní třídy C 25/30 je uveden v Tab. 7.7 a na Obr. 7.5.



Obrázek 7.5: Histogram četností výsledků rychlosti ultrazvukového vlnění betonovou stěnou v km/s.

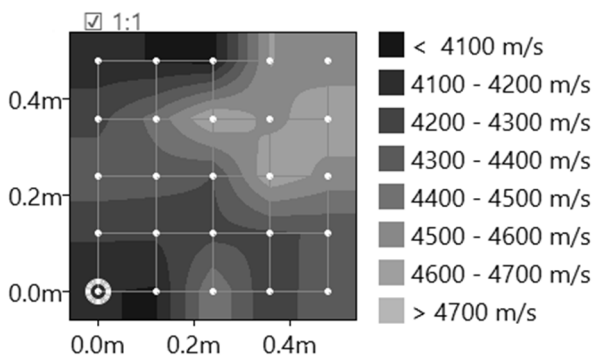
Tab. 7.7: Příklad měření rovnoměrnosti betonové stěny pomocí rastru 5×5 zkušebních míst, zjištěné rychlosti ultrazvukového vlnění v m/s.

zkušební místo	A	B	C	D	E
1	3695	3765	3612	3753	3856
2	3858	3879	3756	3871	3889
3	3902	3971	3805	3978	3971
4	3948	4026	3987	4112	4003
5	3943	3906	4058	4087	4111

Z výsledků měření plyne, že aritmetický průměr rychlostí ultrazvukového vlnění pro všechny měřené body je 3910 m/s (průměr se zaokrouhluje na 3 platné číslice). Variační koeficient souboru dat je $V_x = 3,31$ %. Maximální rozdíl mezi sousedními měřicími body (C3 a C4) je 182 m/s, což vzhledem k nižší hodnotě (C3) – jedná se o vyhodnocení na stranu bezpečnou – vykazuje rozdíl $\Delta = 4,78$ %. Jak bylo uvedeno, zkoušený beton je

C 25/30 a mezní hodnoty dle normy ČSN 73 2011 (Tab. 7.6) jsou 3,5 % pro V_x a 7,5 % pro Δ . Výsledkem tedy je, že se jedná o **rovnoměrný beton**.

Podle histogramu četnosti lze usuzovat, zda je rozdělení výsledků ultrazvukových měření normální (lepší je však vždy provést statistický test normality dat), ovšem rozdělení hodnot v_L přímo v konstrukci (tedy rozložení kvality betonu) lze vhodným způsobem graficky znázornit pomocí čar o stejné rychlosti šíření UZ vlnění – pomocí tzv. izovel. Odstupňováním odstínů barvy ploch mezi izovelami lze dosáhnout značné názornosti vzhledem ke kvalitě betonu v konstrukci – např. tmavé plochy vyjadřují oblasti konstrukce s nejlepším betonem, světlé naopak s betonem nejhorším. Základní grafické editory (včetně Microsoft Excel) umožňují provést toto znázornění velmi efektivně. Ultrazvukový přístroj Pundit PL-200, který bude ve cvičení použit, umí toto znázornění provést také, viz Obr. 7.6. Díky povrchovému grafu s vyznačením oblastí se stejnou rychlostí šíření UZ vlnění lze okamžitě získat přehled o kvalitě betonu prvku nebo i celé konstrukce.



Obrázek 7.6: povrchový graf šíření UZ vlnění zkoušenou oblastí.

7.5 Kontrola shody

V plánu odběru vzorků a zkoušek a v kritériích shody jednotlivých složení betonů nebo souboru betonů se rozlišuje počáteční výroba a průběžná výroba. Počáteční výroba trvá do doby získání nejméně 35 výsledků zkoušek. Průběžná výroba nastává po získání nejméně 35 výsledků zkoušek během období, které není delší než 12 měsíců.

Při kontrole shody pevnosti betonu v tlaku se používají dvě kritéria. Do hodnocení vstupuje průměrná pevnost v tlaku f_{cm} a také každý jednotlivý výsledek zkoušky f_{ci} , viz Tab. 7.8. Hodnota f_{ck} znamená charakteristickou krychelnou pevnost betonu v tlaku.

Tabulka 7.8: Kritéria shody pro pevnost v tlaku.

Výroba	Počet „n“ výsledků zkoušek pevnosti v tlaku ve skupině	Kritérium 1	Kritérium 2
		Průměr „n“ výsledků zkoušek f_{cm} [N/mm ²]	Každý jednotlivý výsledek zkoušky f_{ci} [N/mm ²]
Počáteční	3	$\geq f_{ck} + 4$	$\geq f_{ck} - 4$
Průběžná	15	$\geq f_{ck} + 1,48 \cdot \sigma$	$\geq f_{ck} - 4$

Protokol ZTVRDLÝ BETON 1	ZB1
Vyučující:	

TVRDOMĚRNÉ MĚŘENÍ

Ve cvičení se bude provádět vyhodnocení tvrdoměrného měření:

1. pomocí normy ČSN EN 12504-2 pro oba typy tvrdoměru,
2. pomocí normy ČSN EN 13791 (u nové konstrukce v případě pochybností).

1. ČSN EN 12504-2

Na zkušební krychli proveďte nedestruktivní měření pomocí tvrdoměru Original Schmidt N na jedné straně krychle, zatížené ve zkušebním lisu, a pomocí tvrdoměru SilverSchmidt N na druhé straně krychle. V obou případech proveďte 9 měření.

1.A. Stanovte tvrdost povrchu betonové krychle pomocí tvrdoměru **Original Schmidt N**.

Číslo úderu	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Hodnota odrazu R_i									
Seřazeno sestupně či vzestupně:									

Medián:

Meze:

Vyhodnocení:

1.B. Stanovte tvrdost povrchu betonové krychle pomocí tvrdoměru **SilverSchmidt N**.

Číslo úderu	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Hodnota odrazu Q_i									
Seřazeno sestupně či vzestupně:									

Medián:

Meze:

Vyhodnocení:

2. ČSN EN 13791

Stanovte zaručenou pevnostní třídu betonu (u nové konstrukce v případě pochybností) pomocí tvrdoměru Original Schmidt N i pomocí tvrdoměru SilverSchmidt N. Použijte hodnoty z přechozího bodu.

2.A. Stanovte pevnostní třídu pomocí tvrdoměru **Original Schmidt N**.

Medián =

Minimum =

Pevnostní třída:

2.2. Stanovte pevnostní třídu pomocí tvrdoměru **SilverSchmidt N**.

Medián =

Minimum =

Pevnostní třída:

Dílčí závěr:

STANOVENÍ PEVNOSTI V TLAKU f_c

Po tvrdoměrném měření stanovte na zkušební krychli její pevnost v tlaku. Před zkouškou určete přesné rozměry krychle a ověřte, zda rozměry vyhovují požadavkům normy ČSN EN 12390-1.

Dílčí závěr:

STANOVENÍ ROVNOMĚRNOSTI BETONU

1. Na zkušebním bloku z betonu, jehož pevnostní třída je uvedena na bloku, vyznačte rastr měřicích bodů a pomocí ultrazvukové impulzní metody (pomocí přístroje Pundit PL-200) stanovte rychlosti UZ vlnění v_L v těchto bodech:

2. Vypočtěte statistické hodnoty souboru naměřených dat a určete, zda se podle normy ČSN 73 2011 jedná o rovnoměrný beton (musí být splněny obě podmínky):

Dílčí závěr:

Zkoušky provedl/a a protokol zpracoval/a: _____