

ZKUŠEBNICTVÍ A TECHNOLOGIE - CVIČEBNICE

Kolektiv autorů

Student: _____

Studijní skupina: _____ Podskupina: _____

Vedoucí laboratorního cvičení: _____

ÚLOHA	NÁZEV	PODPIS
U	Úvod do cvičení a opakování	
K	Stavební keramika	
B1	Návrh složení betonu	
A1	Zkoušení a analýza mikrostruktury	
A2	Zkoušení izolačních materiálů	
B2	Čerstvý beton	
ZB1	Ztvrdlý beton 1	
ZB2	Ztvrdlý beton 2	
T	Tenzometrické měření napjatosti materiálu části konstrukce	
R	Rezonanční metoda	
E	Moduly pružnosti betonu	
ZD	Zatěžovací zkouška dílce	
P	Příklady, zápočet	

Kolektiv autorů:

Petr Cikrle – kapitola ZB2 (část 8.4)

Petr Daněk – kapitola T

Karel Dvořák – kapitola A1

Adam Hubáček – kapitola B1

Dalibor Kocáb – kapitoly U, ZB1, ZB2 (části 8.1 až 8.3), R, E, P

Barbara Kucharczyková – kapitola B2

Lenka Nevřivová – kapitola K

Jiří Zach – kapitola A2

Petr Žítt – kapitola ZD

UČEBNÍ TEXTY VYSOKÝCH ŠKOL

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta stavební

ZKUŠEBNICTVÍ A TECHNOLOGIE - CVIČEBNICE

Kolektiv autorů

Brno

OBSAH

OBSAH.....	2
1 ÚVOD DO CVIČENÍ A OPAKOVÁNÍ.....	4
1.1 Úvodní informace o laboratorním cvičení	4
1.2 Bezpečnostní předpisy a laboratorní řád.....	4
1.3 Harmonogram laboratorních cvičení podle učeben	5
Protokol ÚVOD DO CVIČENÍ A OPAKOVÁNÍ.....	6
2 STAVEBNÍ KERAMIKA.....	12
2.1 Zkoušky na surovinách	12
2.2 Zkoušky na pracovních hmotách.....	13
2.3 Zkoušky na vypáleném keramickém střepu.....	17
Protokol STAVEBNÍ KERAMIKA.....	22
3 NÁVRH SLOŽENÍ BETONU	24
3.1 Beton	24
3.2 Požadavky na kamenivo do betonu.....	27
3.3 Návrh složení betonu	28
Protokol NÁVRH SLOŽENÍ BETONU	30
4 ZKOUŠENÍ A ANALÝZA MIKROSTRUKTURY	33
4.1 Mikrostruktura stavebních hmot	33
4.2 Metody pro zkoušení a analýzu mikrostruktury.....	34
Protokol ZKOUŠENÍ A ANALÝZA MIKROSTRUKTURY	39
5 ZKOUŠENÍ IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ	40
5.1 Úvod	40
5.2 Stanovení pevnosti v tahu kolmo k rovině desky u tepelně izolačních výrobků používaných ve stavebnictví	41
5.3 Zkouška tlakem u tepelně izolačních výrobků používaných ve stavebnictví	42
5.4 Stanovení krátkodobé nasákavosti při částečném ponoření.....	43
5.5 Stanovení součinitele tepelné vodivosti.....	44
5.6 Stanovení rozměrové stability za určených teplotních a vlhkostních podmínek.....	45
Protokol STANOVENÍ VLASTNOSTÍ IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ.....	47
6 ČERSTVÝ BETON.....	49
6.1 Výroba a zkoušení čerstvého betonu	49
6.2 Výroba zkušebních těles	52
Protokol ČERSTVÝ BETON.....	56
7 ZTVRDILÝ BETON 1	59
7.1 Kontrola rozměrů zkušebního tělesa	60
7.2 Odhad pevnosti v tlaku pomocí tvrdoměrného zkoušení	60

7.3 Stanovení pevnosti betonu v tlaku	64
7.4 Rovnoměrnost betonu.....	65
7.5 Kontrola shody	68
Protokol ZTVRDLÝ BETON 1	69
8 ZTVRDLÝ BETON 2	73
8.1 Hloubka průsaku tlakovou vodou	73
8.2 Stanovení odolnosti cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek.....	74
8.3 Stanovení soudržnosti betonu.....	77
8.4 Kontrola vyztužení metodou indukce vířivých proudů.....	79
Protokol ZTVRDLÝ BETON 2	83
9 TENZOMETRICKÉ MĚŘENÍ NAPJATOSTI MATERIÁLU ČÁSTI KONSTRUKCE.....	87
9.1 Popis použitých přístrojů a měřidel	87
9.2 Úloha I: Ohybové napětí - konzola	90
9.3 Úloha II: Normálové napětí – tahové zkoušky	92
9.4 Úloha III: Teplotní roztažnost	94
Protokol TENZOMETRIE	96
10 REZONANČNÍ METODA	99
10.1 Obecný princip.....	99
10.2 Stanovení dynamických charakteristik betonu.....	99
10.3 Stanovení mrazuvzdornosti betonu	103
Protokol REZONANČNÍ METODA.....	106
11 MODULY PRUŽNOSTI BETONU	109
11.1 Stanovení dynamického modulu pružnosti ultrazvukovou impulzovou metodou.....	109
11.2 Stanovení statického modulu pružnosti betonu v tlaku	111
11.3 Vyhodnocení.....	114
Protokol MODULY PRUŽNOSTI BETONU	116
12 ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA DÍLCE	119
12.1 Cíle zatěžovacích zkoušek.....	119
12.2 Druhy zatěžovacích zkoušek.....	119
12.3 Příprava zatěžovací zkoušky.....	119
12.4 Požadavky na zatěžovací zkoušky.....	120
12.5 Postup zkoušení	120
12.6 Hodnocení výsledků zatěžovací zkoušky	120
12.7 Zatěžovací zkouška stavebního dílce.....	122
Protokol ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA DÍLCE	124
13 VZOROVÉ PŘÍKLADY A ZÁPOČET	127

1 ÚVOD DO CVIČENÍ A OPAKOVÁNÍ

1.1 Úvodní informace o laboratorním cvičení

Laboratorní cvičení z předmětu *BIA002 Zkušebnictví a technologie* jsou povinná a jsou ukončena zápočtem. Náplň celého předmětu je členěna do dvou oblastí:

- zkušebnictví ve stavebnictví,
- technologie výroby betonu a keramiky.

Část zkušebnictví ve stavebnictví (úlohy U, B2, ZB1, ZB2, T, R, E, ZD a P) zabezpečuje Ústav stavebního zkušebnictví (SZK) a tato část je zaměřena především na zkoušení betonu. Část technologie (úlohy K, B1, A1 a A2) zabezpečuje Ústav technologie stavebních hmot a dílců (THD).

Všechny laboratorní úlohy mimo A1 začínají vždy v učebně E107 nebo E108. Před vyučovací hodinou se proto studenti vždy sejdou před touto učebnou (ve shromažďovacích prostorách, ne na chodbě před učebnou!) a do učebny vstoupí až po pokynu vyučujícího. Úloha A1 probíhá v centru AdMaS, přesné informace podávají vyučující z THD.

Do cvičení je doporučeno přinést cvičebnici, psací potřeby a kalkulačku. Laboratorní cvičení nenavazují na odpřednášenou látku, a proto je nezbytné se na cvičení připravovat. Přípravou se rozumí základní nastudování plánovaných měření. Student, který na začátku cvičení neprokáže přiměřené znalosti o zadané úloze, nesmí úlohu provádět. Náhradní termín mu určí vyučující.

Zápočty uděluje vedoucí laboratorního cvičení. Požadavkem k zápočtu je aktivní absolvování všech cvičení a správně zpracované protokoly (= podpis na titulním listu cvičebnice). Pokud student bude předem vědět, že cvičení nemůže navštívit, nahradí si je s jinou studijní skupinou (pokud je to možné). Pokud již není náhrada možná (daná úloha již neprobíhá), určí mu způsob náhrady vyučující (vedoucí cvičení).

Studenti jsou povinni se zaregistrovat k rozvrhové jednotce laboratorního cvičení, které navštěvují. Přesuny ve cvičeních jsou možné pouze se souhlasem obou vedoucích cvičení, tzn. vedoucího cvičení, ze kterého student odchází, a vedoucího cvičení, do kterého se chce student přehlásit. Maximální počet studentů v laboratorních cvičeních je 24, přičemž tento počet je z bezpečnostních důvodů nepřekročitelný.

1.2 Bezpečnostní předpisy a laboratorní řád

- Tyto bezpečnostní předpisy a laboratorní řád platí pro výuku laboratorních cvičení v laboratořích Ústavu stavebního zkušebnictví v budově E1 a v laboratořích Ústavu technologie stavebních hmot a dílců v centru AdMaS.
- Laboratoře jsou určeny nejen pro praktická cvičení posluchačů, ale také pro provádění výzkumné činnosti pracovníků ústavu. V laboratořích je proto nutné zachovávat klid a pořádek. Přestupky proti bezpečnosti práce by mohly způsobit i vážné úrazy.
- Před zahájením výuky v laboratořích musí být posluchač seznámen s bezpečnostními předpisy a laboratorním řádem. Musí o tom být proveden záznam, který posluchač potvrdí vlastnoručním podpisem.
- Vstup do laboratoří je povolen pouze ve vhodné obuvi a vhodném oblečení a jen s vědomím vyučujícího.
- Na začátku cvičení prokáže posluchač přiměřenou znalost o metodě, postupu práce při měření a vyhodnocení dané úlohy. Zcela nepřipravený posluchač nesmí cvičení provádět.

- V průběhu cvičení je posluchačům dovoleno používat jen to zařízení, které je přímo určeno k provádění jejich úlohy. Manipulace s ostatním zařízením laboratoří je zakázána. Posluchači jsou odpovědní za všechny pomůcky a zařízení, které během cvičení používají, a po jeho skončení je v pořádku a čistotě předají zpět vyučujícímu. Poškození nebo rozbití pomůcky nebo zařízení hradí původce v plném rozsahu.
- Posluchači provádějí měření a obsluhu mechanických přístrojů až po výslovném povolení učitele a pod jeho přímým dohledem. Zkoušené vzorky (zkušební tělesa) a měřicí pomůcky (nebo přístroje) mohou být ukládány pouze na stolech s ochranným povrchem a na místech k tomuto účelu vymezených, aby nedocházelo k poškození vybavení laboratoře.
- Obsluha elektrických přístrojů není posluchačům dovolena a provádí ji pouze vyučující.
- Pro případ nebezpečí úrazu elektrickým proudem je každá laboratoř vybavena ochrannými STOP vypínači (červená tlačítka na zdech), jejichž stisknutím se v celém prostoru vypíná zásuvkový obvod 220 V i 380 V. Světelný obvod přitom zůstává stále pod napětím.
- Při vzniku požáru je nutné dbát pokynů vyučujících, nepanikařit a rychle opustit prostory laboratoří.
- Jakýkoliv (i sebemenší) úraz je nutné nahlásit vyučujícímu.
- V prostorách laboratoří je zakázáno kouření a vstup pod vlivem alkoholu či jiných omamných látek.
- Po skončení cvičení uvedou posluchači pracoviště do původního stavu a před odchodem je předají vyučujícímu.
- Porušení těchto ustanovení může být v závažném případě důvodem k vyloučení ze cvičení.

1.3 Harmonogram laboratorních cvičení podle učeben

Týden	E107		E108	
Podskupina	A	B	C	D
1	U		U	
2	K		B1	
3	B1		K	
4	A1		A1	
5	A2		A2	
6	B2		ZB2	T
7	ZB1	R	B2	
8	R	ZB1	T	ZB2
9	ZB2	T	ZB1	R
10	T	ZB2	R	ZB1
11	ZD		E	
12	E		ZD	
13	P		P	

Učebny:

E 107
E 108
E 007
E 008
AdMaS

Protokol

ÚVOD DO CVIČENÍ A OPAKOVÁNÍ

U

Vyučující:

ČÁST A

1. Jak se vypočítá objemová hmotnost pravidelného cihlářského výrobku (např. cihly plně pálené)? Uveďte vzorec, popis jednotlivých veličin a jejich jednotky.

2. Jak se vypočítá objemová hmotnost cihelného střepe (stanovená pomocí hydrostatického vážení)? Uveďte vzorec, popis jednotlivých veličin a jejich jednotky.

3. Jak se vypočítá vlhkost cihelného střepe? Uveďte vzorec, popis jednotlivých veličin a jejich jednotky.

4. Jak se vypočítá nasákavost cihelného střepe? Uveďte vzorec, popis jednotlivých veličin a jejich jednotky.

ČÁST B

1. Jaký materiál se skrývá pod označením **C 30/37 XC2 XF3 D_{max} 16 mm S4 CI 0,2?** Vysvětlete jednotlivé části označení.

2. Jaká jsou základní normová tělesa pro zkoušky betonu (včetně rozměrů)?

3. Jak se vypočítá pevnost betonu v tlaku? Uveďte vzorec, popis jednotlivých veličin a jejich jednotky.

4. Jak se spočítá pevnost betonu v tahu ohybem (referenční zkouška je čtyřbodový ohyb)? Uveďte vzorec, popis jednotlivých veličin a jejich jednotky.

5. Jaký materiál se skrývá pod označením **CEM I 42,5 R**? Vysvětlete jednotlivé části označení.

6. Jaká jsou základní normová tělesa pro zkoušky cementu (včetně rozměrů)?

7. Jak se vypočítá pevnost cementu v tlaku? Uveďte vzorec, popis jednotlivých veličin a jejich jednotky.

8. Jak se spočítá pevnost cementu v tahu za ohybu (zkouška je tříbodový ohyb)? Uveďte vzorec, popis jednotlivých veličin a jejich jednotky.

9. Nakreslete deformační diagram betonu v tlaku. Vyznačte a popište všechny jeho meze, pružnou oblast a napište zákony, které v diagramu platí.



ČÁST C

1. Jaký materiál se skrývá pod označením **B500B**? Vysvětlete jednotlivé části označení.

2. Jakou hodnotu objemové hmotnosti má stavební ocel?

3. Jakou hodnotu modulu pružnosti má stavební ocel?

4. Jakou přibližnou hodnotu jmenovité meze kluzu má stavební ocel s označením E 10 216?

5. Jak se vypočítá pevnost oceli v tahu? Uveďte vzorec, popis jednotlivých veličin a jejich jednotky.

5. Jak se vypočítá napětí na mezi kluzu oceli v tahu? Uveďte vzorec, popis jednotlivých veličin a jejich jednotky.

8. Nakreslete deformační diagram oceli v tahu. Vyznačte a popište všechny jeho meze, pružnou a plastickou oblast a napište zákon, který platí v pružné oblasti.



ČÁST D

V následující tabulce jsou uvedeny naměřené hodnoty krychelné pevnosti v tlaku ztvrdlého betonu. Vypočtěte základní statistické charakteristiky a sestavte histogram četností.

Krychle	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f_{ci} [N/mm ²]	30,2	28,1	28,7	29,4	34,2	23,0	32,2	28,1	35,0	27,6

Aritmetický průměr:

Medián:

Směrodatná odchylka:

Variační koeficient:

Histogram:

Počet tříd: **3**

Minimum:

Maximum:

Rozpětí (maximum – minimum):

Délka třídy:

Třídy (hranice tříd):			
Četnost			



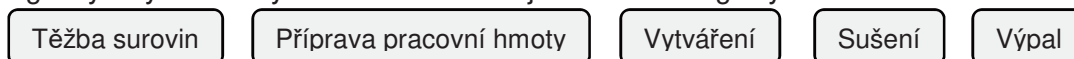
Protokol zpracoval/a: _____

2 STAVEBNÍ KERAMIKA

Do kategorie stavební keramiky patří výrobky pevně spojené se stavební konstrukcí. Jedná se o tři základní skupiny keramických výrobků:

- krytina, zdící materiály, překlady, stropní dílce
- obklady a dlažby
- sanitární keramika

Technologie výroby keramiky sestává z následujících technologických kroků:



Suroviny používané na výrobu keramiky dělíme na

- pojiva - jíly, hlíny
- ostřiva - křemenný písek, odpadní materiály (popílek, brusné kaly, atd.)
- taviva - různé druhy, pomocí nichž je korigována teplota výpalu keramických výrobků.

Příprava pracovní hmoty

Všechny technologické úkony, prováděné v této části technologie výroby, vedou k maximální homogenizaci přírodní, velmi nehomogenní suroviny. Jedná se o odležení, mletí, mísení, haldování a homogenizaci směsi za přídavku různého množství vody a přísad.

Tím, jaké množství vody je do suroviny přidáno, je dána výsledná konzistence pracovní hmoty. Při výrobě stavební keramiky používáme pracovní hmoty definované právě svojí konzistencí.

- Drolenka – nízká vlhkost 5 - 8 %, zavlhlá směs, zpracovává se lisováním do forem na hydraulických lisech tlakem 20 - 40 MPa. Tato technologie je používána především pro výrobu obkladových prvků a dlažby.
- Plastické těsto – vlhkost 18 – 26 %, zpracovává se na vakuovém šnekovém lisu, tlak na ústí šnekového lisu se pohybuje okolo 1 - 2 MPa. Tažením na vakuovém šnekovém lisu jsou vyráběny především zdící materiály a stropní dílce.
- Licí břecha – vysoká vlhkost 60 - 90 % jedná se o hustou, tekutou suspenzi. Výrobky jsou odlévány do sádrových forem na střep nebo na jádro. Touto technologií je vyráběna sanitární keramika – umyvadla, záchodové mísy a další.

Vytváření

Při tomto technologickém kroku je hmotě dáván tvar konečného výrobku. Ke tvarování slouží hydraulické lis, šnekové lis nebo sádrové formy, podle toho, jaká pracovní hmota je zpracovávána.

Sušení

Probíhá v tunelových nebo komorových sušárnách vlhkým vzduchem, výjimečně spaliny. Sušení je technologicky i energeticky náročné a nesmí při něm dojít k poruchám výrobku.

Výpal

Probíhá v tunelových, či válečkových nebo komorových pecích, teplota výpalu je závislá na druhu páleného zboží, pohybuje se od 900 °C až do 1300 °C. Výpalem získává keramický výrobek svoje výjimečné vlastnosti. Jedná se o nejvíce energeticky náročný krok v technologii výroby keramiky.

2.1 Zkoušky na surovinách

Na keramických surovinách provádíme řadu fyzikálně mechanických i technologických zkoušek, mezi které patří chemický rozbor, mineralogický rozbor a stanovení granulometrie. Stanovení granulometrického složení je jedna z nejrozšířenějších zkoušek, prováděných na plastických i neplastických keramických surovinách.

- neplastické suroviny: síťový rozbor

- plastické suroviny:
 - síťový rozbor plavením, nejčastěji na síť 0,063 mm,
 - Andreasenova sedimentační analýza (stanovení distribuce velikosti částic menších než 0,063 mm)

2.2 Zkoušky na pracovních hmotách

Největší objem keramických výrobků je vyráběn z plastického těsta. Proto je obsahem následující kapitoly popis základních zkoušek, prováděných na plastickém těstě. Jedná se o tyto tři základní zkoušky:

- Stanovení vlhkosti
- Stanovení optimální vlhkosti podle Pfefferkorna
- Stanovení kritické vlhkosti a citlivosti k sušení podle Bigota

2.2.1 Stanovení vlhkosti

Princip stanovení vlhkosti plastického těsta je následující: Vzorek plastického těsta zvážíme m_n , vysušíme v sušárně při 105°C do konstantní hmotnosti, tedy vlhkost je nulová a po vysušení opět zvážíme m_s , z naměřených hodnot vypočítáme vlhkost plastického těsta podle vzorce:

$$w = \frac{m_z - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad [\%] \quad 2.1$$

m_z hmotnost vlhkého vzorku v gramech s přesností na 0,01 [g]

m_s hmotnost suchého vzorku v gramech s přesností na setiny 0,01 [g]

w vlhkost těsta s přesností na 0,1 [%]

Pomůcky: hodinové sklíčko, váhy, sušárna

2.2.2 Stanovení optimální vlhkosti keramických těst (Pfefferkorn) ČSN 72107

Jedná se o stanovení optimální vlhkosti pro tváření pracovní hmoty (plastického těsta) na šnekovém vakuovém lisu. Tuto vlhkost - optimální vlhkost těsta w_{opt} , určíme ze závislosti plastické deformace na vlhkosti.

Pomůcky:

- Pfefferkornův deformační přístroj
- Forma na přípravu vzorku
- Posuvné měřítko
- Zařízení na stanovení vlhkosti viz stanovení vlhkosti

Postup zkoušky:

Vytvořím dva zkušební vzorky průměru 33 mm, výšky $h_0 = 40$ mm, jeden vzorek bude tužší, vzorek č. 1 (nižší vlhkost) a druhý bude plastičtější vzorek č. 2 (vyšší vlhkost), vzorek č. 1 vložím do přístroje a zdeformuji, po deformaci změřím výšku vzorku h_1 . Vzorek č. 2 vložím do přístroje a zdeformuji, po deformaci změřím výšku vzorku h_2 . Z každého vzorku odeberu kousek hmoty na stanovení vlhkosti w_1 , w_2 .



Obrázek 2.1.: Pfefferkornův deformační přístroj, vzorek před deformací.



Obrázek 2.2.: Pfefferkornův deformační přístroj, vzorek po deformaci.

Stanovím vlhkosti w_1, w_2 s přesností na 0,01 [%]. Viz kapitola 1.3.1.
 Vypočítám deformační poměry d_1 a d_2 podle vztahu:

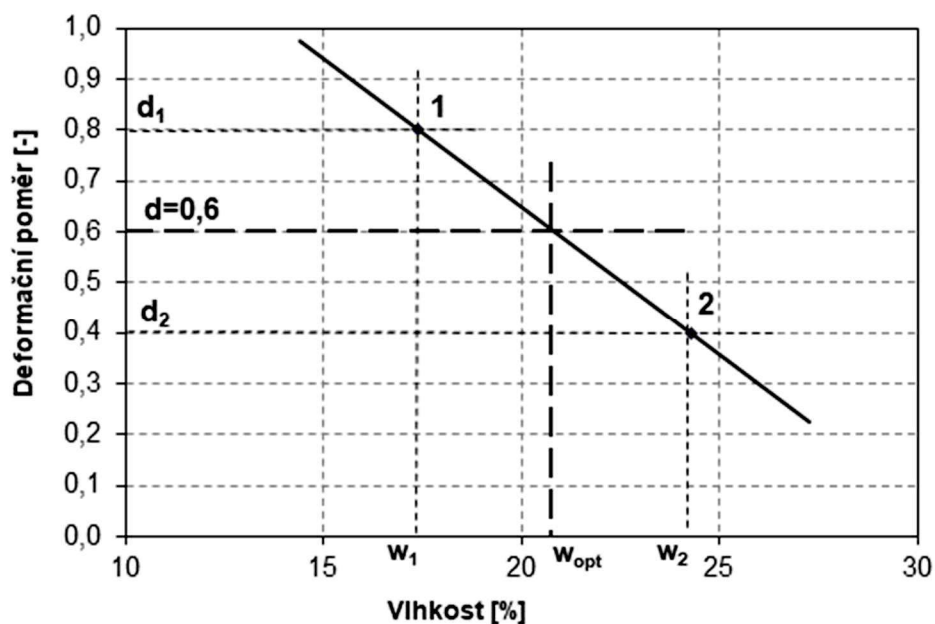
$$d_1 = \frac{h_1}{h_0} \quad d_2 = \frac{h_2}{h_0} \quad [-] \quad 2.2$$

h_1, h_2 výška vzorku (válečku) po deformaci s přesností na 0,1 [mm]
 h_0 výška vzorku (válečku) před deformací s přesností na 0,1 [mm]
 d_1, d_2 deformační poměr těsta s přesností na 0,01 [mm]

Stanovení optimální vlhkosti w_{opt} se z těchto hodnot provádí buď graficky (méně časté), nebo výpočtem podle vzorce:

$$w_{opt} = w_1 + \frac{w_2 - w_1}{d_2 - d_1} \cdot (d - d_1) \quad [%] \quad 2.3$$

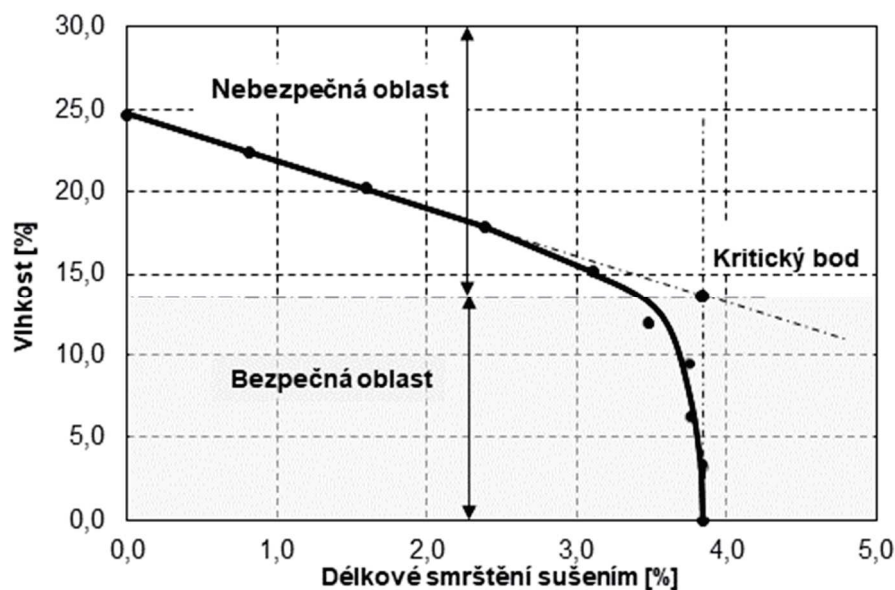
w_{opt} optimální vlhkost těsta s přesností na 0,1 [%]
 d optimální deformační poměr, pro keramická těsta $d = 0,4$, pro cihlářská těsta $d = 0,6$



Obrázek 2.3.: Grafické stanovení optimální vlhkosti podle Pfefferkorna.

2.2.3 Stanovení kritické vlhkosti a citlivosti k sušení (Bigot) ČSN 721565

Při sušení keramických výrobků se snižuje jejich vlhkost a současně se výrobek smršťuje, dochází u něj k délkové změně, záporné, kterou označujeme jako smrštění. Zejména v počáteční fázi sušení je potřeba výrobky sušit opatrně, aby nedocházelo ke vzniku technologických trhlinek a prasklin. Vlhkost, do které je nutné sušení provádět opatrně a se zřetelem na délkové smrštění materiálu, označujeme jako vlhkost kritického bodu a značíme ji w_{KB} . Když vlhkost při sušení výrobku klesne pod hodnotu w_{KB} , nehrozí již nebezpečí vzniku poruch, protože ke smrštění výrobku již nedochází nebo pouze ve zcela minimální míře. Vlhkost w_{KB} rozděluje celé sušení na dvě části, na oblast nebezpečného sušení a na oblast bezpečného sušení. Z tohoto pohledu je proces sušení nejlépe popsán Bigotovou křivkou.



Obrázek 2.4.: Bigotova křivka.

Stanovení kritické vlhkosti a citlivosti k sušení je zkouška časově značně náročná. Nejdříve je potřeba stanovit vlhkost kritického bodu w_{KB} a následně vypočítat citlivost k sušení CSB (citlivost k sušení podle Bigota)

Pomůcky:

Forma na výrobu keramických cihelky

Posuvné měřítko

Zařízení na stanovení vlhkosti viz stanovení vlhkosti kapitola 2.3.1.

Postup zkoušky:

Vytvořím zkušební tělísko ve tvaru cihelky, po jeho vytvoření (odformování) do vzorku otisknu posuvné měřítko nastavené na vzdálenost $l_z=80$ mm a cihelku zvažím.

Vytvořený zkušební vzorek - cihelku nechám schnout v laboratoři za normální teploty a atmosférického tlaku (volnoprostorové sušení) a každou hodinu tělísko vážím a měřím vzdálenost otisků posuvného měřítka na vzorku. Když tři za sebou jdoucí měření otisků vykazují stejnou hodnotu, dosuším zkušební těleso v laboratorní sušárně do konstantní hmotnosti. Při nulové vlhkosti zkušební tělesa opět změřím vzdálenost otisku posuvného měřítka. Veškeré naměřené hodnoty zaznamenávám do tabulky.

Tabulka 2.1: Naměřené a **vypočítané** hodnoty při stanovení citlivosti k sušení podle Bigota.

	Hmotnost [g]	Vzdálenost rysek [mm]	Vlhkost [%]	Smrštění sušením [%]
Výlisek	197,25	$l_z = 80,00$	$w_a = 24,7$	0,0
	193,68	79,35	22,4	0,8
	190,25	78,72	20,2	1,6
	186,54	78,09	17,9	2,4
	182,25	77,51	15,2	3,1
	177,12	77,22	11,9	3,5
	173,25	77,00	9,5	3,8
	168,15	76,99	6,3	3,8
	163,33	76,93	3,2	3,8
Výsušek	$m_s = 158,24$	76,93	0,0	$DS_{max} = 3,8$

Z naměřených hodnot vypočítám vlhkost tělesa při jednotlivých měřeních s přesností na 0,1 % a délkové smrštění DS při jednotlivých měřeních.

Výpočet vlhkosti je již znám, výpočet délkového smrštění provedu podle vztahu:

$$DS_i = \frac{l_i - l_z}{l_z} \cdot 100 \quad [\%] \quad 2.4$$

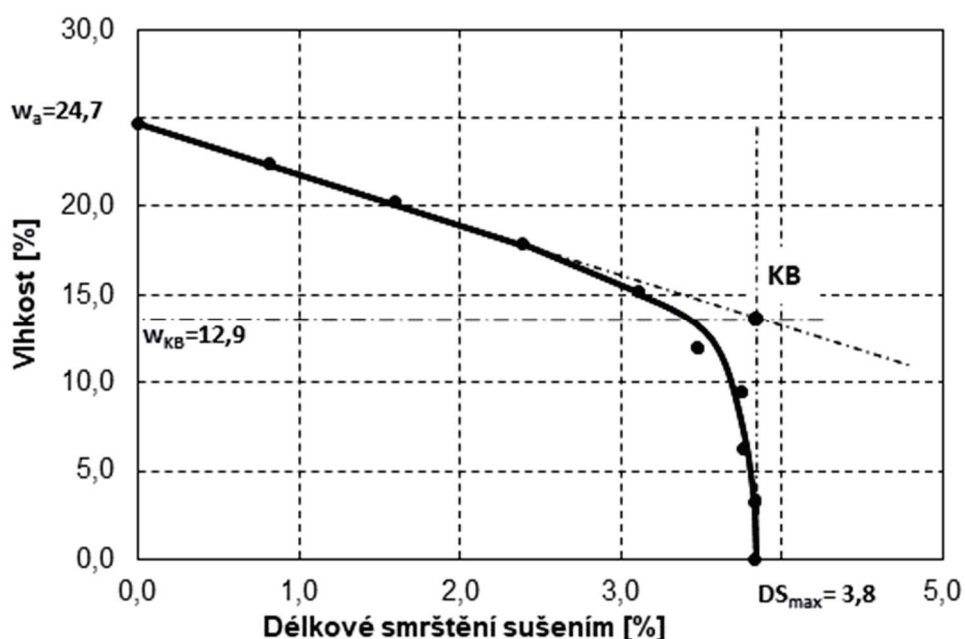
l_z vzdálenost rysek po odlisování s přesností na 0,01 [mm]

l_i vzdálenost rysek při jednotlivých měřeních s přesností na 0,01 [mm]

DS_i smrštění sušením při daném měření s přesností na 0,1 [%]

Pokud známe hodnoty vlhkostí a délkového smrštění v jednotlivých bodech měření, přikročíme z vynesení grafické závislosti - Bigotovy křivky. Nejdříve graficky stanovíme kritický bod KB a z grafu odečteme w_{KB} - vlhkost kritického bodu.

Postup grafického řešení je následující: Vyneseme uspořádané dvojice (vlhkost, DS) jednotlivých měření, jednotlivé body na obr. 2.5. Z maximálního smrštění DS_{max} vyneseme kolmici k ose x. Z bodu w_a na ose y se snažíme proložit přímkou naměřenými body tak, aby odchylka od jednotlivých bodů byla minimální. V průsečíku těchto dvou přímek se nachází kritický bod KB, na ose „y“ můžeme pak odečíst vlhkost kritického bodu.



Obrázek 2.5: Bigotova křivka, konstrukce kritického bodu (Tab. 1.1.).

Citlivost k sušení stanovím podle vztahu:

$$CSB = \frac{W_a - W_{KB}}{W_{KB}} \quad [-] \quad 2.5$$

W_a vlhkost vzorku na počátku měření [%]

W_{KB} vlhkost kritického bodu [%]

CSB citlivost k sušení podle Bigota [-

Podle hodnoty CSB následuje zařídění zeminy do určité kategorie:

$CSB < 1$ – zeminy málo citlivé k sušení

$CSB 1 - 1,5$ - zeminy středně citlivé k sušení

$CSB 1,5 - 2$ - zeminy citlivé k sušení

$CSB > 2$ - zeminy silně citlivé k sušení

Citlivost k sušení je technologická vlastnost keramických surovin, kterou můžeme ovlivnit zejména přidavkem ostřiva.

2.3 Zkoušky na vypáleném keramickém střepu

Posledním, avšak nejdůležitějším, technologickým krokem při výrobě keramiky je výpal. Výpalem, jeho délkou, průběhem a maximální teplotou můžeme významným způsobem ovlivnit výsledné fyzikálně mechanické a užitné vlastnosti materiálu. Výpal probíhá v kontinuálních nebo v periodických pecích. Jedná se o pece tunelové, či válečkové a o pece komorové, či vozokomorové. Každé z těchto tepelných zařízení má své výhody i nevýhody, každé je vhodné pro výpal jiného druhu keramického zboží. Teplota výpalu je různá, podle vypalovaného zboží, 860 °C až 1000 °C (1200°C). Průběh výpalu popisuje pálící křivka.



Obrázek 2.6: Vozokomorová pec.



Obrázek 2.7: Tunelová pec.

2.3.1 Zkoušky prováděné na vypáleném keramickém střepu

- Nasákavost NV [%]
- Objemová hmotnost OH [kg.m⁻³]
- Zdánlivá pórovitost PZ [%]
- Zdánlivá hustota ZH [%]
- Skutečná pórovitost PS [%]
- Slínavost
- Hustota (měrná hmotnost) ρ [kg.m⁻³]
- Pórovitost uzavřená PU [%]
- Celková délková změna DC [%]
- Pevnost v tahu za ohybu [Pa]

- Pevnost v tlaku [Pa]
- Vzlínavost a další

2.3.2 Nasákavost

Definice: Nasákavost je schopnost vypáleného keramického materiálu přijímat kapalinu.

Nasákavost (NV) je jedním z nejdůležitějších parametrů, který charakterizuje mikrostrukturu keramického střeptu. Vysoká nasákavost odpovídá pórovité struktuře, zatímco hutný a slinutý výrobek má nasákavost nízkou. Nasákavost se stanovuje v %, jako poměr hmotnosti vody pohlcené zkušebním vzorkem ke hmotnosti vysušeného vzorku.

Výpočet nasákavosti:

$$NV = \frac{m_n - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad [\%] \quad 2.6$$

m_n hmotnost vzorku po zkoušce nasákavosti, nasáklého [g]

m_s hmotnost vysušeného vzorku [g]

Postup zkoušky:

- Stanovení nasákavosti varem

Vzorky vysušené při 110°C do ustálené hmotnosti se zváží a uloží na rošt do varné nádoby s vodou tak, aby se nedotýkaly stěn nádoby, ani vzájemně mezi sebou a byly zcela ponořeny. Voda se během půl hodiny až jedné hodiny přivede k varu, který se dále udržuje 2 hodiny. Odpařená voda se během varu doplňuje tak, aby vzorky byly stále minimálně 20 mm pod hladinou. Po ukončení varu se nádoba nechá vychladnout na teplotu místnosti. Po vychladnutí jsou vzorky postupně vyjímány z nádoby, na povrchu otírány vyždímanou vlhkou tkaninou a ihned váženy.

- Stanovení nasákavosti vakuovou metodou

Zvážené, vysušené vzorky se umístí do exikátoru, ze kterého je následně odčerpán vzduch. Po dosažení 80% vakua jsou vzorky zaplaveny vodou. Po 10 minutách vakuum zrušíme, vzorky jsou postupně vyjímány z exikátoru, na povrchu otírány vyždímanou vlhkou tkaninou a váženy.

2.3.3 Objemová hmotnost

Definice: Objemová hmotnost (OH) udává hmotnost objemové jednotky vysušeného vzorku včetně uzavřených a otevřených pórů.

Vyjadřuje se v $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a je vždy nižší než měrná hmotnost vzorku. U keramických střeptů se nejčastěji stanovuje hydrostatickým vážením. Vzorky nasycené při zkoušce nasákavosti se potom hydrostaticky váží na vytárovaném závěsu (dbá se na to, aby se vzorky při vážení nedotýkaly stěn, ani dna nádoby). Objemová hmotnost střeptu se vypočítá ze vztahu:

$$OH = \frac{m_s}{m_n - m_{nv}} \cdot \rho_v \quad [\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}] \quad 2.7$$

m_s hmotnost suchého vzorku [g],

m_n hmotnost nasáklého vzorku váženého na vzduchu [g],

m_{nv} hmotnost nasáklého váženého hydrostaticky (pod vodou) [g],

ρ_v hustota kapaliny v níž je prováděno hydrostatické vážení [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$], pro vodu dosazují $1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

2.3.4 Zdánlivá pórovitost

Definice: Zdánlivá pórovitost udává, jaký je poměr objemu otevřených pórů vzorku k jeho celkovému objemu včetně pórů

Ne vždy musí být střep s větší měrnou hmotností při stejné nasákavosti pórovitější. *Zdánlivá pórovitost (PZ)* je přesnějším ukazatelem pórovitosti mikrostruktury než nasákavost (střep s větší měrnou hmotností bude vždy pórovitější než vzorek s měrnou hmotností nižší při stejné nasákavosti). Stanovuje se společně se zjišťováním nasákavosti a objemové hmotnosti.

$$PZ = \frac{m_n - m_s}{m_n - m_{nv}} \cdot 100 = NV \cdot \frac{OH}{1000} \quad [\%] \quad 2.8$$

m_n hmotnost vzorku nasáklého [g],
 m_s hmotnost suchého vzorku [g],
 m_{nv} hmotnost nasáklého vzorku pod vodou [g]

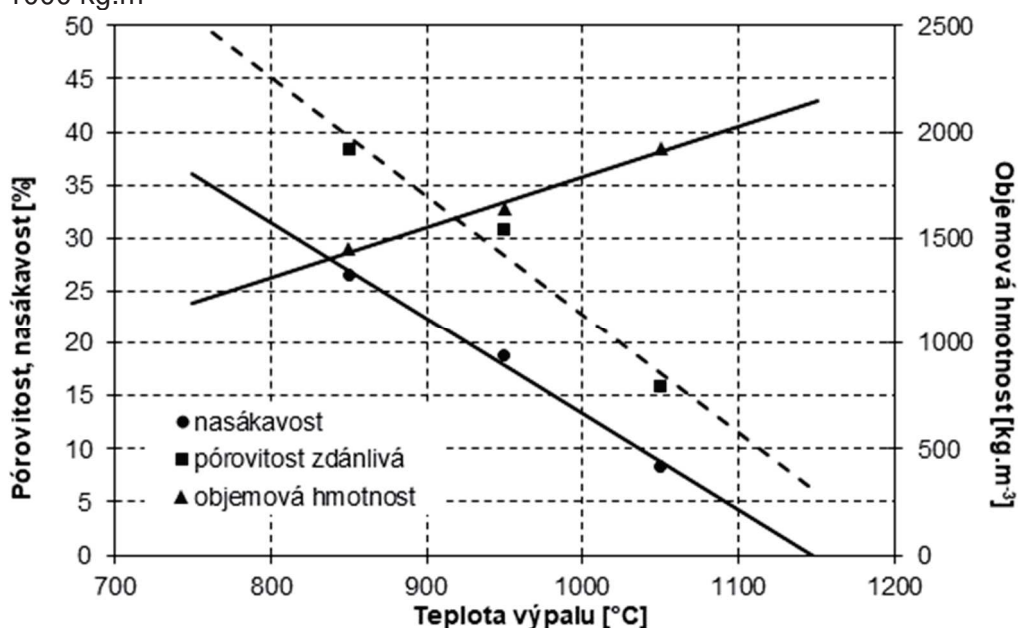
2.3.5 Zdánlivá hustota

Definice: Zdánlivá hustota (ZH) udává hmotnost vysušeného vzorku na jednotku jeho objemu včetně uzavřených pórů.

Pokud vzorek nemá uzavřené póry, pak se zdánlivá hustota rovná měrné hmotnosti (hustotě). Stanovuje se současně se stanovením nasákavosti, objemové hmotnosti a zdánlivé pórovitosti podle vzorce:

$$ZH = \frac{m_s}{m_s - m_{nv}} \cdot \rho_v \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad 2.9$$

m_s hmotnost suchého vzorku [g],
 m_{nv} hmotnost nasáklého vzorku pod vodou [g],
 m_n hmotnost nasáklého vzorku na vzduchu [g].
 ρ_v hustota kapaliny, v níž je prováděno hydrostatické vážení [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$], pro vodu dosazují 1000 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$



Obrázek 2.1.: Obrázek 2.8: Nasákavost a pórovitost s teplotou výpalu klesá, objemová hmotnost keramického střepu s teplotou roste.

2.3.6 Skutečná pórovitost

Definice: Skutečná pórovitost (PS) udává poměr otevřených i uzavřených pórů zkušebního vzorku k jeho objemu včetně všech pórů.

Vyjadřuje se v procentech objemu zkušebního vzorku. Postup určuje ČSN 72 5010. Skutečná pórovitost je vždy větší, než zdánlivá pórovitost, poněvadž zahrnuje také objem uzavřených pórů. K posouzení mikrostruktury cihlářského střeptu z hlediska podílu pórů vystačíme často pouze s hodnotou zdánlivé pórovitosti, protože u těchto pórovitých výrobků je relativně menší objem uzavřených pórů. Pouze u výrobků hutných a slinutých se vyskytují uzavřené póry častěji, takže je stanovení skutečné pórovitosti účelné.

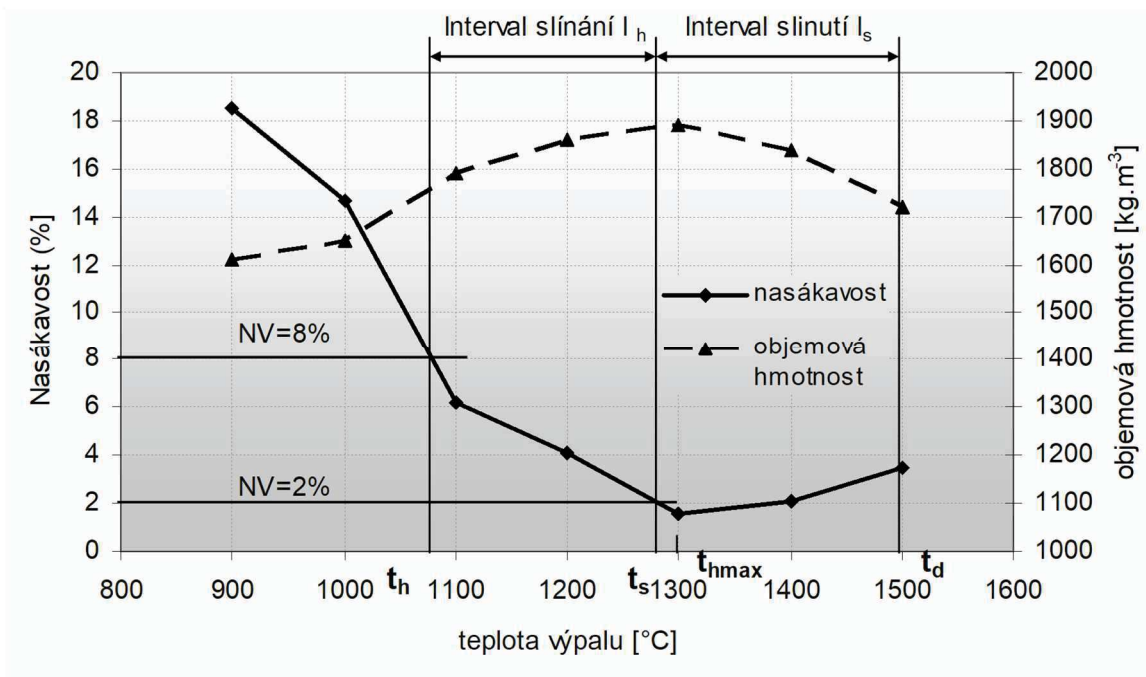
$$PS = \left(1 - \frac{OH}{\rho} \right) \cdot 100 \quad [\%] \quad 2.10$$

OH objemová hmotnost [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],
 ρ hustota [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

2.3.7 Slínavost

Každá zemina je charakterizována svou slínavostí, která se vyjadřuje teplotou slinutí, intervalem slinutí, resp. slínání.

- **Teplota slinutí (t_s)** – teplota ve $^{\circ}\text{C}$, při níž má vypálený vzorek po vychladnutí na teplotu místnosti nasákavost $NV = 2\%$.
 - **Interval slinutí (I_s)** – rozdíl mezi teplotou slinutí a teplotou deformace: $I_s = t_d - t_s$
 - **Interval slínání (I_h)** – rozdíl mezi teplotou slinutí a zhutnění, $I_h = t_s - t_h$
- **Teplota zhutnění (t_h)** – teplota, při níž má vzorek po výpalu a vychladnutí nasákavost $NV=6\%$ (8 %)
- **Teplota deformace (t_d)** – teplota, při níž nastane deformace žároměrky připravené ze vzorku.
- **Teplota maximálního zhutnění (t_{hmax})** – teplota t , při níž má vzorek nejmenší nasákavost, v každém případě menší než 2%.



Obrázek 2.9: Slínavost keramického materiálu.

Při stanovení slínivosti se postupuje podle ČSN 72 1072 – zjistí se nejprve teplota slinutí t_s takovým způsobem, že se na vzorcích, vypálených na různé teploty, určí nasákavost NV. Dále se stanoví teplota deformace (žároměrné shody) a z jejich rozdílu interval slinutí I_s . Pokud je třeba stanovit ostatní intervaly, postupuje se obdobně. To znamená, že se řada zkušebních cihel vypaluje na různé teploty. Vypalovací teploty se volí podle typu materiálu a jsou odstupňovány po 100 °C. V blízkosti očekávané teploty slinutí se jejich intervaly zmenšují. Na každou teplotu se vypalují tři zkušební cihelky. Po vychladnutí cihel na teplotu místnosti se stanoví jejich nasákavost.

Z výsledku zkoušky se sestaví křivka závislosti nasákavosti na vypalovací teplotě tak, že jednotlivé body křivky jsou aritmetickým průměrem tří stanovení. Z křivky se čtou příslušné teploty zaokrouhlené na nejbližších 5°C. Z odečtených teplot je možno určit intervaly zhutňování I_p , slínání I_h a slinutí I_s .

2.3.8 Hustota (měrná hmotnost)

Definice: Hustota (ρ) je poměr hmotnosti látky a jejího objemu bez pórů.

Ke stanovení hustoty musíme znát hmotnost vzorku a jeho objem. Hmotnost vzorku určíme vážením, objem nepřímo vážením v pyknometru za použití vhodné kapaliny.

Ke stanovení hustoty vypálených stěpů se používá metoda kapalinového pyknometru za použití vody (podle ČSN 72 5011).

Vzorek se ke zkoušce připraví pomletím tak, aby prošel sítím 0,063 mm, a nechá se vysušit při 110 °C. Pomletý vzorek se poté přesype do zváženého pyknometru (na analytických vahách s přesností 0,0001 g) tak, aby zaplnil asi 1/5 jeho objemu a opět zváží. Poté se vzorek v pyknometru zaleje vodou tak, aby hladina dosahovala přibližně 1 cm nad vzorek. Aby kapalina dokonale vyplnila mezery mezi zrny vzorku, musí se vzorek odvzdušnit za použití vývěvy a to tak, že se pyknometr bez uzávěru umístí do exsikátoru, který je připojen na odvzdušňovací vodní vývěvu. Odvzdušňování poté probíhá asi 10 minut. Po zrušení podtlaku se pyknometr doplní vodou asi 5 mm pod okraj ústí hrdla a nechá se sedimentovat. Poté se pyknometr uzavře zátkou, aby došlo k výtoku přebytku vody kapilárou v zátce. Osušený pyknometr se zváží. Poslední hmotnost se určí při naplnění pyknometru vodou.

2.3.9 Pórovitost uzavřená

Definice: Pórovitost uzavřená udává poměr uzavřených pórů vzorku k jeho objemu včetně pórů.

Uzavřená pórovitost se vypočítá podle vzorce: $PU = PS - PZ$ [%] 2.11

PS skutečná pórovitost [%]

PZ zdánlivá pórovitost [%]

2.3.10 Celková délková změna

V průběhu výpalu a především sušení dochází k délkovým změnám střeptu (při sušení vždy smrštění), Celkovou délkovou změnu označujeme jako (DC). Kladná hodnota DC znamená prodloužení vzorku (méně časté), záporná DC naopak smrštění střeptu. Pokud původní velikost výlisku byla dána velikostí formy ($l_z = 100$ mm), lze hodnotu DC vypočítat následovně:

$$DC = \frac{l_p - l_z}{l_z} \cdot 100 \quad [\%] \quad 2.12$$

l_p délka trámečku po výpalu [mm]

Poznámka: Pokud známe délkovou změnu sušením DS, potom je možno vypočítat délkovou změnu pálením DP = DC – DS

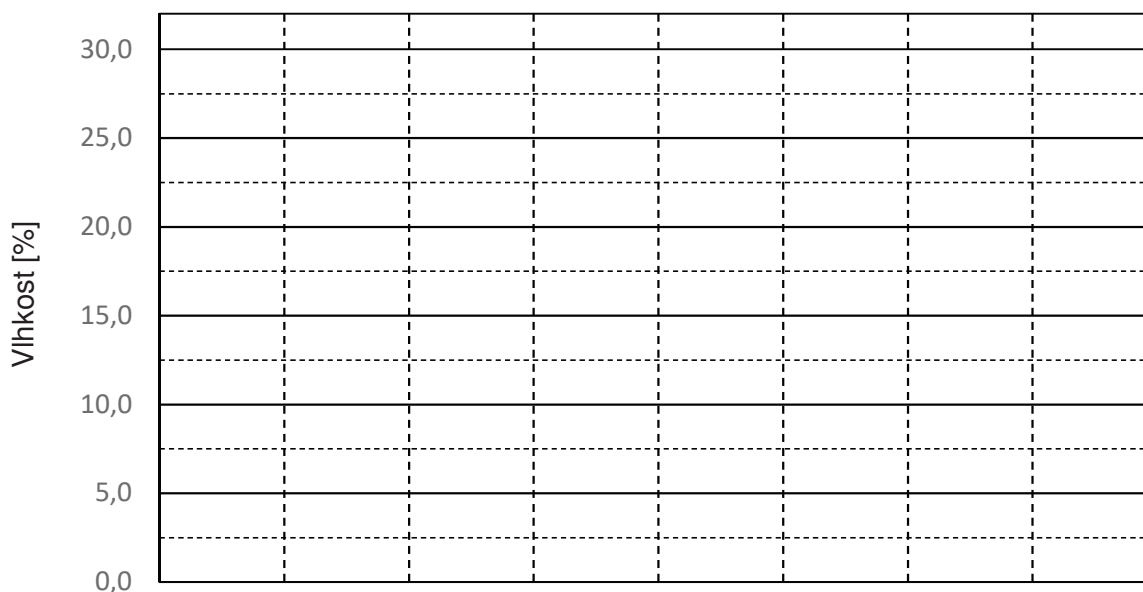
Protokol STAVEBNÍ KERAMIKA	K
Vyučující:	

**Stanovení maximální porovnávací rychlosti nezávadného sušení.
Stanovení kritické vlhkosti [ČSN 72 1565 – 11]**

Stanovte vlhkost kritického bodu a zeminu zařídte podle koeficientu CSB.
Zadání:

	Vlhkost [%]	Smrštění sušením [%]
Výlisek		
Výsušek		

Konstrukce Bigotovy křivky:



Délkové smrštění sušením [%]

Kritická vlhkost $w_{KB} = \dots\dots\dots$

Výpočet koeficientu citlivosti k sušení dle Bigota: $CSB = \dots\dots\dots$

Závěr, zařídění suroviny: $\dots\dots\dots$

$\dots\dots\dots$

Označte správnou odpověď:

Výroba pálené keramiky má v České Republice mnohaletou tradici. Hojně je vyráběna keramika užitková i keramika stavební.

Největší objem keramické výroby představují:

- a) zdící prvky a střešní krytina,
- b) obklady a dlažba,
- c) sanitární keramika.

Tyto výrobky se vyrábějí z plastického těsta, které má vlhkost:

- a) 5-15 %,
- b) 15-30%
- c) 60-80%.

V současné době jsou v provozu cihelny firmy Heluz (Hevlín, Libochovice) a Wienerberger (Šlapanice, Kostelec nad Orlicí, České Budějovice, Novosedly a Jezernice). Výrobou cihlářských výrobků se zabývá ještě několik malých cihelen (Vysoké Mýto, Zlín, Polom,...)

Velkou tradici má v České Republice také výroba obkladových prvků a dlažby, např. RAKO Rakovník.

Obklady a dlažba se vyrábí z pracovní hmoty, které říkáme:

- a) licí břečka,
- b) plastické těsto,
- c) zavhlá směs (lisovací granulát).

Poslední skupinou výrobků stavební keramiky je sanitární keramika, která se vyrábí odléváním keramické suspenze do forem. Používají se formy:

- a) sádrové,
- b) ocelové,
- c) keramické.

Technologie výroby stavební keramiky se skládá z následujících kroků:

1. Těžba suroviny
2. Homogenizaci suroviny a vytvoření pracovní hmoty
3. Vytvoření tvaru výrobku - výlisek
4. Vysušení výlisku
5. Vypálení výsušku

Před vlastním výpalem je nutné výrobek vysušit. Vlhkost výsušků se pohybuje mezi:

- a) 0-3 %,
- b) 3-5 %,
- c) 3-10 %.

Sušení probíhá v periodických sušárnách (komorových), nebo v sušárnách kontinuálních (tunelových, kanálových). Chování plastického těsta při sušení popisuje:

- a) Pfefferkornova křivka,
- b) sušící křivka,
- c) Bigotova křivka.

Posledním technologickým krokem je výpal, při kterém probíhají různé chemické reakce a dochází ke slinování keramického střepe. Keramika získává své vynikající užitné vlastnosti.

Výpal probíhá podle pálící křivky v komorových, tunelových nebo válečkových pecích. Chování pracovní hmoty při výpalu popisuje vlastnost, které říkáme:

- a) plasticita,
- b) žáruvzdornost,
- c) slínavost.

Při výrobě keramiky je potřeba znát základní charakteristiky použitých surovin jako je granulometrie, chemické a mineralogické složení. U vypálených keramických výrobků je garantována rozměrová přesnost výrobků, nasákavost, pórovitost, mrazuvzdornost, tepelně izolační vlastnosti, obrusnost, otěruvzdornost a další vlastnosti specifické pro daný druh keramického výrobku.

3 NÁVRH SLOŽENÍ BETONU

3.1 Beton

3.1.1 Úvod

Beton je materiálem ze směsi cementu, hrubého a drobného kameniva a vody, s přísadami nebo příměsemi nebo bez nich, který získá své fyzikálně-mechanické vlastnosti hydratací cementu.

3.1.2 Legislativní předpisy

Základním legislativním předpisem pro návrh, výrobu a mezní hodnoty složení betonu je norma **ČSN EN 206+A2**. Tato norma je zaměřená výhradně na beton a jeho vstupní suroviny. Platí zejména pro beton použitý pro konstrukce betonované na staveništi, montované konstrukce a pro prefabrikované konstrukční dílce pozemních a inženýrských staveb. Beton může být vyráběn na staveništi, dodáván jako transportbeton nebo vyráběn ve výrobně betonových výrobků. **Na počátku roku 2016 byla vydána tzv. zbytková norma ČSN P 73 2404 Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda – Doplnující informace, která přispěla ke sjednocení požadavků na vlastnosti betonu s tzv. Technickými kvalitativními podmínkami vydanými Ministerstvem dopravy, odborem pozemních komunikací.** Týká se to zejména požadavků na složení a vlastnosti betonu pro významné dopravní stavby.

3.1.3 Základní definice

Čerstvý beton

Beton, který je zcela zamíchán a je ještě v takovém stavu, který umožňuje jeho zhutnění zvoleným způsobem.

Ztvrdlý beton

Beton, který je v pevném stavu a má již určitou pevnost (možnost manipulace).

Základní složky betonu

- **Cement** - Jemně rozemletý anorganický materiál, který po smíchání s vodou vytváří kaši, která tuhne a tvrdne hydraulickou reakcí, a která si po ztvrdnutí zachovává pevnost a stálost i pod vodou.
- **Kamenivo** - Zrnitý anorganický materiál, vhodný do betonu. Kamenivo může být přírodní, umělé nebo recyklované z materiálů, který byl dříve použit v konstrukci. Kamenivo zaujímá 75 – 80 % objemu betonu a jeho hlavní funkcí je vytvoření pevné kostry v betonu s minimální mezerovitostí. Pokud je v betonu použito recyklované kamenivo, je třeba zohlednit jeho vysokou nasákavost a nepoužitelnost pro některé druhy betonů uvedené v ČSN EN 206+A2.
- **Voda** - Technologicky vodu rozdělujeme na záměsovou (dávkovanou při mísení čerstvého betonu a na ošetřovací (voda dodávaná po zatuhnutí betonu po několik dnů pro udržení betonu ve vlhkém stavu).
- **Přísady** - Materiál, který upravuje vlastnosti čerstvého nebo ztvrdlého betonu, přidávaný během míchání betonu v malém množství vzhledem k poměru ke hmotnosti cementu.
- **Příměsi** - Práškový materiál, který se přidává do betonu za účelem zlepšení určitých vlastností nebo k docílení speciálních vlastností betonu. Norma pojednává o dvou druzích anorganických příměsí:
 - a) téměř inertní příměs (druh I)
 - b) pucohány nebo latentní hydraulické příměsi (druh II)

Vodní součinitel

(w - water / cement ratio)

Poměr účinného obsahu vody k hmotnosti cementu v čerstvém betonu.

$$w = m_v / m_c$$

3.1

Působení prostředí (ČSN EN 206+A2)

Takové chemické a fyzikální působení, kterému je vystaven beton, jehož účinky na beton nebo na výztuž nebo na zabudované kovové vložky nejsou uvažovány jako zatížení konstrukce.

3.1.4 Stupně vlivu prostředí (ČSN EN 206+A2 a ČSN P 73 2404)

Působení prostředí je klasifikováno dle tzv. stupňů vlivů prostředí (expozičních tříd). Stupně vlivu prostředí se stanoví v závislosti na předpisech v místě použití betonu. Charakterizují prostředí využívání betonové konstrukce, označují se vždy písmenem X, dalším písmenem určující působení, kterému je beton vystaven a číslem udávající intenzitu tohoto působení.

X0 - Bez nebezpečí koroze nebo narušení

Pro beton bez výztuže nebo zabudovaných kovových vložek:

- všechny vlivy s výjimkou střídavého působení mrazu a rozmrazování, obrusu nebo chemicky agresivního prostředí (např. beton uvnitř budov s velmi nízkou vlhkostí vzduchu)

Pro beton s výztuží nebo se zabudovanými kovovými vložkami:

- velmi suché

XC - Koroze vlivem karbonatace

Pokud beton obsahující výztuž nebo jiné zabudované kovové vložky je vystaven ovzduší a vlhkostí, pak se stupeň vlivu prostředí určuje následovně:

- XC1 - Suché nebo stále mokré
- XC2 - Mokrý, občas suchý
- XC3 - Středně mokrý, vlhký
- XC4 - Střídavě mokrý a suchý

XD - Koroze vlivem chloridů, ne však z mořské vody

Pokud beton s výztuží nebo s jinými zabudovanými kovovými vložkami, přichází do styku s vodou obsahující chloridy, včetně rozmrazovacích solí, ze zdrojů jiných než z mořské vody, musí být vliv prostředí odstupňován následovně:

- XD1 - Středně mokrý, vlhký
- XD2 - Mokrý, občas suchý
- XD3 - Střídavě mokrý a suchý

XS - Koroze vlivem chloridů z mořské vody

Pokud beton s výztuží nebo s jinými zabudovanými kovovými vložkami, přichází do styku s chloridy z mořské vody nebo slaným vzduchem z mořské vody, musí být vliv prostředí odstupňován následovně:

- XS1 - Vystaven slanému vzduchu, ale ne v přímém styku s mořskou vodou
- XS2 - Trvale ponořen ve vodě
- XS3 - Smáčený a ostříkovaný přílivem

XF - Působení mrazu a rozmrazování (mrazové cykly) s rozmrazovacími prostředky nebo bez nich

Pokud je mokrý beton vystaven významnému působení střídavého mrazu a rozmrazování (mrazovým cyklům), musí být vliv prostředí odstupňován následovně:

- XF1 - Mírně nasycen vodou bez rozmrazovacích prostředků
- XF2 - Mírně nasycen vodou s rozmrazovacími prostředky
- XF3 - Značně nasycen vodou bez rozmrazovacích
- XF4 - Značně nasycen vodou s rozmrazovacími prostředky nebo mořskou vodou

Stupně vlivu prostředí															
	Bez nebezpečí koroze nebo narušení	Koroze způsobená karbonatací				Koroze způsobená chloridy jiné chloridy než z moře			Působení mrazu a rozmrazování				Chemicky agresivní prostředí		
		X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2
Maximální vodní součinitel w/c	---	0,65	0,60	0,55	0,50	0,55	0,50	0,45	0,55 ^{b)}	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,45
Doplňková specifikace min. pevnostní třídy betonu	C12/15	C20/25	C25/30	C25/30	C30/37	C25/30	C25/30	C30/37 ^{m)}	C25/30	C25/30	C25/30	C30/37	C25/30	C25/30 ^{g)}	C30/37 ^{g)}
Minimální obsah cementu při návrhu složení betonu [kg/m ³] ⁿ⁾	---	260	280	280	300	300	300	320	300	300 ^{d)}	320 ^{d)}	340 ^{d)}	300	320	360
Minimální obsah vzduchu v CB při zkoušce podle ČSN EN 12350-7 pro beton se zrnitostí do (%) ^{e)}	8 mm	---	---	---	---	---	---	---	---	4,5 ^{f)}	5,0 ^{a)}	5,5 ^{a)}	---	5,5 ^{b)}	5,5 ^{b)}
	16 mm	---	---	---	---	---	---	---	---	3,5 ^{f)}	4,0 ^{a)}	4,5 ^{a)}	---	4,5 ^{b)}	4,5 ^{b)}
	22-32 mm	---	---	---	---	---	---	---	---	3,0 ^{f)}	3,5 ^{a)}	4,0 ^{a)}	---	4,0 ^{b)}	4,0 ^{b)}
Minimální obsah mikropórů A ₃₀₀ ve ztvrdlém betonu při zkoušce podle ČSN EN 480-11 [%] ⁿ⁾	---	---	---	---	---	---	---	---	---	1,0 ^{l)}	1,0 ^{l)}	1,8 ^{l),m)}	---	---	---
Maximální součinitel rozložení vzduchových pórů (L) při zkoušce podle ČSN EN 480-11 [mm]	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0,24 ^{l)}	0,24 ^{l)}	0,20 ^{l),m)}	---	---	---
Maximální průsak vody při zkoušce podle ČSN EN 12390-8 [mm] ^{a)}	---	---	---	50	50	50	50	20	50	35	20	20	50	35	20
Odolnost betonu vůči zmrazování a rozmrazování, při zkoušce podle ČSN 73 1326 – metoda/počet cyklů/odpad [g/m ²]	---	---	---	---	---	---	---	---	---	A/100/ 1250 C/75/ 1250	---	A/100/ 1000 C/75/ 1000	---	---	---
Stupeň mrazuvzdornosti (ČSN 73 1322)	---	---	---	---	---	---	---	---	T100	---	T150	---	---	---	---
Počet cyklů při PZ/KZ (ČSN 73 1322)									100/75		125/100				

Tabulka 3.1: Mezní hodnoty pro složení a vlastnosti betonu platné v ČR pro dopravní a jiné významné stavby (předpokládaná životnost 100 let).

XA - Chemické působení

Pokud je beton vystaven chemickému působení rostlé zeminy a podzemní vody, musí být vliv prostředí odstupňován, jak je uvedeno dále. Klasifikace mořské vody závisí na geografické poloze a předpisech platných v místě použití betonu.

- XA1 - Slabě agresivní chemické prostředí
- XA2 - Středně agresivní chemické prostředí
- XA3 - Vysoce agresivní chemické prostředí

XM - Koroze vlivem mechanického působení (obrus)

Pokud je beton vystaven pohyblivému mechanickému zatížení musí být vliv prostředí odstupňován následovně:

- XM1 - Mírné nebo střední namáhání obrusem
- XM2 - Silné namáhání obrusem
- XM3 - Velmi silné namáhání obrusem

3.2 Požadavky na kamenivo do betonu

3.2.1 Zrnitost kameniva

Zrnitost kameniva vyjadřuje skladbu různě velikých zrn o různém tvaru. Cílem je dosažení nejvhodnější skladby s minimálním objemem dutin - mezer. Velikost zrn a jejich podílové zastoupení se stanovuje síťovým rozbořem. Síťovým rozbořem se rozumí prosévání kameniva sadou normalizovaných sítí. Množina zrn zachycená na síti se nazývá frakcí. Normová, základní sada sítí se čtvercovými otvory je následující:

0,063 – 0,125 – 0,25 – 0,5 – 1 – 2 – 4 – 8 – 16 – 32 – 63 – 125 [mm]

Zrnitost se vyjadřuje pomocí čáry zrnitosti. Pro výběr plynulé čáry zrnitosti jsou uváděny tzv. ideální čáry zrnitosti, pomocí kterých jsme schopni určit podíly kameniva na sítích tak, aby výsledná mezerovitost kameniva byla co nejmenší. Tyto parametry určují nejnižší dávky cementu, dobrou zpracovatelnost a vysokou pevnost betonu. Je uváděno několik "ideálních křivek" zrnitosti, které vychází ze skladby koulí a jsou upraveny empirickými koeficienty. Výpočet čáry zrnitosti vyžaduje znalost maximálního zrna kameniva (D_{max}). Buď jsou zastoupena všechna zrna od d_{min} až po D_{max} – plynulá zrnitost kameniva nebo mohou být zastoupeny pouze jemná a hrubá frakce kameniva bez střední složky - přetržitá zrnitost kameniva.

Zrnitost se vyjadřuje **čarou zrnitosti**, která má tyto tvary:

$$y = \left(\frac{d}{D_{max}} \right)^n \cdot 100 \quad [\%] \quad 3.2$$

y - propad sítím o velikosti otvoru d [mm]

n - exponent (dle Fullera n = 0,5; dle Hummela pro těžené kamenivo n = 0,4 a pro drcené n = 0,3).

Čára zrnitosti EMPA I

$$y = 50 \cdot \left(\frac{d}{D_{max}} + \sqrt{\frac{d}{D_{max}}} \right) \quad [\%] \quad 3.3$$

Čára zrnitosti EMPA II

$$y = 20 \left(\frac{d}{D_{max}} + 4 \sqrt{\frac{d}{D_{max}}} \right) \quad [\%] \quad 3.4$$

3.2.2 Moduly kameniva

Křivky zrnitosti popisujeme pomocí modulů, které vyjadřují jemnost kameniva. Směs kameniva se stejným modulem vytváří předpoklady pro dosažení stejné pevnosti betonu, ale především takové kamenivo potřebuje stejné množství vody na ovlhčení svého povrchu. Tyto moduly rovněž slouží k výpočtu poměrů mísení dvou i více kameniv rozdílné zrnitosti. Pro stanovení modulu zrnitosti je nutné provést síťový rozbor na normové sadě sítí.

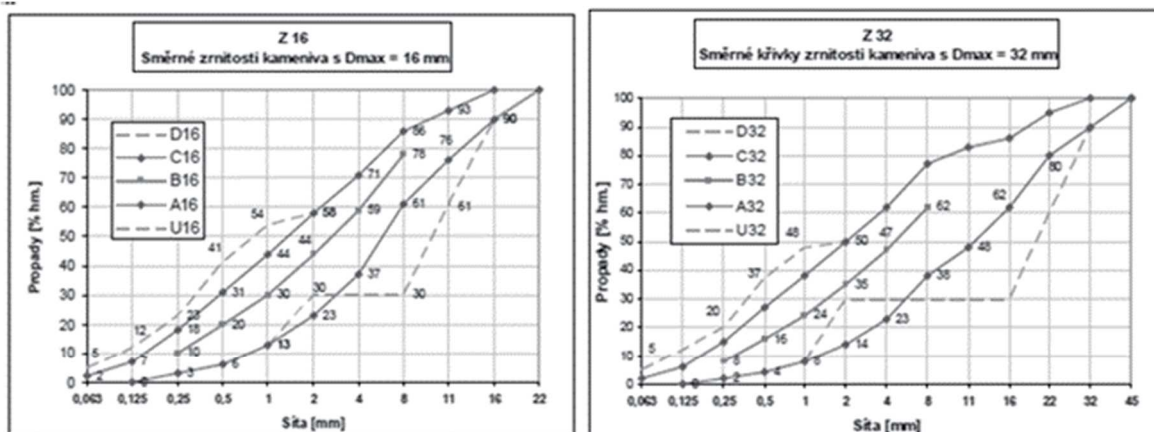
k modul - číslo zrnitosti (Abrams) - k číslo zrnitosti je součet procentních zůstatků směsi kameniva stanovených na základní sadě sítí dělený 100.

$$k = \frac{\sum (100 - y_i)}{100} \quad [-] \quad 3.5$$

y_i = propad sítím o velikosti i [% hm.], zůstatek na sítě v % je = $100 - y_i$

3.2.3 Pásma zrnitosti

Dodržování ideálních křivek zrnitosti kameniva v praxi však není reálné. Normou jsou proto stanoveny hodnoty podsítné (propad pod nejmenším sítím frakce) a nadsítné (zůstatek na největším sítím frakce). Tyto hodnoty jsou stanoveny pomocí takzvaných pásem zrnitosti. Příklady jednotlivých pásem zrnitosti jsou uvedeny na následujícím obrázku.



Směrné křivky jsou označeny písmeny Ai, Bi, Ci, Di a Ui, kde index i je hodnota [mm] maximální jmenovité horní meze zrnitosti kameniva (D_{max}). Uvedené křivky vymezují následující oblasti:

- Ai až Bi: nejvhodnější oblast pro velkou část betonů; u čerpatelných, vodonepropustných a pohledových betonů je vhodná zrnitost v blízkosti křivky Bi;
- Bi až Ci: vyhovující zrnitost;
- Di: při použití účinných plastifikačních přísad a/nebo při malém obsahu cementu a příměsí lze mezní křivku Ci nahradit mezní křivkou Di;
- Ui: v případě použití přetříté zrnitosti se křivka Ai nahrazuje mezní křivkou Ui.

Obrázek 3.1: Příklady pásem zrnitosti kameniva.

3.3 Návrh složení betonu

Vlastnosti složek a jejich podíly v betonu rozhodují o jeho vlastnostech. Požadované vlastnosti vyplývají z druhu pozemní nebo inženýrské stavby (vliv stupně vlivu prostředí a namáhání), z typu konstrukce (charakterizuje uspořádání konstrukčních prvků), ze stavebního postupu (jak bude konstrukce prováděna) a ze způsobu vyztužení. Ekonomickým kritériem kvality složení betonu je **minimální spotřeba cementu**, který je nejdražší a energeticky nejnáročnější složkou betonu.

3.3.1 Definice požadavků na beton

- Technologické požadavky
- Stupeň vlivu prostředí
- Třída pevnosti betonu
- Zvláštní požadavky

Uvedené údaje jsou nezbytná vstupní data návrhu složení betonu a představují první fázi. V druhé fázi návrhu složení se provádí volba složek betonu. Cílem je kvalitní beton odpovídající požadavkům nejen projektanta stavby, ale příslušným technickým normám (ČSN EN 206+A2, ČSN P 73 2404).

3.3.2 Volba složek betonu

- Kamenivo
- Cement
- Přísady
- Příměsi
- Rozptýlená výztuž

3.3.3 Návrh složení betonu

- Pevnostní třída
- Vodní součinitel w
- Množství cementu
- Množství vody
- Množství kameniva
- Množství příměsí a přísad
- Stanovení celkového složení na 1 m³ betonu

3.3.4 Experimentální ověření návrhu

- Výpočet dávky na zkušební záměs
- Stanovení konzistence ČB
- Zhotovení zkušebních těles
- Ověření vlastností ztvrdlého betonu po 28-ti dnech normového zrání
- Případná úprava složení betonu na požadované vlastnosti
- Určení definitivního složení betonu

3.3.5 Rovnice absolutních objemů

Základním vztahem pro výpočet složení betonu je **rovnice absolutních objemů**. Rovnice má následující znění:

$$\frac{m_C}{\rho_C} + \frac{m_V}{\rho_V} + \frac{m_K}{\rho_K} + \frac{m_P}{\rho_P} = 1 - \frac{V_Z}{100} \quad 3.6$$

V rovnici lze substituovat $m_V = w \cdot m_C$ 3.7

Pro technické předběžné výpočty používáme objemové hmotnosti složek ρ_i : cementu, $\rho_C = 3100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, vody $\rho_V = 1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a kameniva $\rho_K = 2650 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Hmotnosti složek betonu jsou označeny písmenem **m** s indexy: **C** - cement, **V** - voda, **K** - kamenivo, **P** - příměsi v $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ betonu.

Protokol NÁVRH SLOŽENÍ BETONU	B1
Vyučující:	

ZADÁNÍ ÚLOHY A POŽADAVKY NA SLOŽENÍ BETONU

Navrhnete složení betonu dle požadavků normy **ČSN EN 206+A2**, **ČSN P 73 2404** a dle souvisejících předpisů.

Pevnostní třída betonu a stupeň vlivu prostředí: C

Požadavky vyplývající z normy ČSN P 73 2404, tabulka F.1.2:

Minimální pevnostní třída: C

Minimální množství cementu: $m_c = \dots\dots\dots$ kg

Maximální vodní součinitel: $w = \dots\dots\dots$

Maximální hloubka průsaku tlakovou vodou: max. mm

Odolnost proti zmrazování a rozmrazování: max. g/m²

Ostatní požadavky a parametry:

Požadovaná konzistence: Stupeň sednutí kužele S3 dle ČSN EN 12350-2

Předpokládaná míra provzdušnění v čerstvém betonu: 2%

Modul kameniva k : 3,98

Požadovaná výsledná křivka kameniva dle Fullera

Použitý cement: CEM

Použitá kamenivo: DTK 0-4 mm

HDK 4-8 mm

HDK 8-16 mm

Plastifikační přísada:

Voda: pitná, pitná z vodovodního řadu

VÝPOČET SMĚSI KAMENIVA

Spočtete zůstatky na sítích ze síťového rozboru kameniva uvedeného v tabulce číslo 3.2
 Výsledky dosadíte do tabulky číslo 3.3.

Tabulka 3.2: Sítový rozbor kameniva - dílčí zbytky na sítích v %.

Kontrolní síta [mm]	Zbytky na sítě [%]		
	DTK 0-4 mm [%]	HDK 4-8 mm [%]	HDK 8-16 mm [%]
16	0,0	0,0	0,0
8	0,0	7,5	85,3
4	5,3	62,9	9,0
2	18,2	22,2	3,7
1	14,2	4,4	0,0
0,5	29,4	1,5	0,0
0,25	23,5	0,5	0,0
0,125	8,6	0,4	0,5
0,063	0,6	0,4	0,5
0	0,2	0,2	1,0
Kontrola / Suma	100,0	100,0	100,0

Výsledná křivka kameniva navržena dle FULLERa

$$y = \left(\frac{d}{D_{\max}} \right)^{0,5} \cdot 100 \quad [\%]$$

Parametry výsledné směsi kameniva:

DTK 0-4 mm %

HDK 4-8 mm %

HDK 8-16 mm %

VÝPOČET MNOŽSTVÍ VODY

Množství vody odvoďte z tabulky směrných hodnot průměrného množství vody v závislosti na čáře zrnitosti a konzistenci.

Modul zrnitosti kameniva $k =$

Navržené množství vody $m_v =$ kg

VÝPOČET MNOŽSTVÍ CEMENTU

Množství cementu vypočtete ze stanoveného maximálního vodního součinitele uvedeného v ČSN EN 206+A2, ze vzorce pro stanovení vodního součinitele w a z navrženého množství záměsové vody.

Vodní součinitel $w = m_v / m_c$

$m_c =$

.....

$m_c =$ kg

VÝPOČET MNOŽSTVÍ KAMENIVA

Rovnice absolutních objemů:

.....

$m_k =$

$m_k =$ kg

Dělení vypočteného množství kameniva dle Fullera

DTK 0-4 mm % = kg

HDK 4-8 mm % = kg

HDK 8-16 mm % = kg

SLOŽENÍ BETONU

Beton **C**

Množství kameniva m_k : DTK 0-4 mm kg

HDK 4-8 mm kg

HDK 8-16 mm kg

Množství cementu m_c : kg

Množství přísady $m_{přísady}$: kg

Množství vody m_v : kg

Návrhová objemová hmotnost čerstvého betonu: $D =$ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$

Závěr:

.....
.....
.....

Zkoušky provedl/a a protokol zpracoval/a:

4 ZKOUŠENÍ A ANALÝZA MIKROSTRUKTURY

4.1 Mikrostruktura stavebních hmot

4.1.1 Úvod

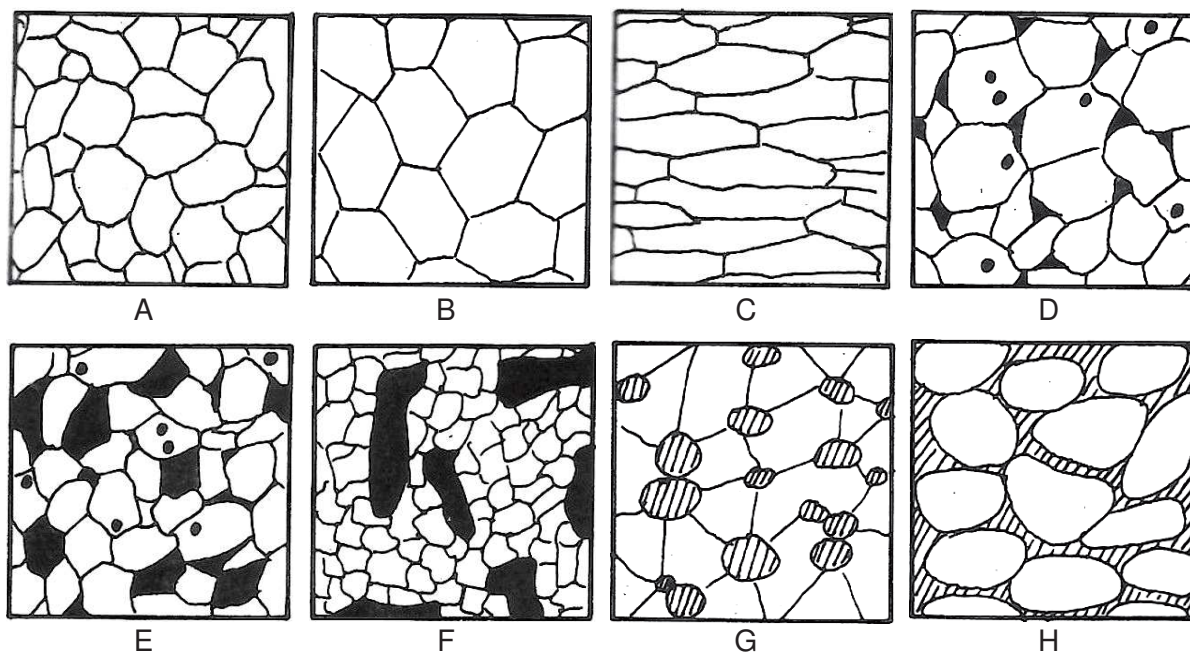
Vlastnosti pevných látek, tak jak se jeví při makroskopickém zkoumání, jsou obrazem vnitřní struktury materiálu. Vnitřní strukturu lze popsat jako prostorové uspořádání stavebních kamenů, ze kterých je látka tvořena a povahy sil, které mezi nimi působí.

Stavební látky jsou převážně heterogenní, obvykle polykrystalické povahy, takže jejich vlastnosti a makroskopicky pozorovatelné projevy a chování souvisí s jejich vnitřním uspořádáním, tedy mikrostrukturou.

Tuto mikrostrukturu je zapotřebí poznat a prozkoumat a poznat tak faktory, které ve svém důsledku ovlivňují jejich chování.

4.1.2 Základní definice

Mikrostruktura je skladebné uspořádání heterogenních látek ze zrn stejného nebo různého složení za nebo bez přítomnosti pórů. Toto uspořádání je charakterizováno velikostí, tvarem, množstvím, orientací a vzájemným rozložením zrn a pórů.



Obrázek 4.1: Příklady idealizovaných mikrostruktur:

A – polykrystalická mikrostruktura o různě velkých zrnech;

B – polykrystalická mikrostruktura se stejně velkými zrny;

C – polykrystalická mikrostruktura s orientovanými zrny;

D – mikrostruktura s malými póry;

E – mikrostruktura s póry velikosti zrna;

F – mikrostruktura s póry většími než je velikost zrna;

G – mikrostruktura o dvou fázích, krystalická a skelné (čárkovaná);

H – mikrostruktura o dvou fázích, krystalická a skelné, ale krystalická fáze není přímo provázána.

4.2 Metody pro zkoušení a analýzu mikrostruktury

4.2.1 Rentgenová difrakční analýza (XRD)

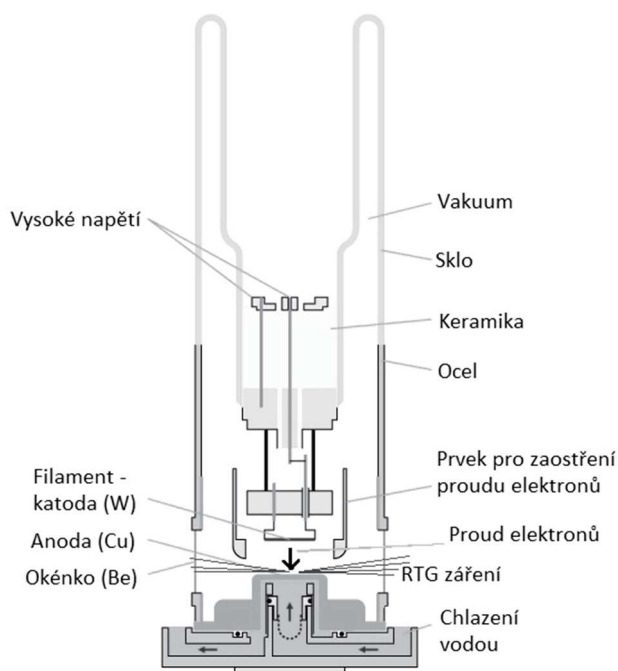
Metoda rentgenové difrakční analýzy se používá ke stanovení mineralogického (fázového) složení látek, a to kvalitativně a v omezené míře i kvantitativně. Vychází z principu krystalografického uspořádání látek a interakce rentgenového záření s částicemi, které tvoří krystalickou mřížku látek.

Rentgenové záření

Rentgenové záření (RTG) představuje část elektromagnetického spektra. Vzniká při prudkém zbrzdění rychlého toku elektronů na hmotné překážce. Nejběžnějším zdrojem RTG záření jsou rentgenové lampy. Rentgenová lampa je skleněná trubice se zatavenými elektrodami, mezi kterými je vysoké napětí. Z katody jsou emitovány elektrony, které jsou urychlovány vysokým napětím (30 – 60 kV) a dopadají na anodu z různých kovů (Cu, Co, Ag) a přitom produkují dva typy záření:

- **spojité záření** - vzniká zbrzděním dopadajících elektronů v elektrickém poli jader neboli ionizací atomů
- **charakteristické záření** - vzniká vyražením elektronu z některé z vnitřních energetických hladin elektronového obalu atomu na hladinu vyšší a jeho následným přechodem zpět na uvolněnou hladinu.

Metoda XRD využívá charakteristické záření.



Obrázek 4.2: Schéma RTG lampy.



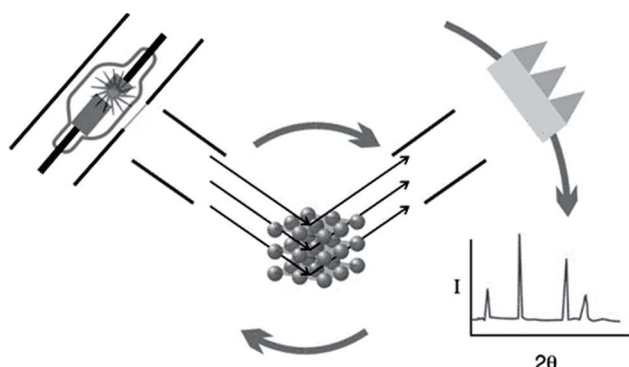
Obrázek 4.3: RTG lampa (www.panalytical.com).

Difrakce RTG záření na krystalech

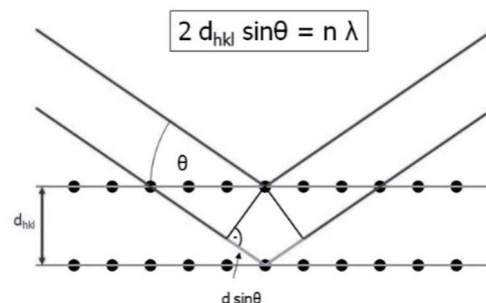
Při dopadu RTG záření na krystalickou látku dochází k rozptylu záření na jednotlivých atomech, které tvoří krystalickou mřížku. Atomy se sami stávají zdrojem RTG záření se stejnou vlnovou délkou. Paprsky, které takto vznikají navzájem interferují a produkují difraktované záření, které má odlišný směr než paprsky dopadající. Difrakci je pak možné chápat jako odraz RTG záření na rovinách krystalové mřížky.

Na trojrozměrné periodické struktuře může k difrakci RTG záření dojít při splnění geometrické podmínky mezi svazkem dopadajícího RTG záření a orientací struktury krystalu. Splnění této podmínky jde vyjádřit například Braggovou rovnicí. Pomocí Braggovy rovnice lze vypočítat

takzvanou mezimřížkovou vzdálenost d_{hkl} , jde o kolmou vzdálenost dvou rovin v krystalech. Každý minerál lze pak pomocí kombinace těchto rovin poměrně přesně určit. Metoda je vhodná pro studium procesů, které probíhají v materiálech, a to jak procesů spojených s tuhnutím a tvrdnutím tak procesů spojených s degradací materiálu.



Obrázek 4.4: Princip RTG difrakce (www.chempoint.cz).



Obrázek 4.5: Braggův zákon.

4.2.2 Rentgenová výpočetní tomografie (CT)

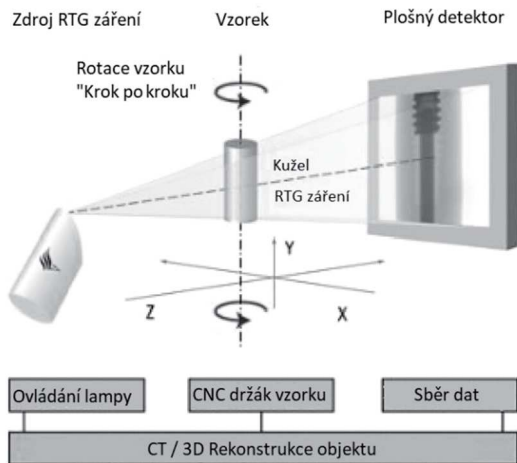
Vysoké nároky na současné metody nedestruktivního testování (NDT – non-destructive testing) zahrnují mnohdy požadavky na provedení analýzy vnitřní struktury materiálů a ověření vlastností daného materiálu (pórovitost, obsah materiálu ve vzorku, defekty atd.). Rentgenová výpočetní tomografie (Computed Tomography, CT, někdy také nesprávně počítačová tomografie) je progresivní metodou, která se dnes využívá právě k těmto účelům.

Výpočetní tomografie je zobrazovací metoda, která umožňuje za použití rentgenového záření zobrazit objekt v sérii řezů. Výsledný obraz vzniká matematickou rekonstrukcí z řady (až několik stovek) rentgenových projekcí, které jsou postupně získány z různých úhlů. Zásadní pro odlišení jednotlivých fází je různá hustota fází.

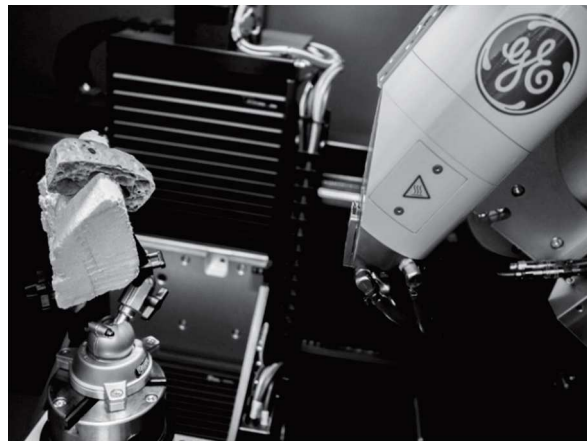
První oblastí, kde se výpočetní tomografie (CT – computed tomography) v první polovině 70. let minulého století uplatnila, bylo lékařství. Zde se osvědčila jako jedinečný diagnostický nástroj, a teprve o dvacet let později došlo s rozvojem technologií k rozšíření této metody i do oblasti průmyslu. Zde od té doby slouží zejména k inspekci průmyslových obrobků, k analýze dutin, vad materiálů. Základním rozdílem mezi lékařskými a průmyslovými tomografií je koncepce skenování. V lékařských CT je pacient (vzorek) pevně fixován a skeny z různých úhlů jsou pořizovány tak, že se X-ray trubice otáčí kolem pacienta, tento postup je jistě pro pacienta komfortní ovšem za cenu mírného snížení přesnosti. V průmyslových CT jsou trubice i detektor pevně fixovány a otáčí se vzorek.

Princip průmyslové CT

Trojrozměrný obraz vzniká numerickou rekonstrukcí (výpočtem) z rentgenových snímků, nasnímaných během otáčení objektu kolem jedné osy. Metoda CT využívá rovněž charakteristické RTG záření.

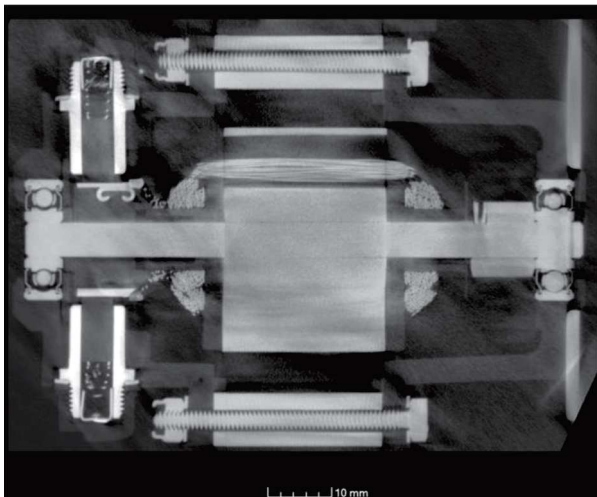


Obrázek 4.6: Princip CT.

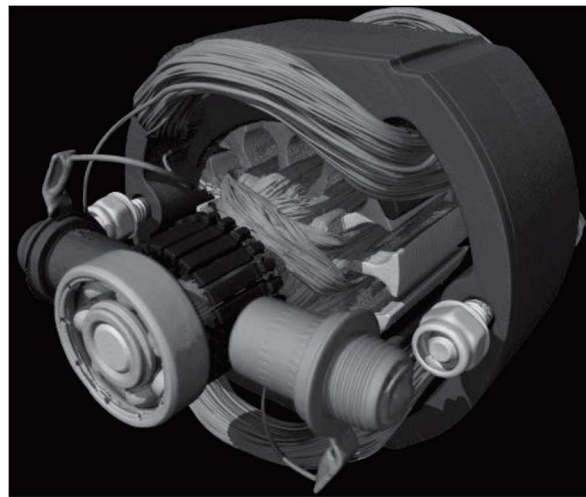


Obrázek 4.7: Rentgenová trubice a umístění vzorku v zařízení V TOMEX 300.

Obraz může být interpretován jako série řezů nebo trojrozměrný objekt. Stavební jednotkou obrazu je voxel, 3D ekvivalent 2D pixelu. Detekcí kontrastních hran následně získáme vektorová data pro vytvoření 3D modelu, kontrolu rozměrů a vzájemných poloh jednotlivých částí vzorku. Jednotlivé objemy můžeme zobrazovat samostatně, obarvovat je apod.



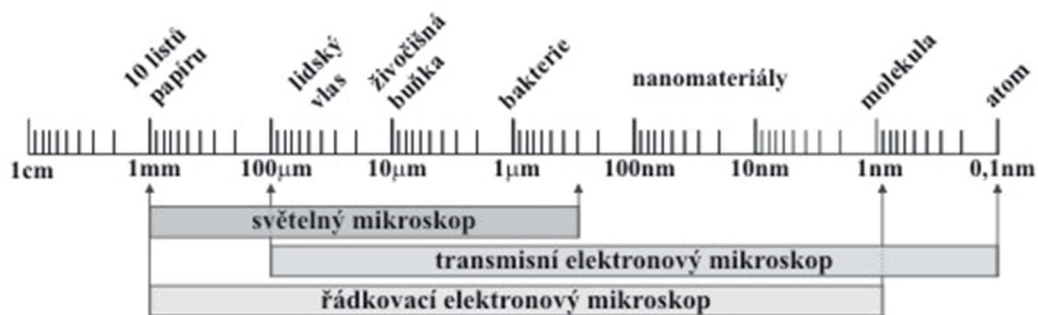
Obrázek 4.8: Příklad řezu alternátorem (CEITEC).



Obrázek 4.9: Příklad 3D rekonstrukce (CEITEC).

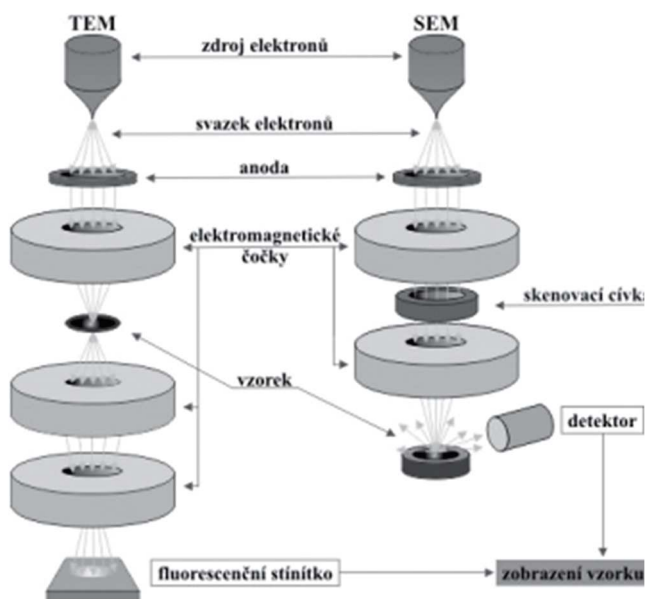
4.2.3 Elektronová mikroskopie (SEM)

Pro pochopení práce elektronového mikroskopu se nabízí srovnání s klasickým světelným mikroskopem. Elektronové mikroskopy jsou také optické přístroje, které však místo světelného svazku používají elektrickým polem urychlené elektrony a místo skleněných čoček jsou použity čočky elektromagnetické. Aby nebyla dráha letících elektronů ovlivněna interakcí s atmosférou, je uvnitř elektronového mikroskopu udržováno vakuum. Oproti světelnému má elektronový mikroskop celou řadu výhod, přičemž tou základní je jeho mnohem větší mezní rozlišovací schopnost, která je úměrná vlnové délce použitého záření. Elektronové záření s podstatně kratší vlnovou délkou (0,01-0,001nm), než má viditelné světlo (400-700nm), umožňuje dosáhnout mnohem většího rozlišení.

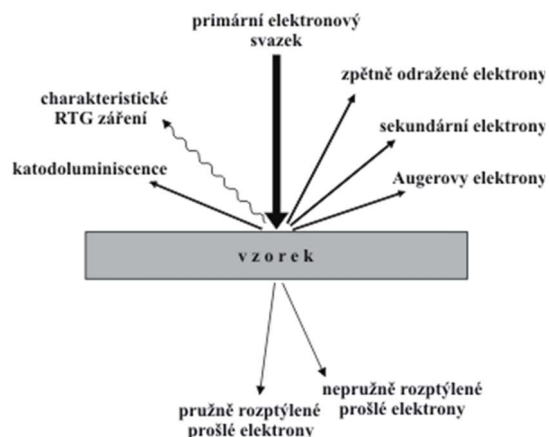


Obrázek 4.10: Porovnání možností světelného a dvou základních typů elektronového mikroskopu.

Elektronové mikroskopy dělíme na dva základní typy. Rastrovací, nebo též řádkovací elektronový mikroskop (scanning electron microscope, SEM) a transmisní elektronový mikroskop (transmission electron microscope, TEM). TEM mají výhodu ve větší rozlišovací schopnosti, a využívají se převážně pro studium vnitřní struktury vzorku a zobrazení jednotlivých atomů. Nevýhodou je složitější příprava vzorku, který musí být dostatečně tenký (několik desítek až stovek nanometrů) na to, aby jím svazek elektronů prošel skrz. Výhodou SEM je jeho větší variabilita. Umožňuje pozorovat složité povrchy a analyzovat jejich složení. Při dopadu elektronů na povrch vzorku dochází k vzájemné interakci a vzniká množství různých signálů, charakteristických pro každý materiál. K jejich zachycení může být mikroskop vybaven širokým spektrem specializovaných detektorů. Obraz je skládán postupně, bod po bodu, řádek po řádku. Každému bodu je při tom přiřazena hodnota ve stupních šedi, odpovídající intenzitě získaného signálu. Výsledkem je tedy černobílý obraz.



Obrázek 4.11: Princip TEM a SEM.

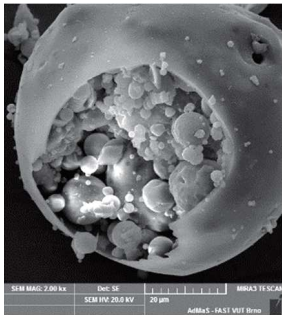


Obrázek 4.12: Schéma interakcí uvnitř SEM.

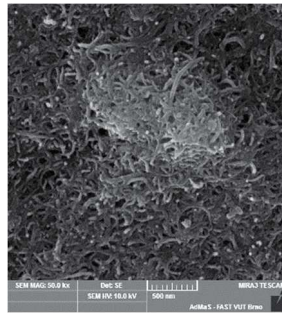
Detektory běžně používané v rastrovacích elektronových mikroskopech

- SE detektor – detektor sekundárních elektronů.
- BSE detektor – detektor zpětně odražených elektronů.
- TE detektor – detektor prošlých elektronů.
- EDS / WDS – detekce charakteristického RTG záření, používá se pro analýzu chemického složení vzorků. Metoda dokáže zjistit jaké prvky a v jakém množství se nacházejí ve vzorku.
- EBSD – difrakce zpětně odražených elektronů, používá se pro krystalografickou analýzu vzorků. Metoda dokáže přesně zjistit orientaci krystalové mřížky ve studovaném vzorku.

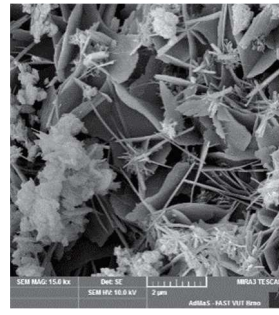
K zobrazení povrchu preparátu se v SEM využívají nejčastěji sekundární elektrony. Vzhledem k nízké energii sekundárních elektronů se z vyvýšenin na povrchu preparátu dostane do detektoru více elektronů a výsledkem je vyšší intenzita signálu z detektoru a tedy světlé místo na obrazovce, z prohlubenin je tomu naopak, tím je získán topografický kontrast, který umožňuje zobrazit v mnohonásobném zvětšení povrch vzorku. Produkce zpětně odražených elektronů, závisí na středním atomovém čísle vzorku. Jako světlé oblasti se budou na obrazovce jevit místa s vyšším středním atomovým číslem, tedy tvořená těžšími prvky, naopak, oblasti tvořené lehkými prvky se budou jevit jako tmavá.



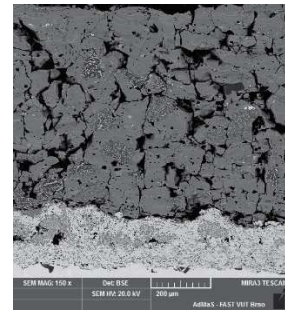
*Elektrárenský
Popílek*



C - Nanotrubičky



Krystaly tobermoritu



*Keramický povlak na
Al substrátu*

Obrázek 4.13: Příklady materiálů pozorovaných pomocí SEM.

Protokol ZKOUŠENÍ A ANALÝZA MIKROSTRUKTURY	A1
Vyučující:	

VÝPOČETNÍ TOMOGRAFIE (CT)

Jaký typ přístroje jsme používali ve cvičení?

Jaké nejvyšší urychlovací napětí na našem CT lze použít?

Určete vnitřní složení / obsah demonstračního vzorku pomocí CT:

Popis vzorku:

Uvnitř demonstračního vzorku se nachází: Můj odhad:

Skutečnost:

PRÁŠKOVÁ DIFRAKČNÍ ANALÝZA (XRD)

Jaký typ přístroje jsme používali ve cvičení?

Cílem experimentu je určit mineralogické složení neznámého vzorku.

Nastavení přístroje pro experiment (kV/mA)?

Makroskopický popis vzorku:

Výsledek mineralogické analýzy:

ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE (SEM)

Jaký typ přístroje jsme používali ve cvičení?

Jaké teoretické zvětšení lze na použitém SEM dosáhnout?

Cílem experimentu je demonstrovat možnosti SEM.

Makroskopický popis vzorků:

.....

.....

Lze na použitém SEM provést prvkovou analýzu?

5 ZKOUŠENÍ IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ

5.1 Úvod

Tepelně izolační materiály představují skupinu materiálů vyznačujících se velmi nízkou hodnotou součinitele tepelné vodivosti a zpravidla také velmi nízkou objemovou hmotností, která je většinou nižší než 200 kg/m^3 (s výjimkou speciálních izolantů, kde může být objemová hmotnost vyšší). Terminologie v oblasti tepelně izolačních materiálů a výrobků je uvedena v ČSN EN ISO 9229 (ČSN 72 7000) a jednotlivé zkušební metody jsou dále uvedeny v souvisejících normách třídy ČSN 72 70 xx (ve všech případech se jedná o harmonizované evropské normy). Zkoušení vlastností tepelně izolačních materiálů je v některých případech velmi odlišné od zkoušení konvenčních materiálů, jako je například beton nebo keramika. Příčinou je především velmi nízká objemová hmotnost izolačních materiálů, vysoká nasákavost a často velmi nízké mechanické vlastnosti, kdy u většiny izolantů při zatěžování nedojde k meznímu stavu únosnosti a k porušení zkušební vzorku.

U tepelně izolačních materiálů na bázi přírodních vláken jsou důležité z pohledu jejich využití ve stavebních konstrukcích především následující vlastnosti:

- **Součinitel tepelné vodivosti**, který je možné stanovit buď ve vysušeném stavu při střední teplotě $+10^\circ\text{C}$, jako $\lambda_{10, dry} [\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$ nebo za laboratorní vlhkosti při 23°C a 50% RH, kde se jedná o $\lambda_{23,50} [\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$, a nebo za laboratorních podmínek při teplotě $+23^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti 80%, kde se jedná o hodnotu $\lambda_{23,80} [\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$. Hodnota součinitele tepelné vodivosti se stanoví v souladu s ČSN EN 12667 (odpovídá jednotlivé zkušební metody jsou dle ISO 8301 nebo ISO 8302).
- V daném případě je možné hodnoty přepočítat dle ČSN EN ISO 10 456, za předpokladu, že jsou známé hodnoty rovnovážných sorpčních vlhkostí při výše uvedených laboratorních podmínkách, které se stanoví dle ČSN EN ISO 12571.
- **Tloušťka**, stanoví se dle ČSN EN 823. V případě tepelných izolantů určených do tlakově nezatížených konstrukcí se tloušťka stanovuje při normovém zatížení/dotlaku 50 Pa.
- **Objemová hmotnost**, stanoví se dle ČSN EN 1602. V případě tepelných izolantů určených do tlakově nezatížených konstrukcí se tloušťka stanovuje při normovém zatížení/dotlaku 50 Pa (viz. výše).
- **Nasákavost při (částečném) ponoření**, stanoví se dle:
 - ČSN EN ISO 29767 – stanovení krátkodobé nasákavosti při částečném ponoření. U zateplovacích systémů dle ETAG 004 je maximální povolená hodnota nasákavosti izolantu při částečném ponoření rovna $1,0 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ za 24 hodin.
 - ČSN EN 12087 - stanovení dlouhodobé nasákavosti při ponoření. U zateplovacích systémů je dle ČSN EN 13500 je požadována mezní hodnota $3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, dle ČSN EN 13499 (materiály na bázi EPS) potom hodnota $0,5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$.
- **Pevnost v tahu kolmo k rovině desky**, stanoví se dle ČSN EN 1607. Tato vlastnost je důležitá z pohledu mechanické stability soudržnosti zateplovacího systému. Jako klíčová se jeví především v případě většího zatížení vlastní tíhou například u fasádních izolací v rámci ETICS – např. při aplikaci obkladových prvků na povrch fasády. Minimální požadovaná hodnota je deklarována dle ČSN EN 13500 nebo ČSN EN 13499 (dle druhu izolantu a způsobu kotvení).
- **Napětí při 10% deformaci (pevnost v tlaku)**, stanoví se dle ČSN EN 826. Z pohledu využití izolantu v konstrukcích ETICS má tato vlastnost význam především z pohledu aplikace ETICS a jeho mechanické stability. I přes skutečnost, že se jedná většinou o méně sledovanou vlastnost (dle ETAG 004 je tato vlastnost považována za nepodstatnou), je nutné, aby napětí při 10% deformaci (případně pevnost v tlaku) dosahovalo jisté minimální hodnoty. Minimální požadovaná hodnota je deklarována dle ČSN EN 13500 nebo ČSN EN 13499 (dle druhu izolantu a způsobu kotvení).
- **Pevnost ve smyku a modul pružnosti ve smyku**, je požadováno dle ETAG 004 a stanoví se dle ČSN EN 12090 (požadované hodnoty udává ETAG 004).

- **Délka a šířka**, stanoví se dle ČSN EN 822. Z pohledu použití izolantu v ETICS je rozhodující odchylka od deklarovaných vlastností výrobcem, přičemž mezní tolerance délky a šířky udávají ČSN EN 13500 a ČSN EN 13499.
- **Rovinnost**, stanoví se dle ČSN EN 825, přičemž mezní tolerance rovinnosti udávají ČSN EN 13500 a ČSN EN 13499.
- **Pravouhlost**, stanoví se dle ČSN EN 824, přičemž mezní tolerance pravouhlosti udávají ČSN EN 13500 a ČSN EN 13499.
- **Faktor difúzního odporu**, stanoví se dle ČSN EN 12086. Jedná se o sledovaný parametr, na který nejsou kladeny z pohledu ČSN EN 13500, ČSN EN 13499 a ETAG 004 obecně žádné požadavky.
- **Dotvarování tlakem**, stanoví se dle ČSN EN 1606. Charakterizuje schopnost materiálu odolávat dlouhodobému účinku zatížení.
- **Rozměrová stabilita za určených teplotních a vlhkostních podmínek**, stanoví se dle ČSN EN 1604.

5.2 Stanovení pevnosti v tahu kolmo k rovině desky u tepelně izolačních výrobků používaných ve stavebnictví

Postup stanovení pevnosti v tahu kolmo k rovině desky u tepelně izolačních výrobků je definován v normě ČSN EN 1607. Tato norma definuje pevnost v tahu kolmo k povrchu σ_{mt} jako největší tahovou sílu zaznamenanou v průběhu tahového namáhání kolmo k povrchu výrobku, dělenou plochou průřezu zkušební vzorku. Zkušební zařízení :

- zkušební zařízení pro tahovou zkoušku – lis,
- tuhé desky nebo bloky pro samočinné vyrovnání,
- pryskyřičné lepidlo pro upevnění vzorku mezi tuhé desky či bloky,
- zkušební stroj pro vyvození tahové síly.

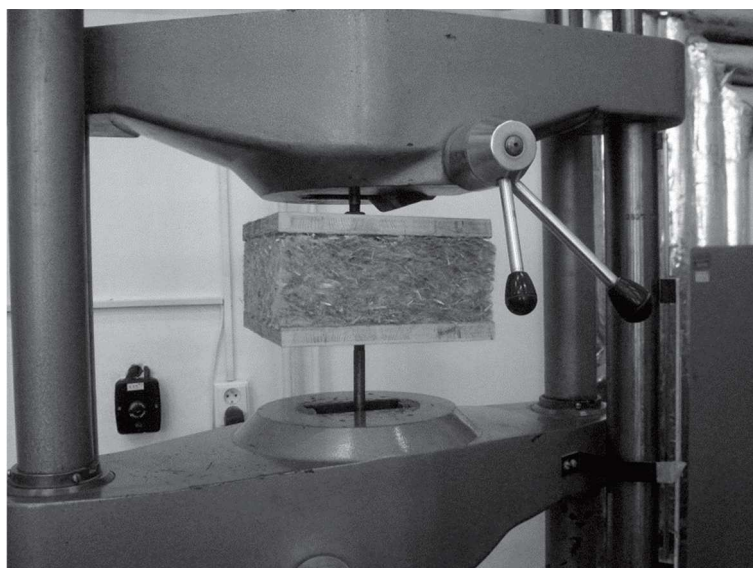
Zkušební vzorek je upevněn mezi dvě tuhé desky nebo bloky, které jsou upevněny do zkušebního zařízení pro zkoušku tahem a jsou taženy od sebe stanovenou rychlostí. Zaznamená se největší tahová síla a z ní se pak vypočte pevnost v tahu zkušební vzorku.

Zkušební vzorky jsou hranoly čtvercového průřezu, jejichž strana má normově doporučené rozměry:

- 50 x 50 mm nebo
- 100 x 100 mm nebo
- 150 x 150 mm nebo
- 200 x 200 mm nebo
- 300 x 300 mm.

Lineární rozměry se musí stanovit dle normy ČSN EN 12085 s přesností $\pm 0,5$ %. Pokud není stanoveno výrobkovou normou jinak, provede se zkouška na 5 zkušebních vzorcích při teplotě vzduchu 23 ± 5 °C.

Nejprve se stanoví průřezová plocha zkušební vzorku ještě před připevněním k dvěma tuhým deskám či blokům. Takto připravený zkušební vzorek se upevní do zkušebního zařízení pro zkoušku tahem upevněním desek či bloků. Během zkoušky se zvyšuje tahová síla se stálou rychlostí posuvu až do porušení, stanoví se maximální síla v kN a způsob porušení materiálu nebo povrchové vrstvy. Pokud došlo k porušení zcela nebo částečně v přilepení zkušební vzorku k tuhým deskám, blokům, tyto vzorky jsou vyloučeny.



Obrázek 5.1: Vzorek upevněný v lisu před zkouškou pevnosti v tahu kolmo k rovině desky.

Pevnost v tahu kolmo k povrchu, σ_{mt} v kPa se určí dle vztahu:

$$\sigma_{mt} = \frac{F_m}{A} = \frac{F_m}{l \cdot b} \quad 5.1$$

kde: F_m je největší tahová síla [kN],
 A průřezová plocha zkušební vzorku [m^2],
 l, b délka, šířka zkušební vzorku [m].

Výsledkem je střední hodnota jednotlivých měření zaokrouhlená na dvě platné číslice.

5.3 Zkouška tlakem u tepelně izolačních výrobků používaných ve stavebnictví

Zkoušku tlakem u tepelně izolačních výrobků používaných ve stavebnictví popisuje norma ČSN EN 826. Podstata zkoušky tkví v tom, že tlaková síla působí danou rychlostí kolmo na větší rovnoběžné povrchy kvádrového zkušební vzorku. Stanoví se maximální tlaková síla přenesená zkušebním vzorkem.

Pokud hodnota maximální síly odpovídá deformaci menší jak 10 %, je označována jako pevnost v tlaku a udává se příslušná deformace. Není-li zjištěno žádné porušení před dosažením 10 % deformace, vypočítá se napětí v tlaku při 10 % deformaci a jeho hodnota se uvede jako napětí v tlaku při 10 % deformaci. Zkušební zařízení:

- zatěžovací stroj,
- zařízení pro měření přetvoření a snímač k měření síly.
-

Zkušební vzorky musí mít tvar kvádrů s těmito rozměry, jejich výběr závisí na výrobkové normě:

- 50 x 50 mm nebo
- 100 x 100 mm nebo
- 150 x 150 mm nebo
- 200 x 200 mm nebo
- 300 x 300 mm.

Lineární rozměry se musí stanovit dle normy ČSN EN 12085 s přesností $\pm 0,5$ %, pokud nejsou výrobky rovinné, je nutné je zbrousit či opatřit vhodnou povrchovou úpravou. Pokud není stanoveno výrobkovou normou jinak, provede se zkouška na 5 zkušebních vzorcích při teplotě

vzduchu 23 ± 5 °C. Tlačené plochy zkušební vzorku se umístí centricky mezi rovnoběžnými deskami zatěžovacího stroje. Zkušební vzorek se zatíží počátečním tlakem 250 ± 10 Pa, pokud však nastane u vzorku při tomto počátečním tlaku výrazná deformace, může být použit počáteční tlak 50 Pa. Tloušťka d_0 by měla být stanovena při tomto počátečním tlaku.

Zkušební vzorek je stlačován pohyblivou deskou zatěžovacího stroje konstantní rychlostí 0,1 d za minutu s mezní odchylkou 25 %, kde d představuje tloušťku zkušební vzorku v milimetrech. Ve zkoušce se pokračuje až k dosažení meze tečení – tím se stanoví pevnost v tlaku, nebo až se docílí poměrné stlačení 10 % a tím může být určeno napětí v tlaku při 10% deformaci. Při této zkoušce se provádí záznam pracovního diagramu. Pevnost v tlaku, σ_m [kPa] se určí dle vztahu:

$$\sigma_m = \frac{10^3 \cdot F_m}{A_0} \quad 5.2$$

kde: F_m je největší síla [N],
 A_0 počáteční průřez zkušební vzorku [mm²].

Napětí při 10% deformaci, σ_{10} , v kPa se určí ze vztahu:

$$\sigma_{10} = \frac{10^3 \cdot F_{10}}{A_0} \quad 5.3$$

kde: F_{10} je síla odpovídající 10% poměrnému stlačení [N],
 A_0 počáteční průřez zkušební vzorku [mm²].

Výsledkem je aritmetický průměr z naměřených výsledků vyjádřený s přesností na tři platné číslice.

5.4 Stanovení krátkodobé nasákavosti při částečném ponoření

Při zkoušce stanovení krátkodobé nasákavosti při částečném ponoření u tepelně izolačních výrobků používaných ve stavebnictví se postupuje dle normy ČSN EN ISO 29767. Zkušební zařízení:

- váhy s přesností 0,1 g,
- velká plastová nádoba, kovová mřížka pro zajištění polohy vzorku, odkapávací zařízení.

Podstatou zkoušky je stanovit změnu hmotnosti zkušební vzorku umístěného po dobu 24 hodin spodní stranou ve vodě.

Přebytečná neabsorbovaná voda, která ulpěla na povrchu vzorku se odstraní dle metody:

- a) odkapáním,
- b) odečtením počátečního navlhčení.

Zkušební vzorky jsou hranoly s čtvercovým příčným řezem o straně 200 ± 1 mm, jejich počet je závislý na výrobkové normě. Pokud není určeno jinak, min. počet jsou 4 vzorky. Zkušební vzorky musí být kondicionovány při teplotě vzduchu 23 ± 2 °C a relativní vlhkosti vzduchu 50 ± 5 %. Další provedení zkoušky vyplývá z příslušné výrobkové normy. Další provedení zkoušky vyplývá z příslušné výrobkové normy, existují 2 metody zkoušení:

a) Metoda A – Odkapání přebytečné vody. Nejprve se určí zvážením počáteční hmotnost vzorku s přesností 0,1 g. Polovina zkušebních vzorků se umístí největší povrchovou plochou směrem nahoru, druhá polovina stejnou plochou směrem dolů. Zkušební vzorek se vloží do prázdné nádoby a zatíží se tak, aby po doplnění vodou zůstal částečně ponořen. Spodní

část vzorku by měla být po celou dobu zkoušky ponořena 10 ± 2 mm pod hladinou vody. Po 24 h se zkušební vzorek vyjme, umístí se vertikálně na síť se sklonem 45° a nechá se po dobu $10 \pm 0,5$ min okapat. Poté se vzorek zváží a stanoví se jeho hmotnost m_{24} .

b) Metoda B – Odpočet počátečního navlhčení. Nejprve se určí zvážením počáteční hmotnost vzorku s přesností 0,1 g. Polovina zkušebních vzorků se umístí největší povrchovou plochou směrem nahoru, druhá polovina stejnou plochou směrem dolů. Zkušební vzorek se vloží do prázdné nádoby a zatíží se tak, aby po doplnění vodou zůstal částečně ponořen. Spodní část vzorku by měla být po celou dobu zkoušky ponořena 10 ± 2 mm pod hladinou vody. Po 10 s se vzorek vyjme, ve vodorovné poloze se umístí na misku o známé hmotnosti a zváží se, stanoví se hmotnost vzorku s počátečním navlhčením m_1 . Poté se zkušební vzorek přemístí zpět do nádoby, zatíží se tak, aby po doplnění vodou zůstal částečně ponořen. Spodní část vzorku by měla být po celou dobu zkoušky ponořena 10 ± 2 mm pod hladinou vody. Po 24 h se zkušební vzorek vyjme, umístí se ve vodorovné poloze na misku o známé hmotnosti. Poté se vzorek zváží a stanoví se jeho hmotnost m_{24} .

Výsledkem zkoušky je střední hodnota z jednotlivých naměřených hodnot.

Krátkodobá nasákavost vody při částečném ponoření W_p [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$]

$$\text{metoda A: } W_p = \frac{m_{24} - m_0}{A_p} \quad 5.4$$

$$\text{metoda B: } W_p = \frac{m_{24} - m_1}{A_p} \quad 5.5$$

kde: m_0 je počáteční hmotnost zkušebního vzorku určená dle metody A [kg],
 m_1 hmotnost zkušebního vzorku včetně počátečního navlhčení vodou dle metody B [kg],
 m_{24} hmotnost zkušebního vzorku po částečném ponoření po dobu 24 h [kg],
 A_p plocha spodního povrchu zkušebního vzorku [m^2].

W_p se zaokrouhlí na nejbližší $0,01 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$.

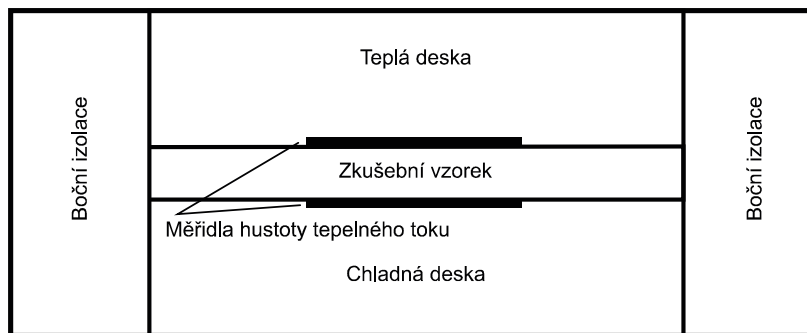
5.5 Stanovení součinitele tepelné vodivosti

Součinitel tepelné vodivosti se v souladu s ČSN EN 12667 stanoví v ustáleném stavu dle ISO 8301 nebo ISO 8302, čemuž odpovídá ekvivalentní česká technická norma ČSN 727012. Stanovení součinitele tepelné vodivosti se nejčastěji provádí při střední teplotě $+10^\circ\text{C}$ a teplotním spádu 10 K jako $\lambda_{10, dry}$ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] (pokud je vzorek vysušený).

Pro stanovení součinitele tepelné vodivosti se nejčastěji využívají metody desky, a to jednak metoda chráněné teplé desky (dle ISO 8302) nebo metoda měřidla tepelného toku (dle ISO 8301). V textu níže je popsána jednodušší a rozšířenější metoda měřidla tepelného toku.

Stacionární metoda měřidla tepelného toku (ČSN 72 7012-3; ISO 8301) je modifikací metody chráněné teplé desky. Metoda tedy předpokládá navození ustáleného teplotního stavu před počátkem měření. Ustálený teplotní stav je pro potřeby této normy definován obdobně jako definice ustáleného teplotního stavu pro metodu chráněné teplé desky. Rovněž délka a počet měřicích intervalů je definován shodně jako u metody chráněné teplé desky.

Měření součinitele tepelné vodivosti probíhá na zařízení schematicky znázorněném na obrázku níže.



Obrázek 5.2: Konstrukční schéma měřícího zařízení pro stanovení součinitele tepelné vodivosti dle ČSN 72 7012-3; ISO 8301.

Principem stanovení hodnoty součinitele tepelné vodivosti je na rozdíl do metody chráněné teplé desky sledování hustoty tepelného toku pomocí měřidel hustoty tepelného toku (série diferenčních termočlánků), které jsou umístěny v rovině rozhraní zkušební vzorku a měřících desek. Měřící desky jsou temperovány na konstantní teplotu a po dosažení ustáleného teplotního stavu se provádí odečet napětí na měřících hustoty tepelného toku, které je úměrné hodnotě součinitele tepelné vodivosti zkušební vzorku. Platí:

$$q_d = U \cdot k_m \quad 5.6$$

kde: U průměrná hodnota napětí na obou měřidlech hustoty tepelného toku [V],
 k_m kalibrační konstanta [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$].

Vzhledem k tomu, že se jedná o metodu sekundární, je nutné měřící aparaturu předem kalibrovat referenčním vzorkem a určit konstantu k_m pro přepočet naměřeného napětí na hodnotu hustoty tepelného toku q_d [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]. Z naměřených hodnot se vypočte hodnota součinitele tepelné vodivosti λ_{sam} [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] dle vztahu:

$$\lambda_{sam} = \frac{U \cdot k_m \cdot d_m}{\theta_{hd} - \theta_{cd}} \quad 5.7$$

kde: d_m průměrná hodnota tloušťky zkušební vzorku [m],
 θ_{hd} výpočtová hodnota povrchové teploty teplé strany zkušební vzorku [$^{\circ}\text{C}$],
 θ_{cd} výpočtová hodnota povrchové teploty chladné strany zkušební vzorku [$^{\circ}\text{C}$].

5.6 Stanovení rozměrové stability za určených teplotních a vlhkostních podmínek

Podstatou zkoušky je stanovit změny lineárních rozměrů zkušebních vzorků, které byly nejprve kondicionovány a poté vystaveny po stanovenou dobu specifikovanému prostředí a poté opět kondicionovány.

Zkušební vzorky musí být nejprve kondicionovány při teplotě vzduchu $23 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a relativní vlhkosti vzduchu $50 \pm 5 \%$ pro dosažení rovnovážného stavu.

U každého kondicionovaného vzorku se na 3 místech, dle ČSN EN 1604, určí počáteční délka l_{01} , l_{02} , l_{03} a počáteční šířka b_{01} , b_{02} , b_{03} , počáteční tloušťka se určí na 5 místech d_{01} , d_{02} , d_{03} , d_{04} , d_{05} . Pro určení lineárních rozměrů zkušebních vzorků se postupuje podle ČSN EN 12085, dále pak dle ČSN EN 822 Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví - Stanovení délky a šířky, ČSN EN 823 Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví - Stanovení tloušťky, s přesností 0,1 mm.

Soubor vzorků je pak vystaven po dobu 24 ± 1 h zkušebními podmínkami.

Možné zkušební podmínky definované normou:

a) Pro stanovenou teplotu bez určení relativní vlhkosti

- -40 ± 2 °C
- -30 ± 2 °C
- $+40 \pm 2$ °C
- $+60 \pm 2$ °C

b) Pro stanovenou teplotu a relativní vlhkost určenou v rozmezí 30 % až 90 % s přesností ± 5 % relativní vlhkosti

- $+20 \pm 2$ °C
- $+23 \pm 2$ °C
- $+60 \pm 2$ °C
- $+70 \pm 2$ °C

Lze však použít i jiné podmínky. Z důvodu časového omezení laboratorního cvičení budou vzorky podrobeny podmínkám, které určí vedoucí cvičení.

Po vystavení zkušebních vzorků ve specifikovaných podmínkách se vzorky vyjmou a vystaví po danou dobu teplotě 23 ± 2 °C a relativní vlhkosti vzduchu 50 ± 5 %.

Poté je u vzorků určena konečná délka l_{t1} , l_{t2} , l_{t3} , šířka b_{t1} , b_{t2} , b_{t3} a tloušťka d_{t1} , d_{t2} , d_{t3} , d_{t4} , d_{t5} na stejných místech počátečního měření vzorků. Vzorky se posoudí i vizuálně.

Pro tuto zkoušku budou sledovány 2 sady vzorků po 3 kusech. Každá sada bude mít odlišné zkušební podmínky. Vzhledem k časovému omezení budou studentům k dispozici již naměřené počáteční hodnoty měření l_0 , b_0 , d_0 . Zkušební vzorky z jednotlivých sad budou již 24 hodin před laboratorním cvičením umístěny do těchto zkušebních podmínek:

- teplota 50 ± 2 °C a relativní vlhkost vzduchu 80 ± 5 %,
- teplota 80 ± 2 °C.

Vzorky budou vyjmuty ze zkušebních podmínek a po dobu 30 minut vystaveny laboratorním podmínkám. Poté budou u zkušebních vzorků stanoveny konečné hodnoty l_t , b_t , d_t .

Změny rozměrů $\Delta \varepsilon_l$, $\Delta \varepsilon_b$, $\Delta \varepsilon_d$ [%]:

$$\Delta \varepsilon_l = \frac{l_t - l_0}{l_0} \quad 5.8$$

$$\Delta \varepsilon_b = \frac{b_t - b_0}{b_0} \quad 5.9$$

$$\Delta \varepsilon_d = \frac{d_t - d_0}{d_0} \quad 5.10$$

kde: l_0 , b_0 , d_0 jsou počáteční rozměry po kondicionování v mm,
 l_t , b_t , d_t konečné rozměry po vystavení v mm.

Z jednotlivých výsledků zkoušek se vypočítá střední hodnota každé rozměrové změny $\Delta \varepsilon_l$, $\Delta \varepsilon_b$, $\Delta \varepsilon_d$. Změny rozměrů $\Delta \varepsilon_l$, $\Delta \varepsilon_b$, $\Delta \varepsilon_d$ zaokrouhlujeme na 0,1 %.

Protokol STANOVENÍ VLASTNOSTÍ IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ	A2
Vyučující:	

ZADÁNÍ ÚLOHY A ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ IZOLANTU

Stanovte klíčové vlastnosti izolantů:

- Objemovou hmotnost ρ_v [kg/m³],
- Součinitel tepelné vodivosti λ_{sam} [W/(m.K)] ,
- Nasákavost při částečném ponoření W_p [kg/m²],
- Napětí při 10% deformaci σ_{10} , [kPa].

Popis a základní vlastnosti zkušebních vzorků:

Popis a označení materiálu (zkušebního vzorku):

Průměrná hodnota tloušťky zkušebního vzorku $d_m = \dots\dots\dots$ m,

Délka zkušebního vzorku: $l_1 = \dots\dots\dots$ m,

Šířka zkušebního vzorku: $l_2 = \dots\dots\dots$ m,

Hmotnost zkušebního vzorku/ počáteční hmotnost vzorku určená pro zkoušku nasákavosti při částečném ponoření dle metody A: $m / m_0 = \dots\dots\dots$ kg.

Objemová hmotnost materiálu: $\rho_v = \dots\dots\dots$ kg/m³.

Stanovení součinitele tepelné vodivosti v ustáleném stavu metodou desky dle ČSN 12667 (metoda měřidla tepelného toku dle ISO 8301):

Krátký popis provádění zkoušky:

.....

Průměrná hodnota tloušťky zkušebního vzorku: $d_m = \dots\dots\dots$ m,

Povrchová teplota teplé strany zkušebního vzorku: $\theta_{hd} = \dots\dots\dots$ °C,

Povrchová teplota chladné strany zkušebního vzorku: $\theta_{cd} = \dots\dots\dots$ °C,

Napětí na měřidlech hustoty tepelného toku: $U = \dots\dots\dots$ V,

Kalibrační konstanta: $k_m = \dots\dots\dots$ W/(V.m²),

Součinitel tepelné vodivosti: $\lambda_{sam} = \dots\dots\dots$ W/(m.K).

Stanovení nasákavosti při částečném ponoření dle ČSN EN ISO 29767:

Krátký popis provádění zkoušky:

.....

6 ČERSTVÝ BETON

Čerstvý beton je dle platných norem definován jako beton, který je zcela zamíchán a je v takovém stavu, který umožňuje jeho zhutnění zvoleným způsobem. Před uložením čerstvého betonu do konstrukce nebo formy se vždy provádí průkazní zkoušky, kterými se ověřují vlastnosti vyráběného betonu a posuzuje se shoda s požadavky specifikovanými pro daný beton. Mezi základní průkazní zkoušky čerstvého betonu patří stanovení konzistence, přičemž nejčastěji se provádí zkouška sednutím nebo rozlitím. Mezi další ověřované vlastnosti pak patří stanovení objemové hmotnosti a obsahu vzduchu v čerstvém betonu. Hodnoty zjištěné průkazními zkouškami se pak porovnávají se specifikací vyráběného betonu.

6.1 Výroba a zkoušení čerstvého betonu

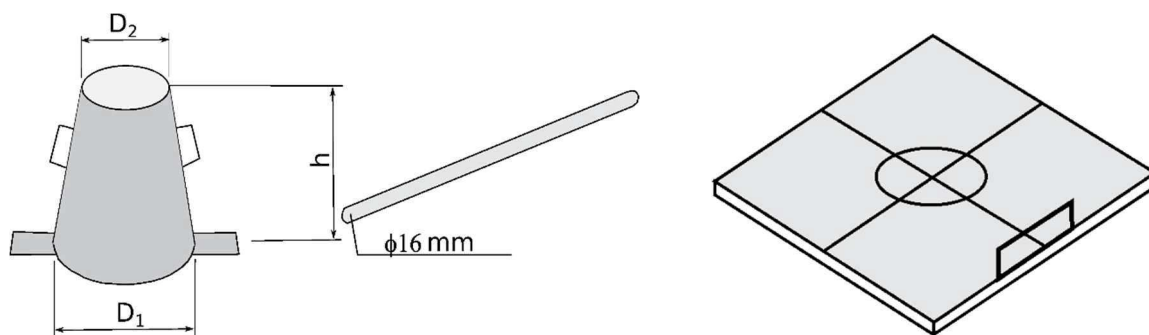
Zásady pro výrobu a zkoušení čerstvého betonu se řídí normami ČSN EN 12350-1 a ČSN EN 206+A2. Čerstvý beton se pro účely cvičení vyrobí z připravené směsi suchých složek betonu a přídavku vody dle doporučení výrobce, nebo dle požadované konzistence betonu. Pro přípravu čerstvého betonu se použije ruční míchadlo a nádoba s objemem minimálně 50 l. Vzhledem k postupu dávkování složek betonu se nádoba nepředvlhčuje. Do nádoby se nejdříve nasype směs suchých složek a za současného míchání se plynule přidává předepsaná dávka vody. Míchání složek betonu se provádí tak dlouho, dokud není beton rovnoměrně promíchán v celém svém objemu. Bezprostředně po umíchání čerstvého betonu se stanoví zpracovatelnost zkouškou sednutím a rozlitím a objemová hmotnost čerstvého betonu.

6.1.1 Zkouška sednutím

Zkouška sednutím dle normy ČSN EN 12350-2 patří mezi základní a nejběžnější způsoby kontroly zpracovatelnosti běžných typů čerstvého betonu s maximálním zrnem kameniva 40 mm. Podstata zkoušky spočívá ve zhutnění čerstvého betonu ve formě tvaru komolého kužele, přičemž konzistence betonu je dána změřenou vzdáleností, o kterou beton poklesl po zvednutí kužele směrem nahoru.

Zkušební zařízení a pomůcky

- Zednická lžíce, lopatka, vlhký hadřík.
- Dutý kužel dle ČSN EN 12350-1 s průměrem dolní a horní základny $D_1 = (200 \pm 2)$ mm a $D_2 = (100 \pm 2)$ mm, s výškou $h = (300 \pm 2)$ mm, opatřený držáky a nášlapnými příloškami.
- Propichovací tyč kruhového průřezu s průměrem cca 16 mm a délkou cca 600 mm s oblými konci.
- Pravítko odstupňované od 0 mm do 300 mm s dělením po 1 mm.
- Tuhá podkladní deska s nenasákavým rovným povrchem.
- Násypka.



Obrázek 6.1: Kužel, propichovací tyč a podkladní deska pro zkoušku sednutím.

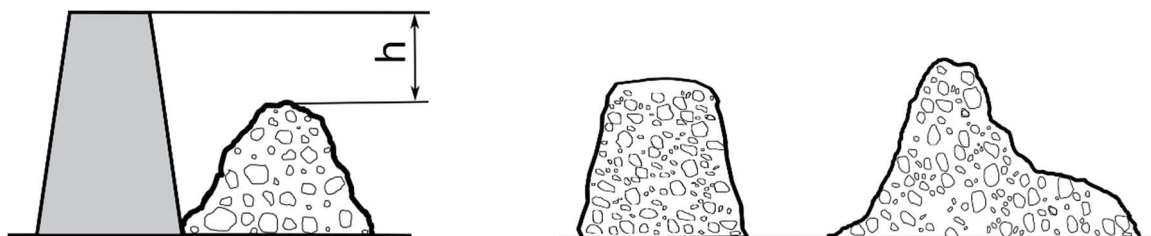
Zkušební postup

Kužel, násypka, podkladní deska a hutnicí tyč se bezprostředně před prováděním zkoušky navlhčí. Kužel opatřený násypkou se postaví na vodorovnou podkladní desku a pevně se přišlápne k podkladní desce. Kužel **se plní ve třech vrstvách** (každá přibližně 1/3 výšky kužele), přičemž každá vrstva **se zhutňuje 25 vpichy** propichovací tyčí rovnoměrně rozloženými po průřezu každé vrstvy. První vrstva se zhutňuje přes celou svou výšku, aniž by tyč narážela na podkladní desku. Druhá a třetí vrstva se hutní přes celou svou výšku tak, aby vpichy mírně zasahovaly do předešlé vrstvy. Při plnění vrchní vrstvy se před zhutňováním přeplní beton nad horní okraj kužele. Po zhutnění vrchní vrstvy se sejme násypka, přebytečný beton se odstraní zednickou lžící a z podkladní desky se odstraní spadlý beton. Během následujících 5 sekund se kužel opatrně odstraní svislým plynulým pohybem nahoru. Celá zkouška od počátku plnění až po zvednutí formy musí probíhat plynule bez přerušování a nesmí trvat déle než 150 sekund.

Okamžitě po zvednutí formy se změří a zaznamená sednutí h s přesností na 10 mm, tj. rozdíl mezi výškou formy a nejvyšším bodem sednutého zkušební vzorku (viz Obr. 6.2 vlevo).

Výsledek zkoušky je platný pouze tehdy, pokud dojde k symetrickému poklesu betonu bez usmýknutí (viz Obr. 6.2 vpravo).

Na základě změřené hodnoty sednutí h se pak určí stupeň konzistence dle Tab. 6.1.



Obrázek 6.2: Stanovení hodnoty sednutí (vlevo); tvary sednutí – korektní a usmýknuté sednutí.

Tabulka 6.1: Klasifikace konzistence podle sednutí kužele.

Stupeň	Sednutí podle ČSN EN 12350-2 [mm]
S1	10 až 40
S2	50 až 90
S3	100 až 150
S4	160 až 210
S5	≥ 220

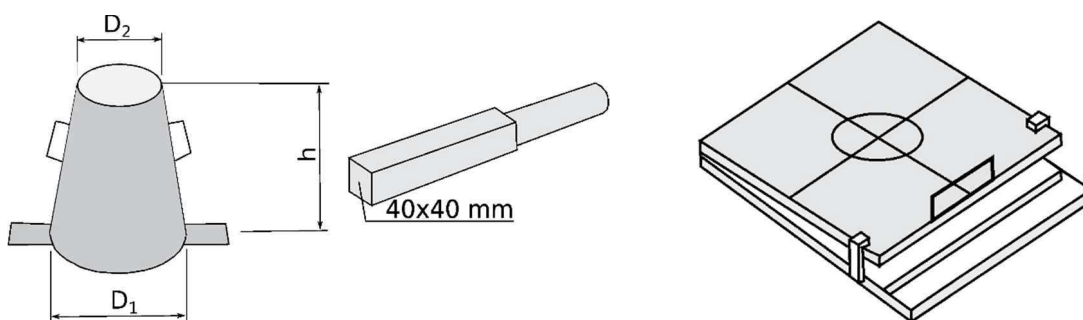
6.1.2 Zkouška rozlitím

Zkouška rozlitím dle normy ČSN EN 12350-5 se používá pro stanovení zpracovatelnosti čerpatelných betonů zejména tam, kde zkouška sednutím již není dostatečně citlivá. Podstata zkoušky spočívá v naplnění čerstvého betonu do formy tvaru komolého kužele, přičemž konzistence betonu je dána změřením průměru rozlitého betonu podrobeného střásání na rovné desce po odstranění kužele směrem nahoru.

Zkušební zařízení a pomůcky

- Zednická lžice, lopatka, vlhký hadřík.
- Dutý kužel dle ČSN EN 12350-2 s průměrem dolní a horní základny $D_1 = (200 \pm 2)$ mm a $D_2 = (130 \pm 2)$ mm, s výškou $h = (200 \pm 2)$ mm, opatřený držáky a nášlapnými příločkami.
- Dusadlo čtvercového průřezu s rozměry 40×40 mm a délkou cca 200 mm s rukojetí délky 120 – 150 mm.
- Střásací stolek, který se skládá z horní rovné pohyblivé desky o ploše (700 ± 2) mm \times (700 ± 2) mm, na kterou se ukládá beton, a která je odklápěcí od pevného podkladu, na který může dopadat z nastavené výšky. Uprostřed desky musí být vyznačen kříž a kružnice o průměru (210 ± 1) mm.

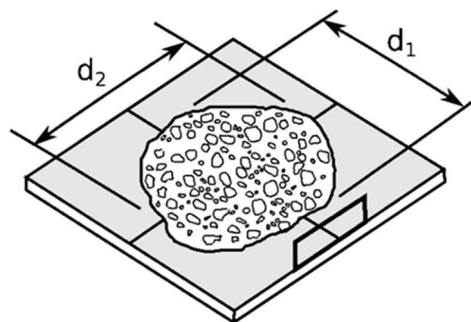
- Měřicí pásmo.
- Násypka.



Obrázek 6.3: Kužel, hutnicí tyč a podkladní deska pro zkoušku rozlitím.

Zkušební postup

Kužel, násypka, střešací stolek a dusadlo se bezprostředně před prováděním zkoušky navlhčí. Kužel opatřený násypkou se postaví na střešací stolek umístěný na rovném, vodorovném povrchu, který není ovlivňován vibrací a otřesy. Kužel se umístí na střed horní desky a pevně se přišlápne. Naplní se rovnoměrně betonem **ve dvou stejných vrstvách**, přičemž každá vrstva se **zarovná lehkým dusáním 10krát dusadlem**. Při plnění vrchní vrstvy se před dusáním přeplní beton nad horní okraj kužele. Po zarovnání vrchní vrstvy se sejme násypka, přebytečný beton se odstraní zednickou lžící a horní plocha desky se očistí od betonu. Po cca 10 až 30 sekundách od urovnání horního povrchu se kužel zvedne svisle nahoru. Poté se střešací stolek stabilizuje přišlápnutím v přední části, horní deska se plynule nadzvedne k horním zářkám a nechá se volně dopadnout na spodní podložku. Tento cyklus se opakuje **celkem 15krát s frekvencí 1krát za cca 1 sekundu**. Pravítkem se pak změří největší rozměr rozlitého betonu ve dvou navzájem kolmých směrech d_1 a d_2 vedených rovnoběžně s hranami stolku (viz Obr. 6.4). Dále se zkontroluje rozlití betonu s ohledem na segregaci – zpravidla se kolem rozlitého betonu vytvoří prstenec cementové kaše v šířce několika milimetrů. Pokud se segregace objeví, zaznamená se do protokolu.



Obrázek 6.4: Stanovení hodnoty rozlití.

Výpočet hodnoty rozlití f je dán vzcrcem:

$$f = \frac{d_1 + d_2}{2},$$

6.1

d_1 maximální rozměr rozlitého betonu, rovnoběžně s jednou stranou stolu v mm;

d_2 maximální rozměr rozlitého betonu, rovnoběžně s druhou stranou stolu v mm.

Výsledek se uvádí zaokrouhlený na nejbližších 10 mm. Na základě vypočtené hodnoty rozlití se pak určí stupeň konzistence dle Tab. 6.2.

Tabulka 6.2: Klasifikace konzistence podle rozlití.

Stupeň	Rozlití podle ČSN EN 12350-5 [mm]
F1	≤ 340
F2	350 až 410
F3	420 až 480
F4	490 až 550
F5	560 až 620
F6	≥ 630

6.1.2 Objemová hmotnost

Ověření hodnoty objemové hmotnosti čerstvého betonu dle normy ČSN EN 12350-6 je jedním z dalších kroků, které se provádějí v souvislosti s posouzením shody s požadavky specifikovanými pro daný beton. Metoda předepsaná normou nemusí být vhodná pro velmi tuhý (zavhlý) beton, který se nedá hutnit běžnou vibrací. Podstata zkoušky spočívá ve zhutnění čerstvého betonu v tuhé vodotěsné nádobě známého objemu a hmotnosti, ve které je následně zvážen.

Zkušební zařízení a pomůcky

- Zednická lžíce, lopatka, vlhký hadřík.
- Nádobá vodotěsná, dostatečně tuhá, z nenasákavého materiálu s hladkým povrchem, jejíž nejmenší rozměr je minimálně čtyřnásobek maximální nominální velikosti částic v betonu (zpravidla kameniva, případně vláken).
- Vybavení na zhutnění betonu shodné s vybavením pro hutnění zkušebních těles (zpravidla vibrační stůl nebo propichovací tyč, bez zhutňování u samozhutnitelných betonů).
- Váhy.
- Srovnávací pravítko.

Zkušební postup

Vzorek betonu se musí před prováděním zkoušky rovnoměrně promíchat. Nádobá pro měření se očistí a navlhčí hadříkem bezprostředně před prováděním zkoušky. Nejprve se vážením zjistí hmotnost nádoby m_1 a zaznamená se do protokolu. Nádobá se pak plní betonem v závislosti na konzistenci a metodě hutnění v tolika vrstvách, aby se dosáhlo úplného zhutnění. Ve cvičeních se nádobá bude **plnit ve dvou vrstvách**, přičemž každá vrstva se zhutní stejným způsobem jako budoucí zkušební tělesa. Při použití vibračního stolu musí být nádobá pevně přitlačena ke stolu. Hutnění nesmí být doprovázeno nadměrnou segregací a odlučováním vody. Po zhutnění horní vrstvy se zarovná povrch betonu do roviny s horním okrajem nádoby zednickou lžící, přebytečný beton se odstraní srovnávacím pravítkem a vnější povrch nádoby se očistí od zbytků betonu. Naplněná nádobá se zváží a zjistí se hmotnost m_2 . Objemová hmotnost D se vypočítá dle vzorce:

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad 6.2$$

D	objemová hmotnost čerstvého betonu v kg/m^3 ;
m_1	hmotnost prázdné nádoby v kg;
m_2	hmotnost naplněné nádoby se zhutněným betonem v kg;
V	objem nádoby v m^3 .

Objemová hmotnost čerstvého betonu se zaokrouhlí na nejbližších $10 \text{ kg}/\text{m}^3$.

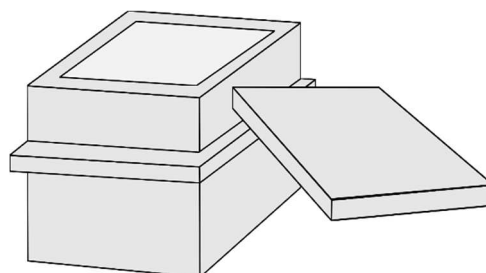
6.2 Výroba zkušebních těles

Zkušební tělesa se vyrábí za účelem kontroly kvality ztvrdlého betonu a shody se specifikací danou pro ztvrdlý beton. Výroba zkušebních těles musí být v souladu s požadavky norem ČSN EN 12350-1, ČSN EN 12390-1 a ČSN EN 12390-2, které určují postupy pro odběr vzorků čerstvého betonu, požadavky na tvar a rozměr zkušebních těles a forem a výrobu zkušebních těles. Mezi základní ověřované charakteristiky ztvrdlého betonu obsažené ve specifikaci betonu patří pevnost betonu v tlaku, kdy se posuzuje shoda s pevnostní třídou vyráběného betonu. U lehkých či těžkých betonů se také vyžaduje shoda s požadavky specifikovanými pro objemovou hmotnost ztvrdlého betonu. Mezi doplňující požadavky obsažené ve specifikaci betonu pak patří požadavky na hodnotu pevnosti v příčném tahu, odolnosti proti průsaku tlakovou vodou, ohrusu, modulu pružnosti, smršťování atp. Pro ilustraci budou v rámci cvičení vyrobená zkušební tělesa pro zkoušky pevnosti v tlaku a pro stanovení smrštění betonu vlivem vysychání.

6.2.1 Tělesa pro zkoušky pevnosti

Vzorek betonu se musí před výrobou zkušebních těles rovnoměrně promíchat. Pro stanovení pevnosti v tlaku se vyrobí celkem 3 zkušební tělesa ve tvaru krychle o hraně 150 mm. Pro výrobu se použijí polyuretanové formy doplněné víkem (viz Obr. 6.5) nebo polyethylenovou fólií. Před plněním se na vnitřní povrch forem nanese tenká vrstva separačního prostředku, aby se zabránilo přilnutí betonu k formě. Beton se do forem ukládá vždy ve dvou vrstvách, přičemž každá vrstva musí být řádně zhutněna tak, aby byl z betonu vypuzen přebytečný vzduch a zároveň aby nedocházelo k segregaci jednotlivých složek betonu a nadměrnému odlučování vody. Postup výroby zkušebních těles popisuje norma ČSN EN 12390-2.

K hutnění se použije vibrační stůl, povrch se urovná zednickou lžící. Po naplnění forem a zarovnání povrchu se formy přikryjí víkem nebo polyethylenovou fólií, aby nedocházelo k nadměrnému odpařování vody z povrchu betonu. Zkušební tělesa se odformují nejdříve po 16 hodinách zrání (zpravidla po 24 hodinách) a nejpozději ve stáří 3 dny. Po odformování se krychle uloží do vodní lázně s teplotou $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ nebo v místnosti s teplotou $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ a relativní vlhkostí $\geq 95\%$ až do doby plánovaného zkoušení.



Obrázek 6.5: Zkušební forma.

6.2.2 Tělesa a zařízení pro měření smrštění betonu

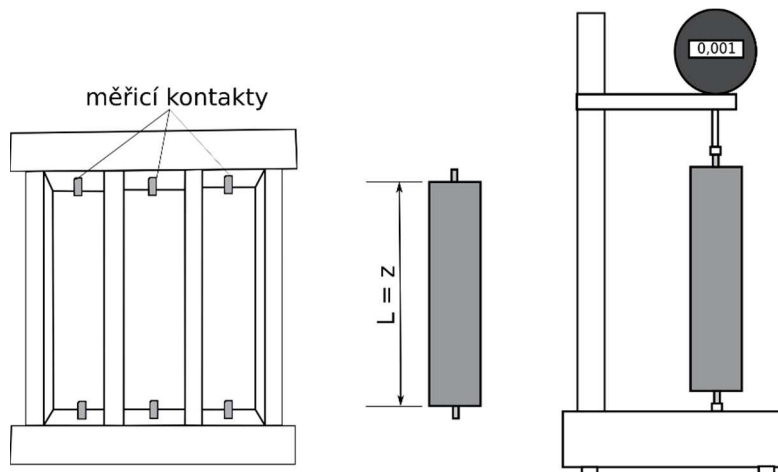
Smrštění betonu je objemová změna betonu, způsobená chemickými a fyzikálními procesy, doprovázející zrání betonu bez působení mechanického zatížení. Projevuje se změnou absolutního objemu pevné fáze a změnou vnějších rozměrů zkušebního tělesa či prvku konstrukce. V praxi rozlišujeme několik typů smrštění, které se liší podstatou jejich vzniku a jejich významnost se mění v závislosti na fázi zrání betonu. V současné době jsou v ČR v platnosti dvě normy pro stanovení smrštění betonu, a to norma ČSN 73 1320 z roku 1987 a norma ČSN EN 12390-16 z února roku 2020. Obě tyto normy se zabývají stanovením volného smrštění betonu především vlivem vysychání. Princip zkoušky spočívá ve stanovení poměrných délkových přetvoření hranolů, které se vynášejí do grafů v závislosti na čase. Současně se zakresluje průběh teplot a změn vlhkosti vnějšího prostředí. Jako doprovodná veličina je sledován také vývoj hmotnostních úbytků v čase způsobený vysycháním betonu. Zjištěné hodnoty pak slouží jako podklad ke stanovení skutečných hodnot objemových změn betonu pro účely navrhování a posuzování betonových konstrukcí. V rámci cvičení se pro stanovení vývoje smrštění betonu vlivem vysychání vyrobí celkem 3 zkušební tělesa ve tvaru hranolu s nominálními rozměry $40 \times 40 \times 160$ mm. Tyto rozměry splňují požadavky na minimální rozměr zkušebních těles s ohledem na velikost maximálního zrna kameniva použitého betonu. Zkušební tělesa se vyrobí do ocelových trojforem, odpovídajících požadavkům ČSN EN 196-1, které mají v protilehlých čelech připravené středové otvory pro upevnění měřicích kontaktů, určených pro zapuštění do zkušebních těles (viz Obr. 6.6 vlevo).

Zkušební zařízení a pomůcky

- Zednická lžice, lopatka, vlhký hadřík.
- Forma ocelová dle ČSN EN 196-1 s otvory pro měřicí kontakty.
- Měřicí kontakty určené k zabetonování do zkušebních těles.
- Přístroj k měření délky zkušebních těles s rozsahem měření nejméně ± 5 mm a s přesností měření $\pm 0,001$ mm, vybavený vhodnými nástavci pro osazení zkušebních těles.
- Kalibrační tyč (etalon) s měřicí základnou délky (160 ± 1) mm, vyrobená z invaru nebo materiálu s podobnou délkovou roztažností v celém rozsahu zkušebních teplot.
- Vibrační stůl, dusadlo, srovnávací pravítko.

Zkušební postup

Do protokolu se zaznamená datum a čas okamžiku smíchání suchých složek betonu s vodou. Vzorek betonu se musí před výrobou zkušebních těles rovnoměrně promíchat. Před plněním se vnitřní povrch forem nejdříve opatří tenkou vrstvou separačního prostředku a poté se do připravených otvorů vloží měřicí kontakty, tak aby se s nimi během plnění formy nepohnulo. Pro bezpečné zajištění polohy kontaktů je možné otvory zaplnit formovací hmotou, do níž se kontakty zatlačí a přebytečná hmota se pečlivě odstraní. Formy se plní ve dvou vrstvách, přičemž každá vrstva se opatrně zhutní na vibračním stole nebo pomocí dusadla, které se také použije pro zapracování betonu okolo přečnívajících částí kontaktů. Horní vrstva betonu se před zhutňováním mírně přeplní, přebytečný beton se odstraní zednickou lžící a povrch se zarovná srovnávacím pravitkem. Po uhlazení betonu se forma překryje polyetylenovou fólií, aby nedocházelo k nadměrnému odpařování vody z betonu.



Obrázek 6.6: Stanovení smrštění: forma pro výrobu, zkušební těleso, měřicí přístroj.

Tělesa se vyjmou z formy ve stáří (24 ± 1) hodin od smíchání suchých složek s vodou. Před provedením prvního měření se zkontroluje osazení měřicích kontaktů a kontakty se očistí od zbytků formovací hmoty. Tělesa s nevhodně osazenými kontakty se vyřadí ze zkušební sady. Tělesa se označí jednoznačným identifikátorem, opatří se ustavovací značkou v horním rohu tělesa, a zaznamenají se počáteční hodnoty hmotnosti m_0 a délky L zkušebních těles (pro účely cvičení se bude uvažovat nominální délka těles $L = 160$ mm). Odečet na měřicím přístroji (viz Obr. 6.6 vpravo) se nejprve zkontroluje pomocí kalibrační tyče $l_{e1}(t_0)$. Poté se provede počáteční odečet $l(t_0)$ pro každé zkušební těleso na měřicím přístroji (viz Obr. 6.6 vpravo). Po dokončení série měření se provede opakovaný odečet s kalibrační tyčí $l_{e2}(t_0)$. Obě měření provedená s kalibrační tyčí se pro každou sérii měření zprůměrují a slouží ke korekci délkových změn zaznamenaných na zkušebních tělesech příslušné série. Poloha zkušebních těles a kalibrační tyče v měřicím přístroji musí být po celé období měření stejná – **ustavovací značka bude vždy vpředu nahoře**. Analogicky se bude měření délek provádět ve stáří betonu 1 a 7 dní, a dále v intervalu 7 dní. Současně s měřením délky se bude zaznamenávat také hmotnost jednotlivých zkušebních těles pro vyhodnocení vývoje hmotnostních úbytků vlivem vysychání.

Zkušební tělesa budou po celé sledované období uložena na perforovaných roštích a vystavena volnému vysychání v laboratoři s nestálou teplotou a relativní vlhkostí okolního vzduchu, proto je u každého měření nutné zaznamenávat aktuální hodnotu teploty a relativní vlhkosti vzduchu.

Délkové změny zaznamenané na kalibrační tyči se vypočítají dle vztahu:

$$\Delta l_e(t_i) = \frac{l_{e1}(t_i) + l_{e2}(t_i) - l_{e1}(t_0) - l_{e2}(t_0)}{2} \quad 6.3$$

$\Delta l_e(t_i)$ průměrná délková změna kalibrační tyče v čase $t_i = 1, 7, 14, \dots$ dní v mm;

$l_{e1}(t_0)$ počáteční odečet v měřicím přístroji v čase t_0 před zahájením měření série v mm;

- $l_{e2}(t_0)$ počáteční odečet v měřicím přístroji v čase t_0 po dokončení měření série v mm;
 $l_{e1}(t_i)$ odečet v měřicím přístroji v čase $t_i = 1, 7, 17, \dots$ dní před zahájením měření série v mm;
 $l_{e2}(t_i)$ odečet v měřicím přístroji v čase $t_i = 1, 7, 17, \dots$ dní po dokončení měření série v mm.

Vývoj smrštění jednotlivých zkušebních těles se stanoví dle vztahu:

$$\varepsilon(t_i) = \frac{\Delta l(t_i)}{z} = \frac{l(t_i) - l(t_0) - \Delta l_e(t_i)}{z} \quad 6.4$$

- $\varepsilon(t_i)$ smrštění zkušebního tělesa v čase $t_i = 1, 7, 14, \dots$ dní v mm/m;
 $\Delta l(t_i)$ délková změna zkušebního tělesa v čase $t_i = 1, 7, 14, \dots$ dní v mm;
 $l(t_0)$ počáteční odečet v měřicím přístroji v čase t_0 v mm;
 $l(t_i)$ odečet v měřicím přístroji v čase $t_i = 1, 7, 14, \dots$ dní v mm;
 $\Delta l_e(t_i)$ průměrná délková změna kalibrační tyče v čase $t_i = 1, 7, 14, \dots$ dní v mm;
 z délka měřicí základny – v tomto případě se rovná délce zkušebního tělesa L v m.

Vývoj hmotnostních úbytků jednotlivých zkušebních těles se stanoví dle vztahu:

$$\Delta m(t_i) = \frac{m(t_i) - m(t_0)}{m_0} \cdot 100 \quad 6.5$$

- $\Delta m(t_i)$ hmotnostní úbytek v čase $t_i = 1, 7, 14, \dots$ dní v %;
 $m(t_0)$ hmotnost zkušebního tělesa v čase t_0 v g;
 $m(t_i)$ hmotnost zkušebního tělesa v čase $t_i = 1, 7, 14, \dots$ dní v g;
 m_0 počáteční hmotnost zkušebního tělesa po vyjmutí z formy v g; pro potřeby cvičení platí:
 $\mathbf{m(t_0) = m_0}$ (reálně tomu tak být nemusí).

Vývoj smrštění a hmotnostních úbytků v čase se vypočítá pro každé zkušební těleso zvlášť. Výsledné smrštění a hmotnostní úbytky betonu v čase se pak vypočítají jako aritmetický průměr měření provedených pro jednotlivá zkušební tělesa. Výsledkem měření je grafický výstup závislosti vývoje smrštění a hmotnostních úbytků v čase a vývoj teplot a relativní vlhkosti vzduchu (RH) okolního prostředí v čase.

Protokol
ČERSTVÝ BETON

B2

Vyučující:

Datum a čas okamžiku smíchání suchých složek s vodou:

Identifikace betonu:

Maximální zrno kameniva:

Údaj o spotřebě vody:

Teplota a vlhkost okolního prostředí v den výroby:

ZPRACOVATELNOST A OBJEMOVÁ HMOTNOST

Záznam o provedení měření.

Typ zkoušky	Naměřená hodnota			Klasifikace konzistence dle ČSN EN 206+A2
Zkouška sednutím [ČSN EN 12350-2]	h			
Zkouška rozlitím [ČSN EN 12350-5]	d ₁	d ₂	f	

Záznam o provedení měření.

Typ zkoušky	Hmotnost prázdné nádoby	Objem nádoby	Hmotnost naplněné nádoby	Objemová hmotnost čerstvého betonu
Objemová hmotnost [ČSN EN 12350-6]				

VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

Záznam o výrobě.

Tvar tělesa	Nominální rozměry	Počet těles	Typ zkoušky

STANOVENÍ VÝVOJE SMRŠTĚNÍ BETONU

Záznam měření.

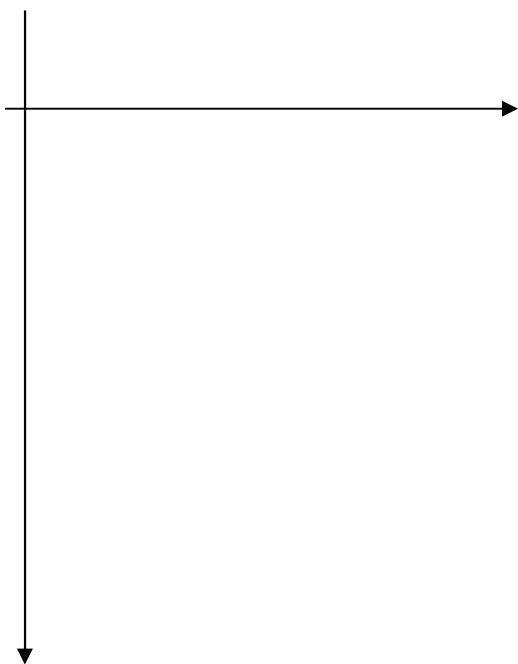
Číslo měření	Datum a čas	T [°C]	RH [%]	l ₁ (t _i) [mm]	l ₂ (t _i) [mm]	l ₃ (t _i) [mm]	etalon [mm]		m ₁ (t _i) [g]	m ₂ (t _i) [g]	m ₃ (t _i) [g]
							l _{e1} (t _i)	l _{e2} (t _i)			

Vyhodnocení měření.

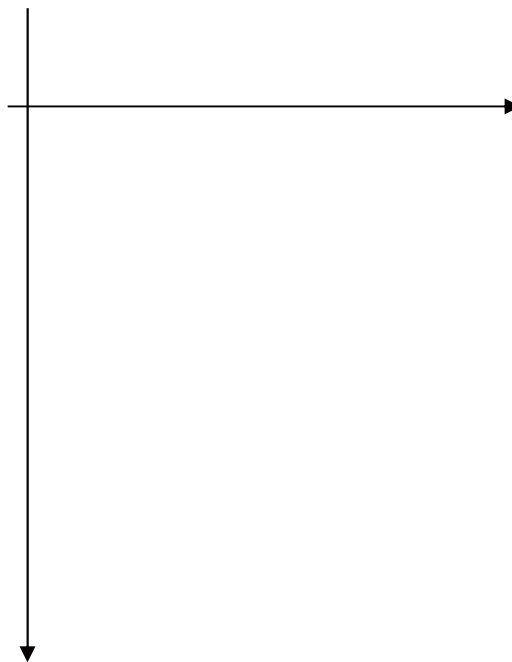
Stáří [dny]	T [°C]	RH [%]	ε ₁ [mm/m]	ε ₂ [mm/m]	ε ₃ [mm/m]	ε [mm/m]	Δm ₁ [%]	Δm ₂ [%]	Δm ₃ [%]	Δm [%]

Grafické znázornění výsledků měření lze vynést ručně do předpřipravených obrázků na další straně, nebo lze grafy připravené ve vhodném programu (např. MS Excel) do protokolu vlepít.

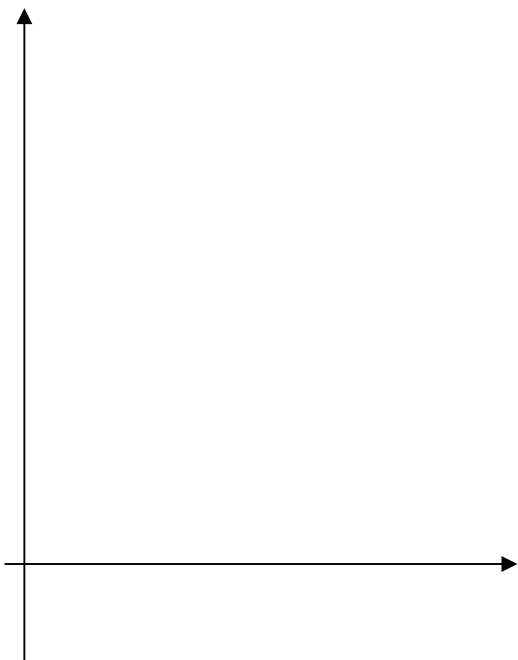
Graf 1: Vývoj smrštění v čase



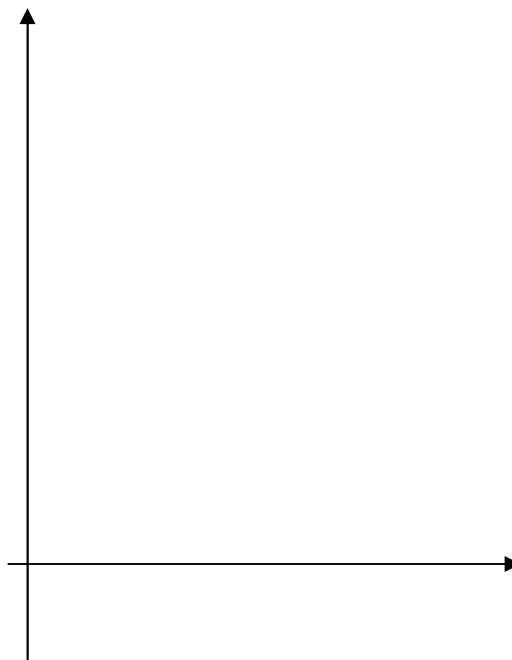
Graf 2: Vývoj hmotnostních úbytků v čase



Graf 3: Vývoj okolní teploty v čase



Graf 4: Vývoj rel. vlhkosti vzduchu v čase



Zkoušky provedl/a a protokol zpracoval/a:

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,
- stupně 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 následující úloha ZB2),
- odolnost proti obrusu [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 následující úloha ZB2),
- mrazuvzdornost [ČSN 73 1322] vždy pro stupeň vlivu prostředí XF1 a XF3 (viz kap. 10.3),
- smršťování [ČSN 73 1320 nebo ČSN EN 12390-16],
- tuhnutí [ČSN 73 1332],
- statický modul pružnosti [ČSN ISO 1920-10 nebo ČSN EN 12390-13] (viz 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**.

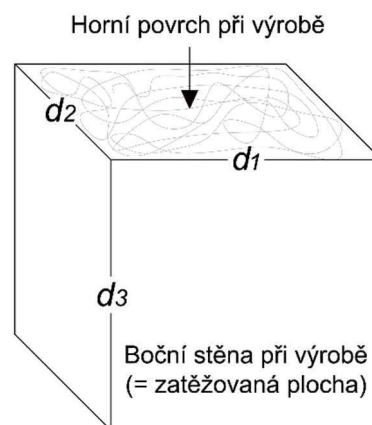
Do této chvíle byla řeč pouze o zkouškách buď na vzorcích čerstvého betonu, anebo na zkušebních tělesech ztvrdlého betonu – tedy o vlastnostech, které řeší a předepisuje norma ČSN EN 206+A2. Pokud nastane situace, že je potřeba zjistit vlastnosti ztvrdlého betonu přímo v konstrukci, může to být problematické. Vlastnosti betonu se mohou od betonu vyztřelého 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 vývrty v ní hrají doplňkovou a upřesňující roli. ČSN EN 13791 naopak preferuje při vyhodnocování pevnosti v tlaku zkoušky jádrových vývrťů, ovšem i nedestruktivní zkoušky mají důležitou roli. Jádrové vývrty 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

Tvrdoměrné (sklerometrické) zkoušení betonu je zkoušení povrchové a, jak již sám název říká, 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.

7.2.1 Tvrdoměr Original Schmidt

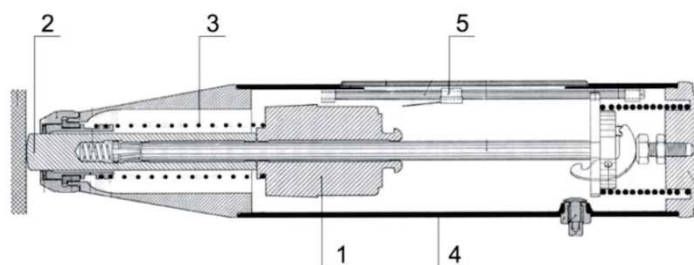
Průkopníkem této metody je švýcarský inženýr Ernst Schmidt, který s prvním typem odrazového tvrdoměru přišel již v roce 1950. Original Schmidt v dodnes nezměněné podobě byl poprvé vyroben již před více než 50 lety, v roce 1965 (!), a doposud v podstatě nebyl překonán žádným jiným typem tvrdoměru.

Sklerometrické 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 vymrštíje 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 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. Zaznamená 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 zkušební lisu a zatížena na 1/10 předpokládané pevnosti v tlaku) se proto provede **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 zrno 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 sklerometru 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

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 $f_{be} = 63$ MPa.

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. Ze zjištěných hodnot odrazu se určí medián a poté se zhodnotí celá sada 10 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	40,0									
Meze intervalu	$0,75 \times R = 30,0$					$1,25 \times R = 50,0$				
Počet odlehlých měření	1 → 10 % ≤ 20% (z počtu všech 10 měření)					Sada přijata / zamítnuta				
Hodnota tvrdosti R	40,0 => 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.

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	≥ 25	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 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:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad 7.2$$

kde F je maximální zatížení při porušení v N a A_c je průřezová plocha zkušebního tělesa, na kterou působí zatížení, v mm^2 . 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**. Ze získané pevnosti f_c a z pevnosti s nezaručenou přesností f_{be} lze určit tzv. součinitel upřesnění (dle normy ČSN 73 1373):

$$\alpha = \frac{f_c}{f_{be}} \quad 7.3$$

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.

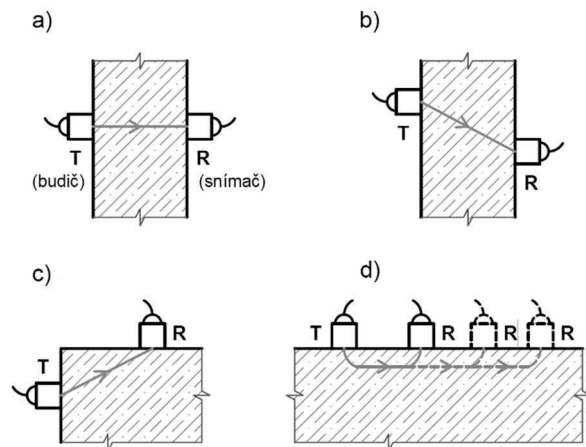
7.4.2 Ultrazvuková impulzová metoda – podstata měření

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 nejvýhodnější 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

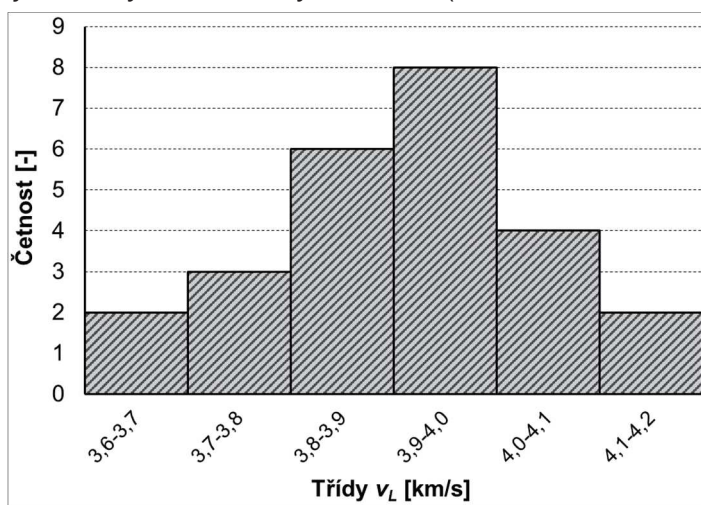
Norma ČSN EN 13791 řeší rovnoměrnost betonu konstrukce nebo její části vzhledem k vyhodnocování vlastností betonu. Pro korektní zhodnocení kvality betonu nebo jeho vlastností je nezbytné vědět, zda je posuzovaná část konstrukce zhotovena ze stejného betonu v celém svém objemu. Pokud je totiž zjištěno, 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 měřících 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.



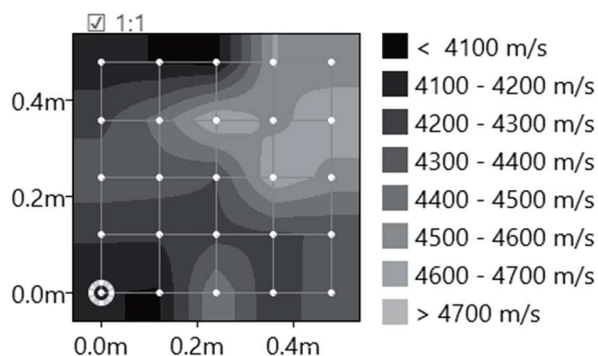
Obrázek 7.5: Histogram četností výsledků rychlosti ultrazvukového vlnění betonovou stěnou v km/s.

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 zaokrouhuje 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

Na zkušební krychli proveďte nedestruktivní měření pomocí tvrdoměru Original Schmidt N: na jedné straně krychle, zatížené ve zkušebním lisu, proveďte 10 měření, které následně vyhodnotíte třemi způsoby:

1. pomocí normy ČSN 73 1373 stanovte pevnost s nezaručenou přesností f_{be} ,

Číslo úderu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Hodnota odrazu R_i										
Hodnota pevnosti $f_{be,i}$										

2. pomocí normy ČSN EN 12504-2 stanovte tvrdost povrchu betonové krychle,

Zde doporučujeme seřadit naměřené hodnoty odrazu sestupně či vzestupně, aby bylo snazší vypočítat medián:

Číslo úderu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Hodnota odrazu R_i										
Seřazeno sestupně či vzestupně:										

3. pomocí normy ČSN EN 13791 stanovte pevnostní třídu betonu (u nové konstrukce v případě pochybností).

Použijte hodnoty z přechozího bodu.

Medián =

Minimum =

Na zkušební krychli proveďte nedestruktivní měření pomocí tvrdoměru SilverSchmidt N: na protilehlé straně stejné zkušební krychle, zatížené ve zkušebním lisu, proveďte 10 měření a pomocí normy ČSN EN 13791 stanovte pevnostní třídu betonu.

Číslo úderu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Hodnota Q_i										
Seřazeno sestupně či vzestupně:										

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. Porovnejte skutečnou pevnost v tlaku a výsledky tvrdoměrného měření, určete součinitel upřesnění α .

Dílčí závěr:

STANOVENÍ ROVNOMĚRNOSTI BETONU

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

1. vypočtete statistické hodnoty souboru naměřených dat a určete, zda se podle normy ČSN 73 2011 jedná o rovnoměrný beton,

2. zhotovte histogram četností,

3. zhotovte grafické znázornění rozdělení hodnot v_L v betonovém bloku pomocí izovel pomocí povrchového grafu (stačí vlepít vytisknutý graf vytvořený vhodným softwarem nebo fotografii displeje UZ přístroje Pundit PL-200, anebo stačí displej přístroje Pundit PL-200 ručně překreslit).

Dílčí závěr:

Zkoušky provedl/a a protokol zpracoval/a: _____

8 ZTVRDLÝ BETON 2

Trvanlivost betonu a konstrukcí z něj vybudovaných závisí na mnoha faktorech. Jedním z nejdůležitějších je kvalita povrchové vrstvy betonu, protože právě ta je v bezprostředním kontaktu s vnějším (často agresivním) prostředím, ze kterého mohou do betonových prvků pronikat nežádoucí látky. Tato kapitola se tedy bude zabývat povrchovou vrstvou betonu. Povrchová vrstva není jen samotný povrch betonu nebo konstrukce – tímto termínem se obvykle rozumí vrstva betonu tloušťky 20 – 50 mm. Jedná se v podstatě o krycí vrstvu výztuže.

8.1 Hloubka průsaku tlakovou vodou

8.1.1 Využití metody

Pokud mohou voda či vzduch povrchovou vrstvou betonu snadno pronikat do jeho vnitřní struktury, velmi pravděpodobně způsobí postupnou degradaci materiálu a zásadním způsobem sníží trvanlivost a životnost betonu, a tím pádem i konstrukce. Například v případě železobetonu mohou do jeho vnitřní struktury vnikat z okolního prostředí látky, které v důsledku snížení pH betonu zapříčiní korozi výztuže.

Proto je v určitých případech nutné stanovit propustnostní vlastnosti betonu. Existuje mnoho zkoušek, pomocí nichž lze stanovit propustnost jak pro vzduch (např. pomocí metody TPT, tedy pomocí přístroje **TORRENT Permeability Tester**), tak pro kapaliny (např. pomocí metody ISAT – **I**nitial **S**urface **A**bsorption **T**est nebo metody GWT – **G**ermann **W**ater permeation **T**est), ovšem základní norma, popisující beton, ČSN EN 206+A2, definuje propustnost betonu pomocí stanovení **hloubky průsaku tlakovou vodou** dle ČSN EN 12390-8.

Metoda se využívá pro kontrolu betonu, který je navržen tak, aby odolával účinkům agresivního prostředí. Norma ČSN EN 206+A2 v tabulce F.1.2 udává mimo jiné i mezní hodnoty hloubky průsaku tlakovou vodou pro složení a vlastnosti betonu v České republice (a s předpokládanou životností 100 let) – předmětná část tabulky F.1.2 je zde uvedena v Tab. 8.1.

Tabulka 8.1: Mezní hodnoty hloubky průsaku tlakovou vodou pro složení a vlastnosti betonu v České republice předepsané normou ČSN EN 206+A2.

Stupeň vlivu prostředí	Koroze způsobená karbonatací		Koroze způsobená chloridy (jiné chloridy než z moře)			Působení mrazu a rozmrazování				Chemicky agresivní prostředí		
	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3
Maximální průsak vody [mm]	50	50	50	50	20	50	35	20	20	50	35	20

8.1.1 Princip metody

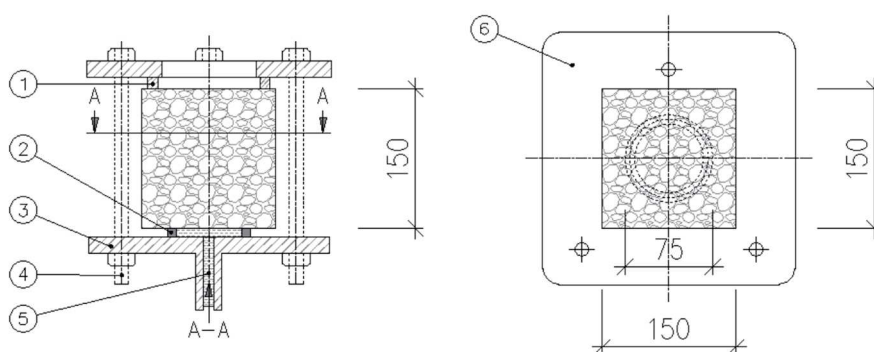
Podstatou zkoušky dle normy ČSN EN 12390-8 je působení tlakové vody na povrch ztvrdlého betonu a následné určení, do jaké hloubky (kolmo od povrchu betonu) voda pronikla.

Základním zkušebním tělesem je krychle, válec nebo hranol o délce hrany nebo průměru nejméně 150 mm, přičemž žádný rozměr nesmí být menší než 100 mm. Zkušební těleso se pro zkoušku musí předem připravit. Plocha zkušebního tělesa, která bude vystavena působení vodního tlaku, se ihned po odformování tělesa zdrsní ocelovým kartáčem. Zkušební těleso je poté uloženo do vodní lázně a samotná zkouška je zahájena ve stáří betonu 28 dní.

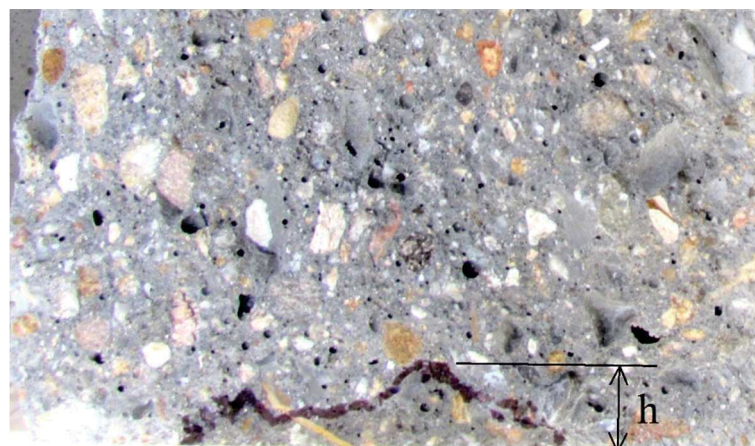
Zkušební těleso se upne do speciálního zařízení a na upravený povrch tělesa se nechá působit vodní tlak (500 ± 50) kPa po dobu (72 ± 2) hodin, viz Obr. 8.1. Zkoušený povrch tělesa musí být kolmý ke směru hutnění betonu. Povrchy, které nejsou vystaveny tlakové vodě, se průběžně během zkoušky kontrolují. Objeví-li se na nich voda, je nutné zvážit platnost výsledku zkoušky.

Po skončení zkoušky se těleso ze zařízení vyjme, povrch tělesa se osuší a zkušební těleso se rozlomí (podobně jako při zkoušce pevnosti v příčném tahu). Lom je veden kolmo k povrchu, na který působila tlaková voda, a ve středu zatěžované plochy. Po oschnutí se obvykle označí viditelná hranice dosažené hloubky průsaku tlakové vody (viz Obr. 8.2) a poté se změří největší hloubka průsaku kolmo od zatěžované plochy.

Výsledek se zaokrouhlí na nejbližší milimetr. Norma dále stanovuje údaje, které musí obsahovat protokol o zkoušce. Norma již neřeší tvar vizuální hranice průniku tlakové vody do zkušebního tělesa, ani případné možné anomálie betonu (kaverno, shluk kameniva apod.), případně by toto mohlo být zahrnuto do bodu 8 f) normy ČSN EN 12390-8 jako jakékoliv prosakování vody ze zkušebního tělesa mimo zatěžovanou plochu či úvaha o platnosti výsledku (pokud se vyskytne problém).



Obrázek 8.1: Příklad uspořádání zkoušky průsaku tlakovou vodou; 1 – opěrný kroužek, 2 – těsnící kroužek, 3 – upevňovací deska, 4 – stahovací šroub, 5 – tlaková voda, 6 – upevňovací deska.



Obrázek 8.2: Rozlomená zkušební krychle po zkoušce průsaku tlakovou vodou s vyznačenou hranicí průsaku tlakové vody.

8.2 Stanovení odolnosti cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek

8.2.1 Využití metody

Hodnocení povrchové vrstvy betonu je poměrně komplikované. Ve světě jsou za tímto účelem využívány různé standardizované i nestandardizované zkušební metody, na jejichž základě je možné charakterizovat povrchovou vrstvu betonu či její vnitřní strukturu. V předchozí kapitole

byly uvedeny některé metody, pomocí kterých lze stanovit propustnost povrchové vrstvy betonu, přičemž důraz byl kladen na průsak tlakovou vodou. Ačkoliv je propustnost betonu důležitá pro hodnocení jeho trvanlivosti, nejedná se zdaleka o jedinou vlastnost, kterou lze u povrchové vrstvy betonu vyžadovat či kontrolovat. Další je např. stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti vodě a chemickým rozmrazovacím látkám (dále jen CHRL).

V případě, že je betonová konstrukce nebo její část vystavena vodě, střídavému působení kladných a záporných teplot a současně na povrch betonu působí také libovolné rozmrazovací činidlo (nejčastěji posypová sůl a následně vzniklý roztok NaCl), výsledný degradační proces je označován jako odlupování. Je to jeden z hlavních problémů, kterým beton ve smyslu jeho trvanlivosti v klimatických podmínkách střední a severní Evropy čelí. Odlupování, jakožto povrchové poškození, sice neohrožuje kvalitu betonu uvnitř konstrukce, činí jej však náchylným k pronikání vody a dalších agresivních látek do jeho struktury. Tím je pochopitelně snížena celková odolnost betonu a následně životnost konstrukce. O fenoménu odlupování betonu se mimo jiné ví, že:

- poškození povrchové vrstvy je nejhorší, když voda obsahuje určité množství rozpuštěné látky,
- existuje určitá nezávislost míry porušení na povaze rozpuštěné látky (např. soli, alkohol, močovina – u všech těchto látek bylo zjištěno podobné působení),
- poškození povrchové vrstvy se projevuje vznikem malých vloček nebo plátků materiálu odpadávajících z povrchu,
- k samotnému odlupování nedojde bez volné kapaliny na povrchu betonu,
- poškození povrchu betonu je tím větší, čím nižší je teplota zatěžovacího cyklu,
- je důležitější koncentrace solí v kapalině působící na povrch betonu než koncentrace solí v kapalině v pórech vnitřní struktury betonu,
- provzdušňovací přísada obvykle zvyšuje odolnost betonu proti odlupování.

8.2.2 Popis metody

Problém se stanovením odolnosti betonu proti působení vody a CHRL je ten, že existuje mnoho postupů, podle nichž lze beton zkoušet. S nadsázkou lze říci, že každý stát s podobnými klimatickými podmínkami, jako má Česká republika, má vlastní normalizovaný postup. Mezinárodní porovnání betonů je v tomto ohledu tedy skoro nemožné.

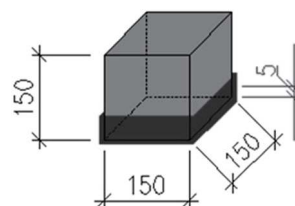
V České republice patří mezi běžně užívané zkušební metody stanovení odolnosti cementového betonu proti vodě a chemickým rozmrazovacím látkám dle normy ČSN 73 1326. Existuje však i předběžná technická norma ČSN P CEN/TS 12390-9, pojednávající o stanovení odolnosti betonu proti zmrazování a rozmrazování – odlupování. Její metodika je podobnější evropským standardizovaným postupům pro stanovení odolnosti betonu proti zmrazování a tání, ovšem v ČR se zatím příliš nevyužívá.

Norma ČSN 73 1326 byla vydána v roce 1984, kdy zkušební postupy byly určené především pro cementové betony krytů vozovek, ale i pro betony obecně vystavené působení soli a chemických rozmrazovacích látek. V době vydání norma obsahovala pouze dvě metody zkoušení: metodu A – Metoda automatického cyklování a metodu B – Metoda ruční manipulace se vzorky. Od roku 2003 platí změna normy Z1, která částečně upravuje některá znění původního vydání, ale zejména doplňuje dokument o metodu C – Metoda automatického cyklování II. Na konec označení metody A poté přibyla římská číslovka "I". V dnešní době se metoda B v podstatě nepoužívá.

8.2.3 Metoda A

Tato zkušební metoda je založena na principu automaticky řízeného cyklického střídání kladných a záporných teplot působících rovnoměrně na celé zkušební těleso ze zkoušeného betonu. Zkušební zařízení (většinou zmrazovací box KD 20) udržuje kladné i záporné teploty po předepsaný čas. Povrch těles musí být ochlazen z +20 °C na -15 °C za dobu 45 až 50 minut. Za stejnou dobu musí dojít ke zpětnému ohřátí a nejvyšší i nejnižší teplota musí být udržována po dobu 15 minut.

Jednotlivá zkušební tělesa (základní tělesem je krychle o hraně 150 mm) jsou během zkoušky umístěna do misek z nekorodujícího materiálu, jež umožňují jednak ponoření zkušebních těles do roztoku chemické rozmrazovací látky a současně zachycení odpadu z povrchu betonu. Jako základní rozmrazovací látka se většinou používá 3% roztok chloridu sodného (NaCl), který je nalit do misky v takovém množství, aby byla zkušební krychle po celém svém obvodu ponořena na výšku (5 ± 1) mm. Zkušební tělesa, kterých musí být pro jeden zkoušený beton alespoň 3 ks, jsou během zmrazování a rozmrazování rovnoměrně rozložena po dně zkušebního automatizovaného cyklovacího zařízení KD 20.



Obrázek 8.2: Způsob uložení tělesa do 3% roztoku NaCl dle metody A.

Po každém 25. cyklu jsou zkušební tělesa s miskou vyjmuta z mrazícího boxu a proudem vody ze stříčky jsou splaveny uvolněné částice do misky. Přebytečná kapalina je slita a odpadlé částice jsou vysušeny do konstantní hmotnosti. Jednotlivé odpady jsou zapsány do protokolu pro každé zkušební těleso po 25 cyklech v gramech. Odolnost povrchu betonu proti působení CHRL je dána hmotností odpadu na jednotku plochy ρ_A v g/m^2 podle vztahu:

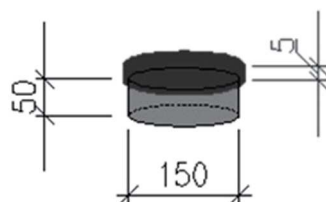
$$\rho_A = \frac{\sum m}{A} \quad 8.1$$

Zkouška je ukončena buď dosažením předepsaného počtu cyklů, nebo dosažením maximální povolené velikosti ρ_A .

8.2.4 Metoda C

Metoda automatického cyklování II (metoda C) používá také automaticky řízené cyklické střídání kladných a záporných teplot působících rovnoměrně na celé zkušební těleso. Tentokrát je zkušebním tělesem válec průměru 150 mm a výšky minimálně 50 mm, jehož povrch je zalit 3% roztokem NaCl. Může se jednat o vybetonované těleso tvaru válce nebo o jádrový vývrt z konstrukce.

Zkušební těleso se opatří objímkou tak, aby převyšovala jeho povrch nejméně o 10 mm. Pro větší vodotěsnost jsou spáry mezi tělesem a objímkou utěsněny pomocí silikonu či pryskyřicového lepidla. Před zahájením zkoušky se na zkušební těleso nalije voda, která se na něm ponechá minimálně dva dny. Poté se voda slije a na povrch se nalije přibližně 5 mm vysoká vrstva 3% roztoku NaCl. Těleso uložené do automatizovaného cyklovacího zařízení KD 20 je ochlazováno na -18 °C. Tato teplota je udržována po dobu 3 hodin, pak se musí zvýšit během 30 minut na hodnotu $+5$ °C, kde je opět udržována 3 hodiny. Jeden zmrazovací cyklus tedy trvá přes 6 hodin, z čehož vyplývá, že tato zkouška je časově mnohem náročnější než metoda A.



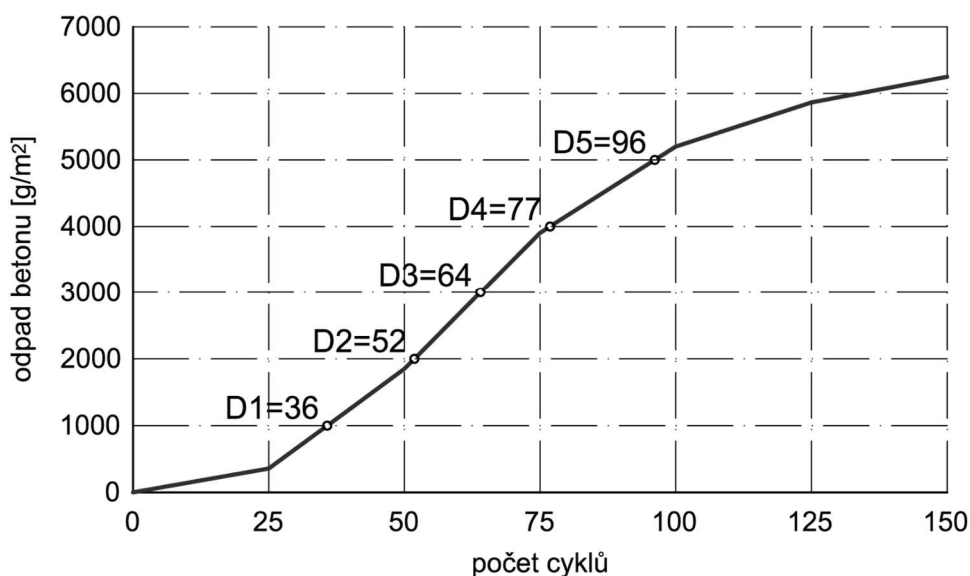
Obrázek 8.3: Způsob umístění 3% roztoku NaCl na zkušební těleso dle metody C.

Po ukončení 25 cyklů je odpad pomocí stříčky slit a ocelovým kartáčem je očištěn povrch tělesa. V klimatizační skříni poté dojde k vysušení odpadu do konstantní hmotnosti. Na zkušební vzorek se opět nalije voda, která zůstane na zkoušeném povrchu po dobu minimálně jednoho dne, a teprve poté je možné pokračovat ve zkoušení povrchu pomocí roztoku NaCl. Výpočet odpadu částic z plochy betonu je shodný jako u metody A, postupuje se tedy dle vztahu 8.1.

Odolnost povrchu betonu proti působení CHRL (metoda C) se hodnotí pomocí součinitelů D1 až D5. Součinitelé D1 až D5 se získají z grafu stanovením průsečíku čáry odpadů betonu na jednotku plochy s příslušnou souřadnicí odpadu betonu, viz Obr. 8.4. Do grafu jsou vynášeny kumulativní odpady. K určení odpadu po 50 cyklech je tedy nutné sečíst dílčí odpad po

25 cyklech s dílčím odpadem po 50 cyklech atd. Jednotlivé součinitele odolnosti betonu proti působení CHRL norma ČSN 73 1326 definuje takto:

- D1 = počet cyklů, po kterých je odpad betonu 1 000 g/m²,
- D2 = počet cyklů, po kterých je odpad betonu 2 000 g/m²,
- D3 = počet cyklů, po kterých je odpad betonu 3 000 g/m²,
- D4 = počet cyklů, po kterých je odpad betonu 4 000 g/m²,
- D5 = počet cyklů, po kterých je odpad betonu 5 000 g/m².



Obrázek 8.4: Vynesení závislosti odpadu betonu s povrchu tělesa v g/m² na počtu cyklů.

Důležité při provádění zkoušky je skutečnost, že zatěžována je vždy „hlazená“ plocha zkušebního tělesa – tedy ta, která byla při výrobě nahoře. Postup zkoušení dle normy ČSN 73 1326 je využíván pro kontrolu betonu, který je navržen tak, aby odolával účinkům určitého agresivního prostředí. Norma ČSN EN 206+A2 v již zmíněné tabulce F.1.2 udává mimo jiné i mezní hodnoty odpadu pro složení a vlastnosti betonu v České republice (a předpokládanou životností 100 let) – předmětná část tabulky F.1.2 je zde uvedena v Tab. 8.2.

Tabulka 8.2: Mezní hodnoty výsledků zkoušky odolnosti betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek pro složení a vlastnosti betonu v České republice předepsané normou ČSN EN 206+A2.

Stupeň vlivu prostředí	Působení mrazu a rozmrazování	
	XF2	XF4
Odolnost betonu vůči zmrazování a rozmrazování, při zkoušce podle ČSN 73 1326: metoda/počet cyklů/odpad [g/m ²]	A/100/1250 C/75/1250	A/100/1000 C/75/1000

8.3 Stanovení soudržnosti betonu

8.3.1 Využití metody

Stanovení soudržnosti betonu probíhá dle normy ČSN EN 1542 „Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Zkušební metody – Stanovení soudržnosti odtrhovou zkouškou“. Samotná zkouška spočívá v přímém odtržení kruhového terče přilepeného k povrchu betonu (nebo systému či výrobku pro opravy betonu), přičemž zkušební místo je definováno jádrovým vývrtem provedeným skrz povrch. Naprosto shodný postup je

popsán v normě ČSN 73 1318 „Pevnost betonu v tahu“ – pokud je odtržen kruhový terč přilepený k návrtnímu jádrovým vrtákem, jedná se o pevnost betonu povrchových vrstev.

Samotnou zkoušku lze tedy využít např. pro:

- zjištění pevnosti v tahu povrchových vrstev betonu,
- stanovení soudržnosti s podkladem u zálivek, malt, betonů a prostředků pro povrchovou ochranu, které se používají pro ochranu a opravy betonu,
- stanovení soudržnosti povrchové vrstvy dlažeb k podkladnímu betonu.

Metoda se tedy využívá při kontrole kvality dlažeb, výrobků a systémů pro ochranu betonových konstrukcí, či určení pevnosti v tahu povrchové vrstvy betonu konstrukce, kterou je nutné sanovat. Pokud otryskaná povrchová vrstva nemá dostatečnou pevnost v tahu, není možné na ni aplikovat systém či výrobek pro její ochranu (např. sanační omítku).

8.3.2 Popis metody

Jádrovým vrtákem o průměru 50 mm se odvrtá zkušební místo. Hloubka návrtní se vypočte ze vztahu:

$$d_i = d_d + (15 \pm 5), \quad 8.2$$

kde d_i je celková hloubka návrtní v mm a d_d je tloušťka povrchové úpravy (malty) v mm.

Čistý odtrhový terč se přilepí soustředně s osou jádra na připravený zkušební vzorek tak, aby mezi zkušebním terčem a zkoušeným povrchem vznikla souvislá vrstva lepidla. Kruhový terč se pak přitlačí tak, aby se odstranil vzduch, a všechno případně vyteklé lepidlo se z návrtní ihned odstraní. Do mezery vytvořené jádrovým vrtákem nesmí žádné lepidlo vniknout. Lepidlo se následně nechá vytvrdnout dle pokynů výrobce.

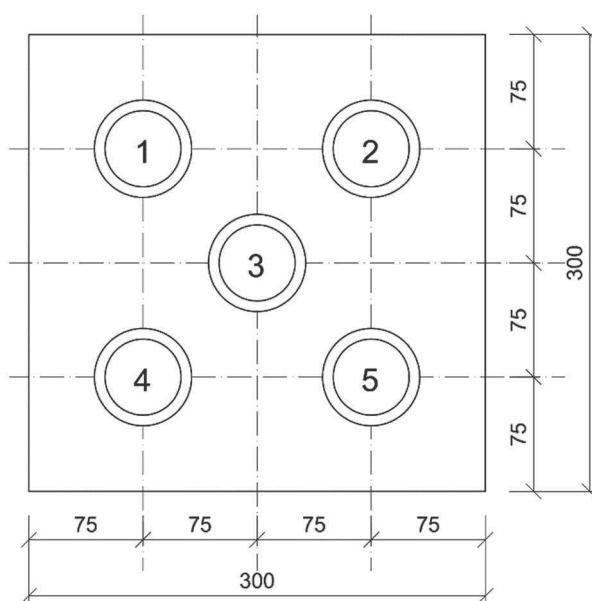
Zařízení pro odtrhovou zkoušku se umístí soustředně nad kruhový terč tak, aby úhel svíraný s jeho povrchem byl $(90 \pm 1)^\circ$. Terč se zajistí, aby se jeho poloha během zkoušky nemohla měnit. Zatěžovací síla se zvyšuje plynule a rovnoměrně rychlostí $(0,05 \pm 0,01) \text{ N/mm}^2/\text{s}$ až do porušení. Síla na mezi porušení se zaznamená a stanoví se plocha porušení zkušebního tělesa D jako průměrný výsledek měření rozměrů provedených posuvným měřítkem vzájemně kolmo napříč jádra. Soudržnost f_h v N/mm^2 je dána následujícím vztahem:

$$f_h = \frac{F_h}{A} = \frac{4 \cdot F_h}{\pi \cdot D^2}, \quad 8.3$$

kde f_h je soudržnost v N/mm^2 , F_h je síla na mezi porušení v N, A je zatěžovaná plocha definovaná jádrovým vývrtem v mm^2 (tedy plocha porušení zkušebního tělesa) a D je průměr jádrového vývrtní v mm.

Výsledek soudržnosti se zaokrouhlí na nejbližších $0,1 \text{ N/mm}^2$.

Pokud se zkouší výrobek či systém pro ochranu betonu, je dle Obr. 8.5 pro zkoušku požadováno jedno zkušební těleso, na němž se provede 5 zkoušek soudržnosti. Po provedení odtrhové zkoušky je nutné posoudit způsob porušení zkušebního místa. Místo s nevhodným porušením (např. porušení v lepidle) se vyřadí. Výsledek je průměr z minimálně tří normálních zkušebních výsledků.



Obrázek 8.5: Zkušební těleso s vyznačenou polohou kruhových terčů.

8.4 Kontrola vyztužení metodou indukce vířivých proudů

Předchozí tři úlohy popisovaly stanovení vlastností povrchové vrstvy betonu. Nedílnou součástí železobetonových konstrukcí je výztuž. A trvanlivost železobetonové konstrukce je ovlivněna nejen kvalitou povrchové vrstvy betonu, ale i její správnou tloušťkou, tedy dodržením předepsané hloubky krytí výztuže. Součástí ověření kvality nových konstrukcí proto bývá kromě stanovení vlastností betonu i zjištění, zda výztuž konstrukce (prvku) odpovídá projektové dokumentaci.

8.4.1 Využití metody

Ocelová výztuž se ve vzájemném spolupůsobení s betonem podílí na únosnosti a mechanické stabilitě železobetonových konstrukcí. Pro kontrolu a zjištění množství výztuže máme k dispozici několik metod, z nichž nejrozšířenější je nedestruktivní metoda pulzní indukce vířivých proudů, v zahraničí uváděná zkráceně jako „**eddy current**“.

Metoda je zejména vhodná pro stanovení:

- vzdálenosti výztuže od povrchu (krytí),
- množství a polohy výztuže (v první vrstvě od povrchu, v obou směrech),
- průměru výztuže (při dostatečné vzdálenosti sousedních prutů),
- směru výztuže, zjištění jiných kovových prvků v měřicím poli.

Metoda má však i svá omezení a limity:

- dosah přístrojů je max. 150-200 mm, ovšem pro efektivní lokalizaci max. 60-80 mm,
- nerozliší od sebe sousední pruty s malou distancí (v závislosti na krytí),
- zkreslení (nadhodnocení) průměru vlivem sousední výztuže (lze částečně korigovat),
- zkreslení směru výztuže, zjištění jiných kovových prvků v měřicím poli,
- blízkost silných elektromagnetických polí (např. elektrické trakce) může měření znemožnit,
- pomocí elektromagnetických indikátorů nelze zjistit výztuž v druhé rovnoběžné vrstvě,
- nelze zjistit druh výztuže ani míru koroze výztuže.

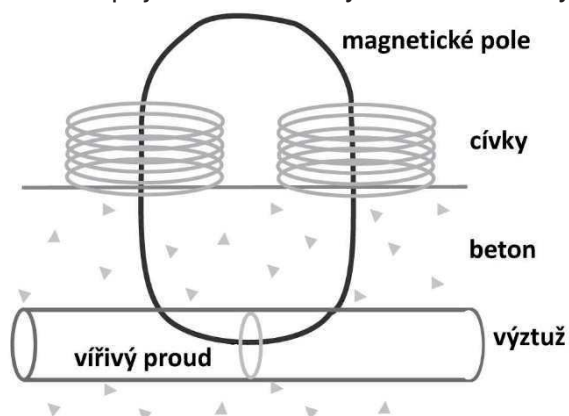
Ve cvičení se zaměříme na kontrolu počtu, polohy a krytí výztuže v nově betonované konstrukci (ověření shody s projektovou dokumentací). Metoda se dále využívá při průzkumech starších konstrukcí a rovněž pro lokalizaci míst pro bezpečné vrtání otvorů.

8.4.2 Využití metody

Všechny typy vyhledávačů kovů jsou založeny na elektromagnetickém principu. Skládají se z vyhledávací hlavy (sondy) a elektronických obvodů. Cívky v sondě generují časově proměnné primární magnetické pole, které proniká ke kovovému (hledanému) cíli. Primární elektromagnetické pole je hledaným cílem deformováno (modifikováno) a vytváří tak sekundární elektromagnetické pole, které působí na přijímací cívku vyhledávací hlavy a indukuje v ní elektrické napětí, které je dále zpracováno a vyhodnoceno elektronickými obvody.

Moderní přístroje jsou založeny na pulzně – indukční technologii, která má cívky vyhledávací hlavy bez magnetického jádra. Princip měření vířivých proudů ve výztuži je znázorněn na Obr. 8.6.

V praxi je možné se setkat s mnoha typy přístrojů od mnoha výrobců. Pro potřeby cvičení byl vybrán jeden z nejmodernějších přístrojů, a to Profometer PM-630 od švýcarské firmy Proceq.

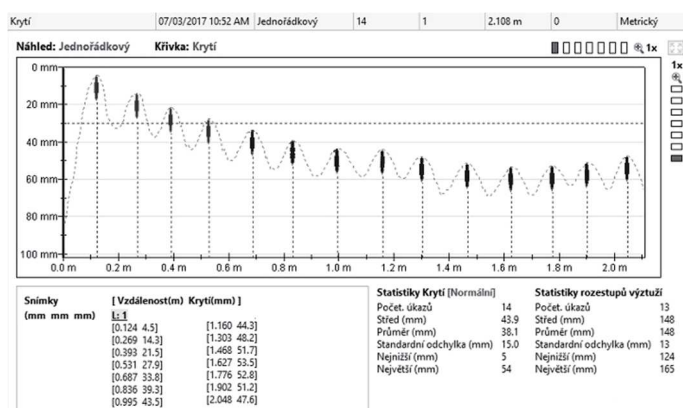


Obrázek 8.6: Princip měření vířivých proudů pomocí pulzně – indukční technologie.

8.4.3 Příklad Profometer PM-630

Šestá generace přístrojů Profometer firmy Proceq, s označením Profometer PM-6 (typ 600, 630, 650) se od předchozích typů výrazně odlišuje. Příklad Profometer PM-630 (Obr. 8.7) využívá moderní dotykový displej umožňující okamžité zobrazení průběhu měření, což přispívá ke kontrole postupu měření v reálném čase.

Sonda je integrovaná (bodová, směrová, hloubková i průměrová), lze ji snadno vložit do rámečku (měřiče dráhy) se čtyřmi kolečky. Kromě zvukové signalizace je přímo na sondě i světelná signalizace – dvě šipky a kruh, která usnadňuje lokalizaci výztuže i v náročných podmínkách stavby.



Obrázek 8.7: Profometer PM-630 s dotykovým displejem a integrovanou sondou; svítící šipky pomáhají lokalizovat výztuž, na displeji lze ihned kontrolovat správnost měření pomocí křivek intenzity signálu. Vpravo záznam měření krytí výztuže.

Příklad využívá několik režimů: bodový, liniový, plošný. Pro účely kontroly krytí a polohy výztuže je nejuvhodnější liniový sken. Návod pro liniové skenování bude k dispozici přímo ve cvičení.

8.4.4 Příprava měření a zásady měření

Příprava měření

Měření probíhá dle normy ČSN 73 2011. Před měřením se uživatel musí dokonale seznámit s použitým typem přístroje a návodem od výrobce, který zpravidla udává i postupy měření pro jednotlivé případy uložení výztuže.

Doporučuje se nejdříve na modelu prvku prověřit citlivost přístroje, zejména při složitějších případech, kdy jsou pruty výztuže blízko vedle sebe, nad sebou, anebo se navzájem kříží. Měření na maketě prvku se ověří všechny údaje udávané výrobcem, např.:

- přesnost stanovení velikosti krycí vrstvy (včetně ovlivnění sousední blízkou výztuží),
- rozlišitelnost prutů probíhajících blízko sebe, v závislosti na velikosti krytí,
- stanovení průměru výztuže, apod.

Ve cvičení bude k dispozici otevřený model pro ověření všech výše uvedených příkladů.

Zjištění polohy výztuže

Zjišťováním polohy výztuže se rozumí rozpoznání její přítomnosti v betonové konstrukci a její průběh (případně tvar) bez ohledu na druh oceli, průměr výztuže a krytí.

Při hledání polohy výztuže je důležité postupovat systematicky. Ve většině případů jsme schopni odhadnout předpokládaný směr hlavní výztuže, rozdělovací výztuže nebo třmínků, které vzájemně tvoří souřadnicový systém. Zvolíme zkušební plochu a umístíme sondu na povrch tak, že:

- osa sondy je rovnoběžná s očekávaným směrem výztuže,
- pohyb sondy je kolmý k očekávanému směru výztuže.

Obvykle začínáme s tím druhem výztuže, který se nachází blíže k povrchu – např. u sloupů nebo trámů se jedná o třmínky. Hodnota ukazatele měření je totiž ovlivněna vzdáleností od výztuže podstatně více než průměrem výztuže. Teprve až přesně určíme polohu bližší výztuže (např. třmínků), pohybujeme sondou mezi ní (aby neovlivňovala měření) kolmo k předpokládanému směru hlavní výztuže.

Odhad průměru výztuže

Odhad průměru výztuže se u starších typů přístrojů prováděl dvojím měřením za pomoci vložené destičky. Moderní přístroje měří průměr přímo, podmínkou úspěšného odhadu průměru výztuže je dostatečná vzdálenost sousedních prutů v obou směrech.

Zjištění tloušťky krycí vrstvy

Při měření je nejdůležitější skutečnost, zda je měřený prut osamocený, anebo jsou v jeho blízkosti jiné pruty (rovnoběžné nebo kolmé), dále pomáhá znalost průměru výztuže.

Měření na osamoceném prutu o známém průměru dává při běžném krytí (10-50 mm) výsledky **s přesností ± 1 mm**. U novějších přístrojů stačí správně nastavit průměr výztuže a výstupem je přímo hodnota krytí.

Prut je považován za osamocený, pokud ukazatel přístroje není ovlivněn sousední výztuží (rovnoběžnou, kolmou) o více než 5 %. Nutná minimální vzdálenost sousední výztuže se určí měřením na modelu. Pokud tato vzdálenost není dodržena, ukazuje přístroj menší krytí, než ve skutečnosti je (více prutů ve větší hloubce se chová jako jeden prut v menší hloubce). Pokud potřebujeme velmi přesně změřit velikost krytí výztuže v hustě vyztuženém prvku, u kterého však známe rozmístění výztuže podle výkresové dokumentace, musíme předem provést kalibrační měření na maketě prvku vyztužené naprosto stejným způsobem a následně provést korekci.

Ne vždy je znám průměr výztuže, který je důležitým parametrem při stanovení velikosti krytí. Pokud by např. skutečný průměr výztuže byl $\varnothing 20$ mm a krytí by se vyhodnotilo podle vztahu pro $\varnothing 16$ mm, vyšlo by krytí o něco menší, než ve skutečnosti je. Pokud se však alespoň přibližně podaří průměr výztuže odhadnout nebo nedestruktivně změřit, je chyba měření krycí vrstvy relativně malá.

8.4.5 Příklady měření

Měření na otevřeném modelu

Cílem měření na otevřeném modelu konstrukce bude seznámit se s různým nastavením přístroje a provést základní měření při různém uspořádání výztuže:

- měření osamocených prutů o různém průměru – odezva přístroje, přesnost odhadu průměru a stanovení velikosti krycí vrstvy,
- měření sousedních prutů bez korekcí a s nastavenými korekcemi,
- porovnání vlivu rozdělovací výztuže.

Měření na uzavřeném modelu – ověření krytí

Cílem měření na uzavřeném modelu konstrukce bude ověření skutečného krytí výztuže a porovnání s projektovou dokumentací. Výkres výztuže bude k dispozici ve cvičení, podle známých průměrů a roztečí výztuže bude provedeno správné nastavení korekcí a následné měření ve 3 liniích. Výsledkem měření bude porovnání skutečné polohy výztuže a skutečného krytí výztuže s projektovou dokumentací. Výsledky budou zpracovány do tabulky, příklad zpracování je uveden v Tab. 8.3.

Tabulka 8.3: Příklad zpracování výsledků měření krycí vrstvy v konstrukci.

Linie č.	Vzdálenost od hrany	Číslo prutu / krytí [mm]								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,10	8,0	14,0	20,1	24,5	27,6	29,6	32,4	35,6	38,4
2	0,30	10,4	16,2	21,4	26,3	28,1	30,2	33,1	36,5	40,1
3	0,50	12,8	18,4	22,7	28,1	28,6	30,8	33,8	37,4	41,8

Podmíněné formátování:

Krytí [mm]

<20 mm

20-30 mm

≥30 mm

Závěr

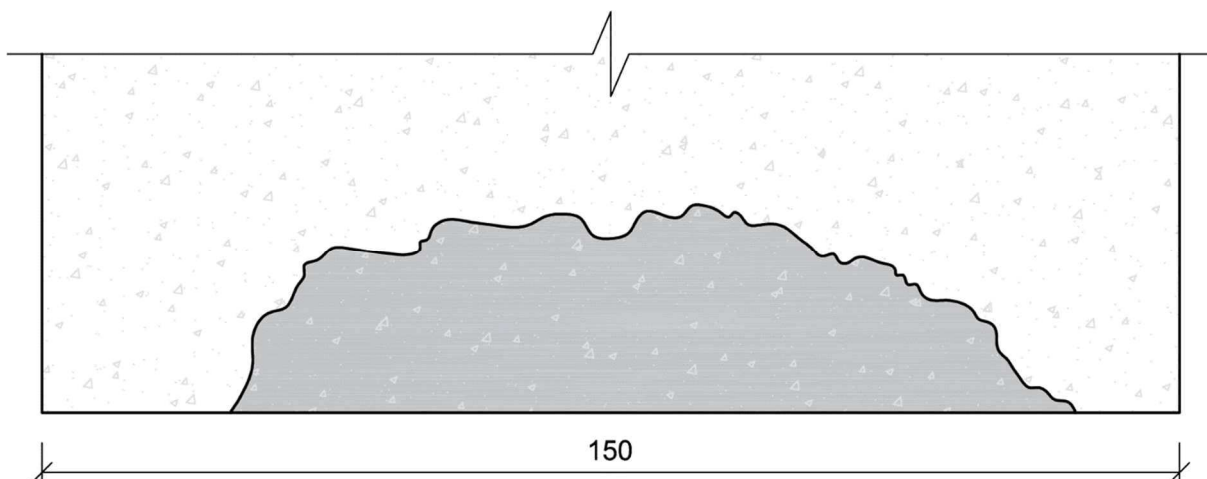
V závěru měření pomocí metody indukce vířivých proudů uveďte zhodnocení měření na uzavřeném modelu – zda byla dodržena projektová dokumentace, zda bylo dodrženo předepsané krytí a případně o kolik se rozcházelo s projektovou dokumentací.

Vyučující:

HLOUBKA PRŮSAKU TLAKOVOU VODOU

Vyhodnoťte zkoušku stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou na zkušební krychli o hraně 150 mm, viz obrázek.

Posuďte, zda beton vyhovuje označení C 35/45 XA2 podle kritérií uvedených v tabulce F.1.2. v normě ČSN EN 206+A2.



Stanovená hloubka průsaku $h =$

Maximální dovolený průsak vody $h_{\max} =$

Dílčí závěr:

STANOVENÍ ODOLNOSTI CEMENTOVÉHO BETONU PROTI PŮSOBENÍ VODY A CHEMICKÝCH ROZMRAZOVACÍCH LÁTEK

Provedte výpočet z hodnot zadaných v tabulce – jedná se o dílčí hodnoty hmotnosti odpadu. Na válci o průměru 150 mm byla provedena zkouška dle metody C.

Vyhodnoťte zkoušku pomocí **součinitele odolnosti D1**, vykreslete závislost odpadu v g/m^2 na počtu cyklů a posuďte, zda beton vyhovuje označení **C 35/45 XF4** podle kritérií uvedených v tabulce F.1.2. v normě ČSN EN 206+A2.

Pozn.: Odpad betonu v g/m^2 se zaokrouhuje na nejbližších $10 g/m^2$ a součinitel D1 (=počet cyklů, kdy je odpad $1000 g/m^2$) se určí pomocí lineární interpolace a zaokrouhlí na celé číslo.

Počet cyklů	25	50	75	100	125	150
Dílčí odpad [g]	3,2	3,5	3,9	4,8	6,0	7,3
Kumulativní odpad [g]						
Výsledný odpad v g/m ²						



Výpočet D1:

Dílčí závěr:

STANOVENÍ SOUDRŽNOSTI BETONU

Určete soudržnost povrchové úpravy betonu s podkladem. Byla provedena tři měření s normálním zkušebním výsledkem – dílčí hodnoty jsou:

$D_1 = 49,8 \text{ mm}$; $F_{h1} = 4,75 \text{ kN}$,

$D_2 = 50,4 \text{ mm}$; $F_{h2} = 4,60 \text{ kN}$,

$D_3 = 50,1 \text{ mm}$; $F_{h1} = 5,05 \text{ kN}$.

Dílčí závěr:

KONTROLA VYZTUŽENÍ METODOU INDUKCE VÍŘIVÝCH PROUDŮ

A. Proved'te měření na otevřeném modelu a odpovězte na tyto otázky:

1. Jak ovlivní průměr prutu hodnotu změřeného krytí výztuže?

2. Jaký je vliv rozdělovací výztuže (v druhém směru) na změřené krytí?

3. Projeví se vliv sousední výztuže?

B. Proved'te měření krytí výztuže na uzavřeném modelu.

1. Zakreslete zjištěnou výztuž a porovnejte její polohu s projektovou dokumentací.



9 TENZOMETRICKÉ MĚŘENÍ NAPJATOSTI MATERIÁLU ČÁSTI KONSTRUKCE

Přímé měření napjatosti materiálu tenzometrickými metodami není možné. Využívá se proto platnosti Hookova zákona, který definuje napětí jako součin hodnot modulu pružnosti a poměrné deformace ve směru působení napětí při jednoosé napjatosti. Poměrné deformace se zjišťují mnoha měřicími metodami, které se v souhrnu označují jako tenzometrické metody.

9.1 Popis použitých přístrojů a měřidel

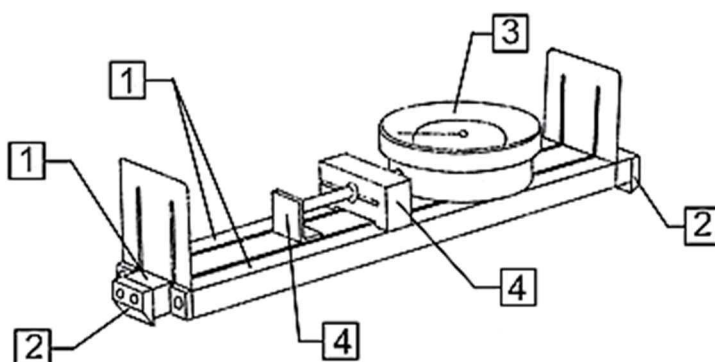
9.1.1 Mechanický tenzometr

Deformuje-li se materiál pod tenzometrem působením zatížení, změní se i celková vzdálenost dotykových břitů tenzometru. Tato změna se přenese pohybem nosníků k úchylkoměru, kde se projeví jako změna čtení. Poměrnou deformaci u tohoto přístroje počítáme ze vzorce:

$$\varepsilon_m = \frac{\Delta L}{L}$$

9.1

kde: ε_m je poměrná deformace v měřeném místě [$\mu\text{m}/\text{m}$],
 ΔL je změna délky měřicí základny [μm],
 L délka měřicí základny [$L = 0,2 \text{ m}$].

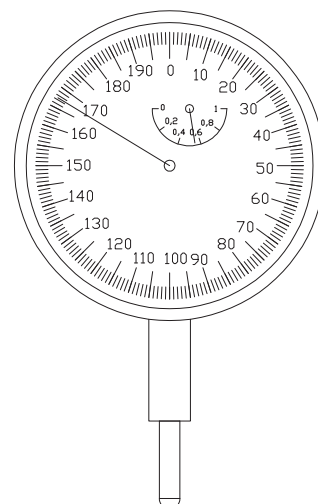


Obrázek 9.1: Schéma mechanického tenzometru (Hollanův můstek).

- 1 – oddělené profilované plechové nosníky,
- 2 – bříty,
- 3 – úchylkoměr,
- 4 – držák úchylkoměru.

9.1.2 Číselníkový úchylkoměr 0,001 mm

Abychom získali hodnoty napětí s dostatečnou přesností, musí být mechanický tenzometr osazen úchylkoměrem s rozsahem 1 mm a dělením 0,001 mm. **Při čtení 0,5675 mm = 567,5 μm bude malá ručička mezi 0,4 a 0,6 (čtení 0,4) a velká ručička ukazuje 167,5 dílku. Čtení je tedy 0,4+0,1675 = 0,5675 mm.**



Obrázek 9.2: Číselníkový úchylkoměr.

9.1.3 Strunové tenzometry

Strunový tenzometr typu TSR/5,5 Gage Technique je tvořen ocelovou strunou, napnutou mezi dvěma koncovými upevňovacími bloky. Struna je chráněna ocelovou trubičkou, pohyblivou v koncových blocích. Vlivem deformace objektu dochází ke změnám napětí struny a tím i ke změnám vlastního kmitočtu struny.

Základní vztah pro výpočet poměrného přetvoření je:

$$\varepsilon_s = K(f^2 - f_0^2) \quad [\mu m/m] \quad 9.2$$

V případě odečítání periody kmitání struny T (místo frekvence f) lze pro výpočet poměrné deformace užít vztah:

$$\varepsilon_s = K \left[\frac{1}{T^2} - \frac{1}{T_0^2} \right] \quad [\mu m/m] \quad 9.3$$

kde:

- K je konstanta strunového tenzometru, přičemž **$K = 2,14 \cdot 10^{-3} \mu m/m \cdot Hz^2$** (pro TSR/5,5),
- f_0 je výchozí čtení na přístroji – nezatížená konstrukce [Hz],
- f je čtení v zatíženém stavu konstrukce [Hz],
- T_0 je výchozí čtení na přístroji – nezatížená konstrukce [s],
- T je čtení v zatíženém stavu konstrukce [s].



Obrázek 9.3: Strunový tenzometr TSR/5,5.

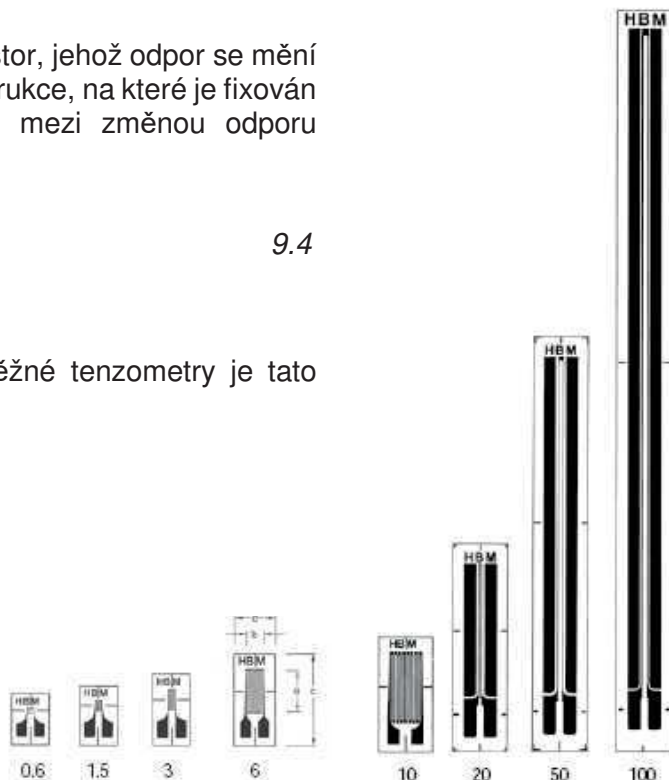
9.1.4 Odporové tenzometry

Tenzometr představuje v podstatě rezistor, jehož odpor se mění v závislosti na deformaci povrchu konstrukce, na které je fixován pomocí speciálních lepidel. Závislost mezi změnou odporu a deformací je dána vztahem:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \varepsilon \quad 9.4$$

kde:

- K je konstanta tenzometru (pro běžné tenzometry je tato hodnota cca 2).



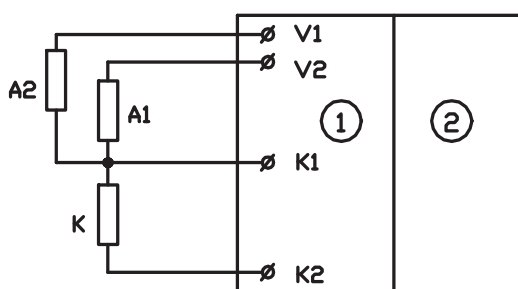
Obrázek 9.4: Odporové tenzometry firmy HBM: 1-LY41-0,6/120 až 1-LY41-100/120.

9.1.5 Měření odporovými tenzometry na ohýbané konzole

Zapojení tenzometrů je uvedeno na Obr. 9.5. Aktivní tenzometry A1 a A2 jsou doplněny do polovičního mostu stejným tenzometrem K na volné části profilu pro kompenzaci teplotní chyby. Měřená deformace je pro jednotlivé tenzometry dána vztahem:

$$\varepsilon_0 = (\varepsilon_{zi} - \varepsilon_{0i}) \cdot \frac{2}{K} \quad [\mu\text{m}/\text{m}] \quad 9.5$$

kde: ε_{zi} je čtení na displeji po zatížení konstrukce pro i-tý tenzometr,
 ε_{0i} je tzv. nulové čtení = hodnota na displeji v nezatíženém stavu,
 K konstanta tenzometrů, přičemž $K = 2,09$.

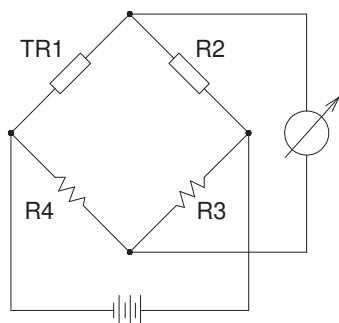


Obrázek 9.5: Schéma zapojení odporových tenzometrů na ohýbané konzole.

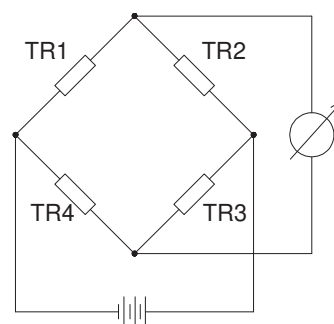
9.1.6 Měření odporovými tenzometry na tažené trubce

V této úloze je pro vysvětlení základních principů měření odporovými tenzometry použito dvou různých způsobů zapojení:

- dva samostatné tenzometry doplněné pevným odporem do polomostu, viz Obr. 9.6,
- čtyři tenzometry zapojené do plného mostu, viz Obr. 9.7.



Obrázek 9.6: Schéma zapojení jednoho aktivního tenzometru TR1 doplněného pevným odporem R2 do polomostu.



Obrázek 9.7: Schéma zapojení čtyř aktivních tenzometrů TR1 až TR4 do plného mostu.

Měřená deformace je pro **jednotlivé tenzometry** zapojené do polomostu dána vztahem:

$$\varepsilon_{ic1,2} = (\varepsilon_{icz1,2} - \varepsilon_{ic0}) \cdot \frac{2}{K} \quad [\mu\text{m}/\text{m}] \quad 9.6$$

kde:

$\varepsilon_{icz1,2}$ je čtení na displeji po zatížení konstrukce závažím m_1 a m_2 pro i-tý tenzometr,
 ε_{ic0} je tzv. nulové čtení = hodnota na displeji v nezatíženém stavu pro tentýž tenzometr,
 K je konstanta tenzometrů, přičemž $K = 2,06$.

Měřená deformace je pro **plný most** dána vztahem:

$$\varepsilon_{p1,2} = \frac{(\varepsilon_{pz1,2} - \varepsilon_{p0})}{2 \cdot (1 + \mu)} \cdot \frac{2}{K} \quad [\mu\text{m/m}] \quad 9.7$$

kde:

- $\varepsilon_{pz1,2}$ je čtení na displeji po zatížení konstrukce závažím m_1 a m_2 pro i -tý tenzometr,
 ε_{p0} je tzv. nulové čtení = hodnota na displeji v nezatíženém stavu pro tentýž tenzometr,
 K konstanta tenzometrů, přičemž $K = 2,06$,
 μ Poissonovo číslo (pro plastovou trubku budeme uvažovat $\mu = 0,30$).

9.2 Úloha I: Ohybové napětí - konzola

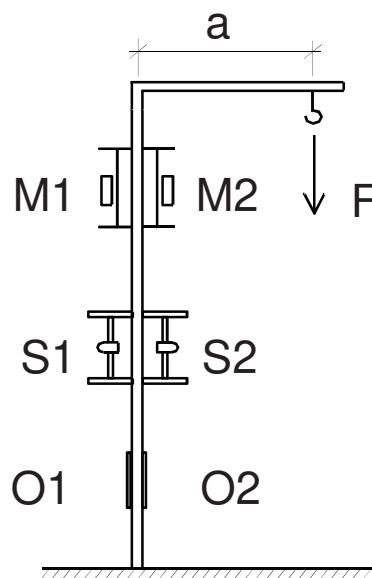
Při řešení této úlohy vycházíme ze vztahu pro výpočet napětí v krajních vláknech ohýbaného průřezu. Měření totiž budeme provádět na konzole upevněné ve svislé poloze. Zatěžována bude závažím zavěšeným na rameni a – viz Obr. 9.8. Vzniklý moment síly vyvolá po celé délce konzoly při určitém závaží konstantní průběh ohybového momentu a tím i stejnou poměrnou deformaci a napětí v krajních vláknech průřezu konzoly. Pro výpočet hodnoty napětí v krajních vláknech ohýbaného profilu platí vztah:

$$\sigma_{t,oh} = \frac{M}{W} \quad 9.8$$

- kde W je průřezový modul [mm^3],
 M je moment síly [$\text{N}\cdot\text{mm}$],
 σ je napětí [N/mm^2].

Zatížíme-li konzolu závažím o známé hmotnosti a na všech typech snímačů provedeme odečty, můžeme určit poměrné deformace v měřených místech. Pak můžeme vypočítat hodnoty napětí v krajních vláknech σ [N/mm^2] a následně je ověřit výpočtem teoretického napětí. Seznámíme se tak se třemi typy tenzometrů a s principy použití tenzometrie (měření poměrných deformací) v praxi.

- M mechanické tenzometry
 S strunové tenzometry
 O odporové tenzometry



Obrázek 9.8: Schéma experimentu.

9.2.1 Postup měření

- Při nezatížené konzole zapíšeme čtení obou úchylkoměrů mechanických tenzometrů d_0 , údaje pro oba strunové tenzometry f_0 (T_0) a nulové čtení na odporových tenzometrech ε_0 .
- Opatrně zavěsíme závaží o hmotnosti m [kg] na rameni a [mm] (viz Obr. 9.8) a po uklidnění vzniklého kmitání znovu zaznamenáme čtení na sledovaných tenzometrech – d , f (T), ε_z .
- Závaží odstraníme, opět počkáme na uklidnění kmitání konzoly a provedeme čtení při odtížené konzole – d_0' , f_0' (T_0'), ε_0' .

9.2.2 Výpočet poměrných deformací ε [$\mu\text{m}/\text{m}$]

Nejdříve vypočteme **pružné deformace** (rozdíl čtení při zatížení a po odtížení). Pro celkovou kontrolu měření určíme také případné **zbytkové deformace** (rozdíl „nulového“ čtení před zatěžováním a čtení po zatěžování).

Z poměrných deformací na horním a dolním líci průřezu (viz Obr. 9.9) vypočteme hledanou deformaci odpovídající ohybovému namáhání dle vztahu:

$$\varepsilon = \left| \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2} \right| = \frac{|\varepsilon_1| + |\varepsilon_2|}{2} \quad (\text{vzhledem k tomu, že } \varepsilon_1 \text{ a } \varepsilon_2 \text{ mají rozdílná znaménka}) \quad 9.9$$

kde:

- ε_1 je pružná poměrná deformace měřená tenzometry v tažené části průřezu [$\mu\text{m}/\text{m}$],
- ε_2 je pružná poměrná deformace měřená tenzometry v tlačené části průřezu [$\mu\text{m}/\text{m}$],
- ε je hodnota pružné poměrné deformace odpovídající ohybovému namáhání [$\mu\text{m}/\text{m}$].

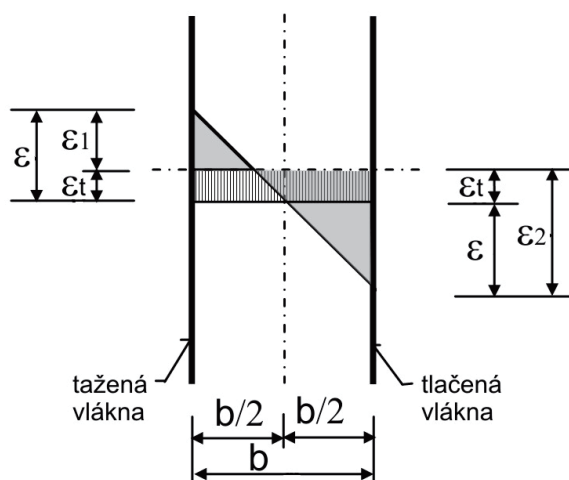
9.2.3 Výpočet napětí v krajních vláknech průřezu σ [N/mm^2]

Odpovídající napětí v tahu (tlaku) krajních vláken průřezu vypočítáme dle vztahu:

$$\sigma_{M,S,Ooh} = \varepsilon \cdot E \quad 9.10$$

kde:

- ε je hodnota pružné deformace určená odporovými tenzometry – viz (rov. 9.5) a (9.9), strunovými tenzometry – viz (9.3) a (9.9) a mechanickými tenzometry – viz (9.1) a (9.9),
- E modul pružnosti oceli [$E = 210\,000 \text{ N}/\text{mm}^2$],
- σ napětí [N/mm^2].



Obrázek 9.9: Schéma průběhu poměrných deformací průřezu při namáhání tlakem (ε_t) a ohybem ($\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – měřené veličiny, ε – hledaná veličina).

9.2.4 Výpočet ohybového momentu M [$\text{N}\cdot\text{mm}$] teoretického napětí σ_t [N/mm^2]

Ohybový moment, kterým působí závaží na konzolu, vypočteme ze vztahu:

$$M = F \cdot a = m \cdot g \cdot a \quad 9.11$$

- kde: m je hmotnost závaží [kg],
- a je rameno, na kterém působí síla [mm],
- g je tíhové zrychlení [$g = 9,81 \text{ m}/\text{s}^2$],
- M je ohybový moment [$\text{N}\cdot\text{mm}$].

Vypočteme teoretickou hodnotu napětí σ_t [N/mm^2] v krajních vláknech průřezu konzoly, která je způsobena působením ohybového momentu M . Pro výpočet předpokládejte normovou hodnotu průřezového modulu $W = 1300 \text{ mm}^3$. Hodnoty teoretického σ_t [N/mm^2] a měřeného napětí σ [N/mm^2] vzájemně porovnejte!

9.2.5 Výpočet průřezového modulu W_V [mm³]

Pro výpočet průřezového modulu použitého profilu Jäckl použijeme úpravy vztahu (9.8) pro napětí v krajních vláknech ohýbaného průřezu:

$$W_V = \frac{M}{\sigma} \quad 9.12$$

kde: σ je experimentálně určené napětí v krajních vláknech [N/mm²],
 M je ohybový moment [N·mm] – dle (9.11),
 W_V je průřezový modul [mm³],

Výslednou hodnotu zaokrouhlete na tři platné číslice a porovnejte s normovou hodnotou v zadání úlohy.

9.2.6 Výpočet hmotnosti závaží m [kg]

Ze vztahů (9.11) a (9.12) lze odvodit vztah pro výpočet hmotnosti závaží:

$$m_V = \frac{W \cdot \sigma}{a \cdot g} \quad 9.13$$

kde: σ je experimentálně určené napětí v krajních vláknech [N/mm²],
 g je tíhové zrychlení [$g = 9,81 \text{ m/s}^2$],
 a je rameno síly [mm],
 m_V je hmotnost závaží [kg],
 W je průřezový modul [mm³].

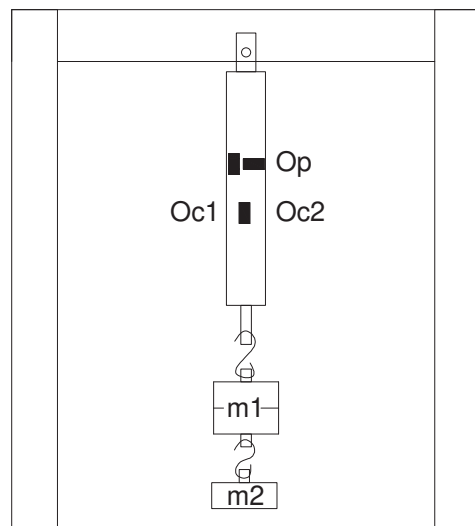
Výslednou hodnotu zaokrouhlete na dvě platné číslice a porovnejte s reálným závažím.

9.3 Úloha II: Normálové napětí – tahové zkoušky

Při řešení této úlohy vycházíme ze vztahu pro výpočet normálového napětí v taženém (tlačeném) průřezu. Měření budeme provádět na plastové trubce zavěšené v rámu. Zatěžována bude závažími, které budeme zavěšovat na její spodní konec – viz Obr. 9.10. Pro výpočet hodnoty napětí profilu platí vztah:

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad 9.14$$

kde: N je normálová síla [N],
 A je průřezová plocha trubky [mm²],
 σ je normálové napětí [N/mm²].



Obrázek 9.10: Schéma experimentu.

Zatížíme-li trubku závažím o známé hmotnosti a na odporových tenzometrech provedeme odečty, můžeme určit poměrné deformace v měřených místech. Pak můžeme vypočítat hodnoty normálového napětí v taženém průřezu σ [N/mm²] a následně je ověřit výpočtem teoretického napětí. Dále je možno ze změřeného poměrného pretvoření a známého zatížení

(hmotnosti závaží) určit statický modul pružnosti materiálu trubky. Naopak při známém modulu pružnosti jsme schopni z naměřených deformací určit zatížení (hmotnost závaží), které působí na trubku (tažený, tlačný prvek).

Trubka je osazena odporovými tenzometry ve dvou řezech. První řez je osazen čtyřmi tenzometry zapojenými do plného mostu. Toto zapojení kompenzuje vliv případného ohybu a teplotní vlivy. Druhý řez je osazen dvěma samostatnými tenzometry doplněnými pevným odporem do polomostu. Zde není kompenzován vliv teploty, v případě krátkodobého měření v laboratoři to však nemá téměř žádný vliv.

9.3.1 Postup měření

- Při nezatížené trubce zapíšeme nulové čtení odporových tenzometrů plného mostu ε_{p0} a samostatných tenzometrů ε_{1c0} a ε_{2c0} .
- Opatrně zavěsíme závaží m_1 a provedeme čtení plného mostu ε_{pz1} a samostatných tenzometrů ε_{1cz1} a ε_{2cz1} . Potom přivěsíme závaží m_2 a opět provedeme čtení ε_{pz2} a ε_{1cz2} a ε_{2cz2} . Při každém čtení počkáme na ustálení hodnot.

9.3.2 Výpočet poměrných deformací ε [$\mu\text{m}/\text{m}$]

Vypočteme pružné deformace způsobené závažím m_1 a závažími $m_1 + m_2$.

V případě plného mostu vypočteme pružné deformace přímo dle vztahu (9.7).

U jednotlivých tenzometrů použijeme vztah (9.6) a získané hodnoty z obou tenzometrů následně zprůměrnujeme dle vztahu:

$$\varepsilon_{C1,2} = \left| \frac{\varepsilon_{1C1,2} + \varepsilon_{2C1,2}}{2} \right| \quad 9.15$$

9.3.3 Výpočet normálového napětí taženého průřezu σ [N/mm^2]

Odpovídající napětí v tahu (tlaku) průřezu vypočítáme dle vztahu:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad 9.16$$

kde: ε je hodnota pružné deformace určená odporovými tenzometry, viz (rov. 9.7) a (9.15),
 E je modul pružnosti plastové trubky [$E = 1050 \text{ N}/\text{mm}^2$],
 σ je napětí [N/mm^2].

9.3.4 Výpočet teoretického normálového napětí taženého průřezu σ [N/mm^2]

Teoretické normálové napětí vypočteme dle vztahu:

$$\sigma_t = \frac{F}{A} = \frac{m \cdot g}{A} \quad 9.17$$

kde: σ je teoretické normálové napětí [N/mm^2],
 m je hmotnost závaží [kg],
 g je tíhové zrychlení [$g=9,81 \text{ m}/\text{s}^2$],
 A je průřezová plocha trubky [mm^2].

9.3.5 Výpočet statického modulu pružnosti E [N/mm²]

Statický modul pružnosti materiálu vypočteme dvakrát – z deformací naměřených při zatížení závažím m_1 a závažími $m_1 + m_2$. V případě, že se budeme pohybovat v pružné oblasti, měl by statický modul pružnosti vyjít shodný. Pro výpočet použijeme vztah:

$$E = \frac{\sigma_t}{\varepsilon} = \frac{m \cdot g}{A \cdot \varepsilon} \quad 9.18$$

kde: σ_t je teoretické normálové napětí [N/mm²],
 m je hmotnost závaží [kg],
 g je tíhové zrychlení [$g=9,81$ m/s²],
 ε je naměřené poměrné přetvoření odpovídající danému zatížení (plný most).

9.3.6 Výpočet hmotnosti závaží m [kg]

Ze vztahu (9.18) lze odvodit vztah pro výpočet hmotnosti závaží:

$$m_v = \frac{A \cdot \varepsilon \cdot E}{g} \quad 9.19$$

kde: m je hmotnost závaží [kg],
 g je tíhové zrychlení [$g=9,81$ m/s²],
 A je průřezová plocha trubky [mm²],
 ε je naměřené poměrné přetvoření odpovídající danému zatížení [$\mu\text{m}/\text{m}$] (plný most),
 E je modul pružnosti plastové trubky [N/mm²].

9.4 Úloha III: Teplotní roztažnost

Teplotní roztažnost (někdy také **tepelná roztažnost**) je jev, při kterém se po dodání/odebrání tepla tělesu (po zahřátí/ochlazení tělesa o určitou teplotu), změní délka (objem) tělesa. Většina látek se při zahřívání rozpíná, to znamená, že jejich molekuly se pohybují rychleji a dále od sebe.

Obvykle je uvažována přímá úměrnost mezi změnou veličiny ΔX a změnou teploty Δt . Matematicky vyjádřeno, změna délky (objemu) je lineární funkcí změny teploty t :

$$\Delta X = X_0 \cdot \alpha \cdot \Delta t \quad 9.20$$

kde: X_0 je výchozí hodnota veličiny X před změnou teploty,
 α je součinitel teplotní roztažnosti [K^{-1} nebo $^{\circ}\text{C}^{-1}$],
 Δt je změna teploty [K nebo $^{\circ}\text{C}$].

V této úloze si ověříme vliv změny teploty na stavební materiál (ocel). Změnu teploty budeme simulovat zahříváním ocelového válečku teplovzdušnou pistolí.

9.4.1 Postup měření

- Při nezahřátém ocelovém válečku odečteme hodnotu nulového čtení d_0 na číselníkovém úchylkoměru.
- Opatrně budeme zahřívát ocelový váleček horkovzdušnou pistolí po dobu asi 1 min.
- Po zahřátí odečteme hodnotu d na číselníkovém úchylkoměru.

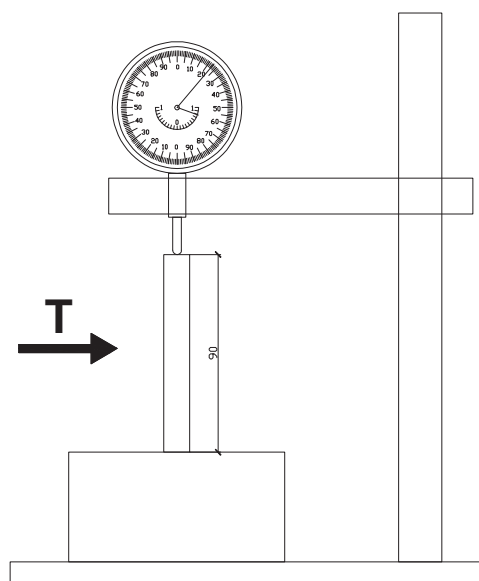
9.4.2 Výpočet změny teploty ocelového válečku

Ze vztahu (9.1 a 9.20) lze odvodit následující vztahy:

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{d - d_0}{l_0} = \alpha \cdot \Delta t \quad 9.21$$

$$\Delta t = \frac{\varepsilon_t}{\alpha} \quad 9.22$$

kde: ε_t je poměrné přetvoření od teploty [-],
 Δl je délková změna vyvolaná oteplením [mm],
 l_0 počáteční délka [mm] ($l_0 = 90$ mm),
 d_0 čtení na číselníkovém úchylkoměru před zahřátím [mm],
 d čtení na číselníkovém úchylkoměru po zahřátí [mm],
 α součinitel teplotní roztažnosti [K^{-1} nebo $^{\circ}C^{-1}$],
 Δt změna teploty [K nebo $^{\circ}C$].



Obrázek 9.11: Schéma experimentu.

Protokol TENZOMETRIE	T
Vyučující:	

OHYBOVÉ NAPĚTÍ – KONZOLA

Zatěžovací parametry konzoly :

délka ramene $a =$ mm hmotnost závaží $m =$ kg

normový průřezový modul $W = 1300 \text{ mm}^3$
 modul pružnosti materiálu $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$

Měřené a vypočtené hodnoty :

1. Mechanické tenzometry

	vyhodnocení					
	čtení při zatěžování konzoly [μm]			poměrné deformace [$\mu\text{m}/\text{m}$]		napětí [N/mm^2]
	d_0	d	d_0'	ϵ_{Mi} dle (9.1)	ϵ dle (9.9)	$\sigma_{M,oh}$ dle (9.10)
tažená vlákna - M1						
tlačená vlákna - M2						

2. Strunové tenzometry

	vyhodnocení					
	čtení při zatěžování konzoly			poměrné deformace [$\mu\text{m}/\text{m}$]		napětí [N/mm^2]
	$f_0 (T_0)$	$f (T)$	$f_0' (T_0')$	ϵ_{Si} dle (9.2) ((9.3))	ϵ dle (9.9)	$\sigma_{S,oh}$ dle (9.10)
tažená vlákna - S1						
tlačená vlákna - S2						

3. Odporové tenzometry

	vyhodnocení					
	čtení při zatěžování konzoly [$\mu\text{m}/\text{m}$]			poměrné deformace [$\mu\text{m}/\text{m}$]		napětí [N/mm^2]
	ϵ_0	ϵ_z	ϵ_0'	ϵ_{Oi} dle (9.5)	ϵ dle (9.9)	$\sigma_{O,oh}$ dle (9.10)
tažená vlákna - O1						
tlačená vlákna - O2						

4. Experimentálně určené napětí v krajních vláknech průřezu $\sigma = \sigma_{O,oh}$

$$\sigma = \text{ N/mm}^2$$

5. Teoretické napětí $\sigma_{t,oh}$ - dle vztahů (9.8) a (9.11)

$$\sigma_{t,oh} = \text{ N/mm}^2$$

6. Rozdíl Δ teoretického a experimentálního určení napětí v krajních vláknech

$$\Delta = ((\sigma - \sigma_{t,oh}) / \sigma_{t,oh}) \cdot 100 \quad [\%]$$

$$\Delta = \text{ \%}$$

7. Průřezový modul W_v - dle vztahu (9.12)

$$W_v = \text{ mm}^3$$

8. Hmotnost závaží m_v - dle vztahu (9.13)

$$m_v = \text{ kg}$$

Dílčí závěr:

NORMÁLOVÉ NAPĚTÍ – TAHOVÉ ZKOUŠKY

Zatěžovací parametry tažené trubky :

vnější průměr trubky :	d =	25,2	mm
tloušťka stěny :	t =	4,5	mm
modul pružnosti trubky :	E =	1050	N/mm ²
hmotnost závaží :	m ₁ =	1,0285	kg
	m ₁ + m ₂ =	1,5350	kg

Měřené a vypočtené hodnoty :

9. Odporové tenzometry - čtvrtmosty - viz odstavec 1.1.6. v návodech

	vyhodnocení								
	čtení při zatěžování [$\mu\text{m}/\text{m}$]			poměrné deformace [$\mu\text{m}/\text{m}$]				napětí [N/mm^2]	
	ε_{ic0}	ε_{icz1}	ε_{icz2}	ε_{ic1} dle (9.6)	ε_{c1} dle (9.15)	ε_{ic2} dle (9.6)	ε_{c2} dle (9.15)	σ_{c1} dle (9.16)	σ_{c2} dle (9.16)
tažená vlákna - Oc1									
tažená vlákna - Oc2									

10. Odporové tenzometry -plný most - viz odstavec 1.1.6. v návodech

	vyhodnocení						
	čtení při zatěžování [$\mu\text{m}/\text{m}$]			poměrné deformace [$\mu\text{m}/\text{m}$]		napětí [N/mm^2]	
	ε_{p0}	ε_{pz1}	ε_{pz2}	ε_{p1} dle (9.7)	ε_{p2} dle (9.7)	σ_{p1} dle (9.16)	σ_{p2} dle (9.16)
tažená vlákna Op							

11. Teoretické napětí σ_t - dle vztahu (9.17)

$$\sigma_{t1} = \boxed{} \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{t2} = \boxed{} \text{ N/mm}^2$$

12. Modul pružnosti E - dle vztahu (9.18)

$$E_1 = \boxed{} \text{ N/mm}^2$$

$$E_2 = \boxed{} \text{ N/mm}^2$$

13. Hmotnost závaží m_v - dle vztahu (9.19)

$$m_{v1} = \boxed{} \text{ kg}$$

$$m_{v2} = \boxed{} \text{ kg}$$

Dílčí závěr:

TEPLOTNÍ ROZTAŽNOST

parametry ocelového válečku :

$$\alpha_{\text{ocel}} = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$l_0 = 90 \text{ mm}$$

Měřené a vypočtené hodnoty :

14. Ohřátí ocelového válečku o Δt °C

	vyhodnocení				
	čtení deformací [μm]		deformace [$\mu\text{m}/\text{m}$]		teplota [$^\circ\text{C}$]
	d_0	d	Δl	ε_t dle (9.21)	Δt dle (9.22)
ocelový váleček					

Dílčí závěr: _____

Zkoušky provedl/a a protokol zpracoval/a: _____

10 REZONANČNÍ METODA

Rezonanční metoda, jejímž principem je stanovení vlastních frekvencí zkušebních těles, umožňuje získat důležité informace o vlastnostech stavebních materiálů, o jejich vnitřní struktuře a také o případných změnách v této struktuře v čase. Pokud je do předmětu z tuhého materiálu vnesen mechanický impuls, dojde k jeho rozkmitání. **Kmitání** (které lze nazvat též oscilací nebo kmitavým dějem) je změna určité veličiny, která zpravidla nastává v čase a která vykazuje opakování nebo tendenci k němu.

Kmitání zkušebního tělesa se může uskutečnit mnoha způsoby, přičemž k vyhodnocení dynamických materiálových charakteristik těles pravidelných geometrických tvarů se používají vlastní frekvence podélného kmitání f_L , příčného kmitání f_T a kroutivého kmitání f_k . **Frekvence** (neboli kmitočet) je fyzikální veličina, která udává počet opakování periodického děje za daný časový úsek. Jednotkou je Hz ($= s^{-1}$).

Vlastní frekvence zkušebního tělesa nastává ve chvíli, kdy z pohledu fyziky dochází k rezonanci. **Rezonance** je snaha určitého systému při některých frekvencích kmitat s větší amplitudou než při ostatních frekvencích, tedy při těchto konkrétních frekvencích kmitat více.

10.1 Obecný princip

V případě zkoušení betonu se jako rezonanční frekvence (neboli vlastní kmitočet) označuje jev, kdy dochází k vzrůstu amplitudy vynucených kmitů zkoušeného tělesa na maximum. K tomuto jevu dochází v případě, když je frekvence vnější budící síly shodná s vlastní frekvencí tělesa.

Základní rezonanční frekvence zkušebních těles lze stanovit pomocí dvou možností aplikace rezonanční metody, které jsou založeny na:

- nepřerušovaném (spojitém) kmitání,
- přerušovaném (impulzním) kmitání.

V prvním případě vysílá rezonanční přístroj do materiálu zkušebního tělesa spojitě mechanické kmitání. Frekvence tohoto kmitání musí být plynule měnitelná, obvykle v rozmezí od 30 Hz do alespoň 20 kHz. Přístroj musí umět určit odezvu tělesa na vysílanou frekvenci, což znamená, že musí umět měřit (a případně na obrazovce osciloskopu zobrazovat) amplitudu kmitání zkušebního tělesa. Ve chvíli, kdy je zaznamenána nejvyšší amplituda kmitání tělesa, je vysílaná frekvence rovna vlastní frekvenci tělesa.

Druhý způsob stanovení vlastních frekvencí je výrazně jednodušší. Místo poměrně složité aparatury s osciloskopem s obrazovkou je použito mnohem jednodušší zařízení, které se skládá z:

- impulzního kladívka (tzv. impact hammer),
- snímače zrychlení (např. snímač akustické emise),
- osciloskopu (spojeného např. přes USB s počítačem),
- vyhodnocovacího softwaru, který pracuje na principu FFT – rychlé Fourierovy transformace (fast Fourier transform).

10.2 Stanovení dynamických charakteristik betonu

10.2.1 Postup měření

Stanovení dynamického modulu pružnosti betonu pomocí rezonanční metody se provádí podle normy ČSN 73 1372. Princip metody je výpočet modulu pružnosti v tahu a tlaku, modulu pružnosti ve smyku a Poissonova čísla z vlastních frekvencí betonového zkušebního tělesa. Jednotlivé dílčí části měření mohou přímo navazovat na průběžné vyhodnocení předcházejících částí měření. Je proto při měření vhodné postupovat podle bodů, které jsou dále podrobněji popsány, a to v časové posloupnosti.

Stanovení rozměrů a hmotnosti zkušební tělesa

Je vhodné si před začátkem měření zhotovit nákres zkušební tělesa včetně označení rozměrů. Příčné rozměry zkušební tělesa (lze je označit a a b nebo b a h) se změří pomocí posuvného měřítka s přesností alespoň na 0,1 mm. Délku zkušební tělesa L lze stanovit pomocí ocelového pravítka s přesností alespoň na 0,5 mm. Následně se určí hmotnost zkušební tělesa.

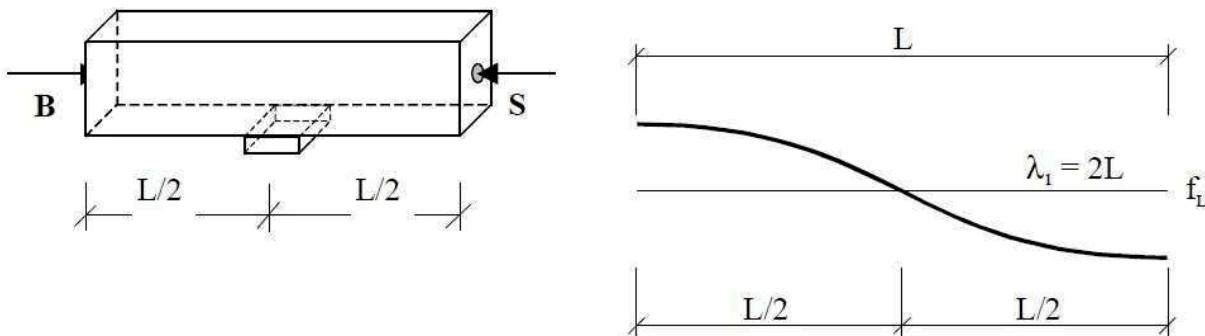
Stanovení rezonanční frekvence podélného kmitání f_L

Před samotným měřením rezonanční metodou je nutné vypočítat hodnotu očekávané vlastní frekvence podélného kmitání f_L' . Důvodem je velmi obtížné stanovení hodnot vlastních frekvencí neznámého vzorku materiálu. Vždy je proto dobré znát očekávanou vlastní frekvenci, tedy přibližnou hodnotu skutečné vlastní frekvence zkušební tělesa. Vypočítat očekávanou vlastní frekvenci je možné např. z doby průchodu ultrazvukového vlnění tělesem:

$$f_L' = \frac{500}{T} \quad 10.1$$

kde f_L' je přibližná hodnota vlastní frekvence podélného kmitání v kHz,
 T je doba průchodu ultrazvukového vlnění zkušebním tělesem ve směru „L“ v μ s.

Při měření rezonančních frekvencí je zkušební těleso rozkmitáno, přičemž jsou známa místa, v nichž vznikají **uzly** a **kmitny** kmitání. Podle sledovaného (vybuzeného) kmitání – může být podélné, příčné nebo kroutivé – musí být těleso uloženo na vhodné podložky (např. gumové) v místě uzlů kmitání a sondy musí být umístěny v místech největších amplitud – tedy v místech kmiten. Preferuje se tím sledované kmitání a ostatní druhy kmitání jsou potlačována. Způsob podepření hranolu pro zjištění vlastní frekvence podélného kmitání je uveden na obrázku 10.1. Sondou je v případě použití impulzního způsobu měření myšleno impulzní kladívko a snímač akustické emise. Další možností je uložit těleso na pružnou podložku (např. molitan), která kmitání tělesa neomezuje.



Obrázek 10.1: Způsob podepření zkušební hranolu a umístění budiče „B“ a snímače „S“ při měření první vlastní frekvence podélného kmitání – vlevo; tvar první vlastní frekvence podélného kmitání – vpravo.

Pokud je k určení vlastní frekvence zkušební tělesa využito spojitě kmitání, je přístroj nastaven na frekvenci, která je nižší než vypočtená hodnota rezonanční frekvence f_L' . Poté se pomalu plynule zvyšuje vysílaná frekvence, až se v blízkosti hledané rezonanční frekvence začne amplituda kmitání, zobrazená na obrazovce přístroje, zvyšovat. Skutečná rezonanční frekvence podélného kmitání f_L je charakterizována největší výchylkou obrazu na obrazovce (maximální amplitudou).

Pokud je k určení vlastní frekvence zkušební tělesa využito impulzní kmitání, po úderu impulzním kladívkem se v softwaru počítače v podobě křivky vykreslí odezva tělesa na jednotlivé frekvence celého frekvenčního spektra. Skutečná rezonanční frekvence podélného kmitání f_L je charakterizována jednoznačným vrcholem (tzv. „peak“) znázorněné křivky v blízkosti očekávané frekvence f_L' .

Kontrola naměřené frekvence se provádí určením druhé vlastní frekvence kmitání tělesa, jejíž hodnota má být dvojnásobkem f_L .

Stanovení kroutové a příčné frekvence

Pro určité podmínky, které jsou definovány tvarem zkušební tělesa a poměrem jeho rozměrů, byl odvozen vztah mezi vlastní frekvencí podélného, kroutového a příčného kmitání. Přestože u zkušební tělesa, které nemá zcela „přesné“ rozměry (shodné s jmenovitými), nemusí být tyto podmínky stoprocentně splněny, koeficienty vyjadřující poměr vlastních frekvencí lze pro stanovení přibližných hodnot kroutové a příčné frekvence použít.

Ze **skutečné** vlastní frekvence podélného kmitání f_L se vypočte očekávaná frekvence kroutového kmitání:

$$f_i' = \alpha \cdot f_L \quad 10.2$$

kde f_i' je přibližná (očekávaná) frekvence kroutového kmitání,
 f_L je měřením zjištěná vlastní frekvence podélného kmitání.
 Koeficient α má pro hranol hodnotu $\alpha = 0,59$.

Ze **skutečné** vlastní frekvence podélného kmitání f_L se vypočte očekávaná frekvence příčného kmitání:

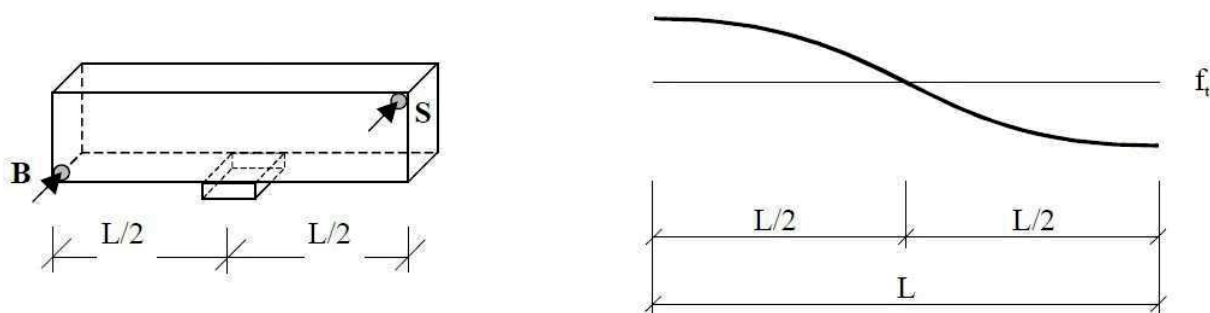
$$f_f' = \beta \cdot f_L \quad 10.3$$

kde f_f' je přibližná (očekávaná) frekvence příčného kmitání,
 f_L je měřením zjištěná vlastní frekvence podélného kmitání.
 Koeficient β závisí na poměru mezi příčným rozměrem a délkou hranolu, hodnoty jsou uvedeny v Tab. 10.1.

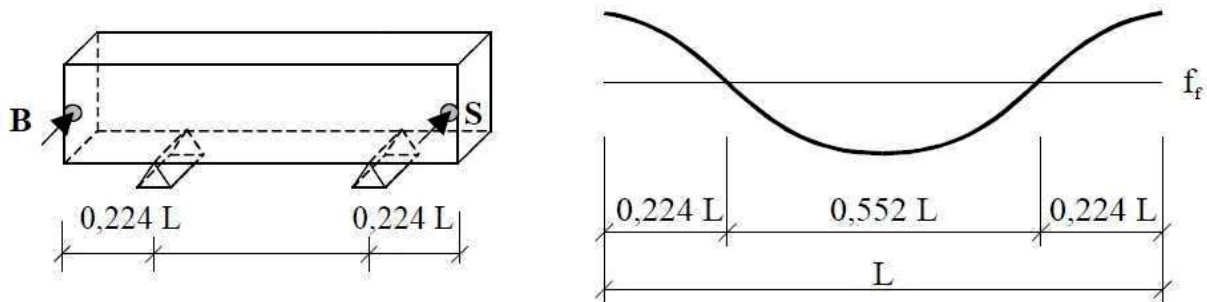
Tabulka 10.1: Hodnoty koeficientu β pro různě dlouhé hranoly.

$a : L$	1 : 3	1 : 4	1 : 5
β	0,52	0,43	0,36

Umístění podložek a sond (nebo úderu impulzního kladívka a snímače akustické emise) se provede pro kroutové kmitání podle Obr. 10.2 a pro příčné kmitání podle Obr. 10.3. Postup měření je dále shodný s postupem měření vlastní frekvence podélného kmitání.



Obr. 10.2: Způsob podepření zkušební hranolu a umístění budiče „B“ a snímače „S“ při měření první vlastní frekvence kroutového kmitání – vlevo; tvar první vlastní frekvence kroutového kmitání – vpravo.



Obr. 10.3: Způsob podepření zkušebního hranolu a umístění budiče „B“ a snímače „S“ při měření první vlastní frekvence příčného kmitání – vlevo; tvar první vlastní frekvence příčného kmitání – vpravo.

10.2.2 Výpočet dynamických vlastností z naměřených hodnot

Hodnota dynamického modulu pružnosti betonu v tlaku a tahu E_{cr} lze vypočítat dvěma způsoby. První možností je určení modulu pružnosti pomocí podélného kmitání ze vztahu:

$$E_{crL} = 4 \cdot L^2 \cdot f_L^2 \cdot \rho \quad 10.4$$

kde E_{crL} je dynamický modul pružnosti v tlaku (tahu) v MPa (N/mm²),
 L je délka zkušebního tělesa v m,
 f_L je naměřená vlastní frekvence podélného kmitání v kHz,
 ρ je objemová hmotnost materiálu v kg/m³.

Hodnotu dynamického modulu pružnosti betonu v tlaku lze určit také pomocí příčného kmitání, a to dle vztahu:

$$E_{crf} = 0,0789 \cdot c_1 \cdot L^4 \cdot f_f^2 \cdot \rho \cdot \frac{1}{i^2} \quad 10.5$$

kde E_{crf} je dynamický modul pružnosti v tlaku (tahu) v MPa (N/mm²),
 L je délka zkušebního tělesa v m,
 c_1 je korekční součinitel,
 f_f je naměřená vlastní frekvence příčného kmitání v kHz,
 ρ je objemová hmotnost materiálu v kg/m³,
 i je poloměr setrvačnosti průřezu zkušebního tělesa v m.

Korekční součinitel c_1 zahrnuje vliv smyku a setrvačnosti. Jeho hodnoty jsou pro odhad Poissonova čísla betonu $\mu = 0,20$ (což je tabulková, standardně uváděná hodnota) vypsány v Tab. 10.2. Pro výpočet c_1 se musí poměr i / L uvádět zaokrouhlený na 3 platné číslice. Výslednou hodnotu c_1 je nutné lineárně interpolovat!

Tabulka 10.2: Hodnoty korekčního součinitele c_1 .

i / L	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10
c_1	1,21	1,29	1,40	1,51	1,64	1,78

Poloměr setrvačnosti průřezu zkušebního tělesa je dán vztahem:

$$i = \frac{a}{\sqrt{12}} \quad 10.6$$

kde a je příčný rozměr hranolu, který je rovnoběžný se směrem úderu impulzního kladívka při zkoušení.

Po výpočtu E_{crL} a E_{crf} je výhodné určit, jak moc se vypočtené hodnoty dynamických modulů pružnosti v tahu a tlaku vzájemně liší. Odchylka ΔE_{cr} je dána vztahem:

$$\Delta E_{cr} = \frac{E_{crf} - E_{crL}}{E_{crL}} \cdot 100 \quad 10.7$$

Hodnota ΔE_{cr} je dána v % a může být jak kladná, tak i záporná. Přesahuje-li však její absolutní hodnota při správně provedeném výpočtu hodnotu 10 %, znamená to, že buď bylo měření provedeno chybně (byla určena minimálně jedna z vlastních frekvencí špatně), anebo zkušební těleso nemá v celém svém objemu rovnoměrný beton (nebo je poškozené, např. mikrotrhlinami).

Kromě modulu pružnosti v tahu a tlaku lze na základě měření rezonanční metodou stanovit také hodnoty dynamického modulu pružnosti betonu ve smyku, a to ze vztahu:

$$G_{cr} = 4 \cdot k \cdot L^2 \cdot f_t^2 \cdot \rho \quad 10.8$$

kde G_{cr} je dynamický modul pružnosti ve smyku v MPa (N/mm²),
 k je součinitel závislý na tvaru průřezu zkušební tělesa, pro čtverec $k = 1,183$,
 L je délka zkušební tělesa v m,
 f_t je naměřená vlastní frekvence kroutivého kmitání v kHz,
 ρ je objemová hmotnost materiálu v kg/m³.

Výhodou rezonanční metody je také možnost určit Poissonovo číslo zkoušeného materiálu. Hodnoty dynamického Poissonova čísla betonu lze určit ze vztahu:

$$\mu_{cr} = \frac{E_{crL}}{2 \cdot G_{cr}} - 1 \quad 10.9$$

Poissonovo číslo μ_{cr} může pro běžné materiály nabývat pouze hodnot v intervalu (0; 0,5). Vypočtené Poissonovo číslo se zaokrouhlí na 0,02 a protože se jedná o jeho dynamickou hodnotu, bude pravděpodobně dosahovat mírně vyšších hodnot než je 0,20.

10.3 Stanovení mrazuvzdornosti betonu

V případě, že je betonová konstrukce nebo její část vystavena vodě a současně střídavému působení kladných a záporných teplot, je nezbytné zhodnotit, zda na povrch betonu působí také libovolné rozmrazovací činidlo (nejčastěji posypová sůl a následně vzniklý roztok NaCl). Pokud totiž rozmrazovací činidlo na beton působí, degradační procesy jsou naprosto jiné než v případě, kdy je beton vystaven jen vodě a mrazu.

V případě, že rozmrazovací činidlo na beton působí, je výsledkem poškození betonu tzv. odlupování. Odlupování vlivem působení solí (přesněji jejich roztoků) je definováno jako povrchové poškození vzniklé působením mrazu a solného roztoku na povrch betonu a je řešeno v kapitole 8.2.

Konvenční působení mrazu na beton (bez chemických rozmrazovacích látek) je vzhledem k jeho porušení jiné. Když je beton v kontaktu s vodou, pak se vlivem jeho nasákavosti dostane voda do jeho pórové struktury. V případě, že dojde k jejímu zmrznutí, objevuje se riziko vzniku nejdříve mikrotrhlin a poté i trhlin v betonu.

Příčinou je expanze vody při změně z kapalného na pevné skupenství. Voda, která se nachází v kapilárních pórech betonu, se začíná měnit na ledovou tříšť přibližně při teplotě -0,5 °C (počátek mrznutí vody závisí na velikosti pórů, při -12 °C by však měla zmrznout veškerá kapilární voda). Vzniklý led má oproti vodě v kapalném stavu větší objem přibližně o 9 %. Toto rozpínání vody ve formě ledu vede ke vzniku vnitřního napětí v betonu, a to o velikosti řádově desítek MPa. Výsledkem je porušení vnitřní struktury betonu a následné nevratné snížení jeho základních materiálových vlastností.

A právě rezonanční metodu lze použít, kromě určení dynamické hodnoty modulu pružnosti, ke sledování míry porušení vnitřní struktury betonu, tedy ke stanovení jeho odolnosti proti zmrazování a rozmrazování.

10.3.1 Princip zkoušky

Podstata zkoušky stanovení mrazuvzdornosti betonu spočívá v určení relativních změn sledovaných vlastností betonu po jeho zmrazování a rozmrazování. V současné době je možné ke stanovení mrazuvzdornosti betonu použít dvou různých norem – ČSN 73 1322 a ČSN 73 1380. Jako hlavní hodnotící kritérium uvažuje norma ČSN 73 1322, která beze změn platí již od roku 1968, pokles pevnosti betonu v tahu ohybem. Norma ČSN 73 1380, která vstoupila v platnost v roce 2007, stanovuje mrazuvzdornost pomocí relativního dynamického modulu pružnosti.

Proces zmrazování a rozmrazování je u novější normy poměrně složitý, a proto se v praxi používá sporadicky. Obvykle se beton zkouší podle normy ČSN 73 1322, která jako možné hodnotící kritérium zmiňuje kromě referenční pevnosti v tahu ohybem i výsledky nedestruktivních elektroakustických metod. Jeden zmrazovací a rozmrazovací cyklus dle ČSN 73 1322 sestává ze 4 hodin zmrazování na vzduchu, kdy se teplota vzduchu pohybuje v rozmezí -15 °C až -20 °C, a ze 2 hodin rozmrazování ve vodě o teplotě +20 °C. Jeden zmrazovací a rozmrazovací (anglicky freeze-thaw, zkráceně **F-T**) cyklus tedy trvá 6 hodin. Ochlazování na požadovanou teplotu probíhá plynule po dobu 1,5 hodiny. Zkušební tělesa se podrobují požadovanému počtu cyklů po etapách, nejčastěji po 25 cyklech, tzn. po 1 týdnu.

10.3.2 Relativní změna dynamického modulu pružnosti

Aby bylo možné vyhodnotit změnu dynamického modulu pružnosti betonu v tahu a tlaku, tedy stanovit relativní dynamický modul pružnosti (**RDM**) pomocí rezonanční metody, je nutné provést měření vlastní frekvence podélného kmitání f_L a vlastní frekvence kroutivého kmitání f_t zkušebního tělesa před začátkem zkoušky a poté i po samotném zmrazování a rozmrazování. Míru porušení vnitřní struktury lze určit na základě výpočtu dle vztahu:

$$RDM_n = \left(\frac{X_n}{X_0} \right)^2 \cdot 100 \% \quad 10.10$$

kde RDM_n je relativní dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku v %,
 X je měřená vlastní frekvence v Hz,
 n je měření po počtu n zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů,
 0 je počáteční měření.

10.3.3 Postup měření

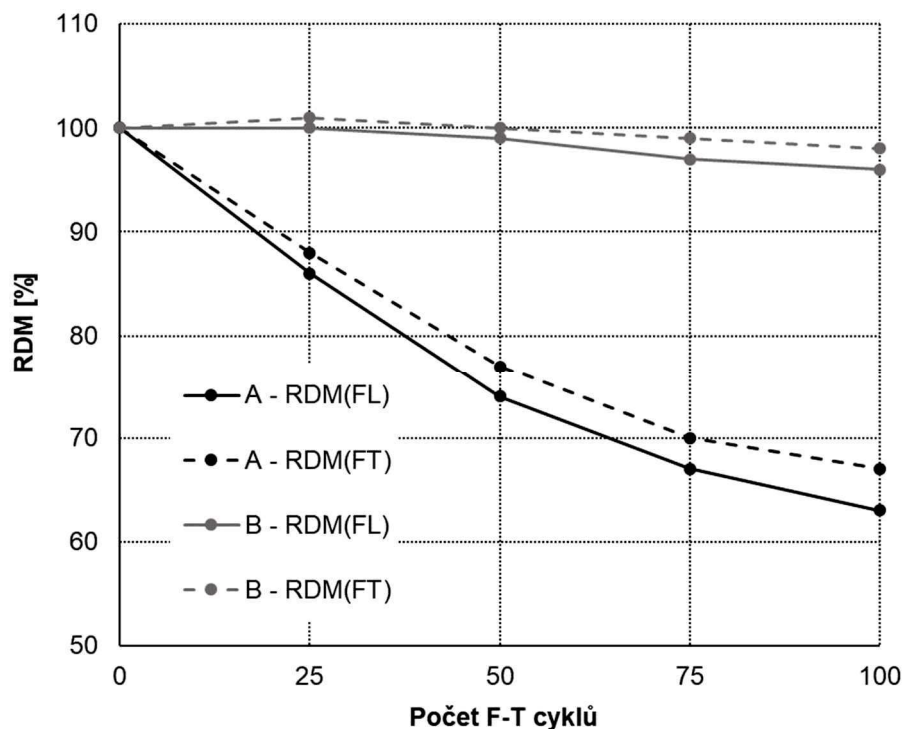
Všechna zkušební tělesa tvaru hranolu s jmenovitými rozměry 100 × 100 × 400 mm ze zkoušeného betonu (min. počet je 3 ks) musí být před začátkem měření nesmazatelně označena. Zkušební hranoly se ve stáří 28 dní vyjmou z vodní lázně. Po stanovení jejich hmotnosti a rozměrů se určí místa, kde bude umístěn snímač akustické emise a kam bude veden úder impulzním kladívkem. Tato místa musí být po celou dobu měření neměnná, stejně jako orientace tělesa při jeho umístění na podložku. Zpravidla se hranol pokládá tak, že původní horní povrch při výrobě (hrubá stěna) je při zkouškách stěnou boční - zadní. Měření vlastních frekvencí podélného a kroutivého kmitání probíhá dle postupu uvedeného v bodě 10.2.1. Toto prvotní měření je tzv. „nulté“ a k němu jsou následně vztaženy výsledky dalších měření.

Následně jsou všechny hranoly umístěny do zkušebního automatizovaného cyklovacího zařízení KD-20 a je zahájeno zmrazování a rozmrazování. Po příslušném počtu F-T cyklů (většinou 25) jsou tělesa vyjmuta ze zmrazovacího boxu. Poté je nutné provést všechna popsaná nedestruktivní měření stejně jako při nultém měření, s výjimkou měření rozměrů těles. Jestliže se jedná o měření po tolika cyklech, že zmrazování bude ještě pokračovat,

tělesa musí být ihned po nedestruktivním zkoušení umístěna zpět do zkušebního automatizovaného zařízení KD-20, aby se mohlo ve zmrazování pokračovat.

10.3.4. Zpracování výsledků měření

Ze zjištěných hodnot vlastních frekvencí f_L a f_t se vypočte relativní změna modulu pružnosti betonu v tahu a tlaku RDM_n dle (10.10). Vypočtené hodnoty se vynesou do grafu jako závislost relativní změny modulu pružnosti na počtu zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů. Ukázka takového grafu je na Obr. 10.4. Výsledky na zvoleném grafu jednoznačně ukazují, že beton „A“ není mrazuvzdorný, neboť jeho dynamický modul pružnosti poklesl po 100 F-T cyklech pod 70 % původní hodnoty. Naopak zkoušený beton „B“ nevykazuje téměř žádné porušení vnitřní struktury, a je proto mrazuvzdorný.



Obr. 10.4: Ukázka grafického znázornění relativních dynamických modulů zkoušených betonů.

Norma ČSN 73 1380 neuvádí žádné kritérium, o kolik může RDM poklesnout, aby mohl být beton ještě prohlášen za mrazuvzdorný. Norma ČSN 73 1322 uvádí, že pokud je pokles pevnosti v tahu ohybem vyšší než 25 %, nejedná se o mrazuvzdorný beton. Pro potřeby cvičení je stejná podmínka aplikována i na RDM – beton lze tedy prohlásit za **mrazuvzdorný, pokud RDM neklesne pod 75 %** po požadovaném počtu F-T cyklů.

Hlavní výhodou nedestruktivního měření hranolů při zkoušce mrazuvzdornosti je získání komplexního obrazu o chování každého jednotlivého trámce v celém průběhu zkoušky. Často se ukazuje, že jednotlivé trámce se od ostatních liší např. nedostatečným zhutněním či přítomností lokální dutiny, která se stává zdrojem šíření poruch dříve než zbývající část tělesa. Nedestruktivní metody mají význam zejména při vývoji nových receptur betonu, neboť snižují počet těles nutných pro zkoušku.

Protokol REZONANČNÍ METODA	R
Vyučující:	

STANOVENÍ DYNAMICKÝCH CHARAKTERISTIK BETONU

Na zkušebním hranolu stanovte dynamické parametry: modul pružnosti v tahu a tlaku, modul pružnosti ve smyku a Poissonovo číslo.

Rozměry, hmotnost, výpočet objemové hmotnosti, nákres měření:

Stanovení vlastních frekvencí zkušebního hranolu:

Vyhodnocení:

$E_{crL} =$

$E_{crf} =$

$G_{cr} =$

$\mu_{cr} =$

$\Delta E_{cr} =$

Dílčí závěr:

STANOVENÍ MRAZUVZDORNOSTI BETONU

Na betonech „A“ a „B“ určete míru porušení jejich vnitřní struktury vlivem zmrazování a rozmrazování. Pro zhodnocení mrazuvzdornosti posuzovaných betonů použijte RDM, posouzení proveďte pro 100 zmrazovacích a rozmrazovacích (F-T) cyklů.

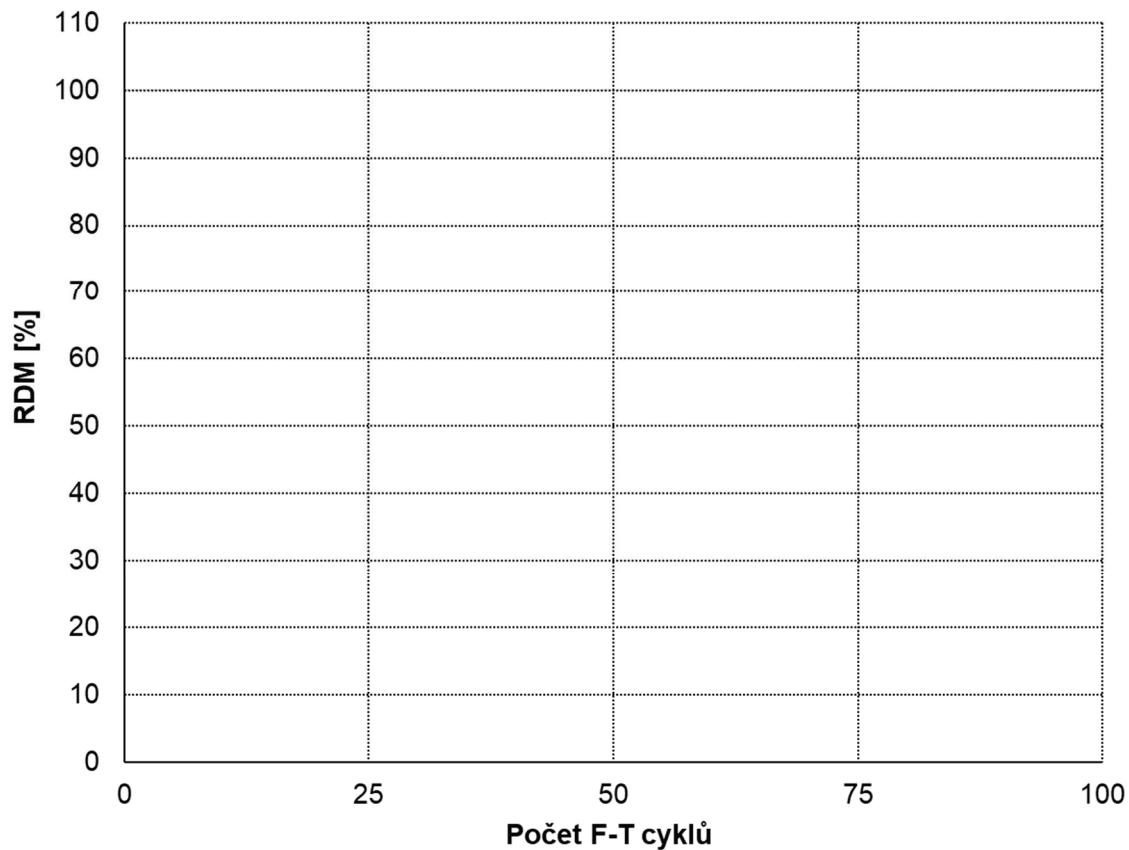
Stanovení vlastních frekvencí po 0, 25, 50, 75 a 100 F-T cyklech:

počet cyklů	beton A		beton B	
	f_L [Hz]	f_t [Hz]	f_L [Hz]	f_t [Hz]
0				
25				
50				
75				
100				

Výpočet RDM:

počet cyklů	beton A		beton B	
	RDM(FL)	RDM(FT)	RDM(FL)	RDM(FT)
0				
25				
50				
75				
100				

Grafické zhodnocení:



Dílčí závěr:

Zkoušky provedl/a a protokol zpracoval/a:

11 MODULY PRUŽNOSTI BETONU

V mezích Hookova zákona je modul pružnosti konstantou úměrnosti normálového napětí a poměrného podélného přetvoření, u betonu tedy směrnici přímkou proloženou počáteční částí deformačního diagramu betonu v tlaku. Obecně lze říci, že modul pružnosti je **měrná veličina tuhosti pevné látky** v tlaku (tahu).

Jedná se o tedy o poměrně důležitou charakteristiku betonu, která ovlivňuje chování konstrukcí, především štíhlých či předpjatých (z hlediska průhybů, dotvarování apod.).

11.1 Stanovení dynamického modulu pružnosti ultrazvukovou impulzovou metodou

Dynamický modul pružnosti může být vnímán jako tzv. tečnový modul pružnosti, což znamená, že se jedná o směrnici tečny deformačního diagramu v počátečním bodě. Dynamický modul pružnosti proto nabývá vyšších hodnot než modul pružnosti statický.

11.1.1 Postup měření

Ultrazvuková impulzová metoda je podrobně popsána v kapitole 7.4. Modul pružnosti se obvykle stanovuje pomocí přímého měření na zkušebních tělesech tvaru válce či hranolu a vypočte se dle normy ČSN 73 1371. Pro potřeby cvičení budou použity hranoly s jmenovitými rozměry 100 × 100 × 400 mm. Příčné rozměry zkušebních hranolů budou zjišťovány posuvným měřítkem s přesností alespoň 0,1 mm, délku je možné změřit ocelovým pravítkem s přesností alespoň 0,5 mm. K výpočtu dynamického modulu pružnosti je nutné znát objemovou hmotnost betonu, proto bude určena i hmotnost zkušebních hranolů.

Na konstrukci, prvku anebo zkušebním tělese se měření provádí tak, že se na protilehlé strany prvku přiloží sondy ultrazvukového přístroje (budič a přijímač) osově proti sobě. Následně se změří doba průchodu ultrazvukového vlnění materiálem. Při vyhodnocení se nejdříve vypočte rychlost šíření ultrazvukového vlnění a poté hledaná fyzikálně-mechanická vlastnost materiálu, v tomto případě dynamický modul pružnosti.

Pokud ultrazvukový přístroj není nakalibrován pomocí etalonu, je nutné určit mrtvý čas – dle vztahu (7.4) – o který je nutné všechny naměřené hodnoty opravit. Samotné měření na zkušebních hranolech probíhá v jeho podélné ose ve třech měřících základnách s označením 1, 2 a 3, viz Obr. 11.1.



Obr. 11.1: Schématické zobrazení měření doby průchodu UZ vlnění s vyznačenými měřícími liniemi; T je budič (transmitter) a R je přijímač (receiver).

Pro každou měřenou základnu se dle vztahu (7.5) vypočte rychlost UZ vlnění. Ze tří vypočtených rychlostí se poté určí průměrná hodnota rychlosti šíření ultrazvuku v_L v m/s se zaokrouhlením na jednotky m/s.

11.1.2 Vyhodnocení

U měření rychlosti ultrazvukového vlnění betonem hraje důležitou roli tzv. rozměrnost prostředí. Bude-li měření ultrazvukovou metodou prováděno na velkém bloku anebo na tenké tyčce ze stejného materiálu, zjištěné hodnoty rychlosti šíření ultrazvuku se budou lišit. Projeví se právě vliv rozměrnosti prostředí, neboli charakteristiky závislé na vztahu rozměrů měřeného objektu a délky vlny ultrazvukového vlnění. V případě měření na hranolu může být prostředí trojrozměrné, jednorozměrné anebo neurčité (přechodová oblast mezi oběma uvedenými

typy). Aby bylo možné rozměrnost prostředí stanovit, musí se nejdříve vypočítat délka vlny ultrazvukového vlnění v měřeném zkušebním tělese dle vztahu:

$$\lambda_L = \frac{v_L}{f} \quad 11.1$$

kde λ_L je délka vlny v m, v_L je průměrná rychlost šíření ultrazvukového vlnění v m/s a f je jmenovitá frekvence použitých UZ sond v Hz.

Prostředí je **jednorozměrné**, jestliže pro rozměry tělesa, kolmé ke směru šíření ultrazvukového vlnění, platí:

$$a, b, \text{ nebo } d \leq 0,2 \cdot \lambda_L \quad 11.2$$

Prostředí je **trojrozměrné**, jestliže platí:

$$a, b, \text{ nebo } d \geq 2 \cdot \lambda_L \quad 11.3$$

Na rozměrnosti závisí koeficient k . Pro jednorozměrné prostředí je $k = 1$, pro trojrozměrné je k závislý na hodnotě Poissonova čísla μ . Pro vybrané stavební materiály je hodnota Poissonova čísla uvedena v Tab. 11.1 a hodnoty koeficientu k jsou pro beton uvedeny v Tab. 11.2.

Tabulka 11.1: Poissonovo číslo μ vybraných stavebních materiálů.

materiál	μ	materiál	μ
ocel	0,27-0,30	beton	0,20
dřevo	0,14	pórobeton	0,20
keramika (cihla)	0,18	agloporitbeton	0,16
sklo	0,24	barytový beton	0,20

Tabulka 11.2: Koeficient k v závislosti na Poissonově čísle betonu.

μ	k	μ	k	μ	k	μ	k	μ	k
0,00	1,0000	0,12	1,0168	0,22	1,0685	0,32	1,1963	0,42	1,5978
0,04	1,0017	0,14	1,0236	0,24	1,0857	0,34	1,2406	0,44	1,8002
0,06	1,0039	0,16	1,0319	0,26	1,1061	0,36	1,2964	0,46	2,1502
0,08	1,0070	0,18	1,0420	0,28	1,1307	0,38	1,3682	0,48	2,9637
0,10	1,0113	0,20	1,0541	0,30	1,1602	0,40	1,4639	0,50	-

Pokud bude ve cvičení použit ultrazvukový přístroj se sondami o frekvenci 150 kHz, bude se vždy jednat o trojrozměrné prostředí.

Hodnota dynamického modulu pružnosti v tlaku a tahu se vypočte pomocí vztahu:

$$E_{cu} = \rho \cdot v_L^2 \cdot \frac{1}{k^2} \quad 11.4$$

kde E_{cu} je dynamický modul pružnosti v N/mm², ρ je objemová hmotnost betonu v kg/m³, v_L je rychlost šíření ultrazvukového vlnění v km/s a k je koeficient rozměrnosti prostředí (bezrozměrný). Vypočtená hodnota dynamického modulu pružnosti se zaokrouhlí na tři platné číslice.

11.2 Stanovení statického modulu pružnosti betonu v tlaku

Statické moduly pružnosti betonu jsou významné charakteristiky vyjadřující deformační vlastnosti materiálu. Zjišťují se z deformací, které nastávají při známém zatížení. Jsou také nazývány „sečnové“ moduly pružnosti, a proto nabývají menších hodnot než moduly pružnosti dynamické.

11.2.1 Princip měření

Zkušební těleso určené pro stanovení statického modulu pružnosti betonu v tlaku dle normy ČSN ISO 1920-10 může mít tvar hranolu nebo válce. Jeho štíhlost, tedy poměr mezi délkou a příčným rozměrem, však musí být rovna minimálně 2.

Principem zkoušení je zatěžování zkušební tělesa ve zkušebním lisu tlakem za současného měření vznikajících deformací. Zkouška probíhá cyklicky – jsou provedeny minimálně 3 cykly, přičemž zkušební těleso je během nich vystaveno měnícímu se zatížení. Úrovně zatížení, mezi kterými se cykluje, se volí tak, aby nedošlo k úplnému odtížení tělesa a současně aby zatěžování probíhalo v pružné oblasti (v oblasti platnosti Hookova zákona). Základní (nižší) hladina napětí je dle normy ČSN ISO 1920-10 vždy $\sigma_b = 0,5 \text{ MPa}$ (N/mm²) a horní hladina napětí by měla odpovídat hodnotě **jedné třetiny pevnosti zkoušeného betonu v tlaku** $\sigma_a = f_c/3 \text{ MPa}$ (N/mm²). Jedna třetina pevnosti v tlaku je zvolena právě z důvodu teoretického předpokladu, že beton se chová do této meze pružně.

11.2.2 Stanovení pevnosti v tlaku srovnávacích těles a zatěžovacích hladin

Z předchozího odstavce je jasné, že před zkouškou je nutné znát pevnost zkoušeného betonu v tlaku, aby mohla být korektně zvolena horní zatěžovací hladina napětí σ_a . Dle normy ČSN ISO 1920-10 se pevnost betonu v tlaku stanoví na třech srovnávacích zkušebních tělesech, která jsou shodná velikostí a tvarem a která byla vyrobena a ošetřována stejným způsobem jako tělesa, která budou použita pro stanovení statického modulu pružnosti.

Z průměrné hodnoty zjištěné pevnosti v tlaku srovnávacích těles f_c se určuje napětí použité ke stanovení statického modulu pružnosti ($f_c/3$).

Během zkoušky, kdy je ve zkoušeném betonu cyklicky měněna úroveň napětí v tlaku ze **základního napětí** σ_b na hodnotu **horního napětí** σ_a , se sleduje deformační odezva tělesa. Z úrovní napětí, která jsou již známa (σ_b je vždy 0,5 MPa a σ_a je 1/3 zjištěné pevnosti srovnávacích těles v tlaku), a ze zatěžované plochy zkušební tělesa se vypočte **základní** a **horní** síla:

$$F_b = 0,5 \cdot A \quad 11.5$$

$$F_a = \frac{f_c}{3} \cdot A \quad 11.6$$

kde F_b je základní síla v N, 0,5 je základní napětí v MPa, A je zatěžovaná plocha zkušební tělesa (vypočtená ze stanovených rozměrů tělesa) v mm², F_a je horní síla v N a f_c je průměrná pevnost v tlaku srovnávacích těles v MPa.

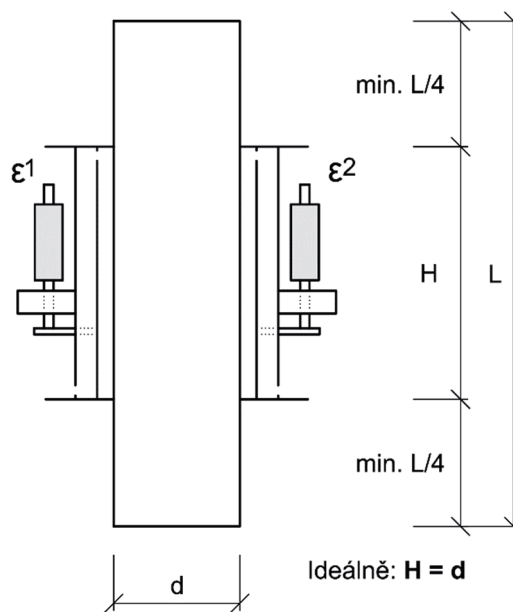
Hodnoty síly je nutné upravit zaokrouhlením podle stupnice použitého zkušební lisu (dle pokynů vyučujícího). Skutečné hodnoty základního napětí σ_b a horního napětí σ_a je nutné znovu vypočítat dle upravených hodnot síly.

11.2.3 Příprava zkušebních těles a centrace

Zkušební těleso se musí před samotnou zkouškou připravit. Velmi důležitá je rovinnost zatěžovaných ploch. Pokud těleso na zatěžovací desce lisu nestojí stabilně, musí se jeho plochy upravit – nejvhodnějším způsobem je zabroušení (např. pomocí korundového prášku).

Přístroje pro měření změn délky (v případě cvičení se bude jednat o mechanické tenzometry – tzv. Hollanovy můstky – s číselníkovými nebo digitálními úchylkoměry) musí být na bočních stranách tělesa připevněny tak, aby měřené body byly stejně vzdálené od obou konců zkušební tělesa a aby byly v podélné ose tělesa. Měřené body musí být současně umístěny tak, aby jejich vzdálenost od konců tělesa byla rovna alespoň jedné čtvrtině délky zkušební tělesa ($1/4 L$ – viz Obr. 11.2). Důvodem je skutečnost, že v oblasti tlačných desek lisu dochází ve zkušebním tělese při stejném zatížení k rozdílným deformacím než ve střední části tělesa. Dle normy ČSN ISO 1290-10 je ideální, pokud $L = d$.

Přetvoření se musí měřit nejméně na dvou protilehlých stranách zkušební tělesa, přičemž u těles zhotovených ve vodorovné poloze se měřicí základny umísťují na svislých výrobních plochách.

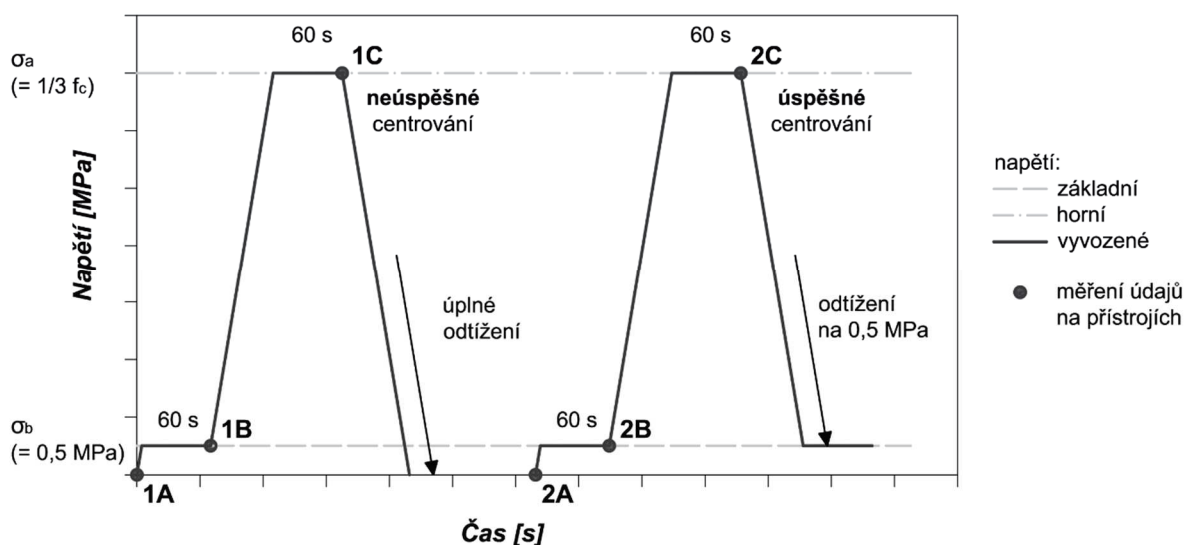


Obrázek 11.2: Umístění měřicího zařízení na zkušebním hranolu.

Při zatěžování zkušební tělesa je nesmírně důležité, aby zatížení působilo pokud možno rovnoměrně na celou jeho zatěžovanou plochu – tedy aby zatížení bylo centrické. Při zatěžování je tedy centrání tělesa nutné ověřit. Časový průběh centrování je znázorněn graficky na Obr. 11.3. Zkušební těleso s osazenými tenzometry se vloží dostředně do zkušební lisu (bod 1A). Následně se vyvodí základní napětí σ_b a po 60 s se odečtou údaje na všech přístrojích (bod 1B). Ve chvíli, kdy se mají odečíst hodnoty na měřicích přístrojích, provádí se odečet bezodkladně – určení hodnot musí být dokončeno nejpozději do 30 s. To platí pro všechny následující zatěžovací stavy celé zkoušky.

Následně se plynule zvyšuje napětí do hodnoty horního napětí σ_a a po době 60 s se opět odečtou údaje na všech přístrojích (bod 1C). **Jestliže se jednotlivá poměrná přetvoření ϵ (nebo přetvoření Δl) liší o více než 20 % od své průměrné hodnoty, zkušební těleso není vycentrováno, a proto se musí zcela odtížit.**

Na základě odečtených hodnot na jednotlivých tenzometrech se upraví poloha zkušební tělesa v lisu a celý postup se opakuje (body 2A až 2C). Pokud je zjištěno, že těleso opět není vycentrováno, celá procedura se znovu opakuje. Pokud proběhlo centrování úspěšně, odtíží se zkušební těleso na úroveň základního napětí σ_b a dokončí se celá zkouška, viz dále.



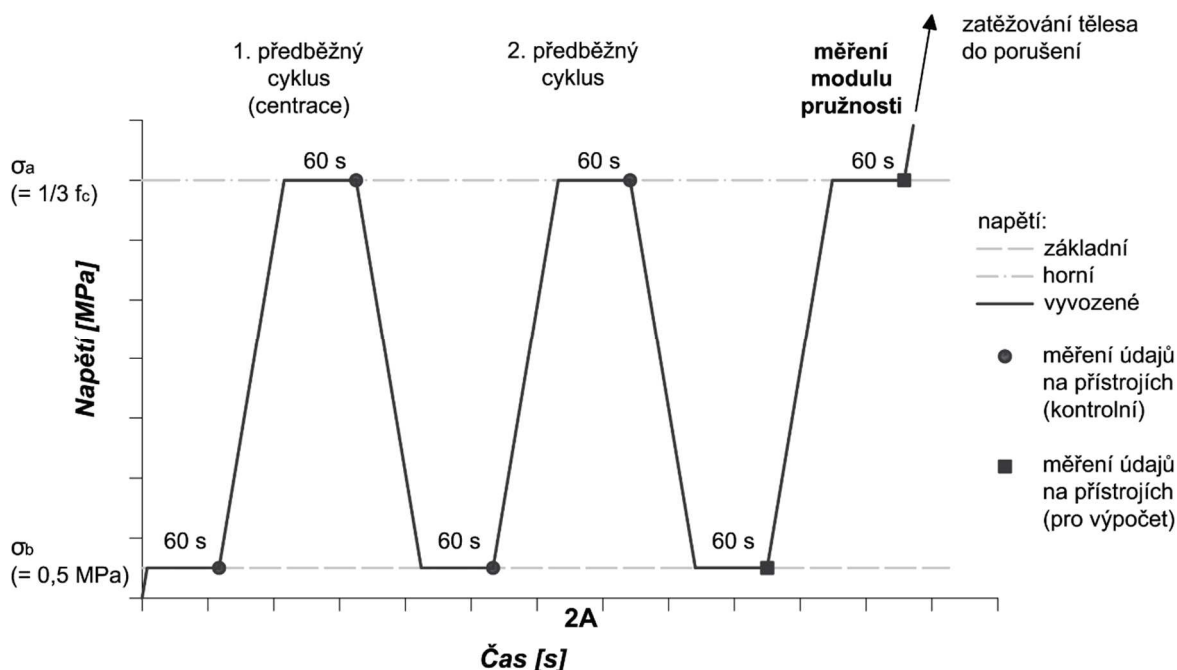
Obrázek 11.3: Grafické znázornění centrování zkušební tělesa.

11.2.4 Zatěžování zkušebního tělesa

Časový průběh zkoušky statického modulu pružnosti je znázorněn graficky na Obr. 11.4. Po úspěšném vycentrování tělesa se udržuje po dobu 60 s zatížení na základním napětí σ_b , po přečtení údajů na tenzometrech se zatížení zvyšuje plynule do hodnoty horního napětí σ_a , kde se po 60 s opět odečtou údaje na všech přístrojích.

Zatížení spodním napětím po dobu 60 s, odečtení hodnot, zatížení horním napětím po dobu 60 s a odečtení hodnot je jeden cyklus. Celá zkouška se skládá z minimálně 2 předběžných zatěžovacích cyklů, po nichž následuje měřicí zatěžovací cyklus. Hodnoty odečtené z tohoto poslední cyklu slouží pro výpočet statického modulu pružnosti E_c . Cyklus, při němž byla úspěšně ověřena centrace, lze považovat za 1. předběžný cyklus.

Po dokončení měření a odstranění měřicích přístrojů se zvětšuje zatížení zkušebního tělesa předepsanou rychlostí až do porušení. Jestliže se pevnost zkušebního tělesa σ_c liší od pevnosti srovnávacích těles f_c o více než 20 %, je nutné tuto okolnost uvést v protokolu.



Obrázek 11.4: Grafické znázornění průběhu zatěžování zkušebního tělesa.

11.2.5 Zpracování naměřených hodnot, výpočet napětí a poměrných deformací

Délkové změny jednotlivých základů (tenzometry 1 a 2) Δl^1 a Δl^2 jsou dány změnami čtení úchytkoměrů:

$$\Delta l = h_a - h_b \quad 11.7$$

kde Δl je délková změna základny v mm (nebo μm), h_a je čtení úchytkoměru na horním zatěžovacím napětí v mm (nebo μm) a h_b je čtení úchytkoměru na základním zatěžovacím napětí v mm (nebo μm).

Průměrná délková změna zkušebního tělesa $\Delta l^{1,2}$ je určena následujícím vztahem:

$$\Delta l^{1,2} = \frac{\Delta l^1 + \Delta l^2}{2} \quad 11.8$$

Je nutné si při dalším výpočtu dát pozor, zda je délková změna zkušebního tělesa $\Delta l^{1,2}$ na měřené základně určena v mm nebo v μm !

Průměrné poměrné přetvoření $\Delta\varepsilon$ se vypočte z následujícího vztahu:

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta l^{1,2}}{H} \quad 11.9$$

kde $\Delta l^{1,2}$ je průměrná délková změna základnen v mm nebo v μm , viz vztah (11.8) a H je délka měřicí základny mechanického tenzometru (ve cvičení budou použity tenzometry délky $H = 100 \text{ mm}$ nebo $H = 200 \text{ mm}$).

11.2.6 Výpočet modulu pružnosti

Modul pružnosti je definován jako poměr změny napětí a odpovídající změny pružného poměrného přetvoření, přesně v souladu s Hookovým zákonem. Průměrné poměrné přetvoření bylo vypočteno z obou měřených míst **v měřeném zatěžovacím cyklu**, viz vztahy (11.8) a (11.9). Změna napětí se určí jako rozdíl základního a horního vyvozeného napětí:

$$\Delta\sigma = \sigma_a - \sigma_b \quad 11.10$$

Statický modul pružnosti v tlaku E_c se poté vypočte ze vztahu:

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad 11.11$$

kde $\Delta\sigma$ je rozdíl napětí při zatěžování v MPa a $\Delta\varepsilon$ je průměrná změna poměrného přetvoření mezi horním a základním napětím v **m/m** (!).

Výsledný modul pružnosti E_c se poté uvádí v **GPa** (!) se zaokrouhlením **na nejbližších 0,1 GPa**.

11.3 Vyhodnocení

Jak již bylo uvedeno, dynamický modul pružnosti se od statického liší. Poměr mezi statickou a dynamickou hodnotou (tzv. zmenšovací součinitel) závisí především na kvalitě a stáří betonu. Obecně platí, že čím je beton méně kvalitní (nebo velmi mladý), tím je poměr mezi statickým a dynamickým modulem pružnosti nižší (může dosahovat hodnot nižších než 0,6), zatímco velmi kvalitní (a dostatečně vyzrálé) betony mohou mít tento poměr relativně vysoký (číslo přesahující hodnotu 0,9).

Navíc platí, že ani obě dynamické metody (ultrazvuková impulzová vs. rezonanční – viz kapitola 10.2) neposkytují shodné výsledky. Rozdíly ve výsledcích dynamických modulů z obou standardizovaných postupů připouští i norma ČSN 73 2011, ve které jsou uvedeny odlišné zmenšovací součinitele κ_u a κ_r pro stejné pevnostní třídy betonu, viz Tab. 11.3.

Tab. 11.3: Zmenšovací koeficienty κ_u a κ_r pro přepočet dynamické hodnoty modulu pružnosti betonu na hodnotu statickou pro zjištěné třídy betonu dle normy ČSN 73 2011.

Třída betonu	Zmenšovací koeficient κ_u	Zmenšovací koeficient κ_r
C 8/10	0,62	0,81
C 12/15	0,71	0,86
C 16/20	0,76	0,88
C 25/30	0,81	0,90
C 30/37	0,83	0,91
C 35/45	0,86	0,93
C 40/50	0,88	0,94
C 45/55	0,90	0,95

Ve cvičení bude určen pro zkoušené betony zmenšovací součinitel κ_u dle vztahu:

$$\kappa_u = \frac{E_c}{E_{cu}} \quad 11.12$$

Výsledek zkoušky statického modulu pružnosti lze porovnat se směrnou (tzn. průměrnou) hodnotou modulu pružnosti, kterou ke každé pevnostní třídě uvádí ČSN EN 1992-1-1 ed. 2 (Eurokód 2), viz Tab. 11.4.

Tabulka 11.4: Směrné hodnoty modulů pružnosti podle Eurokódu 2.

Pevnostní třída betonu	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
E_c [GPa]	26,0	27,5	29,0	30,5	32,0	33,5	35,0	36,0	37,0

Protokol MODULY PRUŽNOSTI BETONU	E
Vyučující:	

DYNAMICKÝ MODUL PRUŽNOSTI BETONU V TLAKU (TAHU)

Stanovte dynamický modul pružnosti E_{cu} zkoušených betonů pomocí ultrazvukové impulzové metody. Uvažujte, že se bude jednat o trojrozměrné prostředí.

Rozměry, hmotnost, výpočet objemové hmotnosti, nákres měření:

hranol	b	h	L	m

Stanovení mrtvého času a doby průchodu UZ vlnění zkušebními tělesy (nezapomeňte doplnit jednotky):

hranol	t_E	etanol	T_0

hranol	t_1	t_2	t_3	opr. t_1	opr. t_2	opr. t_3

Vyhodnocení E_{cu} :

Dílčí závěr k E_{cu} :

STATICKÝ MODUL PRUŽNOSTI BETONU V TLAKU

Stanovte statický modul pružnosti E_c zkoušených betonů. Nutné informace sdělí vyučující.

Určení zatěžovacích hladin napětí σ_b a σ_a a odpovídajících sil F_b a F_a :

Měření deformací:

	Δ_1	Δ_2	
1. p. c. (cen.)			(F_B)
			(F_A)
2. p. c.			(F_B)
			(F_A)
m. c.			(F_B)
			(F_A)

	Δ_1	Δ_2	
1. p. c. (cen.)			(F_B)
			(F_A)
2. p. c.			(F_B)
			(F_A)
m. c.			(F_B)
			(F_A)

Výpočet statického modulu pružnosti E_c :

Výpočet pevnosti v tlaku hranolů po zkoušce E_c :
(Určete, zda zkouška vyhověla normě, tedy zda se skutečná pevnost v tlaku nelišila od očekávané pevnosti v tlaku o více než 20 %.)

Dílčí závěr k E_c :

CELKOVÉ VYHODNOCENÍ STANOVENÝCH MODULŮ PRUŽNOSTI

Vypočítejte pro zkoušené betony zmenšovací součinitele κ_u a porovnejte je s normovými hodnotami (viz Tab. 11.3).

Porovnejte vypočítané statické moduly pružnosti s normovými hodnotami (viz Tab. 11.4).

Dílčí závěr:

Zkoušky provedl/a a protokol zpracoval/a: _____

12 ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA DÍLCE

Zatěžovací zkoušky stavebních konstrukcí a dílců jsou účinným nástrojem pro prokázání únosnosti a spolehlivosti daných prvků zejména tam, kde nemusí být zcela přesné výstupy z analytického posouzení, popř. u složitých konstrukcí.

V případě jednoduchých zatěžovacích zkoušek, jako jsou např. zatěžovací zkoušky panelů, překladů apod., se pak jedná zejména o kontrolní a průkazní zkoušky ve výrobě.

K měření sledovaných charakteristik jako je síla, průhyb, protažení aj. se využívají specializované měřicí ústředny s připojenými patřičnými snímači (siloměry, průtahoměry, snímače deformací atd.).

12.1 Cíle zatěžovacích zkoušek

Cíle zatěžovací zkoušky je nutné před vlastním provedením zkoušek jednoznačně stanovit, mohou to být např.:

- ověření spolehlivosti daného prvku,
- ověření výpočetních modelů,
- získání vstupních dat pro ověření výpočetních modelů,
- ověření spolehlivosti a/nebo chování prvku za předpokladu, že není možné bezpečně zjistit všechny potřebné parametry pro výpočet.

12.2 Druhy zatěžovacích zkoušek

Z hlediska **způsobu hodnocení výsledků** se dělí na:

- zatěžovací zkoušky prováděné do dosažení únosnosti prvku,
- zatěžovací zkoušky prováděné bez dosažení únosnosti prvku.

Z hlediska **účelu** se dělí na:

- průkazní, sloužící k ověření spolehlivosti před zahájením výroby,
- kontrolní, sloužící k ověřování spolehlivosti v průběhu výroby,
- zkoušky existujících stavebních konstrukcí,
- ostatní, např. studijní, výzkumné apod.

12.3 Příprava zatěžovací zkoušky

Před zahájením zatěžovacích zkoušek se vlastní plán realizace zhotoví v souladu s příslušnými normovými předpisy, přičemž se obvykle přihlédne k:

- cílům a vlastnímu účelu zatěžovací zkoušky,
- požadavkům na vlastní provedení zatěžovací zkoušky,
- tvaru a rozměrům zkoušené konstrukce nebo dílce apod.

Příprava obvykle probíhá v několika stupních, vzhledem ke komplexnosti problému často zahrnujících činnosti od diagnostiky konstrukce, zkoušení materiálů, numerické analýzy a vlastního provedení zatěžovací zkoušky.

V rámci přípravy zatěžovací zkoušky jsou stupně přípravy a plánování následující:

- shromáždění údajů o konstrukci popř. zkušebním prvku,
- podklady pro statickou zatěžovací zkoušku,
- program statické zatěžovací zkoušky.

12.4 Požadavky na zatěžovací zkoušky

- Zatěžovací zkouška má být provedena tak, aby byly minimalizovány vlivy, které by mohly nepříznivě ovlivnit nebo zkreslit výsledky zatěžovací zkoušky.
- Při zkouškách ve zkušebně zabezpečit takové podmínky, které se co nejvíce přibližují reálným podmínkám působení skutečné konstrukce za provozu.
- Při zkouškách na stavbě je nutné stanovit míru spolupůsobení ostatních částí konstrukce a, pokud to podmínky umožňují, zamezit spolupůsobení nenosných součástí stavby.
- Při provádění zkoušky postupně zvyšovat intenzitu zatížení s měřením odezvy konstrukce, tj. deformace, protažení apod.
- Měřicí přístroje, metody a postupy zkoušení při zatěžovací zkoušce volit tak, aby splňovaly podmínku nezkrácení zobrazení a odpovídaly požadované přesnosti měření.
- Odchylka skutečného zatížení od požadované hodnoty nesmí přesáhnout 3 % při zkoušce v laboratorních podmínkách a 5 % při zkouškách terénních na stavbě.

12.5 Postup zkoušení

Jsou definovány 3 základní zatěžovací stupně silových účinků zatížení:

- a) účinek zatížení E_1 – charakteristická hodnota stálého zatížení,
- b) účinek zatížení E_2 – kombinace charakteristických hodnot stálého a proměnného zatížení,
- c) účinek zatížení E_3 – kombinace návrhových hodnot stálého a proměnného zatížení.

12.5.1 Základní zatěžovací postup

- 1) Konstrukce je před zahájením zkoušky zatížena výchozím zatížením E_0 .
- 2) Konstrukce se přitíží na hodnotu zatížení E_1 (bod 1 v grafu na Obr. 12.1).
- 3) Po ustálení deformačního účinku (bod 2 v grafu na Obr. 12.1) se hodnota zatížení zvýší na hodnotu E_2 (bod 3 v grafu na Obr. 12.1).
- 4) Po ustálení deformačního účinku (bod 4 v grafu na Obr. 12.1) se hodnota zatížení zvýší na hodnotu E_3 (bod 5 v grafu na Obr. 12.1).
- 5) Po ustálení deformačního účinku (bod 6 v grafu na Obr. 12.1) se konstrukce (prvek) odlehčí na hodnotu E_1 (bod 7 v grafu na Obr. 12.1).
- 6) Po ustálení deformačního účinku (bod 8 v grafu na Obr. 12.1) se hodnota zatížení zvýší na hodnotu $E_3 + 10$ až 20 % navíc (bod 9 v grafu na Obr. 12.1).
- 7) Po ustálení deformačního účinku (bod 10 v grafu na Obr. 12.1) se konstrukce (prvek) odlehčí na hodnotu E_1 (bod 11 v grafu na Obr. 12.1) a opět se po ustálení deformací odečte její hodnota (bod 12 v grafu na Obr. 12.1), viz větev „a“.
- 8) V dalších zatěžovacích cyklech se opakuje postup mezi body 8 až 12 vždy s přitížením o cca dalších 10 – 20 % z hodnoty E_3 .

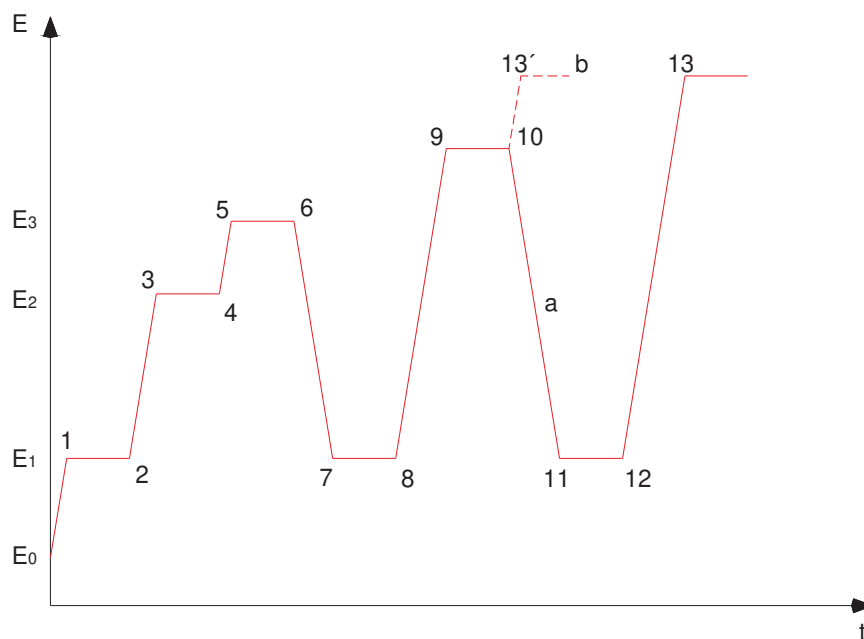
V odůvodněných případech je možné zkoušku provést tak, že v bodě 10 se již konstrukce neodlehčuje a zatížení se postupně v každém kroku zvýší o 10 – 20 % z hodnoty odpovídající zatížení E_3 , viz větev „b“ na Obr. 12.1.

Zatěžovací zkouška do dosažení únosnosti konstrukce je provedena dle základního zatěžovacího postupu. Dosažením mezní síly je zkouška ukončena. Podmínky dosažení únosnosti konstrukce budou zadány v rámci úlohy.

Zatěžovací zkouška bez dosažení únosnosti konstrukce je provedena dle základního zatěžovacího postupu až do předepsaného bodu 8 na Obr. 12.1.

12.6 Hodnocení výsledků zatěžovací zkoušky

Výsledky zatěžovací zkoušky se u zkoušené konstrukce hodnotí z hlediska mezních stavů únosnosti a mezních stavů použitelnosti v závislosti na cílech, druhu a účelu zkoušky.



Obrázek 12.1: Základní zatěžovací postup.

12.6.1 Hodnocení výsledků z hlediska mezního stavu únosnosti

Při zatěžovací zkoušce do dosažení únosnosti konstrukce se zkoušená konstrukce považuje za spolehlivou z hlediska mezního stavu únosnosti, splňuje-li zároveň tato kritéria:

- návrhová hodnota odolnosti v rozhodujícím průřezu R_{ed} odvozená z výsledků zkoušek je větší nebo rovna účinku zatížení v rozhodujícím průřezu stanovenému podle norem pro navrhování konstrukcí,
- při zatížení na hodnotu E_3 a následném odlehčení na hodnotu E_1 dle zatěžovacího postupu uvedenému na Obr. 12.1 se určí celkový deformační účinek $S_{tot,ULS}$ (rozdíl měření deformace v bodech 6 a 2) a trvalý deformační účinek $S_{r,ULS}$ (rozdíl měření deformace v bodech 8 a 2).

Pro poměr mezi trvalým a celkovým deformačním účinkem musí platit vztah:

$$S_{r,ULS} / S_{tot,ULS} \leq \lambda_1, \quad 12.1$$

kde $\lambda_1 = 0,25$ pro železobetonové konstrukce.

12.6.2 Experimentálně stanovená odolnost konstrukce

Při zatěžovací zkoušce do dosažení únosnosti konstrukce/dílce se na základě výsledků zkoušek vyhodnotí charakteristická hodnota R_{ek} veličiny R_e , která popisuje experimentálně zjištěnou odolnost konstrukce.

V případě většího počtu zkoušek je možné stanovit bodový odhad variačního koeficientu V_{Re} přímo z jednotlivých výsledků zkoušek. V případě malého počtu zkoušek se při vyhodnocení R_{ek} doporučuje vycházet z předpokladu, že je znám variační koeficient V_{Re} , a uvažovat jeho konzervativní horní odhad hodnotou 0,166.

Návrhová hodnota R_{ed} se vypočte dle následujícího postupu:

$$m_{Re} = \Sigma R_{e,i} / n \quad 12.2$$

$$s_{Re} = [\Sigma(R_{e,i} - m_{Re})^2 / (n - 1)]^{1/2} \quad 12.3$$

$$V_{Re} = s_{Re} / m_{Re} \quad 12.4$$

$$R_{ek} = m_{Re} (1 - k_n V_{Re}) \quad 12.5$$

$$R_{ed} = R_{ek} / \gamma_R \quad 12.6$$

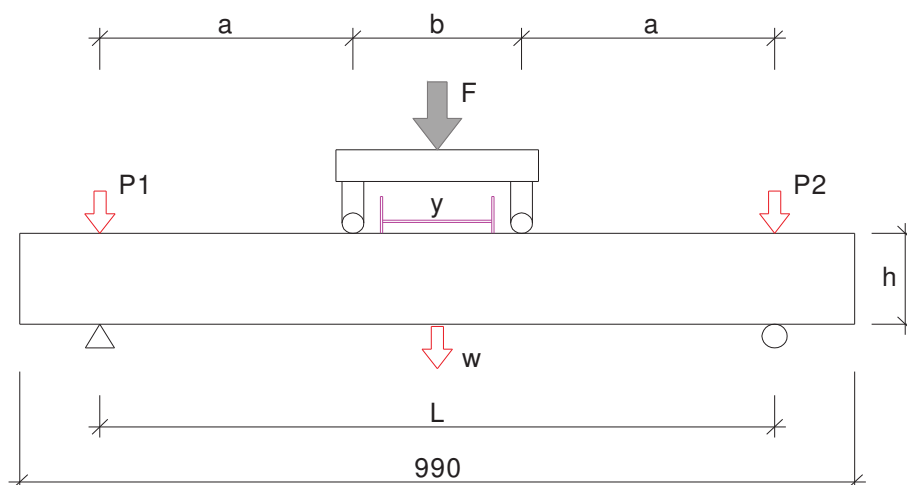
kde: m_{Re} je průměrná hodnota souboru výsledků,
 $R_{e,i}$ je jednotlivé výsledky,
 n je počet výsledků,
 s_{Re} je výběrová směrodatná odchylka,
 k_n je součinitel odhadu 5% kvantilu, pro 6 vzorků je roven 1,77
 V_{Re} je variační koeficient,
 R_{ek} je charakteristická hodnota normálního rozdělení odolnosti,
 γ_R je součinitel odolnosti pro beton = 1,5,
 R_{ed} je návrhová hodnota normálního rozdělení odolnosti.

12.7 Zatěžovací zkouška stavebního dílce

Proveďte a vyhodnoťte kontrolní zatěžovací zkoušku železobetonového dílce z lehkého betonu o jmenovitých rozměrech 990 x 115 x 115 mm. V rámci úlohy budeme provádět následující úkoly:

- 1) geometrické uspořádání zkoušky
- 2) stanovení teoretické únosnosti železobetonového prvku
- 3) zatěžovací rozvaha
- 4) příprava a provedení zatěžovací zkoušky
- 5) vyhodnocení zatěžovací zkoušky

12.7.1 Geometrické uspořádání zkoušky, měření deformací



Obrázek 12.2: Geometrické uspořádání zkoušky.

Na Obr. 12.2 je znázorněno geometrické uspořádání zatěžovací zkoušky a způsob zatěžování daného prvku. Rozmístění snímačů deformace je znázorněno obrysovými šipkami. Měřený průhyb w je v průběhu vyhodnocení upraven o příslušný průměrný pokles v podporách. Součástí měření je sledování deformací betonu v horních tlačných vláknech uprostřed rozpětí prvku.

12.7.2 Základní charakteristiky zkoušeného prvku

Tabulka 12.1: Tabulkové charakteristiky zkoušeného prvku.

rozměry překladu	délka uložení	moment únosnosti	maximální síla v 1/2 rozpětí	průhyb od zatížení	limitní průhyb L/250	únosnost ve smyku
[mm]	[mm]	[kNm]	[kN]	[mm]	[mm]	[kNm]
115 x 115 x 990	120	1.31	6.99	0.7	3.5	5.1

12.7.3 Zatěžovací rozvaha

Na základě provedené teoretické momentové únosnosti prvku a jeho známé geometrie při plánované zatěžovací zkoušce lze provést teoretický výpočet velikosti jednotlivých zatěžovacích kroků s ohledem na statické uspořádání zkoušky.

Reálné zatížení na prvek je uvažované jako spojité. Pro studijní účel zatěžovací zkoušky je nezbytné silový účinek zatížení uprostřed rozpětí přepočítat na zatížení dvou silových účinků, tj. uspořádání ve formě čtyřbodového ohybu, tak aby zůstalo zachováno totožné ohybové namáhání na průřezu uprostřed rozpětí.

Ohybový moment od maximální síly v 1/2 rozpětí prvku:

$$M = 1/4 \cdot F \cdot L \quad 12.7$$

Ohybový moment ze zatěžovací zkoušky:

$$M = 1/2 \cdot F \cdot a \quad 12.8$$

12.7.4 Napětí v betonu při maximální dosažené síle F

$$\varepsilon_m = \frac{\Delta L}{L} \quad 12.9$$

kde: ε_m je poměrná deformace v měřeném místě [$\mu\text{m}/\text{m}$],
 ΔL je změna délky měřicí základny [μm],
 L je délka měřicí základny [$L = 0,12 \text{ m}$].

Odpovídající napětí v tahu (tlaku) průřezu vypočítáme dle vztahu:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad 12.10$$

kde: ε je hodnota pružné deformace určená odporovými tenzometry – viz vztah (12.9),
 E je modul pružnosti betonu 20000 [N/mm^2],
 σ je napětí [N/mm^2].

Protokol
ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA DÍLCE

ZD

Vyučující:

Geometrie prvku, uspořádání zatěžovací zkoušky:

Přepočet max. síly v 1/2 rozpětí z tabulkových charakteristik na reálné uspořádání zatěžovací zkoušky:

Zatěžovací rozvaha:

1) zatížení výchozím zatížením	$E_0 = \dots\dots\dots$ kN
2) charakteristickou hodnotou stálého zatížení	$E_1 = \dots\dots\dots$ kN
3) kombinace charakteristických hodnot stálého a proměnného zatížení	$E_2 = \dots\dots\dots$ kN
4) kombinace návrhových hodnot stálého a proměnného zatížení	$E_3 = \dots\dots\dots$ kN
5) odtížení charakteristickou hodnotou stálého zatížení	$E_1 = \dots\dots\dots$ kN

Výstupy ze zatěžovací zkoušky:					
Zatížení [kN]	Odpovídající deformace [mm]				tenzometr
	podpora P1	střed W	podpora P2	průhyb prvku	Y [mm]
E_0					
E_1					
E_2					
E_3					
E_1					
max F					
$S_{r,ULS}$					
$S_{tot,ULS}$					

Průběh zatěžovací zkoušky, graf (závislost zatížení/průhyb):

Vyhodnocení zatěžovací zkoušky z hlediska mezního stavu únosnosti:

Experimentálně stanovená odolnost konstrukce:		
Maximální zatěžovací síla prvku č. 1	$R_{e,1} =$	kN
Maximální zatěžovací síla prvku č. 2	$R_{e,2} =$	kN
Maximální zatěžovací síla prvku č. 3	$R_{e,3} =$	kN
Maximální zatěžovací síla prvku č. 4	$R_{e,4} =$	kN
Maximální zatěžovací síla prvku č. 5	$R_{e,5} =$	kN
Maximální zatěžovací síla prvku č. 6	$R_{e,6} =$	kN

Napětí v tlačeném betonu při maximální zatěžovací síle F:

Závěr:
.....
.....
.....

Zkoušky provedl/a a protokol zpracoval/a: _____

13 VZOROVÉ PŘÍKLADY A ZÁPOČET

Zápočet může být udělen, pokud má student vypracovány všechny protokoly správně (a získal příslušné podpisy na titulní straně cvičebnice) a vypočteny níže uvedené příklady.

Součástí zkoušky z předmětu BIA002 jsou kromě teoretických otázek také příklady. Tematické okruhy příkladů jsou shodné s jednotlivými úlohami v této cvičebnici (pozor, nejen s protokoly). Uvedené příklady jsou vzorové – takové a jim podobné jsou součástí zkoušky.

Příklad 1

Vypočtete změnu hladiny statického napětí $\Delta\sigma$ v N/mm^2 , pokud byly v měřeném místě odečteny následující hodnoty čtení na strunovém tenzometru typu TSR/5,5:

nulové čtení před zatížením $f_0 = 931 \text{ Hz}$,

čtení po zatížení $f = 965 \text{ Hz}$.

Modul pružnosti materiálu v měřeném místě je $E = 210000 \text{ N/mm}^2$.

Konstanta použitého typu strunového tenzometru $K = 2,14 \cdot 10^{-3} \text{ } \mu\text{m/m} \cdot \text{Hz}^2$.

Výsledek uveďte v N/mm^2 zaokrouhlený na 3 platné číslice.

Příklad 2

Vypočtete nenakalibrovaným přístrojem naměřenou dobu průchodu impulzu ultrazvukového vlnění betonovou stěnou v μs , když víte, že zjištěná rychlost šíření impulzu ultrazvukového vlnění touto stěnou tloušťky 250 mm byla 4220 m/s. Doba průchodu impulzu ultrazvukového vlnění etalonem je 111,2 μs a časová charakteristika etalonu je 109,8 μs .

Výsledek uveďte v μs zaokrouhlený na 3 platné číslice.

Příklad 3

Určete, jakou silou byl odtržen kruhový terč průměru 50,0 mm při zkoušce soudržnosti povrchové úpravy betonu s podkladem, když stanovená soudržnost byla 2,9 MPa. Výsledek uveďte v kN zaokrouhlený na 3 platné číslice.

Příklad 4

Stanovte dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu betonu, ze kterého je vyrobený hranol, jehož první vlastní frekvence příčného kmitání je 2,06 kHz. Hranol má rozměry $a = 100$ mm, $b = 100$ mm, $L = 400$ mm a hmotnost $m = 9,25$ kg. Výsledek uveďte v N/mm^2 zaokrouhlený na 3 platné číslice.

Příklad 5

Jaký je součinitel odolnosti betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek D1 (tzn. kolik cyklů je potřeba k odpadu 1000 g/m^2), jestliže víte, že u zkoušeného betonového tělesa byl zjištěn odpad 174 g/m^2 po 25 zmrazovacích a rozmrazovacích cyklech, 402 g/m^2 po 50 cyklech, 789 g/m^2 po 75 cyklech a 1553 g/m^2 po 100 cyklech? Jedná se již o součtové hodnoty odpadu. Výsledek uvádějte na celé cykly (celá čísla).

Příklad 6

Jaká pevnost v tlaku srovnávacích těles f_c byla zjištěna před zkouškou statického modulu pružnosti betonu v tlaku E_c , jestliže při samotné zkoušce statického modulu pružnosti E_c bylo naměřeno průměrné poměrné zkrácení základěn $\Delta\varepsilon = 0,326$ mm/m a následně byl vypočten statický modul pružnosti $E_c = 21200$ N/mm²?

Výsledek uveďte v N/mm² zaokrouhlený na 3 platné číslice.

Příklad 7

Betonový sloup kruhového průřezu průměru 200 mm má v nezatíženém stavu výšku 2,5 m. Při centrickém zatížení silou 420 kN se zkrátí o 1,25 mm. Jaká je hodnota statického modulu pružnosti v tlaku betonu, ze kterého je sloup vyroben? Uvažujte, že zatížení se nachází v oblasti pružných deformací. Při výpočtu zanedbejte betonářskou výztuž.

Výsledek uveďte v GPa zaokrouhlený na 3 platné číslice.

Název	ZKUŠEBNICTVÍ A TECHNOLOGIE - CVIČEBNICE
Autor	Kolektiv autorů
Nakladatelství	Fakulta stavební, Brno
Vyšlo	září 2023
Vydání	6. aktualizované

Tato publikace neprošla redakční ani jazykovou úpravou

ISBN 978-80-7623-091-0