

## **Pokusy s vodou**

**Leoš Dvořák**

KDF MFF UK Praha

Abstrakt

*Příspěvek popisuje 15 pokusů s vodou využitelných na úrovni základní i střední školy. Pokusy využívají velmi jednoduché pomůcky: plastové injekční stříkačky, plastové hadičky, brčka atd. Přesto v řadě případů umožňují i kvantitativní měření.*

### **Úvod**

Tematika, jíž se dále uvedené pokusy týkají, se týká následujících oblastí, jevů a veličin: Stlačitelnost vody (pokus 1), hustota a její měření (pokusy 2, 3, 6), hydrostatický tlak (pokusy 4, 5, 6), Archimédův zákon a vztlak (pokusy 3, 7, 8, 9, 10), povrchové napětí (pokusy 9, 10 a 13), vodivost vody (pokusy 11 – 14), rovnice kontinuity (pokus 15).

### **Seznam pokusů**

1. (Ne)stlačitelnost vody
2. „Vážení frťanů“
3. Hustoměr z brčka
4. „Voda se unese“
5. Voda stlačuje vzduch
6. „Relativní hustoměr“
7. „Názorný karteziánek“
8. Míček, který nevyplave
9. Co drží padesátník na hladině?
10. Tvar kapek a bublin
11. Voda nabíjí plechovku
12. Brčko přitahuje lodičku
13. Brčko odpuzuje padesátník
14. Náboj zvedá hladinu
15. Rovnice kontinuity trochu „akčněji“

### **Pomůcky**

Pokusy, uvedené dále, vystačí s opravdu jednoduchými a levnými pomůckami, jako jsou:

- plastové pohárky (pro pokusy jsou vhodné průhledné, dají se koupit pohárky o objemu 0,2, 0,3 a 0,5 l),
- plastové injekční stříkačky (levné a vhodné jsou stříkačky o objemech 5, 10 a 20 ml),
- PET láhve od minerálek či od mléka,
- plastové hadičky (ty lze koupit v odděleních zahrádkářských potřeb různých hypermarketů pro kutily nebo v prodejnách akvaristických potřeb; výhodou je, že hadičku o průměru 4 mm lze těsně nasadit na trn plastové injekční stříkačky)
- a další drobnosti (sůl, plechovky, kousek drátu, pingpongový míček, plastová brčka, kousek plastelíny, polystyrén, Alobal, padesátník, atd.). K měření se hodí pravítko, papírové měřítko, digitální kuchyňské váhy, digitální fotoaparát...

## 1. (Ne)stlačitelnost vody

Velice jednoduchý pokus: Do plastové stříkačky nabereme trochu vody a trochu vzduchu. Prstem ucpeme otvor stříkačky a stlačujeme píst. Vidíme, že objem vzduchu se zmenšuje, objem vody se pozorovatelně nemění.

### Poznámka (o kolik vodu stlačíme):

Modul objemové pružnosti vody je podle SŠ tabulek  $2 \cdot 10^9$  Pa. Z toho můžeme usoudit, že stlačíme-li vzduch ve stříkačce na  $1/3$  jeho původního objemu (při izotermické změně tedy tlak ve stříkačce stoupne na 3 atm, takže přetlak bude činit  $2 \cdot 10^9$  Pa), stlačí se voda o jednu desetitisícinu. Toho si opravdu ve stříkačce nemáme šanci všimnout!

## 2. „Vážení frt'anů“

Proč při názorném zavádění pojmu hustota nevyužít dnes již celkem běžnou pomůcku – digitální kuchyňskou váhu?

Na váhu prostě postupně dáváme plastové kelímky s vodou – tedy o objemu 0,2 l, 0,3 l a 0,5 l. Chceme-li, můžeme na ni dávat i menší odlivky („fř'aný“), nebo naopak PET láhve s 1 l, 1,5 l, či 2 l vody. A všímáme si, že hmotnost je 200 g, 300 g, 500 g, ... prostě, že litr vody váží kilogram a menší množství úměrně méně.

### Poznámka k využití pokusu:

Jde o námět; zaleží na každém učiteli, jak jej využije ve své výuce. Vtip je v tom, dělat vše s co nejběžnějšími, opravdu „kuchyňskými“ pomůckami. Protože „třetinka“ či půllitr limonády v kelímku jsou asi většině žáků bližší, než odměřování pomocí odměrného válce.

### Poznámka k hmotnosti kelímků:

Pro přesnější měření je samozřejmě dobré kelímky předem vytárovat. (Což je asi lepší, než je zvážit a pak jejich váhu odčítat; tárování mohou žáci znát z nákupů.) I tak nemusí váha ukázat očekávané hmotnosti „na gram přesně“. To lze ale vzít jako příležitost pro krátkou diskusi o přesnosti měření objemu v kelímku atd.

### Varianta pokusu se slanou vodou:

Po pokusech s obyčejnou vodou lze do kelímku nalít slanou vodu. Hustota nasyceného roztoku kuchyňské soli je (dle [1], tab. 4.8) až  $1200 \text{ kg/m}^3$ , takže slaná voda v 0,5 l kelímku může mít hmotnost až 600 g. Rozdíl váhy kelímků s obyčejnou a slanou vodou je dokonce citelný i při zvedání kelímků rukou. (Kelímek uchopte shora lehce prsty za okraj. Zvedněte stejnou rukou nejprve jeden, pak druhý kelímek, případně zvednutí několikrát opakujte. Je dobré, nevědět předem, který kelímek je který.)

## 3. Hustoměr z brčka

Známý úkol – vytvořit hustoměr z brčka – lze proměnit v problémovou úlohu či malou laboratorní práci.

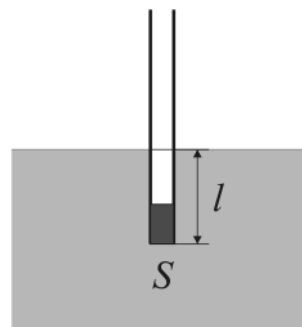
### Úkol:

Vytvořte hustoměr z plastového brčka, ocechujte ho pomocí obyčejné vody (nesmíte použít jinou kapalinu!) a změřte pak jeho pomocí hustotu slané vody.

### Řešení:

Pokud bychom hustoměr vytvořili tak, jak se to běžně dělá, tedy „zapíchnutím“ brčka do kuličky z plastelíny, potřebovali bychom pro kalibraci dvě kapaliny známých hustot. Řešením je, aby hustoměr měl tvar válce, z něhož nic „nepřečnívá“ (což dosáhneme tak, že plastelínu vtlačíme dovnitř brčka).

Z Archimédova zákona pak plyne  $m = \rho V = \rho S l$  (kde  $m$  je hmotnost brčka s plastelínovým závažím a  $\rho$  hustota kapaliny). Do kapalin hustot  $\rho_1$  a  $\rho_2$  se tedy brčko ponoří do hloubek  $l_1$  a  $l_2$ , pro něž platí  $\rho_1 l_1 = \rho_2 l_2$ . Ostatně, už úvahou bez použití výpočtu jsme mohli zdůvodnit, že hloubka ponoření brčka je nepřímo úměrná hustotě kapaliny.



Náš hustoměr tedy opravdu stačí ocejchovat jen v jedné kapalině, třeba právě ve vodě.

### Poznámky k provedení:

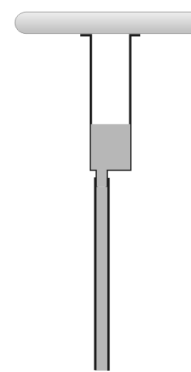
Brčko je vhodné značně zkrátit, asi na 5 až 10 cm. Jinak bychom potřebovali příliš hluboké nádoby s kapalinou. Navíc, dlouhé brčko má tendenci se „kácet“. Zátěž tedy nesmí být příliš lehká. (Pro těžší zátěž můžeme také užít matičky či malé hřebíčky; brčko dole opět ucpeme plastelínou.)

A ještě upozornění na dvě drobné samozřejmosti. Pozor na dobré utěsnění spodního konce brčka. Jinak místo hustoměru získáme spíše model potápějící se lodi... A k vyznačení rysek: Na brčko lze kreslit lihovými fixy – ale jen na brčko, které je suché! Snažit se udělat fixem čárku právě na hladině vody vede pouze k rozmazané skvrně a špinavé vodě.

## 4. „Voda se unese“

Následující pokus lze předvést jako pro leckoho překvapivou demonstraci.

Z plastové stříkačky vytáhneme píst a na její trn nasadíme kus plastové hadičky dlouhý půl metru až metr. Hadičku a kousek stříkačky naplníme vodou a horní okraj stříkačky si přitiskneme zespoda na dlaň, jak to ukazuje obrázek. Stříkačka s hadičkou a vodou se pak na dlani sama udrží.



Vysvětlení pak můžeme hledat v diskusi se žáky. Nejde samozřejmě o nic světoborného. Stříkačku drží zdola atmosférický tlak, přesněji řečeno rozdíl atmosférického tlaku a tlaku uvnitř stříkačky. (Ještě přesněji řečeno tlaková síla daná rozdílem tlaků...) Tlak vzduchu ve stříkačce je nižší než atmosférický o hydrostatický tlak sloupce vody v hadičce (a stříkačce). Žáci či studenti by však měli na správné vysvětlení přijít pokud možno sami – a neměli bychom se přitom spokojit jen s vágními formulacemi typu „stříkačku přisává podtlak“.

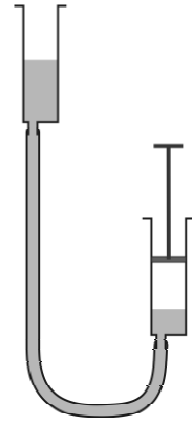
V diskusi by zřejmě mělo dojít na otázku, zda je lépe používat k pokusu stříkačku širší nebo užší. (Jistě, širší. Proto je vhodné užít 20 ml stříkačku, ta má plochu podstavy přes  $3 \text{ cm}^2$ .) Trochu náročnější může být otázka, jak dlouhou hadičku s vodou stříkačka unese, resp. je-li k pokusu výhodnější kratší či delší kus hadičky. (Delší je lepší.)

### Poznámky k provedení:

Dlaň je dobré předem navlhčit, stříkačka nesmí „přisávat vzduch“. Pozor, na začátku pokusu vždy trochu vody vyteče.

## 5. Voda stlačuje vzduch

Jestliže dvě hadičky spojíme stříkačkou, z jedné vyndáme píst a v druhé ho necháme, získáme dvě spojitě nádoby. Hladiny v nich ovšem nemusí být ve stejné výšce, protože jedna z nádob je zavřená. Zvedneme-li otevřenou stříkačku výše, jak to ukazuje obrázek, hydrostatický tlak vody stlačuje vzduch v zavřené stříkačce. Je-li výškový rozdíl hladin 1 m, je přetlak asi 0,1 atmosféry (atmosférický tlak udrží 10 m vody), tj. v zavřené stříkačce je 1,1-krát vyšší tlak. Při konstantní teplotě se tedy objem vzduchu změní  $1/1,1 \approx 0,9$ -krát, tedy o desetinu. Tuto změnu na stupnici stříkačky zřetelně vidíme.



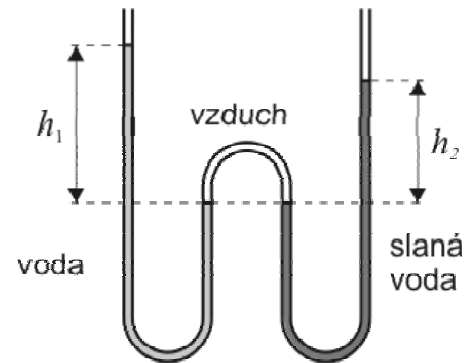
Pokud naopak otevřenou stříkačku držíme níže, než zavřenou, je v zavřené stříkačce podtlak a vzduch se roztáhne – při rozdílu hladin 1 m opět asi o desetinu.

## 6. „Relativní hustoměr“

Vytvoříme-li z plastové hadičky dvě spojené U-trubice (viz obrázek), můžeme porovnávat hustotu kapalin v obou trubiciích. Hydrostatický tlak  $h_1 \rho_1 g$ , který vytváří kapalina v levé U-trubici, se totiž v rovnováze musí rovnat tlaku vytvořenému kapalinou v pravé U-trubici:  $h_1 \rho_1 g = h_2 \rho_2 g$ .

Poměr hustot kapalin tedy opět vychází nepřímo úměrný poměru výšek jejich hladin:

$$\rho_2 = \frac{h_1}{h_2} \rho_1 .$$



### Poznámka k přesnosti měření:

Popsaná metoda nám umožňuje určit hustotu (např. slané vody v porovnání s obyčejnou vodou) poměrně velmi přesně. Jsou-li rozdíly výšek hladin zhruba půl metru až metr (což lze s hadičkami pověšenými třeba na tabuli lehce dosáhnout), můžeme je změřit zhruba na milimetr, tedy s relativní přesností jednoho až dvou *promile*. S celkovou chybou poměru hustot se tak lehce můžeme dostat pod půl procenta. A to s obyčejnými plastovými hadičkami a měřítkem nalepeným na tabuli!

Výhodou je, že v popsáném uspořádání není výsledek ovlivněn kapilárními silami. Ty totiž v každém rameni U-trubice táhnou kapalinu nahoru stejně, takže se vzájemně kompenzují. Dokonce si ani nemusíme dělat starost, jestli máme na tabuli měřítko umístěno přesně svisle. Do vztahu pro poměr hustot totiž vstupuje jen poměr výšek – se studenty by šlo diskutovat, že tento poměr by nám vyšel, i kdyby měřítko bylo šikmo.

Samozřejmě, v principu vzniká malá chyba tím, že hladiny kapalin v otevřených koncích hadiček jsou různě vysoko a působí na ně tedy nepatrně jiný atmosférický tlak. I to by mohla být příležitost k diskusi s hloubavějšími studenty. (V ní bychom dospěli k tomu, že takto vzniká chyba řádu desetin *promile*.)

### Poznámka k realizaci pokusu:

Pro pokus lze využít jedinou hadičku a do ní postupně nasávat vodu, vzduch a další kapalinu. Pohodlnější je mít dvě hadičky a spojit je krátkou trubičkou. (Ovšem pozor, spoj

musí velmi dobře těsnit, nesmí z něj ucházet vzduch!) K měření výšek, jak už bylo řečeno, lze užít papírové měřítko nalepené na tabuli. Výšky všech hladin je přitom zřejmě vhodné odečítat na jediném měřítku. Poznamenejme ještě, že spodní hladiny kapalin v hadičkách nemusí být ve stejné výšce.

#### **Poznámka k možným variantám pokusu:**

Zde uvedená varianta pokusu je podrobněji popsána v příspěvku [2] v interním materiálu pro účastníky Jarního soustředění pro budoucí učitele na Malé Hrašticí 2007.

Jak v průběhu dílny upozornil Zdeněk Polák [3], v zásadě tentýž pokus již dříve popsal B. Patč [4]. Jeho provedení je však technicky poněkud náročnější a navíc výšku hladin v trubicih při něm ovlivňují kapilární síly. (V příspěvku [4] je pokus popsán jen velmi stručně a není diskutována přesnost měření.)

Zdeněk Polák předvedl asi nejjednodušší variantu daného pokusu využívající jeden kus hadičky. Konce hadičky jsou ponořeny do nádob s kapalinami, jejichž hustotu porovnáваме. Hladiny kapalin v hadičce jsou výše, než hladiny v nádobách, mezi nimi je vzduch. Kapalina s vyšší hustotou vystoupí do menší výšky. V této variantě pokusu se nekompensuje vliv kapilárních sil, šlo by jej však omezit použitím širší hadičky. Možná by se takto dala porovnávat i hustota studené a teplé vody (která jinak při „natahování“ do hadiček příliš rychle zchladne).

### **7. „Názorný karteziánek“**

Z malé 5 ml stříkačky a kousku plastové hadičky můžeme vyrobit karteziánka, na němž je výrazně vidět, jak se v něm při zvyšování tlaku snižuje objem vzduchu.

„Tělo“ stříkačky zkrátíme na délku asi dva až tři centimetry. (Využijeme část s trnem; přebytečnou část odřízneme řezákem.) Zkrátíme rovněž část s pístem, aby příliš nepřečnívala. Na trn stříkačky nasadíme asi pětcentimetrový kousek hadičky. Její konec obtočíme kouskem tlustšího drátu. Ten bude tvořit zátěž.



Karteziánka teď ponoříme hadičkou dolů do vody a nasajeme trochu vody – tak, aby její hladina byla ve spodní polovině hadičky. Při ponoření do vody se přitom karteziánek musí „tak tak“ vznášet na hladině. (Pozor na to, aby část nad pístem byla zalita vodou.) Rovnováhu lze nastavit změnou objemu vzduchu ve stříkačce. Pokud by byla vzduchová bublina ve stříkačce příliš malá a karteziánek stále vyčníval, zvětšíme zátěž.

Náš karteziánek pohodlně projde hrdlem obyčejné PET láhve. Ovládá se stejně, jako jiné známé karteziánky: po stlačení láhve klesá ke dnu. Sledujte přitom hladinu vzduchu v trubici karteziánka. Jasně je vidět, že při zvětšení tlaku jde hladina nahoru, tedy že objem vzduchu v karteziánku se snižuje.

#### **Poznámka:**

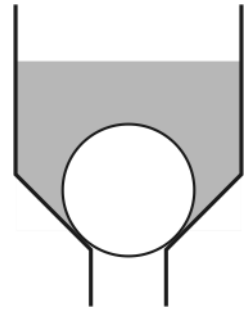
Se studenty, kteří se víc zajímají o fyziku, by mohlo být zajímavé diskutovat, jaké síly skutečně nadnášejí karteziánka (tedy přispívají k celkové vztlakové síle). Vždyť „dno“ karteziánka, tedy spodní okraj hadičky, je stále stejně vzdáleno od jeho vrchního okraje! (Takovouto sugestivní otázkou bychom z našeho karteziánka mohli udělat drobnou problémovou úlohu.) Samozřejmě, karteziánka tlačí nahoru tlak vzduchu působící na píst stříkačky. Ale zde bychom mohli položit další „matoucí otázku“: když se po stlačení láhve

zmenšila bublina vzduchu v karteziánku, znamená to, že tlak vzduchu se v něm zvětšil. Tedy, že na píst působí *větší* silou. Proč tedy karteziánek klesá? :-)

## 8. Míček, který nevyplave

Ponoříme-li pingpongový míček pod vodu, samozřejmě vyplave nahoru. Ale jen tehdy, když na něj zespodu působí tlak. Dáme-li míček do obrácené ho hrdla PET láhve (asi nejlépe se hodí láhev od mléka), přidržíme ho shora prstem a nalijeme na něj vodu, míček nevyplave! S nadsázkou můžeme říci, že jsme „přelstili“ Archimédův zákon.

(Voda samozřejmě trochu odtéká kolem míčku. Je lépe, aby se „lem“ míčku slepeného ze dvou polokoulí nedotýkal hrdla, kolem něj by „zatékalo“ víc.)



Pokud na hrdlo láhve zespodu přiložíme uzávěr (většinou ho ani nestačíme zašroubovat), voda naplní prostor pod míčkem, tlak začne působit i zdola a míček vyskočí nahoru.

Pozn.: Místo hrdla PET láhve lze použít trychtýř. Tuto variantu předváděl ve svém příspěvku na Veletrhu nápadů učitelů fyziky 12 Zdeněk Drozd [5].

## 9. Co drží padesátník na hladině?

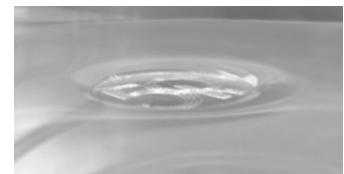
Že padesátník opatrně položený na hladinu vody neklesne ke dnu, je známá věc. Obvykle se říká, že za to může povrchové napětí. Někdy dokonce, „že ho na hladině drží povrchové napětí“. Lehce si však můžeme spočítat, že síla daná povrchovým napětím sama *nemůže udržet* padesátník na hladině.



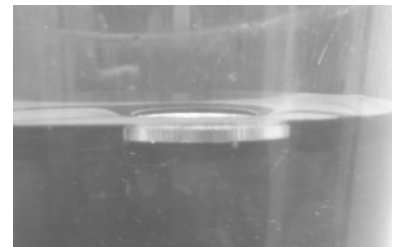
Povrchové napětí na rozhraní voda-vzduch je (viz [1], tab. 5.11) asi 70 mN/m. Padesátihalérová mince má (jak zjistíme měřením nebo dle [6]) průměr 19 mm. Obvod tedy činí asi 6 cm. Maximální síla, kterou povrchové napětí může táhnout padesátník vzhůru, je tedy  $F_{\max} = 0,07 \text{ N/m} \cdot 0,06 \text{ m} = 4,2 \text{ mN}$ .

Hmotnost padesátníku je 0,9 g; jeho tíha je tedy 9 mN. To je více než dvojnásobek toho, co „unese“ povrchové napětí! Proč se tedy padesátník nepotopí?

Vysvětlení je jasné, podíváme-li se na plovoucí padesátník z boku. Je zanořený pod hladinu. Přibližně můžeme odhadnout, že spodní strana padesátníku je asi 3 mm pod hladinou. (Sám padesátník má tloušťku 1,7 mm.) Hydrostatický tlak v hloubce 3 mm je asi 30 Pa. Plocha podstavy padesátníku je  $2,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ .



Celková vztlková síle je tedy  $30 \text{ N/m}^2 \cdot 2,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ , což dává necelých 9 mN. Povrchové napětí se už tedy ani nemusí snažit táhnout moc nahoru... Dokonce bychom naopak mohli položit sugestivní otázku, proč dohromady vztlak a povrchové napětí „nevystřelí“ padesátník nahoru. :-:) (Samozřejmě, jednak jsme hloubku ponoření padesátníku neurčovali příliš přesně, a navíc: povrchové napětí netáhne přímo nahoru, protože hladina se k hraně padesátníku sklání šikmo.)

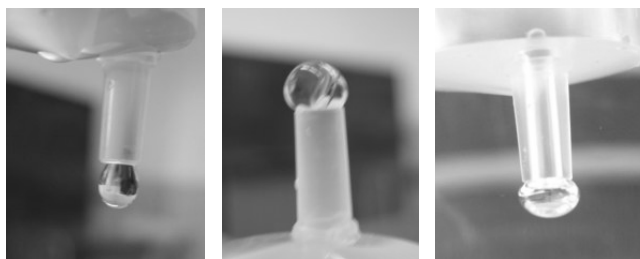


Bez povrchového napětí by ovšem samozřejmě padesátník neplaval! Právě povrchové napětí udrží šikmou hladinu kapaliny v blízkosti padesátníku, takže se může „zanořit“, aniž by se přes něj přelila voda shora.

## 10. Tvar kapek a bublin

Proč mají kapky kapkovitý tvar?

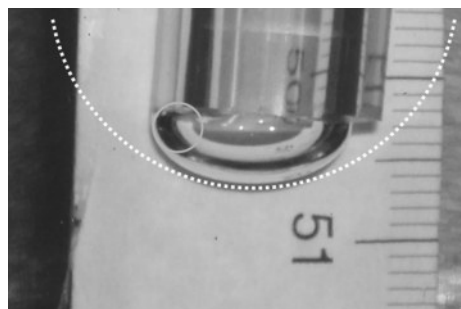
Kapka, visící dolů, je protažená – ovšem protažená ve své horní části. Naopak kapka na podložce (nebo na trnu plastové stříkačky obrácené tímto trnem vzhůru) je „spláclá“, a to zase spíše ve své dolní části. Podobný



tvar má bublina vzduchu ve vodě, vytlačujeme-li vzduch ze stříkačky obrácené trnem dolů. Vyzkoušejte si i možnost, která zde na fotografiích není: bublinu, která se snaží utrhnout směrem vzhůru. (Na to stačí vést ze stříkačky naplněné vzduchem do vody tenkou hadičku a její konec ve vodě otočit vzhůru.)

Jak toto chování kapek a bublin pochopit? Kvalitativně je to jednoduché. V kapce je v její spodní části vyšší tlak, než v horní části (díky hydrostatickému tlaku). Ve vzduchu kolem je ovšem tlak prakticky stejný. Na spodní část kapky tedy musí působit zvenku nějaký dodatečný tlak – aby kompenzoval ten hydrostatický. Tímto tlakem je kapilární tlak. Proto je povrch kapky ve spodní části více zakřiven.

U bubliny je tomu podobně, jen tentokrát hydrostatický tlak vody působí zvenku (a ve vzduchu v bublině je všude prakticky stejný). Bublina je proto na spodku plošší a v horní části je její povrch více zakřiven. (S mírnou nadsázkou bychom mohli říci, že něco musí v horní části „tlačit proti vzduchu z boků“, aby tam bublina „neexplodovala“ proti nižšímu tlaku okolní vody.)



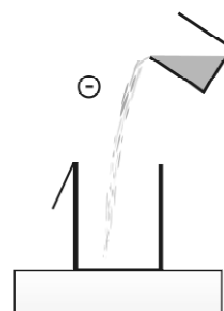
Problém lze řešit i kvantitativně a to i jednoduchými prostředky. V miniprojektu [7] z letošního jarního soustředění na Malé Hrašticí bylo určeno zakřivení povrchu bubliny prostě zkusmým nastavením poloměrů kružnic do fotografie bubliny. (Využit byl software Corel Draw, ale šlo by to i jinak.) Z takto určených poloměrů křivosti a ze změřené hloubky bubliny pak šlo vypočítat povrchové napětí na rozhraní voda-vzduch. Vyšlo 80 N/m, tedy s chybou jen asi deset procent vůči tabulkové hodnotě.

## 11. Voda nabíjí plechovku

Vodu obvykle při elektrostatických pokusech považujeme za „nepřítele“; ve vlhkém prostředí se nabíjení plechovek a podobné pokusy moc nedaří. Přesto lze tenkým pramínkem vody plechovku nabít. Jde o pokus dosti starý (bývá spojován se jménem lorda Kelvina), ale pro toho, kdo ho vidí prvně, docela překvapující.

Plechovku s lístkem Alobalu, který bude svou výchylkou indikovat, že je plechovka nabitá, postavíme na izolační podložku (např. polystyrén). Shora do ní z druhé plechovky lijeme tenký pramínek vody. Poblíž pramínku podržíme nabitou tyč. Lístek se zvedá, spodní plechovka se nabíjí. Přiblížením tyče k lístku pak můžeme ukázat, že plechovka se nabíla opačným nábojem, než má tyč.

Na ději není nic nepochopitelného: jde prostě o elektrostatickou indukci. Řekněme, že tyč je nabitá záporně. V praménku vody tedy přitáhne kladné náboje. Záporné náboje odejdou do horní plechovky



a do ruky, kterou tuto plechovku držíme. (A případně naším tělem do země.) Padající voda s sebou nese kladný náboj. – proto nabíjí spodní plechovku kladně.

### Poznámky k realizaci pokusu:

Pramének vody musí být opravdu tenký, tak aby se v pádu rozpadal na kapičky. Jestliže bychom lili vodu souvislým proudem, byly by horní a spodní plechovka tímto proudem vodivě spojeny, navzájem by se tedy vlastně „vybijely“ a pokus by se nedařil.

Nabitou tyč také nepřibližujte příliš blízko k praménku vody. Tyč kapičky vody přitahuje. Při větším přiblížení se proud kapiček výrazně odchyluje a namáčí jednak tyč a jednak i izolační podložku pod spodní plechovkou, což rovněž pokusu neprospívá.

## 12. Brčko přitahuje lodičku

Na hladinu vody v misce či v talíři položíme malou „lodičku“ z Alobalu. Plastové brčko zelektrujeme třením a přiblížíme z boku k lodičce (na vzdálenost 5-10 cm). Brčko lodičku výrazně přitahuje.

Vysvětlení opět není složité. Záporně nabitě brčko přitáhne kladné náboje do části lodičky, která je nejbližší brčku. Ta je proto k brčku přitahována. Záporné náboje jsou odpuzovány a jsou odvedeny vodou pryč.

### Poznámka:

Ve vysvětlení tohoto i dalších pokusů mluvíme o tom, že kladný náboj je přiveden do určité části vodiče apod., i když víme, že samozřejmě v kovech se pohybují elektrony. A že to, že v určité části vodiče převládne kladný náboj, je způsobeno relativním nedostatkem elektronů odvedených jinam. Věříme, že tento fenomenologický popis („kladný náboj je přiváděn“ atd.) nepůsobí čtenáři potíže.

### Alternativní vysvětlení, proč je lodička přitahována:

Alternativně můžeme přitahování lodičky vysvětlit na základě energie. Je-li lodička blízko brčka, je celková energie elektrického pole menší, než když je lodička dál. A samozřejmě systém (lodička, voda a brčko) se vyvíjí tak, aby jeho potenciální energie klesala – podobně jako když se kulička koulí z kopce.

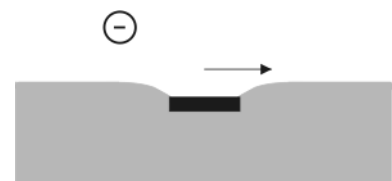
Bohužel, toto vysvětlení je asi méně názorné, protože to, jak je to s energií elektrického pole, není asi pro většinu lidí bezprostředně jasné – a výklad například na úrovni přístupné středoškolákům by musel být asi dost zjednodušen. Přesto však je vhodné přístup přes energie uvést, neboť je vhodný pro porozumění následující, na první pohled překvapující situaci.

## 13. Brčko odpuzuje padesátník

Položte padesátník na hladinu, tak jako jsme to dělali v pokusu 5. Přiblížte k němu ze strany brčko zelektrované třením. (Brčko pochopitelně držíme nad hladinou.) Uvidíte, že padesátník se bude od brčka *odpuzovat*.

A máme tu záhadu: Jak může nabitě brčko odpuzovat kovový padesátník?

Kvalitativní řešení přitom není složité. Stačí si uvědomit, co brčko *přitahuje*. Přitahuje vodivé předměty. (Protože se na nich přemístí náboje, podobně jako tomu bylo u alobalové





lodičky v minulém pokusu.) Můžeme tedy říci, že elektrické síly se „snaží“, aby vodivé předměty a věci byly co nejbližší nabitého brčka. A vodivou věcí je i voda. Takže, samozřejmě, nabitě brčko přitahuje i vodu. Ovšem padesátník je zanořen kousek pod hladinu a nad ním je „díra“. A elektrické síly se snaží, aby blíž k brčku byla voda, ne tato „díra“. Což se projeví jako odpuzování padesátníku.

Podobně jako v minulém pokusu by šlo jev rozebrat pomocí energie. Elektrické pole má nižší energii, pokud je blízko brčka voda a ne „díra“ vyplněná vzduchem. A protože soustava se snaží zaujmout stav s nejnižší energií, je „díra“ (resp. padesátník pod ní) odpuzována pryč.

#### **Další poznámky k vysvětlení pokusu:**

O možnosti dalšího, na první pohled názornějšího vysvětlení typu „brčko přitáhne vodu, na vodě se tedy vytvoří kopeček a padesátník jede s kopce“ dosud diskutujeme. Možná je podobné vysvětlení příliš zjednodušující a bude důležité započítat ještě vliv změny směru, jímž se k hraně padesátníku sklání hladina vody na straně blíže k brčku – různý směr sil povrchového napětí by se také měl projevit silou táhnoucí padesátník po hladině. Problém bude určitě zajímavě rozebrat podrobněji, provést i kvantitativní výpočet či alespoň odhad velikosti sil a porovnat tyto teoretické odhady s reálným experimentem.

### **14. Náboj zvedá hladinu**

Skutečnost, že nabitě brčko přitahuje vodu, se projeví i při pouhém přiblížení brčka k hladině. Hladina v blízkosti brčka se nepatrně zvedne, tedy vyklene směrem vzhůru.



O kolik se hladina zvedne, lze vypočítat nebo alespoň přibližně odhadnout. Plošná hustota síly, působící na povrch vodiče v elektrostatickém poli je (viz např. [8], vztah (1.238))

$$f = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2,$$

kde  $E$  je intenzita těsně nad povrchem vodiče, v našem případě nad hladinou vody. Na zvednutou hladinu kapaliny tedy celkově působí nižší tlak než atmosférický – a to právě o hodnotu  $f$ . (Atmosférický tlak tlačí shora, elektrické síly táhnou naopak nahoru; v obou případech jde o sílu na jednotku plochy.) Tlak shora je tedy  $p_{\text{shora}} = p_{\text{atm.}} - f$ . Pod zvednutou hladinou je rovněž nižší tlak než atmosférický, a to o hodnotu danou hydrostatickým tlakem odpovídající výšce  $h$ , o níž se hladina zvedne. Tlak „zdola na hladinu“ je tedy  $p_{\text{zdola}} = p_{\text{atm.}} - \rho g h$ . Tlaky na hladinu shora i zdola se musí rovnat, takže  $\rho g h = f$ . Odtud

$$h = \frac{\varepsilon_0 E^2}{2\rho g}.$$

Zkusme odhadnout maximální výšku, do níž se hladina zvedne. Maximální hodnotu elektrické intenzity můžeme odhadnout na  $1 \text{ kV/mm} = 10^6 \text{ V/m}$ . (Při hodnotě  $3 \text{ kV/mm}$  nastává průraz vzduchu, tedy přeskočí jiskra. Vyšší hodnoty elektrické intenzity zřejmě můžeme očekávat v okolí nabitě brčka, hodnota  $1 \text{ kV/mm}$  u hladiny vody tedy může být rozumný odhad.) Dosadíme-li hodnoty ostatních veličin ( $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m} \doteq 0,9 \cdot 10^{-11} \text{ F/m}$ ,  $\rho \doteq 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,  $g \doteq 10 \text{ m/s}^2$ ), vyjde zvýšení hladiny  $h$  necelého půl milimetru.

Zvednutí hladiny lze pozorovat při pohledu z boku, případně při pohledu shora, pokud na dno (či pod dno průhledné nádoby) dáme třeba milimetrový papír. Vzvednutá hladina působí jako čočka a rastr na papíře vidíme zkreslený.

## 15. Rovnice kontinuity trochu „akčněji“

Následující otázka může skončit spoustou vody na podlaze i na stropě, ale také nás přivede k rovnici kontinuity a k trochu netradičnímu příkladu svislého vrhu:

Jak vysoko dostříknete vodou z plastové stříkačky?

Na strop, a to i dosti vysoký, dostříkneme bezpečně. (Zásah je na něm také dobře vidět.) Zřejmě lze dostříknout do výšky pět metrů i víc. Jakou rychlostí musí stříkat voda z trnu stříkačky, aby vylétla tak vysoko? Samozřejmě, je na to vzoreček  $v = \sqrt{2gh}$ . Pro výšku  $h = 5$  m vychází rychlost 10 m/s. Může voda vystříkovat tak rychle?

A zde nastoupí rovnice kontinuity, v našem případě jednoduchý vztah  $S_1v_1 = S_2v_2$ . Otvor v trnu stříkačky má průměr asi 2 mm (přibližně ho změříme obyčejným pravítkem), tedy průřez asi  $3 \text{ mm}^2$ . Plocha pístu stříkačky je asi  $3 \text{ cm}^2$ , tedy zhruba stokrát větší. Píst stříkačky se tedy musí pohybovat stokrát pomaleji než voda stříkající ven, čili rychlostí asi 0,1 m/s. U 20 ml stříkačky je délka dráhy pístu asi 6 cm, takže doba, za níž píst úplně stlačíme, odpovídá asi polovině sekundy. Zdá se, že to je vcelku v souladu s experimentem.

Otázek bychom samozřejmě mohli klást víc, ptát se například na sílu, kterou tiskneme píst, zkoušet, zda je lépe použít menší nebo větší stříkačku, odhadovat vliv ztrát třením v úzkém otvoru stříkačky, ztrát daných odporem vzduchu atd. Také by šlo měřit dobu, po kterou tiskneme píst stříkačky, nahrávat pokus na video a rozebírat dynamiku pohybu pístu a podobně. Z obyčejného stříkání na strop by se možná mohl vyvinout i malý projekt. Snad ale i v jednoduché variantě, kdy řadu věcí pouze přibližně odhadujeme, může být něco, co osvěží vyučovací hodinu fyziky... :-)

### Závěr

Všechny výše uvedené pokusy je samozřejmě třeba brát jako náměty, které lze využívat podle konkrétních podmínek a typu školy a dále rozvíjet.

### Literatura

- [1] *Matematické, fyzikální a chemické tabulky a vzorce pro střední školy*. Prométheus, Praha 2003.
- [2] Dvořák L.: *Porovnávání hustoty kapalin pomocí spojených nádob*. Publikováno na CD pro účastníky jarního soustředění pro budoucí učitele fyziky na Malé Hrašticí 2007.
- [3] Polák Z.: soukromé sdělení
- [4] Patč B.: *Méně obvyklá měření*. In: Sborník konference *Veletrh nápadů učitelů fyziky 6*. Ed. O. Lepil. Vydavatelství UP Olomouc, 2001. Dostupné na CD *Veletrh nápadů pro fyzikální vzdělávání. Pro učitele fyziky a nejen pro ně. (Souhrnný elektronický sborník na CD.)* Ed.: Dvořák L., Broklová Z. Prometheus, Praha 2005 a on-line na adrese <http://kdf.mff.cuni.cz/veletrh/sbornik/> [cit. 22. 11. 2007].
- [5] Drozd Z., Brockmeyerová J.: *Fyzika z volné ruky*. In: Sborník konference *Veletrh nápadů učitelů fyziky 12*. Prométheus, Praha 2007. V tisku.
- [6] *50 haléřů - vzor 1993 v oběhu od 12.05.1993*. (Česká národní banka – stránky věnované českým platidlům.) Dostupné online: <http://www.cnb.cz/www.cnb.cz/cz/platidla/mince/m50.html>. [cit. 31. 10. 2007]

- [7] Dvořák L.: *Tvar bubliny a povrchové napětí*. In: Soubor materiálů z miniprojektů na Jarním soustředění pro budoucí učitele fyziky na Malé Hrašticí 2007. (Na CD, interní materiál pro účastníky soustředění.)
- [8] Sedlák B., Štoll I.: *Elektřina a magnetismus*. Academia, Praha 1993