10 TENZOMETRIE

Přímé měření napjatosti materiálu známými metodami **není možné**. Využívá se proto platnosti Hookeova zákona, který definuje napětí v pružné oblasti chování materiálu, jako součin hodnot modulu pružnosti ***E*** a poměrné deformace ***ε*** ve směru působení napětí při jednoosé napjatosti.

Hookeův zákon: $\sigma = E \cdot \varepsilon$

Poměrné deformace se zjišťují mnoha měřícími metodami, které se v souhrnu označují jako tenzometrické metody neboli **Tenzometrie**, prostředky pro stanovení poměrné deformace se pak jmenují **Tenzometry**. Hlavní vlastností tenzometrů je jejich schopnost měřit velmi malé relativní (poměrné) změny délky, typicky 10^{-6} (1 μm/m).

Tenzometrie je součástí všech vědních oborů, ve kterých se uplatňuje mechanika tuhých těles - od medicíny po kosmonautiku. Existuje široké spektrum tenzometrů, které se liší principem měření, rozsahem nebo přesností. Ve stavebnictví se používá tenzometrie pro stanovení deformace materiálů a konstrukcí při namáhání, porovnání experimentů s numerickými simulacemi nebo při sledování konstrukcí. Nejčastěji využívanými typy tenzometrů jsou:

- Mechanické (Extensometry)
- Strunové
- Odporové

10.1 Popis použitých přístrojů a měřidel

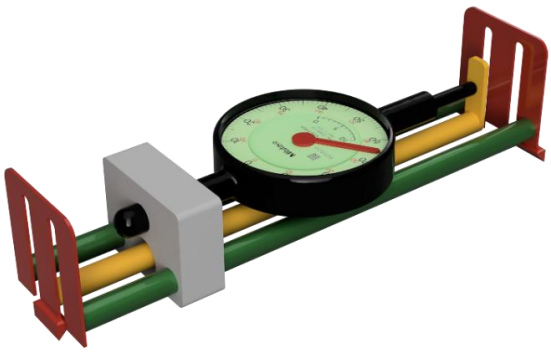
10.1.1 Mechanický tenzometr

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

$$\varepsilon_m = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{d - d_0}{L_0} \qquad 10.1$$

kde:

ε_m *je poměrná deformace určená pomocí mechanického tenzometru [μm/m],*
ΔL *je změna měřící základny [μm],*
L_0 *původní délka měřící základny (základní vzdálenost břitů tenzometru) [m],*
d *je délka měřící základny při zatížení (čtení na úchylkoměru) [μm],*
d_0 *je výchozí délka měřící základny (výchozí čtení na úchylkoměru) [μm].*



*Obrázek 10.1: Model mechanického tenzometru s osazeným mechanickým úchylkoměrem (**Hollanův můstek**).*

10.1.3 Strunové tenzometry

Strunové tenzometry jsou tvořeny ocelovou strunou, napnutou mezi dvěma koncovými upevňovacími bloky, které jsou v kontaktu s měřeným objektem. Struna je chráněna ocelovou trubičkou, pohyblivou v koncových blocích a elektromagnetickou cívkou je snímaná její frekvence (perioda) kmitání. Vlivem deformace objektu dochází i ke změnám délky (napětí) struny a tím i ke změnám frekvence (periody) kmitání struny. Strunové tenzometry se mohou připevnit na povrch měřeného tělesa, nebo umístit dovnitř materiálu (například zabetonovat).

Při stanovování poměrné deformace pomocí strunových tenzometrů nestačí pouze odečítat změnu frekvence kmitání struny, ale je nutné také znát konstantu strunového tenzometru, která se pro každý typ tenzometru liší v závislosti na jeho konstrukci a použitých materiálech snímače. Tato konstanta udává vztah mezi poměrnou deformací tenzometru a frekvencí s jakou struna kmitá.

Základní vztah pro výpočet poměrného přetvoření je:

$$\varepsilon_s = (f^2 - f_0^2) \cdot K \qquad 10.2$$

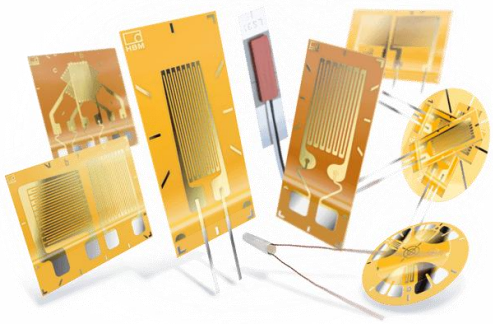
kde:

ε_s *je poměrná deformace určená pomocí strunového tenzometru [μm/m],*
f *je frekvence struny tenzometru při zatížení [Hz],*
f_0 *je frekvence struny tenzometru ve výchozím stavu (nezatížená konstrukce) [Hz],*
K *je konstanta strunového tenzometru [μm/m·Hz^2].*

Obrázek 10.2: Základní typy strunových tenzometrů.

10.1.4 Odporové tenzometry

Odporové tenzometry patří k nejrozšířenějšímu druhu tenzometrů z důvodu jednoduchosti, velikosti, snadné montáže, přesnosti a nízkým pořizovacím nákladům. Tento typ tenzometru se většinou skládá ze spodní nosné fólie, elektricky vodivé měřící mřížky, horní krycí fólie a vývodů ve formě vodičů nebo pájecích plošek. Tyto tenzometry se mohou na měřený objekt nalepit pomocí speciálních lepidel, svařovat k povrchu nebo vložit (zalít) do zkoušeného materiálu.



Obrázek 10.3: Příklad sortimentu odporových tenzometrů výrobce HBM.

Při deformaci se tenzometr deformuje společně s měřeným objektem. Tato deformace je přenášená i na vodivou měřící mřížku tenzometru. Mechanická deformace měřící mřížky má za následek změnu průřezové plochy vodičů mřížky, což vede ke změně jejího elektrického odporu. Odporový tenzometr je v podstatě rezistor, jehož odpor se mění v závislosti na deformaci objektu, ke kterému je fixován.

Obecná závislost mezi změnou odporu a poměrnou deformací je dána vztahem:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \varepsilon \qquad 10.3$$

kde:
R *je elektrický odpor [Ω],*
K *je konstanta tenzometru [-],*
ε *je poměrná deformace [μm/m].*

Konstanta odporových tenzometrů *K*

V praxi jsou z měřící ústředny přímo odečítány hodnoty poměrné deformace *ε*, ale tyto hodnoty je nutné opravit o specifickou konstantu tenzometru *K*, která se liší v závislosti na použitém typu tenzometru, jeho materiálů a výrobní šarži. Tento údaj je typicky uveden na obalu tenzometru a většinou se pohybuje okolo hodnoty $K \approx 2{,}00$ (1,80 až 2,20). Vztah pro opravenou hodnotu poměrné deformace získané pomocí odporových tenzometrů je pak:

$$\varepsilon_{corr} = (\varepsilon - \varepsilon_0) \cdot \frac{2}{K} \qquad 10.4$$

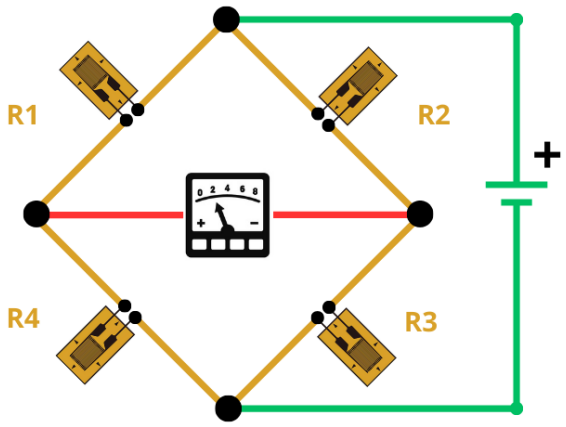
kde:
ε_{corr} *je opravená hodnota poměrné deformace určená z odporových tenzometrů [μm/m],*
K *je specifická konstanta tenzometru [-],*
ε *je poměrná deformace určená z odporových tenzometrů při zatížení [μm/m],*
ε_0 *je výchozí poměrná deformace určená z odporových tenzometrů (nezatížená konstrukce) [μm/m].*

Pro potřeby cvičení bude uvažovaná specifická konstanta odporových tenzometrů ***K* = 2,00**, tudíž korekce o konstantu tenzometrů není nutná a stanovované hodnoty poměrné deformace budou přímo představovat hodnotu poměrné deformace ε_{corr}.

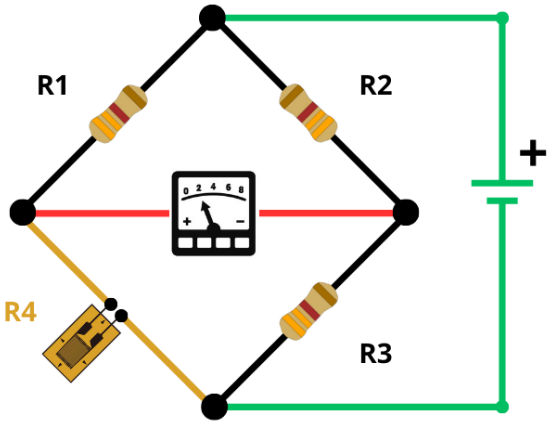
Zapojení odporových tenzometrů – Wheatstoneův můstek

Hodnoty změny odporu tenzometrů jsou při reálném měření velmi malé a není efektivní ani přesné měřit změny odporu tenzometrů přímo. Pro tyto účely se využívá tzv. Wheatsoneova můstku, ve kterém se změna elektrického odporu projeví změnou napětí. Jedná se o zapojení čtyř rezistorů (aktivních tenzometrů nebo pasivních rezistorů) do elektrického obvodu. Wheatsoneův můstek je napájen konstantním napětím a na protějších větvích můstku je měřena změna napětí, ze které lze stanovit změna odporu některého z členů můstku. Podle konfigurace můstku a počtu aktivních rezistorů (tenzometrů) lze pak rozlišovat typ můstku (Obr. 10.4):

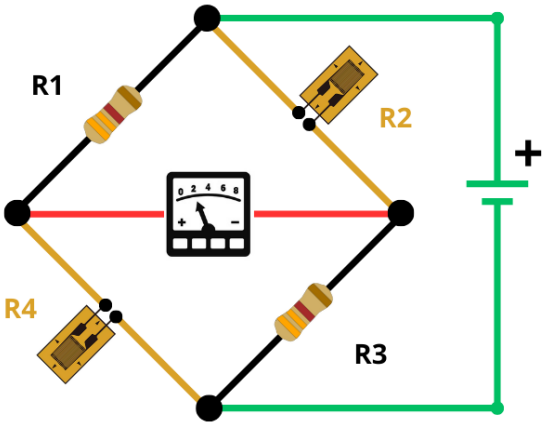
- Plný most (4 aktivní tenzometry)
- Čtvrtmost (1 aktivní tenzometr, 3 doplňkové rezistory)
- Polomost (2 aktivní tenzometry, 2 doplňkové rezistory)
    - Diagonální (aktivní tenzometry na protilehlé větvi)
    - Paralelní (aktivní tenzometry na sousední větvi)



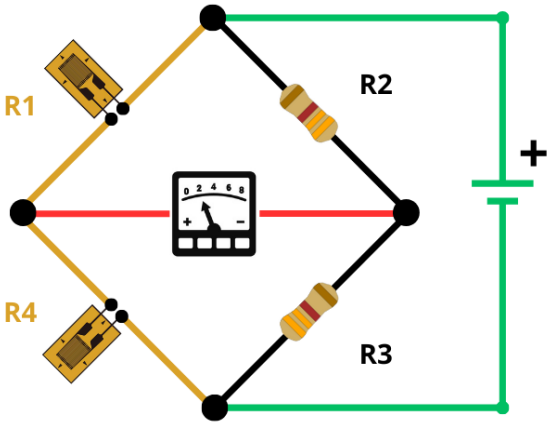
Obr.10.4a: Plný most



Obr.10.4b: Čtvrtmost



Obr.10.4c: Polomost diagonální



Obr.10.4d: Polomost paralelní

Každý způsob zapojení tenzometrů má svá specifika, výhody a nevýhody. Obecně platí, že výsledná měřená změna elektrického napětí, respektive poměrného přetvoření vychází ze vztahu:

$$\varepsilon = +\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4 \qquad 10.5$$

kde:

ε *je výsledná poměrná deformace [μm/m],*
ε_1 *je poměrná deformace tenzometru 1 [μm/m],*
ε_2 *je poměrná deformace tenzometru 2 [μm/m],*
ε_3 *je poměrná deformace tenzometru 3 [μm/m],*
ε_4 *je poměrná deformace tenzometru 4 [μm/m].*

Ve stavebním zkušebnictví se nejčastěji používá zapojení do čtvrtmostu (pouze s jedním aktivním tenzometrem), toto zapojení umožňuje efektivně a jednoduše měřit poměrné deformace, například při jednoosé napjatosti. Plný most se používá například při zkouškách s vyšším nárokem na přesnost, při stanovování Poissonova čísla, nebo z důvodu vyloučení zkreslení výsledků vlivem změny teploty během zkoušky. Polomosty se používají ve speciálních případech, kdy je nutné měřit malé změny poměrné deformace nebo v případech, kdy potřebujeme oddělit jednotlivé složky namáhání, například při kombinaci ohybu a jednoosého tahu/tlaku. Typ polomostu závisí na způsobu namáhání měřené konstrukce.

10.2 Úloha I: 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*:

$$\Delta X = X_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \qquad 10.6$$

kde:
X_0 *je výchozí hodnota veličiny X před změnou teploty*
α *je součinitel teplotní roztažnosti [K^{-1} nebo °C^{-1}]*
ΔT *je změna teploty [K nebo °C].*

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

10.2.1 Postup měření

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

10.4.2 Výpočet změny teploty ocelového válečku

Ze znalosti výpočtu poměrné deformace a vztahu 10.6 lze odvodit následující vztahy. Výsledný rozdíl teplot (ohřátí válečku) se vypočte ze vztahu 10.9:

$$\varepsilon_T = \frac{d - d_0}{l_0} \qquad 10.7$$

$$\varepsilon_T = \alpha \cdot \Delta T \qquad 10.8$$

$$\Delta T = \frac{\varepsilon_T}{\alpha} \qquad 10.9$$

kde:
ε_T *je poměrná deformace od teploty [-]*
d_0 *čtení na číselníkovém úchylkoměru před zahřátím [mm]*
d *čtení na číselníkovém úchylkoměru po zahřátí [mm]*
l_0 *počáteční délka [mm] (**l_0 = 90 mm**)*
ΔT *změna teploty [K nebo °C]*
α *součinitel teplotní roztažnosti [K^{-1} nebo °C^{-1}].*
*(**$\alpha = 1{,}2 \cdot 10^{-5}$ °C^{-1}**)*

Obrázek 10.5:
Schéma experimentu.

10.3 Úloha II: Osový tah – srovnání tenzometrů

Tato úloha má za úkol demonstrovat použití základních typů tenzometrů, které se vyskytují ve stavební praxi, způsob měření a vyhodnocení naměřených dat. Porovnání bude prováděno na nejjednodušším způsobu namáhání – v prostém jednoosém tahu. Zatěžována bude GFRP (Glass Fibre Reinforced Polymer) plochá tyč, kloubově zavěšená ve svislé poloze. Zatěžování bude prováděno pomocí ocelových závaží.

Charakteristiky tyče:

GFRP plochá tyč – PREFA KOMPOZITY, a.s.

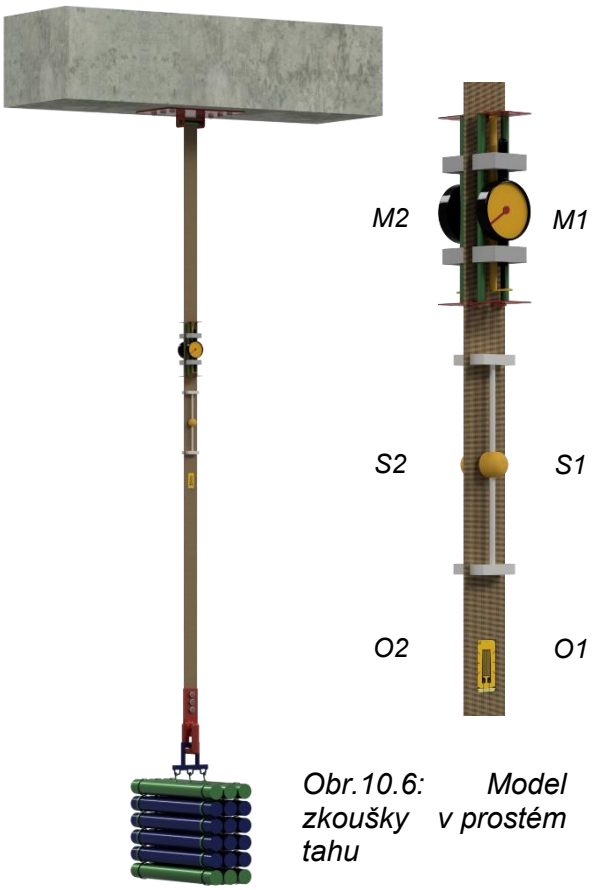
příčné rozměry *b x t*: **50,70 x 3,30 mm**

modul pružnosti v tahu *E*: **24 000 MPa**

Hmotnost závaží:

hmotnost držáku závaží: 13,50 kg
hmotnost jednoho závaží: 10,40 kg

celkem: 138,30 kg (1 držák + 12 závaží)



Obr.10.6: Model zkoušky v prostém tahu

Během zatěžování se bude sledovat změna délky, respektive poměrná deformace tyče ve směru normálového napětí. Měření bude realizováno třemi typy tenzometrů:

- Mechanickými tenzometry (Hollanovými můstky o základní délce L_0 **= 120 mm**) osazenými digitálními úchylkoměry *Mitutoyo* s přesností měření 0,001 mm
- Strunovými tenzometry *Gage Technique International Ltd.* typu *TSR/5.5* s konstantou tenzometru $K = 3{,}025 \cdot 10^{-3}\ \mu m/m \cdot Hz^2$
- Odporovými fóliovými tenzometry *HBM 1-LY11-10/350*

Značení tenzometrů:

- Mechanické – *M1, M2*
- Strunové – *S1, S2*
- Odporové – *O1, O2*

Úkolem této úlohy je stanovit teoretické napětí pomocí teorie pružnosti, následně ověřit a porovnat teoreticky vypočítané napětí s napětím stanoveným experimentálně a zhodnotit výsledky získané pomocí různých typů tenzometrů.

10.3.1 Postup měření

Odečítaní hodnot ze všech tenzometrů bude probíhat ve třech krocích – nulové čtení v nezatíženém stavu, čtení v zatíženém stavu po ustálení deformací a čtení v odtíženém stavu. Odečítání z mechanických tenzometrů bude přímo z displeje úchylkoměrů. Hodnoty ze strunových a odporových tenzometrů budou odečítány pomocí ústředny *DataTaker DT85*. V případě mechanických tenzometrů se bude odečítat relativní délka Hollanova můstku ***d***, u strunových tenzometrů frekvence kmitání struny ***f*** a u odporových tenzometrů přímo hodnota poměrné deformace $\boldsymbol{\varepsilon_o}$.
Pro další výpočty jsou důležité hodnoty nulového čtení a čtení při zatížení. Hodnoty po odtížení jsou pouze kontrolní a slouží pro ověření nepřekročení meze lineárního chování konstrukce. **Hodnoty odečtené po odtížení by měly být podobné se čtením před zatížením.**

Postup:

- Nulové čtení na všech tenzometrech – $\boldsymbol{d_0, f_0, \varepsilon_{o,0}}$
- Zatížení konstrukce předepsaným množstvím závaží
- Čtení při zatížené konstrukci - $\boldsymbol{d, f, \varepsilon_o}$
- Odtížení konstrukce na výchozí zatížení
- Čtení při odtížení – $\boldsymbol{d_0', f_0', \varepsilon_{o,0}'}$

10.3.2 Výpočet teoretického napětí

V případě jednoosého tahu se teoretické napětí podle pružnosti vypočítá jako podíl normálové síly a průřezové plochy tyče:

$$\sigma_{N,teor} = \frac{N}{A} \qquad 10.10$$

kde:
$\sigma_{N,teor}$ *teoretické normálové napětí [MPa]*
N *normálová síla [N]*
A *průřezová plocha tyče [mm^2].*

Při výpočtu normálové síly uvažujte hodnotu gravitačního zrychlení $\boldsymbol{g = 9{,}81\ m/s^2}$.

10.3.3 Výpočet experimentálně stanového napětí

Pro výpočet experimentálně stanoveného napětí budeme vycházet z **Hookeova zákona**, změřené poměrné deformace a znalosti hodnoty modulu pružnosti materiálu zkoušené konstrukce. Pro získání korektních hodnot poměrné deformace při zatížení je nutné odečíst poměrnou deformaci získanou po zatížení konstrukce od poměrné deformace při nulovém čtení (při nezatížené konstrukci).
Mechanické tenzometry
Poměrná deformace z mechanických tenzometrů $\boldsymbol{\varepsilon_m}$ se stanoví podle vztahu *10.1.*
Strunové tenzometry
Poměrná deformace ze strunových tenzometrů $\boldsymbol{\varepsilon_s}$ se stanoví podle vztahu *10.2*.
Odporové tenzometry
Hodnota odečítaná z měřící ústředny je přímo hodnota poměrné deformace stanovená pomocí odporových tenzometrů $\boldsymbol{\varepsilon_o}$, výsledná poměrná deformace se stanoví pomocí 10.4

Výsledná hodnota poměrné deformace pro výpočet normálového napětí bude uvažována jako průměrná hodnota poměrné deformace z obou tenzometrů stejného typu.

10.4 Úloha III: Ohyb – zapojení odporových tenzometrů

Ačkoliv se může zdát, že nutnost můstkového zapojení odporových tenzometrů je oproti jiným typům tenzometrů spíše nevýhoda, tak právě možnost různého zapojení odporových tenzometrů ve Wheatstoneově můstků nám umožňuje volit takové zapojení, které je pro danou zkoušku či měření nejvhodnější.

V této úloze budou demonstrovány tři typy zapojení odporových tenzometrů na konstrukci, kterou tvoří vetknutá ocelová konzola. Konzola bude zatěžována svislou silou v podobě ocelových závaží a blízko vetknutí budou pomocí tří párů odporových tenzometrů v různém zapojení stanovovány poměrné deformace, ze kterých lze následně určit velikost mechanického napětí.

Charakteristiky konstrukce:

vetknutá konzola z obdélníkového dutého ocelového profilu:

šířka profilu b: 50 mm

výška profilu h: 30 mm

tloušťka stěny t_w: 3,0 mm

délka konzoly l: 1 500 mm

vzdálenost měřícího místa od vetknutí a: 20 mm

moment setrvačnosti profilu ve svislém směru I_z: **$5{,}70 \cdot 10^4$ mm^4**

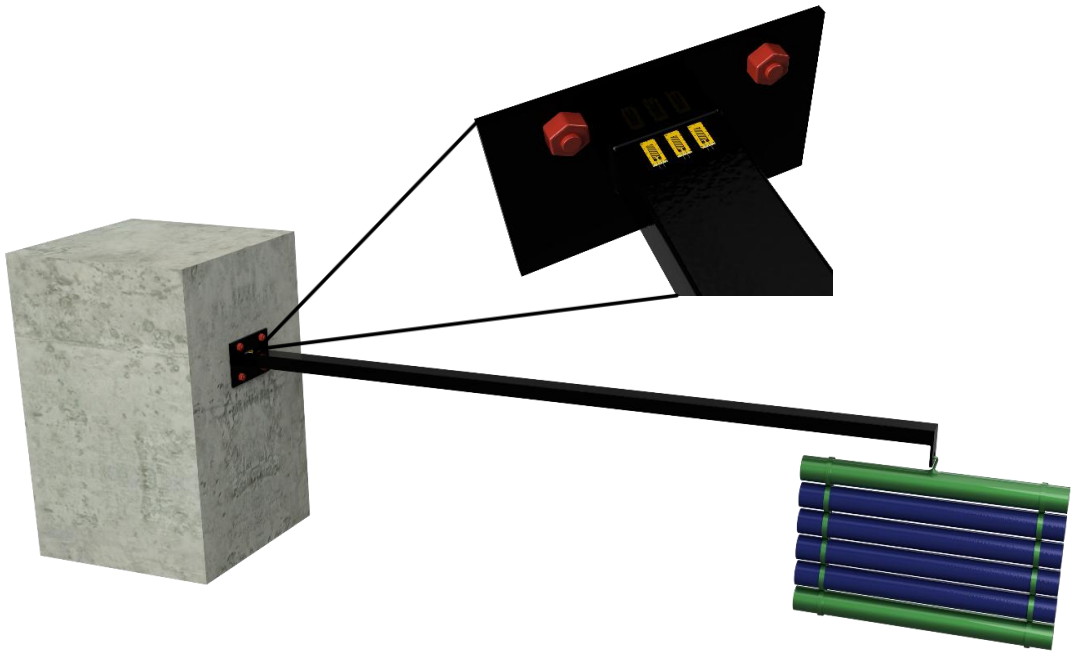
průřezový modul profilu ve svislém směru W_y: **3 800 mm^3**

modul pružnosti oceli: **210 000 MPa**

Hmotnost závaží:

hmotnost držáku závaží: 11,72 kg
hmotnost jednoho závaží: 10,40 kg

celkem: 32,52 kg (1 držák + 2 závaží)



Obr.10.7: Model zkoušky ohybu konzoly

Zatěžováním konzoly na jejím volném konci osamělým břemenem vyvodí v konstrukci ohybový moment ***M***, ohybový moment vyvodí normálové napětí σ_x v prutu konzoly, přičemž největší hodnota ohybového momentu a normálového napětí bude ve vetknutí. Vzhledem ke způsobu namáhání budou horní vlákna průřezu konzoly namáhána kladným normálovým napětím (tahem) a spodní vlákna napětím se záporným znaménkem (tlakem). Dále platí, že hodnoty napětí by kvůli osové symetrii průřezu měly mít shodnou velikost, ale opačné znaménko.

Pro měření poměrných deformací bude použito celkem 6 fóliových odporových tenzometrů *HBM 1-LY11-6/350*. Tenzometry budou na konstrukci osazeny vždy v trojici na horním povrchu a dolním povrchu ocelového profilu v blízkosti vetknutí. Hodnoty poměrných deformací pro každý tenzometr, respektive pro daný způsob zapojení, budou odečítány pomocí univerzální ústředny *HBM QuantumX MX840B*. Tenzometry budou vždy po dvojici zapojeny následujícím způsobem a výsledná měřená hodnota bude v souladu s rovnicí ***10.5***:

- **Čtvrtmost** – horní a spodní tenzometr zapojen zvlášť do čtvrtmostu (jeden aktivní tenzometr, tři doplňkové odpory), tento způsob zapojení dává přímo hodnotu poměrné deformace, kterou lze odečítat pro každý tenzometr zvlášť, značení odečítaných poměrných deformací – $\varepsilon_{1/4h}$ (horní tenzometr), $\varepsilon_{1/4d}$ (dolní tenzometr).

- **Paralelní půlmost** – oba tenzometry ***R1*** a ***R4*** jsou zapojeny do paralelního půlmostu (dva aktivní tenzometry, dva doplňkové odpory), výsledná hodnota poměrné deformace zobrazovaná pomocí ústředny je podle rovnice *10.5* rovna dvojnásobku reálné poměrné deformace (poměrné deformace se sčítají), značení tohoto způsobu zapojení - $\varepsilon_{1/2_par}$.

  $$\varepsilon_{1/2_par} = +\varepsilon_1 - (-\varepsilon_4)$$

- **Diagonální půlmost** – oba tenzometry ***R2*** a ***R4*** jsou zapojeny do diagonálního půlmostu (dva aktivní tenzometry, dva doplňkové odpory), ale výsledná hodnota poměrné deformace zobrazovaná pomocí ústředny je podle rovnice *10.5* rovna nule (poměrné deformace se odečítají), značení tohoto způsobu zapojení - $\varepsilon_{1/2_diag}$.

  $$\varepsilon_{1/2_diag} = -\varepsilon_2 - (-\varepsilon_4)$$

10.4.1 Postup měření

Odečítaní hodnot bude probíhat ve dvou krocích (zatížená konstrukce a konstrukce po odtížení). Nulové čtení bude vynecháno z důvodu, že při spuštění měřící ústředny se na všech měřících kanálech odečte absolutní hodnota měřených veličin a měření probíhá v relativních hodnotách, vztažených k počátku zkoušky. Tudíž všechna čtení na počátku zkoušky jsou rovná nule. Odečítaní poměrných deformací bude probíhat pomocí měřící ústředny a počítače. Při každém zatěžovacím kroku budou odečítány čtyři hodnoty poměrné deformace (2x čtvrtmost, paralelní půlmost a diagonální půlmost). Důležité hodnoty jsou hodnoty odečítány při zatížení konstrukce. **Čtení po odtížení je opět kontrolní a mělo by se blížit nule (počáteční hodnotě).**

Postup:

- Spuštění měření
- Zatížení konstrukce předepsaným množstvím závaží
- Čtení při zatížené konstrukci – **ZS1** ($\varepsilon_{1/4h}$, $\varepsilon_{1/4d}$, $\varepsilon_{1/2_par}$, $\varepsilon_{1/2_diag}$)
- Odtížení konstrukce na výchozí zatížení
- Čtení při odtížení – **ZS0** ($\varepsilon_{1/4h}$, $\varepsilon_{1/4d}$, $\varepsilon_{1/2_par}$, $\varepsilon_{1/2_diag}$)

10.4.2 Výpočet teoretického napětí

V případě prostého ohybu symetrického průřezu se teoretické napětí podle pružnosti vypočítá jako podíl ohybového momentu a průřezového modulu nosníku:

$$\sigma_{M,teor} = \frac{M}{W} \qquad 10.11$$

kde:

$\sigma_{N,teor}$ *teoretické normálové napětí [MPa]*
M *ohybový moment [Nm] ·10^3*
W *průřezový modul nosníku [mm^3].*

Při výpočtu zatěžovací síly uvažujte hodnotu gravitačního zrychlení ***g* = 9,81 m/s^2**.

10.4.3 Výpočet experimentálně stanoveného napětí

Pro výpočet bude opět použit **Hookeův zákon**, změřené poměrné deformace a modul pružnosti materiálu zkoušené konstrukce. Pro názornost rozdílů jednotlivých zapojení nebudou pro potřeby výpočtu experimentálního napětí měřené hodnoty nijak upravovány a do výpočtu se budou uvažovat tak, jak byly naměřeny.

Protokol **TENZOMETRIE**	**T**
Vyučující:	

Úloha I: Teplotní roztažnost

Úloha I - Naměřené hodnoty

nulové čtení	d_0	[mm]	
zatížená konstrukce	d	[mm]	

Úloha I – Výpočet poměrné deformace a změny teploty

změna délky	poměrná deformace	změna teploty
Δl	ε	ΔT
[μm]	[μm/m]	[°C]

Závěr:

Úloha II: Osový tah – srovnání tenzometrů

Úloha II - Naměřené hodnoty

	mechanické tenzometry		strunové tenzometry		odporové tenzometry	
	M1	M2	S1	S2	O1	O2
	d_1	d_2	f_1	f_2	ε_1	ε_2
	[mm]	[mm]	[Hz]	[Hz]	[μm/m]	[μm/m]
nulové (výchozí) čtení						
zatížená konstrukce						
odtížená konstrukce						

Úloha II – Výpočet poměrných deformací a experimentálně stanoveného napětí

	mechanické tenzometry		strunové tenzometry		odporové tenzometry	
	M1	M2	S1	S2	O1	O2
	$\varepsilon_{m,1}$	$\varepsilon_{m,2}$	$\varepsilon_{s,1}$	$\varepsilon_{s,2}$	$\varepsilon_{o,1}$	$\varepsilon_{o,2}$
	[μm/m]	[μm/m]	[μm/m]	[μm/m]	[μm/m]	[μm/m]
poměrná deformace **ε** [μm/m]						
průměr ε [μm/m]						
napětí σ [MPa]						

Úloha II – Výpočet teoretického napětí $\sigma_{N,teor}$

Úloha II – Srovnání výsledků

		teoretické napětí	mechanické tenzometry	strunové tenzometry	odporové tenzometry
napětí ***σ***	[MPa]				
rozdíl	[%]	0			

Závěr:

Úloha III: Ohyb – zapojení odporových tenzometrů

Úloha III - Naměřené hodnoty

	čtvrtmost		polomost paralelní	polomost diagonální
	horní	dolní		
	$\varepsilon_{1/4h}$	$\varepsilon_{1/4d}$	$\varepsilon_{1/2_par}$	$\varepsilon_{1/2_diag}$
	[μm/m]	[μm/m]	[μm/m]	[μm/m]
nulové čtení	0	0	0	0
zatížená konstrukce				
	průměr:			
odtížená konstrukce				
	průměr:			

Úloha III – Výpočet teoretického napětí $\sigma_{M,teor}$

Úloha III – Výpočet teoretické poměrné deformace ε_{teor}

Úloha III – Srovnání výsledků

		teoretické napětí	čtvrtmost	polomost paralelní	polomost diagonální
napětí σ_x	[MPa]				
rozdíl	[%]	0			

Závěr: