

MASARYKOVA UNIVERZITA

PEDAGOGICKÁ FAKULTA

Katedra Fyziky



## Fyzika tření

*Diplomová práce*

Brno 2010

**Autor práce:** Josef Janík, 199446

**Vedoucí práce:** Prof. RNDr. Vladislav Navrátil, CSc.

## Anotace

Moje závěrečná diplomová práce "Fyzika tření" pojednává, jak už název napovídá o tření. První polovina závěrečné práce je věnována využití tření při výuce žáků resp. dětí na základních školách. Zmiňovaná polovina, obsahuje také pracovní listy, právě vhodné a použitelné při výuce tření na základních školách. Na konci první poloviny práce je vyhodnocení mnou vytvořeného testu právě na tření, z tohoto výsledku lze usoudit, jak děti zvládají tření jakožto fyzikální jev a jestli znají jeho podstatu. Druhá polovina je odbornějšího a teoretičtějšího charakteru. Zabývám se v ní třením nejen ve fyzikálním směru, ale i třením se kterým se setkáváme v každodenním životě a praxi. V této části práce uvádím jednotlivé druhy tření a jejich fyzikální vysvětlení a podstatu, popřípadě faktory, které tření ovlivňují. Na konci mojí závěrečné práce, je zahrnuta i praktická část tzn. měření koeficientu tření mezi různými materiály.

## Annotation

My final thesis "Physics of friction" deals, as the name suggests about friction. The first half of the final work is devoted to using of friction in teaching students respectively children in primary schools. Advertised half, also contains worksheets, just appropriate and applicable to teaching in primary schools friction. At the end of the first half of my work is to evaluate the test was created to friction, this result may be judged on how children handle the friction as a physical phenomenon, and if you know its essence. The second half is more vocational and theoretical character. I am not dealing only with friction in a physical direction, but also friction encountered in everyday life and practice. In this part of the work I mention the different types of friction and their physical explanation and the essence, or factors that affect friction. At the end of my final thesis, it included a practical part. Measuring coefficient of friction.

## Klíčová slova

Síla, test, pracovní listy, tlak, základní škola, tření suché, valivé, kapalinové; koeficient tření, přilnavost, viskozita.

## Keywords

Force, test, working sheets, pressure, primary school, static friction, sliding friction, fluid friction; friction coefficient, inclined plane, adhesion, viscosity.

## Prohlášení

*Prohlašuji, že jsem závěrečnou diplomovou práci vypracoval samostatně, s využitím pouze citovaných literárních pramenů, dalších informací a zdrojů v souladu s Disciplinárním řádem pro studenty Pedagogické fakulty Masarykovy univerzity a se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů.*

*Souhlasím, aby práce byla uložena na Masarykově univerzitě v Brně v knihovně Pedagogické fakulty a zpřístupněna ke studijním účelům*

Brno dne 10.dubna 2010

Josef Janík

.....

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu závěrečné diplomové práce Prof. RNDr. Vladislavu Navrátilovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc. Dále bych chtěl poděkovat paní Mgr. Haně Tesařové za poskytnutí nejen svého volného času, ale i za cenné rady a inspirace.

# Obsah

Úvod	5
<b>1 Předmět fyzika na základní škole</b>	<b>9</b>
1.1 Charakteristika vyučovacího předmětu. Dle ŠVP ZŠ Lysice . . . . .	9
1.2 Výchovné a vzdělávací postupy, které směřují k utváření klíčových kompetencí . . . . .	9
<b>2 Tření na základní škole</b>	<b>11</b>
2.1 Síla . . . . .	12
2.1.1 Měření síly . . . . .	12
2.1.2 Grafické znázornění síly . . . . .	13
2.1.3 Gravitační síla . . . . .	13
2.1.4 Skládání dvou sil téhož směru . . . . .	14
2.1.5 Skládání dvou sil opačného směru . . . . .	15
2.1.6 Účinky síly . . . . .	15
2.2 Těžiště tělesa . . . . .	16
2.3 Pohybové zákony . . . . .	16
2.3.1 První pohybový zákon (zákon setrvačnosti) . . . . .	16
2.3.2 Druhý pohybový zákon (zákon vzájemného působení těles) . . . . .	17
2.4 Praktické využití páky, kladky . . . . .	17
2.5 Tlaková síla, tlak . . . . .	18
2.6 Tření, třecí síla . . . . .	19
2.6.1 Pracovní listy . . . . .	19
2.6.2 Průběh hodiny . . . . .	23
2.6.3 Zadání testu . . . . .	24
2.6.4 Výsledky testu . . . . .	24
2.6.5 Vyhodnocení, závěr testu . . . . .	30
<b>3 Úvod do fyziky tření</b>	<b>31</b>
<b>4 Suché tření</b>	<b>33</b>
4.1 Klidové tření . . . . .	33
4.2 Smykové tření . . . . .	34
4.3 Valivé tření . . . . .	36
<b>5 Viskozita a Newtonův zákon</b>	<b>38</b>
5.1 Metody měření viskozity . . . . .	39
5.1.1 Pádové (tělískové) viskozimetry . . . . .	40
5.1.2 Průtokové viskozimetry . . . . .	40
5.1.3 Rotační viskozimetry . . . . .	42
<b>6 Maziva a mazání</b>	<b>45</b>
6.1 Speciální maziva . . . . .	46
6.2 Typy maziv a jejich vlastnosti . . . . .	46
6.3 Olejnatost . . . . .	47

<b>7</b>	<b>Přilnavost (Adheze)</b>	<b>49</b>
7.1	Přilnavost pneumatiky . . . . .	51
7.2	Přilnavost a povrchové napětí . . . . .	51
<b>8</b>	<b>Měření koeficientu tření</b>	<b>53</b>
8.1	Zpracování vlastního měření . . . . .	54
8.1.1	Dvojice materiálů dřevo - dřevo (suché) . . . . .	54
8.1.2	Dvojice materiálů dřevo - dřevo (namydlené) . . . . .	55
8.1.3	Dvojice materiálů kov - dřevo (suché) . . . . .	55
8.1.4	Dvojice materiálů kov - dřevo (namazáno) . . . . .	56
8.1.5	Dvojice materiálů kov - kov (suché) . . . . .	57
8.1.6	Dvojice materiálů kov - kov (vyleštěno) . . . . .	57
8.1.7	Dvojice materiálů kov - kov (namazáno) . . . . .	58
8.1.8	Dvojice materiálů dřevo - beton . . . . .	59
8.1.9	Dvojice materiálů pryž - beton . . . . .	59
8.1.10	Dvojice materiálů pryž - suchý asfalt . . . . .	60
8.1.11	Dvojice materiálů pryž - mokrý asfalt . . . . .	61
8.2	Závěr měření . . . . .	61
	<b>Závěr</b>	<b>63</b>
	<b>Literatura</b>	<b>64</b>

# Úvod

Cílem mojí závěrečné diplomové práce je využití fyziky tření na základní škole, teoretický rozbor nejen fyziky tření po odborné fyzikální stránce, ale i všech jevů, které s pojmem tření souvisí. Práce zahrnuje celkem osm hlavních kapitol, jejichž obsah je následující.

První část je zaměřena obecně na předmět fyzika na základní škole. Pojednává o obsahu ŠVP ZŠ Edvarda Beneše v Lysicích. V kapitole je uvedena nejenom charakteristika fyziky jakožto jednoho z vyučovacích předmětů, ale také výchovné a vzdělávací postupy, které jsou potřebné pro vytváření klíčových kompetencí.

Druhá kapitola je poměrně obsáhlá, protože jsou v ní zahrnuty všechny stěžejní a důležité pojmy ve fyzice, které musí děti znát k pochopení jevu tření. Přes pojmy jako jsou síla, tlak, pohybové zákony, těžiště se dopracujeme až k samotnému tření a jeho podstatě. Kapitola také obsahuje průběh vyučovací hodiny, ve které se právě tření probíralo jako nové učivo. Jsou v ní zaznamenány pracovní listy, dle kterých učitel resp. žáci postupovali. Dále se zde nachází testy právě z kapitoly tření. Samozřejmě jsou zde zaneseny také výsledky testů, zpracovány do grafů a závěr, který lze z těchto grafů vyčíst.

Další kapitola se zabývá fyzikou tření na vyšší úrovni, to znamená minimálně středoškolskou fyzikou, ale ve většině případů spíše fyzikou vysokoškolskou. Tato kapitola se konkrétně zabývá teoretickým úvodem do problematiky tření a následným rozdělením tření. Uvádím v této kapitole také fyzikální podstatu jednotlivých druhů tření.

Ve čtvrté části popisuji jednotlivé konkrétní příklady tření. Jsou zde zahrnuty nejenom ty, s kterými se setkáváme v každodenním životě a víme o nich, ale i ty se kterými se setkáváme a neuvědomujeme si to. V kapitole je popsáno tření smykové, klidové a valivé.

Další kapitola pojednává o tření vnitřním o tzv. tření kapalin nebo-li viskozitě. Všichni si určitě neuvědomujeme, že i v kapalinách dochází ke tření, které nelze opomenout a nutno s ním počítat. V kapitole najdeme měření viskozity variabilními přístroji a způsoby.

Kapitola šestá pojednává (jak sám název napovídá) o mazivech a mazání, převážně o to jak tření snížit na minimum. K tomu nám slouží speciální maziva, jejichž druhy, vlastnosti a konkrétní použití jsou uvedeny v této kapitole.

V kapitole sedmé je popsán jev jménem přilnavost. Cílem této kapitoly bylo co pokud možno nejdetalněji popsat tento jev z fyzikálního hlediska. V kapitole je také uvedeno na čem přilnavost závisí, jak vzniká, co je její příčinou, kdy je největší a naopak kdy nejmenší.

Poslední, osmá část je praktického charakteru. Konkrétně se jedná o měření koeficientu tření mezi různými materiály. Druhy měřených materiálů jsou brány dle tabulky z kapitoly č.4. Na závěr kapitoly jsou uvedeny výsledky měření a skutečnosti, které z měření vyplívají.



# 1 Předmět fyzika na základní škole

## 1.1 Charakteristika vyučovacího předmětu. Dle ŠVP ZŠ Lysice

Vyučovací předmět má na druhém stupni časovou dotaci v 6. ročníku 1 hodinu týdně, v 7. ročníku 2 hodiny týdně, v 8. ročníku 1 hodinu týdně a v 9. ročníku 2 hodiny týdně. V 6. ročníku je kladen důraz na motivační stránku. Používané metody a formy práce vedou zejména k rozvoji zájmu žáka o fyziku a fyzikální jevy. Ve velké míře jsou využívány praktické úkoly, fyzikální zajímavosti, jednoduché laboratorní úkoly, praktické měření fyzikálních veličin a jejich odhady, úkoly spojené s praxí, (dívej se kolem sebe, zkoumej, odhaduj), ukaž, co už umíš a dovedeš, projekty a jednoduché motivační pokusy. Velký důraz je kladen na laboratorní práce žáků a zařazeny jsou i exkurze. V předmětu jsou zařazena i dvě průřezová témata a to environmentální a mediální výchova. V některých tématech učivo fyziky prolíná s učivem chemie, matematiky a zeměpisu.

## 1.2 Výchovné a vzdělávací postupy, které směřují k utváření klíčových kompetencí

### Kompetence k učení

Na úrovni předmětu fyzika jsou pro utváření a rozvíjení této klíčové kompetence využívány následující postupy:

- vést žáky k tomu, aby uváděli věci do souvislostí, propojovali do širších celků poznatky z různých vzdělávacích oblastí a na základě toho si vytvářeli komplexnější pohled zejména na přírodní jevy
- vést žáky k vyhledávání informací vhodných k řešení problémů, nacházet jejich shodné, podobné a odlišné znaky, využívat získané vědomosti a dovednosti k objevování různých variant řešení problémů a využívat je efektivně ve svém dalším studiu
- podporovat u žáků snahu vytrvale hledat konečné řešení problému, nenechat se odradit případným nezdarem
- nabízet žákům možnost samostatně, či ve spolupráci s ostatními žáky systematicky pozorovat různé fyzikální objekty, procesy i jejich vlastnosti a měřit různé fyzikální vlastnosti objektů
- vést žáky k tomu, aby výsledky svých pozorování a měření zpracovávali, vyhodnocovali a dále používali pro vlastní učení
- vést žáky v diskuzích k vyslovení hypotézy o fyzikální podstatě studovaných jevů či jejich průběhu, ověřovat různými prostředky jejich pravdivost a využívat získané zkušenosti k dalšímu poznávání okolního světa

### **Kompetence k řešení problémů**

Na úrovni předmětu fyzika jsou pro utváření a rozvíjení této klíčové kompetence využívány následující postupy:

- podporovat u žáků samostatné pozorování a experimentování, získané výsledky žák porovnává, kriticky posuzuje a vyvozuje z nich závěry pro využití v budoucnosti
- vést žáky k vyhledávání informací vhodných k řešení problémů, nacházet jejich shodné, podobné a odlišné znaky, využívat získané vědomosti a dovednosti k objevování různých variant řešení problémů, nenechat se odradit případným nezdarem a vytrvale hledá konečné řešení problému
- vést žáky k samostatnému řešení problémů; k volbě vhodných způsobů řešení; při řešení problémů žák využívá logické, matematické a empirické postupy
- hledat, navrhnout a používat další metody, informace a poznatky, které přispívají k řešení daného problému v případě, že dosavadní poznatky a metody nevedou k cíli
- vést žáky k pochopení základních ekologických souvislostí a environmentálních problémů, k respektování požadavků na kvalitní životní prostředí a k rozhodování v zájmu podpory a ochrany zdraví svého i ostatních

### **Kompetence komunikativní**

Na úrovni předmětu fyzika jsou pro utváření a rozvíjení této klíčové kompetence využívány následující postupy:

- vést žáky k zvládnutí přesného a stručného vyjadřování užíváním fyzikálního jazyka včetně symboliky (označení fyzikálních veličin a jejich jednotek)
- nabízet žákům dostatek možností k porozumění textů, obrazových materiálů, modelů a pokusů souvisejících s fyzikálními jevy
- vést žáky k týmové práci, žáci jsou si vědomi zodpovědnosti za výsledek skupinové (párové) práce, hodnotí výsledky skupinové práce a formulují své uspokojení z práce v hodině
- vést žáky k diskusi o výsledcích skupinové práce ve skupině i ve třídě
- vést žáky k využívání informačních prostředků pro své studium, práci ve škole a komunikaci s okolím, k používání komunikačních technologií k dorozumění (telefon, internet, e-mail, chat)

## 2 Tření na základní škole

Tření se ve fyzice dle ŠVP ZŠ Lysice probírá jednu, maximálně dvě vyučovací hodiny. Tento fakt, ale nemění nic na tom, že než se k tření samotnému dojde, je třeba znát stěžejní pojmy, které předcházejí před třením. Bez těchto pojmů by tření jakožto fyzikální pojem neměl pro žáky smysl. Následuje seznam důležitých pojmů dle ŠVP ZŠ v Lysicích, které by měli děti umět, než přejdou k tření a jeho podstatě.

- síla - značka veličiny, název a značka jednotky, dílčí a násobné jednotky síly
- měření siloměrem, znalost jednotky síly 1 N
- popis siloměru a jeho principu
- grafické znázornění síly
- gravitační síla Země - závislost na hmotnosti a vzdálenosti od Země
- výpočet velikosti gravitační síly, kterou působí Země na tělesa ve svém gravitačním poli
- určení výslednice sil u sil stejného a opačného směru poččetně i graficky
- účinky síly v praxi - posuvný (pohyb), otáčivý (kladky, páka), deformační (tlak)
- pojem těžiště - praktické určení, vytvoření netypické soustavy
- Newtonovy pohybové zákony - zákon setrvačnosti (vysvětlení na praktických dějích podle znalostí žáků), zákon vzájemného působení dvou těles
- praktické využití páky, kladky
- tlak v praxi - zvětšení či zmenšení tlaku v praktických úkolech
- praktické využití tlaku, výpočet jednoduchých příkladů na tlak
- **tření** - ovlivňování velikosti třecí síly
- **využití tření v praxi**

Jelikož se jedná o osnovu učiva z ŠVP, tudíž jde o konkrétní výuku na výše uvedené škole tj. *Základní škola Edvarda Beneše v Lysicích* tzn. na jiných základních školách se může učivo podstatně lišit. Následující kapitoly, budou věnovány jednotlivým bodům výše uvedené učební osnovy.

## 2.1 Síla

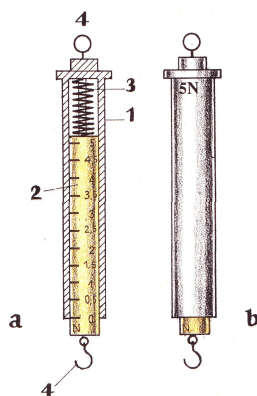
*Vzájemné silové působení těles* popisujeme pomocí pojmu síla. Říkame např., že ruka působí silou na pružinu a pružina působí silou na ruku. Slovo síla užíváme i k popisu **působení polí na tělesa**. Například gravitační pole Země, elektrické pole a magnetické pole. Nesmíme však zapomínat, že síla není něco, co by existovalo samo o sobě.

Síla může mít na těleso nejruznější účinky. Natáhneme-li nebo stlačíme pružinu, pak pružina mění tvar (deformuje se). Síla má tedy v tomto případě **deformační účinek**. Kopneme-li do míče síla má vedle účinků deformačních i vliv na **rychlost** a **směr** míče. Síla působící na těleso může tedy měnit jeho tvar, rychlost a směr pohybu. Síla, jakož to fyzikální veličiny se ve fyzice značí písmenem  $F$  a jednotkou síly je 1 *Newton* [1N].

### 2.1.1 Měření síly

Abychom mohli měřit velikost síly, musíme mít patřičný přístroj - **siloměr**. Ve škole se užívá nejčastěji tzv. pružinový siloměr [obr.1]. V pružinovém siloměru je umístěna pružina z takového materiálu, aby prodloužení pružiny bylo přímo úměrné působící síle. Siloměrem můžeme měřit velikost gravitační síly působící na těleso tak, že toto těleso zavěsíme na pružinu siloměru. Ještě než začneme sílu pružinovým siloměrem měřit, zjistíme:

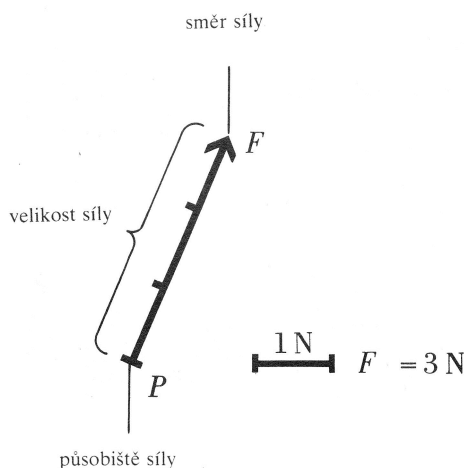
- jak velké síle odpovídá nejmenší dílek stupnice,
- jaký je měřicí rozsah stupnice,
- zda při nulové síle se nulová čárka stupnice kryje s okrajem vnějšího válce siloměru.



Obrázek 1: Pružinový siloměr: **a)** průřez siloměrem (1 - obal siloměru, 2 - stupnice, 3 - pružina, 4 - uchycovací háčky); **b)** celkový pohled na siloměr. Převzato z [7]

### 2.1.2 Grafické znázornění síly

Mají-li dvě stejně velké síly různý směr, říkáme, že jsou různé. Síly, které mají stejnou velikost i směr, jsou stejné. K jednoznačnému popisu síly musíme uvést nejen její velikost, ale i její směr. Místo, ve kterém síla působí, nazýváme působíště síly. Sílu znázorňujeme úsečkou se šipkou [obr.2]. Délka úsečky odpovídá velikosti síly. Lze se dohodnout například, že úsečka o délce  $1\text{cm}$  znázorňuje sílu o velikosti  $1\text{N}$ . Pak úsečka délky  $3\text{cm}$  znázorňuje sílu o velikosti  $3\text{N}$ .



Obrázek 2: Znázornění síly. Převzato z [6]

### 2.1.3 Gravitační síla

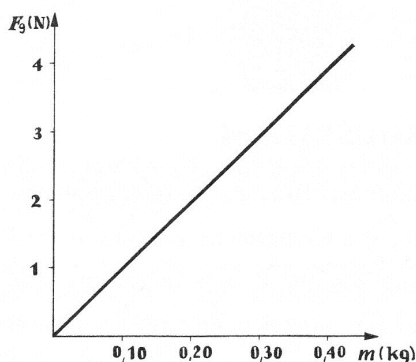
Z předchozích kapitol již víme, že na těleso o větší hmotnosti působí větší gravitační síla než na těleso o menší hmotnosti. Jaký je však přesný vztah mezi velikostí gravitační síly působící na těleso ( $F_g$ ) a hmotností tělesa ( $m$ )? Provedeme-li jednoduchý pokus, který spočívá v tom, že změříme **siloměrem** gravitační síly působící na závažíčka různých hmotností. Zjistíme, že podíly  $\frac{F_g}{m}$  pro jednotlivá závažíčka zůstávají stálé. Tyto podíly mají hodnoty  $10\frac{\text{N}}{\text{kg}}$ . Z těchto pokusů vyplývá: **Podíl gravitační síly a hmotnosti pro dané těleso je stálý**. Označíme-li tento podíl písmenem  $g$ , dostaneme:

$$g = \frac{F_g}{m} \quad (2.1)$$

Veličina  $g$  má jednotku  $\frac{\text{N}}{\text{kg}}$  nebo-li newton na kilogram. Předchozí vztah můžeme také psát ve tvaru:

$$F_g = g \cdot m \quad (2.2)$$

Gravitační síla je v daném místě přímo úměrná hmotnosti tělesa [obr.3].



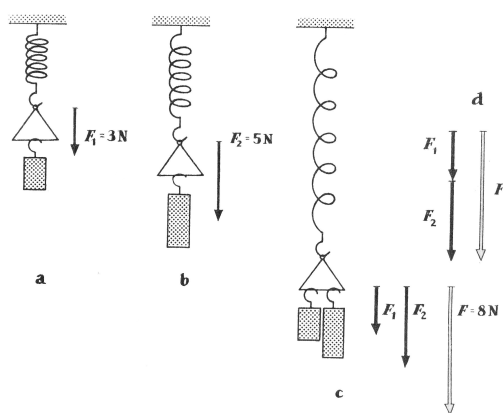
Obrázek 3: Graf závislosti gravitačních sil pro různé hmotnosti. Převzato z [7]

#### 2.1.4 Skládání dvou sil téhož směru

Výslednice dvou sil působících v téže směru na těleso má týž směr jako tyto složky. Její velikost je rovna součtu velikostí obou složek:

$$F = F_1 + F_2. \quad (2.3)$$

Graficky sečteme dvě síly působící v jednom směru tak, že jednu z orientovaných úseček **rovnoběžně posuneme**, aby svým začátkem navazovala na konec úsečky druhé [obr.4d]. Délka výsledné úsečky určuje velikost výsledné síly a koncová šipka její směr.



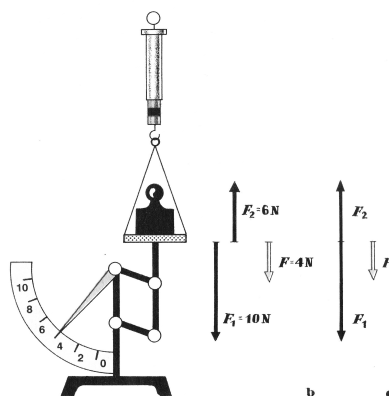
Obrázek 4: Skládání sil stejného směru: **a)** působí pouze síla  $F_1$ ; **b)** působí pouze síla  $F_2$  stejného směru jako  $F_1$ ; **c)** síly  $F_1$  a  $F_2$  působí současně, **d)** výsledná síla  $F$  má velikost  $F = F_1 + F_2$  a směr shodný se směrem složek. Převzato z [7]

### 2.1.5 Skládání dvou sil opačného směru

Směr výslednice dvou sil opačných směrů je shodný se směrem větší z obou sil. Velikost výslednice je rovna rozdílu velikostí složek:

$$F = F_1 - F_2. \quad (2.4)$$

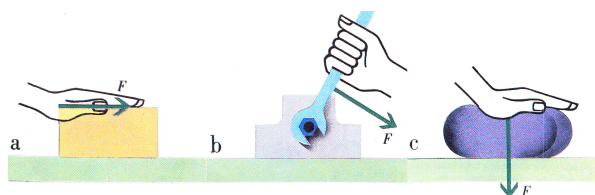
Určujeme-li velikost výslednice, odečítáme vždy velikost menší síly od velikosti síly větší. Opačné síly můžeme složit i graficky [obr.5b].



Obrázek 5: Skládání sil opačného směru: a) spolu se silou  $F_1$  působí síla  $F_2$  opačného směru, než má síla  $F_1$ ; b) výslednice má velikost  $F = F_1 - F_2$  a směr shodný se směrem větší ze složek. Převzato z [7]

### 2.1.6 Účinky síly

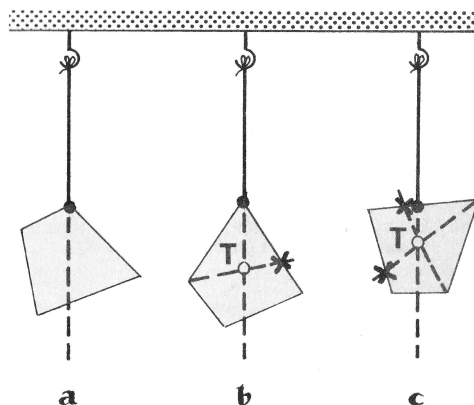
Síla může uvést těleso z klidu do posuvného pohybu, může pohyb urychlit, zpomalit nebo zastavit. Říkáme, že má **posuvné účinky**. Síla může roztočit těleso, zrychlit nebo zbrzdit či zastavit jeho otáčivý pohyb. Říkáme, že má **otáčivé účinky**. Síla také může změnit tvar tělesa. Říkáme, že má **deformační účinky**. Na obrázku 6 jsou příklady různých účinků síly, kterou ruka působí na tělesa.



Obrázek 6: Různé účinky síly. a) posuvné účinky, b) otáčivé účinky c) deformační účinky. Převzato z [6]

## 2.2 Těžiště tělesa

Zavěsíme postupně tenkou desku (z lepenky nebo umělé hmoty) na nit v různých bodech desky [obr.7a, b, c]. Nit se ustálí ve svislém směru. Ve všech třech případech narýsujeme přímku jdoucí ve směru nitě a procházející bodem závěsu. Přímky se protínají v jediném bodě  $T$ , který nazýváme **těžiště** desky. Tímto způsobem bychom zjistili těžiště i jiných těles.



Obrázek 7: Určení těžiště tělesa (a, b, c - různé případy zavěšení tělesa). Převzato z [7]

Libovolné těleso si můžeme představit složené z malých částí. Na každou působí gravitační síla. Výslednice těchto gravitačních sil má na těleso stejný účinek jako výsledná gravitační síla, která by měla působiště právě v těžišti. Gravitační síla působící na těleso a tahová síla nitě jsou v rovnováze, je-li těleso v klidu. Těleso má vždy jediné těžiště. Jeho umístění v tělese však závisí na rozložení látky v něm.

Poloha těžiště má v praxi velký význam. Ovlivňuje, mimo jiné, velikost síly potřebné k převrácení tělesa. Čím výše je těžiště nad podložkou, tím je tato síla menší. Proto je např. vhodné položit skříň na korbu automobilu největší plochou. Těžiště skříně je pak nejnižší a ta se obtížněji při jízdě převrátí.

## 2.3 Pohybové zákony

### 2.3.1 První pohybový zákon (zákon setrvačnosti)

Již víme, že síla může měnit rychlost tělesa a směr jeho pohybu. Jestliže na těleso nepůsobí síla, rychlost i směr jeho pohybu se nemění. Je-li auto v klidu, tj. jeho rychlost je nulová, pak pokud na něj nebude působit síla, bude stále **setrvávat** v klidu.

Na auto pohybující se rovnoměrně a přímočarě po silnici působí vlastně sil více: síla motoru, třecí síla, gravitační síla, síla od silnice, odporová síla vzduchu. Při rovnoměrném přímočarém pohybu auta je však jejich výslednice nulová. Tento příklad potvrzuje první pohybový zákon neboli zákon setrvačnosti: **Těleso setrvává v klidu nebo v pohybu přímočarém rovnoměrném, pokud výsledná síla působící na těleso je nulová.**

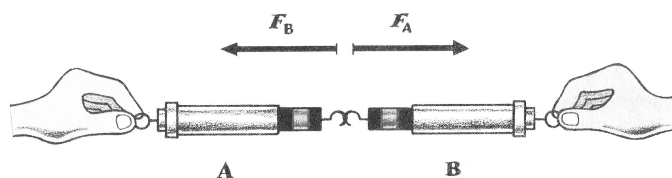


### 2.3.2 Druhý pohybový zákon (zákon vzájemného působení těles)

Mnohokrát jsme se mohli sami přesvědčit, že působení těles je vždy vzájemné. Jestliže jedno těleso působí na druhé, působí i druhé na první. Dva magnety se přitahují nebo odpuzují. Země působí na Slunce a Slunce na Zemi. Odstrčíte-li se vzájemně dlaněmi s kamarádem na bruslích, oba změníte rychlost: kamarád působil na vás a vy na něho.

Jaké jsou velikosti sil vzájemného působení těles a jaké jsou jejich směry? Zjistíme to nejlépe pomocí siloměrů. Dva siloměry  $A$  a  $B$  [obr.8] spojíme háčky na vysunovatelných koncích a volné konce siloměrů táhneme od sebe. Oba siloměry na sebe působí stejně velkými silami opačného směru.  $F_A$  je velikost síly působící na siloměr  $A$  (ze strany siloměru  $B$ ).  $F_B$  je velikost síly působící na siloměr  $B$  (ze strany siloměru  $A$ ). Platí:

$$F_A = F_B$$

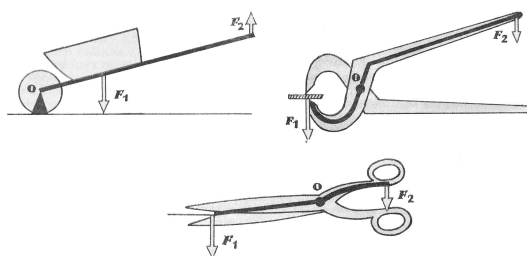


Obrázek 8: Vzájemné působení siloměrů. Převzato z [7]

Tento pokus dokazuje platnost tzv. třetího pohybového zákona nebo-li zákona vzájemného působení těles: **Síly vzájemného působení dvou těles jsou stejně velké a opačného směru.**

### 2.4 Praktické využití páky, kladky

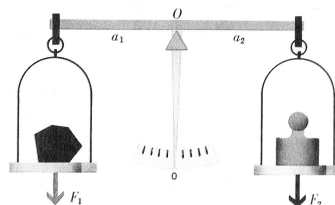
Páka je součástí mnoha strojů a zařízení. Pomocí páky zvedáme těžká tělesa. Pákou přemáháme i jiné síly než gravitační sílu  $F_g$ , kterou Země přitahuje těleso; např. při stříhání plechu nůžkami, při štípání drátu kleštěmi nebo při otevírání víka u krabice s barvou. Příklady užití páky, kde síla působí na různých stranách páky od osy otáčení, jsou na obrázku 9.



Obrázek 9: Užití páky. Převzato z [7]

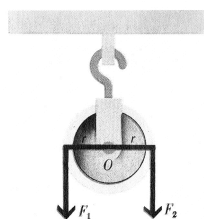
Páka může být v rovnovážné poloze i tehdy působí-li obě síly na stejné straně páky od osy otáčení. Při působení dvou stejně velkých sil ( $F_1 = F_2$ ) na páku je páka v rovnovážné poloze, jestliže jsou ramena obou sil stejná ( $a_1 = a_2$ ). Taková páka se **nazývá rovnoramenná páka**.

Nejnámějším použitím rovnoramenné páky jsou tzv. **rovnoramenné váhy**. Na rovnoramenných vahách určujeme hmotnost tělesa srovnáváním se známou hmotností závaží [obr.10].



Obrázek 10: Rovnovážná poloha rovnoramenných vah. Převzato z [6]

**Pevná kladka** je podobně jako páka, těleso otáčivé kolem pevné vodorovné osy. Je to kotouč, na jehož obvodu je žlábek, do kterého se vkládá lanko. Poloměr kladky označíme  $r$ . Působí-li na levý konec lana síly  $F_1$  a na pravý síla  $F_2$ , je modelem kladky rovnoramenná páka [obr.11]. Pevná kladka je v rovnovážné poloze, když na obou koncích lana působí stejně veliké síly.

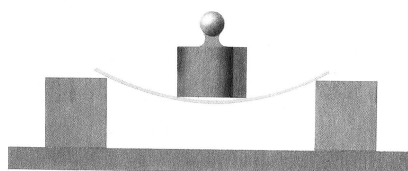


Obrázek 11: Pevná kladka. Převzato z [6]

## 2.5 Tlaková síla, tlak

Položíme závaží na vodorovnou podložku. Tělesa se dotýkají v určité ploše o obsahu  $S$ . Závaží působí kolmo na styčnou plochu silou  $F$ , kterou nazýváme **tlaková síla**. Tlaková síla je celková síla, kterou působí jedno těleso na druhé kolmo na plochu. Položíme závaží na tenkou desku [obr.12], deska se prohne. Zmačkneme-li rukou gumu, deformuje se. Vidíme že tlaková síla může vyvolat deformační účinky. Stejně velká tlaková síla může vyvolat různé deformační účinky podle toho, jak velký je obsah plochy, na kterou působí. Proto se ve fyzice zavádí veličina tlak. Tuto veličinu značíme  $p$ . Podíl velikosti tlakové síly  $F$  a obsahu plochy  $S$ , na kterou síla působí kolmo, se nazývá tlak

$$p = \frac{F}{S}. \quad (2.5)$$



Obrázek 12: Deformační účinky tlakové síly na tenkou desku. Převzato z [6]

Jednotkou tlaku je **pascal**. Označujeme ji  $Pa$ . Při měření tlaku se většinou používá jednotka větší než pascal.

Tlak zmenšíme: zvětšením obsahu styčné plochy, zmenšením tlakové síly. Naopak tlak zvětšíme: zmenšením obsahu styčné plochy, zvětšením tlakové síly.

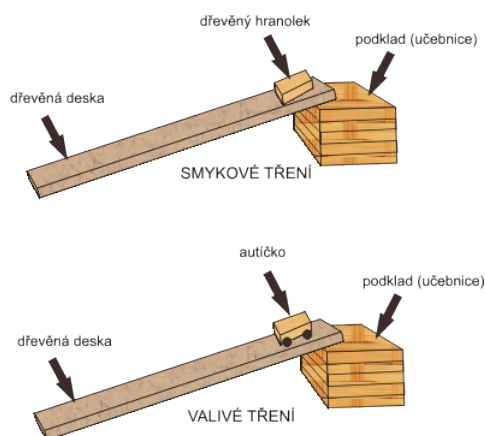
## 2.6 Tření, třecí síla

Měl jsem možnost si z dovolením paní Mgr. Hany Tesařové vyzkoušet výuku, právě tohoto učiva, tj. tření, třecí síla. Učil jsem dvě sedmé třídy na Základní škole Edvarda Beneše v Lysicích, konkrétně to byly třídy VII.B a VII.C. Pro hodinu fyziky, abych ji učinil zajímavější a netradiční (vyhnout se klasickému opisování definic a vzoreček z tabule či učebnice), jsem si připravil pracovní listy, které měly následující podobu.

### 2.6.1 Pracovní listy

Následuje přesné zadání pracovních listů, jaké dostaly děti v hodině fyziky.

#### 1. ÚČINKY TŘENÍ



#### Materiál a pomůcky

dvě knížky jako podklad  
autíčko  
dřevěná deska  
dřevěný hranol velikosti autíčka

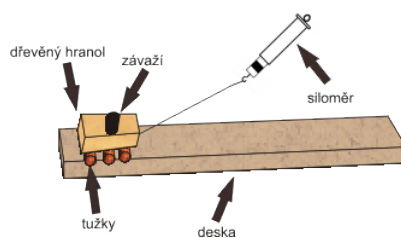
## Postup

1. Umístěte destičku tak, aby jeden její konec byl výše než druhý.
2. Na horní okraj destičky položte hranolek, jehož velikost je srovnatelná s autíčkem.
3. Místo hranolku položte na horní okraj destičky autíčko.

## Doplňte

*Když umístím na destičku autíčko, tak autíčko .....*

## 2. SMYKOVÉ A VALIVÉ TŘENÍ



## Materiál a pomůcky

dřevěná deska  
dřevěný hranol  
siloměr  
tužky  
větší závaží

## Postup

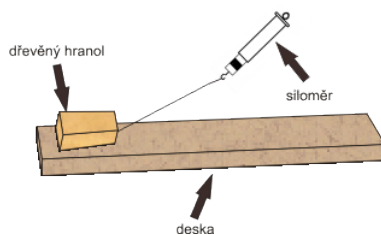
1. Dřevěný hranol položte na desku.
2. Na hranol dejte závaží.
3. Pomalu táhněte za siloměr a sledujte jeho hodnotu, jakmile se hranol začne pohybovat.
4. Zopakujte předchozí bod, ale pod hranol vložte kulaté tužky.

## Doplňte

*Když jsem táhnul za siloměr v bodě č.3 ukázal hodnotu .....*

*Když jsem táhnul za siloměr v bodě č.4 ukázal hodnotu .....*

### 3. KLIDOVÉ TŘENÍ



#### Materiál a pomůcky

siloměr  
dřevěná deska  
dřevěná deska potažená smirkovým papírem  
dřevěný hranol

#### Postup

1. Hranolek položte na velkou dřevěnou desku.
2. Pomalu táhněte za siloměr a sledujte hodnotu siloměru, než se špalíček „začne“ pohybovat, poté sledujte hodnotu na siloměru při pohybu špalíčku.
3. Vyměňte dřevěnou desku za desku potaženou smirkovým papírem a opakujte předchozí postup.

#### Doplňte

##### Dřevěná deska

*Než se začal dřevěný hranol pohybovat siloměr ukazoval hodnotu .....*

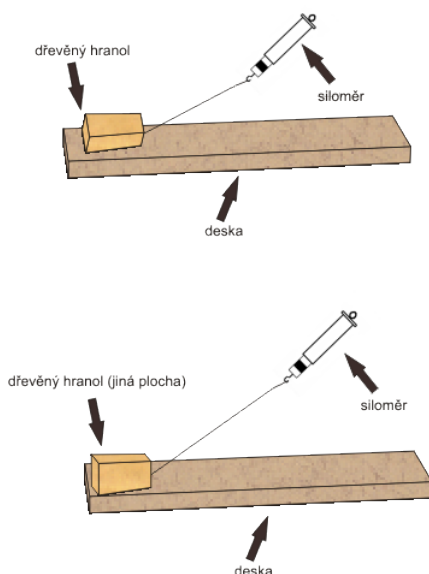
*Když se špalíček pohyboval siloměr ukazoval hodnotu .....*

##### Dřevěná deska potažená smirkovým papírem

*Než se začal dřevěný hranol pohybovat siloměr ukazoval hodnotu .....*

*Když se špalíček pohyboval siloměr ukazoval hodnotu .....*

## 4. TŘENÍ A STYČNÉ PLOCHY



### Materiál a pomůcky

siloměr  
dřevěná deska  
dřevěný hranol

### Postup

1. Hranolek položte jeho **největší plochou** na dřevěnou desku.
2. Táhněte pomalu za siloměr a sledujte hodnotu na siloměru jakmile se začne hranolek pohybovat.
3. Hranolek položte na desku **jinou plochou** než v bodě č.1.
4. Táhněte pomalu za siloměr a sledujte hodnotu na siloměru jakmile se začne hranolek pohybovat.

### Doplňte

*Když hranolek ležel svoji největší plochou na desce a já jsem táhnul za siloměr, tak siloměr ukazoval hodnotu .....*

*Když hranolek ležel na desce jinou plochou než v předchozím bodě a já jsem táhnul za siloměr, tak siloměr ukazoval hodnotu .....*

## 2.6.2 Průběh hodiny

Uplně na začátek jsem děti motivoval pověstí o Jánošíkovi, jak jej dopadli pomocí hrachu, který mu naházeli pod nohy, tímto změnili tření smykové na tření valivé, Jánošík po hrachu uklouznul a mohli ho zajmout. Po motivační fázi jsem dětem, pustil prezentaci, ve které byla krátká teorie o tření - co to vlastně tření je, jak vzniká, co je třecí síla. Jelikož byla už osmá vyučovací hodina, ještě k tomu fyzika, tak abych děti nejen motivoval, ale i přiměl k vzájemné spolupráci řekl jsem dětem, že si vlastně budeme „hrát“ s autíčkem, s dřevěným hranolem, siloměrem apod.

Téměř všechny pomůcky, které jsou výše popsány v pracovních listech si děti donesly, či vyrobily samy. Autíčko si každá skupina donesla vlastní z domova. Dřevěný hranol, dřevěnou desku a dřevěnou desku potaženou smirkovým papírem si děti vyrobily svépomocí v dílně tamější školy. Tímto způsobem došlo k mezipředmětovému provázání fyziky a techniky.

Po prezentaci krátkého úvodu jsem rozdělil celou třídu na pět skupin po čtyřech, pěti žácích. Rozdal jsem jim pracovní listy, které jsou uvedeny v předchozí kapitole. Na konci každé očíslované sekce jednotlivých experimentů, jsou úkoly pro děti, ty spočívají v doplnění chybějících vět. Děti si věty přepisovaly do svých sešitů, věty jsou vždy sestaveny tak, aby děti navedly k závěru, který měli jednotlivými experimenty vypořádat. Například na čem třecí síla závisí nebo naopak nezávisí, je větší klidová třecí síla, nebo třecí síla při pohybu tělesa. Proč je vhodné „převádět“ smykové tření na tření valivé.

Abych zajistil poměrně kvalitní a ničím nerušenou práci dětí, všechny experimenty jsem jim v rychlosti předvedl a zdůraznil na co se mají zaměřit. Děti si poznámky psaly do sešitů, pracovní listy jsem rozdál zatažené ve fólii, abych zamezil případnému znehodnocení. Poté co jsem předvedl v krátkosti všechny experimenty, si jeden žák z každé skupiny přišel pro pomůcky, které byly potřeba k daným experimentům. Při samostatné práci jsem obcházel jednotlivé skupinky dětí a kladl různé otázky, týkající se nejen zadaných experimentů a souvisejících úkolů, ale také na **praktické využití** daného jevu. Dohlížel jsem na kázeň, na střídání jednotlivců ve skupině při provádění pokusů a kontroloval učiněné zápisky v sešitech.

Děti pracovaly ochotně a bez větších problémů s pochopením učiva, z mého pohledu to vypadalo jako kdyby hodinu opravdu pojaly jako „hru“. Na konci hodiny dostali žáci krátký a poměrně jednoduchý test na probrané učivo, jako zpětnou vazbu pro učitele, v tomto případě pro mne, jestli se děti touto metodou a těmito prostředky něco naučily či nikoliv. Jednalo se o multiple-choice test, který se skládal z tří otázek, každá z otázek měla na výběr z pěti distraktorů, přičemž právě jeden byl správný. Přesné zadání testu bylo následující.

### 2.6.3 Zadání testu

1. Jaký **směr** má třecí síla?
  - A) působí vždy kolmo k zemi
  - B) shodný se směrem tíhové síly
  - C) působí ve směru pohybu
  - D) působí proti směru pohybu těles
  - E) působí vždy do středu Země
2. **Klidová** třecí síla je vůči třecí síle **při pohybu**
  - A) větší
  - B) menší
  - C) stejně velká
  - D) záleží na teplotě okolí
  - E) větší, ale jen u „malých“ těles
3. Na čem třecí síla **nezávisí**?
  - A) na tlakové síle, kterou působí kolmo na podložku
  - B) na materiálu těles
  - C) na „drsnosti“ ploch
  - D) na hmotnosti těles
  - E) na velikosti styčných ploch

### 2.6.4 Výsledky testu

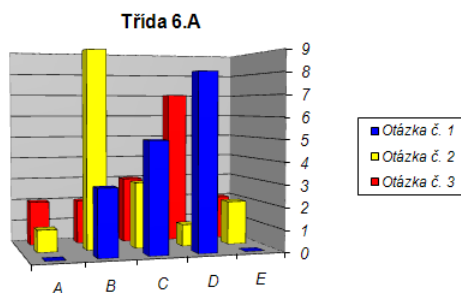
Test, který je uveden o kapitolu výše byl v přesném znění rozdán žákům různých základních resp. gymnaziálních škol. Test byl záměrně vytvořen poměrně jednoduchý, aby čas vymezen pro odpovědi byl relativně krátký. Krátký byl také proto, abych neokrádal pedagogy o jejich drahocenný čas. Test obsahuje pět možných odpovědí, přičemž právě jedna je správná, tím jsem chtěl eliminovat případné hádání dětí a nebo také náhodné správné odpovědi. V každé škole, byl test rozdán ve více ročnících.

Otázky testu jsem vytvořil sám, snaha byla vytvořit test, který měl zjistit jak žáci na základních školách potažmo gymnáziích chápou resp. rozumí fyzikálnímu pojmu tření. Budou následovat grafy, na kterých budou vyhodnoceny testy z jednotlivých tříd. Na první pohled bude z grafu patrné jak se jednotlivé třídy z testem vypořádali. Další srovnání by také mohlo být mezi ročníky, které učivo tření braly a které naopak nikoliv. Vždy jsem vzal jednotlivé testy z tříd spočítal odpovědi k jednotlivým otázkám (A, B, C, D, E) a vložil data do grafu. U každé třídy bylo samozřejmě zaznamenáno kolik dětí na test odpovídalo. Bylo jim řečeno, že je jen právě jedna možná odpověď u každé otázky. Správné odpovědi na testové otázky jsou následující: **1 D; 2A ; 3E.**



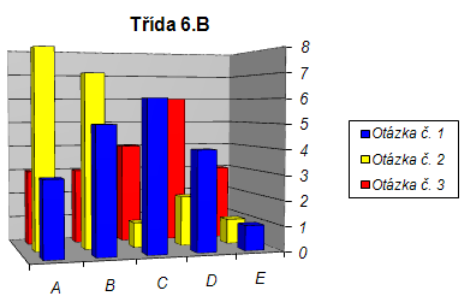
## Základní škola Edvarda Beneše v Lysicích

Třída 6.A, celkem 16 dětí.



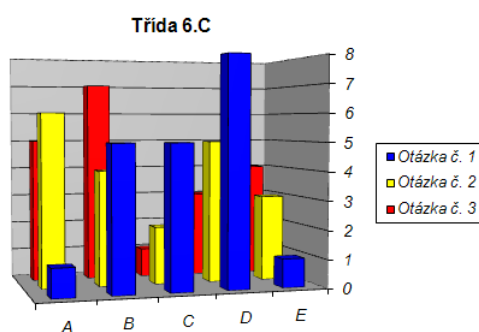
Obrázek 13: Grafické znázornění výsledku testu třídy 6.A

Třída 6.B, celkem 19 dětí.



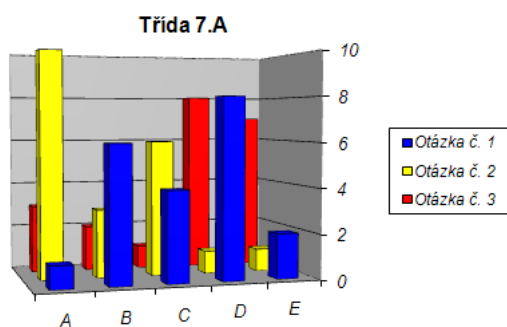
Obrázek 14: Grafické znázornění výsledku testu třídy 6.B

Třída 6.C, celkem 20 dětí.



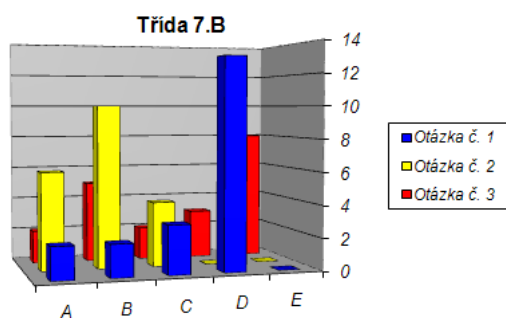
Obrázek 15: Grafické znázornění výsledku testu třídy 6.C

Třída 7.A, celkem 21 dětí.



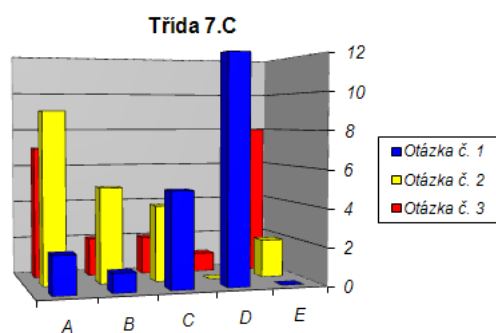
Obrázek 16: Grafické znázornění výsledku testu třídy 7.A

Třída 7.B, celkem 20 dětí.



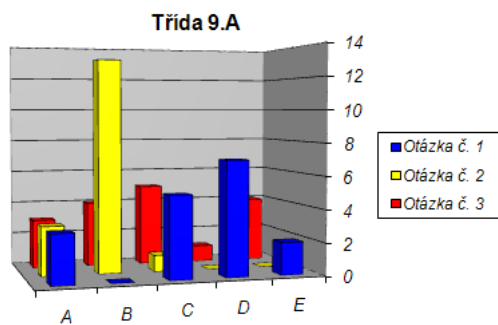
Obrázek 17: Grafické znázornění výsledku testu třídy 7.B

Třída 7.C, celkem 20 dětí.



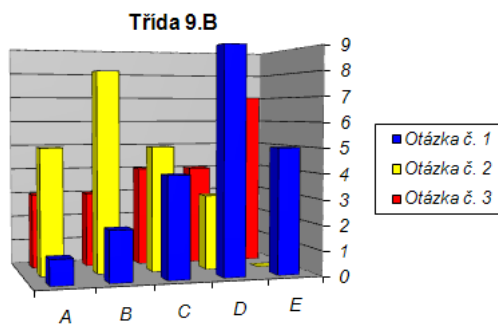
Obrázek 18: Grafické znázornění výsledku testu třídy 7.C

Třída 9.A, celkem 17 dětí.



Obrázek 19: Grafické znázornění výsledku testu třídy 9.A

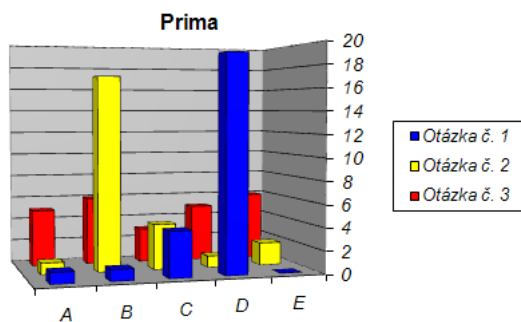
Třída 9.B, celkem 21 dětí.



Obrázek 20: Grafické znázornění výsledku testu třídy 9.B

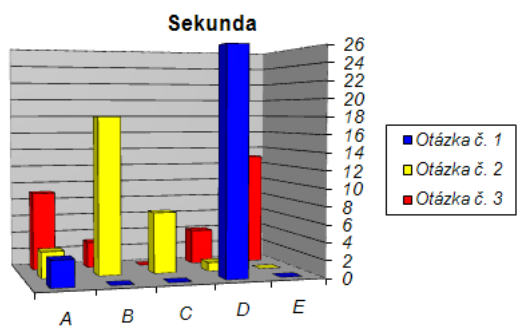
## Gymnázium kapitána Jaroše v Brně

Třída prima, celkem 25 dětí.



Obrázek 21: Grafické znázornění výsledku testu třídy primy

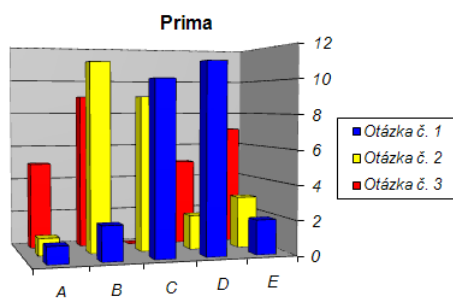
Třída sekunda, celkem 29 dětí.



Obrázek 22: Grafické znázornění výsledku testu třídy sekundy

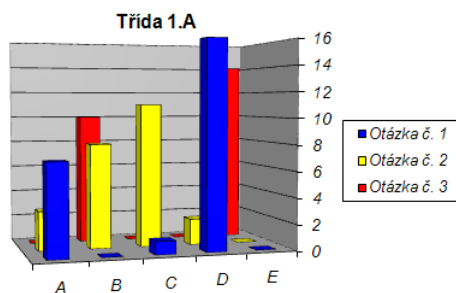
## Biskupské Gymnázium v Brně

Třída prima, celkem 26 dětí.



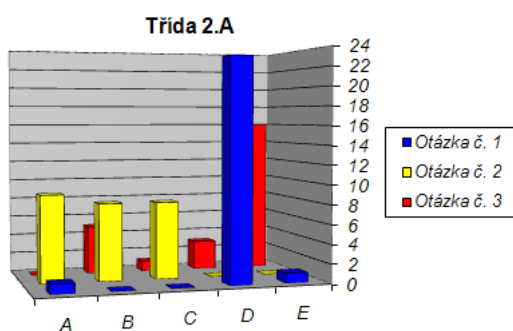
Obrázek 23: Grafické znázornění výsledku testu třídy primy

Třída 1.A, celkem 24 dětí.



Obrázek 24: Grafické znázornění výsledku testu třídy 1.A

Třída 2.A, celkem 25 dětí.



Obrázek 25: Grafické znázornění výsledku testu třídy 2.A

### 2.6.5 Vyhodnocení, závěr testu

Cílem testu bylo zjistit, jak jsou na tom děti s vědomostmi, které se týkají tření. Jak jsem už v práci zmínil, test jsem vytvořil sám, jelikož nejsem ještě tak docela zběhlý nejen v tvorbě testů, ale i v učitelské praxi, test mi „posvětila“ paní Mgr. Hana Tesarřová z pozice zkušeného pedagoga a didaktika.

Nejdřív se zaměříme na děti šestých tříd tzn. žáky, kteří se s pojmem tření ještě nesetkali. Z výše uvedených grafů vyčteme, že největší problém dělala dětem otázka číslo 2 přičemž si mysleli, že klidová třecí síla je vůči třecí síle při pohybu menší. Naopak nejlehčí dle výsledků byla pro děti otázka číslo 1, kdy většinou správně odpověděli, že třecí síla působí vždy proti směru pohybu tělesa. U otázky číslo tři si děti často špatně mysleli, že třecí síla nezávisí na materiálu stýkajících se těles.

Následují třídy, které se o tření už učily, tudíž by jejich výsledky měly dopadnout lépe. Třídy sedmých ročníků resp. sekundy odpověděly s převážnou většinou správně na otázku číslo 1, zbytek dětí které neodpověly správně na tuto otázku tzn. nezatrhlly správnou možnost D, zatrhlly odpovědi B a C. Z toho vyplývá, že minimum dětí zatrhllo odpovědi A, E. Správnou odpověď tj. odpověď A, na otázku číslo 2 zatrhllo zhruba polovina žáků, druhou nejčastější odpovědí na tuto otázku, byla odpověď B, to v podstatě znamená, že děti sedmých ročníků měly úplně stejný problém s touto otázkou jako děti z šestých ročníků. U otázky číslo 3 byla nejčastější odpověď správná tj. odpověď pod písmenem E, tzn. děti si správně mysleli, že třecí síla závisí na velikosti styčných ploch.

Poslední skupinou byli žáci devátých tříd tzn. žáci, kteří by měli znát téměř celou základěškolskou fyziku. Do této skupiny přidám i studenty 1. a 2. ročníků gymnázia, kteří by měli taktěž problematiku tření dokonale ovládat. Na otázku číslo 3, tak většina žáků odpověděla správně tj. zakroužkovali písmeno E, tudíž opět jako v sedmých ročnících si správně myslí, že třecí síla závisí na velikosti styčných ploch. Nejčastější špatnou odpovědí na tuto otázku byla možnost D. Na otázku číslo 1 pak drtivá většina studentů resp. žáků odpověděla správně tj. zatrhlly odpověď D. Bohužel druhá otázka dělala této skupině žáků docela problémy, protože častější zakroužkované odpovědi na tyto otázky byly B a C tudíž odpovědi chybné. Správnou odpověď pod písmenem A zatrhllo necelá třetina žáků.

Na závěr vyhodnocení lze shrnout celkové výsledky testů, nehledě na věk dětí. Zjistili bychom že nejvíce se žáci poprali s otázkou číslo jedna, kdy opravdu převážná většina odpověděla správně. Na pomyslném druhém místě stojí otázka číslo 3, jelikož správnou odpověď na tuto otázku zatrhlly asi dvě třetiny žáků. Celkově nejméně správných odpovědí tak má otázka číslo 2, kdy na tuto otázku odpověděla pouze necelá polovina z celkového počtu dětí.

### 3 Úvod do fyziky tření

Název tření má ve fyzice dvojí význam: značí *jev*, který vzniká na styčné ploše dvou pevných těles; dále *sílu*, která přitom vznikne. Můžeme hovořit o **tření vnějším**, když po sobě klouzají dvě pevná tělesa. Tento typ tření lze také nazvat **tření suché**, protože mezi tělesy není kapalná ani plynná mezivrstva. Dále lze uvést **tření vnitřní**. Vnitřní tření, nebo tzv. *vnitřní tření kapalin* vzniká mezi povrchem pevného tělesa a kapalného nebo plynného prostředí, kterým se těleso pohybuje. Vnitřním třením, lze také nazvat případ, kdy dochází ke tření mezi částmi jednoho tělesa.

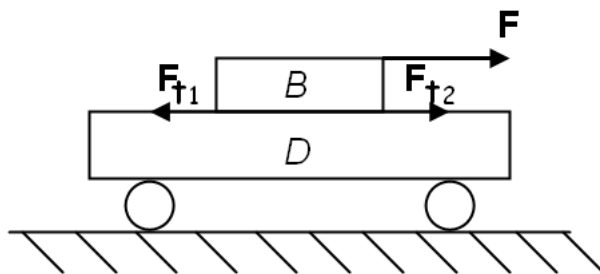
Odpory prostředí nazýváme odporové síly, které vznikají při pohybu pevného tělesa v kapalinách nebo plynech. Plyn resp. kapalina lpí na povrchu tělesa, tím pádem je prakticky vnější tření nekonečně velké a odpor závisí zejména na vnitřním třením v prostředí, jež vzniká při přeskupování jednotlivých částí navzájem. Právě tyto částice musí pohybuji se těleso před sebou rozhrnovat.

Síla, která vzniká u všech typů tření má speciální postavení. Tato speciálnost spočívá v tom, že působí formou odporů, vždy proti pohybu tělesa. Oproti ostatním silám, které mohou působit nejen proti pohybu tělesa, ale mohou i pohyb tělesa podporovat. Zmiňovaná síla se nazývá **síla třecí**, značíme ji  $\mathbf{F}_t$  a její orientace má směr právě podél povrchů stýkajících se těles, tzn. v opačném směru než rychlost jejich relativního přemístění.

Když je úhel mezi třecí silou  $\mathbf{F}_t$  a elementárním přemístěním  $\Delta \mathbf{r}$  tělesa  $\pi$  radiánů, pak je práce třecí síly záporná a rovna:  $W_t = -F_{ts} \cdot s_{12}$ , kde  $s_{12}$  je dráha tělesa mezi body 1 a 2.

Může však nastat varianta číslo dvě, kdy úhel mezi třecí silou  $\mathbf{F}_t$  a elementárním přemístěním  $\Delta \mathbf{r}$  je roven nule. V tomto případě je pak práce třecí síly kladná;  $W_t = F_{ts} \cdot s_{12}$ . Tyto dva předešlé způsoby, jsou zobrazeny na obrázku 26.

Nechť vnější síla  $\mathbf{F}$  působí na hranolek B, který klouže po vozíku D. Pohybuje-li se vozík vlevo, je práce síly skluzového tření  $\mathbf{F}_{t2}$ , která působí na vozík ze strany hranolku záporná.



Obrázek 26: Práce třecí síly. Převzato z [1]

Tření resp. třecí síla v některých případech pohyb umožňuje resp. usnadňuje, např. při pohybu automobilů, lokomotiv, při chůzi. V opačných případech jako jsou např. ložiska strojů, je tření na závadu. Tření rozdělujeme na **tření smykové**, **klidové** a **valivé** u všech třech typů se jedná o tření **suché**, liší se akorát způsobem jakým se tělesa po sobě pohybují.



## 4 Suché tření

### 4.1 Klidové tření

Nebudeme-li hranolku B na obrázku 26 udělovat náraz, ale budeme zvětšovat zatížení hranolku tak dlouho, až se hranolek začne sám pohybovat, zjistíme, že potřebná síla  $\mathbf{F}$  je v tomto případě větší. Z tohoto experimentu je zřejmé, že třecí síla při přechodu z klidu do pohybu (tření statické) je větší než třecí síla v pohybu, potom platí

$$F_{t0} = \mu_0 G. \quad (4.1)$$

Síla  $\mathbf{F}_{t0}$  je tzv. *klidová třecí síla*, která brání vzniku pohybu jednoho tělesa po povrchu tělesa druhého. Působí-li na těleso, které je v kontaktu s tělesem dalším, zvětšující se vnější síla  $\mathbf{F}_{vn}$ . Tato síla působí rovnoběžně s rovinou dotyku obou těles, k pohybu tělesa nedojde, jestliže  $\mathbf{F}_{t0}$  nedosáhne určité hodnoty. Při snaze o vyvedení tělesa z klidového stavu, se síla klidového tření mění od nuly do mezní hodnoty  $\mathbf{F}_{t0}^{max}$ , která se nazývá mezní síla klidového tření. Relativní pohyb tedy vyžaduje splnění podmínky  $F_{t0}^{max} < F_{vn}$ . Většinou, když se hovoří o síle klidového tření, bývá míněna právě její mezní hodnota.

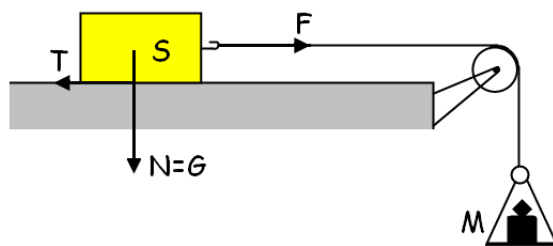
Síly klidového tření vznikají při zapadání drobných mikroskopických hrbolek a nerovností povrchů dotýkajících se těles. Uvedené síly vznikají také elastickými deformacemi těchto nerovností a soudržností těles v místech kde vzdálenosti mezi jejich částicemi jsou tak malinké, že dochází k *mezimolekulárnímu přitahování*. K tomuto přitahování může docházet mezi molekulami libovolné látky. Působí zde zároveň přitažlivé i odpudivé síly. Díky těmto předešlým jevům, lze považovat síly klidového tření za typ projevu pružných (elastických) sil.

Tyto síly působí mezi styčnými vrstvami deformovaného tělesa, ale také v místech styku tělesa deformovaného a tělesa které deformaci vyvolává. Přibližné výpočty provádíme pomocí rovnosti

$$F_{t0}^{max} = \mu_0 G_n. \quad (4.2)$$

Síla  $\mathbf{N}$  [obr.27], jež působí opora na těleso kolmo na styčnou plochu, se nazývá síla *normálové reakce* a síla  $\mathbf{F}_{Gn}$ , kterou působí těleso na oporu, síla *normálového tlaku* (tlaková síla).

Veličina  $\mu_0$  je bezrozměrný koeficient úměrnosti a nazýváme ho součinitelem (*koeficientem*) klidového tření. Součinitel závisí na materiálu stýkajících se těles, na kvalitě a jemnosti stykových ploch, na přítomnosti nežádoucích látek mezi nimi a řadě mnoha dalších faktorů. Hodnoty koeficientu tření se získávají experimentální cestou.



Obrázek 27: Síly působící na těleso

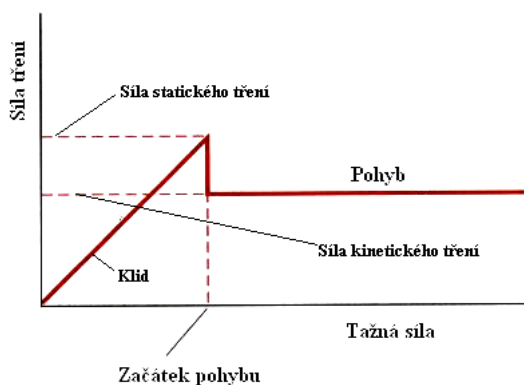
## 4.2 Smykové tření

Smykové (suché) tření vzniká při pohybu jednoho tělesa po tělese druhém. Pro třecí sílu mezi těmito dvěma tělesy platí tzv. **Coulumbův - Amontův zákon**:

$$F_t = \mu \cdot N \quad (4.3)$$

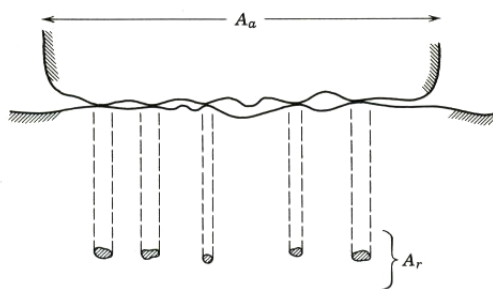
přičemž  $\mu$  je koeficient tření a  $N$  je kolmý tlak, tj. složka výsledné síly, která je kolmá k ploše.

Součinitel (koeficient) smykového tření je funkcí rychlosti vzájemného pohybu obou těles. Na obrázku 28 je vynesena závislost třecí síly na čase. Podle obrázku je patrná z praxe známá skutečnost: táhneme-li např. sáně po zamrzlém rybníku, musíme nejprve působit velkou silou, než se sánky začnou pohybovat. Jakmile sílu, která sánky rozpohybuje překonáme, další síla potřebná k jejich pohybu bude menší.



Obrázek 28: Závislost síly tření (koeficientu tření) na tažné síle (čase). Převzato z [9]

Obě uvedené závislosti můžeme kvalitativně objasnit pomocí tzv. *teorie mikrosvárů*. Základní princip této teorie plyne z obrázku 29, na kterém jsou schématicky zobrazeny dva po sobě klouzající povrchy. V místech, kde se vzájemně dotýkají „hrbolky“ obou ploch, dochází k velice těsnému kontaktu, k takovému že atomy obou povrchů jsou tak blízko u sebe a začnou mezi nimi působit meziatomové síly - dochází ke vzniku **mikrosvárů**.



Obrázek 29: Vzájemný vztah mezi skutečnou a zdánlivou třecí plochou. Převzato z [9]

V tabulce 1 jsou uvedeny koef. tření některých v praxi používaných dvojic materiálů.

Tabulka 1: Koeficienty tření. Převzato z [9]

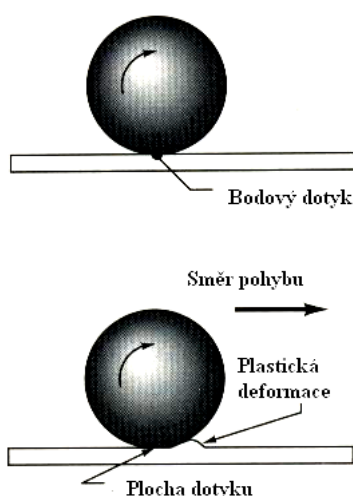
Materiály	Koeficient tření [ $\mu$ ]
Dřevo na dřevu (suché)	0,40
Dřevo na dřevu (namydlené)	0,20
Kov na dubovém dřevu (suché)	0,55
Kov na dubovém dřevu (mokrém)	0,25
Kůže na kovu (suché)	0,56
Kůže na kovu (mokrém)	0,36
Kůže na kovu (namazáno)	0,15
Kov na kovu (suché)	0,17
Kov na kovu (mokrém)	0,30
Kov na kovu (namazáno)	0,05
Ocel na achátu (suché)	0,20
Ocel na achátu (namazáno)	0,11
Ocel na křemenu (suché)	0,50
Pneumatika na betonu (suché)	0,70
Pneumatika na betonu (mokrém)	0,25
Dřevo na kameni	0,40
Teflon na teflonu	0,07

### 4.3 Valivé tření

Z předešlých kapitol vyplývá, že smykové resp. suché tření můžeme snížit např. správným zvolením materiálů pro styčné plochy. Jiný způsob je takový, že použijeme valivá ložiska tj. změním resp. přeměníme suché tření na tření valivé.

Při valivém pohybu kulatého resp. oblého tělesa (koule, válce) po druhém pevném tělese, k němuž je kulaté těleso přitlačováno nějakou silou a ještě k tomu je tlačeno ve směru rovnoběžným s rovinou druhého tělesa. Při tomto pohybu odporuje tělesu tzv. *třecí síla valivá* (nebo-li *tření valivé*). Podstatu z hlediska fyzikálního, lze objasnit pomocí obrázku 30 a 31.

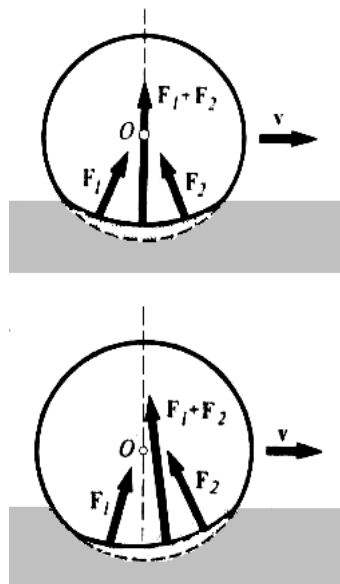
Na kuličku (váleček) působí síla, která ji vtiskuje do podložky a tím pádem dojde k deformaci nejenom kuličky, ale i podložky. Jestliže by tato deformace byla *ideálně pružná*, síla valivého tření by vůbec nevznikla.



Obrázek 30: K objasnění valivého tření. Převzato z [9]

Celková síla, která působí na kuličku, je podle obrázku rovna  $\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2$  a momenty těchto sil vzhledem k ose kuličky se navzájem vyruší. Výsledná síla  $\mathbf{F}$  je v rovnováze s vnější silou, působící na kuličku (zvětšenou o její tíhu). V tomto případě nevzniká žádná síla valivého tření.

Ve skutečnosti je tato deformace plastická (i když velmi malá), vzniká síla valivého tření a síly  $\mathbf{F}_1$  a  $\mathbf{F}_2$  budou různé, a proto bude jejich výslednice mít složku svislou i vodorovnou. Momenty mají opačný směr a nerovnájí se. Moment síly  $\mathbf{F}_2$ , brzdící otáčení kuličky je větší, než moment síly  $\mathbf{F}_1$ , který ji urychluje, takže výsledkem je zpomalování rotace kuličky a tedy vznik valivého tření.



Obrázek 31: Síly při valivém tření. Převzato z [9]

Síla valivého tření je tedy důsledkem nepružného charakteru deformace kuličky (válečku) a povrchu ložiska v okolí jejich vzájemného kontaktu. Vztah pro sílu valivého tření má tvar

$$T_v = \frac{\mu_v}{r} N \quad (4.4)$$

$\mu_v$  je koeficient valivého tření,  $r$  je poloměr kuličky a  $N$  je kolmý tlak, který na ni působí. Hodnota koeficientu valivého tření  $\mu_v$  je vždy menší, než je koeficient smykového tření viz. tabulka 2:

Tabulka 2: Koeficienty valivého tření. Převzato z [9]

Materiály	Koef. val. tření [ $\mu_v$ ](cm)
Tvrdé dřevo na tvrdém dřevě	0,05
Ocel na oceli	0,005
Ocelové kuličky v ložisku	0,0005 - 0,001

Z tabulky vyplývá, že je ideální, pokud možno převést suché resp. smykové tření na tření valivé.

## 5 Viskozita a Newtonův zákon

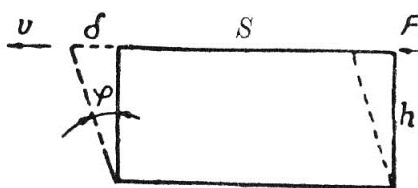
Newtonův zákon o vnitřním tření kapalin uvádí, že smykové napětí v libovolném místě kapaliny je přímo úměrné *rychlosti* smykového přetvoření. Vnitřní tření kapalin je tím srovnáváno s usmyknutím pevné hmoty, jeho velikost roste podle Hookova zákona úměrně s velikostí přetvoření, zatím co smykové napětí v kapalině je úměrné rychlosti přetvoření. Toto je velmi zásadní a důležitý rozdíl. Platí

$$\sigma = konst \cdot R \quad (5.1)$$

kde  $\sigma$  je smykové napětí v kapalině a  $R$  je rychlost smyku.

Smyková přetvoření vznikají podobně jako u pevných těles, zatím co u pevných těles se zajímáme o velikost přetvoření, u kapalin sledujeme rychlost přetvoření.

Obdélníková částice kapaliny [obr.32] je z polohy, která je znázorněná plnou čarou přetvořená do polohy čárkované, bez zrychlení. Na horní plochu  $S$  působí tečná (smyková) síla  $F$ . Po dosažení rovnováhy v čárkovaném tvaru je síla  $F$  v rovnováze s ostatními silami (vnitřními), které nejsou zakresleny. Částice je vysoká  $h$ ; horní povrch  $S$  se posunul proti spodnímu rychlostí  $v$  o vzdálenost  $\delta$ . Částice kapaliny se neotáčí jako celek, úhel posunutí  $\varphi$  má  $\text{tg } \varphi = \frac{\delta}{h}$ . Rychlost smyku  $R$  je úměrná gradientu rychlosti  $\frac{v}{h}$  (to je přírůstku rychlosti v jednotkové vzdálenosti).



Obrázek 32: Obdélníková částice kapaliny. Převzato z [15]

U pružných těles, namáhaných smykem platí Hookův zákon, který praví, že po dosažení rovnováhy je smykové napětí  $\tau = \frac{F}{S} = konst \cdot \frac{\delta}{h}$ . U kapalin **Newtonův zákon** praví, že po dosažení rovnováhy je smykové napětí  $\sigma = \frac{F}{S} = konst \cdot \frac{v}{h}$ . Konstanta v Hookově zákoně je modul pružnosti ve smyku a značíme ji  $G$ . Konstanta v Newtonově zákoně se jmenuje dynamický součinitel viskozity, nebo-li **viskozita**, značí se  $\eta$ . Newtonův zákon má pak tvar

$$\sigma = \eta \cdot R; \quad \eta = \frac{\sigma}{R}. \quad (5.2)$$

Při lineárním rozdělení rychlosti  $R = \frac{v}{h}$ , dosazením do vzorce dostáváme

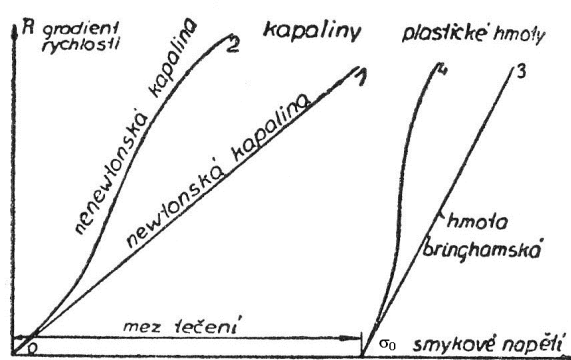
$$\sigma = \frac{F}{S} = \eta \cdot \frac{v}{h}; \quad F = \eta \cdot F \cdot \frac{v}{h}. \quad (5.3)$$

Z této rovnice se dá určit síla  $F$  a dostáváme vzorec *vnitřního tření*. Není-li rozdělení rychlosti lineární, nutno místo  $\frac{v}{h}$  dát jenom poměr diferenciálů

$$F = \eta \cdot S \cdot \frac{dv}{dh}. \quad (5.4)$$

Velmi četné zkoušky prokázaly, že pro praktické úlohy (tření v ložiskách) Newtonův zákon dobře vyhovuje, pokud nejsou poměry příliš abnormální.

Nanášíme-li v diagramu zjištěné hodnoty, dostáváme křivky nebo čáry [obr.33]. Procházejí-li počátkem (1, 2), považujeme zkoušenou látku za kapalinu, neprocházejí-li počátkem (3, 4), považujeme látku za plastickou pevnou hmotu, která začíná téci teprve po dosažení meze tečení  $\sigma_0$ . Tak jako rovná čára u kapalin značí kapalinu *newtonskou*, značí rovná čára u plastické hmoty hmotu *bringhamskou*<sup>1</sup>.



Obrázek 33:  $R$ - $\sigma$  diagram. Převzato z [15]

## 5.1 Metody měření viskozity

Pro měření viskozity se nejčastěji používají viskozimetry průtokové, pádové a rotační. Pravdou je, že pouze rotační a speciální kapilární viskozimetry umožňují charakterizovat tokovou křivku nenewtonských kapalin. Pro správné měření je podmínka taková, že proudění musí být laminární v celém svém rozsahu měření. Dalším faktorem, který musí být splněn je dobře definovaná geometrie toku právě v případě nenewtonských kapalin.

Kromě těchto výše popsaných viskozimetrů, existuje nepřeborná řada přístrojů, které lze použít pro hodnocení konzistence určitých výrobků za určitých standartních podmínek. Tyto přístroje jsou pak většinou kalibrovány newtonskou kapalinou. Hodnoty naměřené na těchto přístrojích nám dávají cenné informace o změně vlastnosti určitého produktu, ale na obecná měření není vhodné je používat.

<sup>1</sup>Na počest prof. Bringhamy, který vydal velký spis právě o tekutosti a plasticitě

### 5.1.1 Pádové (tělískové) viskozimetry

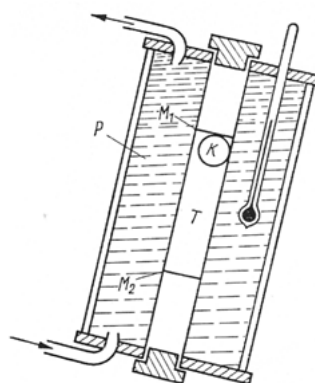
Princip měření těchto přístrojů je založen na měření rychlosti pádu tělíška známých parametrů (obvykle koule) v kapalině, jejíž viskozitu chceme právě určit. Podle Stokesova zákona pro rychlost pádu platí vztah

$$v = \frac{F}{6\pi \cdot \eta \cdot r}; \quad F = \frac{3}{4}\pi \cdot r^3 \cdot (\varrho - \varrho_0) \cdot g \quad (5.5)$$

kde  $\varrho$  a  $\varrho_0$  jsou hustoty kapaliny a tělíška,  $r$  je poloměr tělíška. Pro určení viskozity se používá vztah

$$\eta = \frac{2g}{9} \cdot \frac{r^2}{v} (\varrho - \varrho_0). \quad (5.6)$$

Mezi nejjednodušší viskozimetry patří viskozimetr Stokesův, dále to může být technický viskozimetr Höpplerův v němž padá kulička skleněnou trubicí, jejíž průměr je malinko větší než průměr kuličky a která je skloněná o  $10^\circ$  od vertikály [obr.34].



Obrázek 34: Schéma Höpplerova kuličkového viskozimetru. T - trubice naplněná zkoumanou kapalinou;  $M_1, M_2$  - rýsky; K - kulička. Převzato z [17]

V obou případech, ať se už jedná o viskozimetr Stokesův či Höpplerův je měření viskozity převedeno na měření doby pádu kuličky. Výměnou kuličky lze zjistit zda-li viskozita závisí na gradientu rychlosti či nikoliv tzn. zda je námi zkoumaná kapalina newtonská či nikoliv.

Pro měření kapalin s velkou viskozitou byly vyvinuty reoviskozimetry s tlačnou kuličkou v nichž je kulička protlačována vzorkem umístěným ve válcovité nádobě při definovaném zatížení, které je možno měnit. Tímto způsobem lze zjistit i tokovou charakteristiku neneutonské kapaliny.

### 5.1.2 Průtokové viskozimetry

Měření těmito viskozimetry je založeno na Poisseulově rovnici pro laminární výtok kapaliny z kolmé trubice kruhové průřezu

$$\eta = \frac{\pi \cdot r \cdot h \cdot \rho \cdot g \cdot t}{8V \cdot l} \quad (5.7)$$

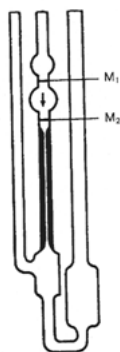
kde je  $r$  - poloměr trubice,  $l$  - délka trubice,  $h$  - výška sloupce kapaliny,  $\rho$  - hustota kapaliny,  $g$  - tíhové zrychlení,  $t$  - doba toku,  $V$  - objem vyteklé kapaliny.



Chceme-li, aby proudění bylo laminární musíme užívat při nízkých viskozitách kapilární trubice. Ve skutečnosti se měření neprovádí absolutně, ale relativně na bázi porovnání s referenční kapalinou, mající známou viskozitu  $\rho_0$  např. dle vztahu

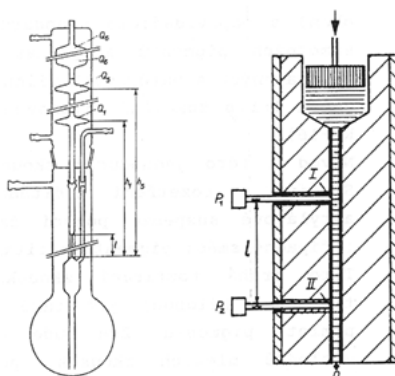
$$v = \frac{t}{t_0} v_0 \quad (5.8)$$

kde  $t$  a  $t_0$  jsou doby výtoku zkoumané a porovnávací kapaliny. Mezi nejznámější typy patří viskozimetr Englerův, Ostwaldův, Kohlův a Ubbelohdeův [obr.35].



Obrázek 35: Ubbelohdeův viskozimetr. Převzato z [17]

Další skupinou průtokových viskozimetrů, jsou viskozimetry s nastavitelným tlakovým spádem [obr.36], které se používají pro měření tokových křivek nenewtonských kapalin.



Obrázek 36: Schéma viskozimetrů s nastavitelným tlakovým spádem. Převzato z [17]

Přímo měřitelné jsou pak objemový průtok  $V$  a tlakový spád  $\Delta p$  na měrné kapiláře s poloměrem  $R$  a délkou  $l$ . Z těchto hodnot lze vypočítat konzistenční proměnné  $\tau_s$ ,  $D_s$  a zdánlivou viskozitu podle vztahů

$$\tau_s = \frac{\Delta p \cdot R}{2l} \quad (5.9)$$

a

$$D_s = \frac{4V}{\pi \cdot R^3} \quad (5.10)$$

podílem těchto dvou rovnic dostáváme potřebný vztah pro viskozitu

$$\eta = \frac{\tau_s}{D_s} = \frac{2\Delta p \cdot V}{\pi \cdot l \cdot R^2}. \quad (5.11)$$

Různou výškou sloupce měrné kapaliny, tlakem inertního plynu, nebo zatěžovaným pístem lze docílit potřebného tlakového spádu. Měříme objemový průtok (typičtější, méně náročnější) nebo tlakový spád (náročnější protože vyžaduje spolehlivé objemové dávkování se stálým výkonem). Přesnost takového měření poté závisí v prvé řadě na výběru správné kapiláry se správně určenými parametry a na měření tlakového rozdílu.

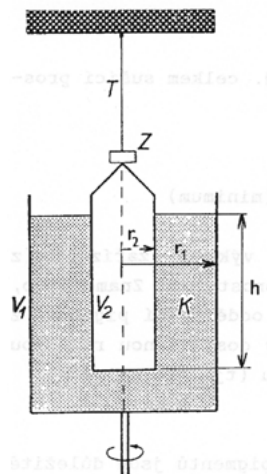
Přímým výsledkem měření na kapilárním viskozimetru je soustava hodnot tlakového spádu a k němu příslušného objemového průtoku. První zpracování měření se provádí výpočet konzistenčních proměnných  $\tau_s$  a  $D_s$  a nakreslení tokové křivky (reogramu). V závislosti na jejím tvaru zvolíme způsob interpolace tokové křivky některou rovnicí toku. U kapalin pseudoplastických a dilatantních lze zpravidla použít jednoduchou mocninnou rovnici, z které po integraci pro trubici kruhového lze odvodit rovnici

$$\tau_s = \frac{K \cdot (3n + 1)^n}{4n} \cdot D_s \quad (5.12)$$

která v logaritmických souřadnicích dá lineární závislost mezi  $\tau_s$  a  $D_s$  jejíž směrnice přímo poskytne index toku  $n$ . Z úseku na ose souřadnic pak můžeme zjistit i hodnotu  $K$ .

### 5.1.3 Rotační viskozimetry

U těchto typů je zkoumaný vzorek podrobován smyku mezi dvěma definovanými plochami, jedna z nich koná rotační pohyb a přitom se vyhodnocuje brzdňý účinek vzorku při různých rychlostech rotace. Nejběžnější druh rotačního viskozimetru s dvěma souosými válci  $V_1$  a  $V_2$ , mezi kterými je měrná kapalina  $K$ , je schematicky znázorněn na [obr.37].



Obrázek 37: Schéma základního typu uspořádání rotačního viskozimetru. Převzato z [17]

Jeden z těchto válců (v našem případě válec vnější) se při měření uvede do rotace stálou úhlovou rychlostí  $\omega$  a zaznamenává se moment síly  $M$ , který přitom působí na vnitřní válec  $V_2$ . V tomto případě se měří stočení torzního vlákna  $T$ , na kterém je zavěšen válec  $V_1$  metodou pomocí světelného paprsku odraženého zrcátkem  $Z$ .

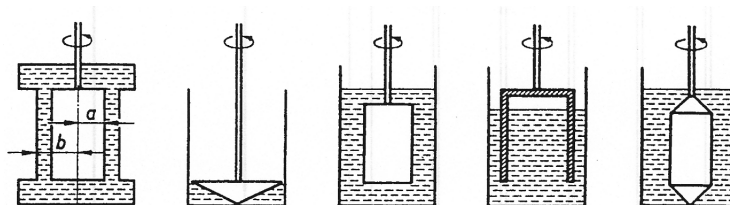
Nechť jsou poloměry válců  $r_1$  a  $r_2$  a výška smýkané vrstvy  $h$ , lze vypočítat viskozitu dle vztahu

$$\eta = \frac{M \cdot \left(\frac{l}{r_1^2 - r_2^2}\right)}{4\pi \cdot h \cdot \omega} = A \frac{M}{\omega} \quad (5.13)$$

kde  $A$  je přístrojová konstanta. Tento vztah byl odvozen za předpokladu stabilního laminárního toku ve štěrbině (Couetteův tok) a při zanedbání koncových a hranových efektů, pro jejich potlačení byla navržena celá řada korekcí. Jisté problémy přináší také skutečnost, že v různých bodech měřené kapaliny ve válcové mezeře je odlišná rychlost smykové deformace (obvykle 20% mezi oběma povrchy). V další řadě je nutno počítat s ohříváním vzorku během měření, které roste s viskozitou a rychlostí otáčení.

Rotačním viskozimetrem tedy snadno získáme hodnoty napětí  $\tau \sim M$  pro různé hodnoty rychlostního gradientu  $D$ , jehož hodnota je dána rychlostí otáčení a poloměrem válců (hodnoty jsou pro každé uspořádání uvedeny v tabulkách).

Celkově můžeme o reometrech se souosými válci říci to, že je k dispozici celá řada komerčních přístrojů nejrůznějšího provedení [obr.38], rozsahů a priorit, z nichž je nutno vybírat vždy dle konkrétních požadavků, vyplývajících hlavně ze stavby a typu viskozitní anomálie měřené kapaliny.



Obrázek 38: Různé úpravy měrného prostoru rotačních viskozimetrů. Převzato z [17]

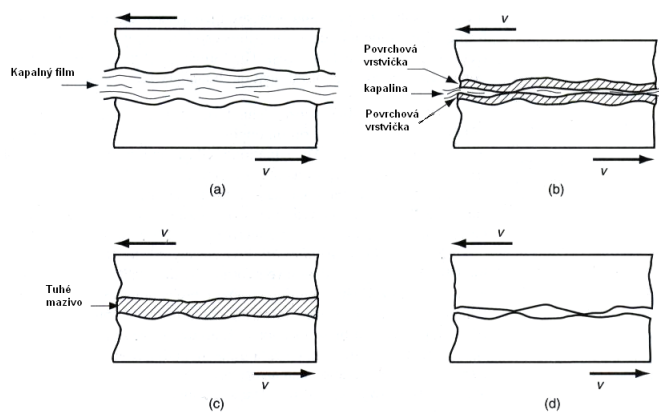
Namísto dvou souosých válců se poměrně často používá uspořádání kužel - deska, toto uspořádání se hodí pro více viskoznější kapaliny. V obou případech se měřená kapalina dává do úzké šterbiny mezi dvě plochy, tudíž není potřeba velké množství kapaliny ( $\sim 0,1$  ml). Celý vzorek je podroben konstantní rychlosti smykové deformace a jsou zde potlačeny krajové a koncové efekty. Chlazení vzorku je v důsledku velké chladičí plochy a tenké vrstvy velmi účinná. Nevýhoda tohoto zařízení: omezená použitelnost pro suspenze a disperze.

Rotačním viskozimetrem podle obr.37 lze stanovit viskozitu také tím způsobem, že necháme vnitřní válec konat torsní kmitů uvnitř stojícího vnějšího válce. Poté se o hovoří o viskozimetru torzním. Viskozita se určí měřením útlumu kmitů kmitajícího válce.

## 6 Maziva a mazání

Poměrně velké vnější tření suché (smykové) hledíme nahradit vnitřním třením kapalin úpravou mazáním. Mazáním může být libovolná tekutina nebo i prášková forma. Způsoby mazání lze rozdělit do tří skupin:

- A) **Vytvoření tenkého kapalného filmu.** Ideální případ tohoto mazání je tehdy, když obě třecí plochy jsou vzájemně od sebe odděleny tenkou vrstvou vhodné kapaliny. Přestože je vrstvička opravdu tenká, stále je v poměru vůči drsnotem ploch daných materiálů mnohem větší. Koeficient tření  $\mu$  je pak dán vlastností mazací kapaliny jako je viskozita  $\eta$ . V tomto případě hovoříme o tzv. *hydrodynamickém mazání*.
- B) **Vytvoření povrchové vrstvičky.** Tento způsob mazání provedeme tak, že vytvoříme povrchové vrstvičky na obou třecích plochách tak, aby nedocházelo ke vzájemnému kontaktu kovů. Zmíněné vrstvičky jsou vytvořeny pomocí adsorpce různých maziv (minerální či rostlinné oleje, tuky, mýdla apod.). Mazání pomocí povrchové vrstvičky se používá většinou při nižších teplotách a tlacích. Pokud chceme touto cestou mazat i za vyšších teplot a tlaků je nutno přidat tzv. *aditiva* (fosfor, chlor, síra). Tímto vzniknou poměrně pevné vrstvičky, které mají vysokou teplotu tání a zároveň brání přímému styku kovů navzájem.
- C) **Mazání tuhými mazivy.** Tuhá maziva se uplatňují v případech, kdy běžná kapalná či plastická maziva svými vlastnostmi již nepostačují. Obvykle jde zejména o mazání strojních dílů za vysokých tlaků, případně vysokých teplot, časté bývá i použití tuhých maziv pro účely technologické nebo jako zušlechťujících komponent plastických i kapalných maziv. Řadíme mezi ně grafit, síran molybdenu a teflon. Aplikace těchto látek je v podobě prášku, který přilne k oběma plochám.



Obrázek 39: Základní principy mazání: a) hydrodynamické, b) pomocí adsorbovaných tenkých vrstviček, c) pomocí tuhých maziv, d) suché tření. Převzato z [9]

## 6.1 Speciální maziva

V dnešní době máme k dostání nepřehledné množství olejů, tuků apod., které nám poslouží k namazání třecích ploch. Přesto však existuje několik speciálních mazadel, které je nejvhodnější použít na konkrétní typ materiálu resp. dvojice materiálů.

Prvním příkladem takových typických materiálů je třecí plocha mezi pístními kroužky a válci ve spalovacích motorech. Nejefektivnějším mazadlem se ukázalo být Zincdialkyldithiofosfát (**ZDDP**). To našlo použití jako protiotěrové aditivum na bázi fosforu a zinku, které má pozitivní vliv na životnost a opotřebení mechanických součástí.

Dalším mazivem, které našlo své konkrétní uplatnění je perfluorinated polyether (**PFPE**). Sloučeniny těchto olejů tvoří pouze uhlík, fluor a kyslík. Díky velmi stabilním vazbám jsou tyto oleje vysoce tepelně stabilní a téměř inertní vůči oxidaci a chemické degradaci. PFPE oleje jsou použity všude tam, kde jsou těžké provozní podmínky, vysoký obsah kyslíku nebo vysoce reaktivní chemikálie, pro čerpání vysoce reaktivních látek jako je kyslík, fluór, hexafluorid uranu apod. Jsou také odolné tzv. Lewisovým kyselinám, avšak při teplotách vyšších než  $100^{\circ}\text{C}$  nejsou zcela inertní.

## 6.2 Typy maziv a jejich vlastnosti

- A) Minerální oleje:** Vyrábí se destilací a rafinací ze surové ropy - je to vedlejší produkt při výrobě benzínu. Výsledný produkt se poté upravuje a probíhá procesem aditivace. Minerální oleje se většinou neskládají z definované sloučeniny, ale je to směs více složitých sloučenin. Minerální oleje jsou tepelně a chemicky dostatečné pro většinu aplikací. Mají vysoký stupeň kompatibility s elastomery a vysokou odolnost vůči hydrolýze.
- B) Rostlinné oleje a tuky:** Jak už název napovídá jsou vyráběny z rostlin a zvířat resp. zvířecích tuků. Tento typ maziv se začal používat mezi prvními. Radíme k nim i mýdla, tuky, vosky a mastné kyseliny. Mají tu výhodu, že jsou ekologické.
- C) Syntetické oleje:** Tyto oleje jsou produkty chemických reakcí a je nutno použít je všude tam, kde fyzikální a chemické vlastnosti minerálních olejů již nejsou dostačující. Používají se za vysokých teplot.
- D) Složená maziva:** Složená maziva, nejsou nic jiného než minerální oleje doplněné o *aditiva*, kterými mohou být:
- sloučeniny fosforu, síry a chlóru
  - pevné látky, jako např. grafit
  - přísady zamezující pění
  - přísady proti množení bakterií a jiných organismů
- E) Maziva na vodní bázi:** Jak už název napovídá hlavní roli zde hraje voda. Jelikož voda sama o sobě je velice špatné mazivo, musíme do ní přidat vhodné látky jako např. olej a nebo speciální chemikálie rozpustné ve vodě. Voda má velkou výhodu a to, že má velice dobré chladič schopnosti.
- F) Povrchové vrstvy.** Povrchy třecích ploch lze pokrýt například:

- kovy (zinek, cín)
- polymery (teflon)
- skly (používají se při vysokých teplotách)

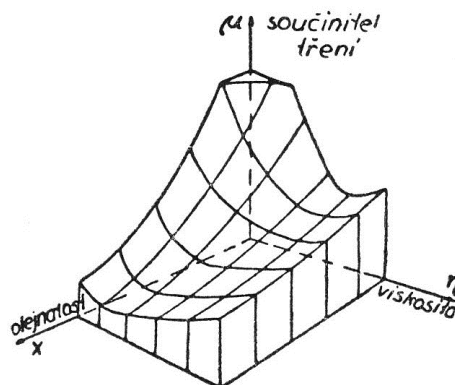
### 6.3 Olejnatost

Může se stát, že dva oleje mají stejnou viskozitu a přece když jimi namažeme totéž ložisko, je tření velmi odlišné. Říkáme, že mají různou **olejnatost**. Tato vlastnost posuzuje jen třecí vlastnosti oleje, není měřítkem opotřebení ani nanášení. Řekneme-li, že sádlový olej má větší olejnatost než olej minerální o stejné viskozitě, znamená to jen, že při mazání sádlovým olejem bude menší tření, bez ohledu na ostatní vlastnosti (zde se lépe hodí k mazání, zda je při jeho použití menší opotřebení atd.).

Olejnatost posouvá bod nejnižšího součinitele tření na křivce směrem k menší viskozitě, nižší rychlosti a většímu zatížení. Olejnatost má zvláště význam u malých pracovních rychlostí vysokých plošných tlaků (tedy např. při rozbíhání, brždění, mazání při strojním obrábění, u ozubených kol aj.), v takových případech je mazání nedokonalé a olejnatost je jedinou okolností, podle níž se dá posoudit, jak se mazáním sníží tření.

Teoreticky je olejnatost vykládána mnoha způsoby. Nejblíže pravdě je teorie, která tvrdí, že olejnatost je způsobena tzv. *selektivní adsorpcí*, ta nám udává jestli povrch kovu přitahuje některé částice maziva méně a některé více a z těchto si pak tvoří ochrannou vrstvu. Nejméně se třou plochy mezi dvojitou vrstvou molekul oleje, která je co možná kompaktní. Určité molekuly, které se vyskytují v olejích s velkou olejnatostí, dobře tvoří výrazné kluzné vrstvy (plochy). Tohle uspořádání se dá zjistit rentgenem a nazývá se *stratifikace* nebo *regimentace*.

Přibližně by se mohl vztah mezi olejnatostí, viskozitou a součinitelem tření znázornit na obrázku 40.



Obrázek 40: Graf znázorňující vztah mezi olejnatostí, viskozitou a součinitelem tření. Převzato z [15]

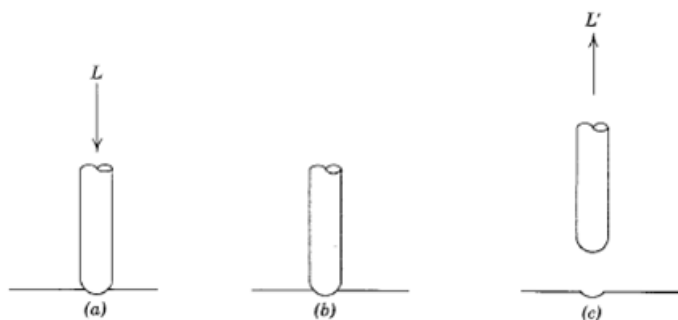
Můžeme mít nejhvodnější viskozitu, odpovídající nejmenšímu tření na křivce  $\mu, \eta$ , není však minimální bod této křivky. Olejnatost není vlastností kapalin, bývá také nesprávně vykládána vlivem molekulárních sil. Molekulární síly působí v dosahu, rovném asi průměru molekuly, zatím co nejtenčí olejová vrstva v praxi má 0,001 mm, což je 10000krát tlustší než průměr molekuly. Molekulární síla, může nanejvýš vyvolat přilnavost jedné vrstvy na povrch.



## 7 Přilnavost (Adheze)

Přilnavost nebo-li adheze je jev, který nastává když tlačíme dva povrchy (materiály) proti sobě. Následně zkoumáme tahovou sílu, která je zapotřebí k oddělení těchto dvou materiálů [obr.41]. Poměru tlakové síly  $L$  a tahové síly  $L'$ , která je potřebná k odtrhnutí říkáme **součinitel přilnavosti**  $f'$ :

$$f' = \frac{L'}{L}. \quad (7.1)$$



Obrázek 41: Schéma přilnavosti: a) působení tlakové síly, b) konec působení tlakové síly, c) působení tahové síly. Převzato z [5]

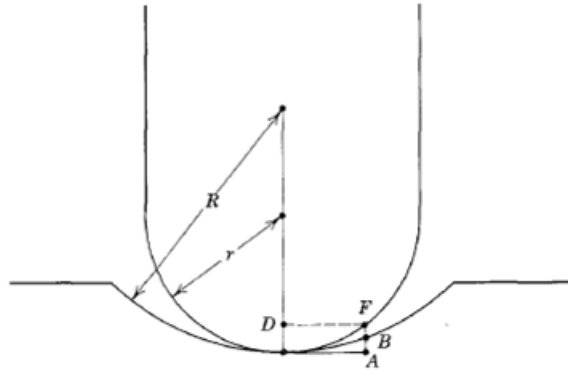
Z důvodu malého výskytu běžných materiálů, které podléhají jevu přilnavosti (plastelína, žvýkačka) pohlížíme na přilnavost jako na *neobvyklý* jev. Zejména kvůli třem faktorům nastává tento jev velice zřídka, jsou to:

- malá hodnota skutečné styčné plochy
- tendence znečišťování povrchů materiálů
- existence pružných sil, které mají tendenci k přerušení přilnavosti

Všechny výše uvedené faktory napomáhají zmenšit efekt přilnavosti, zejména poslední faktor má na tom největší podíl.

Nechť vtlačujeme kulovitý konec jezdec proti rovinné ploše, přičemž po chvíli tlačít přestaneme. Tvar rovinné plochy je zobrazen na obrázku 42, kdy se kulovitý jezdec vtisknul do rovinné plochy a částečně ji zdeformoval. Jakmile přestaneme tlačít na jezdec, přestane působit i síla, která tiskne jezdec do materiálu. Poté začne působit elastické napětí, které změní poloměry zakřivení a styčná plocha se výrazně zmenšuje.

Uvažme jednoduchý příklad. Jezdec z oceli o poloměru  $3\text{ mm}$  je stlačený  $1\text{ kg}$  závažím proti rovinné ploše. Předpokládejme, že paprsek zakřivení plochy po sundání závaží je  $6\text{ mm}$ . Následně lze spočítat zbytkovou styčnou plochu, jejíž velikost je přibližně  $3 \cdot 10^{-8}\text{ cm}$  [obr.42].



Obrázek 42: Styčná plocha po odstranění kilogramového závaží. Převzato z [5]

$$AF = \frac{DF^2}{2r} = \frac{DF^2}{0,6cm}, \quad (7.2)$$

$$AB = \frac{DF^2}{2R} = \frac{DF^2}{1,2cm}, \quad (7.3)$$

$$AF - AB = 3 \cdot 10^{-8}cm = \frac{DF^2}{1,2cm}. \quad (7.4)$$

Pak dostaneme  $DF = 1,9 \cdot 10^{-4}cm$ , a zbytek plochy je roven  $A' = 1,1 \cdot 10^{-7}cm^2$ .

Pokud známe tvrdost oceli, popřípadě jiného použitého materiálu a počítáme s tím, že zbytková plocha je velice odolná vůči zlomení (jak je u plastické deformace v tahu), lze použít vztah

$$L' = A'p. \quad (7.5)$$

Z výše uvedeného vztahu zjistíme, že síla která je potřebná k přerušení přilnavosti není nijak velká, ba naopak. Následně lze vypočítat koeficient přilnavosti  $f'$

$$f' = \frac{L'}{L} = \frac{pA'}{L} = 0,002 \quad (7.6)$$

ze vztahu vyplývá, že koeficient přilnavosti  $f'$  je *nepřímo úměrný* tlakové síle  $L$ .

Malá vrstvička nečistot značně redukuje koeficient přilnavosti. Při vysokém zatížení může nastat případ, kdy vrstvička nečistot bude přerušena a tím bude zvýšen koeficient přilnavosti. Naopak při lehčím zatížení je vrstvička zcela účinná. Ať tak nebo onak může přítomnost nečistot sama způsobit efekt přilnavosti. Tento případ nastává, jestliže znečišťující látkou je kapalina, neboť zde začne působit povrchové napětí nebo viskózní síly.

## 7.1 Přilnavost pneumatiky

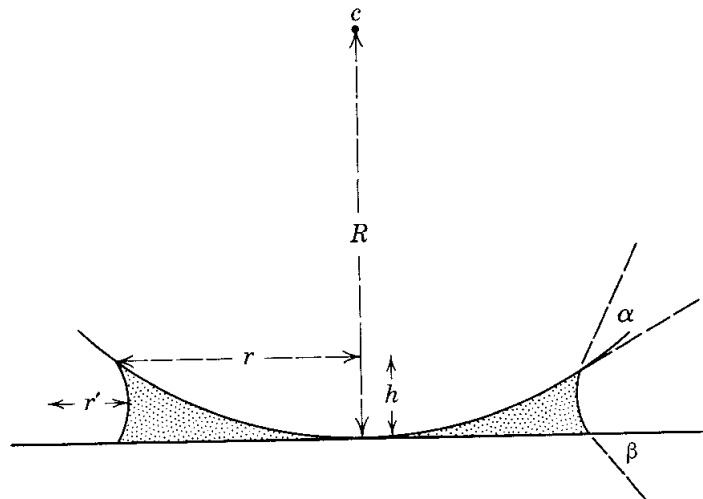
Přilnavost pneumatik k vozovce na mokřém povrchu, tedy pokud je na vozovce voda, klesá. Přilnavost na mokřém povrchu rozdělujeme na Viscoplanning a Aquaplanning.

**Viscoplanning** nastává, pokud se mezi vozovku a pneumatiku dostane tenká vrstva vody, do cca 0,5 mm. Tato vrstva narušuje přilnavost pneumatiky k vozovce na molekulární bázi. Visciplanning často způsobuje smyk vozidla.

**Aquaplanning** nastává, pokud vrstva vody mezi pneumatikou a vozovkou postupně stoupne nad 0,5 mm. „Síla“ Aquaplanningu se zvyšuje společně s vyšší rychlostí vozidla. Voda se při tomto jevu hromadí klínovitě před pneumatikou, až se dostane ve větším množství pod ní. Pneumatika se pak zvedá ze silnice. To nakonec způsobí prodloužení brzdě dráhy a sníží ovladatelnost automobilu.

## 7.2 Přilnavost a povrchové napětí

V případě, kdy polokulovitý jezdec je stlačený proti plošnému povrchu [obr.43] a v místě vzájemného dotyku obou těles je kapalina, nastanou účinky povrchového napětí. Právě tyto účinky budou tisknout (tlačit) oba povrchy k sobě.



Obrázek 43: Kapka kapaliny v oblasti styčné plochy. Převzato z [5]

Přilnavost  $L'$  lze v případě vyznačeném na obrázku zapsat vztahem

$$L' = \frac{\pi r^2 \gamma}{r'}, \quad (7.7)$$

kde  $r'$  je poloměr zakřivení a  $\gamma$  je povrchové napětí.

Jestliže je množství kapaliny tak malé, že její vrchní a spodní plochy lze považovat za rovnoběžné dostáváme vztah

$$r' = \frac{h}{\cos \alpha + \cos \beta}, \quad (7.8)$$

kde  $\alpha$  je úhel mezi kapalinou a vrchní částí plochy, zatímco  $\beta$  je úhel mezi kapalinou a spodní částí plochy. Geometrickou úvahou lze psát  $r^2 = 2Rh$ .

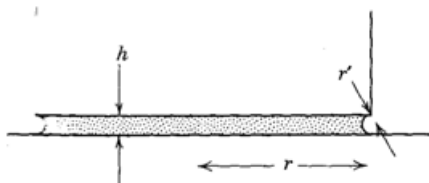
Kombinací předchozích rovnic je vztah

$$L' = \pi R \gamma (\cos \alpha + \cos \beta). \quad (7.9)$$

Tato rovnice nám ukazuje, že přilnavost <sup>2</sup> není závislá na množství kapaliny mezi styčnými plochami, protože parametr  $r'$  není vyjádřením pro  $L'$ .

Pro dva ploché materiály, které jsou zobrazeny na obrázku 44 je přilnavost následující:

$$L' = \frac{\pi r^2 \gamma (\cos \alpha + \cos \beta)}{h}. \quad (7.10)$$



Obrázek 44: Dva ploché materiály oddělené tenkým kapalným filmem. Převzato z [5]

<sup>2</sup>Kapitola č. 7 a podkapitola č. 7.2 - vlastní překlad z [5]

## 8 Měření koeficientu tření

Kapitola měření koeficientu tření je uvedena v práci kvůli ověření resp. porovnání tabulkových hodnot, s hodnotami mnou naměřenými. Koeficient tření  $\mu$  lze určit z různých experimentů a metod, některé jsou jednoduché některé pak více či méně složitější. Provedená metoda měření tohoto koeficientu  $\mu$  je jednodušší a pro výpočet je potřeba jen několik základních vztahů, které pro tření platí. Výsledky budou zapsány do tabulek a porovnány s hodnotami, které uvádí odborné literatury. Jedná z takovýchto tabulek je i v této práci v kapitole č. 4.2 Smykové tření.

### Pomůcky k měření

Siloměr, kovový hranol z jedné, největší plochy vyleštěný, dřevěný hranol, hranol z pryže, dřevěná deska, kovová deska z jedné největší plochy vyleštěná, mýdlo, olej, voda, beton, asfalt.

### Pracovní postup

1. Dřevěný hranol, položíme na dřevěnou desku. Díky háčkům v hranolku upevníme siloměr. Měříme sílu  $\mathbf{F}$  potřebnou k udržení hranolku v rovnoměrně přímočarém pohybu.
2. Hodnoty síly  $\mathbf{F}$  zapisujeme do tabulky. Tuto sílu  $\mathbf{F}$  měříme pětkrát a z každého jednotlivého měření poté vypočítáme koeficient tření dle vztahu:  $\mu = \frac{F}{G}$ . Ze všech vypočítaných koeficientů poté vypočítáme aritmetický průměr. Tento průměr nám určuje koeficient tření pro danou dvojici materiálů. Odečítáním jednotlivých naměřených hodnot od průměru získáme odchylky z nichž opět určíme průměrnou hodnotu. Obecně tento výpočet vypadá následovně

$$\Delta\mu = \frac{|\bar{\mu} - \mu_1| + |\bar{\mu} - \mu_2| + \dots + |\bar{\mu} - \mu_n|}{n}. \quad (8.1)$$

Dále vypočítáme relativní odchylku a to dle vztahu

$$\delta\mu = \frac{\Delta\mu}{\bar{\mu}} \cdot 100\%. \quad (8.2)$$

3. Po provedení výše uvedených měření a vypočtení koeficientu tření, zaměníme jeden z dvojici materiálů, nebo dokonce oba materiály. Každá dvojice materiálů, bude vždy uvedena v jednotlivých měření. Po záměně materiálů postup č. 2 opakujeme. Nakonec naměřené a vypočtené hodnoty srovnáme s hodnotami tabulkovými a učiníme závěr.

## 8.1 Zpracování vlastního měření

Pro následující měření bude tíhové zrychlení  $g = 9,81 m s^{-2}$ .

$$G = m \cdot g$$

V následujících tabulkách budou použity tyto symboly:

$F$  - síla potřebná k udržení tělesa v rovnoměrném pohybu

$\mu$  - koeficient tření

$\Delta\mu$  - odchylka měření

$\delta\mu$  - relativní odchylka měření

### 8.1.1 Dvojice materiálů dřevo - dřevo (suché)



Obrázek 45: Dvojice materiálů dřevo - dřevo (suché)

Pro  $G = 0,77N$

Číslo měření	$F[N]$	$\mu$	$ \Delta\mu $
1	0,12	0,1548	0,0025
2	0,13	0,1677	0,0154
3	0,10	0,1290	0,0233
4	0,11	0,1419	0,0104
5	0,13	0,1677	0,0154
Průměrné hodnoty $\bar{\mu}$		<b>0,1523</b>	<b>0,0134</b>

$$\mu = 0,1523 \pm 0,0134$$

$$\delta\mu = 8,80\%$$

### 8.1.2 Dvojice materiálů dřevo - dřevo (namydlené)



Obrázek 46: Dvojice materiálů dřevo - dřevo (namydlené)

Pro  $G = 0,77\text{N}$

Číslo měření	$F[\text{N}]$	$\mu$	$ \Delta\mu $
1	0,10	0,1299	0,0026
2	0,09	0,1169	0,0104
3	0,10	0,1299	0,0026
4	0,11	0,1429	0,0156
5	0,09	0,1169	0,0104
Průměrné hodnoty $\bar{\mu}$		<b>0,1273</b>	<b>0,0083</b>

$$\mu = 0,1273 \pm 0,0083$$

$$\delta\mu = 6,52\%$$

### 8.1.3 Dvojice materiálů kov - dřevo (suché)



Obrázek 47: Dvojice materiálů kov - dřevo (suché)

Pro  $G = 7,75\text{N}$

Číslo měření	$\mathbf{F}[\text{N}]$	$\mu$	$ \Delta\mu $
1	2,30	0,2968	0,0047
2	2,50	0,3226	0,0305
3	2,20	0,2839	0,0082
4	2,20	0,2839	0,0082
5	2,12	0,2735	0,0186
Průměrné hodnoty $\bar{\mu}$		<b>0,2921</b>	<b>0,0140</b>

$$\mu = 0,2921 \pm 0,0140$$

$$\delta\mu = 4,80\%$$

#### 8.1.4 Dvojice materiálů kov - dřevo (namazáno)



Obrázek 48: Dvojice materiálů kov - dřevo (namazáno)

Pro  $G = 7,75\text{N}$

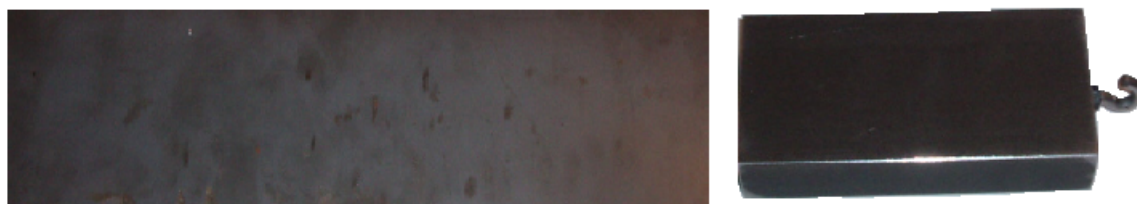
Číslo měření	$\mathbf{F}[\text{N}]$	$\mu$	$ \Delta\mu $
1	1,60	0,2065	0,0039
2	1,50	0,1935	0,0091
3	1,50	0,1935	0,0091
4	1,60	0,2065	0,0039
5	1,65	0,2129	0,0103
Průměrné hodnoty $\bar{\mu}$		<b>0,2026</b>	<b>0,0072</b>

$$\mu = 0,2026 \pm 0,0072$$

$$\delta\mu = 3,55\%$$



### 8.1.5 Dvojice materiálů kov - kov (suché)



Obrázek 49: Dvojice materiálů kov - kov (suché)

Pro  $G = 7,75\text{N}$

Číslo měření	$F[\text{N}]$	$\mu$	$ \Delta\mu $
1	1,50	0,1936	0,0051
2	1,60	0,2065	0,0078
3	1,40	0,1806	0,0181
4	1,60	0,2065	0,0078
5	1,60	0,2065	0,0078
Průměrné hodnoty $\bar{\mu}$		<b>0,1987</b>	<b>0,0093</b>

$$\mu = 0,1987 \pm 0,0093$$

$$\delta\mu = 4,69\%$$

### 8.1.6 Dvojice materiálů kov - kov (vyleštěno)



Obrázek 50: Dvojice materiálů kov - kov (vyleštěno)

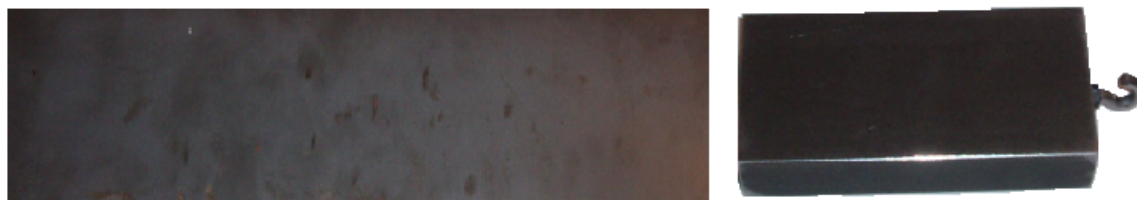
Pro  $G = 7,75\text{N}$

Číslo měření	$\mathbf{F[N]}$	$\mu$	$ \Delta\mu $
1	1,10	0,1419	0,0026
2	1,15	0,1484	0,0039
3	1,10	0,1419	0,0026
4	1,15	0,1484	0,0039
5	1,10	0,1419	0,0026
Průměrné hodnoty $\bar{\mu}$		<b>0,1445</b>	<b>0,0031</b>

$$\mu = 0,1445 \pm 0,0031$$

$$\delta\mu = 2,13\%$$

### 8.1.7 Dvojice materiálů kov - kov (namazáno)



Obrázek 51: Dvojice materiálů kov - kov (namazáno)

Pro  $G = 7,75\text{N}$

Číslo měření	$\mathbf{F[N]}$	$\mu$	$ \Delta\mu $
1	0,75	0,0968	0,0013
2	0,80	0,1032	0,0077
3	0,70	0,0903	0,0052
4	0,75	0,0968	0,0013
5	0,70	0,0903	0,0052
Průměrné hodnoty $\bar{\mu}$		<b>0,0955</b>	<b>0,0041</b>

$$\mu = 0,0955 \pm 0,0041$$

$$\delta\mu = 4,29\%$$

### 8.1.8 Dvojice materiálů dřevo - beton



Obrázek 52: Dvojice materiálů dřevo - beton

Pro  $G = 0,58\text{N}$

Číslo měření	$F[\text{N}]$	$\mu$	$ \Delta\mu $
1	0,23	0,3966	0,0137
2	0,24	0,4138	0,0035
3	0,25	0,4310	0,0207
4	0,25	0,4310	0,0207
5	0,22	0,3793	0,0310
Průměrné hodnoty $\bar{\mu}$		<b>0,4103</b>	0,0179

$$\mu = 0,4103 \pm 0,0179$$

$$\delta\mu = 4,36\%$$

### 8.1.9 Dvojice materiálů pryž - beton



Obrázek 53: Dvojice materiálů pryž - beton

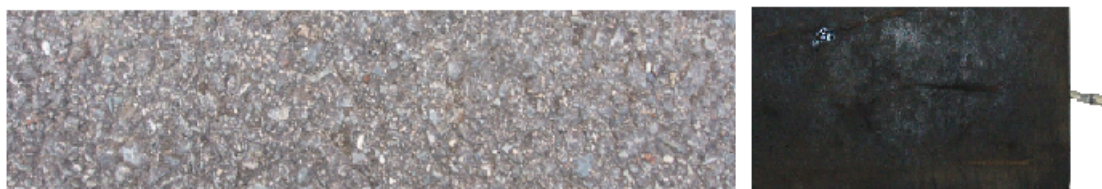
Pro  $G = 1,89\text{N}$

Číslo měření	$\mathbf{F}[\text{N}]$	$\mu$	$ \Delta\mu $
1	1,35	0,7143	0,0095
2	1,48	0,7302	0,0074
3	1,35	0,7143	0,0085
4	1,36	0,7196	0,0032
5	1,40	0,7407	0,0179
Průměrné hodnoty $\bar{\mu}$		<b>0,7238</b>	<b>0,0093</b>

$$\mu = 0,7238 \pm 0,0093$$

$$\delta\mu = 1,12\%$$

### 8.1.10 Dvojice materiálů pryž - suchý asfalt



Obrázek 54: Dvojice materiálů pryž - suchý asfalt

Pro  $G = 1,89\text{N}$

Číslo měření	$\mathbf{F}[\text{N}]$	$\mu$	$ \Delta\mu $
1	1,10	0,5820	0,0000
2	1,05	0,5556	0,0264
3	1,15	0,6085	0,0265
4	1,10	0,5820	0,0000
5	1,10	0,5820	0,0000
Průměrné hodnoty $\bar{\mu}$		<b>0,5820</b>	<b>0,0106</b>

$$\mu = 0,5820 \pm 0,0106$$

$$\delta\mu = 1,82\%$$

### 8.1.11 Dvojice materiálů pryž - mokrý asfalt



Obrázek 55: Dvojice materiálů pryž - mokrý asfalt

Pro  $G = 1,89\text{N}$

Číslo měření	$F[\text{N}]$	$\mu$	$ \Delta\mu $
1	0,90	0,4762	0,106
2	0,90	0,4762	0,106
3	0,85	0,4497	0,159
4	0,85	0,4497	0,159
5	0,90	0,4762	0,106
Průměrné hodnoty $\bar{\mu}$		<b>0,4656</b>	<b>0,0127</b>

$$\mu = 0,4656 \pm 0,0127$$

$$\delta\mu = 2,72\%$$

## 8.2 Závěr měření

Na závěr této kapitoly bych rád shrnul výsledky měření. V prvním případě resp. v prvních čtyřech případech, kdy jsme v našem měření používali jednu a tutéž dřevěnou desku, nám koeficienty tření vycházejí menší, někdy jsou dokonce až poloviční. Tento fakt bych odůvodnil tím, že deska byla ohoblována a tudíž nerovnosti byly odstraněny, tím pádem i koeficient tření musí být menší, jelikož závisí na drsnostech styčných ploch.

Relativně zůstaly ale hodnoty stejné, tzn. suché dřevo na suchém dřevě má koef. tření největší. Když jsme tyto plochy namydlili tak koef. tření klesl. Kov na suchém dřevě měl větší hodnotu  $\mu$  než na dřevě mokrém.

V případech, kdy jsme použili jako materiály kov a kov, se hodnoty už velice přibližovaly k hodnotám v tabulce. Také lze vyzorovat, že při vyleštění ploch těchto kovů, koef. tření opět rapidně klesne.

Při táhnutí pryžového kvádrů po betonu jsme následným výpočtem získali velice podobné resp. stejné hodnoty jako jsou uvedeny v tabulkách. Lze také vyčíst z výše uvedených tabulek, že koef. tření mezi gumou (pryží) a suchým asfaltem je vždy větší, než mezi gumou a asfaltem mokrým.

Tento výsledek nám potvrzuje i skutečnost z praxe známa, tj. na mokré vozovce dostane auto snadněji smyk než na vozovce suché. V případě dřevo - kámen se naše hodnoty téměř nelišily od hodnot v tabulkách. Z výše uvedených skutečností lze považovat naše měření za úspěšné.

Výsledky měření lze považovat za velice přesné. Kromě prvního měření, při kterém nám vyšla relativní chyba poměrně veliká ( $\sim 10\%$ ). Tato chyba byla pravděpodobně způsobena špatnou manipulací se siloměrem v důsledku prvního měření. V následujících měřeních jsme se chybu snažili eliminovat, dle výsledků se nám to podařilo, jelikož je relativní chyba v dalších měřeních poměrně malá ( $< 5\%$ ).

## Závěr

V závěrečné práci Fyzika tření jsme podali odborný teoretický přehled fyzikálního pojmu tření. Další přínos této práce tkví v pracovních listech, které lze použít na základních školách při výuce problematiky tření. Před samotnými pracovními listy jsou v práci uvedeny stěžejní fyzikální pojmy a zákony, které by měli žáci znát ke správnému pochopení samotného tření. V závěru didaktické části jsou uvedeny výsledky testů, ze kterých lze vyčíst, jak děti v některých školách chápou a „ovládají“ fyziku tření. Podle výsledků testů děti příliš tření na základních školách neovládají a právě proto jsem navrhnul pracovní listy pro lepší a efektivnější výuku tohoto fyzikálního pojmu. Dle mého názoru by měli děti tření znát a ovládat, vždyť se s ním chtě nechtě setkávají každý den.

Na konci závěrečné diplomové práce se nachází praktická část. Konkrétně se jedná o měření koeficientu tření mezi různými materiály. Měření je dle výsledků poměrně přesné a tudíž je můžeme považovat za validní. V měření jsme ověřili hodnoty koeficientu tření pro některé dvojice materiálů, které jsme poté srovnali s tabulkovými hodnotami a zjistili, že odchylky jsou minimální. V práci lze také pozorovat využití teorie v praxi, kdy v kapitole č.6 Maziva a mazání je vysvětleno, jak maziva či oleje ovlivňují koeficient tření. Tento fakt je následně ověřen v našem měření.

Jediný problém, který by mohl nastat při tomto měření je obstarání materiálů, ze kterých jsou pomůcky vyrobeny. Ne každý má možnost si vyfrézovat kovový hranol a nebo uříznout hranol pryžový. Proto beru moje měření jako ojedinělé, za daných „domácích“ podmínek. Samozřejmě je možné námi vyrobené měřicí pomůcky využít ve školách pro daná praktická měření a tím rozšířit skupinu běžně používaných materiálů o další, ne tak běžně dostupné. Pro ryze praktickou ukázkou účinku maziv je vhodné zahrnout do měření demonstraci rozdílu měření hodnoty koeficientu tření s a bez použití mazání i na školách. Při měření koeficientu tření, kde používáme ve dvou případech stejné materiály, ale v jednom z měření aplikujeme mazovou vrstvu, můžeme lépe vyhodnocovat a uvědomovat si vliv přidané látky na výsledky měření, než když porovnáváme naměřené hodnoty při použití různých dvojic materiálů. Jedná se patrně o vcelku podrobnější příklad, ale natolik praktický, že jistě za předvedení ve školách stojí. Zároveň považuji svoji práci přínosnou v jejím souhrnném přehledu naměřených hodnot koeficientů tření, který je možno použít místo hodnot tabulkových vzhledem k přesnosti našeho měření.

## Literatura

- [1] JAVORSKIJ, B. M., SELEZNĚV, J. A. *Přehled elementární fyziky*. Praha: SNTL, 1989. ISBN 80-03-00184-6.
- [2] HORÁK, Z., KRUPKA, F. *Fyzika*. Praha: SNTL/ALFA, 1976.
- [3] HLAVIČKA, A., BĚLAŘ, A., KRMEŠSKÝ, J., ŠPELDA, A. *Fyzika pro pedagogické fakulty*. Praha: SPN, 1971.
- [4] ČMELÍK, M., MACHONKSÝ, L., ŠÍMA, Z. *Fyzikální tabulky*. Liberec: TU Liberec, 2001. ISBN 80-7372-009-4.
- [5] RABINOWICZ, E. *Friction and wear of materials, second edition*. USA: 1995. ISBN 0-471-83084-4.
- [6] BOHUNĚK, J., KOLÁŘOVÁ, R., KLOBUŠICKÝ, K., PROCHÁZKOVÁ, E. *Fyzika pro 7. ročník základní školy*. Praha: SPN, 1991. ISBN 80-04-24609-5.
- [7] MARŠÁK, J. *Fyzika pro 7. a 8. ročník základní školy*. Praha: KVARTA, 1991. ISBN 80-85570-29-7.
- [8] LORBEER, G., NELSON, L., KUBA, P. *Fyzikální pokusy pro děti*. Praha: Portál, 1998. ISBN 80-7178-181-9.
- [9] NAVRÁTIL, V. [online], poslední revize - nevedeno [cit. 2008-22-02]. Dostupné z URL: [https://is.muni.cz/auth/dok/fmgr.pl?fakulta=1441;obdobi=3764;studium=191832;ag=of\\_ma;furl=%2Fof%2F1441%2FFY2BP\\_PL%2Fjaro2008%2F;info=](https://is.muni.cz/auth/dok/fmgr.pl?fakulta=1441;obdobi=3764;studium=191832;ag=of_ma;furl=%2Fof%2F1441%2FFY2BP_PL%2Fjaro2008%2F;info=)
- [10] UHROVÁ, H. a kolektiv [online], poslední revize - nevedeno [cit. 2008-26-03]. Dostupné z URL: <http://www.vscht.cz/ufmt/cs/pomucky/uhrovah/skripta/Uloha%203.pdf>
- [11] MACHÁČEK, M. *Fyzika pro 7. ročník základní školy, 1. díl*. Praha: SPN, 1993.
- [12] RAUNER, K., HAVEL, V., PROKŠOVÁ, J., RANDA, M. *Fyzika 7: Učebnice pro základní školy a víceletá gymnázia*. Plzeň: FRAUS, 2005. ISBN 80-7238431-7
- [13] Základní škola Edvarda Beneše v Lysicích *Školní vzdělávací program* [USB flash].
- [14] JANÍK, J. *Fyzika tření*. Brno, 2008. 24l., 3l. příl. Bakalářská práce. Masarykova univerzita, Pedagogická fakulta.
- [15] KRUTINA, J. *Přehled technické mechaniky*. Praha: ROH-PRÁCE, 1954.
- [16] VORÁČEK, M., BEJSTA, J., LAMPA, J., LEGER, J., SVOBODA, K. *Praktikum z fyziky na základní devítileté škole*. Praha: SPN, 1971.
- [17] SOPOUŠEK, J. [online], poslední revize - nevedeno [cit. 2010-22-03]. Dostupné z URL: <http://kf.upce.cz/Reologie%20a%20reometrie%20kapalin.doc>
- [18] NEZNÁMÝ AUTOR. [online], poslední revize - 2008 [cit. 2010-22-03]. Dostupné z URL: <http://www.pneumatiky-auto.cz/prilnavost.html>