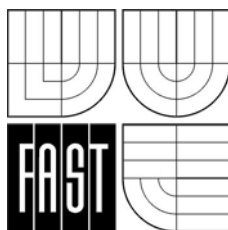


**Ing. Pavel Schmid, Ph.D.**

**ZKUŠEBNICTVÍ A**  
**TECHNOLOGIE**

MODUL BI02-M02  
**STAVEBNÍ ZKUŠEBNICTVÍ**



Jazyková korektura nebyla provedena, za jazykovou stránku odpovídá autor.

© ...Ing. Pavel Schmid, Ph.D.

# OBSAH

<b>1</b>	<b>Úvod.....</b>	<b>5</b>
1.1	Cíle .....	5
1.2	Požadované znalosti .....	5
1.3	Doba potřebná ke studiu.....	5
1.4	Klíčová slova.....	5
<b>2</b>	<b>Měření posuvů a deformací.....</b>	<b>7</b>
2.1	Úvod.....	7
2.2	Deformace .....	7
2.3	Měření deformací .....	7
2.4	Měření průhybů a posunutí .....	9
2.5	Měření relativních deformací .....	10
<b>3</b>	<b>Zatěžovací zkoušky stavebních dílců a konstrukcí .....</b>	<b>15</b>
3.1	Význam zatěžovací zkoušky .....	15
3.2	Členění a názvosloví zatěžovacích zkoušek.....	15
3.3	Zkušební zařízení a měřicí přístroje .....	16
<b>4</b>	<b>Tvrdoměrné metody.....</b>	<b>19</b>
4.1	Přehled tvrdoměrných metod .....	19
4.2	Tvrdoměrné metody zkoušení betonu .....	20
4.3	Tvrdoměrné metody zkoušení oceli .....	23
4.4	Tvrdoměrné metody zkoušení dřeva .....	26
4.5	Metody zkoušení cihel .....	27
4.6	Metody zkoušení malty .....	28
<b>5</b>	<b>Elektroakustické nedestruktivní metody .....</b>	<b>29</b>
5.1	Přehled elektroakustických nedestruktivních metod (EA NDT).....	29
5.2	Možnosti aplikace metod .....	31
5.3	Ultrazvukové metody (UZ) .....	32
5.4	Rezonanční metoda .....	37
<b>6</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>43</b>
<b>7</b>	<b>Studijní prameny .....</b>	<b>45</b>
7.1	Seznam použité literatury .....	45
7.2	Seznam doplňkové studijní literatury.....	45
7.3	Odkazy na další studijní zdroje a prameny .....	46
<b>8</b>	<b>Klíč.....</b>	<b>47</b>



# 1 Úvod

Studijní opora je součástí modulů BI02\_M01 až 4. Jedná se o učební texty předmětu Zkušebnictví a technologie. V module M01 je podána část technologie. V modulech M02-04 pak část zkušebnictví. Moduly M02-03 obsahují teoretickou podporu pro modul M04, kde jsou návody k provádění praktických zkoušek stavebních konstrukcí, materiálů a dílců. V module M04 jsou zařazeny korespondenční úkoly za část zkušebnictví.

## 1.1 Cíle

Modul M02 podává encyklopedický přehled o postupech zkoušení materiálů, dílců, konstrukcí a principech nedestruktivních metod používaných ve stavebnictví. V jednotlivých kapitolách jsou čtenáři seznámeni s přístrojovými možnostmi v oboru měření posunů a deformací (kapitola 2), podstatou zatěžovacích zkoušek stavebních prvků a konstrukcí (kapitola 3), tvrdoměrnými metodami zkoušení materiálů nosných konstrukcí (kapitola 4) a elektroakustickými nedestruktivními metodami (kapitola 5).



## 1.2 Požadované znalosti

Pro porozumění studijního textu jsou nezbytné znalosti středoškolské fyziky a matematiky a znalosti o stavebních materiálech a jejich zkoušení, získané v 1. ročníku studia na FAST v rámci předmětu Stavební látky.



## 1.3 Doba potřebná ke studiu

Předpokádaná doba potřebná ke studiu je při odpovídající úrovni požadovaných znalostí 6 hodin ( t.j. 1,5 hodiny na kapitolu)



## 1.4 Klíčová slova

experiment, měření, pružná deformace, plastická deformace, posun, poměrná deformace, modul pružnosti, mechanické snímače, optické snímače, elektrické snímače, zatěžovací zkouška, nedestruktivní metody zkoušení (NDT) tvrdost, pevnost, vlnění, ultrazvukové metody, rezonanční metoda, hodnocení vlastností betonu.





## 2 Měření posuvů a deformací

### 2.1 Úvod

Na každou stavební konstrukci případně zabudovaný konstrukční nosný prvek působí okolní prostředí svými účinky. Tak dochází v materiálech, z kterých jsou konstrukce vybudovány, k různým fyzikálním nebo mechanickým změnám. Předmětem zájmu následujících oddílů jsou především změny, které v konstrukcích vyvozují změnu hladiny statického napětí. Účinkem různých druhů napětí dochází totiž vždy ke změně tvaru, tedy k deformaci (přetvoření tělesa), která je měřitelná.

#### Definice

Deformace těles jsou zásadně dělena na:

- **deformace pružné (elastické)** – po odstranění napětí deformace vymizí (těleso se vrací do původního stavu (tvaru),
- **deformace nepružné (plastické)** – po odstranění napětí deformace zůstává ve formě trvalých (stálých) přetvoření.



### 2.2 Deformace

Pružná deformace je složena ze dvou částí – z okamžitého pružného přetvoření, které nastává okamžitě s přírůstkem (změnou) hladiny napětí a z dopružování (zpožděná pružnost), které nastává opožděně a se zrušením napětí postupně vymizí. Dopružování je pružnou částí deformace, které se také říká dotvarování. Nepružná část dotvarování je zvláštní deformací, která roste při konstantní hladině napětí neustále s časem. Projevuje se hlavně u složených hmot jako je např. beton. Zde je nutno podotknout, že se obvykle pod pojmem dotvarování myslí jen tato nepružná část.



Nepružná deformace se projevuje prakticky ihned po zvýšení hladiny napětí a po odlehčení ani s časem nevymizí. Po snížení hladiny napětí na původní hladinu zůstává v celé své hodnotě.

Hodnoty deformací odpovídající změně hladiny napětí se určují pomocí různých měřicích metod. Na základě znalosti smyslu a velikosti deformace můžeme určit i průběh a velikost napětí ve sledovaném prvku..

### 2.3 Měření deformací

Vlastní měření velikosti deformací se provádí především za účelem stanovení průběhů napětí u složitých konstrukcí a staticky náročných soustav.

Měření skutečných deformací na modelu nebo i reálném prvku či konstrukci z určitého materiálu však o velikosti dosažených hladin napětí vypovídá až

v případě znalostí fyzikálně mechanických parametrů použitého materiálu. Jedná se především o modul pružnosti a Poissonovo číslo. Tyto materiálové parametry se zjišťují na zkušebních tělesech pravidelných geometrických tvarů, kdy jsou měřeny skutečné deformace odpovídající známým hladinám zatížení.

Problematika měření deformací se v oblasti vyhodnocení dělí na dvě skupiny. Buďto při známých fyzikálně mechanických parametrech materiálů sledujeme velikost dosaženého napětí, nebo z naměřených deformací, které vznikly účinkem známého zatížení, určíme fyzikálně mechanické parametry.

### **2.3.1. Měření deformací tělesa jako celku**

Do této skupiny patří především problematika měření průhybů a posunutí, kde používáme přístroje:

- mechanické – posuvná měřidla, průhyboměry, indikátorové hodinky apod.
- hydrostatické – přístroje na principu vodováhy,
- optické – nivelace a optický mikrometr, bezkontaktní videometody (upravená kamera snímá optické body, obraz je zpracován a vyhodnocen přes videokarty v PC příslušným software),
- elektrické – měřící potenciometry lineární a úhlové, indukčnostní, kapacitní a optoelektronické snímače apod.

### **2.3.2. Měření polí napětí a deformací**

Měření jsou realizována na povrchu zkoušeného tělesa. Používají se následující metody:

- křehké laky – v povrchové úpravě se vytvářejí trhliny kolmo na směr hlavního napětí, kdy hustota (četnost) výskytu odpovídá hladině napětí,
- „Moiré“ metoda – pravidelná mřížka na povrchu je po zatížení geometricky porovnávána s nedeformovanou mřížkou,
- fotoelasticimetrie – amorfni látky po zatížení vytváří krystalickou strukturu, při průchodu polarizovaného světla je shodná orientace vytvořených mřížek s průběhy hlavních napětí.

### **2.3.3. Měření napětí a deformací ve zvoleném místě tělesa**

Měření délkových změn měřící základny ve zvoleném místě tělesa – měření relativních deformací. Tyto metody jsou označovány jako tenzometrické.

#### **Poznámka**



V dalších odstavcích se zaměříme podrobněji na metody skupin 2.3.2 a 2.3.3

## 2.4 Měření průhybů a posunutí

Nejčastěji se měření průhybů a posunutí zkoumaného prvku nebo konstrukce vztahuje k relativně pevnému stanovišti. Přenos pohybu na měřicí přístroj se může dít bezprostředně nebo může být proveden pomocí ocelového drátu (struny) nebo i jiným způsobem. Při zatěžovacích zkouškách prvků se většinou používá bezprostředního přenosu na indikátorové hodinky. Hodinky se přímo opírají o měřenou konstrukci. Upevněny jsou k nezávislému tuhému lešení. Tento způsob vyvolává značné potíže u větších konstrukcí a je téměř nemožný u mostů velkých rozpětí a vzepětí pro značné finanční náklady na lešení. V takových případech se používá struny, která zprostředkovává přenos pohybu konstrukce k měřicímu zařízení. To pak bývá upevněno na vhodné podpůrné konstrukci. Někdy i tento způsob měření selhává, např. u mostů přes řeku, kde je velký proud a hloubka. Pak musí nastoupit volba další metody, která je založena na principu velmi přesné nivelace.

### 2.4.1. Snímače mechanické

Jsou konstruovány tak, že všechny jejich části pracují jen na mechanickém principu, zvláště pak přenosové a zvětšující ústrojí. Z důležitějších to jsou:

- **Přístroje na principu posuvného měřítka (verniéru, nonia)**

Podle konstrukce verniéru je možno u nich dosáhnout přesnosti odečtení až 1/50 mm, tj. 0,02 mm. Sestávají z kovového měřítka, opatřeného přesnou rytou stupnicí, které se posouvá vzhledem k stupnici verniéru.

- **Průhyboměry mostní krabicové systém Frič, Metra**

Jsou určeny k měření větších konstrukcí. Pohyb konstrukce (průhyb) se přenáší k přístroji strunou, napjatou zatížením nebo pružným elementem (pérem, gumou apod.). Kruhová indikační stupnice je rozdělena na třicet dílů. Jednomu dílu odpovídá pohyb struny 1 mm. Každý z těchto dílů je rozdělen na deset dílků, takže je možno odečíst spolehlivě 1/10 mm a odhadem (0,02-0,01) mm.

- **Indikátorové hodinky (číselníkové úchylkoměry)**

Jsou nejvíce používaným přístrojem jak pro přímé měření délkových změn, tak také pro měření poměrných deformací jako čidlo, tj. indikační člen. Podle druhu konstrukce a své stavby mají rozsahy: 5, 10, 25, 30, 50 mm při citlivosti 100 dílků na 1 mm nebo rozsah 1 až 3 mm (výjimečně 5 mm) s citlivostí 1000 dílků na 1 mm. Jejich přesnost se pohybuje od 1 μm do 100 μm.

### 2.4.2. Snímače na hydrostatickém principu

Slouží k měření výškových změn bodů vzhledem k pevnému nepohyblivému bodu s dostatečnou přesností a poměrně pohodlným způsobem. Způsob měření je založen na hydrostatickém principu a je podobný měření pomocí hadicových vodovah, které pracují jako spojené nádoby naplněné vodou.

Pro přesnější určení výšky hladiny se používají buď mikrometrické šrouby, nebo systémy s plováky a indukčními snímači jejich polohy.

### 2.4.3. Snímače mechanické

Nejběžnějším způsobem měření svislého posuvu opticky je nivelace, tj. měření pomocí nivelačního stroje. Obvyklá nivelační metoda nedává dostatečně přesné výsledky měření pro zjišťování deformací na stavebních prvcích nebo konstrukcích. Přesnost kolísá okolo 1 mm. Aby bylo možno zvýšit citlivost výškového odečtení, používá se předsazené planparalelní destičky s možností jemného natočení – tzv. optického mikrometru.

### 2.4.4. Zvláštní způsoby

Progresivní metodou sledování deformací a posuvů konstrukcí je aplikace videotechniky ve spojení s výpočetní technikou. Sledovaný objekt se osadí kontrastními terči a po fixaci výchozího stavu terčů a kalibraci obrazu je speciálním programem analyzován obraz snímáný CCD kamerou a vyhodnocovány souřadnice (x,y) jednotlivých bodů (terčů). V dalším jsou pak počítány hodnoty přemístění (deformací) vybraných bodů.

### 2.4.5. Snímače elektrické

Délkové a úhlové změny můžeme převést pomocí řady elektrických snímačů na změny elektrických veličin jako odporu, indukčnosti, kapacity, elektor. napětí a pod.

- **Odporové snímače**

Nejčastějším konstrukčním provedením jsou potenciometry (přímé nebo kruhové). Pro převod pohybu konstrukce na běžec potenciometru se opět často používá struny ovínuté kolem kladky (kruhový typ) či přímého převodu.

- **Indukční snímače**

Další široce využívanou skupinou pro měření délkových a úhlových posunutí jsou snímače založené na změně indukčnosti soustavy cívek, způsobené změnou jejich magnetického odporu. Konstrukčně jsou řešeny ve formě snímačů s malou vzduchovou mezerou, s otevřeným magnetickým obvodem či s potlačeným polem a zapojeny jako jednoduché, diferenční či transformátorové. Nejběžnější konstrukční typ pro měření lineárních posunutí je realizován v diferenčním provedení snímače s otevřeným magnetickým obvodem, u něhož dochází se změnou polohy feromagnetického jádra v dutině cívek ke změně jejich indukčnosti.

Uvedená skupina snímačů je vhodná i pro měření rychlých pohybů (kmitání) při dynamických zkouškách objektů.

## 2.5 Měření relativních deformací

### Definice



K měření relativních deformací (poměrných přetvoření) ve zvoleném místě (bodě) konstrukce či prvku se používá řada přístrojů a snímačů, které se obvykle nazývají tenzometry či deformetry.

Při těchto měřeních jde vždy o určení relativního pohybu rozměru vymezené části objektu, tedy o detekci změn měrné délky  $l_0$  (měrná délka, základna) o přírůstek či úbytek  $\Delta l$ , vyvolaný změnou zatížení či účinku prostředí.

Měrná délka tenzometrů se volí s ohledem na jejich konstrukci a konkrétní situaci vyšetřovaného objektu. Při měření na homogenních materiálech (kovy apod.) se nejčastěji používá délka 3-10 mm, na nehomogenních materiálech (beton, dřevo apod.) je nutné používat délek větších, obvykle 50-200 mm.

Výsledkem měření je velikost relativní deformace  $\varepsilon = \Delta l/l_0$ , která se obvykle udává v  $\mu\text{m}/\text{m}$ , bezrozměrně či v procentech a promilech.

V praxi se nejvíce rozšířily tenzometry mechanické, strunové a elektrické – především odporové.

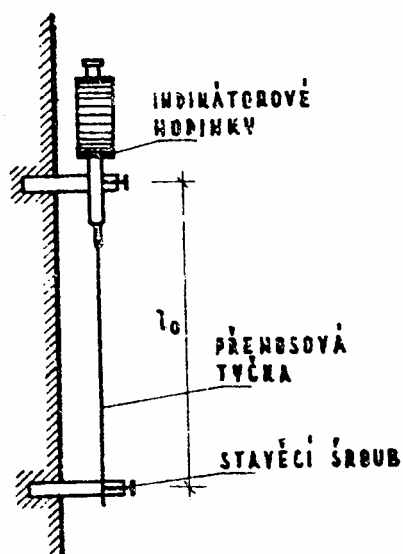
Správnost měření relativních deformací a z nich určovaných napětí závisí na kontaktu tenzometru s měřeným objektem, na kompenzaci či korekci chyb způsobených parazitními vlivy na údaj tenzometru (především teplota) a nezbytné kalibraci a ověřování používané techniky.

### 2.5.1. Tenzometry mechanické

Mechanických tenzometrů byla vyvinuta celá řada. Jsou konstruovány buď pro přímé měření poměrné deformace indikátorovými hodinkami, nebo mají pro zvýšení citlivosti hlavně u menších odměrných délek pákové zvětšení pohybu. Z nejběžněji používaných se jedná o následující typy.

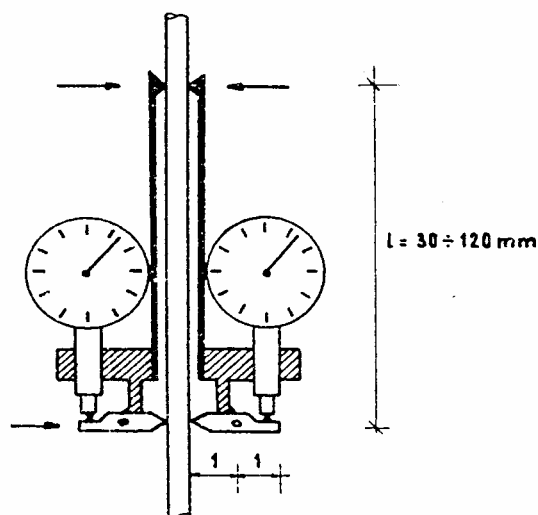
- **Tyčkový tenzometr s trny osazenými přímo do konstrukce** (obr. 3.1)
- **Příložný tenzometr normální** (obr. 3.2)
- **Příložný můstkový tenzometr s plochými pružinami (HM)** (obr. 3.3)

Místo indikátorových hodinek lze u většiny konstrukcí mechanických tenzometrů použít elektrické snímače posunutí, např. odporové či indukčnostní.



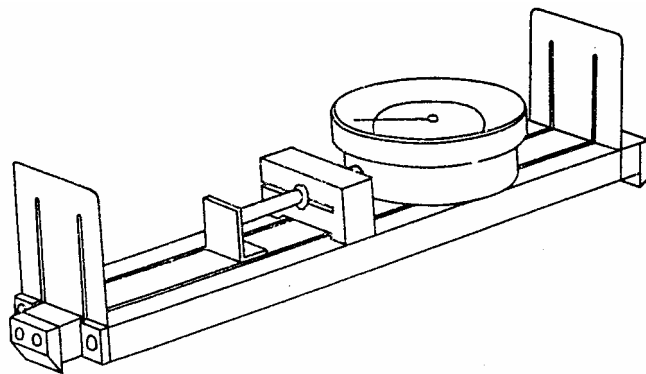
Obr. 3.1

Schéma tyčkového tenzometru



Obr. 3.2

Schéma příložného tenzometru



Obr. 3.3

Schéma můstkového tenzometru HM

## 2.5.2. Tenzometry strunové

### Definice

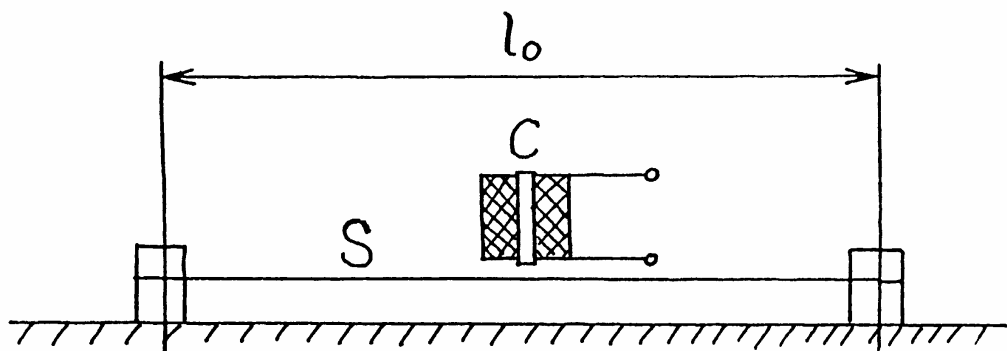


Principem činnosti strunových tenzometrů je určování frekvence vlastních kmitů ocelové struny předepjaté mezi dvěma pevnými body, jejichž vzdálenost tvoří měrnou délku tenzometru  $l_0$ .

Frekvence kmitání struny (I. tvar) je dána vztahem:

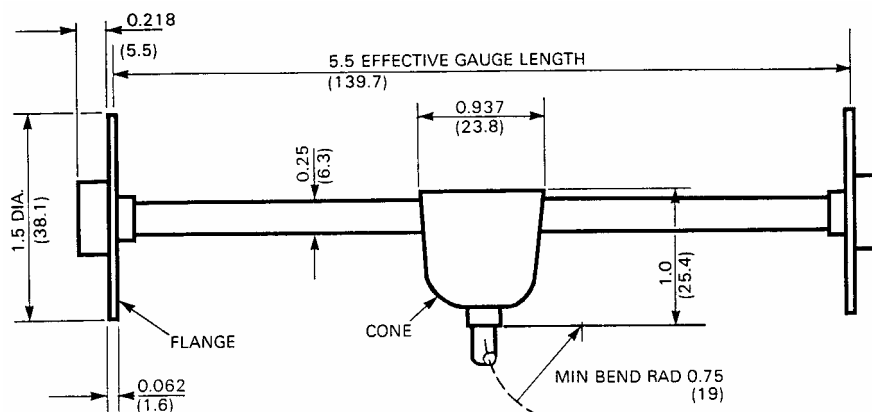
$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{\delta}{\rho}} = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{E \cdot \varepsilon}{\rho}} = c \cdot \sqrt{\varepsilon}, \quad (3.1)$$

kde  $l$  je délka struny  
 $E$  modul pružnosti materiálu struny  
 $\rho$  měrná hmotnost materiálu struny  
 $\delta, \varepsilon$  napětí, deformace struny



Obr. 3.4 Zjednodušené schéma strunového tenzometru, S – struna, C – elektromagnetická budící a snímací cívka.

Reálný strunový tenzometr má strunu krytou v trubce a koncové hlavy uzpůsobené buď pro montáž na povrch objektů či pro instalaci do stavebních hmot.



Obr. 3.5 Strunový tenzometr firmy Gage Technique

### 2.5.3. Tenzometry elektrické

Konstrukce elektrických snímačů deformace (tenzometrů) má v podstatě dvojitou formu: buď v provedení tzv. příložných tenzometrů, nebo tenzometrů pro přímou aplikaci (lepením, přivařením) na povrch objektu či pro zalití do stavebního materiálu objektu (beton, asfalt).

#### ▪ Příložné tenzometry - extenzometry

Provedení těchto snímačů deformace je tvořeno spojením vhodného mechanického řešení pohybu jednoho vymežovacího břitu vůči druhému a převodu tohoto relativního pohybu na elektrický signál dostatečné úrovně.

Pro převod na elektrický signál jsou využívány principy odporové, indukční, kapacitní a piezoelektrické. Vesměs se vyznačují dostatečnou citlivostí, širokým rozsahem a možností měřit jak statické, tak i dynamické deformace. Měrná délka  $l_0$  se běžně pohybuje od 10 do 50 mm a lze ji v řadě případů individuálně nastavovat. Na povrch objektu je nutno je spolehlivě fixovat, např. šrouby, lepenými příchytkami, pružinovými úchyty apod.

#### • Odporové tenzometry kontaktní

Odporová tenzometrie je všeobecně rozšířená metoda určování deformací a napětí ve vybraných (kritických, rozhodujících) místech částí a celků konstrukcí. Úspěšně a spolehlivě je aplikována především na konstrukcích z homogenních materiálů. Dává při relativně malých nákladech velmi dobré výsledky a lze ji při dostatečných zkušenostech úspěšně aplikovat na nejrozmanitější situace v inženýrské praxi.

Vlastním mechanicko-elektrickým převodníkem je snímač, měnící mechanickou deformaci na změnu svého elektrického odporu. Materiálem snímače může být kovový drátek či pásek, napařená vrstva či polovodičové vlákno. Pro běžné použití jsou vyráběny především kovové tenzometry různého provedení.

#### Definice

Princip funkce odporových snímačů spočívá ve změně odporu snímače způsobené změnou délky.



Z fyziky známe vztah pro elektrický odpor vodiče.

$$R = \rho \cdot \frac{l}{s}, \quad (3.2)$$

kde  $\rho$  je specifický odpor,  
 $l$  je délka,  
 $s$  příčný průřez drátku.

Po úpravách vztahu (3.2) základní tenzometrickou rovnicí s deformačním součinitelem  $k$ , takže pro konečné změny můžeme psát

$$\frac{\Delta R}{R} = k \frac{\Delta l}{l} = k \cdot \varepsilon \quad (3.3)$$

Pro reálný tenzometr je tato hodnota udávána výrobcem jako výběrový parametr dané série a označujeme ji  **$K$  (konstanta tenzometru, gage factor)**.

Pro tenzometry pak píšeme:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \varepsilon \quad (3.4)$$

### • Konstrukce kovových odporových tenzometrů a jejich parametry

Podle provedení měřicí mřížky můžeme rozdělit tenzometry na drátkové a fóliové, dále pak na speciální provedení pro měření za vysokých teplot či pro zabudování do stavebních hmot.

Drátkové tenzometry mají mřížku tvořenou tenkým odporovým drátkem (0,01 – 0,03 mm), obvykle z konstantanu (60 % Cu, 40 % Ni), vykazující dobrou linearitu až do cca 6,5 % deformace. Nejběžnější typ, vyráběný např. Mikrotechnou Praha, měl měrný drátek na smyčkách (obr. 3.9a). Délka základny  $e$  je od 4 mm do 138 mm. Mřížka je přitmelena k podložce z papíru.

Foliové tenzometry se zhotovují fotochemickým způsobem technologií obdobnou výrobě plošných spojů z konstantanu nebo chromniklové folie o tloušťce 12-15  $\mu\text{m}$  (obr. 3.9b) na podložce z plastické hmoty. Uvedený způsob umožňuje zhotovovat i velmi složité tvary měřicí mřížky, popř. integrované soustavy tenzometrů. Oproti drátkovým snímačům mohou být i více elektricky zatíženy (vlastní ohřev – lepší odvod tepla).

Odporové tenzometry se lepí na povrch konstrukce speciálními lepidly. Povrch musí být předem dokonale připraven – u běžných povrchů odstraněny všechny nátěry, koroze i chemické vrstvy, dobře odmaštěno a odpovídajícím způsobem vyhlazeno.

### Kontrolní otázky



1. Jaké je základní členění deformací při experimentální analýze konstrukcí?
2. Vysvětlíte princip strunových tenzometrů?
3. Vysvětlíte princip odporových tenzometrů?

## 3 Zatěžovací zkoušky stavebních dílců a konstrukcí

### 3.1 Význam zatěžovací zkoušky

#### Definice

U stavebních konstrukcí na které jsou kladeny mimořádné požadavky na spolehlivost (př. mosty, pilotové základy) nebo u dílců hromadně vyráběných je požadováno ověření jejich skutečného chování při účincích zatížení nebo prostředí (např. požární zkoušky).



Abychom ověřili účinky zatížení, provádíme zatěžovací zkoušku nosné konstrukce nebo dílce s cílem získat podklady pro hodnocení:



- funkce zkoušené konstrukce při statickém nebo dynamickém zatížení
- spolehlivosti konstrukce z hlediska mezních stavů použitelnosti popř. únosnosti (u zkoušek dílců)
- výpočtových modelů, pokud je pochybnost, že použité výpočtové postupy nejsou dostatečně výstižné nebo není možné bezpečně zajistit všechny potřebné parametry pro výpočet
- spolehlivosti konstrukce, zejména jsou-li pochybnosti o shodě provedení konstrukce s požadavky návrhu (např. nedodržení předepsané pevnosti betonu v části konstrukce)

Na základě hodnocení výsledků zatěžovací zkoušky lze rozhodnout o uvedení konstrukce do běžného provozu (v nepříznivém případě uvedením do omezeného provozu) nebo o zahájení hromadné výroby dílců specifikovaným technologickým postupem.

### 3.2 Členění a názvosloví zatěžovacích zkoušek

Dle podmínek pro provádění rozlišujeme:

- zatěžovací zkoušky nezabudovaných stavebních dílců prováděné zpravidla ve vybavených zkušebnách
- zatěžovací zkoušky stavebních konstrukcí před zahájením provozu nebo v době provozu
- zatěžovací zkoušky modelů stavebních konstrukcí, které jsou prováděny v laboratořích

Časové působení zkušebního zatížení vymezuje:

- zkoušky krátkodobé - slouží k ověření okamžitých vlastností
- zkoušky dlouhodobé - slouží ke studiu dlouhodobých přetvárných vlastností nebo degradace parametrů spolehlivosti
- zkoušky opakované pro soustavné sledování změn vybraných parametrů v době provozu

Dle dosaženého stupně zkušeb. zatížení dělíme zkoušky dílců a konstrukcí na:

- zkoušky bez dosažení únosnosti zkušební vzorku, které slouží k průkazu velikosti přetvoření, u betonových konstrukcí rovněž k určení vzniku, rozvoje a maximální šířky trhlin
- zkoušky do dosažení únosnosti zkušební vzorku

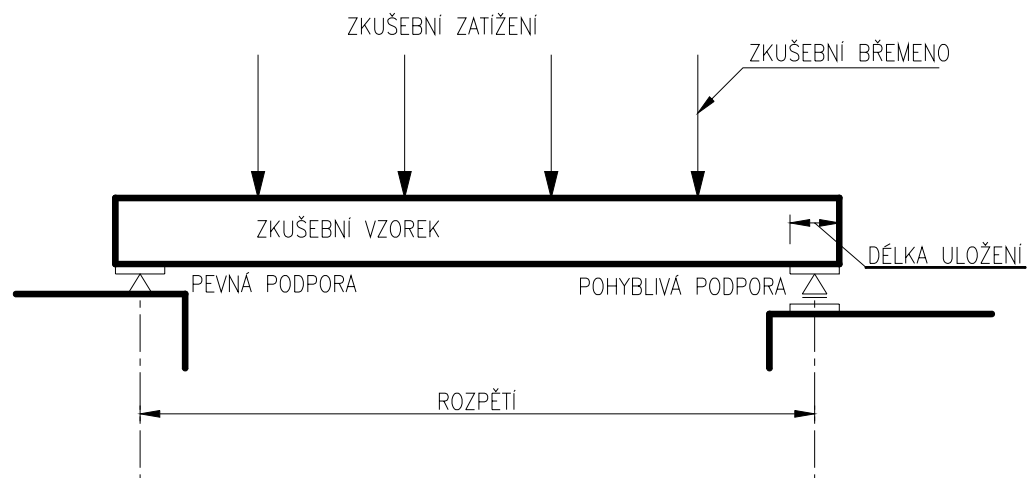
Charakter zatížení vymezuje dva rozdílné typy zkoušek:

- statické zatěžovací zkoušky, při nichž změna velikosti zatížení je pomalá nebo pohyb zatížení má zanedbatelné zrychlení, vyvozuje tedy na zkušební dílec nebo konstrukci statické účinky. Tento charakter zatížení je běžný u pozemních staveb
- dynamické zatěžovací zkoušky, při nichž zkušební zatížení mění svou velikost nebo polohu a vyvolává takové zrychlení zkušební dílce nebo konstrukce, že nelze zanedbat vliv vzniklých setrvačných sil hmoty konstrukce. Dynamická zatížení vyvolávají velké točivé stroje na základy, nárazový vítr na vysoké stavby apod. Zvláštním případem je seismické zatížení a kmitající zatížení vyvolávající namáhání na únavu.

Základní názvosloví užívané při zatěžovacích zkouškách je patrné z obr. 3.1.

Časový postup zatěžovací zkoušky je rozdělen na etapy:

- příprava zatěžovací zkoušky zahrnuje zpracování programu zkoušky
- provádění zatěžovací zkoušky
- vyhodnocení zatěžovací zkoušky



Obr. 3.1. Uspořádání zatěžovací zkoušky ohýbaného betonového vzorku, který byl vyroben pro účel zkoušky nebo vybrán jako reprezentant dílců vyrobených za stejných podmínek.

### 3.3 Zkušební zařízení a měřicí přístroje

Při zkouškách mají být dodrženy podmínky, při kterých konstrukce působí v provozu, jiné vlivy nutno omezit nebo k nim přihlédnout při vyhodnocení zatěžovací zkoušky.

Ve zkušebně je doporučeno provádět zkoušky při teplotách vyšších než +5 °C a vzorek ponechat temperovat v prostředí zkušebny min. 24 hodin. Volba zatě-

žovacích systémů musí zaručit přesnost  $\pm 3\%$  u zkoušek konstrukcí,  $\pm 5\%$  u zkoušek dílců. Kalibrované hydraulické válce napojené na centrální čerpadlo s ověřeným tlakoměrem stupně přesnosti  $\pm 1\%$  musí být dimenzovány tak, aby požadavek přesnosti byl dodržen v celém rozsahu (10-20%) zkušební síly. Požadovaná přesnost zjišťování hmotnosti stavebních dílců činí 2% jejich teoretické hodnoty (základní hmotnosti). V praxi jsou užívány k zjišťování tíhy třmenové dynamometry s rozsahem až do 100 kN. Silové působení bývá kontrolováno ověřeným dynamometrem.

Silové působení zkušebních břemen má být přenášeno na vzorek pomocí kloubů většinou kulových, u plošných prvků válcových, přičemž je nutno vzhledem k tření v kloubu volit klouby s malým poloměrem.

Měřicí přístroje pro měření pretvoření volíme vhodně tak, aby přípustná chyba nepřekročila 5% očekávaného teoretického překročení v základním cyklu nebo hodnotu 0,05 mm při vyloučení poklesu podpor a vlivu změn teploty. Pro ověření správného chodu přístrojů a zatěžovacího systému provedeme před zahájením zkoušky několikrát předběžné zatížení do max. 20% základního cyklu zatížení. Měření trhlin provádíme optickými přístroji (lupami) se šestinásobným zvětšením, zrakem lze sledovat trhliny od šířky 0,05 mm. Zařízení a přístroje musí být metrologicky ověřeny

*Zatěžovací zkoušky konstrukcí* před uvedením do provozu nebo konstrukcí provozovaných provádíme dle schváleného programu zkoušky, který mimo jiné stanoví druh, intenzitu zatížení a požadavky na měřicí přístroje.

Při zkouškách mostů jsou pro vyvození statického zatížení užívány:

- kolejová vozidla u drážních mostů,
- nákladní auta a autodomývače naložené pískem ( vyjíměčně pásová vozidla) u silničních mostů
- vozidla u lávek pro chodce

Dynamické zatížení je vyvozováno:

- budiči harmonické síly, impulsními budiči (raketové motory)
- technologickým zařízením
- pohybem vozidel
- přejezdem silničních vozidel přes umělou překážku  $v = 60$  mm dle ČSN 73 6209 při určitých rychlostech
- osobami nebo skupinou osob u lávek

Při dynamické zatěžovací zkoušce nutno zdůraznit důkladnou přípravu a uvážení odezvy konstrukce včetně možného nepřipustného poškození. Statická zkouška vždy předchází zkoušce dynamické.

### Kontrolní otázky

4. Členění zatěžovacích zkoušek z hlediska provádění.
5. Členění zatěžovacích zkoušek z hlediska časového působení.
6. Základní typy zatěžovacích zkoušek dle charakteru zatížení.





## 4 Tvrdoměrné metody

### Definice

Tvrdost je určena odporem zkoušeného materiálu proti tvárné (plastické) deformaci materiálu.



Přes velké uplatnění zkoušek tvrdosti v praxi pro jejich jednoduchost a rychlost nelze hodnotu tvrdosti jednoznačně definovat jako fyzikální veličinu. Tvrdost se zjišťuje mnoha metodami, které však poskytují různé hodnoty tvrdosti i na stejném materiálu.



Neexistuje vzájemný exaktní vztah mezi hodnotami tvrdosti udávaných v nejrůznějších stupnicích a číslech. Existují jen přibližně porovnávací tabulky mezi jednotlivými hodnotami tvrdostí získanými různými metodami.

Obdobně nelze specifikovat obecný vztah mezi zjištěnou tvrdostí a jinými mechanickými veličinami, např. pevností. Přesto u řady metod, při nichž se měří tvrdost, existují tzv. *kalibrační vztahy* vyjadřující vztah stanovené tvrdosti k příslušné pevnosti. Takto stanovené pevnosti mají většinou charakter pouze nezaručených pevností.

### 4.1 Přehled tvrdoměrných metod

Podle způsobu vyvození síly dělíme tvrdoměrné metody na *statické*, užívané nejčastěji v laboratořích a *dynamické* používané velmi často i na konstrukcích.

Tvrdost materiálů zjišťujeme těmito metodami:

- vrypovými,
- vtiskovými,
- vnikacími,
- odrazovými,
- a dalšími.

#### 4.1.1 Vrypová metoda

Je porovnávací metodou určování tvrdosti vrypem jednoho materiálu do druhého. Takto vznikla stupnice tvrdosti podle Mohse: 1. mastek, 2. sůl kamenná (sádrovec), 3. vápenec, 4. kazivec, 5. apatit, 6. živec, 7. křemen, 8. topas, 9. korund, 10. diamant.

#### 4.1.2 Vtiskové metody

Nejčastěji se jimi určuje velikost vtisku vytvořeného ve zkoušeném materiálu zatlačením předepsaného vnikajícího tělíska určenou silou zkušebního zařízení.

Nejběžnější vtiskové metody:

- tvrdost podle Brinella (HB),
- tvrdost podle Janky (HJ),
- tvrdost podle Vickerse (HV),
- tvrdost podle Rockwella (HR),
- tvrdost měřená pružinovým tvrdoměrem dle Baumanna,
- tvrdost kladívkem Poldi,
- tvrdost dle Waitzmanna.

### 4.1.3 Vnikací metody

Tyto metody jsou založeny na vniknutí tvrdého tělesa do měkkého materiálu, např. betonu, malty, dřeva opakovanými rázy. Měří se buď hloubka vniku špičáku zaraženého předepsaným počtem úderů, nebo naopak počet úderů potřebný na vnik špičáku do předepsané hloubky.

Používané metody:

- špičáková metoda Ing. J. Maška,
- špičáková metoda Prof. Cigánka,
- špičáková metoda Baumannovým kladívkem a
- elektromagnetický špičák.

### 4.1.4 Odrazové metody

Jsou založeny na pružném odrazu standardního tělesa padajícího z určené výšky nebo vrženého jistou energií od povrchu zkoušeného materiálu.

- měření tvrdosti kovů dle Shora,
- měření tvrdosti betonů, malt a cihel Schmidtovými sklerometry

#### Poznámka:



V dalším textu je pozornost věnována využití tvrdoměrných metod při nedestruktivním posouzení kvalit betonu, kovů, dřeva a kusových staviv.

## 4.2 Tvrdoměrné metody zkoušení betonu

Tvrdoměrné metody zkoušení betonu jsou v současné době nejvíce používanými nedestruktivními metodami (NDT metody). Mají však určitá omezení:

- zkouší se jen povrchová vrstva betonu,
- zkouší se vlastnosti betonu, např. tvrdost, pružnost, lokální porušení, o kterých se předpokládá, že jsou v těsném korelačním vztahu ke sledované vlastnosti, např. pevnosti v tlaku nebo modulu pružnosti,
- přesností případně spolehlivostí výsledků, které jsou závislé na přesnosti měření a velikosti chyb,
- četností zkušebních míst, které při zvolené pravděpodobnosti nesou riziko omylu,
- přístupností povrchu konstrukce, vlhkostním stavem betonu, jeho stářím, stejnoměrností apod.

### 4.2.1 Společné zásady pro provádění a vyhodnocování tvrdoměrných metod na betonu

Pro odpovědné provádění zkoušek a jejich vyhodnocování je třeba se řídit příslušnými ustanoveními ČSN. Předpisy, které jsou společné pro jednotlivé normalizované metody jsou uvedeny v ČSN 73 1370 a ČSN 73 1373. ČSN 73 2011 upravuje použití NDT metod na konstrukcích.

Jedním ze základních pravidel je ustanovení, které mluví o *závaznosti zkoušek*. Hodnocení pevností betonu v tlaku, které se provádí pouze podle obecného kalibračního vztahu, dává hodnoty pouze informativní, tj. *s nezaručenou přesností*. Objektivní výsledky lze dosáhnout upřesněnými zkouškami, které se dosáhnou:

- vyhodnocením podle určujícího kalibračního vztahu vypracovaného pro daný beton (složení, stáří, ošetření), nebo
- odvozením součinitele  $\alpha$ , stanoveného pro upřesnění obecného příp. směrného kalibračního vztahu.

#### Definice

*Obecný kalibrační vztah* je uveden v příslušné ČSN dané zkušební metody.

*Směrný kalibrační vztah* je vypracován pro ty betony, které se obvykle používají pro sledovanou vlastnost a zvolenou technologii. Pro jeho odvození zpravidla stačí vyzkoušení nejméně 100 zkušebních těles.

*Určující kalibrační vztah* slouží pro stanovení upřesněných hodnot vlastnosti daného betonu, např. pevnosti v tlaku, určitého druhu. Je buď *úzký* pro rozsah pevností v rámci jedné třídy betonu, nebo *široký* pro rozsah pevností dvou nebo více tříd betonů zhotovených stejnou technologií výroby ze stejných složek.



*Upřesnění obecného nebo směrného kalibračního vztahu* lze provést vynášením hodnoty vlastnosti určené z kalibračního vztahu součinitelem  $\alpha$ . Součinitel  $\alpha$  se vypočte ze vztahu

$$\alpha = \frac{R_b}{R_{be}} \quad (4.1)$$

kde  $R_b$  – krychelná pevnost betonu stanovená v lise dle ČSN 73 1317,

$R_{be}$  – pevnost betonu v tlaku s nezaručenou přesností stanovená na témže zkušebním vzorku nedestruktivní metodou.

*Zkušební tělesa odebraná z konstrukcí* mohou mít tvar krychle o hraně 150 mm, válce  $\varnothing$  150 mm o výšce 150 mm nebo hranolů 100 x 100 x 300 (400) mm, příp. 150 x 150 x 600 mm. Podle objemu konstrukce se odeberou 3 vzorky do 10 m<sup>3</sup> betonu, 6 vzorků do 50 m<sup>3</sup> betonu a 9 ks nad 50 m<sup>3</sup> betonu.

V případě, že se konstrukce nejdříve odzkouší nedestruktivní metodou, lze vyjmout pouze 3 ks zkušebních těles z místa s nejmenší, největší a průměrnou pevností. Vyjmutá zkušební tělesa se nedestruktivně zkouší na dvou protilehlých stranách, a posléze se stanoví jejich pevnost v tlaku v lise.

*Zkušební místo* je místo na povrchu betonu zkušebního tělesa nebo konstrukce, na kterém se provede takový počet měření, ze kterého lze odvodit jednu hodnotu ukazatele vlastnosti betonu. Zkušební místa se volí tak, aby reprezentovala zkoušený beton. Zkušební místa se pokud možno nevolí nad probíhající ocelovou výztuží. Velikost zkušebního místa je dána použitou tvrdoměrnou metodou. Každé zkušební místo se upraví způsobem předepsaným pro použitou tvrdoměrnou metodu včetně odstranění povrchové vrstvy, je-li zkarbonatována. O tom je třeba se přesvědčit zvlhčením betonu roztokem fenolftaleinu. Zkarbonatovaná vrstva nezmění barvu, vrstva nezkarbonatovaná má barvu červenofialovou.

#### 4.2.3 Tvrdoměrné metody dle ČSN 73 13763

V ČSN 73 1373 - Tvrdoměrné metody zkoušení betonu jsou popsány tyto metody:

- metoda Waitzmannova tvrdoměru (označená W)
- metoda kuličkového tvrdoměru (označení K)
- metoda Schmidových tvrdoměrů N, L, M (označení S)
- metoda špičákového tvrdoměru (označení ŠT)

*Tab. 4.1 Možnosti použití tvrdoměrných metod pro ověření pevnostních parametrů betonů*

Metoda	Vlhkost betonu při zkoušce	Krychelná pevnost [MPa]	Nejmenší tloušťka vrstvy betonu [mm]
W	Beton přirozeně vlhký, suchý (výjimečně i vlhký, avšak nenasyčený vodou)	17 až 60	100
K		17 až 60	100
S N		17 až 60	100
S L		13 až 50	60
S M		25 až 60	200
ŠT	Beton přirozeně vlhký, vlhký nasycený vodou, výjimečně i suchý	3 až 30	100

#### Poznámka



*V dalším textu je uvedena nejrozšířenější tvrdoměrná metoda při diagnostickém hodnocení kvality betonu reálných konstrukcí.*

#### 4.2.4 Metoda Schmidových tvrdoměrů

Schmidovy tvrdoměry se dělí podle vyvozené energie:

typ N - s energií 2,25 J,  
 typ L - s energií 0,75 J,  
 typ M - s energií 30,00 J.

Systémy mechanismů všech tvrdoměrů jsou stejné. Jsou to pružinové tvrdoměry skládající se z razníku, beranu, pružin a vlečného ukazatele s měřítkem. Při zatlačení razníku a uvolnění závěsu beran dopadne na razník, odrazí se a posune vlečný ukazatel na měřítku do místa, které je hodnotou velikosti odrazu. Velikost odrazu je závislá na poloze tvrdoměru. Základní poloha tvrdoměru je vodorovná.

V ČSN 73 1373 jsou uvedeny obecné kalibrační vztahy pro vyhodnocení  $R_{be}$  ze zajištěného odrazu „a“ pro směr zkoušení: vodorovně, svisle dolů, svisle nahoru, šikmo nahoru a dolů pod úhlem 45°.

### Poznámka

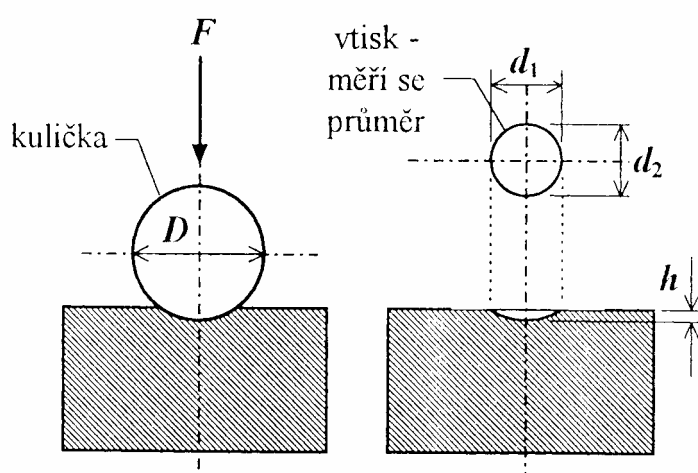
Pracovní postup měření a vyhodnocení zkoušek je podrobně uveden V module BI02\_M04 v oddílech kapitoly 5.

## 4.3 Tvrdoměrné metody zkoušení oceli

Tvrdost ocelí se zjišťuje nejčastěji vtiskovými metodami, statickým nebo dynamickým účinkem zatížení.

### 4.3.1 Tvrdost podle Brinella HB

Metoda je vhodná pro všechny kovové materiály větší tloušťky s výjimkou velmi tvrdých slitin. Tvrdost  $HB$  je dána vztahem mezi silou  $F$ , kterou se do povrchu zkoušeného materiálu vtláčuje kalená ocelová kulička  $HBS$  nebo kulička z tvrdokovu  $HBW$  o průměru  $D$  a povrchem trvalého vtisku, jehož průměr  $d$  se po odlehčení změří (obr. 4.1).



Obr. 4.1 Schéma zkoušky tvrdosti podle Brinella

Tvrdost vypočteme ze vztahu:

$$HB = \frac{0,102F}{\pi Dh} = \frac{0,102,2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (4.2)$$

Za vypočtenou hodnotu tvrdosti se podle typu kuličky uvede symbol *HBS* nebo *HBW*. Dále následují průměr kuličky, velikost zkušebního zatížení ve starých jednotkách a doba působení zatížení.

#### **Příklad:**

125 HBS 10/500/30

Symbol 500 v zápisu výsledku značí hodnotu síly v kilopondech a je číselně roven násobku  $0,102F$  ( $500 = 0,102,4903 N$ )

Z hodnoty tvrdosti HB lze přibližně (orientačně) určit pevnost v tahu  $R_m$  v MPa.

$$R_m = K.HB \quad (4.3)$$

Pro ocel se hodnota  $K$  pohybuje v rozmezí od 0,34-0,36 v závislosti na poměru meze kluzu a meze pevnosti a na tepelném zpracování oceli.

### **4.3.2 Tvrdot podle Vickerse HV**

Tvrdot *HV* je určena poměrem vhodně voleného zatížení  $F$  na čtyřboký diamantový jehlan se čtvercovou základnou a vrcholovým úhlem  $136^0$  a povrchem vtisku. Po odlehčení se změří obě úhlopříčky vtisku  $u_1$  a  $u_2$  a vypočte se průměr  $u$ .

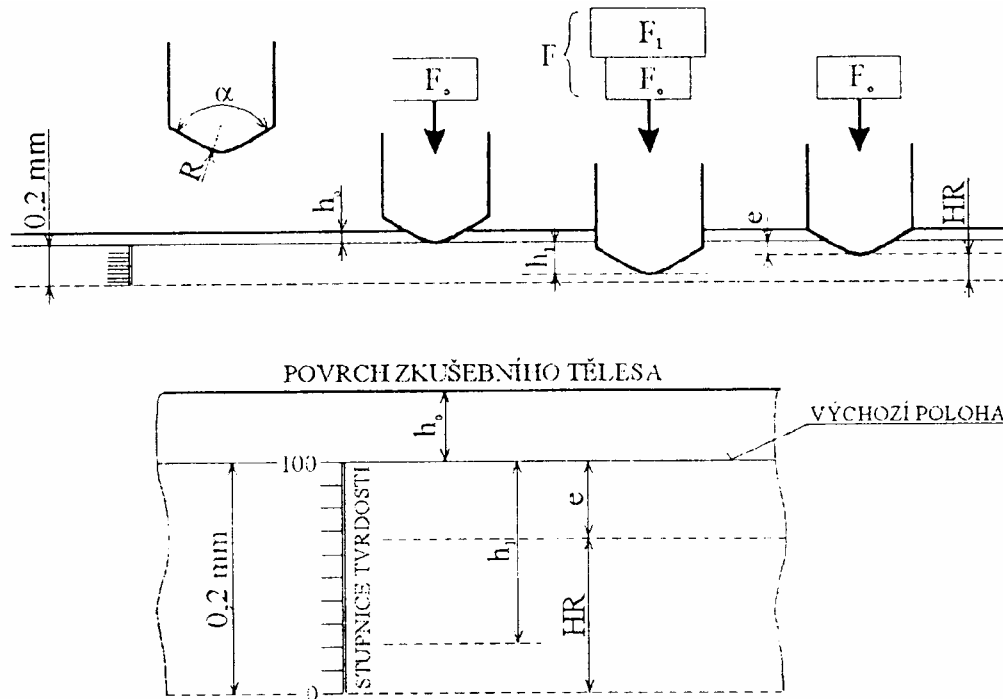
Tvrdot *HV* je dána

$$HV = \frac{0,102,2F \sin(136/2)}{u^2} = \frac{0,1891F}{u^2} \quad (4.4)$$

### **4.3.3 Tvrdot podle Rockwella**

Podstata zkoušky spočívá v zatlačení ocelové kuličky nebo diamantového kužele do povrchu zkoušeného materiálu předepsaným zatížením předběžným a přidavným. Po odtížení se změní hloubka vtisku  $e$  vnikajícího tělesa (obr. 4.2)

Predběžné zatížení  $F_0 = 98 N$ , přidavné zatížení  $F_1$  a celkové zatížení  $F$  závisí na tvrdosti vnikajícího tělesa (tab. 5.6). Nejprve se zatíží na  $F_0$  posléze zatížení  $F_1$ . Po ustálení deformace se zatížení sníží na  $F_0$ . Číselná hodnota tvrdosti *HRC* (*HRB*, *HRA*) se objeví přímo na stupnici přístroje.



Obr. 4.2 Schéma zkoušky tvrdosti podle Rockwella

Stupnice tvrdosti			Předběžné zatížení $F_0$	Přídavné zatížení $F_1$	Celkové zatížení $F$
Kužel	kulička 1,5875	kulička 3,175			
A	F	H	98,07 N	490,3 N	588,4 N
D	B	E	98,07 N	882,6 N	980,7 N
C	G	K	98,07 N	1,373 kN	1,471 kN

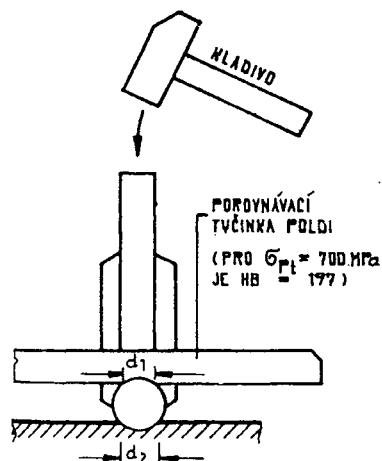
Tab. 4.2 Stupnice tvrdosti podle Rockwella v závislosti na typu vnikacího tělesa a zatížení

Tvrdość  $HRC$  se určuje z hloubky trvalého vtisku  $e$  jako  $HRC = 100 - e$

#### 4.3.4 Zkouška tvrdosti metodou POLDI

Zkouška je vhodná k rychlému posouzení jakosti zejména zabudovaných materiálů v konstrukcích. Není však normována. Při zkoušce porovnáváme průměr vtisku ve srovnávací tyčince o známé tvrdosti s průměrem vtisku v materiálu zkoušené tvrdosti. Jedním rázem kladiva zatlačíme ocelovou kalenou kuličku současně do tyčinky i zkušebního materiálu.

Skutečná hodnota tvrdosti srovnávací tyčinky je vyjádřena její pevností v tahu vypočítanou z Brinellovy tvrdosti. Tvrdość zkoušeného kovu se vyhledá na základě změřených průměrů vtisků  $d_1$  a  $d_2$  v tabulkách přístroje, které jsou zpracovány pro každý kov a jeho slitinu zvlášť.



Obr. 4.3 Schéma zkoušky tvrdosti metodou Poldi

#### Poznámka

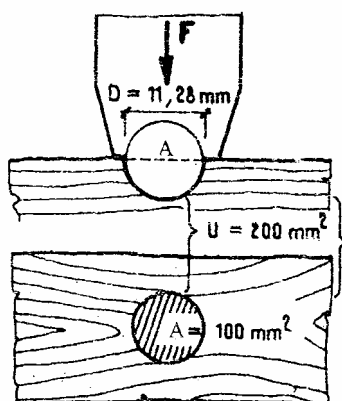


Pracovní postup měření a vyhodnocení zkoušek je podrobně uveden V module BI02\_M04 v oddíle kapitoly 5.2.

## 4.4 Tvrdoměrné metody zkoušení dřeva

Tvrdot dřeva se stanoví zkouškou podle Janky, případně použitím přístroje Pilodyn firmy Proceq a dalšími.

### 4.4.1 Statická tvrdost dřeva podle Janky



Obr. 4.4. Schéma zkoušky statické tvrdosti dřeva podla Janky

Zkouška slouží k roztřídění dřevěných materiálů a stanovení jejich tvrdosti. Podstata zkoušky spočívá v působení statického zatížení na ocelovou kuličku o průměru  $D = 11,28$  mm zasazenou do kovového válečku. Zatížením se ve zkušebním tělese vytvoří vtisk o hloubce 5,64 mm a ploše polokoule  $200 \text{ mm}^2$ , takže průmět vtisku do roviny má plochu  $100 \text{ mm}^2$  (obr. 5.5). Statická tvrdost  $HJ$  při vlhkosti  $w$  se vypočítá ze vztahu

$$HJ_w = \frac{F}{\pi r^2} \quad (4.5)$$

Vypočtená tvrdost  $HJ$  se uvádí s přesností 0,1. Výsledek vychází v  $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$ , jednotky se však neuvádějí.

#### 4.4.2 Tvrdost dřeva stanovená přístrojem PLIDYN 6J

Pilodyn 6J je ruční přístroj švýcarské firmy Proceq na nedestruktivní zkoušení dřeva. Umožňuje objektivní posouzení rozsahu napadení dřeva dřevokaznými houbami, hmyzem nebo hnilobou a s tím související snížení jeho pevnosti. Zvláště výhodný je při lokalizaci poškozené části prvku, zejména ve zhlaví stropních trámů. Také u zdravých prvků můžeme pomocí kalibračních vztahů určit kvalitu dřeva a následně i jeho výpočtovou pevnost.

Tímto přístrojem se zaráží do dřeva ocelový razník Ø 2,5 mm konstantní silou 6 joulů a měří hloubku vniku kolíku do dřeva v rozsahu 0 až 40 mm. Hloubka vniku se odečítá na stupnici přístroje. Takto lze získat objektivní údaje o místní tvrdosti dřeva. Porovnáním hloubky vniku na různých místech zkoušeného dřevěného prvku se dá přesně vymežit jeho poškozená oblast a objektivně kvantifikovat míra poškození. Tato objektivní metoda umožní zhodnotit např. míru snížení tvrdosti dřeva uprostřed vazného trámu a ve zhlaví téhož trámu osazeného v obvodové zdi, od níž je evidentně zřejmý přísun vlhkosti do zhlaví trámu. Z hloubky vniků ocelového razníku do dřeva lze z upřesněných kalibračních vztahů následně stanovit i jeho výpočtovou pevnost, případně její snížení v místě poškození.

Metoda vniku ocelového kolíku je většinou kombinována s metodou odvrtávání vzorku dřeva jádrovým vrtákem např. Ø 16 mm, kdy se vývrt opatrně z vrtáku vyjme a hodnotí z hlediska změny barvy poškozeného dřeva v porovnání s dřevem zdravým odebraným v místě nenapadeném. Obdobně lze posoudit rozdíl pevností v tlaku odebraných vzorků dřeva kvalitního a napadeného. Vážením a vysušením vzorků lze určit obsah vlhkosti dřeva v obou vzorcích.

#### 4.5 Metody zkoušení cihel

Tvrdoměrnou metodou využívající Schmidtova sklerometru typu *LB* (přístroj se speciálním razníkem pro keramické materiály) lze určit hodnoty odrazu razníku při zkoušení cihel zabudovaných ve stavbě, příp. cihel upevněných v lise. Podle metodiky dle ČSN 73 1373 se provede obroušení povrchové vrstvy zkoušené cihly a provede se příslušné stanovení odrazu. Vyloučí se neplatná měření a podle některého z vhodných kalibračních vztahů se určí pevnost cihly  $R_c$  v tlaku s nezaručenou přesností. Lze použít např. kalibrační vztah dle PUDIS Praha, 1989 [5.1]

$$R_c = 9,129 + 0,3101LB, \quad (4.6)$$

kde *LB* je průměrná hodnota odrazu získaná z deseti měření Schmidtovým sklerometrem *LB*, přičemž za platné měření se považují pouze ty hodnoty, které se neliší od průměrné hodnoty deseti měření o více než 28 %.

Takto získané hodnoty pevností cihel lze použít ke stanovení výpočtové pevnosti zdiva při rekonstrukcích ve smyslu ČSN 73 0038 a ČSN 73 1101.

## 4.6 Metody zkoušení malty

Tvrdotost zdicí malty se zkouší upravenou příklepovou vrtačkou, případně vtlačováním ocelové tyčinky (indentoru nebo sondy) do maltové vrstvy. Podle kalibračních vztahů se u obou metod určí pevnost malty v tlaku s nezaručenou přesností.

Pevnost cihelného zdiva ve sledované konstrukci se zpravidla určí výpočtem z hodnot pevností použitých cihel a malty ve smyslu ustanovení ČSN 73 0038 a ČSN 73 1101.

### Kontrolní otázky



7. *Definujte pojem tvrdost stavebních materiálů.*
8. *Jaké jsou základní metody experimentálního ověření tvrdosti materiálů?*
9. *Jak se provádí upřesnění obecného nebo směrného kalibračního vztahu při vyhodnocení pevnostních parametrů zkoušeného materiálu po zkouškách tvrdosti?*
10. *Popište princip a použití metody Schmidtova sklerometru při diagnostice konstrukcí.*

## 5 Elektroakustické nedestruktivní metody

### Definice

Nedestruktivní metody zkoušení (NDT=Non Destructive Testing) stavebních materiálů, prvků, dílců a konstrukcí jsou metody nevyžadující porušení zkoušené hmoty, a když již, tak jen takové, které nemůže ohrozit, byť i v nejmenší míře, únosnost nebo použitelnost stavebního prvku. Z těchto hledisek se dělí NDT na metody tzv. *čisté*, které nezpůsobí vůbec žádné porušení a *na ostatní* metody, které způsobují jen nepatrné místní porušení hmoty (stopa po vtisku tvrdoměrné, brusné či vrtné metody a pod.).



Elektroakustické metody (často nazývané elektrodynamické nebo jen dynamické) patří spolu s prozařovacími metodami (např. rentgenografickými a radiometrickými) mezi „čisté“ NDT metody. Jejich nespornou výhodou je, že na úplně stejném zkušebním místě lze měření libovolněkrát opakovat a tím získávat spolehlivější hodnoty měřených veličin, popřípadě sledovat změnu jejich hodnot v závislosti na čase (změny vlivem stárnutí, degradace hmoty, nárůstu pevnosti aj.), technologii (vliv přísad), prostředí (teplota, vlhkost, agresivita) a jiných vlivech.



### 5.1 Přehled elektroakustických nedestruktivních metod (EA NDT)

Mezi elektroakustické metody používané ve světě i u nás patří (v uzavřených závorkách znamená I — impulzový zdroj ; S — buzení spojitého, ustáleného kmitání):

- (I) *kladívková* metoda pružného impulzu – úderem kladívka (mechanického nebo elektromagnetického) na povrch zkoušeného prvku se vyvodí ráz, který současně spustí časoměrné zařízení. Pružný impulz (čelo vlny) se šíří materiálem, po dopadu na elektromechanický snímač a přeměně na elektrický impulz zastaví časoměrné zařízení – běžící čas  $t$ . Zaznamenává se doba šíření tohoto čela prošlou dráhou  $L$ , počítá se rychlost impulzu  $v=L/t$  [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ].
- (I) metoda *tlučeného rázu* (ČSN 73 6192) – spočívá v zatížení povrchu podloží nebo vozovky tlučeným rázem, ve změření odezvy konstrukce a v příslušném vyhodnocení výsledků měření. Rázové zatížení je vyvoláno pádem břemene na tlumící podložky umístěné na povrchu zatěžovací desky o průměru  $1000\text{ cm}^2$ , která je v kontaktu s měřeným prostředím. Velikost rázové síly je dána výškou pádu a hmotností břemene (obvykle do 800 kN), doba trvání rázové síly se upraví tlumícími podložkami v rozmezí  $0,01\text{ s} < T_0 < 0,1\text{ s}$ . Měří se rázová síla, průhyb v místě rázu nebo deformace vozovky umožňující stanovit i další ukazatele dynamické odezvy konstrukce na působící impulzové zatížení. Vyhodnocují se dynamický průhyb a modul tuhosti což je podíl max. rázové síly ku max. hodnotě dynamického průhybu. Tyto veličiny jsou podkladem pro vyhodnocení tuhosti a únosnosti vrstev podloží i vozovek.

- (I) *ultrazvuková impulzová* metoda (ČSN 73 1371) – princip spočívá v opakovaném vysílání mechanických tlumených vln – impulzů - do zkoušeného materiálu, vyvozených v magnetostrikčním nebo piezoelektrickém budiči o ultrazvukové frekvenci. Ultrazvukový kmitočet je dán neměnnou, tzv. jmenovitou hodnotou podle konstrukce budiče (např. rezonanční frekvencí jádra). Běžně užívané budiče ve stavebnictví mají frekvence od 20 kHz do 150 kHz, výjimečně do 500 kHz. Vzniklé vlnění - dilatační napětové vlny -, které prošlo materiálem měřeného prvku po dráze  $L$  je sejmuto piezoelektrickým snímačem a časoměrným zařízením je změřena doba průchodu  $t$ . Vyhodnocenou veličinou je rychlost šíření UZ impulzu  $v = L/t$  [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ], která slouží jako výchozí hodnota pro další hodnocení (např. stejnoměrnosti, homogenity) materiálu. Z rychlosti lze rovněž přímým výpočtem stanovit dynamickou hodnotu modulu pružnosti, popř. nepřímo z kalibračních vztahů i jiné mechanické, popřípadě fyzikální parametry zkoušeného materiálu.
- (I) aktivní metoda *akustické emise* (AE) – je založena na tom, že v prostředí zatěžovaného prvku vznikají mikroporuchy (lomy krystalů, odlomy vnitřních vrstev, apod.), které vyvolávají mechanické impulzy dilatačních vln. Ty se šíří ve zkoušeném prvku jako UZ signály, jsou snímány piezoelektrickými snímači a zaznamenávány např. na magnetická media. Vyhodnocením lze určit polohu vznikajících trhlin a během zatěžování sledovat i jejich postupné šíření. Mimo tyto pružné impulzy vznikají bohužel i nevhodné akustické „šumy“, a to jednak posouváním vnitřních částic hmoty podél již vzniklých trhlinek, jednak vlivem šíření rozruchů z venkovního prostředí (např. při zatěžování). Tyto parazitní šumy způsobují potíže při vyhodnocování výsledků a musí se při analýze vyloučit (odfiltrovat). Přednosti metody AE jsou např. v tom, že její pomocí lze stanovit (jako jediné z NDT) dosažitelnou historii zatížení. Jedná se o tzv. Kaiserův efekt, který spočívá v tom, že pokud namáhání materiálu nedosáhne vyšší hodnoty, než které bylo dosaženo od zatížení v minulosti, nedochází k novému rozvoji vnitřních mikrodefektů a nejsou tudíž registrovány nové rozruchy. Lze odhadnout rezervu únosnosti prvku před jeho destrukcí z průběhu intenzity rozvoje vnitřních trhlin.
- (S) *rezonanční* metoda (ČSN 73 1372). Je založena na tom, že prvek pravidelného tvaru a menšího rozměru (hranol, válec, deska aj.) se pomocí elektromechanického budiče a tónového generátoru umožňujícího vyvodit spojitě harmonické kmitání o frekvenci od 30 Hz někdy až do 30 kHz uvádí do rezonančního kmitočtu. Relativní amplituda vzniklého *stojatého vlnění* je většinou snímána piezoelektrickým snímačem a zaznamenávána např. na obrazovce osciloskopu. Měněním budící frekvence se najde největší amplituda, tj. ta, která vznikla v případě *rezonance vzorku*. Měřenými veličinami jsou rezonanční frekvence podélného, příčného (ohybového) a kroutivého kmitání stanovené při preferenci typů kmitání, které jsou dané podepřením vzorku a polohami budiče a snímače. Dále lze stanovit útlum kmitání z šířky příslušné rezonanční křivky.
- (S) *vibrační* metoda *příčného kmitání* velkých prvků – jedná se o analogii rezonanční metody v příčném (ohybovém) vlnění, ale s velmi nízkými budícími kmitočty (frekvence od několika Hz), zato však s větším budícím výkonem. Budičem bývá těžší pomaluběžný vibrátor s usměrněnou vibrací.

- (S) metoda *fázových rychlostí* (ČSN 73 6170). Používá se pro měření na plošných konstrukcích s jednou přístupnou plochou. Principem je výpočet fázových rychlostí šíření vln napětí (většinou ohybových) ve zkoušeném materiálu konstrukce z vlnových délek  $\lambda$  naměřených pro příslušné (odpovídající) frekvence  $f$  harmonického kmitání ( $v = f \cdot \lambda$ ), které byly vybudeny budičem v plošné konstrukci. Z nich se zjišťují dynamické charakteristiky vozovek a podloží.
- (S) metoda *mechanické impedance* – se používá pro zkoušení materiálů s výraznými vazkopružnými vlastnostmi, jak je tomu např. u asfaltobetonových vozovek nebo u podloží ze soudržných zemin. Je definovaná jako poměr síly a rychlosti pohybu v budícím bodě harmonicky kmitající soustavy (u některých autorů je to poměr síly a průhybu v budícím bodě) a je komplexní funkcí. Vztahuje-li se rychlost pohybu k jinému než budícímu bodu, jedná se o mechanickou impedanci přenosu. Z hlediska měřicí techniky je výhodnější měřit normovanou mechanickou impedanci  $Z = F(\bar{a}.M)$  Zde je  $F$  = harmonicky proměnná síla,  $\bar{a}$  = zrychlení v budícím bodě kmitajícího prvku o hmotnosti  $M$ .  $Z$  je bezrozměrná komplexní funkce, jejíž průběh je závislý na tvaru, rozměrech a druhu kmitání tělesa, na pružných a vazkých vlastnostech materiálu (závisejících např. na teplotě aj.) a na okrajových podmínkách tělesa. Určují se komplexní moduly  $E_K$  a  $G_K$ .

## 5.2 Možnosti aplikace metod

Uvedenými metodami můžeme přímo určit některé fyzikálně-mechanické parametry měřeného prostředí (materiálu), popřípadě pomocí vytvořených regresních funkcí, kalibračních vztahů, odhadovat korelované veličiny.

### Definice

Metody jsou založeny na tom, že charakteristiky šíření mechanických vln (akustických vln napětí) ve hmotném prostředí (plyn, kapalina, tuhá látka) nebo vynuceného kmitání v tuhých prvcích jsou vázány na fyzikálně–mechanické vlastnosti zkoumaného prostředí.



V pružném nebo tuhém prostředí – teoretickým předpokladem je, že je izotropní a homogenní – sem patří : hustota  $\rho$  (objemová hmotnost), moduly pružnosti  $E_{dyn}$ ,  $G_{dyn}$  případně i moduly komplexní, útlumové charakteristiky faktor tlumení  $\delta_L$ , resp.logaritmický útlum  $\delta$  a Poissonův koeficient  $\nu_{dyn}$ ; jimi lze vyjádřit závislost stavu napjatosti na deformaci sledovaného materiálu. U betonu, zejména pak u asfaltobetonu, který je heterogenním a pružno–vazko–plastickým materiálem, je situace složitější. Jeho vlastnosti závisí nejen na složení (pojivo, voda, vzduch, kamenivo, přísada, příměs), ale i na časově proměnlivých činitelích (teplota, vlhkost; nárůst krystalizačních vazeb stářím, do tvarování – smršťování, relaxace, chemická degradace aj.). Tyto činitele ovlivňují zákonitosti šíření akustických vln v betonových prvcích a to zcela jinak, než u kovových dílců. Při používání a vyhodnocování těchto metod na betonových prvcích, dílcích a stavebních konstrukcích, a to i zjednodušeně podle příslušných ČSN, musíme k tomu nutně přihlížet.

## Poznámka



Pro správné použití metod především z hlediska interpretace výsledků měření se předpokládají základní znalosti z oblasti teorie vlnění, vzniku vlny a vlnění, fázových rychlosti šíření vlnění, šíření vlnění z hlediska rozměrnosti prostředí, útlumu vlnění, odrazu vlnění, lomu vlnění, ohybu vlnění a interference vlnění. Tyto jsou podrobně uvedeny např. v [1], [2], [22] nebo učebnicích fyziky.

## 5.3 Ultrazvukové metody (UZ)

Pro stanovení vlastností materiálů nebo při lokalizaci vad u technických prvků (defektoskopii) se v praxi používá několik druhů UZ metod. Jednak se může používat *spojité vysílání vlnění* (např. ve strojírenství pro kontinuální kontrolu tloušťky plechů nebo vad materiálu), jednak, a to častěji, *vysílání impulzové* (krátké svazečky mechanického tlumeného kmitání vznikající v budiči účinkem pravidelně se opakujících elektrických impulzů). Přitom se při zkoušení materiálů mohou používat dvě UZ sondy; jedna jako *budič* mechanických impulzů, druhá jako *snímač*, která mění přicházející příp. dopadající mechanické vlnění na jeho elektrický obraz. Lze rovněž použít pouze jednu sondu (většinou piezoelektrickou), která se přikládá na povrch zkoušeného prvku. Ta zprvu funguje jako budič, tj. vyšle do materiálu mechanický impulz, ihned se přepne na snímání, tj. pracuje jako snímač, který po příchodu odražené vlny od protějšího povrchu vzorku nebo jiné překážky ji přemění na elektrický tvar a zobrazí jako tzv. „echo“ na obrazovce defektoskopu. Takto pracují strojírenské UZ defektoskopy pro odhalování vad výkovků, svárů a p.. Používají se piezoelektrické sondy o vysokých jmenovitých frekvencích, obvykle od 1 do 6 MHz a metoda se nazývá *impulzová odrazová* (Echolot). Nehodí se pro materiály s velkým útlumem a pro časté heterogenní hmoty, jako je např. beton, i když by byla ve stavebnictví velmi potřebná pro kontrolu konstrukcí přístupných z jednoho povrchu. Proto se ve stavebnictví pro zkoušení betonu používají pouze přístroje o dvou sondách.

*Ultrazvuková impulzová metoda průchodová* se používá převážně tam, kde chceme zjistit z rychlosti šíření UZ vlnění (impulzu) jakost zkoušeného prostředí např. stejnoměrnost výrobku, popřípadě jeho mechanicko-fyzikální charakteristiky. Princip UZ metody spočívá v tom, že se opakovanými elektrickými impulzy vytvoří v budiči úzké svazky mechanického tlumeného kmitání. Tyto mechanické impulzy se vnesou do zkoušeného prvku a po proběhnutí změřené dráhy  $L$  se sejmou snímačem. Přitom se měří doba průchodu UZ vlnění, t.j. čas  $t$  od vyslání impulzu budičem po zaznamenání jeho dopadu na snímač. Impulzová rychlost UZ je pak dána vztahem :

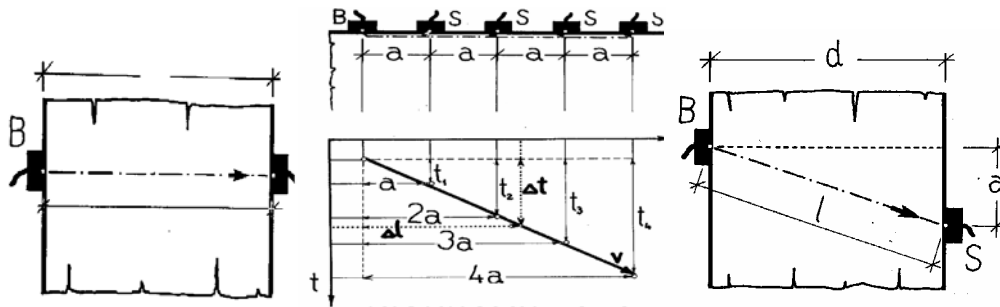
$$v_{uz} = L/t \quad [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}] \quad (5.1)$$

### 5.3.1. Ultrazvukové měřící přístroje

Při ultrazvukovém zkoušení stavebních prvků, dílců i konstrukcí se používá dvou elektroakustických měničů – sond : budiče a snímače. Způsob prozvučování závisí na přístupnosti povrchů zkoušeného objektu a na umístění sond na zkoušeném objektu. Proto rozeznáváme tyto typy *prozvučování* :

- *protilehlé – normální*, leží-li UZ sondy na protilehlých stěnách a jsou-li osazeny na stejné normále k oběma povrchům a *protilehlé – šikmé*, jsou-li sondy na protilehlých stěnách mimo tuto normálu; mohou být ve stejné nebo v různých výškách (Obr. 5.1),
- *boční normální i šikmé*, leží-li sondy např. na sousedních stěnách objektu, a to buď v normálové rovině nebo mimo ni (Obr. 5.2 a 5.3),
- *povrchové*, kdy se obě sondy přikládají na tutéž plochu objektu (Obr. 5.2 a 5.6),
- navíc ještě existuje prozvučování *vnitřní* (normální i šikmé), kdy se měří mezi vyvrtanými otvory v konstrukci (např. se tak dá stanovit kvalita betonu v tlustých základových deskách nebo stěnách přístupných z jednoho povrchu, stěny biologické ochrany JE, obezdívky tunelů apod.) (Obr.5.5).

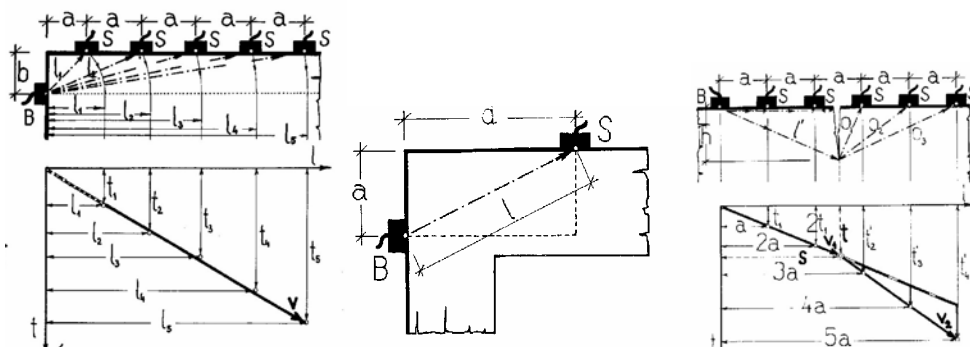
Přednostně se volí *normální protilehlé prozvučování*, poněvadž u něj se dá měřící základna nejpřesněji určit.



Obr. 5.1 Normální prozvučování

Obr. 5.2 Povrchové prozvučování

Obr. 5.3 Šikmé-protilehlé prozvučování



Obr. 5.4 Povrchové šikmé měření

Obr. 5.5 Měření šikmé přes roh

Obr. 5.6 Povrchové měření – trhlina

U normálního protilehlého, bočního i vnitřního prozvučování se přikládají sondy na jednoznačně stanovená a označená místa a provede se měření. U šikmých systémů a povrchového měření je možné jednu sondu (obvykle budič) ponechat na jednom místě a snímač můžeme přemisťovat na předem graficky vyznačená místa (body, nejlépe křížky). Jestliže leží tato místa na přímkě (respektive známé křivce), jedná se o systém následného prozvučování, který se

ve zkušebnické praxi označuje jako „trasovací“ metoda. Nejčastěji se používá pro stanovení odstavu budiče od snímače u povrchové metody. Tak lze stanovit nejvhodnější délku měřicí základny, kterou pak používáme pro opakované povrchové měření např. na plošných konstrukcích.

### 5.3.2. Měření doby průchodu signálů

U digitálních UZ přístrojů je obvykle hodnota doby šíření UZ zobrazována pro kratší měřicí základny na 0,1  $\mu\text{s}$  (výjimečně 0,01  $\mu\text{s}$ ), pro delší základny (pro měřený čas přes 100  $\mu\text{s}$ ) pak na 1  $\mu\text{s}$ . Vyhovuje to ustanovení ČSN 73 1371, měřený čas má být zjištěn s přesností na  $\pm 1\%$ .

Naměřená hodnota času  $t_L$  je ovlivněna UZ aparaturou, zejména konstrukcí obvodů přístroje, ultrazvukových sond, tvaru UZ signálu a použitím akustického vazebního prostředku. Skutečná doba šíření UZ ve zkoušeném materiálu  $t_i$  se proto upravuje korekcí z měření na kalibračním vzorku. Kalibrační vzorek (často nazývaný etalon) je dodáván buď výrobcem přístroje nebo odborným ústavem pro UZ zkoušení. Bývá konstruován pro nejběžněji měřené časy na prvcích, tj. 60 až 120  $\mu\text{s}$ . Je na něm vyznačena nominální doba  $t_E$ , obvykle na 0,1  $\mu\text{s}$ . Naměří-li se UZ přístrojem na kalibračním vzorku UZ sondami, a to s příslušným (použitým) vazebním prostředkem a stejným přitlakem na sondy doba průchodu  $t_{ME}$ , je ztrátový čas, tzv. „mrtvý čas“, korekční -  $t_{kor} = t_{ME} - t_E$  a správná doba průchodu signálu od budiče k snímači je  $t_i = t_L - t_{kor}$ .

Zkušební místa (poloha sond) mají být volena tak, aby nedošlo k ovlivnění měřeného času vlivem okraje zkušebního tělesa, nehomogenitou betonu nebo přítomností poruch nebo trhlin v oblasti zkušebních míst. To pochopitelně neplatí, je-li úkolem měření ohraničit oblast části betonové konstrukce, která je poškozená trhlinami, hnízdy ap., tj. vlastně máme-li určit její nehomogenitu.

Vliv výztuže se projeví :

- při měření kolmém nebo šikmém na směr výztuže tehdy, je-li součet průměrů výztuže  $d_i$  větší nebo rovný 1/10 měřicí základny  $L$  t.j.

$$\frac{\sum_{i=1}^n d_i}{L} \geq \frac{1}{10}, \text{ pak } v_b = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{1 - \frac{\sum_{i=1}^n d_i v_{bs}}{L v_s}} \quad (5.2)$$

kde  $v_s$  je rychlost impulzu UZ vlnění v oceli výztuže (tj. cca 5300 – 5700  $[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$ ),

$v_{bs}$  rychlost v železobetonu při měření kolmém/šikmém na směr uložení prutů v  $[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$ ,

$d_i, n, L$  jsou postupně: průměr [mm], počet prutů výztuže a délka měřicí základny v [mm],

- při měření rovnoběžném se směrem prutů výztuže může rovněž dojít k ovlivnění (zvýšení) rychlosti šíření UZ. Je třeba se vyhnout tomu, aby

místa přikládání sond byla v oblasti ovlivnění, která je přibližně ohraničena válcovou plochou o poloměru  $r \approx L/6$  [mm], mající střed v ose prutu výztuže,

- měření na *jednom zkušebním místě* se opakuje 2 krát. Pokud se naměřené hodnoty od sebe neliší více než o 5% z menší hodnoty, bere se za výsledek aritmetický průměr obou hodnot. Při větším rozdílu se provede další měření a do výsledku (aritmetického průměru) se použijí ty hodnoty, jejichž rozdíly jsou menší než 5% od nejmenší změřené hodnoty,
- měření *se nemá provádět* v místech se šterkovými hnízdy, ani přes omítku, pokud nehledáme vady prvku a je třeba uvážit vliv vlhkosti betonu; podle zkoušek TZÚS, každé procento zvýšení hmotnostní vlhkosti způsobí nárůst rychlosti UZ v betonu o 100 až 120 m.s<sup>-1</sup>,
- při měření na vzorcích a v konstrukci je potřebné používat *stejnou aparaturu* s pokud možno stejnými UZ sondami. Je rovněž vhodné, aby přístroj *obsluhoval též pracovník*, jinak je nutno provést statistické porovnání shodnosti (nebo nejistoty) měření obou pracovníků a vzít ji pak do úvahy při vyhodnocování výsledků UZ.

### 5.3.3. Vyhodnocení rychlosti šíření impulzů podélných UZ vln

Impulzová rychlost se vypočte ze vztahu:

$$v_L = \frac{L}{t_L \pm t_{kor}} \quad [\text{m.s}^{-1}], \quad (5.3)$$

Výsledná impulzová rychlost se uvádí s přesností na 10 m.s<sup>-1</sup> a je-li to potřebné, přepočítává se podle rozměrnosti prostředí, obvykle na prostředí trojrozměrné :

$$v_{L3} = k_3 v_{L1}, \text{ respektive } v_{L3} = k_3/k_2 v_{L2} \quad (k_1 = 1 \text{ pro } v_{L1})$$

Hodnoty  $k_3$ ,  $k_2$  a  $k_3/k_2$  jsou uvedeny pro Poisson. součinitele  $\nu_{bu}$  v tabulce 1. ČSN 73 1371.

### 5.3.4. Stanovení vlastností betonu – dynamický modul pružnosti v tlaku/tahu

Určí se z fyzikálního vztahu:

$$E_{bu} = \rho v_L^2 / k^2 \cdot 10^{-6} \quad [\text{MPa}], \quad (5.4)$$

kde  $\rho$  – objemová hmotnost betonu, [kg.m<sup>-3</sup>]  
 $v_L$  – impulzová rychlost podélného UZ vlnění, [m.s<sup>-1</sup>]  
 $k$  – součinitel rozměrnosti prostředí (hodnoty  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ , ).

### 5.3.5. Stanovení vlastností betonu – pevnost v tlaku

UZ měřením lze pevnost betonu stanovit z kalibračního vztahu mezi rychlostí šíření UZ impulsu v betonu a jeho krychelnou pevností. Podle ČSN 73 1370, oddíl III. se rozeznávají :

- *kalibrační vztahy obecné* (zjištěné na nejméně 300 vzorcích),
- *kalibrační vztahy směrné* (nejméně na 100 zkušebních vzorcích), z nichž lze obdržet pevnosti betonu v tlaku  $R_{be}$  s nezaručenou přesností (hodnotu pevnosti lze upřesnit) a
- *kalibrační vztahy určující – úzké* (pro jednu třídu betonu stanovené na 18 až 24 zkušebních vzorcích ) anebo
- *kalibrační vztahy určující – široké* (pro více tříd betonu dle čl.50), jimiž lze vyhodnotit upřesněné pevnosti betonu v tlaku  $R_{be}$ .

### Poznámka

Kalibrační vztahy se odvozují podle oddílu III. ČSN 73 1370 a návodu v Příloze I. Směrné kalibrační vztahy jsou uvedeny v ČSN 73 1371.

### 5.3.6. Stanovení vlastností betonu – hutnost

Hutnost betonu  $T$  je možné určit z rychlosti  $v_{L3}$  a z měrných hmotností hutných složek betonu, t.j. kameniva a zatvrdlého cementového tmele např. podle kalibračního vztahu

$$T = 100 - \frac{a \cdot \rho - v_{L3}}{b} \quad v (\%), \quad (5.5)$$

- kde  $T$  je poměr objemové k měrné hmotnosti zatvrdlého betonu v %,  
 $a, b$  jsou součinitele pro daný beton ( $a=1,85$ ,  $b=100$  pro pórovitost, oba součinitele pro obyčejný beton),  
 $\rho$  je měrná hmotnost hutných složek betonu kameniva (pro běžné-kamenivo  $2600 \text{ kg.m}^{-3}$ ) a cementového tmele ( $3000 \text{ kg.m}^{-3}$ ),  
 $v_{L3}$  impulzová rychlost v  $\text{m.s}^{-1}$ . Hodnoty měrné hmotnosti i UZ rychlosti se dosazují do vztahu bez rozměrů.

### 5.3.7. Stanovení vlastností betonu – strukturální změny

Strukturální změny mohou vznikat na povrchu nebo uvnitř betonového tělesa se rovněž dají určit pomocí UZ měření. Patří mezi ně zejména poruchy vlivem požáru, degradace betonu vlivem povětrnosti (účinky mrazu), vlivem agresivity prostředí (působení agresivních vod náporových i podzemních, solení silnic), vlivem dynamického i statického zatížení a jiné, mimořádné vlivy. Všechny tyto typy poruch je ale možné posuzovat *pouze vzájemným porovnáváním* degradovaného a neporušeného betonu stejného (obdobného) prvku. Při těchto hodnoceních se dosti často užívá i měření útlumu UZ signálu v betonu, o němž se tu nezmiňujeme pro náročnost měření.

- *Povrchová degradace* betonu se určuje snadněji, než vnitřní poruchy. Pro její stanovení se používá povrchové měření na předem vyvolených měřicích základnách, popřípadě i trasovací metody. Vliv porušeného místa (oblasti) se projevuje podstatným snížením UZ rychlosti a výrazným zmenšením amplitudy přicházejícího signálu, takže je velmi vhodné, ne-li naprosto nutné, používat obrazovkový UZ přístroj.
- Při hledání *vnitřních poruch* betonu v prvku se používá speciálních metodik měření i vyhodnocování, např. UZ měření na křížujících se měřicích základnách, plošná měření na měřicích sítích a vyhodnocení homogenity betonu pomocí čar stejných hladin rychlostí – *izovel*, a podobně. Tato speciální měření mohou provádět jen odborně a teoreticky zaškolení a technicky zdatní zkušební pracovníci ve specializovaných ústavech.
- Při určování *narušení betonu* je rovněž nutné uvážit správnou volbu UZ sond, vliv prostředí (sucho, vlhko), metodiku měření délek měřicích základen a pod.

### 5.3.8. Stanovení vlastností betonu – stejnoměrnost (stejnoro-dost)

Velmi výhodnou je UZ metoda pro zjišťování stejnoměrnosti betonu ve stavebních dílcích, prvcích a konstrukcích, neboť může průchodovou metodou elegantně stanovit průměrnou jakost betonu i uvnitř konstrukce, pokud je tato *z obou stran přístupná*. Na obou protilehlých stranách stavebního prvku se vyznačí měřicí síť. Oka sítě mají být volena u protilehlého prozvučování tak, aby rozteč jejich uzlů byla srovnatelná s měřicí základnou, ne však větší než 500 mm. Při větší vzdálenosti uzlů je nutno provést měření na vložené síti a zjistit, zda nedochází k výraznější změně průměrné rychlosti UZ. Stanoví se vzdálenosti odpovídajících protilehlých uzlů sítě – měřicí, na nich se naměří doba průchodu UZ vlnění a spočítají se rychlosti, které se vynesou do výkresu prvku a vykreslí se jako vrstevnice na mapě čary stejných rychlostí – *izovely*, obvykle po 100 m/s. Z jejich průběhu lze velmi dobře posoudit stejnoměrnost betonu v konstrukci.

Při jednostranně přístupném dílci se použije *povrchové metody*. Tato metoda se často kombinuje s tvrdoměrnou (sklerometrickou) metodou, kdy se zkušební místa, např. pro zkoušku Schmidovým tvrdoměrem volí mezi uzly „ultrazvukové sítě“. Tato, tzv. *kombinovaná metoda* (ČSN 73 2011) dává poněkud lepší „odhady“ pevností a proto ji dáváme přednost, není-li možno odebrat z konstrukce porovnávací vzorky.

## 5.4 Rezonanční metoda

Jednou z elegantních metod zjištění pružných dynamických charakteristik stavebních materiálů je rezonanční metoda. Je určena pro stanovení dynamických hodnot : *modulu pružnosti v tahu/tlaku*  $E_{br}$ , i jako jedna z mála metod, *modulu pružnosti ve smyku*  $G_{br}$ , a tím i *dynamické hodnoty Poissonova koeficientu*  $\nu_{br} = (E_{br}/2G_{br} - 1)$ .

## Definice



Podstatou rezonanční metody je změření hodnot určitého druhu vynuceného rezonančního kmitání menších zkušebních vzorků pravidelného geometrického tvaru, pro něž dovedeme teoreticky odvodit vztahy mezi vlastními frekvencemi a odpovídajícími pružnými charakteristikami materiálu.



Nejběžněji se používají kontrolní zkušební vzorky ve tvaru dlouhých hranolů (např. 100.100.400 mm) nebo válců. Poněkud obtížnější je používání krátkých hranolů, válců (s poměrem délky ku příčnému rozměru menším než 2), popřípadě i krychlí a desek. Další možnou charakteristikou k posouzení kvality materiálu prvku je *logaritmický dekrement útlumu* (tlumení), pomocí něhož můžeme sledovat časové změny kvality, např. degradaci materiálu působením okolí.

Jak z uvedeného vyplývá je rezonanční metoda vhodná pro laboratorní zkoušení volných tj. nezabudovaných prvků, které mají být pokud možno homogenní. Beton můžeme pokládat za homogenní materiál, pokud je dobře zpracovaný bez vnitřních vad, trhlin, hnízd – pak naměřené výsledky odpovídají teoretickým vztahům s postačující přesností. Objeví-li se ve zkušebním vzorku nespojitosti, trhlinky, rozdílné hutnosti oblastí apod., je měření touto metodou často neuskutečnitelné.

### 5.4.1. Princip rezonanční metody

Zkušební tělesa, uložená jako prostý nosník s *převislými konci* můžeme vhodným budícím zařízením s plynule měnitelnou frekvencí rozkmitat třemi základními druhy jejich *vlastních (rezonančních) kmitočtů* (frekvencí), a to kmitáním:

- *podélným*  $f_L$  (longitudinálním, dilatačním), a to tehdy, je-li nosník podepřen (nebo vetknut) uprostřed své délky a obě jeho čela kmitají v protifázi ve směru délky vzorku,
- *kroutivým*  $f_t$  (torzním, smykovým) s obdobným uložením vzorku, ale s torzním kmitáním čel vyvozeným kroutivým momentem, tj. kolmo na osu vzorku.

U obou případů je při základní frekvenci uzlová rovina dána středním průřezem vzorku v místě uložení, zatím co kmitny tvoří čela vzorku. Vlnová délka stojatého vlnění, které takto vzniká, je určena dvojnásobnou délkou vzorku  $L$ , tedy  $\lambda_L \equiv \lambda_t = 2L$ . Lze tedy určit rychlost šíření vlny v jednorozměrném prostředí (délka je více než 3-krát větší, než příčný rozměr) ze vztahu :

$$v_{Ll} = f_L \lambda_L = 2 L f_L \quad [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}] \quad (5.6)$$

resp.  $v_t = f_t \lambda_t = 2 L f_t \quad [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}] \quad (5.7)$

- *příčným*  $f_f$  (ohybovým, flexibilním), je-li prutový prvek podepřen v místě uzlů jako prostý nosník s *převislými konci*.

## 5.4.2. Určení dynamických modulů pružnosti a Poissonova koeficientu

Závislost mezi modulem pružnosti v tahu/tlaku, objemovou hmotností a rychlostí dilatační vlny, tedy pro modul  $E_{brL}$  stanovený z podélné frekvence  $f_L$  vychází

$$E_{brL} = 4 f_L^2 L^2 \rho \quad [\text{Pa}] \quad (5.8)$$

a poněkud obtížněji počítaný, méně přesný  $E_{brf}$  z ohybového, tj. příčného kmitání

Hodnota  $c$  je závislá jak na poměru poloměru setrvačnosti k délce vzorku  $i/L$ , tak i pro krátké vzorky na Poissonově koeficientu. Dosazením pak vychází vztah pro výpočet  $E_{brf}$  po úpravě pro základní rezonanci takto :

$$E_{brf} = (4\pi^2 / 4,730^2) c L^4 / i^2 f_f^2 \rho = 0,0789 c f_f^2 L^2 \rho / (i/L)^2 \quad [\text{Pa}], \quad (5.9)$$

kde  $c$  nabývá hodnot podle tab.5.1.

i/L	c	i/L	c	i/L	c	i/L	c
0,00	1,00	0,05	1,21	0,10	1,78	0,15	2,66
0,01	1,01	0,06	1,29	0,11	1,93	0,16	2,88
0,02	1,03	0,07	1,40	0,12	2,09	0,17	3,10
0,03	1,08	0,08	1,51	0,13	2,27		
0,04	1,13	0,09	1,64	0,14	2,46		

Tab. 5.1

Obdobným postupem jako pro podélné kmitání by se odvodila pro krouivé kmitání vlnová rovnice z momentového působení na vyřátem elementu z prvku. Dosazením do její konstanty  $c_t^2 = v_t^2 = G_{br}/\rho \cdot J_k/J_p$  získáme potřebný vztah mezi modulem pružnosti ve smyku  $G_{br}$ , objemovou hmotností a fázovou torzní rychlostí pro známý příčný průřez vzorku. Veličina  $J_k$  je moment tuhosti v kroucení,  $J_p$  je polární moment průřezu (centrální moment setrvačnosti).

Rezonanční modul pružnosti ve smyku je dosazením a zavedením  $k_t = J_p/J_k$  dán vztahem

$$G_{br} = \rho v_t^2 J_p/J_k = 4 k_t f_t^2 L^2 \rho \quad [\text{Pa}] \quad (5.10)$$

Pro kruhový průřez je

$$J_p = J_k = \pi r^4/2 \text{ a tedy} \quad k_t = 1$$

Pro čtvercový průřez je

$$J_p = a^4/6, J_k = 0,1404 \cdot a^4 \quad k_t = 1/(6 \cdot 0,1404) = 1,187$$

Pro obdélníkový průřez

$$b, h, \text{ při } b \leq h \text{ je} \quad k_t = [b/h + h/b] / [4(b/h) - 2,52(b/h)^2 + 0,21(b/h)^6]$$

Pro výpočet dynamické hodnoty *Poissonova koeficientu* užitíme známý vztah z pružnosti a pevnosti mezi moduly v tahu/tlaku a ve smyku  $E/2G = 1 + \nu$ , pak

$$\nu_{br} = E_{br} / 2G_{br} - 1 = f_L^2 / (2k_t f_i^2) - 1 \quad (5.11)$$

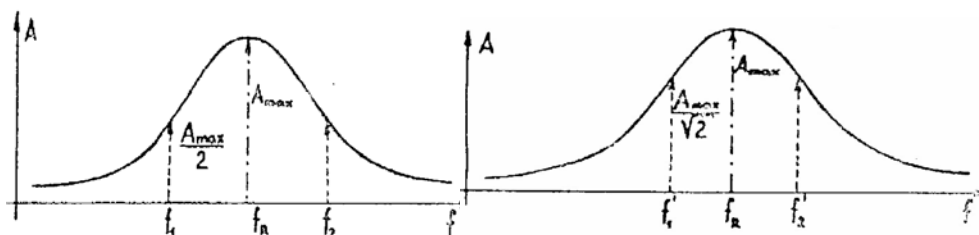
### 5.4.3. Rezonanční křivka

Zkušební prvky se dostávají do rezonančního stavu vynuceným kmitáním plynulou změnou frekvence budícího zařízení. Amplitudu kmitání snímá snímací zařízení, které svým indikačním členem (obrazovka osciloskopu, milivoltmetr, souřadnicový zapisovač aj.) registruje její velikost. Zobrazíme-li graficky závislost amplitudy kmitání na frekvenci vzorku, získáme tzv. *rezonanční křivku* (obr.6.16). Blíží-li se budící frekvence zařízení k vlastnímu kmitočtu vzorku, roste amplituda kmitání – rezonanční křivka vzrůstá. Jakmile při rovnosti budící a snímané frekvence dosáhne svého maxima (vrchol rezonanční křivky), nastane vlastní rezonanční kmitání zkušebního prvku. Jinými slovy : vrchol rezonanční křivky (největší amplituda kmitání  $U_{max}$ ) udává příslušnou rezonanční frekvenci vzorku  $f_R$ . Přitom se může jednat o základní (vlastní) nebo 1. harmonickou, 2. harmonickou a vyšší rezonanční frekvence.

Poněvadž při tomto způsobu rozkmitávání prvku jde o vynucené kmitání, bylo by správné upravit získanou hodnotu rezonanční frekvence o *vliv tlumení kmitání*. Hodnoty tlumení u běžných materiálů jsou však natolik malé, že jejich vliv lze pro běžnou praxi zanedbat.

*Tlumení* kmitání má ale vliv na tvar rezonanční křivky. Je-li útlum nepatrný, je v okolí rezonance nárůst amplitud velmi strmý, s ostrým vrcholem rezonanční křivky. V tomto případě se dá hodnota rezonanční frekvence velmi dobře a jednoznačně určit (např. u hutných materiálů). Při velkém útlumu je nárůst amplitud velmi pozvolný, rezonanční křivka je značně protáhlá a její zaoblený vrchol není jednoznačně vyznačený. Pro tento případ je určení rezonanční frekvence značně nejisté, tyto případy nastávají např. u mladých, vlhkých nebo porušených betonových vzorků. Nejvíce potíží však vzniká, vyskytne-li se při měření dvojvrcholový tvar rezonanční křivky. Ten může vzniknout při běžném měření na některých „krátkých“ tělesech (krychlích, deskách, válcích) vlivem blízkých rezonančních frekvencí různého typu kmitání. U dlouhých zkušebních vzorků to nastává, jsou-li nestejněměrně zpracovány (různá hutnost horní a dolní vrstvy) nebo i vlivem nezapozorovaných vnitřních nespojitostí (hnízda, mikrotrhliny apod.). V těchto případech se za „rezonanční“ frekvenci bere průměrná hodnota získaná z rezonancí obou vrcholů ( $f_R = f_{R1} + f_{R2}$ ) s tím vědomím, že z toho vyplývá pro další výpočty značná nejistota.

Charakteristikou útlumu bývá obvykle *logaritmický dekrement tlumení*  $\delta$ , který se určí jako přirozený logaritmus poměru dvou následujících amplitud tlumeného kmitání zkušebního prvku. Dá se rovněž zjistit z tvaru rezonanční křivky, z poměru její šířky při určité amplitudě k její rezonanční frekvenci.



Obr. 5.7 Křivka pro logaritmický dekrement

Obr. 5.8 Rezonanční křivka pro výpočet logaritmického dekrementu

Podle obr. 5.7 se logaritmický dekrement vypočítá buď ze vztahu :

$$\delta = \pi(f_2 - f_1) / f_R \quad (5.12)$$

nebo podle obr. 6.8 ze vztahu :

$$\delta = \pi(f_2 - f_1) / (\sqrt{3} f_R) \quad (5.13)$$

#### 5.4.4. Měřicí přístroje

Rezonanční měřicí aparatura sestává ze dvou hlavních obvodů : budícího a snímajícího.

*Budící obvod* sestává:

- z budícího generátoru (tónového generátoru) s plynule regulovatelným kmitočtem sinusových (někdy i pilových) kmitů – obvykle od 100 do 20000 [Hz]. Dále je nutný výkonový zesilovač napojený na vhodný budič, obvykle elektrodynamický pro kmitočty do 15 kHz nebo magnetostrikční, pracující pro vyšší kmitočty – někdy do 30 kHz. Generátor kmitů pracuje na principu fázového nebo RC-generátoru s frekvenčním rozsahem potřebným k vyvození rezonančních frekvencí. Musí splňovat v celém rozsahu budících kmitočtů dostatečnou přesnost do  $\pm 1\%$ . Navíc nesmí vznikat v celém kmitočtovém rozsahu budícího obvodu nežádoucí rušivé rezonanční jevy, které by mohly nepříznivě ztížit nebo ovlivnit měření.

*Budič* je pro nižší kmitočty používán elektrodynamický nebo pro kmitočty přesahující 15 kHz magnetostrikční, obdobně jako jsou UZ budiče. Mění budící elektrické kmitočty na mechanické kmitání, které se přenáší na zkušební těleso, a to buď :

- *pružící opěrnou ploškou* – pak se pro dobrý přenos energie kmitání budiče do zkušební vzorku používá vhodný spojovací prostředek obdobný, jak je to nutné i pro přenos kmitání ze vzorku na snímač. Nejčastěji se používá velmi měkké plastelíny, a kde to nevádí i různých masť, jako je Indulona apod.
- nebo *ostrým hrotem*, který bývá doplňující součástí budiče a který je naprosto nutný pro vyvození torzního kmitání válcovitých těles. V tomto případě sice není naprosto nutné použít spojovacího prostředku, ale umístění plastelíny na konec hrotu umožňuje dokonalejší styk s rozkmitávaným tělesem.

*Snímací obvod* je složen z velmi citlivého snímače mechanických kmitů (elektromechanického měniče), který je navázán přes citlivý zesilovač na indikační zařízení. Poněvadž amplitudy rozkmitávaného vzorku jsou velmi nepatrné, mohou se používat jen snímače pracující na elektrickém principu.

- *Snímače* bývají piezoelektrické, elektrodynamické, elektromagnetické, odporové, kapacitní, a to pro nutnost mnohonásobného zesílení elektrickou cestou. Nejčastěji se užívají piezoelektrické snímače (obdobně jako u UZ metody), u nichž se mechanické kmitání vzorku přenáší přes spojovací prostředek na piezoelektrickou vložku ve velmi tenkém kovovém pouzdře. Vložka je ve formě vodivě pokovené destičky, např. z elektricky polarizovaných krystalů nebo z velmi citlivých piezokeramik, jako je bariumtitanátová nebo bariumzirkonátová keramika, v níž se na základě piezoelektrického efektu dopadající mechanické kmitání přemění na jeho elektrický obraz. Toto elektrické vlnění (kmitání) se po náležitém zesílení vede na vhodné indikační zařízení.
- *Indikační zařízení* může být vytvořeno velmi citlivým ručkovým přístrojem (bývá to milivoltmetr) nebo katodovým osciloskopem anebo oběma přístroji. Pro získání úplného spektra amplitud rezonančních kmitání měřeného zkušební vzorku v celém měřicím rozsahu přístroje se používá i grafického souřadnicového zapisovače.
- *Katodový osciloskop*, upravený jako indikační zařízení pro rezonanční metodu je velmi vhodný přístroj jak pro výuku, tak také pro náročné vědecko-výzkumné úlohy. U něj je možné přivést budící frekvenci kmitání na vodorovné destičky a zesílenou sejmutou frekvenci kmitání na svislé destičky. Na obrazovce osciloskopu lze sledovat Lissajousův obrazec vytvořený složením dvou na sebe kolmých kmitočtů, tj. při vynuceném kmitání *elipsu* (výjimečně kružnici nebo úsečku). Při vzniku základní rezonance vzorku je délka svislé amplitudy (výška elipsy) snímaného kmitání největší. Při polovičním budícím kmitočtu vznikne při rezonanci vzorku obrazec ve formě osmičky.

### Poznámka



Princip zkoušení rezonanční metodou je podrobně popsán v kapitole 7 modulu BI02-M04.

### Kontrolní otázky



11. *Definujte pojem NDT metody zkoušení stavebních materiálů.*
12. *Jaký je princip a využití UZ metody hodnocení stavebních materiálů?*
13. *Jaký je princip a využití rezonanční metody při hodnocení stavebních materiálů?*

## 6 Závěr

### 6.1 Shrnutí

Modul M02 podává encyklopedický přehled o postupech zkoušení materiálů, dílců, konstrukcí a principech nedestruktivních metod používaných ve stavebnictví. Problematika je podána v rozsahu požadovaných znalostí v rámci předmětu Zkušebnictví a technologie. Pro omezený rozsah modulu nejsou zařazeny destruktivní laboratorní zkoušky materiálů na zkušebních tělesech a technologické zkoušky. Tyto jsou náplní předmětu Stavební látky.



V jednotlivých kapitolách byli čtenáři seznámeni s přístrojovými možnostmi v oboru měření posunů a deformací (kapitola 2), podstatou zatěžovacích zkoušek stavebních prvků a konstrukcí (kapitola 3), tvrdoměrnými metodami zkoušení materiálů nosných konstrukcí (kapitola 4) a elektroakustickými nedestruktivními metodami (kapitola 5).

Modul M02 je součástí souvisejících modulů řady BI02-M01 až 4. Modul 01 je věnován problematice technologie betonu, modul M03 teoretické části oboru radiační defektoskopie a modul M04 zahrnuje praktická cvičení včetně korepondenčních úkolů z části předmětu zkušebnictví.



## 7 Studijní prameny

### 7.1 Seznam použité literatury

- [1] Hónig, Zapletal, V.: *Nedestruktivní zkušebnictví*. Skripta FAST VUT Brno, 1982 a pozdější nezměněný dotisk pro PGS ÚSI VUT V Brně z r. 1982.
- [2] Koktavý, B.: *Mechanické kmitání a vlnění*. Skripta FAST VUT Brno, PC-DIR spol.s.r.o. Brno 12/1995 :
- [3] Zapletal, V.: *Zkušebnictví I. – Učební texty VŠ*. ES VUT Brno 1982



### 7.2 Seznam doplňkové studijní literatury

- [4] Janíček, P.: *Technický experiment*. FS VUT Brno, 1989
- [5] Hoffmann, K.: *An Introduction to Measurement using Strain Gages*. HBM Darmstadt, 1989
- [6] Klementev, I., Kyška, R.: *Elektrické meranie mechanických veličín*. Alfa Bratislava, 1990
- [7] *Firemní literatura Gage Technique England*. Velká Británie, 2004
- [8] *Firemní literatura HBM Darmstadt*. SRN, 2004
- [9] Němec: *Odporové tenzometry v praxi*. SNTL Praha 1965
- [10] Martinček, G.: *Nedeštruktívne dynamické metódy skúšania stavebných materiálov*. Vydavateľstvo SAV Bratislava, 1962
- [11] Martinček, G.: *Dynamická diagnostika vozovok*. Bratislava, VEDA (Vydavateľstvo SAV) Bratislava 1983
- [12] Martinček, G.: *Teoria a metodika dynamického nedeštruktívneho skúšania plošných prvkov*. Bratislava, VEDA (SAV) 1975
- [13] Galan, A.: *Kombinované ultrazvukové metódy skúšania betónu*. VEDA (SAV) Bratislava 1984
- [14] Vejchoda, J.: *Zkoušení stavebních materiálů rezonanční metodou*. Studijní texty pro kvalifikační kurs Nedestruktivní zkoušení ve stavebnictví – NZS, verze 99–1, školící středisko Brno, 1999
- [15] Kottas, H.: *Das Resonanzverfahren zur Messung mechanischer Schwingungen und Materialeigenschaften*. Zeitschrift für Instrumentenkunde, 72, Heft 7, Braunschweig 1964
- [16] *Možnosti využití nedestruktivních diagnostických metod ke zjišťování kvality cihel ve starém zdivu*. Publikace PUDIS Praha, 1989



- [17] Pavlík, A.: *Tvrdoměrné metody zkoušení betonu*. Studijní texty pro kvalifikační kurz, verze 99-1

### 7.3 Odkazy na další studijní zdroje a prameny



- [18] Hela, R.: *Modul BI02-M01*, Zkušebnictví a technologie, část technologie, <ftp.fce.vutbr.cz>, 2004
- [19] Hobst, L., Schmid, P.: *Modul BI02-M02*, Zkušebnictví a technologie, část zkušebnictví, <ftp.fce.vutbr.cz>, 2004
- [20] Hobst, L.: *Modul BI02-M03*, Zkušebnictví a technologie, část radiační defektoskopie, <ftp.fce.vutbr.cz>, 2004
- [21] Anton, O.: *Modul BI02-M04*, Zkušebnictví a technologie, část praktické úkoly zkušebnictví, <ftp.fce.vutbr.cz>, 2004
- [22] Schmid, P.: *Základy zkušebnictví*. Skriptum FAST VUT v Brně, CERM, 2001
- [23] Anton, O.: *Základy zkušebnictví – návody do cvičení*, Skriptum FAST VUT v Brně, CERM, 2002
- [24] Adámek, J.: *Vlastnosti a zkoušení stavebních materiálů*, Skriptum FAST VUT v Brně, CERM, 1995
- [25] Cikrle, P.: *Zkoušení stavebních materiálů – laboratorní cvičen.*, Skriptum FAST VUT v Brně, CERM, 1996

## 8 Klíč

1. Celkové deformace těles je zásadně členěna na dvě části: deformaci pružnou (elastickou) a deformaci nepružnou (plastickou, trvalou). Pružná část deformace po odstranění účinků napětí vymizí a tělese se vrací do původního tvaru. Plastická část deformace po odstranění účinků napětí zůstává ve formě trvalých (stalých) přetvoření.
2. Strunové tenzometry se používají pro měření relativních deformací (poměrných přetvoření) ve zvoleném místě tělesa. Měří se změna délky základny  $\Delta l$  (původní délka základny  $l_0$ , hodnota poměrná deformace je pak určena vztahem  $\varepsilon = \Delta l / l_0$ ). Principem činnosti strunových tenzometrů je změna frekvence vlastních kmitů ocelové struny předepjaté mezi dvěma body (jejich vzdálenost je původní délka základny) vyvolaná změnou napětí (deformace) struny.
3. Odporové tenzometry se používají pro měření relativních deformací (poměrných přetvoření) ve zvoleném místě tělesa. Měří se změna délky základny  $\Delta l$  (původní délka základny  $l_0$ , hodnota poměrná deformace je pak určena vztahem  $\varepsilon = \Delta l / l_0$ ). Principem činnosti odporových snímačů je změna odporu snímače způsobená jeho délkovou změnou.
4. Z hlediska provádění rozlišujeme zatěžovací zkoušky
  - a) nezabudovaných stavebních dílců (ve zkušebnách),
  - b) stavebních konstrukcí před zahájením nebo během provozu (in-situ),
  - c) modelů konstrukcí (ve zkušebnách).
5. Z hlediska časové působení rozlišujeme zatěžovací zkoušky
  - a) krátkodobé – ověření okamžitých vlastností,
  - b) dlouhodobé – ověření reologických vlastností,
  - c) opakované – soustavné sledování změn vybraných parametrů v době provozu.
6. Základní typy zatěžovacích zkoušek dle charakteru zatížení jsou:
  - a) statické zatěžovací zkoušky – změna velikosti zatížení je pomalá nebo pohyb zatížení má zanedbatelné zrychlení,
  - b) dynamické zatěžovací zkoušky – zkušební zatížení mění svou velikost nebo polohu a vyvolává takové zrychlení, že nelze zanedbat vliv vzniklých setrvačných sil hmoty zkoušené konstrukce.
7. Tvrdost stavebních materiálů je určena jejich odporem proti tvárné (plastické) deformaci.
8. Tvrdost materiálů zjišťujeme metodami:
 

vrypovými, vtiskovými, vnikacími, odrazovými, dalšími



9. Upřesnění obecného nebo směrného kalibračního vztahu lze provést vynásobením hodnoty vlastnosti určené z kalibračního vztahu součinitelem  $\alpha$ . Součinitel  $\alpha$  se vypočte poměrem experimentálně (destruktivně, laboratorně) určené hodnoty sledovaného parametru ku nedestruktivně zjištěné hodnotě (stanovené dle kalibračního vztahu).
10. Jedná se o odrazovou metodu. Vlastní přístroj je pružinový tvrdoměr skládající se z razníku, beranu, pružin a vlečného ukazatele s měřítkem. Dle vyvozené energie úderu rozeznáváme tři základní typy – N, L a M. Při zatláčení razníku a uvolnění závěsu beran dopadne na razník, odrazí se a posune vlečný ukazatel na měřítku do místa, které je hodnotou velikosti odrazu. Velikost odrazu je závislá na poloze tvrdoměru. Základní poloha tvrdoměru je vodorovná. V ČSN 73 1373 jsou uvedeny obecné kalibrační vztahy pro vyhodnocení  $R_{be}$  ze zajištěného odrazu „a“ pro směr zkoušení: vodorovně, svisle dolů, svisle nahoru, šikmo nahoru a dolů pod úhlem  $45^\circ$ .
11. Nedestruktivní metody zkoušení (NDT=Non Destructive Testing) stavebních materiálů, prvků, dílců a konstrukcí jsou metody nevyžadující porušení zkoušené hmoty, a když již, tak jen takové, které nemůže ohrozit, byť i v nejmenší míře, únosnost nebo použitelnost stavebního prvku. Z těchto hledisek se dělí NDT na metody tzv. *čisté*, které nezpůsobí vůbec žádné porušení a *na ostatní* metody, které způsobují jen nepatrné místní porušení hmoty (stopa po vtisku tvrdoměrné, brusné či vrtné metody a pod.).
12. Při aplikaci UZ metod se zjišťuje doba průchodu ultrazvuku posuzovanou hmotou (při vyhodnocení se počítá rychlost průchodu - šíření). Z výsledků zkoušek na betonu lze objektivně hodnotit následující vlastnosti:
  - a) dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku,
  - b) dle kalibračního vztahu pevnost v tlaku,
  - c) hutnost,
  - d) strukturální změny,
  - e) hodnotit stejnoměrnost (stejnorodost) struktury.
13. Podstatou rezonanční metody je změření hodnot určitého druhu vynuceného rezonančního kmitání menších zkušebních vzorků pravidelného geometrického tvaru, pro něž dovedeme teoreticky odvodit vztahy mezi vlastními frekvencemi a odpovídajícími pružnými charakteristikami materiálu. Z výsledků zkoušek na betonu lze objektivně hodnotit následující vlastnosti:
  - a) dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku,
  - b) dynamická modul pružnosti ve smyku,
  - c) poissonův koeficient,
  - d) dle kalibračního vztahu pevnost v tlaku,
  - e) dle útlumu pak hodnotit případné strukturální poruchy a vady.

Zkouší se na zkušebních tělesech. Jedná se tedy o laboratorní zkoušky posuzovaných materiálů.