

## Další nápady z Malé Hraštic 2: „špagetová fyzika“

LEOŠ DVOŘÁK

Katedra didaktiky fyziky MFF UK Praha

### Abstrakt

Príspevek informuje o niekoľika pokusech a mēreních mechanických vlastností látok, k nimž lze využit poněkud netradiční materiál – nevařené špagety. Jde o náměty z jarního soustředění pro budoucí učitele fyziky. Jedná se o pokusy s jednoduchými pomůckami, které mohou být námětem například pro menší žákovské projekty.

### Úvod: jarní soustředění na Malé Hraštic

Náměty na pokusy, které vzešly z jarního soustředění pro budoucí učitele fyziky „a spřízněné duše“ už byly na Veletrhu nápadů několikrát prezentovány – viz např. [1] a odkazy v daném článku uvedené. Připomeňme, že jde o soustředění trochu „mimo civilizaci“, resp. alespoň mimo školní třídy a laboratoře, kde po dobu 3–4 dnů začátkem května v kruhu patnácti až pětadvaceti účastníků „bádáme“ a ověřujeme, že fyzika funguje i v takto jednoduchých podmínkách. Na jaře 2012 nás bylo dvacet.

Na soustředění účastníci jednotlivě nebo častěji ve skupinkách pokusníci na témata, která si zvolí. Těto formě práce říkáme „miniprojekty“. Na rozdíl od laboratorních prací či praktik jde o práci bez předem daných návodů. Na jedné straně to znamená, že výsledek není zaručen, a řada pokusů končí zjištěním, že „tudy cesta nevede“. Na druhou stranu je to činnost kreativní, umožňuje rozvinout třeba i nejasně formulované nápady, dává prostor vzájemné komunikaci... a prostě nás baví.

Pro miniprojekty je každý rok zvoleno jedno hlavní téma resp. spíše tematická oblast. Přiznávám, že občas rád volím téma, o němž toho vím málo, protože to dává příležitost se poučit. Přesně taková situace nastala letos, neboť hlavním tématem hraštického soustředění byla **fyzika materiálů**. Ta mě ve vysokoškolském studiu minula, přece jen byla daleko od relativistické fyziky. Naštěstí jsme s sebou měli experta, vedoucího naší katedry doc. Zdeňka Drozda, který přivezl i slušně vysokou hromádku odborné literatury, a významně přispěl i do seznamu námětů, co zkoumat.

### Proč zkoumat vlastnosti špaget – inspirace a možnosti využití

Jak vůbec došlo na špagety? V seznamu námětů od Zdeňka Drozda byl jeden, kdy jsem vůbec nevěděl, o čem jde: „*Charpyho kladivo*“. Vrtalo mi to hlavou a byla to výzva. Zdeněk mi vysvětlil, že to je zařízení, kterým se měří energie potřebná k přerážení tyče resp. profilu ze zkoumaného materiálu. (Chápu to tak, že tohle souvisí s houževnatostí daného materiálu – křehký materiál se přerazí snáze.) Průřez tyče je normován, navíc je na něm definovaný vrub, kladivo je zavěšené na kyvadle, energie nárazu je desítky až stovky J, příslušná zařízení dodávají specializované firmy, celé je to přesně daná a už přes sto let používaná zkouška ve fyzice materiálů.

To byla výzva. Ovšem „klasické“ Charpyho kladivo může mít hmotnost 300 kg; takovou věc z latí na Hrašticí nesešroubují. Co přerážet, abych vystačil s nižšími energiemi a konstrukce mohla být jednodušší? I špejle může být příliš tuhá. Návštěva místní samoobsluhy poskytla potřebnou inspiraci: špagety budou to pravé!

I vstřícný fyzikář se teď ale asi netrpělivě zeptá: **K čemu nám to může být ve škole?**

Je pravdou, že technické obory seznamují své studenty s profesionálními zařízeními pro mechanické zkoušky materiálů, takže měřit špagety by mohly jen jako kuriozitu. A rozhodně nechci vyhlašovat program „Charpyho kladivo na špagety do každého gymnázia“. :-) Nejde ale jen o přerážení. Ukazuje se, že na špagetách můžeme jednoduše měřit řadu dalších vlastností: pevnost v tahu i v tlaku a moduly pružnosti.

Špagety jsou z hlediska „školské fyziky“ poněkud netradiční materiál, takže snad i tím mohou pokusy s nimi vzbudit zájem žáků a studentů. Přitom je známe z běžného života, a tak se dá ukázat, že věci jako pružnost „fungují“ nejen na pružinách ze siloměru či na gumovém vlákne, ale i u dalších materiálů. Navíc je to příležitost vidět, že chování reálných materiálů je složitější, než říkají jednoduché vztahy středoškolské fyziky. (Při ohýbání špaget se jasně projevuje plastická deformace.) Také můžeme klást otázky, které snad mohou provokovat zájem žáků. Například: Kolik špaget by bylo potřeba, aby udržely tíhu člověka? Odpovědi přitom nelze vyčíst z tabulek.

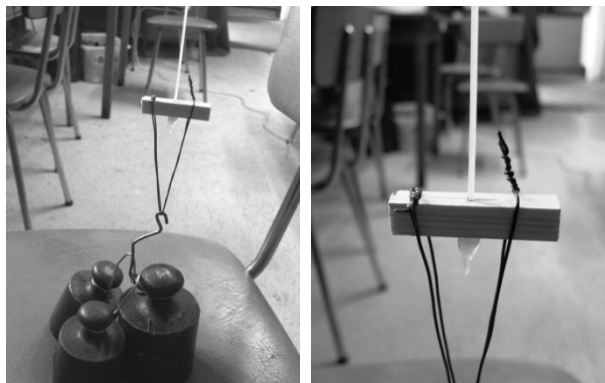
Poznamenejme ovšem, že „nic nového pod sluncem“. Na nápad měřit vlastnosti špaget přišla už dříve řada autorů a na webu, alespoň na anglických stránkách, lze najít i popisy laboratorních prací věnovaných například měření Youngova modulu pružnosti a dalších vlastností špaget (např. na Johns Hopkins University, viz [2]). A v potravinářství a podobných oborech zřejmě měření některých mechanických vlastností těstovin není ničím neobvyklým, viz [3].

## Co a jak zkoumat

Dále uvedu náměty na jednoduchá měření mechanických vlastností *nevařených* špaget. Jde o měření nepříliš přesná, v nichž nám jde spíše o řádové hodnoty veličin. Ostatně, měřené hodnoty nepochybně závisí jak na druhu špaget, tak na dalších podmínkách, zejména na jejich vlhkosti. Budete-li provádět analogická měření, počítejte s tím, že se vaše výsledky mohou odchylovat od hodnot uvedených zde.

### Pevnost v tahu

Pro určení pevnosti v tahu stačí špagetu zatížit dostatečným počtem závaží, jak to ukazuje obrázek vpravo. Horní konec špagety můžeme držet třeba v prstech – udržet takhle několik kilogramů se dá. Uchycení závaží ke spodnímu konci špagety lze vyřešit třeba tak, jak to ukazuje detailní obrázek vpravo. Špageta prochází dírou ve dřevěném špalíku. Aby dírou neprošel konec, obalíme jej

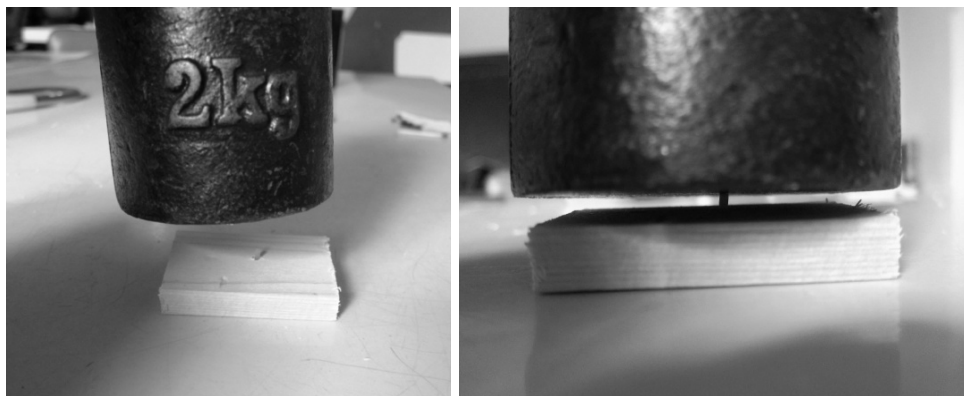


„bambulkou“ z tavného lepidla. (Špagetu nelepíme přímo ke špalíku.)

Pro žáky může být překvapující, že špageta v tahu udrží několik kg. (4 kg občas unesla, občas se přetrhla.) Po vydělení plochou průřezu špagety (asi  $2,5 \text{ mm}^2$ ) vychází její pevnost v tahu 16 MPa. Ocelové lano to sice nenahradí (dle tabulek je ocel asi 40× pevnější), ale svazek třiceti až čtyřiceti špaget by udržel i solidního tloušťka. Podobná hodnota pevnosti vyjde i z momentu síly, jímž špagetu přelomíme.

### **Pevnost v tlaku**

Jak změřit pevnost v tlaku? Stlačujeme-li dlouhou špagetu, vybočí se do strany. Řešením je vzít krátký kousek špagety a ještě jej raději strčit do otvoru vyvrtaného např. v dřevěné destičce. (Špageta musí jít do otvoru zcela volně, ale otvor by neměl mít příliš velký průměr, aby se v něm špageta „nekácela na bok“.) Na horní konec špagety pak můžeme opatrně postavit závaží, jak to ukazují fotografie.



V našem případě špageta udržela 5 kg (při 7 kg chvíli držela, ale pak se její horní část rozdrtila); její pevnost tedy vychází na asi 20 MPa. To už je podle tabulek téměř srovnatelné s pevností dřeva v tlaku.

### **Modul pružnosti v tahu**

Měřit Youngův modul pružnosti natahováním špagety by asi bylo obtížné. Mnohem jednodušší je určit tento modul z ohybu špagety. Pro špejle již tento způsob využil a prezentoval Miroslav Jílek [4]. Příslušná teorie je odvozena a vyložena např. v učebnici [5], vzorečky se však najdou i v řadě technických příruček a samozřejmě na internetu.

Měření ohybu lze realizovat velmi jednoduše, jak ukazují fotografie níže. Na papírovou čtvrtku narýsujeme síť rovnoběžných čar pro odečítání výchylky, přehnutím kusu čtvrtky vytvoříme kapsu, kam zasuneme špejli a její polohu fixujeme dvěma připínáčky. (V našem případě byla celá konstrukce připíchnuta na starou okenici.) Silou, která špagetu ohýbá, je tíha jedné nebo několika kancelářských sponek zavěšených na niti přivázané ke konci špagety.



Youngův modul pružnosti  $E$  spočteme podle vztahu

$$E = \frac{4Fl^3}{3\pi dR^4}, \quad (1)$$

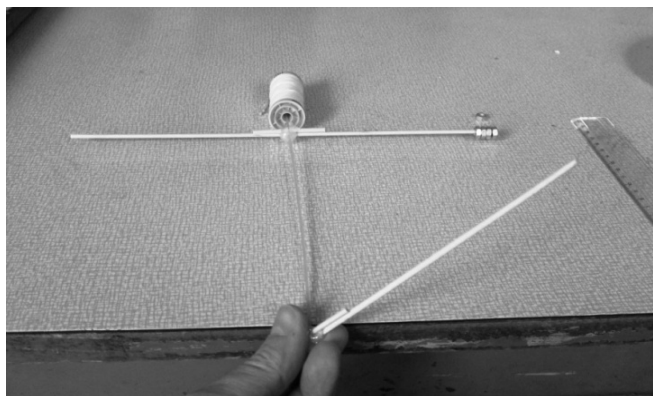
kde  $F$  je síla působící na konec špagety,  $l$  délka špagety,  $R$  její poloměr a  $d$  výchylka na konci. (Pozor, ve starších verzích článku [4] byl v tomto vzorci v čitateli uveden omylem faktor 2 místo 4; odvození ze vztahu 9(4.17) v [5] dá výsledek (1).)

Z naměřených dat v našem případě vyšla hodnota  $E$  necelé 4 GPa (konkrétně asi 3,6 GPa). To je opět hodnota asi padesátkrát nižší než pro ocel, ale asi jen 2–3-krát nižší než pro dřevo.

### Modul pružnosti ve smyku

Modul pružnosti ve smyku, označovaný jako  $G$ , lze dobře spočítat z kroucení špagety. Tedy, „odborně řečeno“, z torze válcové tyče. Pro moment  $M$  síly, kterou musíme tyč krotit, aby se její konec otočil o úhel  $\varphi$ , platí vztah (viz [5])

$$M = \frac{\pi GR^4 \varphi}{2l}. \quad (2)$$



Z něj už můžeme hodnotu modulu pružnosti ve smyku snadno určit.

Možnou realizaci měření ukazuje fotografie. Ke koncům špagety jsou tavným lepidlem připevněny špejle. Moment síly je realizován matičkami nasazenými na konec jedné špejle, druhý konec krotíme, sklon přední špejle určuje úhel. Zadní konec špagety je nasazen v cívice od nití, aby se mohl volně otáčet.

Z měření vyšla hodnota asi 1,5 GPa. To dobře souhlasí s výše změřenou hodnotou  $E$ , protože z teorie je známo, že musí platit  $E/3 < G < E/2$ .

### Energie k přeražení špagety („Charpyho minikladivo“)

A konečně dochází i na malé Charpyho kladivo. Fotografie ukazují, že ho lze sešroubovat z latěk. Při přeražení špagety ho vychýlíme o definovaný úhel a pustíme. Po přeražení vykývne na druhé straně do menší výšky.



Z rozdílů výšek před a po přeražení špagety určíme energii, která byla k přeražení potřeba. V našem případě to bylo asi 11 mJ. Když kyvadlo přeráželo dvě špagety naráz, byla potřebná energie asi 19 mJ; můžeme tedy uzavřít, že energie na přeražení jedné špagety je asi 0,01 J. Někdy se jako výsledek uvádí energie dělená průřezem, ta by vycházela 4 kJ/m<sup>2</sup>. Analogické měření pro dřevěnou špejli dalo asi 50 kJ/m<sup>2</sup>, pro slanou tyčku vyšlo jen 1 kJ/m<sup>2</sup>. Prostě, slaná tyčka je křehčí.

### Závěr

U špaget lze měřit i další parametry, např. hustotu (v našem případě byla 1,5 g/cm<sup>3</sup>) nebo měrný elektrický odpor (vyšel řádově 10<sup>6</sup> Ω·m) či leccos zajímavého stavět. Po slepení tavným lepidlem lze ze špaget udělat i miniaturní luk, ale to už jsou opravdu hříčky pro zasmání. „Špagetová fyzika“ je samozřejmě spíš kuriozita – ale třeba výše uvedené nápady někdy s vašimi žáky a studenty při výuce fyziky využijete.

### Literatura

- [1] Dvořák L.: *Další nápady z Malé Hraštic: co s čočkami*. In: Veletrh nápadů učitelů fyziky 15. Sborník z konference. Ed. Z. Drozd, Prometheus, Praha 2011. ISBN 978-80-7196-417-9. s. 47-51.
- [2] Karweit M.: *Material testing*. Online: [http://www.jhu.edu/virtlab/finals/FINALS/labs/l7/materials\\_lab.pdf](http://www.jhu.edu/virtlab/finals/FINALS/labs/l7/materials_lab.pdf) [cit. 28. 8. 2012].
- [3] Nedomová Š.: *Stanovení pevnosti syrových nevařených těstovin*. Online: <http://www.chempoint.cz/stanoveni-pevnosti-syrovych-nevarenych-testovin> [cit. 28. 8. 2012].
- [4] Jílek M.: *Ohýbání špejlí*. In: Dílny Heuréky 2003-2004. Sborník konferencí projektu Heuréka. Ed. L. Dvořák. Prometheus, Praha, 2005. s. 32–37. Verze článku je dostupná online: <http://fyzweb.cuni.cz/dilna/spejle/spejle.htm>
- [5] Kvasnica J. a kol.: *Mechanika*. Academia, Praha, 2004.