Univerzita Hradec Králové

Přírodovědecká fakulta

Katedra fyziky

Podpora výuky kmitání a vlnění na střední škole pomocí experimentů

Diplomová práce

Autor:	Bc. Markéta Havlová
Studijní program:	N1701 Fyzika
Studijní obor:	NFYSSK-NMATSSK Učitelství fyziky pro střední školy – Učitelství matematiky pro střední školy
Vedoucí práce:	doc. RNDr. Jan Šlégr, Ph.D.

Hradec Králové 2020

Univerzita Hradec Králové
Přírodovědecká fakulta

Zadání diplomové práce

Autor:	**Markéta Havlová**
Studium:	S18FY007NP
Studijní program:	N1701 Fyzika
Studijní obor:	Učitelství fyziky pro střední školy, Učitelství matematiky pro střední školy
Název diplomové práce:	**Podpora výuky kmitání a vlnění na střední škole pomocí experimentů**
Název diplomové práce AJ:	Support of teaching oscillation and wave physics in high school through experiments

Cíl, metody, literatura, předpoklady:

Bohumil Vybíral: Kmitání a vlnění. Gaudeamus - 2014. ISBN: 978-80-7435-379-6, 247 stran.

Anotace:

Cílem práce je navrhnout a v praxi ověřit experimenty, které by bylo možné využít k účinné podpoře výuky kmitání a vlnění na střední škole. Půjde zejména o sestrojení demonstrátoru kmitavého pohybu, demonstrátoru vlnění a Kundtovy trubice. Součástí práce bude i pedagogický experiment, kde bude účinnost výuky podporované experimenty ověřena a porovnána s kontrolní skupinou.

Garantující pracoviště:	Katedra fyziky, Přírodovědecká fakulta
Vedoucí práce:	doc. RNDr. Jan Šlégr, Ph.D.
Oponent:	RNDr. Filip Studnička, Ph.D.

Datum zadání závěrečné práce: 4.4.2019

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně a že jsem v seznamu použité literatury uvedla všechny prameny, z kterých jsem vycházela.

V Hradci Králové dne Markéta Havlová

Poděkování

Chtěla bych poděkovat svému vedoucímu diplomové práce panu doc. RNDr. Janu Šlégrovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky poskytnuté při psaní práce. Dále bych chtěla poděkovat mé rodině a blízkým přátelům za podporu během mého studia a psaní diplomové práce.

Anotace

HAVLOVÁ, M. *Podpora výuky kmitání a vlnění na střední škole pomocí experimentů.* Hradec Králové, 2020. Diplomová práce na Přírodovědecké fakultě Univerzity Hradec Králové. Vedoucí diplomové práce doc. RNDr. Jan Šlégr, Ph.D. 77 s.

Diplomová práce je zaměřena na podporu výuky kmitání a vlnění pomocí experimentů, kteří si mohou žáci sestavit sami doma. V teoretické části je popsána teorie kmitání a vlnění a stručné informace k pedagogickému experimentu, který byl proveden v rámci praktické části diplomové práce. V praktické části jsou také jednoduché experimenty z oblasti kmitání a vlnění a jejich měření, které napomáhají žákům k porozumění dané problematiky a distanční materiály, které doplňují teorii k probírané látce.

Klíčová slova:

kmitání, vlnění, pedagogický experiment, distanční materiály, pokusy ve výuce

Annotation

HAVLOVÁ, M. *Support for teaching oscillations and waves thorugh experiments.* Hradec Králové, 2020. Diploma Thesis at Faculty of Science at University of Hradec Králové. Diploma Thesis supervisor doc. RNDr. Jan Šlégr, Ph.D. 77 p.

The Diploma Thesis is focused on the support of teaching oscillations and waves through expereiments, which the students can perform by themselves at home. The theoretical part describes the theory of oscillations and contains brief information about a pedagogical experiment, which was performed for the practical part of the thesis. The practical part also incorporates simple experiments from the area of oscillations, waves and their measurements, which assist the students to understand the problematics, and distant materials, which supplement the theory of the topics being learned.

Keywords

Oscillation, wave, pedagogic experiment, distant materials, teaching experiments

Obsah

Úvod

Nad tím, jak zpestřit výuku a zároveň přiblížit danou látku žákům tak, aby je to bavilo a zároveň to bylo efektivní a účinné, jsem se zamýšlela již během průběžných a souvislých praxí během studia. Tyto úvahy se pak projevily i při výběru témat mých závěrečných prací.

Jedním z důvodů, proč jsem si vybrala téma diplomové práce „Podpora výuky kmitání a vlnění na střední škole pomocí experimentů" je ten, že věřím, že žáci lépe pochopí probíranou látku, pokud si sami vyzkouší a případně i sami sestaví jednoduché experimenty, které se týkají dané látky. Zároveň jako studentka kombinací učitelství matematiky a fyziky pro střední školy ráda poukazuji i na matematickou stránku experimentů a tím tak propojuji dané obory.

Teoretická část diplomové práce bude rozdělena do pěti kapitol, přičemž první dvě kapitoly budou zaměřeny na podrobnější popis kmitání a vlnění pro shrnutí fyzikálních poznatků o kmitání a vlnění. Dále pak bude teoretická část věnována typům experimentů ve výuce fyziky a Rámcovému vzdělávacímu plánu, speciálně části týkající se oblasti výuky kmitání a vlnění. Jedna z kapitol teoretické části bude věnována stručnému základu teorie k provedení pedagogického experimentu.

Součástí praktické části diplomové práce je provedení pedagogického experimentu, který je zaměřen na porovnání účinnosti výuky kmitání a vlnění, pokud mají žáci k dispozici distanční materiály, nahraná videa s pokusy a pokud mají k dispozici navíc i výklad učitele. Provedení a průběh pedagogického experimentu byl ovlivněn epidemií koronaviru COVID-19, kvůli které byly zavřeny školy a experiment byl proto proveden v on-line podobě. Dále je součástí praktické části diplomové práce vytvoření materiálů pro distanční výuku žáků spolu s vytvořením videí, která jsou pro žáky dostupná online.

1 Kmitání

Kmitavý pohyb je jedním ze základních pohybů, se kterým se setkáváme každý den. Příkladem může být pohyb kyvadla v nástěnných hodinách, chvění kytarové struny, kmitavý pohyb tělesa zavěšeného na pružině, dítě houpající se na houpačce, kmitání atomů v pevné látce.

1.1 Kmitavý pohyb

Kmitavý pohyb je takový pohyb, při kterém se těleso střídavě vychyluje ze své stabilní rovnovážně polohy, která je nutnou podmínkou pro existenci oscilátoru. Oscilátor je fyzikální soustava, u kterého probíhá kmitavý pohyb. Oscilátor může být mechanický, například těleso na pružině, ale také i elektromagnetický. Příkladem elektromagnetického oscilátoru je obvod tvořený cívkou a kondenzátorem. Důležitým pojmem je frekvence. Frekvence udává počet dokončených kmitů za jednu sekundu. Jednotkou frekvence v soustavě SI je hertz. Jednotka je pojmenována podle německého fyzika Heinricha Rudolfa Hertze (1857–1894). S periodou je spjat také pojem perioda. Perioda je převrácená hodnota frekvence a udává nám, jakou dobu trvá tělesu vykonat jeden celý kmit. Výchylka je okamžitá vzdálenost tělesa od stabilní rovnovážné polohy. Amplituda výchylky je vzdálenost mezi rovnovážnou polohou a maximální výchylkou. [1–3]

Pokud pozorujeme těleso zavěšené na pružině, které kmitá kolem rovnovážné polohy, zjistíme, že se výchylka s časem zmenšuje a kmitavý pohyb ustává až těleso zůstane v rovnovážné poloze. V reálném světě dochází k přeměně mechanické energie oscilátoru na jiné druhy energie, například na tepelnou energii. Takové kmitání se nazývá tlumené kmitání a s netlumeným kmitáním se v přírodě nesetkáme. Pro názorné odvození se ale budeme nejdříve zabývat zjednodušeným případem, kdy ke ztrátám energie nedochází. [2]

1.1.1 Lineární pružinový harmonický oscilátor

Uvažujme nejprve pouze jednorozměrný případ, kdy se těleso po vychýlení z rovnovážné polohy pohybuje po přímce. To je například případ hmotného bodu zavěšeného na pružině. Mějme hmotný bod o hmotnosti m zavěšený na pružině zanedbatelné hmotnosti. Hmotný bod se pohybuje svisle ve směru osy y, tření zanedbejme. Na vychýlené těleso působí síla F

$$F = -ky, \tag{1.1}$$

kde k je tuhost pružiny a znaménko minus znamená, že síla působí proti směru pohybu vychýleného tělesa. Pružinu charakterizuje tuhost pružiny k, která nám vyjadřuje změnu délky pružiny vzhledem k působící síle na pružinu.

$$k = \frac{F}{\Delta l}, \tag{1.2}$$

jednotkou je $\mathrm{N \cdot m^{-1}}$. Po zavěšení hmotného bodu o hmotnosti m na pružinu, se pružina zdeformuje, protože na ni působí tíhová síla o velikosti mg ve směru svisle dolu. Zároveň působí pružina na hmotný bod silou stejně velkou, jako je tíhová síla a tedy

$$-mg + k\Delta l = 0 \tag{1.3}$$

Pro výchylku y bude podle 2. Newtonova pohybového zákona platit

$$-ky = ma, \tag{1.4}$$

$$\frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}t^2} + \frac{k}{m} y = 0. \tag{1.5}$$

[1, 4, 5]

Harmonický pohyb je takový pohyb, který lze popsat rovnicí

$$y(t) = y_m \sin(\omega t + \varphi_0), \tag{1.6}$$

kde y_m je amplituda výchylky. Vzhledem k oboru hodnot funkce sinus pak bude výchylka nabývat hodnot v rozmezí $\pm y_m$. Argument funkce sinus je časově závislý a nazývá se fáze pohybu. Řecké písmeno φ_0 značí počáteční fázi a vyjadřuje hodnotu okamžité výchylky v počátečním okamžiku. Počáteční fáze je důležitá, pokud porovnáváme dva oscilátory se stejnou úhlovou frekvencí, ale rozdílnou počáteční fází. V takovém případě můžeme vypočítat fázový rozdíl Δφ. Označíme-li φ_{01}, φ_{02} počáteční fáze obou oscilátorů, fázový rozdíl vypočítáme jako rozdíl fází obou oscilátorů

$$\Delta\varphi = (\omega t + \varphi_{02}) - (\omega t + \varphi_{01}) = \varphi_{02} - \varphi_{01.} \tag{1.7}$$

Fázový rozdíl dvou oscilátorů se stejnou úhlovou frekvencí vypočítáme jako rozdíl počátečních fází obou oscilátorů. Řecký symbol ω označuje úhlovou frekvenci. Funkce kosinus je periodická funkce s periodou 2π rad a pro úhlovou frekvenci platí

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f. \tag{1.8}$$

Okamžitá rychlosti je derivace dráhy podle času. Derivováním rovnice (1.6) podle času získáme rovnici pro rychlost hmotného bodu

$$v(t) = \frac{\mathrm{d}y(t)}{\mathrm{d}t} = y_m\omega\cos(\omega t + \varphi_0) \tag{1.9}$$

$$v(t) = v_m\cos(\omega t + \varphi_0) \tag{1.10}$$

kde $v_m = y_m\omega$ je amplituda rychlosti. Zrychlení získáme derivací rovnice (1.9) podle času

$$a(t) = -y_m\omega^2\sin(\omega t + \varphi_0) \tag{1.11}$$

$$a(t) = -a_m^2\sin(\omega t + \varphi_0) = -\omega^2 y \tag{1.12}$$

kde $a_m^2 = y_m\omega^2$ je amplituda zrychlení. Okamžité zrychlení má opačný směr než okamžitá výchylka, to je reprezentováno v rovnici (1.11) znaménkem mínus. Největší rychlost má hmotný bod při průchodu rovnovážnou polohou. Po dosažení maximální výchylky se hmotný bod pohybuje směrem k rovnovážné poloze, mění tedy směr svého pohybu. Proto v bodě maximální výchylky je rychlost nulová. [1, 4, 6]

1.1.2 Torzní oscilátor

U pružinového oscilátoru se měnila výchylka natažením nebo stlačením pružiny a pružinu jsme popsali pomocí tuhosti pružiny. U torzního oscilátoru se při kmitavém pohybu těleso zavěšené na tyči pohybuje z rovnovážné polohy o úhel φ.

Mějme těleso zavěšeno na tyči o torzní tuhosti k_t. Pootočíme-li těleso o úhel φ, v mezích platnosti Hookova zákona, dojde ke zkroucení tyče a těleso se bude vracet do rovnovážné polohy, přičemž bude konat harmonické kmitání. Při vychýlení tělesa působí na těleso direkční moment síly M, který vrací těleso do rovnovážné polohy. Pro direkční moment síly M pro malé výchylky φplatí

$$M = -k_t\varphi. \tag{1.13}$$

Pokud má zavěšené těleso na tyči moment setrvačnosti I vzhledem k ose tyče, pak lze sestavit pomocí 2. Newtonova zákona pohybovou rovnici

$$-k_t\varphi = I\frac{\mathrm{d}^2\varphi}{\mathrm{d}t^2}, \tag{1.14}$$

$$\frac{\mathrm{d}^2\varphi}{\mathrm{d}t^2} + \frac{k_t}{I}\varphi = 0. \tag{1.15}$$

[1, 4, 7]

1.1.3 Energie mechanických harmonických kmitů

Pohyb oscilátoru můžeme popsat také pomocí zákona zachování energie. Kinetická energie je největší při průchodu hmotného bodu rovnovážnou polohou. Naopak potenciální energie je nejvyšší v bodě maximální výchylky. Po vychýlení hmotného bodu z rovnovážné polohy, působí na hmotný bod síla opačného směru, která navrací hmotný bod do rovnovážné polohy. Potenciální energie je rovna práci, kterou pružina spotřebuje při deformaci z rovnovážné polohy. Zavedeme, že v rovnovážné poloze je potenciální energie nulová.

$$E_p = -W = -\int_0^y F\mathrm{d}y = -\int_0^y (-ky)\mathrm{d}y = \frac{1}{2}ky^2 \tag{1.16}$$

Po dosazení rovnice (1.6) do rovnice (1.16) vypočítáme potenciální energii

$$E_p = \frac{1}{2}ky_m^2\sin^2(\omega_0 t + \varphi_0). \tag{1.17}$$

Kinetickou energii oscilátoru vypočítáme pomocí vzorce

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2, \tag{1.18}$$

kde dosadíme za v rychlost oscilátoru, kterou jsme vyjádřili již dříve v rovnici (1.10), tedy

$$\begin{aligned} E_k &= \frac{1}{2}m(v_m\cos(\omega t + \varphi_0))^2 \\ &= \frac{1}{2}mv_m^2\cos^2(\omega t + \varphi_0) \\ &= \frac{1}{2}m(\omega y_m)^2\cos^2(\omega t + \varphi_0) \end{aligned} \tag{1.19}$$

$$E_k = \frac{1}{2}ky_m^2\cos^2(\omega t + \varphi_0). \tag{1.20}$$

Sečtením kinetické a potenciální energie získáme celkovou mechanickou energii oscilátoru

$$E = E_k + E_p = \frac{1}{2}ky_m^2\cos^2(\omega t + \varphi_0) + \frac{1}{2}ky_m^2\sin^2(\omega_0 t + \varphi_0) =$$

$$
\begin{aligned}
&= \frac{1}{2} k y_m^2 (\cos^2(\omega t + \varphi_0) + \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0)) = \\
&= \frac{1}{2} k y_m^2
\end{aligned}
\tag{1.21}
$$

Celková energie harmonického oscilátoru je konstantní, přičemž se periodicky přeměňuje potenciální energie kmitání na kinetickou energii a zpátky. Rovnice (1.21) nám říká, že celková energie harmonického oscilátoru je přímo úměrná tuhosti pružiny a druhé mocnině amplitudy výchylky. [1, 6, 8]

1.2 Volné kmity tlumených lineárních oscilátorů

V předchozích případech jsme se zabývali lineárními harmonickými oscilátory, na které nepůsobila žádaná vnější síla, která by zapříčinila utlumení oscilátoru. Takové oscilátory neexistují a je to pouze naše zjednodušená představa pro výpočty s oscilátory. Vždy jsou tedy volné kmity oscilátorů tlumené a amplituda výchylky oscilátoru se zmenšuje až kmity přestanou probíhat úplně a oscilátor se zastaví v rovnovážné stabilní poloze. Protože se mění amplituda výchylky oscilátoru, mění se také perioda kmitů oscilátoru. Pohybová rovnice volných tlumených lineárních oscilátorů je stejně jako v případě lineárních harmonických oscilátorů lineární homogenní diferenciální rovnicí 2. řádu s tím rozdílem, že se v této rovnici vyskytuje navíc další člen, kterým je součinitel tlumení mechanického oscilátoru. [1, 9]

Kmitání ovlivňuje také prostředí, ve kterém se oscilátor nachází. Jinak se bude pohybovat těleso zavěšené na pružině, které kmitá ve vzduchu a jinak se bude pohybovat těleso zavěšené na pružině, které kmitá například pod vodou. V takovém případě je velice pravděpodobné, že nebude docházet k žádným kmitům kyvadla. Jak již bylo zmíněno v předchozím odstavci, při pohybu oscilátoru na vzduchu dochází k přeměnám energie oscilátoru, protože okolní vzduch působí třecí silou na oscilátoru a také dochází k přeměnám energie v místě zavěšení kyvadla. Pro nejjednodušší případ tlumeného harmonického pružinového oscilátoru předpokládejme, že na oscilátor působí odporová síla F_o, která působí v opačném směru proti výchylce oscilátoru a je přímo úměrná velikosti rychlosti v

$$
F_o = -bv, \tag{1.22}
$$

kde b je součinitel útlumu. Jednotkou součinitele útlumu v soustavě SI je $[b] = kg \cdot s^{-1}$. Výslednou sílu, která působí na zavěšené těleso na pružině, vyjádříme takto

$$F_{výsledná} = -ky - bv. \tag{1.23}$$

Z druhého Newtonova zákona sestavíme pohybovou rovnici oscilátoru

$$ma = -ky - bv. \tag{1.24}$$

Po úpravě získáme lineární diferenciální rovnici druhého řádu s konstantními koeficienty

$$m\frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}t^2} + ky + b\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} = 0,$$

$$\frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}t^2} + \frac{b}{m}\frac{\mathrm{dy}}{\mathrm{d}t} + \frac{k}{m}y = 0,$$

$$\frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}t^2} + 2\delta\frac{\mathrm{dy}}{\mathrm{d}t} + \omega_0^2 y = 0, \tag{1.25}$$

kde $\delta = \frac{b}{2m}$ je součinitel tlumení mechanického oscilátoru a ω_0 je vlastní úhlová frekvence netlumeného oscilátoru. Řešením této diferenciální rovnice je rovnice

$$y = y_0 e^{-\delta t}\cos(\omega t + \varphi), \tag{1.26}$$

kde $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} = \sqrt{\frac{k}{m} - \frac{b^2}{4m^2}}$ je úhlová frekvence tlumeného oscilátoru. Úhlovou frekvenci tlumeného oscilátoru ovlivňuje vlastní úhlová frekvence oscilátoru a součinitel tlumení mechanického oscilátoru. Podle jejich velikosti rozdělujeme tlumené oscilátory do třech kategorií, a to podle výsledného rozdílu výrazu pod odmocninou. Tlumené kmitání nastane v případě, kdy $\omega_0^2 > \delta^2$. V ostatních případech nedochází ke kmitavému pohybu. V případě, kdy je $\delta^2 > \omega_0^2$, dochází k aperiodickému pohybu a oscilátor je zatlumený. Po vychýlení oscilátoru z rovnovážné polohy se vrací zpět do rovnovážné polohy, ale nedochází ke vzniku kmitavého pohybu. Poslední případ nastane při $\omega^2 = \delta^2$. Dochází k takzvanému kritickému tlumení, kdy se po vychýlení oscilátoru z rovnovážné polohy zpět v nejkratším možném čase, přičemž opět nevznikají kmity. [1, 2, 8]

1.3 Nucené kmity oscilátorů

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, dochází k přeměnám energie oscilátoru na jiné druhy energie a tím dochází k postupnému zmenšování amplitudy výchylky až k zániku vlastních kmitů oscilátoru. Abych kmity oscilátoru neustaly, můžeme dodávat oscilátoru energii. Příkladem může být rodič houpající dítě na houpačce. Když se dítě zhoupne a přiblíží se k rodiči, rodič do něho určitou sílou strčí a tím předá energii dítěti a houpačce a houpání neustává. V takovém případě však není kmitavý pohyb harmonický. Již malé děti se brzy naučí houpat se na houpačce samy. Pokud se budou na houpačce během houpaní zaklánět a zvedat nohy a poté je zase skrčovat ve správné frekvenci mění polohu těžiště a budou udržovat kmitavý pohyb. Pokud je pohyb dítěte na houpačce harmonický, pak je harmonický i pohyb oscilátoru. V ostatních případech by se dítě přestalo houpat, nebo by naopak zvyšovalo amplitudu kmitání. Nejlepších výsledků dosáhne dítě tehdy, pokud se frekvence jeho pohybů shoduje s frekvencí oscilátoru. Takovému stavu se říká stav rezonance. Pokud bude rodič strkat do dítěte se stejnou frekvencí jako je vlastní frekvence kmitání houpačky, dojde opět ke stavu rezonance a houpačka bude dosahovat maximálních amplitud výchylky. Pokud bude frekvence vnější síly menší nebo větší, než je frekvence houpající se houpačky, houpačka dosahuje menších amplitud výchylek. [2, 8, 10]

Periodicky proměnná síla, která působí na oscilátor se nazývá budící síla a platí

$$F_b = F_m \sin \Omega t, \tag{1.27}$$

Kde F_m je amplituda budící síla a Ω je úhlová frekvence budící síly. Při zahrnutí této síly do pohybové rovnice (1.25) budeme mít novou pohybovou rovnici

$$\frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}t^2} + 2\delta \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} + \omega_0^2 y = \frac{F_m}{m} \sin \Omega t. \tag{1.28}$$

V některých případech chceme kmity zesilovat a v některých případech je rezonance kmitů nežádoucí. Jedním z příkladů, kdy chceme zesilovat kmitání, je rezonanční zesilování zvuků u hudebních nástrojů. V mnoha případech je rezonance kmitů velice nežádoucí. Jmenujme například rezonování kmitů z pracovních strojů v továrnách. Jedním z možných způsobů zabránění rezonance je umístění strojů na izolační podložky, které zabraňují přenosu kmitání na podlahu nebo nastavení rozdílných vlastních frekvencí strojů.

1.4 Fyzické kyvadlo

Do teď jsme se zabývali popisem matematického kyvadla, tedy kyvadla, které jsme popisovali pomocí hmotného bodu a závěsu zanedbatelných rozměrů kromě délky. U fyzického kyvadla již bereme v úvahu hmotnost, která může být u tělesa různě rozmístěna a těžiště tělesa nemusí být umístěno ve středu tělesa. Při snaze najít vzorec pro periodu fyzického kyvadla musíme započítat tíhovou sílu, která má působiště v těžišti tělesa. Těleso má také moment setrvačnosti I vzhledem k ose procházející bodem závěsu kyvadla. Periodu fyzického kyvadla pak vypočítáme podle vztahu

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgh}}, \tag{1.29}$$

kde h je vzdálenost mezi těžištěm tělesa a bodem závěsu tělesa. Tento vzorec platí, stejně jako u matematického kyvadla, pouze pro malé výchylky oscilátoru. Pro každé fyzické kyvadlo, které kmitá kolem bodu závěsu s periodou T, lze nalézt takové matematické kyvadlo, které bude kmitat se stejnou periodou. K tomu je potřeba znát redukovanou délku [2]

2 Mechanické vlnění

Ději, který šíří látkovým prostředím, říkáme vlnění. Při vlnění nedochází k přenosu látky, ale k přenosu energie. V této kapitole se budeme věnovat mechanickému vlnění. Kromě mechanického vlnění existuje i elektromagnetické vlnění, které se šíří i mimo hmotné prostředí. Příkladem elektromagnetického vlnění je světlo, které se šíří ve vakuu ve vesmíru.

2.1 Postupné vlnění

Vlnění můžeme rozdělovat na vlnění postupné a stojaté. Věnujme se nejprve postupnému vlnění. Postupné vlnění se šíří v látkovém prostředí, kdy jeden z hmotných bodů se rozkmitá a působí tak na částice ve svém okolí, které se také rozkmitají. Podle způsobu šíření vlnění rozdělujeme postupné vlnění na postupné vlnění příčné (transversální) a postupné vlnění podélné (longitudinální). Zabývejme se nejdříve příčným vlněním. U příčného vlnění se rozkmitané částice pohybují ve směru kolmém na směr šíření vlny. Představme si, že držíme v ruce provaz, který je na druhém konci přivázán. Pohybem ruky nahoru a dolu rozkmitáme provaz a provazem se bude šířit příčné vlnění. Podrobněji se budeme věnovat příčnému vlnění v jednorozměrném kontinuu, kterým může být již zmiňovaný úzký provaz, u kterého budeme předpokládat, že tloušťku provazu můžeme zanedbat vzhledem k délce provazu. Dalším příkladem jednorozměrného kontinua je struna. Příkladem dvourozměrného kontinua může být hladina vody a příkladem trojrozměrného kontinua může být voda uvnitř nádoby. [1, 2, 7]

2.1.1 Příčné vlnění

Uvažujme jednorozměrné kontinuum, které je tvořeno řadou navzájem vázaných hmotných bodů. V čase $t = 0$ nechtě začne první bod z řady konat kmitající pohyb. V prostřední se začne šířit rozruch vyvolaný prvním bodem z řady a vznikne vlnění, které kmitá se stejnou periodou jako první bod, ale je fázově posunuté. Tedy různé body řady se v určitém okamžiku nacházejí v různých fázích. Vzdálenost mezi dvěma nejbližšími body, které kmitají se stejnou fázi, se nazývá vlnová délka. Vlnová délka je vzdálenost, kterou urazí vlnění, které se šíří prostředím rychlostí v za dobu jedné periody, tedy

$$\lambda = v \cdot T = \frac{v}{f}. \tag{2.1}$$

Pokud má příčné vlnění výchylky do všech směrů kolmých na směr šíření vlnění, hovoříme o nepolarizovaném vlnění. Lineárně polarizované vlnění je takové vlnění, u něhož všechny amplitudy výchylky leží v jedné rovině. Kromě lineárně polarizovaného vlnění může být vlnění polarizováno i kruhově. Jednotlivé amplitudy výchylky postupně při postupující vlně opisují kružnici kolem směru šíření vlny. [1, 2, 7]

2.1.2 Podélné vlnění

U podélného vlnění je směr kmitání jednotlivých částic rovnoběžný se směrem šíření vlnění v látce. Uvažujeme-li opět jednorozměrné kontinuum, pak po rozkmitání prvního bodu v řadě dochází k šíření vlnění, a protože částice kmitají ve stejné rovině jako je směr šíření vlnění, dochází k zhušťování a řídnutí bodů. V pružných látkách se šíří pomocí podélného postupného vlnění například zvuk. [1, 7]

2.1.3 Rovnice postupného vlnění

Předpokládejme, že se prostředím bude šířit harmonická vlna, tedy vlna, kterou lze popsat pomocí funkce sinus. Tím, jak se vlnění šíří, rozkmitávají se jednotlivé částice a okamžitá výchylka částice závisí na čase t a navíc také na vzdálenosti částice od zdroje vlnění. Mějme bod v počátku P, který kmitá kolem rovnovážné polohy s amplitudou výchylky y_m. Okamžitou výchylku v čase t můžeme popsat rovnicí

$$y = y_m \sin(\omega t). \tag{2.2}$$

Pokud se vlnění šíří prostředím rychlostí v, pak vlnění dospěje do bodu X za čas $\tau = \frac{x}{v}$. Protože vlnění dospěje do bodu X až za čas τ, je kmitání bodu X o tento čas opožděno. Tuto skutečnost vyjádříme rovnicí

$$y = y_m \sin\big(\omega(t - \tau)\big) = y_m \sin\left(\omega\left(t - \frac{x}{v}\right)\right). \tag{2.3}$$

Využitím vztahů $\omega = \frac{2\pi}{T}$ a $\lambda = vT$, $v = \frac{\lambda}{T}$ upravíme rovnici (2.3).

$$y = y_m \sin\left(\omega\left(t - \frac{x}{v}\right)\right) = y_m \sin\left(\frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{x}{\frac{\lambda}{T}}\right)\right) =$$

$$= \sin\left(2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)\right). \tag{2.4}$$

Uvažujeme-li, že se vlnění začne šířit z jednoho bodu dvourozměrným nebo trojrozměrným prostorem, pak množina bodů, které budou kmitat ve stejné fázi, tvoří takzvanou vlnoplochu. Pokud bude množina bodů kmitajících se stejnou fází tvořit rovinu, hovoříme o rovinné vlnoploše. Za rovinnou vlnoplochu můžeme považovat takovou kruhovou vlnoplochu, která je ve velké vzdálenosti od zdroje vlnění. Fázová rychlost vlnění je taková rychlost, jakou se šíří místa stejné fáze. Fázovou rychlost vypočítáme také vztahem

$$c = \frac{\lambda}{T} = \frac{\lambda}{2\pi}\frac{2\pi}{T} = \frac{\lambda}{2\pi}\omega = \frac{\omega}{k}, \tag{2.5}$$

kde $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ je úhlový vlnočet, jednotkou úhlového vlnočtu v soustavě SI je $[k] =$ $= \mathrm{m}^{-1}$. [1, 2, 7]

2.1.4 Interference vlnění

Zatím jsme se zabývali pouze případem, kdy máme jeden zdroj vlnění. Pro jednoduchost uvažujme dva stejné zdroje vlnění. Nechť se z každého zdroje šíří vlnění jednorozměrným kontinuem. Vlnění se šíří stejně jako v případě s jedním zdrojem vlnění. Rozdíl nastane až v tehdy, když se obě vlnění potkají ve stejném bodě prostoru. V takovém případě dochází k jevu, kterému se říká interference vlnění. Platí princip superpozice, a tak se jednotlivé výchylky obou vlnění v daném bodě sečtou, poté už zase pokračují vlny stejně, jako kdyby se vůbec nepotkaly. Ovlivňují se pouze výchylky, vlny se navzájem neovlivňují. [1, 2]

Mějme v jednorozměrném kontinuu dva bodové zdroje vlnění, ze kterého se šíří dvě vlnění stejným směrem o stejné vlnové délce a amplitudě. Protože se v místě, kde se obě vlnění setkají sčítají amplitudy obou vlnění, bude záležet na tom, v jaké fázi se v daném bodě vlny setkají. Nejjednodušší případ nastane, pokud se obě vlnění začnou šířit se stejnou fází. Interferencí těchto vlnění bude součet jejich amplitud. Sestavíme dvě rovnice postupné vlny (2.5) pro vlny, u kterých jsou zdroje vzdáleny od sebe o vzdálenost d. Označme vzdálenost prvního zdroje od zkoumaného místa setkání jako x_1 a vzdálenost druhého zdroje vlnění od zkoumaného místa setkání dvou vlnění jako x_2, přičemž $x_1 < x_2$.

$$y_1 = y_m \sin\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda}\right)\right], \tag{2.6}$$

$$y_2 = y_m \sin\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda}\right)\right]. \tag{2.7}$$

Použijeme vzorec pro součet funkcí sinus s rozdílným parametrem

$$\sin x + \sin y = 2 \cdot \sin\frac{x+y}{2} \cdot \cos\frac{x-y}{2}. \tag{2.8}$$

$$y_1 + y_2 = y_m \sin\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda}\right)\right] + y_m \sin\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda}\right)\right] =$$

$$= y_m \cdot \left\{\sin\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda}\right)\right] + \sin\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda}\right)\right]\right\} =$$

$$= y_m \cdot \left\{2\sin\left[\frac{2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda}\right) + 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda}\right)}{2}\right] \cdot \cos\left[\frac{2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda}\right) - 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda}\right)}{2}\right]\right\} =$$

$$= y_m \cdot \left\{2\sin\left[\frac{4\pi\left(\frac{t}{T}\right) - 2\pi\left(\frac{x_1}{\lambda} + \frac{x_2}{\lambda}\right)}{2}\right] \cdot \cos\left[\frac{2\pi\left(-\frac{x_1}{\lambda}\right) + 2\pi\left(\frac{x_2}{\lambda}\right)}{2}\right]\right\} =$$

$$= y_m \cdot \left\{2\sin\left[2\pi\left(\frac{t}{T}\right) - \pi\left(\frac{x_1 + x_2}{\lambda}\right)\right] \cdot \cos\left[\pi\left(\frac{x_2 - x_1}{\lambda}\right)\right]\right\} =$$

$$= 2y_m \cdot \left\{\sin\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x_1 + x_2}{2\lambda}\right)\right] \cdot \cos\left[\frac{\pi(x_2 - x_1)}{\lambda}\right]\right\} =$$

$$= 2y_m \cos\left(\frac{\pi d}{\lambda}\right) \sin\left(2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{\bar{x}}{\lambda}\right)\right), \tag{2.9}$$

kde $d = x_2 - x_1$ je vzdálenost zdrojů vlnění a $\bar{x} = \frac{1}{2}(x_1 + x_2)$. Všimněme si, že argument funkce kosinus není závislý na čase. Proto je celý výraz $2y_m \cos\left(\frac{\pi d}{\lambda}\right)$ výslednou amplitudou složeného vlnění a označme jej symbolem Y_m

$$y = Y_m \sin\left(2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{\bar{x}}{\lambda}\right)\right). \tag{2.10}$$

Pokud se obě vlnění začnou šířit s opačnou fází, v bodě, kde se setkají, se jejich amplitudy opět sečtou. Ale protože se šíří s opačnou fází, výsledný součet bude nulový a v daném bodě bude amplituda výchylky nulová. Na interferenci má tedy vliv fáze, ve které se obě vlnění nacházejí. Kdyby se lišily tyto vlny pouze o úhel φ, pak úhel $\Delta\varphi$ je fázový rozdíl. Fázový rozdíl je rozdíl argumentů funkce sinus v rovnicích (2.6) a (2.7)

$$\begin{aligned}\Delta\varphi = 2\pi\left(\frac{t}{T}-\frac{x_1}{\lambda}\right) - 2\pi\left(\frac{t}{T}-\frac{x_2}{\lambda}\right) \\ = \frac{2\pi}{\lambda}(x_2 - x_1) = \frac{2\pi}{\lambda}d.\end{aligned} \tag{2.11}$$

Pokud se bude dráhový rozdíl d rovnat násobku sudého počtu půlvln $d = 2k\frac{\lambda}{2}, k = 0, 1, 2, \ldots$, vznikne interferenční maximum. V případě počtu lichých násobků půlvln $d = (2k+1)\frac{\lambda}{2}, k = 0, 1, 2, \ldots$ budou vznikat interferenční minima. [2, 8]

2.2 Stojaté vlnění

Pokud máme postupné vlnění, které je v uzavřeném prostoru (například na tyči, na struně, na provazu) a které dospělo na konec tohoto prostoru, vlnění se odráží a vlna postupuje opačným směrem. Tím se odražené vlnění setkává s původním vlněním a dochází k interferenci vlnění a tím i ke vzniku stojatého vlnění. U stojatého vlnění kmitá každý bod řady se stále stejnou amplitudou. Tím nám vzniknou místa, ve kterých má vlnění největší amplitudu. Takovým místům říkáme kmitny. Místa, ve kterých je amplituda výchylky nulová, se nazývají uzle. U stojatého vlnění se s časem nemění poloha uzlů a kmiten. Rozdílný odraz nastává na pevném konci a na volném konci. Na pevném konci dochází k odrazu s opačnou fází, na volném konci se vlnění odráží se stejnou fází. [2]

Uvažujme vlnění na struně. Protože je struna na obou svých koncích pevně připevněna, bude se vlnění odrážet s opačnou fází. To se v rovnici postupné vlny projeví znaménkem minus před rovnicí. Vyjdeme z rovnice postupné vlny, kterou sečteme s rovnicí odražené postupné vlny, která se odrazila s opačnou fází

$$y_1 = y_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda}\right), \tag{2.12}$$

$$y_2 = -y_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi x}{\lambda}\right). \tag{2.13}$$

$$y_1 + y_2 = y_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda}\right) - y_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi x}{\lambda}\right) =$$

$$= y_m \left(2 \cdot \cos \frac{\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda} + \omega t + \frac{2\pi x}{\lambda}}{2} \cdot \sin \frac{\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda} - \omega t - \frac{2\pi x}{\lambda}}{2} \right) =$$

$$= y_m \left(2 \cdot \cos \omega t \cdot \sin\left(-\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \right) =$$

$$-2y_m \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \cos \omega t \,. \tag{2.14}$$

V předchozí rovnici pro stojatou vlny je vidět, že amplituda výchylky není časově proměnná a závisí pouze na poloze bodu.

Stojaté vlnění může být, stejně jako postupné vlnění, podélní i příčné. Vlnění na struně je příkladem příčného stojatého vlnění.

Jak už jsme na začátku kapitoly zmiňovali, stojaté vlnění vznikne interferencí postupného vlnění o vhodné frekvenci. Pokud budeme držet v ruce jeden konec provazu a druhý bude pevně upevněn, pohybem ruky nahoru a dolu vznikne postupné vlnění, které se bude šířit až na konec provazu a odrazí se. Postupná vlna, která se bude šířit směrem k nám, bude interferovat s postupnou vlnou, která míří směrem od naší ruky k pevnému konci provazu. Pokud bychom pohybovali rukou v nevhodné frekvenci, nedošlo by ke vzniku stojaté vlny s viditelnými kmitnami a uzly. Takovým frekvencím, při kterých vzniká stojatá vlna, se říká vlastní frekvence.[2]

S vlněním se setkáváme i u hudebních nástrojů, protože zvuk je mechanické vlnění. Jedním z nejtypičtějších příkladů je stojaté vlnění na struně. Struna má oba své konce pevně připevněné ke zbytku hudebního nástroje. Nechť struna je délky L. Podmínkou pro vznik stojatého vlnění je stejná vlnová délka postupujícího vlnění ke konci struny a zpět. Oba konce jsou pevné, a tudíž se v obou koncích bude nacházet uzel. Proto rovnice (2.14)**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** musí splňovat podmínku

$$Y_m \sin\left(\frac{2\pi L}{\lambda}\right) = 0, \tag{2.15}$$

tedy, výchylky v na konci struny délky L je nulová. V rovnici (2.15) je $Y_m = -2y_m \cos \omega t$. Funkce sinus nabývá nulových hodnot, pokud je argument funkce roven násobkům π:

$$\frac{2\pi L}{\lambda} = k\pi, \qquad k = 1, 2, 3, \ldots \tag{2.16}$$

$$L = k\frac{\lambda}{2}, \qquad k = 1, 2, 3, \ldots \tag{2.17}$$

$$\lambda = \frac{2L}{k}, \qquad k = 1, 2, 3, \ldots \tag{2.18}$$

Proto pro strunu délky L bude nejprostší stojatá vlna mít dva uzle a jednu kmitnu, protože se na délku L při dané vlnové délce vejde pouze jedna půlvlna. Aby na struně vznikla stojatá vlna, která bude mít dvě kmitny a tři uzle, musí vlnová délka vlnění být $\lambda = L$. Vlnovým délkám, které vypočítáme z rovnice (2.18), odpovídají vlastní frekvence. Tyto frekvence vypočítáme pomocí rovnice (2.1), ve které je uveden vztah mezi rychlostí vlnění, periodou, případně frekvencí, a vlnovou délkou. [1, 2, 7, 8]

Stojaté vlnění vzniká i při odrazu na otevřeném konci, přičemž se vlnění odráží se stejnou fází. Postupné a odražené vlnění spolu interferují, přičemž tato vlnění můžeme popsat rovnicemi

$$y_1 = y_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda}\right), \tag{2.19}$$

$$y_2 = y_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi x}{\lambda}\right). \tag{2.20}$$

Rovnice (2.19) a (2.20) sečteme. Opět použijeme vzorec pro sčítání dvou goniometrických funkcí sinus s rozdílnými argumenty funkce.

$$y = y_1 + y_2 = y_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda}\right) + y_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi x}{\lambda}\right) =$$

$$= y_m\left(2 \cdot \sin\frac{\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda} + \omega t + \frac{2\pi x}{\lambda}}{2} \cdot \cos\frac{\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda} - \omega t - \frac{2\pi x}{\lambda}}{2}\right) =$$

$$= 2y_m \sin \omega t \cos \frac{2\pi x}{\lambda} = Y_M \sin \omega t,$$

kde $Y_M = 2y_m \cos \frac{2\pi x}{\lambda}$ je amplituda vlnění při odrazu na volném konci.

Příkladem hudebních nástrojů, které mají otevřený konec, je flétna, příčná flétna, hoboj a další.

3 Experimenty ve výuce fyziky

Zařazování experimentů do výuky fyziky je velmi důležité k tvorbě správných představ z daného fyzikálního tématu. Experimenty můžeme provádět s pomocí školních sad pro experimenty, samozřejmě můžeme použít i předměty, které k tomu nejsou primárně určeny a tím si vyrobit pomůcky vlastní. V následující kapitole jsou uvedeny typy organizačních forem pokusů, se kterými se ve škole můžeme setkat.

3.1 Demonstrační experiment

Při demonstračním experimentu je hlavním aktérem učitel, který předvádí experiment před žáky. Práce žáků je během experimentu pasivní. Demonstrační experiment je využíván k motivaci žáků k probírané látce a žáci sledují fyzikální jevy, které se v experimentu vyskytují. Problémem pro demonstrační experiment je viditelnost aparatury pro všechny žáky ve třídě. Učitel musí zajistit, aby všichni žáci ve třídě na experiment viděli, protože žák v první lavici jistě uvidí pokus lépe než žák v poslední lavici. [11] Pro demonstrační experiment je vhodné využít pomůcek, které lze propojit s počítačem, takže lze průběh a výsledky experimentu promítat pomocí data projektoru. Další problém, který se u demonstračního experimentu vyskytuje, je žáci nejsou dostatečně a kontrolovatelně zapojeni do myšlenkových procesů učitele a žáci nejsou dostatečně aktivizování.

3.2 Frontální experiment

Frontální experiment je velmi finančně náročný, protože by žáci měli pracovat buď samostatně nebo v malých skupinách. To je jedním z důvodů, proč se frontální experiment ve výuce příliš neobjevuje. Nedostatečný počet pomůcek vede také k tomu, že skupiny žáků jsou příliš velké a metoda nemá požadovaný výsledek. Další nevýhodou frontálního experimentu je nekontrolovatelnost práce žáků, kdy si žáci s pomůckami pouze hrají a zkoušejí, co vydrží. To je problematické i z hlediska bezpečnosti. [11]

3.3 Laboratorní experiment

Pro laboratorní experiment jsou vyhrazené celé vyučovací hodiny, kdy žáci řeší předem daný problém. Následkem malého zastoupení hodin v laboratoři se žáci spíše, než měření hodnot věnují tomu, aby se naučili správně zacházet s pomůckami v laboratoři. Jedním z úkolů, který žáci v laboratořích mohou řešit, je naměření a dopočítání konstant z různých fyzikálních zákonů. Žáci mají tendence upravovat výsledky svých měření tak, aby to vycházelo „hezky“. Domnívají se, že něco špatně naměřili a upravují hodnoty. Nenapadne je hledat chybu jinde, ve škole měříme pouze zjednodušenou část závislosti, která je v přírodě mnohem složitější. [11]

3.4 Domácí experiment

Žáci v domácím experimentu mohou využívat i pomůcky z běžného života a tím si propojují poznatky z fyziky, která se probírá ve škole s fyzikou, se kterou se potkávají doma. Uvědomí si, že to, o čem se učí ve škole, má i praktický užitek. Nejčastěji učitelé zadávají žákům výrobu pomůcek, které pak využijí například při měření ve výuce. Obvykle jde o práci, která je málo tvůrčí k vlastnímu objevování. [11]

4 Pedagogický experiment

Pedagogický experiment lze rozdělit do několika skupin, podle toho, jakým způsobem a v jakém prostředí a v jakých podmínkách je prováděn. Jedním ze způsobů rozdělení pedagogického experimentu je podle zaměření na kontrolu působení nezávisle proměnných. Experiment pak lze zrealizovat pomocí jedné z tří technik. Tyto tři techniky jsou: **technika jedné skupiny**, **technika paralelních skupin** a **technika rotace faktorů**. Výsledky z jednotlivých technik a jejich obměn nejsou stejně kvalitní. Nejvíc chybová je technika jedné skupiny, kdy námi získané výsledky mohou být zkresleny výběrem skupiny a také tím, že nemáme porovnání s další skupinou. Tato technika lze vylepšit pomocí měření úrovně žáků před experimentem a po experimentu. Chybovost u této techniky může být způsobena mimo jiné tím, že mezi měřením před a po uběhla dlouhá doba, takže mezitím mohlo dojít ke zrání organismu dětí a následnému zkreslení výsledků. [12]

Při porovnání techniky jedné skupiny a techniky paralelních skupin je z hlediska věrohodnosti výsledků lepší použít techniku paralelních skupin. Jde o použití dvou nebo více skupin, přičemž skupiny, ve kterých měníme nezávisle proměnou nazýváme skupinou experimentální. Skupinu, ve které nemění nezávisle proměnou, nazýváme skupinou kontrolní. [12] Techniku paralelních skupin lze provádět pomocí několika plánů, které se liší například počty zkoumaných skupin, uskutečněním na jedné či více školách, prováděním jedním nebo více vyučujícími apod. Jedním z plánů je experiment spárovaných skupin, který je uskutečněn na jedné škole, ve které je možné experiment provést ve dvou třídách. Před začátkem experimentu žáci vyplní didaktický test, na jehož základě jsou pak rozděleny do dvou skupin, které budou mít stejné rozdělení výsledků didaktického testu. V praxi je však složité tuto podobu experimentu provést, protože jsou žáci rozděleni již předem do jednotlivých tříd a následné přerozdělení není možné. Je však možné získat data ze dvou tříd a následně získaná data analyzovat pomocí statických technik. [12]

U techniky rotace faktorů probíhá experiment ve dvou fázích. V první fázi slouží jedna třída jako kontrolní skupina a druhá jako experimentální. Ve druhé fázi slouží původně kontrolní skupina jako experimentální a z experimentální skupiny se stane skupina kontrolní. Jednou z nevýhod této techniky je, že výsledky jsou ovlivněny pořadím, ve kterém byl ve skupinách prováděn experiment, tedy jestli daná skupina byla nejprve kontrolní nebo experimentální. [12]

4.1 Testové úlohy

Pro provedení experimentu spárovaných skupin je nutné vytvořit didaktické testy. V těchto testech mohou být různé typy otázek. Mohou to být otevřené široké úlohy, otevřené úlohy se stručnou odpovědí, dichotomické úlohy, úlohy s výběrem odpovědi, přiřazovací úlohy nebo ověřovací úlohy. Jde je tedy rozdělit do dvou velkých kategorií, kterými jsou otevřené úlohy a uzavřené úlohy. [12, 13]

Otevřené široké úlohy nejsou pro didaktický test příliš vhodné, protože jejich hodnocení není objektivní. Dichotomické otázky mají na výběr ze dvou odpovědí, z nichž se má jedna označit jako správná. U těchto úloh je velká pravděpodobnost uhádnutí správné odpovědi. Úloh s výběrem odpovědi je několik druhů. Jedním z nich je výběr jedné správné odpovědi. Testované osoby vybírají odpověď z nabízených možností, přičemž se obvykle vybírá minimálně ze čtyř nabízených odpovědí, aby se snížila pravděpodobnost uhádnutí správné odpovědi. Dalším typem úloh s výběrem odpovědi je typ úloh s výběrem nesprávné odpovědi. Testovaná osoba má za úkol vybrat z nabízených odpovědí takovou možnost, která není správná. Je vhodné v zadání takových úloh zvýraznit slovo, které nám říká, že máme vybrat nesprávnou odpověď. [12, 13]

4.2 Pedagogický výzkum

Výzkum by měl být systematický. Před zahájením výzkumu by měla být dána posloupnost jednotlivých kroků výzkumu. Výzkum by měl být objektivní a neměl by být ovlivněn subjektivními názory výzkumníků. Dále by pak výzkum měl být validní, tedy jestli pomocí daného výzkumu zjišťujeme to, co zjistit máme. Dalším kritériem pro výzkum je reliabilita měření. To, že je měření reliabilní znamená, že při opakování daného experimentu za podobných podmínek dospějeme ke stejnému výsledku experimentu. [12–14]

5 Fyzika a Rámcový vzdělávací plán

Očekávané výstupy žáka z fyziky jsou uvedeny v Rámcovém vzdělávacím programu pro gymnázia [15] na straně 27 a na straně 28 v kapitole Pohyb těles a jejich vzájemné působení:

„Očekávané výstupy:

Žák:

- *užívá základní kinematické vztahy při řešení problémů a úloh o pohybech rovnoměrných a rovnoměrně zrychlených/zpomalených*
- *určí v konkrétních situacích síly a jejich momenty působící na těleso a určí výslednici sil*
- *využívá (Newtonovy) pohybové zákony k předvídání pohybu těles*
- *využívá zákony zachování některých důležitých fyzikálních veličin při řešení problémů a úloh*
- *objasní procesy vzniku, šíření, odrazu a interference mechanického vlnění*

Učivo:

- *kinematika pohybu – vztažná soustava; poloha a změna polohy tělesa, jeho rychlost a zrychlení*
- *dynamika pohybu – hmotnost a síla; první, druhý a třetí pohybový zákon, inerciální soustava; hybnost tělesa; tlaková síla, tlak; třecí síla; síla pružnosti; gravitační a tíhová síla; gravitační pole; moment síly; práce, výkon; souvislost změny mechanické energie s prací; zákony zachování hmotnosti, hybnosti a energie*
- *mechanické kmitání a vlnění – kmitání mechanického oscilátoru, jeho perioda a frekvence; postupné vlnění, stojaté vlnění, vlnová délka a rychlost vlnění; zvuk, jeho hlasitost a intenzita“*

6 Příprava distančních materiálů

Při přípravě distančních materiálů jsem vycházela z učebnice Fyzika pro gymnázia – Optika od O. Lepila [3]. Text jsem doplnila humornými ilustracemi, které vtipně zdůrazňují hlavní myšlenku nebo pojem dané kapitoly. Materiály jsou rozděleny do 4 částí, které odpovídají jednotlivým kapitolám v učebnici. Na konci každé kapitoly je zařazena část, ve které jsou v bodech shrnuty hlavní poznatky z dané kapitoly. Materiály jsou vypracovány v programu Microsoft Word, obrázky jsou vytvořeny v programu Geogebra a humorné ilustrace jsou kresleny v aplikaci Whiteboard. Soubor byl exportován do formátu PDF.

V rámci distančních materiálů měli žáci k dispozici videa s experimenty týkající se probírané látky. Jednou z výhod videí s experimenty je ta, že se žáci mohou kdykoliv k daným experimentům vracet a sledovat je znovu.

6.1 Vznik a druhy vlnění

Úvod:

Ačkoliv si to možná neuvědomujeme, s vlněním se setkáváme každý den. I teď pokud se rozhlédneme, je vlnění všudy přítomné. Ptáte se jak to? Světlo je elektromagnetické vlnění, také zvuk se šíří v podobě vlnění. Určitě vás napadají jiné příklady vlnění, jako například zemětřesení, vlny v rybníce po vhození kamínku do vody. V následující kapitole si povíme o vlnění více.

Mechanické vlnění

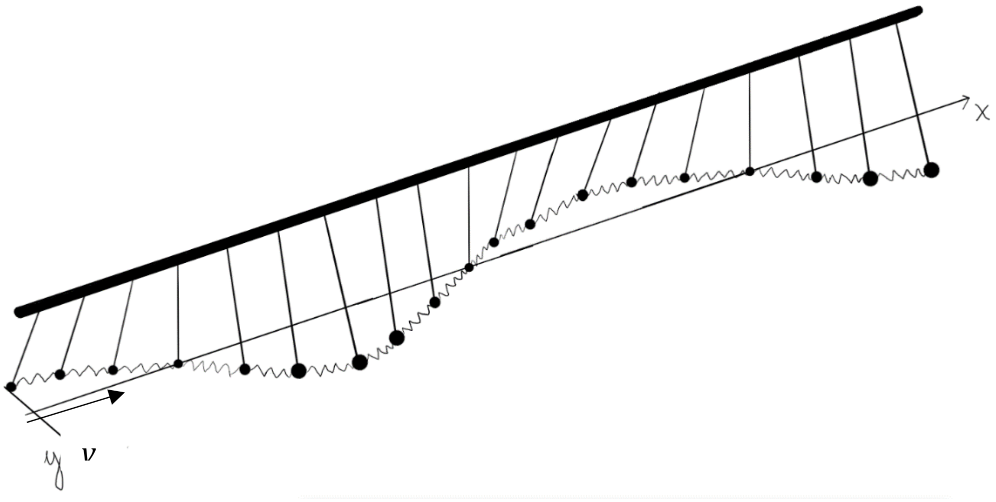
Mechanické vlnění se šíří v látkovém prostředí díky vazebným silám mezi částicemi. Ve vakuu se tedy mechanické vlnění šířit nebude. Bude se tam ale šířit elektromagnetické vlnění, kterému se budeme věnovat později.

Postupné mechanické vlnění

Mechanické vlnění se může šířit ve všech skupenství. Protože mezi částicemi jsou vazebné síly, rozkmitáním jedné částice se rozkmitá i sousední částice a zároveň se přenáší mezi částicemi energie kmitavého pohybu.

Jak to vypadá v jednorozměrném případě? Představme si částice v jedné přímce.

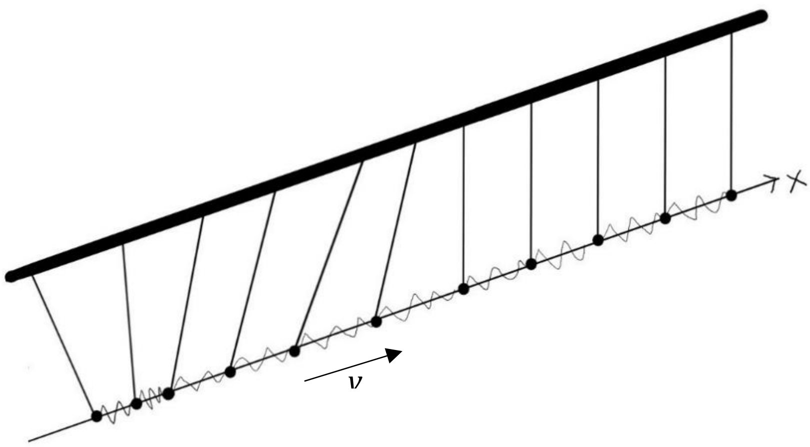
Postupné vlnění příčné



Obrázek 6.1 Postupné vlnění příčné [zdroj: převzato a upraveno z [3]]

Vlnění se šíří ve směru osy x rychlostí v, ale jednotlivé body se vychylují ve směru osy y, tedy kolmo na směr šíření vlnění.

Postupné vlnění podélné



Obrázek 6.2 Podélné vlnění [zdroj: převzato a upraveno z [3]]

Na obrázku Jednotlivé výchylky bodů jsou ve směru šíření vlnění. Dochází tedy ke zhušťování a zřeďování bodů na přímce. Okamžité výchylky mají směr rovnoběžný na směr šíření vlnění.

Mechanické podélné vlnění se šíří v kapalinách, plynech i pevných látkách. Příčné mechanické vlnění se šíří především v pevných látkách, v plynech se nešíří vůbec.

Částice se vychylují z rovnovážné polohy kolmo na směr šíření vlnění → ***postupné vlnění příčné***

Částice se vychylují z rovnovážné polohy rovnoběžně se směrem šíření → ***postupné vlnění podélné***

Co můžeme u vlnění určit?

Vlnová délka – vzdálenost dvou nejbližších bodů, které kmitaní se stejnou fází

Vlnění se látkovým prostředím šíří rychlostí v.

$$\boldsymbol{\lambda = v \cdot T}$$

$$\boldsymbol{\lambda = \frac{v}{f}}$$

Vlnová délka je tedy vzdálenost, kterou vlnění urazí během jedné periody.

Zopakuj si

Perioda – doba jednoho kmitu, $T = [s]$

Frekvence – počet kmitů za jednotku času, $f = [Hz]$

Nepřipomíná vám to vzorec, pro výpočet dráhy? $s = v \cdot t$

Obrázek 6.3 Ilustrace vlnění [zdroj: autorka]

<u>Příklady:</u>

Př. 1.: Zdroj vlnění kmitá s frekvencí 60 Hz, vlnová délka tohoto vlnění je 50 cm. Vypočítejte rychlost vlnění.

Zápis: $f = 60$ Hz

$\lambda = 50$ cm $= 0{,}5$ m

$v = ?$

Řešení: $\lambda = \frac{v}{f}$

$v = \lambda \cdot f$

$v = 0{,}5\ \mathrm{m} \cdot 60\ \mathrm{Hz}$

$v = 30\ \mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}$

Vlnění se šíří rychlostí $30\ \mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}$.

Shrnutí:

- Mechanické vlnění se šíří látkovým prostředím.
- Vlnová délka je nejkratší vzdálenost mezi dvěma body, které kmitají se stejnou fází.
- Vlnová délka: $\lambda = v \cdot T$

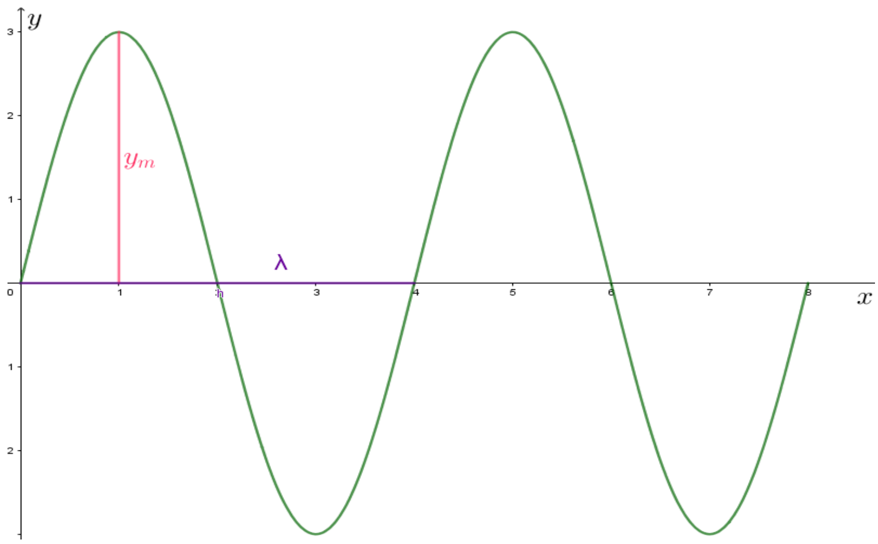
$$\lambda = \frac{v}{f}$$

  - $\lambda = [\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}] \cdot [\mathrm{s}] = [\mathrm{m}]$
  - jednotkou vlnové délky v soustavě SI je metr
- Postupné vlnění může být podélné nebo příčné.

6.2 Rovnice postupného vlnění

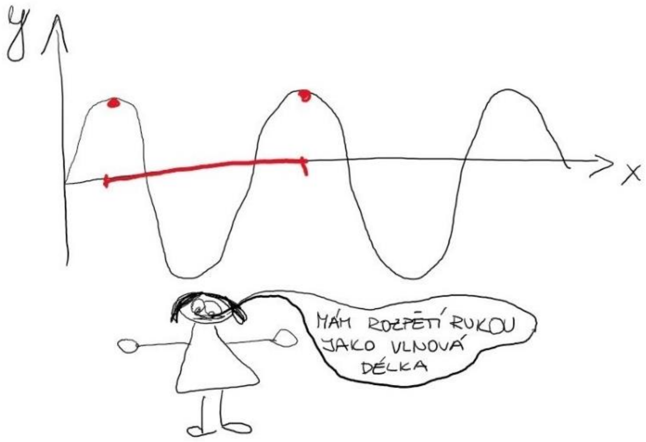
Úvod:

Abychom mohli podrobněji studovat vlnění, potřebujeme ho matematicky popsat. V této kapitole se dozvíte, na čem je závislá okamžitá výchylka vlnění a co je fáze vlnění.



Obrázek 6.4 Amplituda a vlnová délka vlnění [zdroj: autorka]

Na **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** je růžově vyznačena **amplituda vlnění y_m** (maximální výchylka) a fialovou barvou **vlnová délka λ**.



Obrázek 6.5 Ilustrace vlnová délka [zdroj: autorka]

Zopakuj si

Amplituda vlnění = maximální výchylka

Vlnová délka λ = vzdálenost dvou nejbližších bodů, které kmitaní se stejnou fází

Rovnice postupného vlnění

Vlnění můžeme popsat pomocí rovnice. Pokud se bude zdroj vlnění pohybovat harmonicky, pak i vlnění, které se bude šířit prostředím bude harmonické. Harmonické funkce můžeme vyjádřit pomocí funkcí sinus a kosinus. Kmitavý pohyb popíšeme pomocí rovnice

$$y = y_m \sin \omega t.$$

U kmitání je okamžitá výchylka y závislá pouze na čase t.

Vlnění se šíří látkovým prostředím rychlostí v. Chceme zjistit okamžitou výchylku v bodě A, jehož vzdálenost od zdroje vlnění Z je x. Zajímá nás, za jaký čas dospělo vlnění do tohoto bodu. Protože

$$x = v \cdot \tau,$$

τ je čas, za který dospělo vlnění do bodu A od zdroje Z. Pak tedy

$$\tau = \frac{x}{v}.$$

Protože vlnění dospěje od zdroje Z do bodu A až za čas τ, bude okamžitá výchylka opožděna oproti okamžité výchylce v bodě Z o rozdíl $t - \tau$.

Rovnice bude mít pak tvar

$$y = y_m \sin[\omega(t - \tau)],$$

dosazením za τ získáme tvar

$$y = y_m \sin\left[\omega\left(t - \frac{x}{v}\right)\right].$$

Využijeme vztahu pro úhlovou rychlost $\omega = \frac{2\pi}{T}$.

$$y = y_m \sin\left[\frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{x}{v}\right)\right],$$

$$y = y_m \sin\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{v \cdot T}\right)\right],$$

$$y = y_m \sin\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)\right],$$

protože vlnová $\lambda = v \cdot T$ je vlnová délka.

A je to! Díky poslední rovnici vypočítáme okamžitou výchylku v daném bodě v čase t, který má od zdroje vlnění vzdálenost x. Vlnění má vlnovou délku λ, periodu T a amplitudu výchylky y_m.

Okamžitá výchylka vlnění tedy závisí na čase a souřadnici, všechny ostatní veličiny jsou pro dané vlnění konstantní.

Výrazu $2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)$, který se nachází v argumentu funkce, se říká **fáze vlnění $\boldsymbol{\varphi}$**.

Př. 1.: Vlnění má vlnovou délku 10 cm, frekvence vlnění je 30 Hz a amplituda výchylky je 2 cm. Napiš rovnici pro výpočet okamžité výchylky v bodě x a čase t.

Zápis: $\lambda = 10 \text{ cm} = 0{,}1 \text{ m}$

$f = 30 \text{ Hz} \rightarrow T = \frac{1}{30} \text{ s}$

$y_m = 2 \text{ cm} = 0{,}02 \text{ m}$

$y = ?$

Řešení: $y = y_m \sin\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)\right]$

$$y = 0{,}02 \sin\left[2\pi\left(30t - \frac{x}{0{,}1}\right)\right]$$

<u>Shrnutí:</u>

- y_m je amplituda vlnění (maximální výchylka)
- rovnice postupného vlnění: $y = y_m \sin\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)\right]$
- fáze vlnění – argument funkce sinus: $2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)$

6.3 Interference vlnění

V předchozích kapitolách jsme se zabývali popisem jednoho vlnění. Co se stane, když se potkají například dvě vlnění? Pozorovali jste někdy, co se stane, když hodíte do rybníku dva kamínky vedle sebe? Z místa, kde dopadl kamínek do vody, se po vodní hladině začne šířit vlna do všech stran. Pokud hodíme do vody i druhý kamínek, vlnění se také začne šířit do všech stran až se dříve či později setká s prvním vlněním. Jak bude vypadat vlnění v místě setkání?

Vlnění se šíří nezávisle na ostatních vlněních. Setkají-li se vlnění, dojde k interferenci vlnění. Tedy ke skládání vlnění. Co se ale skládá? Skládají se okamžité výchylky vlnění. Vyjádřeme si to pomocí rovnice postupného vlnění, kterou jsme odvodili v předchozí kapitole. Dvě vlnění se šíří ze dvou zdrojů vlnění Z_1, Z_2, které jsou od sebe vzdáleny o vzdálenost d. Předpokládejme, že se obě vlnění setkají v místě S. Vzdálenost prvního vlnění od zdroje Z_1 k místu S je x_1 a vzdálenost druhého vlnění od zdroje Z_2 k místu S je x_2. Dále platí, že $x_1 < x_2$. Rovnice obou vlnění vypadají takto:

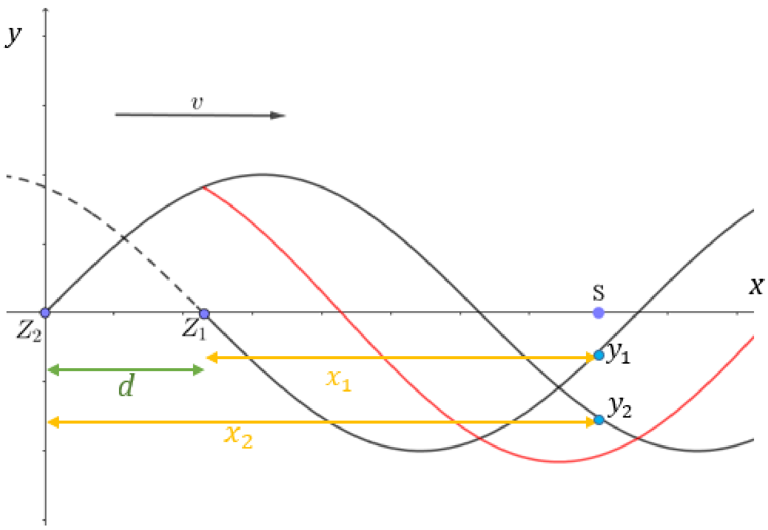
Zopakuj si

Rovnice postupného vlnění

$$y = y_m \sin\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)\right]$$

$$y_1 = y_m \sin\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda}\right)\right],$$

$$y_2 = y_m \sin\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda}\right)\right].$$



Obrázek 6.6 Skládání vlnění [zdroj: autorka]

Obě rovnice sečteme:

$$y_1 + y_2 = y_m \sin\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda}\right)\right] + y_m \sin\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda}\right)\right]$$

Po sečtení obou rovnic dostaneme novou rovnici:

$$y = Y_m \sin\left(2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{\bar{x}}{\lambda}\right)\right),$$

kde $Y_m = 2y_m \cos\left(\frac{\pi d}{\lambda}\right)$ (→ protože tento výraz je pro dané vlnění konstantní ← nezávisí na čase) je amplituda výsledného vlnění a $\bar{x} = \frac{1}{2}(x_1 + x_2)$. Písmenem d jsme označili rodíl $x_2 - x_1$, říká se mu ***dráhový rozdíl***.

Výsledná amplituda vlnění vzniklého interferencí závisí na tom, v jaké fázi se v daném bodě obě vlnění nachází. ***Fázový rozdíl* $\Delta\varphi$** je rozdíl fází vlnění, tedy

$$\Delta\varphi = 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda}\right) - 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda}\right) = \frac{2\pi}{\lambda}(x_2 - x_1) = \frac{2\pi}{\lambda}d.$$

Vidíme, že fázový rozdíl je závislý na dráhovém rozdílu d. Podívejme se na následující obrázky, na kterých jsou znázorněny dva speciální případy dráhového rozdílu.

Na obr. **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** vidíme dvě vlnění (červené a zelené), které se šíří prostředím. Na obr. **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** je modrou křivkou znázorněno výsledné vlnění, které vzniklo interferencí zeleného a červeného postupného vlnění.

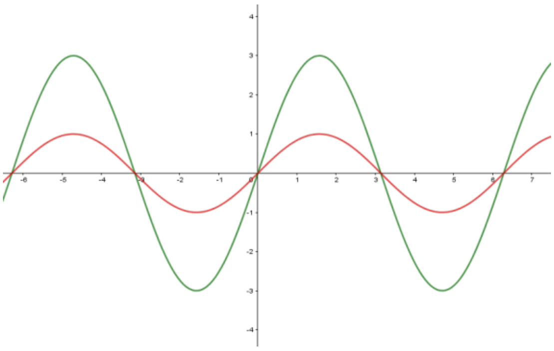
Zopakuj si

Rovnice harmonického kmitání

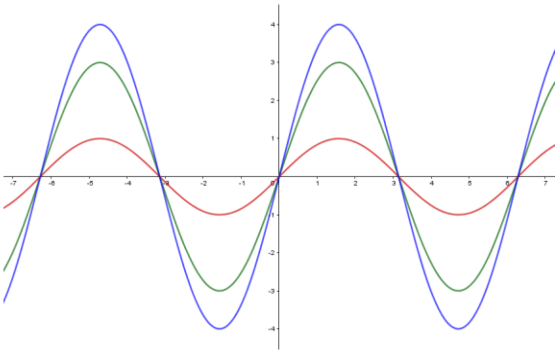
$$y = \mathrm{y_m} \sin(\omega t + \varphi_0),$$

fáze kmitání je argument funkce sinus: $\omega t + \varphi_0$, φ_0 je počáteční fáze kmitání.

Fáze kmitání nám udává, v jaké poloze se v daném čase kmitání nachází (maximum, minimum výchylky, někde mezitím).

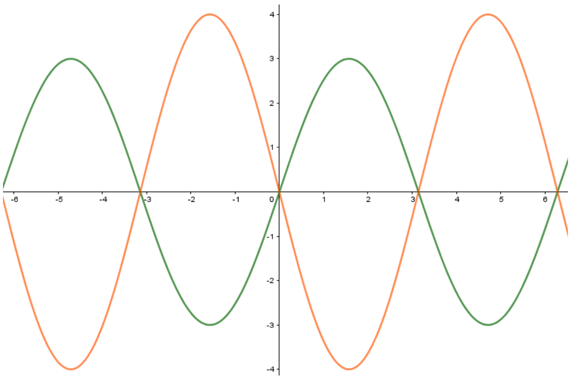


Obrázek 6.7 Skládání vlnění 2 [zdroj: autorka]

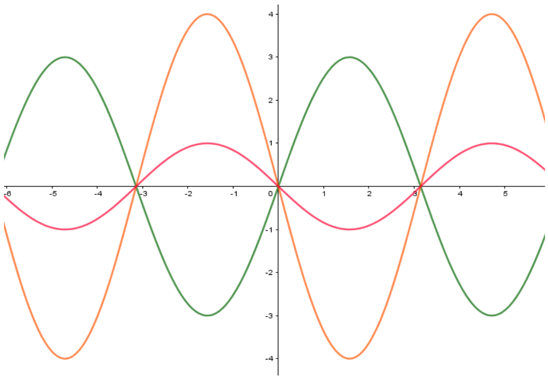


Obrázek 6.8 Skládání vlnění 3 [zdroj: autorka]

Na obr. jsou zeleně a oranžově znázorněny postupné vlnění. Na obr. **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** je růžově zobrazeno výsledné vlnění které vzniklo interferencí zeleného a oranžového vlnění.



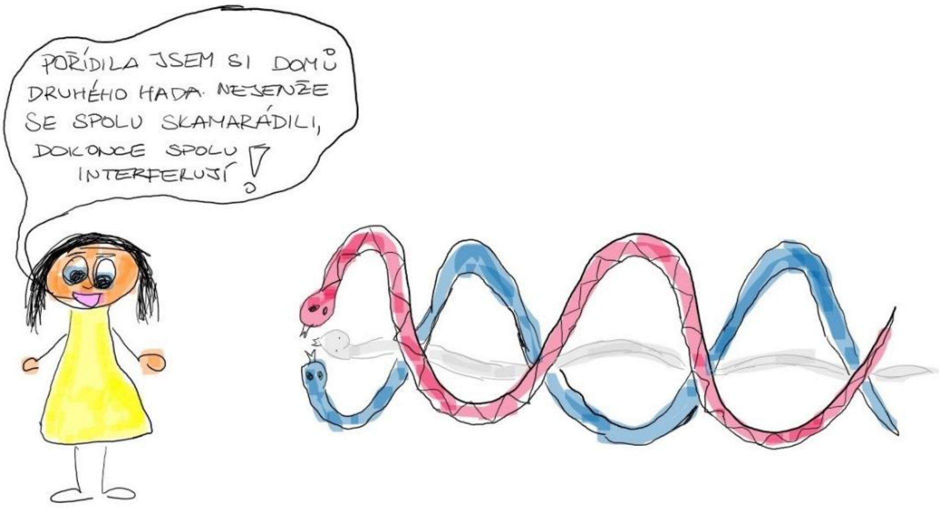
Obrázek 6.9 Skládání vlnění 4 [zdroj: autorka]



Obrázek 6.10 Skládání vlnění 5 [zdroj: autorka]

Dráhový rozdíl

- obr. 6.8: $d = 2k\frac{\lambda}{2}$ sudé násobky půlvln →**interferenční maximum**
- obr. 6.10: $d = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$ liché násobky půlvln →**interferenční minimum**



Obrázek 6.11 Ilustrace interference [zdroj: autorka]

Shrnutí:

- fázový rozdíl vlnění je úměrný dráhovému rozdílu

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} d$$

- pokud je dráhový rozdíl sudým násobkem půlvln, vzniká interferenční maximum

$$d = 2k\frac{\lambda}{2}$$

- pokud je dráhový rozdíl lichým násobkem půlvln, vzniká interferenční minimum

$$d = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$$

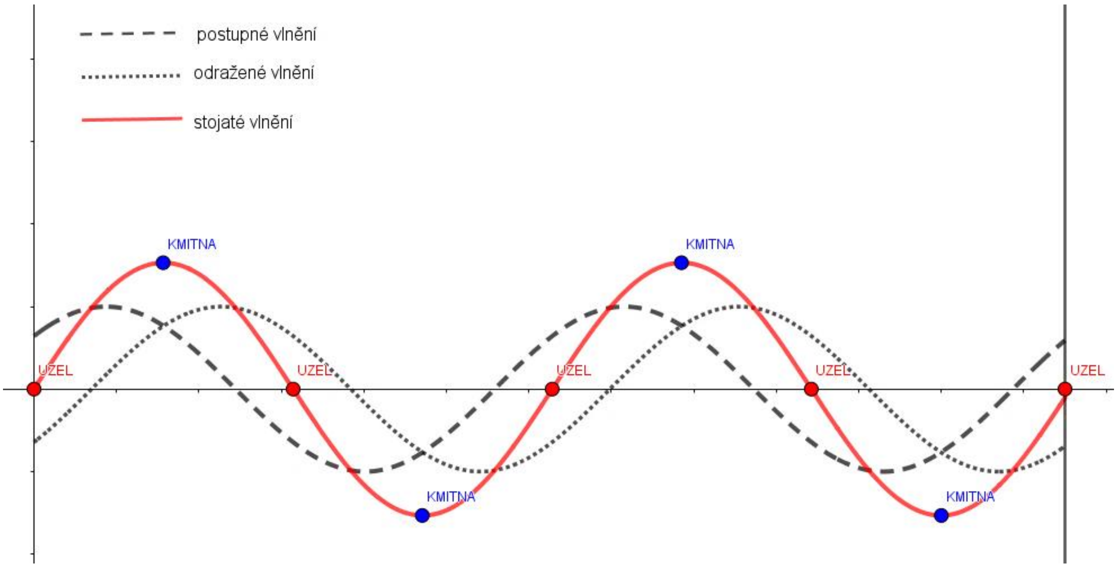
6.4 Stojaté vlnění

Úvod:

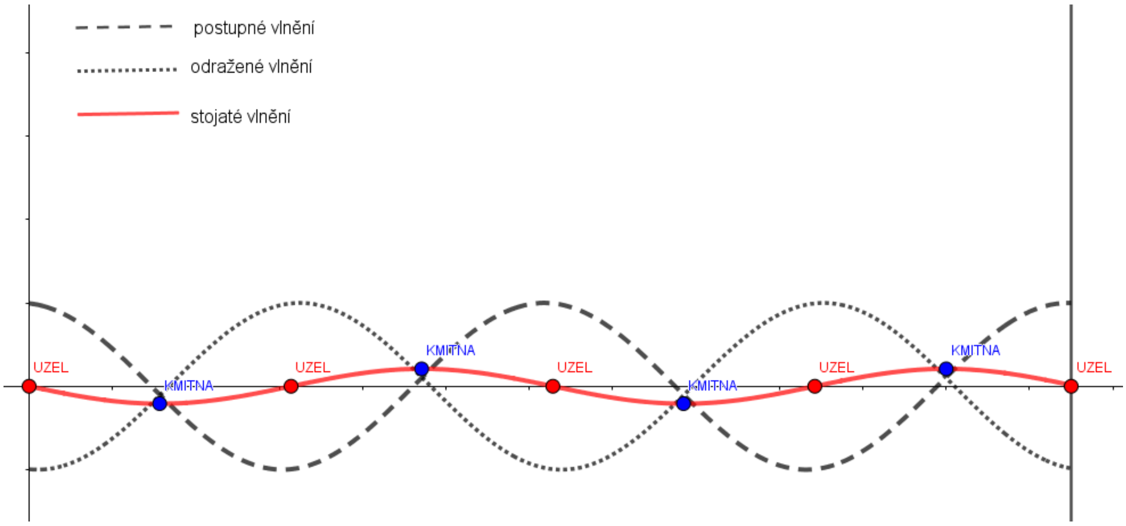
V této kapitole se dozvíte, co je to stojaté vlnění, jak vznikne a co jsou to kmitny a uzle.

Vznik stojatého vlnění

Představte si, že v ruce držíte provaz, který je na druhém konci pevně přidělaný. Rukou harmonicky pohybujete nahoru a dolu, takže se provazem šíří postupné vlnění. Na konci provazu se vlnění odrazí a postupuje směrem ke zdroji vlnění, tedy k zpět k vaší ruce. Postupné vlnění interferuje s odraženým vlněním a vzniká stojaté vlnění. Celá animace je dostupná na https://youtu.be/cwxNvVTFimw .

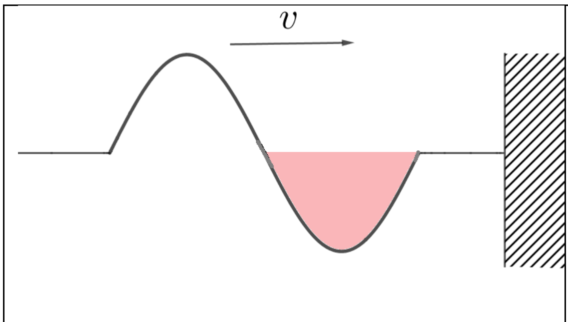
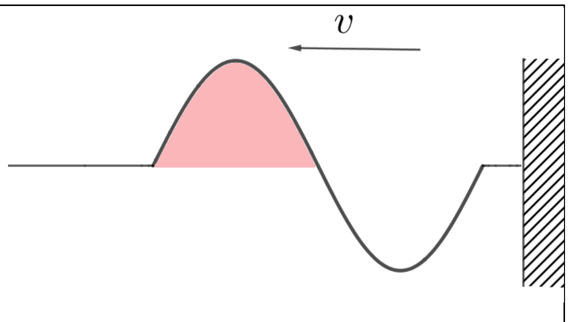
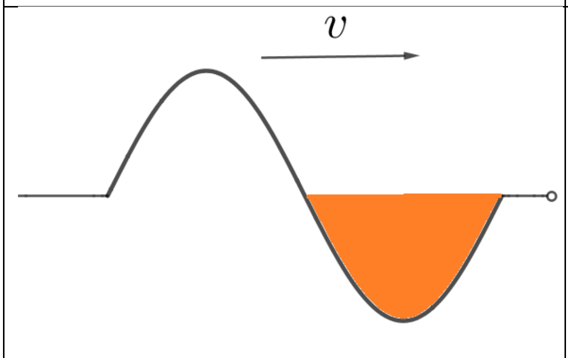
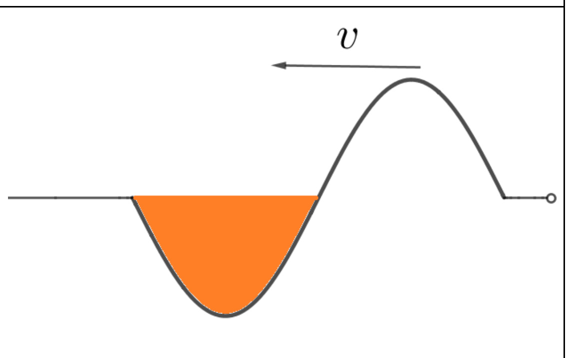


Obrázek 6.12 Stojaté vlnění, kmitny, uzle [zdroj: autorka]



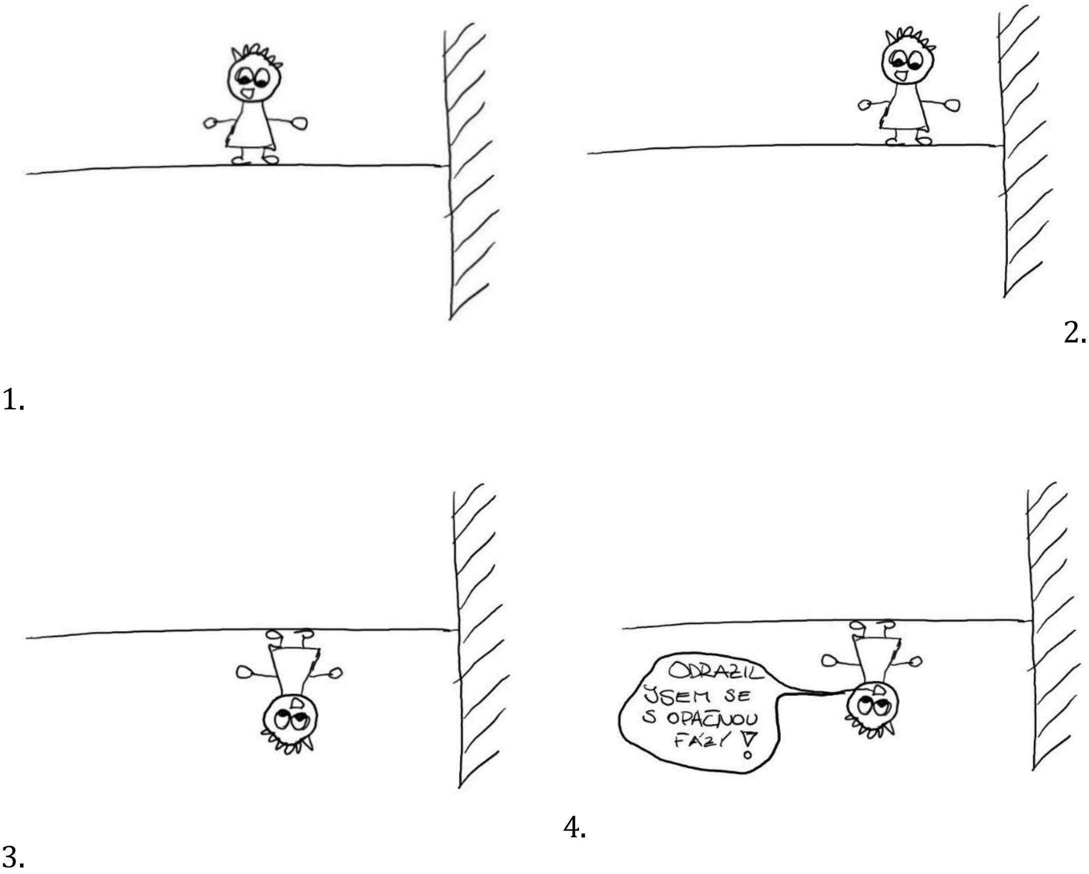
Obrázek 6.13 Stojaté vlnění, kmitny, uzle 2 [zdroj: autorka]

Odraz vlnění nastává nejenom na pevném konci, ale také i na volném konci. Odražené vlnění se však bude lišit. Na **pevném** konci se vlnění odráží s **opačnou fází**, na **volném** konci se vlnění odráží se **stejnou fází**.

	
Postupná vlna se pohybuje zleva doprava.	Postupná vlna se odrazila na pevném konci a postupuje zprava doleva.
	
Postupná vlna postupuje zleva doprava.	Postupná vlna se odrazila na volném konci a postupuje doleva.

Obrázek 6.14 Odražená vlna [zdroj: autorka]

U stojatého vlnění kmitá každý bod se stejnou fází, ale s rozdílnou amplitudou. Při kmitání provazem pozorujeme, že v určitých místech provazu je amplituda nulová a v některých místech je amplituda maximální. **Uzel** stojatého vlnění je bod, ve kterém je nulová amplituda vlnění. **Kmitna** stojatého vlnění je bod, který kmitá s maximální amplitudou.



Obrázek 6.15 Ilustrace odraz s opačnou fází [zdroj: autorka]

Shrnutí:

- kmitna je bod, který kmitá s maximální amplitudou vlnění
- uzel je bod, ve kterém je hodnota amplitudy nulová
- odraz vlnění na volném konci – se stejnou fází
- odraz vlnění na pevném konci – s opačnou fází

7 Experimenty podporující výuku kmitání a vlnění

V této podkapitole jsou shrnuty experimenty, které mohou být použity při výuce kmitání a vlnění na střední škole.

7.1.1 Demonstrátor kmitání

Sestavení tohoto demonstrátoru je inspirováno videem [16] z kanálu NightHawklnLight na Youtube.com. Tento jednoduchý demonstrátor kmitání si může kdokoli sestavit doma. Vyzkoušela jsem dvě varianty sestavení tohoto demonstrátoru. Jedná se o několik oscilátorů zavěšených vedle sebe, lišící se v délce závěsu. Konstrukce je vytvořena z dřevěných dřívek, které se dají koupit v balení po 100 ks v lékárnách i papírnictví. Tuto variantu jsem volila proto, že je snadno dostupná. Alternativou může konstrukce z dřevěných latěk. Jednotlivá dřívka jsem slepila pomocí tavné pistole tak, aby měly tvar V. Pro menší konstrukci je potřeba 12 dřívek, ze kterých vytvoříme dvě nohy ve tvaru písmene V. Tyto nohy spojíme pomocí 3 špejlí, které připevníme ve vrcholu konstrukce ve tvaru písmene V viz Obrázek 7.1 Demonstrátor kmitání. Nejsložitější částí je zavěšení matiček na niť. Délka závěsu si předem vypočítáme podle vzorce uvedeného níže. Jednotlivá kyvadla jsou vyrobena z matiček o velikosti 1 cm. Každý závěs je vždy uchycen na dvou místech, aby se omezilo vychylování kyvadla do jiných směrů, než je námi požadovaný. Na délku špejle rovnoměrně rozmístíme 8 kyvadel s různou délkou závěsu.

Délka závěsu je vypočítána podle vzorce

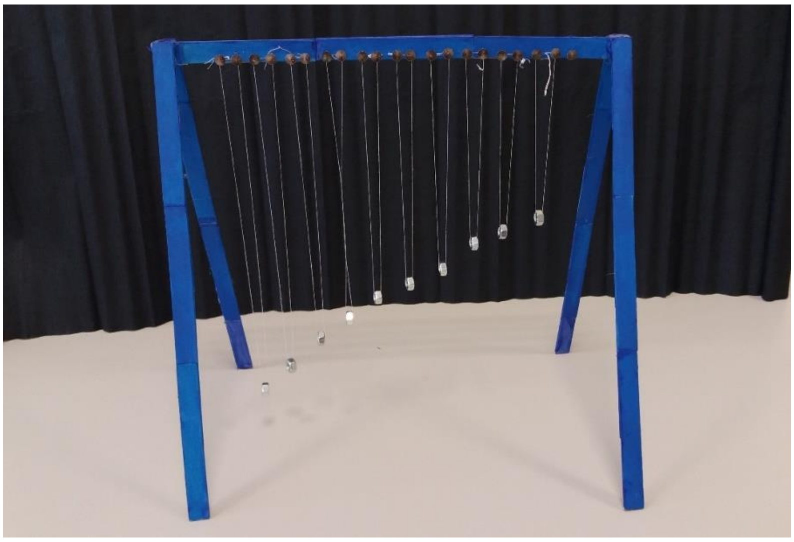
$$l_n = g \cdot \left[\frac{T_{max}}{2\pi(k+n+1)}\right]^2 .$$

Za T_{max} dosadíme čas, za kterých chceme, aby se obrazce začaly opakovat. Já jsem zvolila u nenabarvené konstrukce dobu $T_{max} = 30$ s a u modré konstrukce je $T_{max} = 25$ s. Pomocí tohoto vzorce vypočítáme délku závěsu l_n pro n-té kyvadlo. Dále pak g je tíhové zrychlení. Určíme si délku prvního kyvadla (v mém případě to je 0,27 m, dosadíme do rovnice a vypočítáme k. Další délky závěsu kyvadel vypočítáme podle vzorce, protože známe k, n i g. [17]

Niť je obtočena kolem špejlí, a ještě připevněna pomocí tavné pistole, aby se délka závěsu nezměnila posunutím nitě. Po rozkmitání kyvadel (například pomocí pravítka) po chvíli pozorujeme, že se celá řada kyvadel vlní a o chvíli později se kyvadla rozdělí na polovinu a střídavě kmitají až dospějí do bodu, kdy se všechna kyvadla vychýlí na jednu stranu a celý cyklus začne znovu. Tento pokus je možné nechat i sestavit žáky doma, protože lze realizovat z dobře dostupných komponentů.

Obměnu demonstrátoru lze provést tak, že při stavbě konstrukce použijeme pouze dřívka, která slepíme pomocí tavné pistole, viz Obrázek 7.2. Dřívka jsou k sobě slepeny dvojitě, aby byla konstrukce pevnější a zároveň jsou jim oříznuty zaoblené hrany, aby na sebe lépe navazovaly. Výsledná konstrukce je natřena modrou akrylovou barvou. Nitě jsou zavěšené na připínáčky, které jsou v rovnoměrných vzdálenostech zapíchnuty do dřívek.

Obrázek 7.1 Demonstrátor kmitání (zdroj: autorka)



Obrázek 7.2 Demonstrátor kmitání 2 [zdroj: autorka]

Měření doby kmitu jednotlivých kyvadel:

U každého kyvadla jsem naměřila dobu 10 kmitů a následně vypočítala dobu jednoho kmitu. Měření 10 kmitů jsem zvolila proto, že je to přesnější, než měřit dobu 1 kmitu. Při měření 10 kmitů odhadujeme krajní polohu kyvadla pouze dvakrát.

1. kyvadlo	10 kmitů [s]	1 kmit [s]
1	10,30	1,03
2	10,53	1,05
3	10,40	1,04
4	10,47	1,05
5	10,50	1,05
6	10,43	1,04
7	10,50	1,05
8	10,50	1,05
9	10,47	1,05
10	10,43	1,04
průměr:	10,45	1,05
směrodatná odchylka:	0,064	0,0064

2. kyvadlo	10 kmitů [s]	1 kmit [s]
1	10,10	1,01
2	10,10	1,01
3	10,00	1,00
4	10,10	1,01
5	9,94	0,99
6	10,14	1,01
7	9,90	0,99
8	10,00	1,00
9	9,96	1,00
10	10,00	1,00
průměr:	10,02	1,00
směrodatná odchylka:	0,077	0,0077

3. kyvadlo	10 kmitů [s]	1 kmit [s]
1	9,64	0,96
2	9,50	0,95
3	9,56	0,96
4	9,50	0,95
5	9,54	0,95
6	9,43	0,94
7	9,50	0,95
8	9,53	0,95
9	9,60	0,96
10	9,58	0,96
průměr:	9,54	0,95
směrodatná odchylka:	0,057	0,0057

4. kyvadlo	10 kmitů [s]	1 kmit [s]
1	9,20	0,92
2	9,33	0,93
3	9,10	0,91
4	9,33	0,93
5	9,27	0,93
6	9,37	0,94
7	9,20	0,92
8	9,30	0,93
9	9,33	0,93
10	9,30	0,93
průměr:	9,27	0,93
směrodatná odchylka:	0,078	0,0078

5. kyvadlo	10 kmitů [s]	1 kmit [s]
1	8,87	0,89
2	8,90	0,89
3	8,97	0,90
4	9,00	0,90
5	8,94	0,89
6	8,84	0,88
7	8,90	0,89
8	8,97	0,90
9	8,93	0,89
10	8,83	0,88
průměr:	8,92	0,89
směrodatná odchylka:	0,054	0,0054

6. kyvadlo	10 kmitů [s]	1 kmit [s]
1	8,73	0,87
2	8,72	0,87
3	8,67	0,87
4	8,60	0,86
5	8,60	0,86
6	8,61	0,86
7	8,68	0,87
8	8,71	0,87
9	8,57	0,86
10	8,72	0,87
průměr:	8,66	0,87
směrodatná odchylka:	0,057	0,0057

7. kyvadlo	10 kmitů [s]	1 kmit [s]
1	8,30	0,83
2	8,33	0,83
3	8,33	0,83
4	8,27	0,83
5	8,36	0,84
6	8,26	0,83
7	8,24	0,82
8	8,27	0,83
9	8,41	0,84
10	8,33	0,83
průměr:	8,31	0,83
směrodatná odchylka:	0,049	0,0049

8. kyvadlo	10 kmitů [s]	1 kmit [s]
1	8,03	0,80
2	8,00	0,80
3	8,00	0,80
4	8,07	0,81
5	8,04	0,80
6	8,04	0,80
7	8,00	0,80
8	8,04	0,80
9	8,03	0,80
10	8,07	0,81
průměr:	8,03	0,80
směrodatná odchylka:	0,025	0,0025

9. kyvadlo	10 kmitů [s]	1 kmit [s]
1	7,73	0,77
2	7,70	0,77
3	7,64	0,76
4	7,78	0,78
5	7,54	0,75
6	7,70	0,77
7	7,77	0,78
8	7,67	0,77
9	7,70	0,77
10	7,66	0,77
průměr:	7,69	0,77
směrodatná odchylka:	0,065	0,0065

Naměřené hodnoty jednotlivých kyvadel a délka jejich závěsu:

kyvadlo	Perioda kyvadla T [s]	Délka závěsu kyvadla l [m]
1	$(1{,}042 \pm 0{,}006)\ s$	0,270
2	$(0{,}999 \pm 0{,}007)s$	0,248
3	$(0{,}962 \pm 0{,}006)s$	0,230
4	$(0{,}926 \pm 0{,}008)s$	0,213
5	$(0{,}893 \pm 0{,}005)s$	0,198
6	$(0{,}863 \pm 0{,}006)s$	0,185
7	$(0{,}834 \pm 0{,}005)s$	0,173
8	$(0{,}807 \pm 0{,}003)s$	0,162
9	$(0{,}782 \pm 0{,}007)s$	0,152

Očekávané hodnoty periody T vypočítáme podle vzorce

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}},$$

známe-li délku závěsu jednotlivých kyvadel:

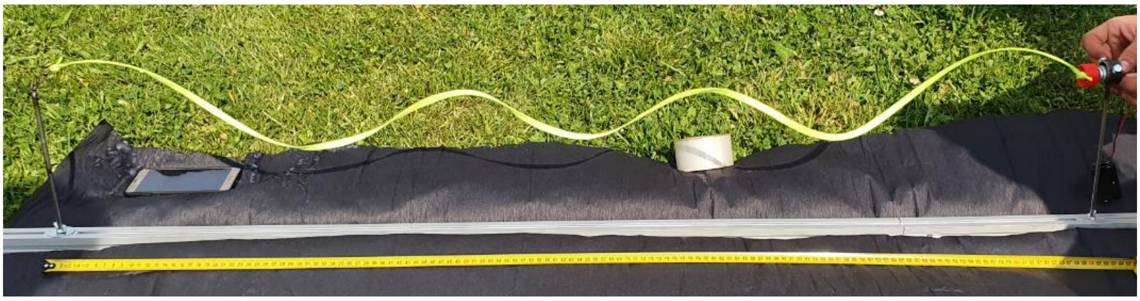
kyvadlo	Očekávaná perioda kyvadla T [s]
1	1,04
2	1,00
3	0,96
4	0,93
5	0,89
6	0,86
7	0,83
8	0,81
9	0,78

Naměřené hodnoty odpovídají očekávaným hodnotám periody jednotlivých kyvadel.

7.1.2 Demonstrátor stojatého vlnění

Při sestavování tohoto demonstrátoru jsem se inspirovala videem na Youtube.com na kanálu FlinnScientific [18]. K vytvoření demonstrátoru stojatého vlnění jsem použila: elektromotor, hliníkovou lištu, barevnou tkaničku od bot, dva rybářské háčky, plastový váleček s dírou uprostřed a jednou dírkou na boku, držák na elektromotor, tužkové baterie a držák na rybářský háček. Základem demonstrátoru stojatého vlnění byla hliníková lišta, kterou jsem vytvořila pro svou bakalářskou práci Školní pokusy s lasery [19]. Na tuto konstrukci jsem si nechala vytvořit dva držáky, jeden k upevnění elektromotoru a druhý k upevnění rybářského háčku, na který je přivázaná tkanička od bot. Elektromotor má průměr hřídele 2 mm, takže jsem si nechala vytisknout na 3D tiskárně dutý váleček o průměru 3 cm, který má uprostřed díru o průměru 2 mm a v boční části má dírku, kterou lze prostrčit rybářský háček. Lze použít i víčko od PET lahve, do kterého se udělají dírky. Rybářské háčky jsou použity z toho důvodu, že hřídel elektromotoru se točí dokola a kdyby byla tkanička přidělaná na pevno, docházelo by k postupnému zamotávaní tkaničky. Rybářské háčky se snadno protáčejí, proto nedochází k zamotávání tkaničky. Tkanička od bot vyšla k tomuto experimentu jako nejvhodnější, protože je dostatečně široká, aby bylo výsledné stojaté vlnění dobře viditelné. Dále je pak pevná, takže nedochází k jejímu přetrhnutí v případě mírného zamotání tkaničky.

Obě strany tkaničky přivážeme k rybářskému háčku. Jeden rybářský háček prostrčíme dírkou v plastovém válečku, druhý háček připevníme ke stojánku. Plastový váleček nasadíme na hřídel elektromotoru a elektromotor upevníme do držáku. Oba držáky upevníme do hliníkové lišty. Oba držáky se mohou pohybovat v liště a jejich posunutím můžeme změnit počet kmiten a uzlů stojatého vlnění.



Obrázek 7.3 Stojatá vlna [zdroj: autorka]

Měření tohoto pokusu lze orientačně provést i bez vysokorychlostní kamery. Rychlé pohyby můžeme natočit pomocí obyčejného videozáznamu, problém nastává až tehdy, kdy se snažíme zjistit periodu kmitání. Záznam nemá dostatečný počet snímků za sekundu, nevíme tedy, zda proběhla jedna perioda kmitání nebo například již dvě periody. Pomocí novějších chytrých telefonů lze natáčet zpomalené záběry a následně je na počítači analyzovat. Ale i při tomto způsobu je měření dat komplikovanější. Nejdříve musíme zjistit, jaká je doba zpomaleného záběru. V našem případě mobilní telefon natočil zpomalený záznam, který trval 0,8 s. Záznam je dostatečně zpomalený na to, abychom spočítali počet period kmitání. Protože víme, v jakém časovém intervalu počítáme počet period, snadno vypočítáme jednu periodu kmitání. Další nepřesnost měření vzniká při měření vlnové délky. Protože je tkanička neustále v pohybu, nemůžeme přiložit poblíž cokoliv, čím by se dala vlnová délka změřit. Svinovací metr je připevněn k hliníkové konstrukci. Odečtené hodnoty ze stupnice svinovacího metru jsou velmi nepřesné, protože se stupnice nachází daleko od stojatého vlnění. Avšak pro ilustraci výpočtu rychlosti vlnění a pro školní ukázku jsou dostačující.

Naměřené hodnoty a výpočet:

Vlnová délka:

$x_1 [cm]$	$x_2 [cm]$	$\lambda = x_2 - x_1 [m]$
57	95	0,38
49	92	0,43
53	92	0,39
43	87	0,44
53	92	0,39
52	94	0,42
64	100	0,36
54	94	0,40
49	92	0,43
55	96	0,41
53,5	93,5	0,40
	Průměr:	0,40
	Směrodatná odchylka:	0,023

Z naměřených hodnot byla určena vlnová délka vlnění jako $(0{,}40 \pm 0{,}02)$ m.

7.1.3 Podélné a příčné vlnění – pružina

Pro tento experiment je potřeba pouze pružina, kterou lze zakoupit v hračkářství. Po rozkmitání pružinky rukou pozorujeme šíření vlnění pružinkou. Podle toho, jakým směrem pohybujeme rukou, můžeme vytvořit buď podélné nebo příčné vlnění. Při demonstraci podélného vlnění na pružině je šíření vlnění lépe vidět na videu než ve skutečnosti. Po natočení videa, lze část záznamu zpomalit, takže je šíření vlnění viditelnější.

7.1.4 Stojaté vlnění – pružina

Stejná pružina jako v pokusu popsaném v podkapitole 7.1.3 lze použít i ke vzniku stojatého vlnění. Opět podle směru pohybu ruky, ve které držíme jeden konec

Obrázek 7.4 Příčná stojatá vlna na pružince [zdroj: autorka]

pružiny, a správné frekvenci kmitání ruky vytvoříme buď podélné stojaté vlnění nebo příčné stojaté vlnění. U podélného stojatého vlnění je obtížnější vytvořit stojaté vlnění. Kmitny a uzle podélného stojatého vlnění nejsou z větší dálky dobře vidět. Je vhodné tento pokus doplnit i videem se zpomaleným záznamem tohoto experimentu, na kterém je dobře vidět šíření vlnění na pružině a také kmitny i uzle stojatého vlnění.

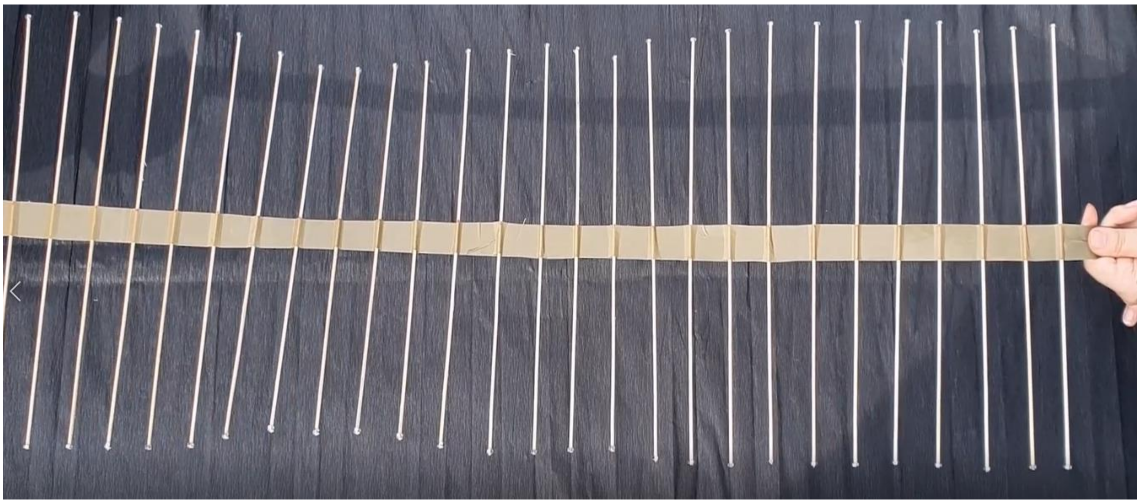
Obrázek 7.5 Podélná stojatá vlna na pružince [zdroj: autorka]

Experiment s pružinou by bylo možné zařadit do výuky i ve formě frontálního experimentu, protože je tato pružina cenově dostupná, případně si ji mohou žáci přinést z domu, pokud ji doma mají a předem je požádáme, aby si ji přinesli.

7.1.5 Vlnostroj

Tento experiment je opět lehce sestavitelný, protože k jeho provedení jsou potřeba pouze snadno dostupné komponenty. Vlnostroj slouží k demonstraci příčného vlnění. Pokud vlnostroj rozkmitáváme s vhodnou frekvencí, lze vytvořit příčné stojaté vlnění. Sestavení tohoto demonstrátoru je převzato z videa [20] Wave Machine Demonstration z kanálu National STEM Centre na Youtube.com.

K sestavení vlnostroje je potřeba pevnější lepící páska, špejle a závaží na konce špejlí. Pruh lepící pásky jsem si položila na stůl lepivou částí nahoru. Konce pásky jsem připevnila ke stolu, aby se páska nesmotala nebo neposunula. Uprostřed špejle jsem si udělala fixem čárku a přiložila ji k lepicí pásce tak, aby byla čárka uprostřed pásky. Další špejle jsem si také označila čárkou, ale ne uprostřed špejle, ale na kraji lepící pásky. To je z toho důvodu, že střed lepící pásky pouze odhadujeme, kdežto kraj pásky určíme přesněji. Jednotlivé špejle jsem položila na lepivou část pásky ve vzdálenosti šířky dvou prstů. Počet špejlí se závislý na tom, jak dlouhý vlnostroj chceme mít. Při delším vlnostroji je nutné zvolit i těžší závaží na konce špejlí. Když je nalepené požadované množství špejlí, lepicí pásku jsem přilepila i z druhé strany tak, aby byly k sobě přilepeny lepicími stranami. Tím se zvýší pevnost pásky. Na konce špejlí jsem nasadila závaží. K tomuto účelu lze použít například marshmallow

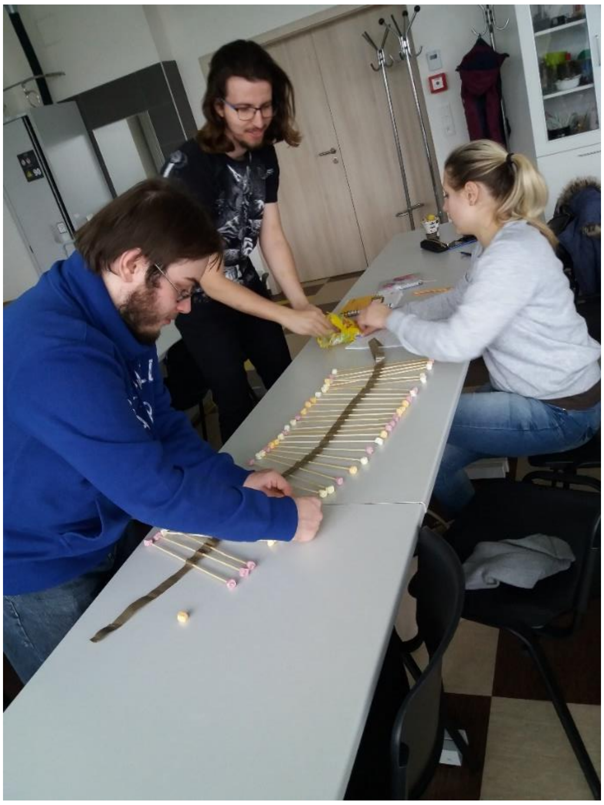


Obrázek 7.6 Vlnostroj ze špejlí [zdroj: autorka]

bonbony, vexty nebo matičky o vhodném vnitřním průměru. Matičky jsou nasazeny na oba konce špejlí. Při výběru špejlí doporučuji špejle z bambusu, protože jsou pevnější a těžší, takže se vlnění lépe přenáší a délka vlnostroje může být delší.

Výrobu vlnostroje můžeme zařadit do výuky tak, aby se zapojili žáci. Sestavení vlnostroje trvá přibližně 15 minut. Čas je pouze orientační, protože se může měnit v závislosti na délce vlnostroje. Na připevňování závaží se může podílet celé třída, opět v závislosti na délce vlnostroje, aby byl dostatek špejlí pro každého.

Obrázek 7.7 Příčná vlna [zdroj: autorka]



Obrázek 7.8 Studenti PřF UHK při sestrojení vlnostroje [zdroj: autorka]

Při vzniku stojatého vlnění na vlnostroji pozorujeme kmitny a uzle stojatého vlnění. Vlnostroj lze použít k výpočtu rychlosti šíření vlnění.

Naměřené hodnoty vlnové délky:

	Vlnová délka λ [cm]	$\Delta\ \lambda$ [cm]	$\Delta^2\ \lambda$ [cm^2]
1	44,9	0,04	0,002
2	44,8	0,14	0,020
3	45,0	-0,06	0,004
4	44,9	0,04	0,002
5	44,8	0,14	0,020
6	45,0	-0,06	0,004
7	44,7	0,24	0,058
8	45,1	-0,16	0,026
9	45,2	-0,26	0,068
10	45,0	-0,06	0,004
	$\bar{\lambda} = 44{,}9$		$\sum \Delta^2\ \lambda = 0{,}204$

Směrodatná odchylka:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{1}^{N}(x_i - \bar{x})^2}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{10} \cdot 0{,}204} = 0{,}1 \text{ cm}$$

Vlnová délka je $(44{,}9 \pm 0{,}1)$ cm.

Periodu vlnění lze změřit přímo při provádění experimentu nebo ji lze zjistit z natočeného videa. V rámci této práce byl zvolen druhý postup.

	Perioda T [s]	$\Delta\, T\ [s]$	$\Delta^2\ \lambda\ [s^2]$
1	0,87	0,11	0,0123
2	0,94	0,04	0,0017
3	1,00	-0,02	0,0004
4	0,96	0,02	0,0004
5	1,07	-0,09	0,0079
6	1,00	-0,02	0,0004
7	1,03	-0,05	0,0024
8	0,97	0,01	0,0001
9	1,03	-0,05	0,0024
10	0,94	0,04	0,0017
	$\bar{T}$ =0,98		$\sum \Delta^2\ \lambda = 0{,}0297$

Směrodatná odchylka:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{10} \cdot 0{,}0297} = 0{,}055 \text{ s}$$

Perioda vlnění je $(0{,}98 \pm 0{,}06)$ s.

Rychlost vlnění vypočítáme podle vzorce $v = \frac{\lambda}{T}$, tedy

$$v = \frac{0{,}449\ \mathrm{m}}{0{,}98\ \mathrm{s}},$$

$$v = 0{,}46\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}.$$

Rychlost vlnění na vlnostroji vytvořeného ze špejlí je $v = 0{,}46\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$.

8 Výsledky pretestu a posttestu

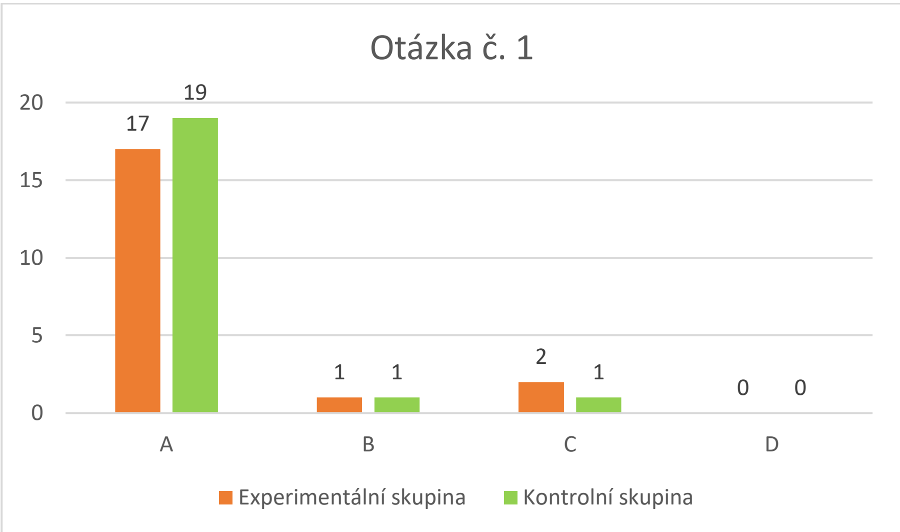
V této kapitole jsou uvedeny výsledky pretestu a postestu. Nejprve jsou vyhodnoceny každé otázky zvlášť, poté jsou uvedeny celkové výsledky žáků kontrolní a experimentální třídy.

8.1 Výsledky pretestu

Celý pretest naleznete v příloze diplomové práce. V této kapitole budou jenom zadání jednotlivých otázek a shrnuté odpovědi žáků. V prvním řádků tabulky je absolutní četnost jednotlivých odpovědí, v druhém řádku je relativní četnost odpovědí. Čísla se vztahují vždy k jednotlivým třídám.

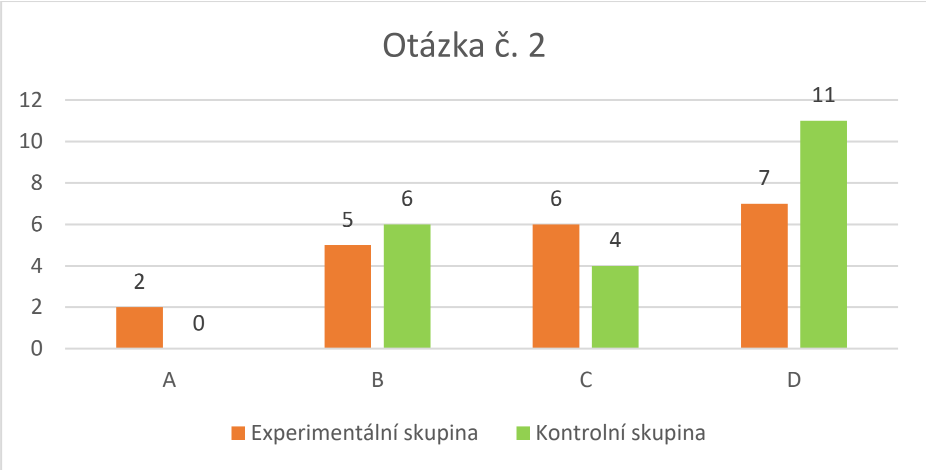
Zadání otázky č. 1: Jaká je hodnota amplitudy vlnění, které je znázorněno na obrázku?

Otázka č. 1	A	B	C	D
Experimentální třída	17	1	2	0
	85 %	5 %	10 %	0 %
Kontrolní třída	19	1	1	0
	90 %	5 %	5 %	0 %



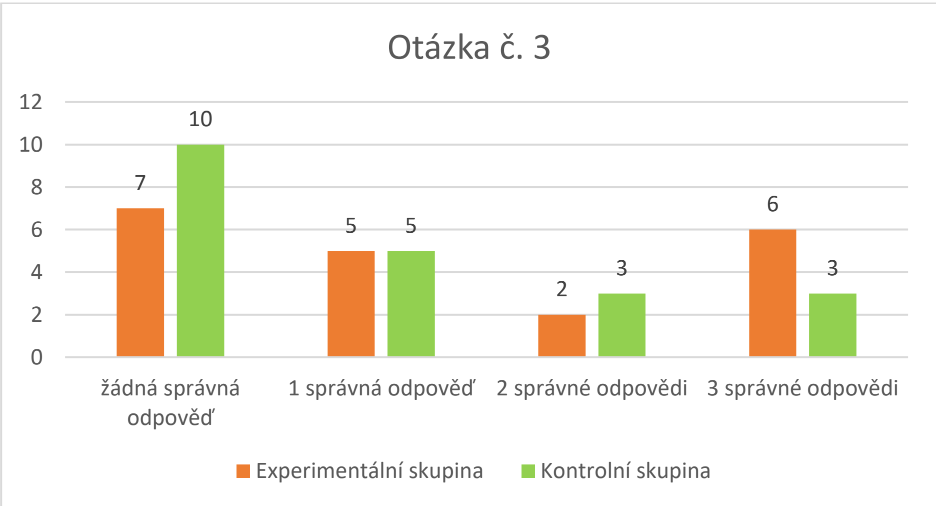
Zadání otázky č. 2: Jakou rychlostí se šíří vlnění, které má vlnovou délku 0,5 m a frekvenci 60 Hz?

Otázka č. 2	A	B	C	D
Experimentální třída	2	5	6	7
	10 %	25 %	30 %	35 %
Kontrolní třída	0	6	4	11
	0 %	29 %	19 %	52 %



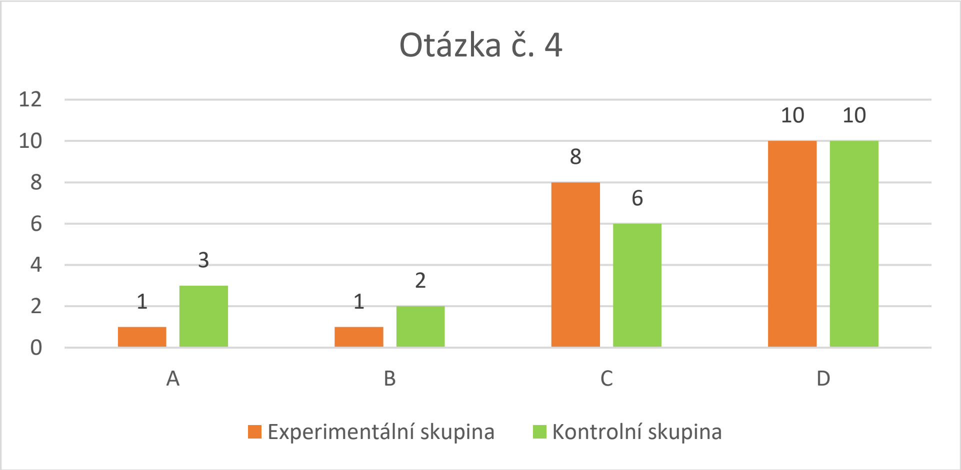
Zadání otázky č. 3: Napiš 3 příklady mechanického vlnění.

Otázka č. 3	žádná správná odpověď	1 správná odpověď	2 správné odpovědi	3 správné odpovědi
Experimentální třída	7	5	2	6
	35 %	25 %	10 %	30 %
Kontrolní třída	10	5	3	3
	48 %	24 %	14 %	14 %



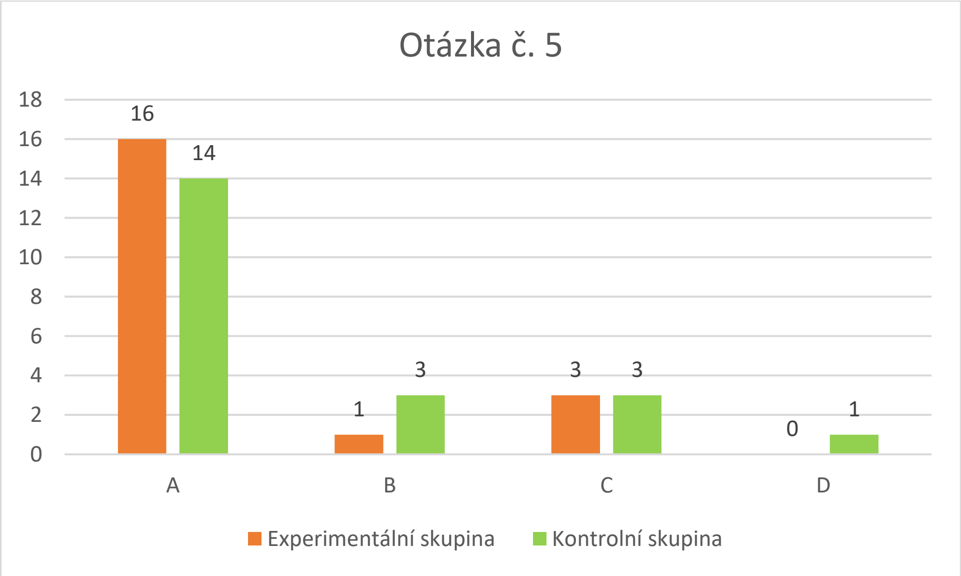
Zadání otázky č. 4: Vyberte obrázek, na kterém je správně vyznačena vlnová délka.

Otázka č. 4	A	B	C	D
Experimentální třída	1	1	8	10
	5 %	5 %	40 %	50 %
Kontrolní třída	3	2	6	10
	14 %	10 %	29 %	48 %



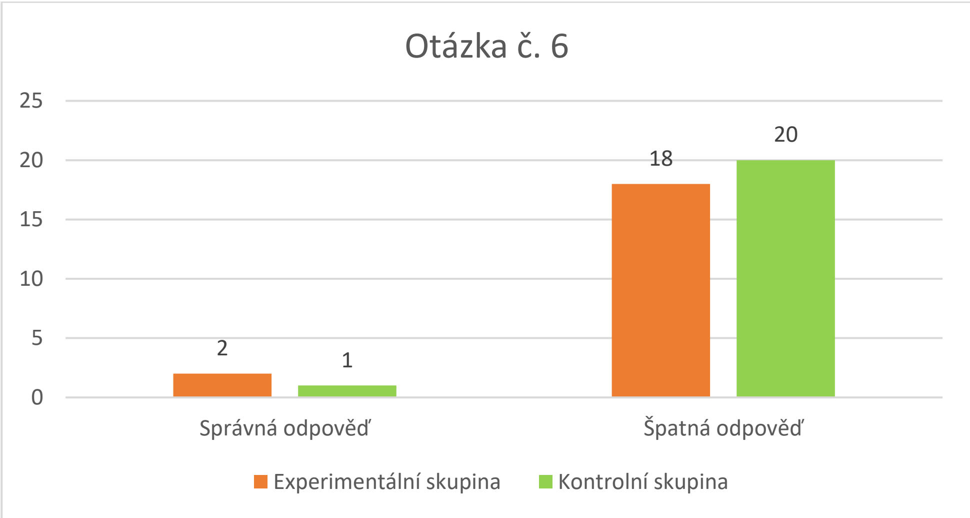
Zadání otázky č. 5: Při šíření příčného vlnění se přenáší:

Otázka č. 5	A	B	C	D
Experimentální třída	16	1	3	0
	80 %	5 %	15 %	0 %
Kontrolní třída	14	3	3	1
	67 %	14 %	14 %	5 %



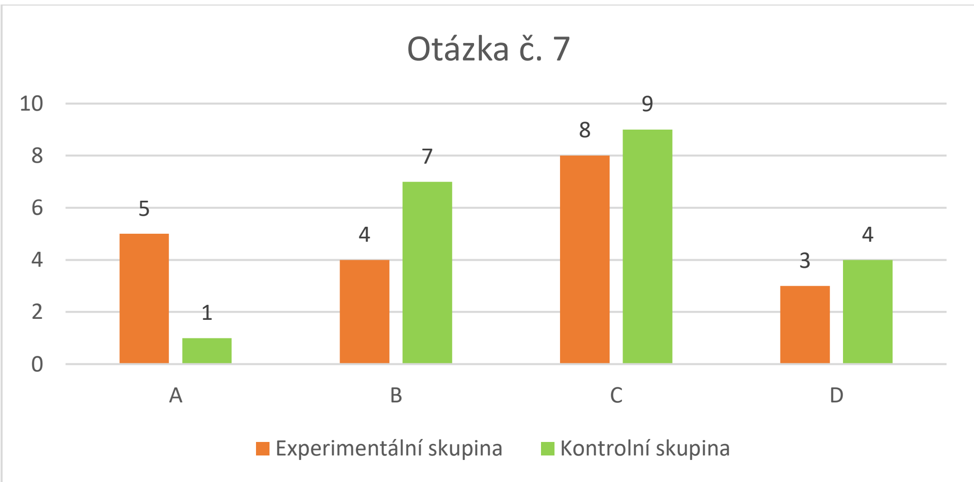
Zadání otázky č. 6: Popiš, jak se liší směr okamžité výchylky u příčného vlnění a podélného vlnění.

Otázka č. 5	Správná odpověď	Špatná odpověď
Experimentální třída	2	18
	10 %	90 %
Kontrolní třída	1	20
	5 %	95 %



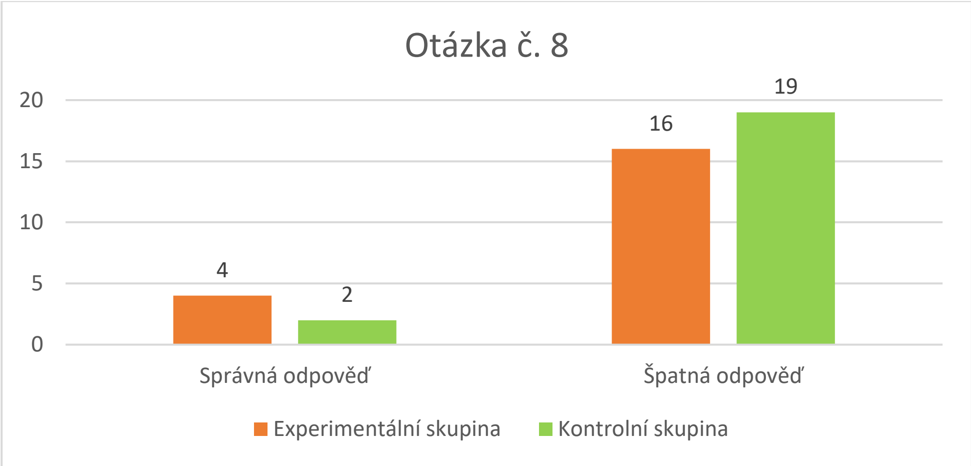
Zadání otázky č. 7: Na obrázku je znázorněna postupná vlna. Vyber obrázek, na kterém je správně zobrazeno, jak bude vypadat odražená vlna na pevném konci.

Otázka č. 7	A	B	C	D
Experimentální třída	5	4	8	3
	25 %	20 %	40 %	15 %
Kontrolní třída	1	7	9	4
	5 %	33 %	43 %	19 %



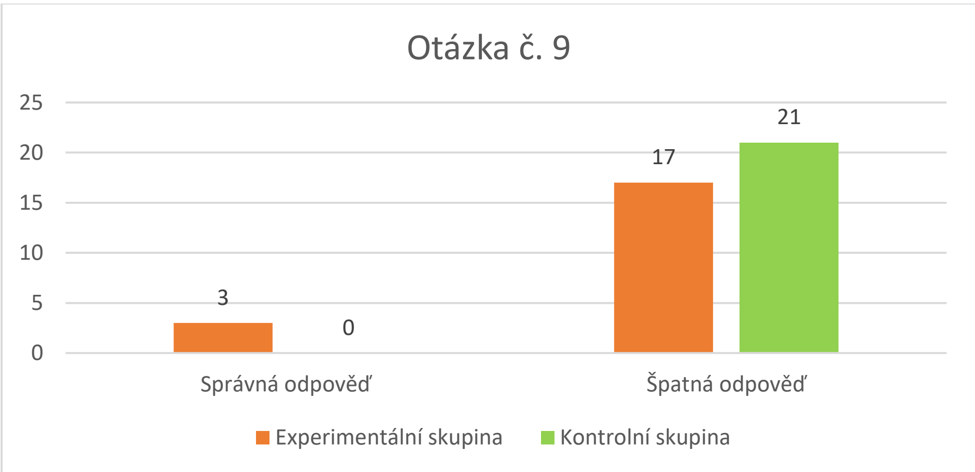
Zadání otázky č. 8: Popiš princip vzniku stojatého vlnění.

Otázka č. 8	Správná odpověď	Špatná odpověď
Experimentální třída	4	16
	20 %	80 %
Kontrolní třída	2	19
	10 %	90 %



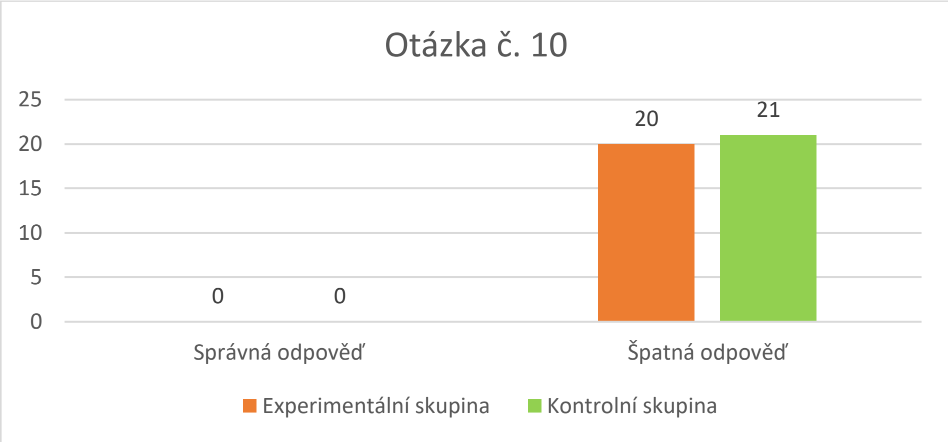
Zadání otázky č. 9: Vysvětli, co je kmitna a uzel stojatého vlnění.

Otázka č. 9	Správná odpověď	Špatná odpověď
Experimentální třída	3	17
	15 %	85 %
Kontrolní třída	0	21
	0 %	100 %



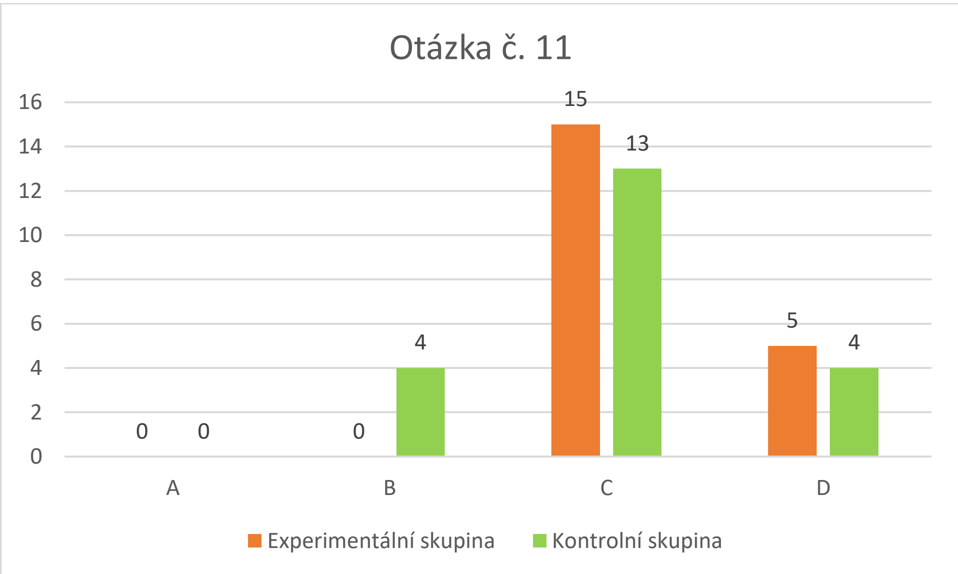
Zadání otázky č. 10: Jaká je podmínka pro dráhový rozdíl dvou vlnění, aby vzniklo interferenční minimum?

Otázka č. 10	Správná odpověď	Špatná odpověď
Experimentální třída	0	20
	0 %	100 %
Kontrolní třída	0	21
	0 %	100 %



Zadání otázky č. 11: Na obrázcích jsou znázorněna dvě postupná vlnění. Červenou barvou je zobrazeno vlnění, které vzniklo interferencí (skládáním) těchto vlnění. Vyber obrázek, na kterém je správně zakreslen výsledek interference vlnění.

Otázka č. 11	A	B	C	D
Experimentální třída	0	0	15	5
	0 %	0 %	75 %	25 %
Kontrolní třída	0	4	13	4
	0 %	19 %	62 %	19 %

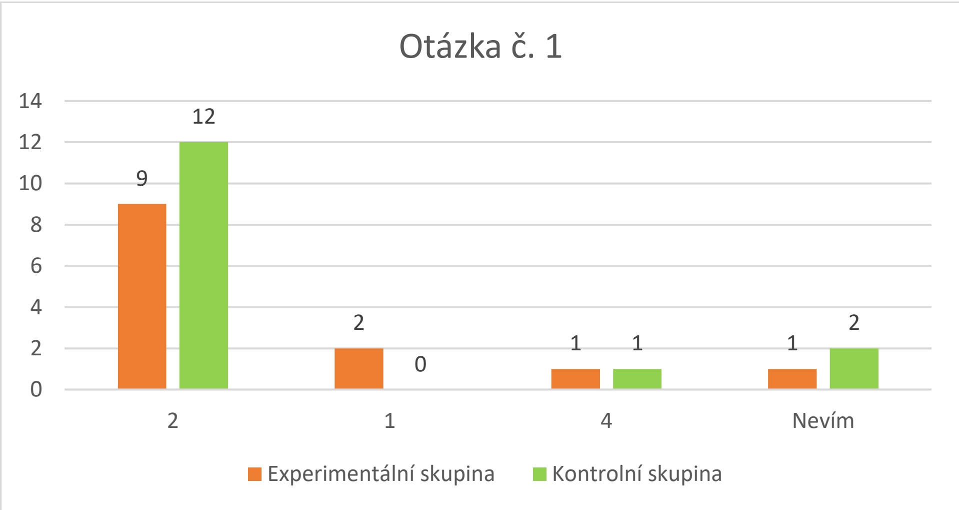


8.2 Výsledky posttestu

Posttest vyplnilo 13 žáků experimentální třídy a 15 žáků kontrolní třídy. Příčin, proč vyplnilo posttest méně žáků než pretest, může být několik. Jednou z nich je období, kdy měli žáci za úkol posttest vyplnit, protože žáci vyplňovali posttest okolo poloviny června. Odpovědi na oba testy jsou anonymní, tedy i vyplnění testů je dobrovolné. Pokud by oba testy byly zadány za normálních podmínek přímo ve škole, vyplnili by testy všichni přítomní žáci. Celé zadání posttestu naleznete v příloze. Níže jsou vypsány jednotlivé otázky a znázorněny počty odpovědí žáků experimentální a kontrolní skupiny.

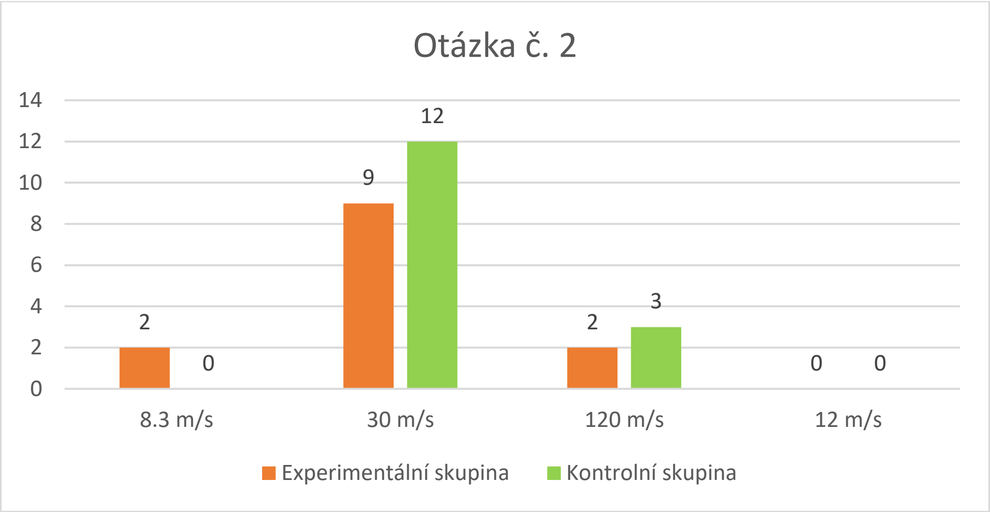
Zadání otázky č. 1: Jaká je hodnota amplitudy vlnění, které je znázorněno na obrázku?

Otázka č. 1	2	1	4	Nevím
Experimentální třída	9	2	1	1
	69 %	15 %	8 %	8 %
Kontrolní třída	12	0	1	2
	80 %	0 %	7 %	13 %



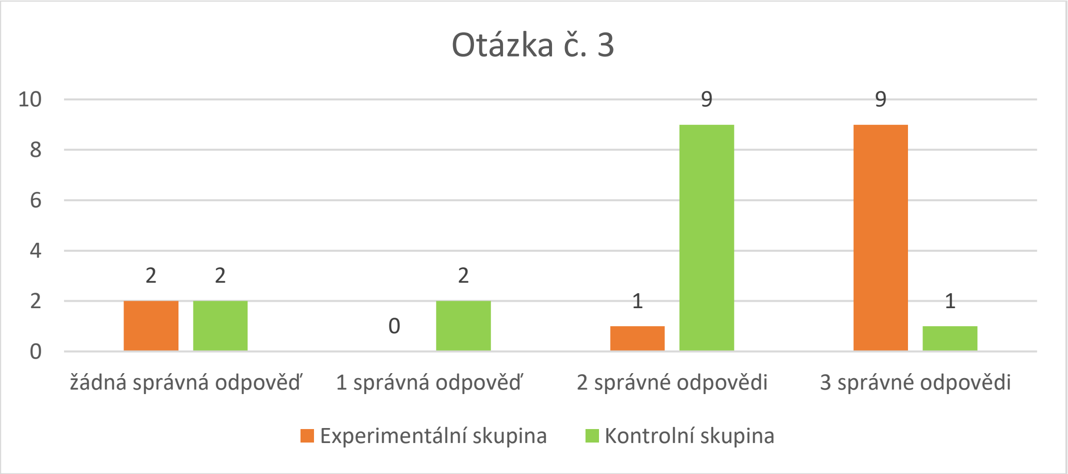
Zadání otázky č. 2: Jakou rychlostí se šíří vlnění, které má vlnovou délku 0,5 m a frekvenci 60 Hz?

Otázka č. 2	8.3 m/s	30 m/s	120 m/s	12 m/s
Experimentální třída	2	9	2	0
	15 %	69 %	15 %	0 %
Kontrolní třída	0	12	3	0
	0 %	80 %	20 %	0 %



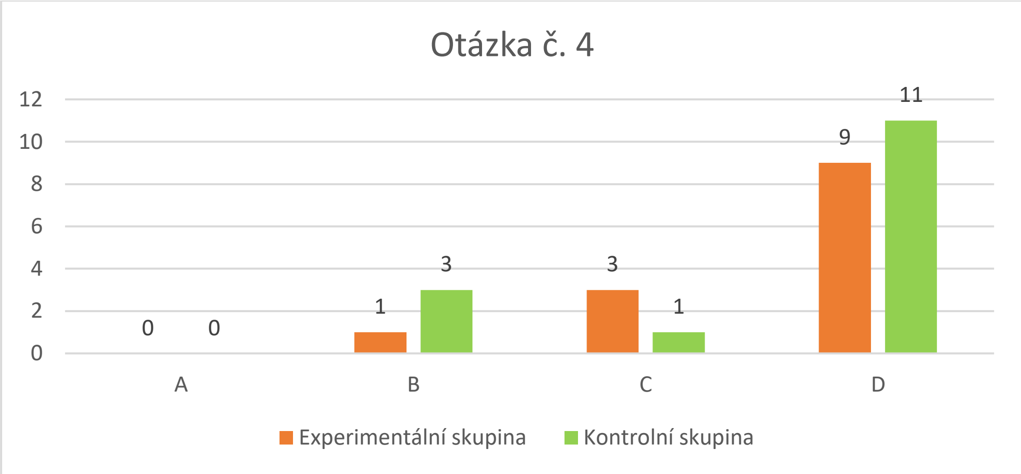
Zadání otázky č. 3: Napiš 3 příklady mechanického vlnění.

Otázka č. 3	žádná správná odpověď	1 správná odpověď	2 správné odpovědi	3 správné odpovědi
Experimentální třída	2	0	1	9
	35 %	25 %	10 %	30 %
Kontrolní třída	2	2	9	1
	48 %	24 %	14 %	14 %



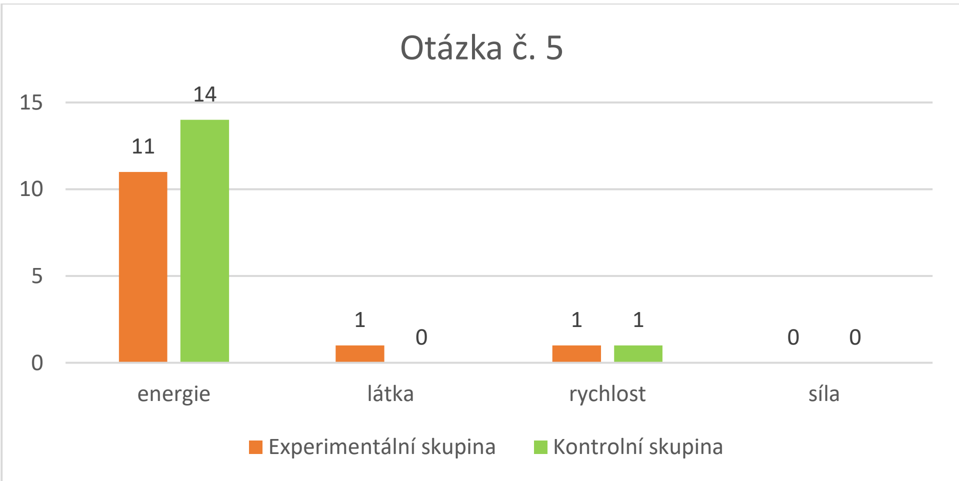
Zadání otázky č. 4: Vyber obrázek, na kterém je správně vyznačena vlnová délka.

Otázka č. 4	A	B	C	D
Experimentální třída	0	1	3	9
	0 %	8 %	23 %	69 %
Kontrolní třída	0	3	1	11
	0 %	20 %	7 %	73 %



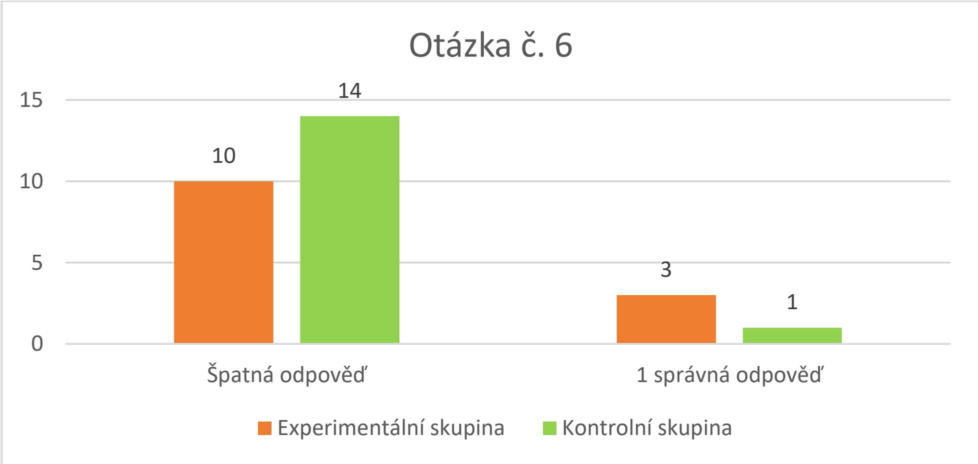
Zadání otázky č. 5: Při šíření příčného vlnění se přenáší:

Otázka č. 5	Energie	Látka	Rychlost	Síla
Experimentální třída	11	1	1	0
	85 %	8 %	8 %	0 %
Kontrolní třída	14	0	1	0
	93 %	0 %	7 %	0 %



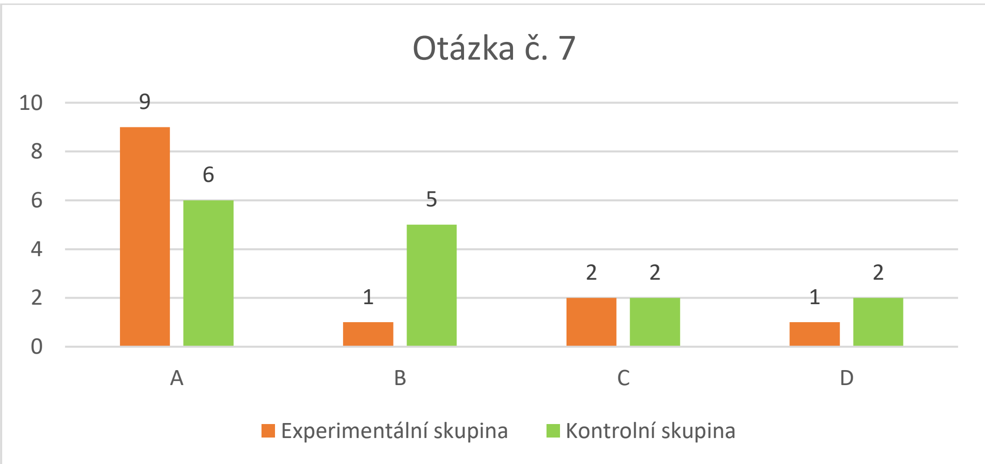
Zadání otázky č. 6: Popiš, jak se liší směr okamžité výchylky u příčného vlnění a podélného vlnění.

Otázka č. 6	Špatná odpověď	Správná odpověď
Experimentální třída	10	3
	77 %	23 %
Kontrolní třída	14	1
	93 %	7 %



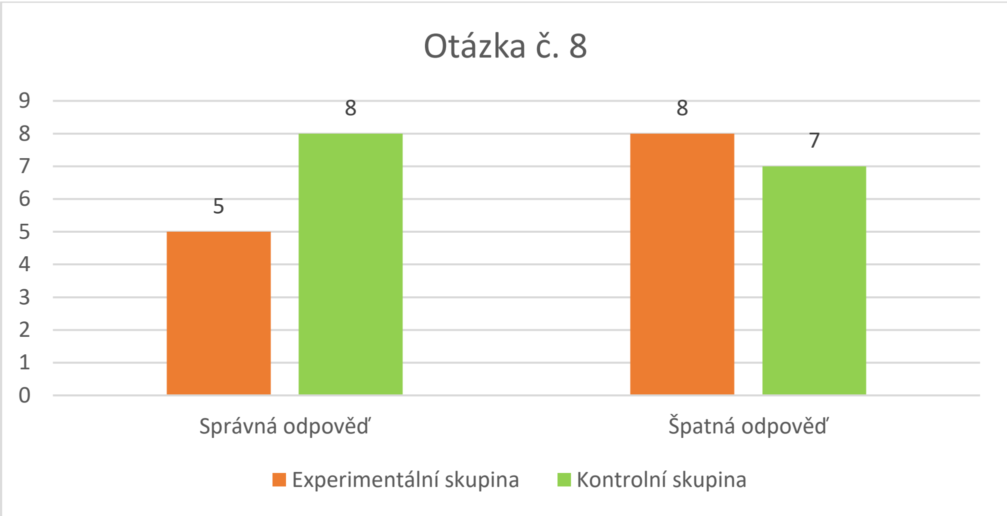
Zadání otázky č. 7: Na obrázku je znázorněna postupná vlna. Vyber obrázek, na kterém je správně zobrazeno, jak bude vypadat odražená vlna na pevném konci.

Otázka č. 4	A	B	C	D
Experimentální třída	9	1	2	1
	69 %	8 %	15 %	8 %
Kontrolní třída	6	5	2	2
	40 %	33 %	13 %	13 %



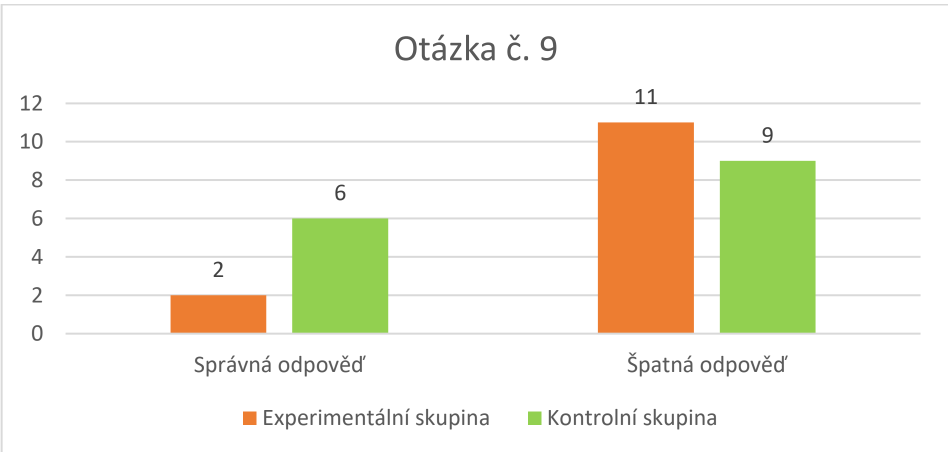
Zadání otázky č. 8: Popiš princip vzniku stojatého vlnění.

Otázka č. 8	Špatná odpověď	Správná odpověď
Experimentální třída	8	5
	62 %	38 %
Kontrolní třída	7	8
	47 %	53 %



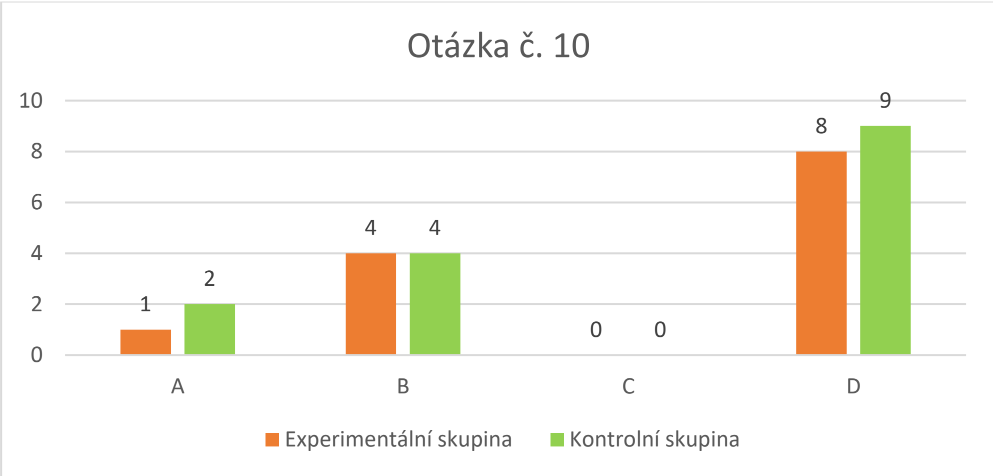
Zadání otázky č. 9: Vysvětli, co je kmitna a uzel stojatého vlnění.

Otázka č. 9	Špatná odpověď	Správná odpověď
Experimentální třída	11	2
	85 %	15 %
Kontrolní třída	9	6
	60 %	40 %



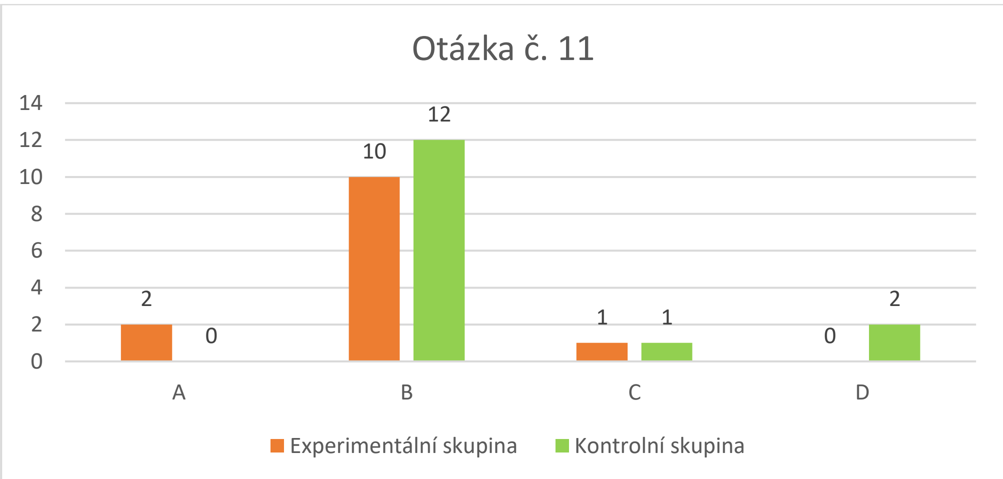
Zadání otázky č. 10: Jaká je podmínka pro dráhový rozdíl dvou vlnění, aby vzniklo interferenční minimum?

Otázka č. 10	A	B	C	D
Experimentální třída	1	4	0	8
	8 %	31 %	0 %	62 %
Kontrolní třída	2	4	0	9
	13 %	27 %	0 %	60 %



Zadání otázky č. 11: Na obrázcích jsou znázorněna dvě postupná vlnění. Červenou barvou je zobrazeno vlnění, které vzniklo interferencí (skládáním) těchto vlnění. Vyber obrázek, na kterém je správně zakreslen výsledek interference vlnění.

Otázka č. 11	A	B	C	D
Experimentální třída	2	10	1	0
	15 %	77 %	8 %	0 %
Kontrolní třída	0	12	1	2
	0 %	80 %	7 %	13 %



8.3 Souhrnné výsledky z pretestu a posttestu

Předchozí dvě kapitoly byly věnovány jednotlivým otázkám a tomu, jak žáci na dané otázky odpovídali. V této kapitole je shrnutí výsledků jednotlivých žáků experimentální a kontrolní třídy z pretestu a posttestu.

8.3.1 Výsledky pretestu

Žáci z experimentální a kontrolní třídy získali v pretestu následující body:

Experimentální třída – body	Δ	Δ^2
5,5	-1,0	0,9
2,0	2,5	6,4
3,5	1,0	1,1
4,5	0,0	0,0
3,0	1,5	2,3
6,5	-2,0	3,9
3,0	1,5	2,3
5,0	-0,5	0,2
3,0	1,5	2,3
2,5	2,0	4,1
4,0	0,5	0,3
2,5	2,0	4,1
5,5	-1,0	0,9
9,5	-5,0	24,7
4,0	0,5	0,3
5,0	-0,5	0,2
7,0	-2,5	6,1
7,0	-2,5	6,1
3,0	1,5	2,3
Průměr: 4,5		Součet: 68,7

Rozptyl: $\sigma^2 = \frac{1}{19} \cdot 68{,}7 = 3{,}6$

Směrodatná odchylka: $\sigma = \sqrt{3{,}6} = 1{,}9$

Kontrolní třída – body	Δ	Δ^2
3,0	1,3	1,6
3,0	1,3	1,6
4,5	-0,2	0,1
4,5	-0,2	0,1
3,5	0,8	0,6
3,0	1,3	1,6
1,0	3,3	10,7
6,5	-2,2	5,0
5,5	-1,2	1,5
4,5	-0,2	0,1
6,0	-1,7	3,0
6,5	-2,2	5,0
5,0	-0,7	0,5
6,0	-1,7	3,0
4,0	0,3	0,1
2,0	2,3	5,2
2,0	2,3	5,2
3,0	1,3	1,6
5,5	-1,2	1,5
6,5	-2,2	5,0
5,5	-1,2	1,5
3,0	1,3	1,6
Průměr: 4,3		Součet: 55,9

Rozptyl: $\sigma^2 = \frac{1}{22} \cdot 55{,}9 = 4{,}3$

Směrodatná odchylka: $\sigma = \sqrt{4{,}3} = 2{,}1$

Průměrný počet bodů z pretestu v experimentální třídě je 4,5, průměrný počet bodů v kontrolní třídě je 4,3. Vidíme, že výsledky obou tříd jsou srovnatelné.

8.3.2 Výsledky posttestu

Experimentální třída – body	Δ	Δ^2
5,0	1,9	3,7
7,5	-0,6	0,3
4,0	2,9	8,5
7,5	-0,6	0,3
9,5	-2,6	6,6
6,5	0,4	0,2
7,5	-0,6	0,3
7,5	-0,6	0,3
4,5	2,4	5,9
4,0	2,9	8,5
9,5	-2,6	6,6
10,0	-3,1	9,5
7,0	-0,1	0,0
Průměr: 6,9		Součet: 50,9

Rozptyl: $\sigma^2 = \frac{1}{13} \cdot 50{,}9 = 3{,}9$

Směrodatná odchylka: $\sigma = \sqrt{3{,}9} = 2{,}0$

Kontrolní třída – body	Δ	Δ^2
9,5	-2,7	7,3
10,0	-3,2	10,2
10,5	-3,7	13,7
5,0	1,8	3,2
7,0	-0,2	0,0
8,0	-1,2	1,4

6,0	0,8	0,6
3,5	3,3	10,9
5,0	1,8	3,2
6,5	0,3	0,1
5,5	1,3	1,7
7,5	-0,7	0,5
9,0	-2,2	4,8
2,0	4,8	23,0
7,0	-0,2	0,0
Průměr: 6,8		Součet: 80,9

Rozptyl: $\sigma^2 = \frac{1}{15} \cdot 80{,}9 = 5{,}4$

Směrodatná odchylka: $\sigma = \sqrt{6{,}2} = 2{,}3$

Průměrný počet bodů z posttestu v experimentální třídě je 6,9, průměrný počet bodů v kontrolní třídě je 6,8. Vidíme, že výsledky obou tříd jsou srovnatelné.

8.4 Průběh a výsledky pedagogického experimentu

Vzhledem k tomu, že se v polovině března 2020 uzavřely školy kvůli epidemii koronaviru COVID-19, probíhala na vybrané škole výuka on-line. Proto bylo nutné pozměnit organizaci pedagogického experimentu tak, aby se mohl uskutečnit v on-line podobě. Pretest i posttest byl vytvořen pomocí Formuláře Google. Obrázky byly vytvořeny v programu Geogebra. V testech jsou otázky s otevřenou odpovědí a otázky s výběrem odpovědi. Nevýhodou těchto formulářů je ten, že nelze vytvořit takové otázky, jejichž cílem by bylo, aby žáci zakreslili odpověď do obrázku nebo nakreslili vlastní obrázek. Pokud by se jednalo o tištěnou verzi, kterou by žáci vyplňovali ve škole, volila bych do testu více produkčních otázek. Jako příklad bych zmínila otázku číslo 4, ve které měli žáci vybrat obrázek, na kterém je správně zobrazena vlnová délka. V tištěné verzi by bylo vhodnější formulovat otázku tak, aby žáci sami zakreslili do obrázku vlnovou délku. U otázek s výběrem odpovědi je možnost, že žáci správnou odpověď uhádnou.

Do pedagogického experimentu byly vybrány dvě paralelní třídy gymnázia. Žáci v obou třídách měli podobný průměr známek jak pouze z fyziky, tak i ze všech předmětů dohromady. Celkový průměr ze všech známek na konci 2. pololetí školního roku 2018/2019 byl v experimentální třídě $1{,}7 \pm 0{,}4$ a v kontrolní třídě $1{,}6 \pm 0{,}4$. Na konci 1. pololetí školního roku 2019/2020 byl celkový průměr ze všech předmětů v experimentální třídě $1{,}6 \pm 0{,}5$ a v kontrolní třídě $1{,}6 \pm 0{,}5$. Průměr z fyziky byl u žáků experimentální třídy na konci 2. pololetí školního roku 2018/2019 $1{,}8 \pm 0{,}7$ a žáci kontrolní třídy měli průměrnou známku z fyziky na konci 2. pololetí školního roku 2018/2019 $1{,}7 \pm 0{,}8$. Průměrná známka z fyziky na konci 1. pololetí školního roku 2019/2020 byla v experimentální třídě $1{,}6 \pm 0{,}7$ a v kontrolní třídě byla průměrná známky z fyziky $1{,}8 \pm 0{,}8$. Počet žáků v experimentální třídě byl 31 a v kontrolní třídě 24.

Před začátkem pedagogického experimentu byl žákům obou tříd zaslán test k vyplnění. Test byl sestaven pomocí Formuláře Google. Vyplnění testu bylo anonymní, žáci pouze vybírali jejich třídu a vyplňovali známku z konce pololetí z fyziky. Do pretestu se zapojilo 20 žáků experimentální třídy a 21 žáků kontrolní třídy. Žáci vyplňovali test doma, proto byl test dělán tak, aby byl anonymní. Důvodem bylo předejít dohledávání správných odpovědí z internetu a z jiných zdrojů, protože výsledek z testu se nedal přiřadit k danému žáku.

Po vyplnění pretestu byly všem žákům zaslány distanční materiály, ze kterých se učili danou látku. Experimentální skupina měla oproti kontrolní skupině k dispozici také výklad učitele ve formě nahraných videí na YouTube. Žákům byl poskytnut čas na prostudování distančních materiálů, případně na shlédnutí videí na YouTube. Poté byl žákům úpět zaslán online test vytvořený pomocí Formuláře Google.

Tento test byl stejný, jako pretest, pouze v něm byly upraveny některé otázky. Výsledky pretestu i posttestu naleznete v kapitolách 8.1, 8.2, a 8.3. Styl odpovědí žáků v pretestu a posttestu se lišil. Zatímco v pretestu odpovídali žáci vlastními slovy a málokdy se jejich odpovědi shodovaly s odpověďmi ostatních žáků, tak v posttestu se některé odpovědi opakovaly často. Nejvíce si odpovědi byly podobné v kontrolní skupině v jedné z otevřených otázek, kdy se žáci pokoušeli o definici kmitny a uzlu. Část odpovědí vypadala jako zkopírovaná odjinud, občas se vyskytlo i velké písmeno uprostřed věty. Samozřejmě se nedá určit, jestli žáci vypracovali otázky samostatně či nikoliv, nesmíme na to však zapomenout při vyvozování závěrů pedagogického experimentu. Žáci vyplňovali posttest i pretest online, takže musíme vzít v úvahu možnost dohledávání si informací z jiných zdrojů než ze své hlavy. Oba testy byly dobrovolné, takže žáci, kteří jej chtěli vyplnit, neměli důvod výsledky zkreslovat, protože testy nebyly známkovány.

Posttest probíhal před koncem školního roku a žáci se ho účastnili dobrovolně, stejně jako v případě pretestu. Účast žáků byla oproti pretestu menší. Je několik možných důvodů, proč se posttestu zúčastnilo méně žáků než pretestu. Pokud by experiment probíhal během výuky ve škole, počet vyplněných testů by byl závislý na absenci žáků a výsledky by byly ovlivněny také tím, že někteří žáci by mohli být ve škole nepřítomni v průběhu experimentu mezi pretestem a posttestem.

Z výsledků posttestu pedagogického experimentu nevyplývá, že by žáci, kteří měli k dispozici i video s výkladem učitele, dosahovali výrazně lepších výsledků než žáci, kteří měli k dispozici pouze distanční materiály. Vzhledem k problematice on-line výuky, počtu zapojených žáků a samotnému provedení a organizaci pretestu a posttestu v on-line podobě, nešlo dostatečně zajistit objektivitu výsledků, protože vyplnění testů bez dohledávání správných odpovědí záviselo pouze na čestnosti žáků, kteří se experimentu účastnili. Proto by bylo vhodné v budoucnu tento experiment zopakovat.

Závěr

V teoretické části byla první kapitola věnována fyzikálnímu a matematickému popisu kmitání, druhá kapitola pak byla věnována mechanickému vlnění. Obě tyto kapitoly opakují a prohlubují znalosti z oblasti kmitání a vlnění a slouží jako doplněk ke studiu kmitání a vlnění. Třetí kapitola se zabývá druhy experimentů ve výuce fyziky. Ve čtvrté kapitole jsou obsaženy stručné informace týkající se provedení pedagogického experimentu. Pátá kapitola obsahuje výňatek z Rámcového vzdělávacího plánu pro gymnázia, který se zabývá kmitáním a vlněním.

V praktické části jsem sestrojila demonstrátor kmitání a demonstrátory vlnění, pomocí kterých jsem provedla měření. Téměř všechny experimenty lze provést pomocí dostupných materiálů a předmětů a lze je tedy zařadit i jako domácí experimenty. Tyto experimenty jsou i cenově dostupné a svojí názorností se vyrovnávají dražším školním pomůckám. Další výhodou těchto experimentů je, že se žáci mohou zapojit do výroby těchto experimentů během výuky a jsou tedy i motivovanější pro pochopení fyzikální podstaty experimentů. K jednotlivým experimentům jsem doplnila i informace, které pomohou k úspěšnému sestavení experimentů již na první pokus.

I přes komplikace způsobené zavřením škol a následné on-line výuce se podařilo provést pedagogický experiment, který byl proveden ve dvou paralelních třídách žáků druhého ročníku střední školy. Pro účely pedagogického experimentu jsem vytvořila pro žáky distanční materiály, které jim byly k dispozici spolu s natočenými videi, která obsahují experimenty týkající se kmitání a vlnění. Do distančních materiálů jsem vložila i vlastní ilustrace pro zpestření dané látky. Dále jsem vytvořila pretest, který byl žákům zaslán před začátkem pedagogického experimentu a posttest, který žáci vyplňovali po pedagogickém experimentu. Zadání pretestu a posttestu jsou v příloze této práce. Výsledky posttestu neprokázaly, že by žáci, kteří měli k dispozici i výklad učitele na videu, dosahovali lepších výsledků než žáci, kteří měli k dispozici pouze distanční materiály a videa s experimenty. Výsledky pedagogického experimentu však vzhledem k povaze pretestu a posttestu nejsou zcela průkazné a bylo by vhodné provést daný experiment v budoucnu ještě jednou a zvětšit vzorek testovaných žáků.

Seznam použité literatury

[1] VYBÍRAL, Bohumil. *Kmitání a vlnění*. Hradec Králové: Gaudeamus, 2014. ISBN 978-80-7435-379-6.

[2] HALLIDAY, David, Jearl WALKER a Robert RESNICK. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky. Část 1-5 Část 1-5*. V Brně; Praha: VUTIUM ; Prometheus, 2000. ISBN 978-80-214-1868-4.

[3] LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia.* 2018. ISBN 978-80-7196-468-1.

[4] ŠEDIVÝ, Přemysl. HARMONICKÉ KMITY MECHANICKÝCH SOUSTAV. nedatováno, 24.

[5] MITTAL, P. K. *Oscillations, Waves and Acoustics*. New Dehli: I. K. International, 2010. ISBN 978-93-80578-27-9.

[6] BAJAJ, N. K. *The Physics of Waves and Oscillations*. B.m.: Tata McGraw-Hill Education, 1988. ISBN 978-0-07-451610-2.

[7] KOPAL, Antonín, TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI a KATEDRA FYZIKY. *Fyzika I: mechanika, kmitání, vlnění, termodynamika*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009. ISBN 978-80-7372-477-1.

[8] SVOBODA, Emanuel. *Přehled středoškolské fyziky*. Praha: Prometheus, 2019. ISBN 978-80-7196-475-9.

[9] POSPÍŠIL, Jaroslav. *Mechanické a elektromagnetické kmity a vlny*. Olomouc: Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého, 1987.

[10] *Nucené kmitání, rezonance | Eduportál Techmania* [online]. [vid. 2020-02-26]. Dostupné z: https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/akustika/kmitani/nucene-kmitani-rezonance

[11] VOLF, Ivo. *Několik úvah o experimentování ve výuce fyziky: studijní materiál pro vzdělávání učitelů fyziky*. Hradec Králové: Gaudeamus : MAFY, 1997. Scio me multa nescire, č. 7.

[12] CHRÁSKA, Miroslav. *Metody pedagogického výzkumu: základy kvantitativního výzkumu*. 2016. ISBN 978-80-247-5326-3.

[13] SKUTIL, Martin. *Základy pedagogicko-psychologického výzkumu pro studenty učitelství* [online]. Praha: Portál, 2011 [vid. 2020-07-07]. ISBN 978-80-262-0262-2. Dostupné z: http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=1640027

[14] PATHAK, R. P. *Methodology of educational research*. New Dehli: Atlantic Publishers and Distributors, 2008. ISBN 978-81-269-0923-0.

[15] BALADA, Jan. *Rámcový vzdělávací program pro gymnázia: RVP G*. Praha: Výzkumný ústav pedagogický v Praze, 2007. ISBN 978-80-87000-11-3.

[16] *How To Make A Pendulum Wave (Science Experiment / Physics Toy)* [online]. 20. červen 2017 [vid. 2020-07-23]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=_8JMVl-_KKs

[17] *Pendulum Waves | Science project | Education.com* [online]. [vid. 2020-07-23]. Dostupné z: https://www.education.com/science-fair/article/pendulum-waves/

[18] *Standing Wave Generator* [online]. 17. prosinec 2012 [vid. 2020-07-23]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=Y4zTHbxwpFM

[19] HAVLOVÁ, Markéta. *Školní pokusy s lasery*. Hradec Králové, 2018. Univerzita Hradec Králové.

[20] *Wave Machine Demonstration* [online]. 18. listopad 2014 [vid. 2020-07-23]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=VE520z_ugcU

Přílohy

Příloha č. 1: Distanční materiály

Příloha č. 2: Videa s pokusy

Příloha č. 3: Zadání pretestu

Příloha č. 4: Zadání posttestu

VZNIK A DRUHY VLNĚNÍ

Úvod:

Ačkoliv si to možná neuvědomujeme, s vlněním se setkáváme každý den. I teď pokud se rozhlédneme, je vlnění všudy přítomné. Ptáte se jak to? Světlo je elektromagnetické vlnění, také zvuk se šíří v podobě vlnění. Určitě vás napadají jiné příklady vlnění, jako například zemětřesení, vlny v rybníce po vhození kamínku do vody. V následující kapitole si povíme o vlnění více.

Mechanické vlnění

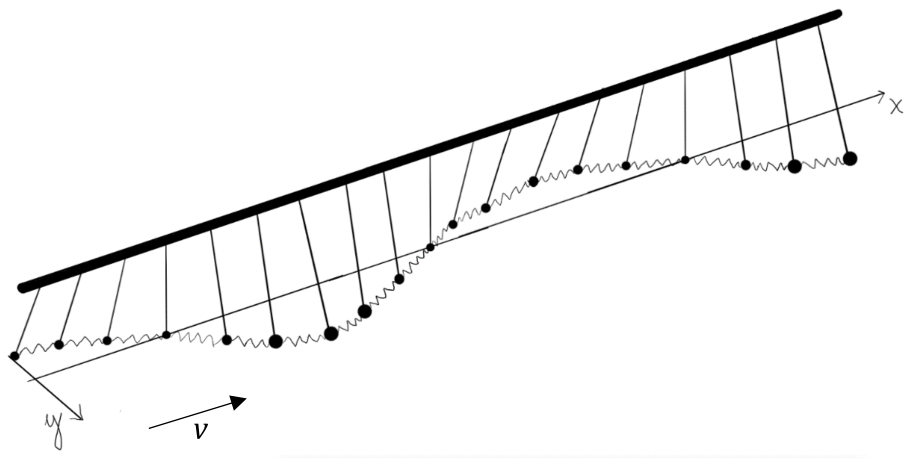
Mechanické vlnění se šíří v látkovém prostředí díky vazebným silám mezi částicemi. Ve vakuu se tedy mechanické vlnění šířit nebude. Bude se tam ale šířit elektromagnetické vlnění, kterému se budeme věnovat později.

Postupné mechanické vlnění

Mechanické vlnění se může šířit ve všech skupenství. Protože mezi částicemi jsou vazebné síly, rozkmitáním jedné částice se rozkmitá i sousední částice a zároveň se přenáší mezi částicemi energie kmitavého pohybu.

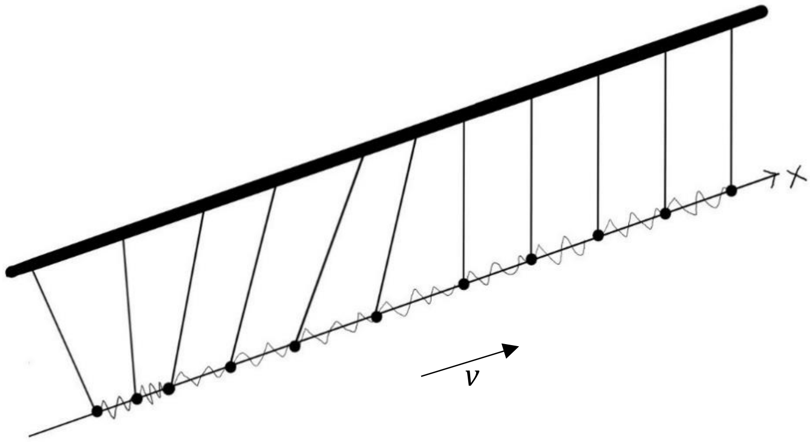
Jak to vypadá v jednorozměrném případě? Představme si částice v jedné přímce.

Postupné vlnění příčné



Vlnění se šíří ve směru osy x rychlostí v, ale jednotlivé body se vychylují ve směru osy y, tedy kolmo na směr šíření vlnění.

Postupné vlnění podélné



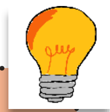
Na obrázku Jednotlivé výchylky bodů jsou ve směru šíření vlnění. Dochází tedy ke zhušťování a zřeďování bodů na přímce. Okamžité výchylky mají směr rovnoběžný na směr šíření vlnění.

Mechanické podélné vlnění se šíří v kapalinách, plynech i pevných látkách. Příčné mechanické vlnění se šíří především v pevných látkách, v plynech se nešíří vůbec.

Částice se vychylují z rovnovážné polohy kolmo na směr šíření vlnění → ***postupné vlnění příčné***
Částice se vychylují z rovnovážné polohy rovnoběžně se směrem šíření → ***postupné vlnění podélné***

Co můžeme u vlnění určit?

Vlnová délka – vzdálenost dvou nejbližších bodů, které kmitaní se stejnou fází



Zopakuj si

Perioda – doba jednoho kmitu, $T = [s]$

Frekvence – počet kmitů za jednotku času, $f = [Hz]$

Vlnění se látkovým prostředím šíří rychlostí v.

$$\boldsymbol{\lambda = v \cdot T}$$

$$\boldsymbol{\lambda = \frac{v}{f}}$$

Vlnová délka je tedy vzdálenost, kterou vlnění urazí během jedné periody.

Nepřipomíná vám to vzorec, pro výpočet dráhy? $s = v \cdot t$

Příklady:

Př. 1.: Zdroj vlnění kmitá s frekvencí 60 Hz, vlnová délka tohoto vlnění je 50 cm. Vypočítejte rychlost vlnění.

Zápis: $f = 60\ Hz$

$\lambda = 50\ cm = 0{,}5\ m$

$v = ?$

Řešení: $\lambda = \frac{v}{f}$

$v = \lambda \cdot f$

$v = 0{,}5\ m \cdot 60\ Hz$

$v = 30\ ms^{-1}$

Vlnění se šíří rychlostí 30 ms^{-1}.

Shrnutí:

- Mechanické vlnění se šíří látkovým prostředím.
- Vlnová délka je nejkratší vzdálenost mezi dvěma body, které kmitají se stejnou fází.
- Vlnová délka: $\lambda = v \cdot T$

  $$\lambda = \frac{v}{f}$$

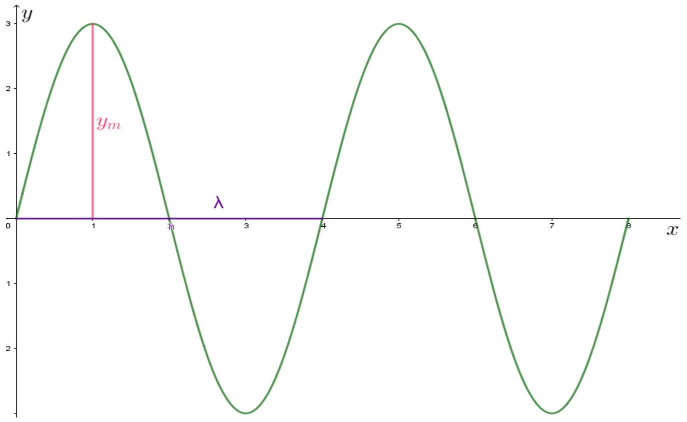
  $$\lambda = [m \cdot s^{-1}] \cdot [s] = [m]$$

  jednotkou vlnové délky v soustavě SI je metr
- Postupné vlnění může být podélné nebo příčné.

ROVNICE POSTUPNÉHO VLNĚNÍ

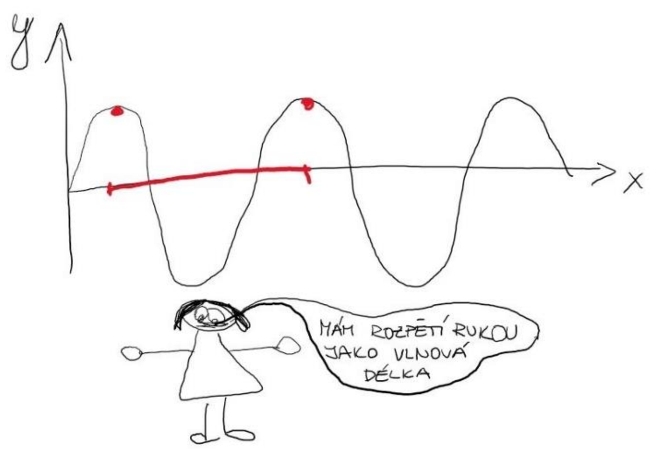
Úvod:

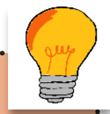
Abychom mohli podrobněji studovat vlnění, potřebujeme ho matematicky popsat. V této kapitole se dozvíte, na čem je závislá okamžitá výchylka vlnění a co je fáze vlnění.



Obr. 1

Na obr.1 je růžově vyznačena **amplituda vlnění y_m** (maximální výchylka) a fialovou barvou **vlnová délka λ**.





Zopakuj si

Amplituda vlnění = maximální výchylka

Vlnová délka λ = vzdálenost dvou

Rovnice postupného vlnění

Vlnění můžeme popsat pomocí rovnice. Pokud se bude zdroj vlnění pohybovat harmonicky, pak i vlnění, které se bude šířit prostředím bude harmonické. Harmonické funkce můžeme vyjádřit pomocí funkcí sinus a kosinus. Kmitavý pohyb popíšeme pomocí rovnice

$$y = y_m \sin \omega t.$$

U kmitání je okamžitá výchylka y závislá pouze na čase t.

Vlnění se šíří látkovým prostředím rychlostí v. Chceme zjistit okamžitou výchylku v bodě A, jehož vzdálenost od zdroje vlnění Z je x. Zajímá nás, za jaký čas dospělo vlnění do tohoto bodu. Protože

$$x = v \cdot \tau,$$

τ je čas, za který dospělo vlnění do bodu A od zdroje Z. Pak tedy

$$\tau = \frac{x}{v}.$$

Protože vlnění dospěje od zdroje Z do bodu A až za čas τ, bude okamžitá výchylka opožděna oproti okamžité výchylce v bodě Z o rozdíl $t - \tau$.

Rovnice bude mít pak tvar

$$y = y_m \sin[\omega(t - \tau)],$$

dosazením za τ získáme tvar

$$y = y_m \sin\left[\omega\left(t - \frac{x}{v}\right)\right].$$

Využijeme vztahu pro úhlovou rychlost $\omega = \frac{2\pi}{T}$.

$$y = y_m \sin\left[\frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{x}{v}\right)\right],$$

$$y = y_m \sin\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{v \cdot T}\right)\right],$$

$$y = y_m \sin\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)\right],$$

protože vlnová $\lambda = v \cdot T$ je vlnová délka.

A je to! Díky poslední rovnici vypočítáme okamžitou výchylku v daném bodě v čase t, který má od zdroje vlnění vzdálenost x. Vlnění má vlnovou délku λ, periodu T a amplitudu výchylky y_m.

Okamžitá výchylka vlnění tedy závisí na čase a souřadnici, všechny ostatní veličiny jsou pro dané vlnění konstantní.

Výrazu $2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)$, který se nachází v argumentu funkce, se říká **fáze vlnění $\boldsymbol{\varphi}$**.

Př. 1.: Vlnění má vlnovou délku 10 cm, frekvence vlnění je 30 Hz a amplituda výchylky je 2 cm. Napiš rovnici pro výpočet okamžité výchylky v bodě x a čase t.

Zápis: $\lambda = 10\ cm = 0{,}1\ m$

$f = 30\ Hz \rightarrow T = \frac{1}{30}\ s$

$y_m = 2\ cm = 0{,}02\ m$

$y = ?$

Řešení:

$$y = y_m \sin\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)\right]$$

$$y = 0{,}02 \sin\left[2\pi\left(30t - \frac{x}{0{,}1}\right)\right]$$

<u>Shrnutí:</u>

- y_m je amplituda vlnění (maximální výchylka)
- rovnice postupného vlnění: $y = y_m \sin\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)\right]$
- fáze vlnění – argument funkce sinus: $2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)$

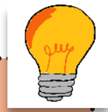
INTERFERENCE VLNĚNÍ

V předchozích kapitolách jsme se zabývali popisem jednoho vlnění. Co se stane, když se potkají například dvě vlnění? Pozorovali jste někdy, co se stane, když hodíte do rybníku dva kamínky vedle sebe? Z místa, kde dopadl kamínek do vody, se po vodní hladině začne šířit vlna do všech stran. Pokud hodíme do vody i druhý kamínek, vlnění se také začne šířit do všech stran až se dříve či později setká s prvním vlněním. Jak bude vypadat vlnění v místě setkání?

Vlnění se šíří nezávisle na ostatních vlněních. Setkají-li se vlnění, dojde k interferenci vlnění. Tedy ke skládání vlnění. Co se ale skládá? Skládají se okamžité výchylky vlnění. Vyjádřeme si to pomocí rovnice postupného vlnění, kterou jsme odvodili v předchozí kapitole. Dvě vlnění se šíří ze dvou zdrojů vlnění Z_1, Z_2, které jsou od sebe vzdáleny o vzdálenost d. Předpokládejme, že se obě vlnění setkají v místě S. Vzdálenost prvního vlnění od zdroje Z_1 k místu S je x_1 a vzdálenost druhého vlnění od zdroje Z_2 k místu S je x_2. Dále platí, že $x_1 < x_2$. Rovnice obou vlnění vypadají takto:

$$y_1 = y_m \sin\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda}\right)\right],$$

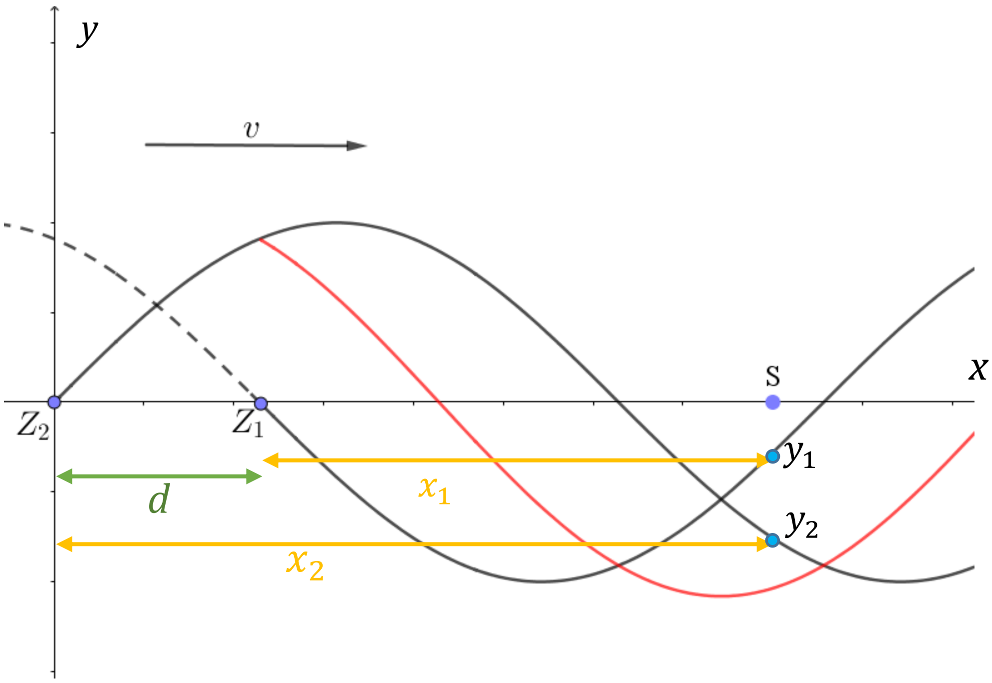
$$y_2 = y_m \sin\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda}\right)\right].$$



Zopakuj si

Rovnice postupného vlnění

$$y = y_m \sin\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)\right]$$



Obě rovnice sečteme:

$$y_1 + y_2 = y_m \sin\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda}\right)\right] + y_m \sin\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda}\right)\right]$$

Po sečtení obou rovnic dostaneme novou rovnici:

$$y = Y_m \sin\left(2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{\bar{x}}{\lambda}\right)\right),$$

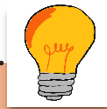
kde $Y_m = 2y_m \cos\left(\frac{\pi d}{\lambda}\right)$ (→ protože tento výraz je pro dané vlnění konstantní ← nezávisí na čase) je amplituda výsledného vlnění a $\bar{x} = \frac{1}{2}(x_1 + x_2)$. Písmenem d jsme označili rodíl $x_2 - x_1$, říká se mu ***dráhový rozdíl***.

Výsledná amplituda vlnění vzniklého interferencí závisí na tom, v jaké fázi se v daném bodě obě vlnění nachází. ***Fázový rozdíl*** $\boldsymbol{\Delta\varphi}$ je rozdíl fází vlnění, tedy

$$\Delta\varphi = 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda}\right) - 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda}\right) = \frac{2\pi}{\lambda}(x_2 - x_1) = \frac{2\pi}{\lambda}d.$$

Vidíme, že fázový rozdíl je závislý na dráhovém rozdílu d. Podívejme se na následující obrázky, na kterých jsou znázorněny dva speciální případy dráhového rozdílu.

Na obr. 1 vidíme dvě vlnění (červené a zelené), které se šíří prostředím. Na obr. 2 je modrou křivkou znázorněno výsledné vlnění, které vzniklo interferencí zeleného a červeného postupného vlnění.



Zopakuj si

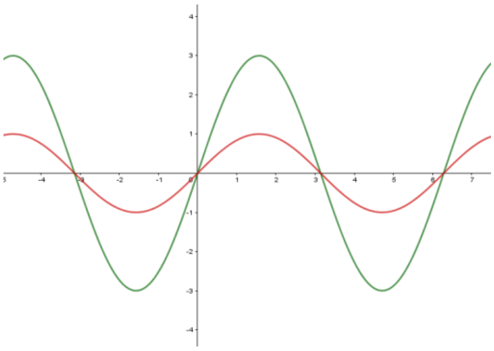
Rovnice harmonického kmitání

$$y = \mathrm{y_m}\sin(\omega t + \varphi_0),$$

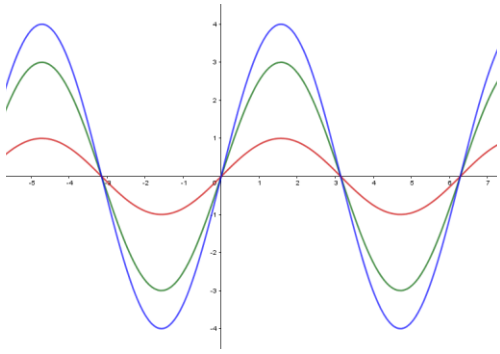
fáze kmitání je argument funkce sinus: $\omega t + \varphi_0$,

φ_0 je počáteční fáze kmitání.

Fáze kmitání nám udává, v jaké poloze se v daném čase kmitání nachází (maximum, minimum výchylky, někde mezitím).

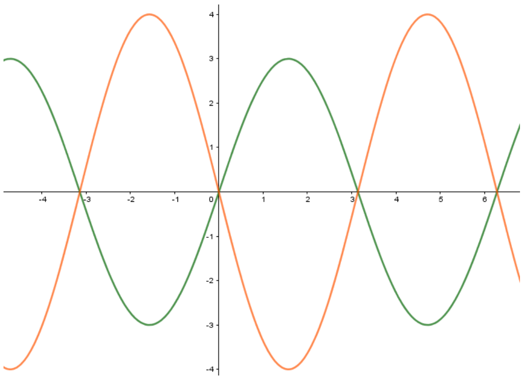


Obr. 1

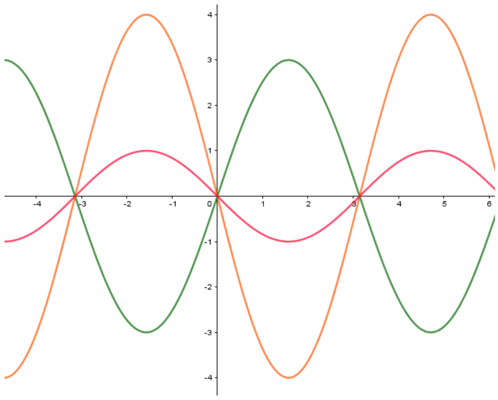


Obr. 2

Na obr. 3 jsou zeleně a oranžově znázorněny postupné vlnění. Na obr. 4 je růžově zobrazeno výsledné vlnění které vzniklo interferencí zeleného a oranžového vlnění.



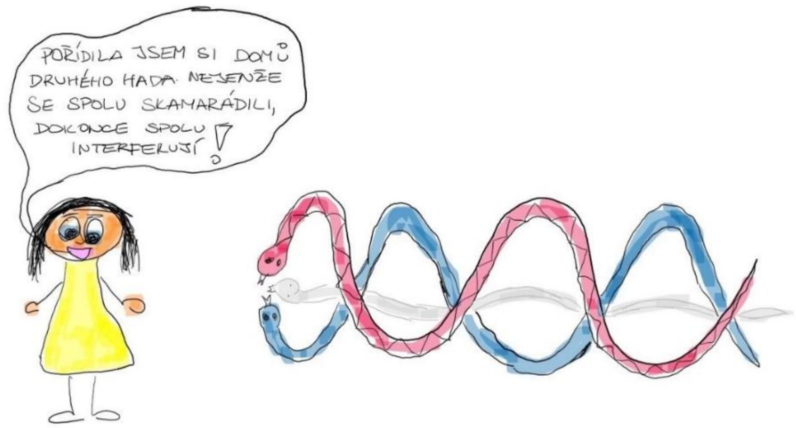
Obr. 3



Obr. 4

Dráhový rozdíl

- obr. 2: $d = 2k\frac{\lambda}{2}$ sudé násobky půlvln **→interferenční maximum**
- obr. 4: $d = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$ liché násobky půlvln **→interferenční minimum**



Shrnutí:

- fázový rozdíl vlnění je úměrný dráhovému rozdílu $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} d$
- pokud je dráhový rozdíl sudým násobkem půlvln, vzniká interferenční maximum $d = 2k\frac{\lambda}{2}$
- pokud je dráhový rozdíl lichým násobkem půlvln, vzniká interferenční minimum $d = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$

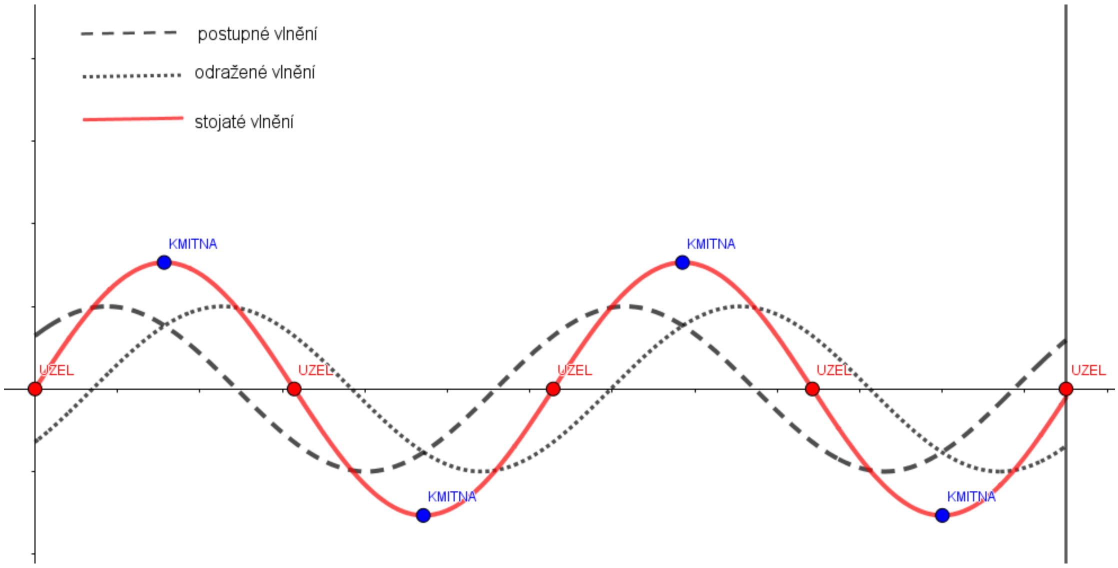
STOJATÉ VLNĚNÍ

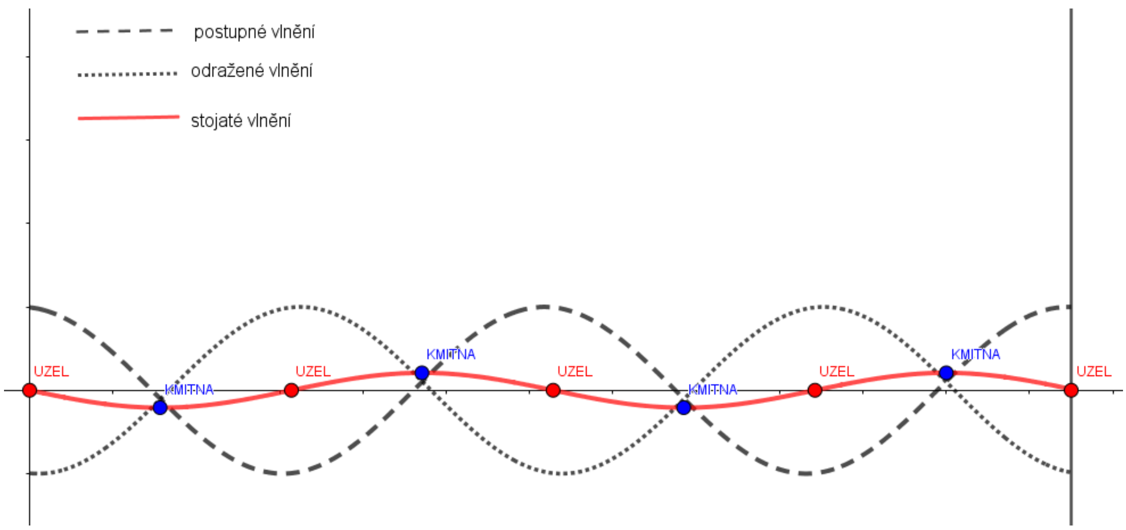
Úvod:

V této kapitole se dozvíte, co je to stojaté vlnění, jak vznikne a co jsou to kmitny a uzle.

Vznik stojatého vlnění

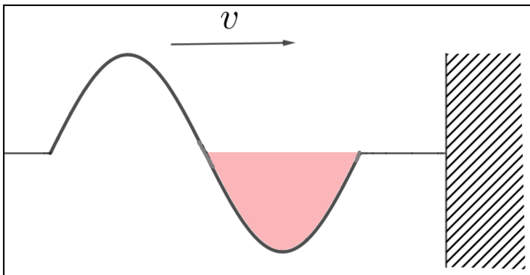
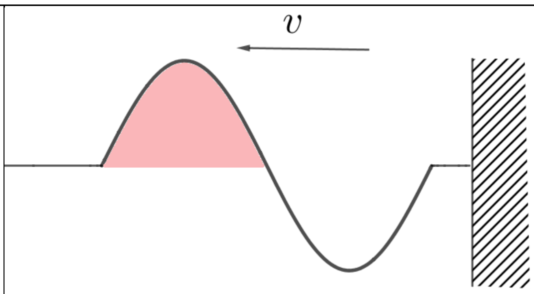
Představte si, že v ruce držíte provaz, který je na druhém konci pevně přidělaný. Rukou harmonicky pohybujete nahoru a dolu, takže se provazem šíří postupné vlnění. Na konci provazu se vlnění odrazí a postupuje směrem ke zdroji vlnění, tedy k zpět k vaší ruce. Postupné vlnění interferuje s odraženým vlněním a vzniká stojaté vlnění. Celá animace je dostupná na https://youtu.be/cwxNvVTFimw .

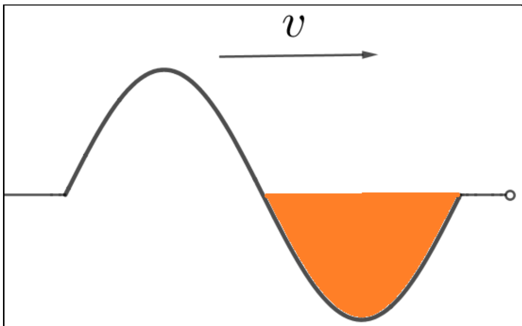
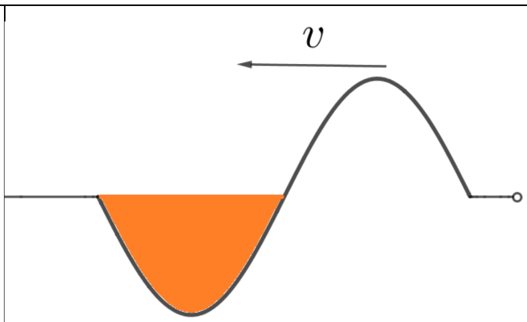




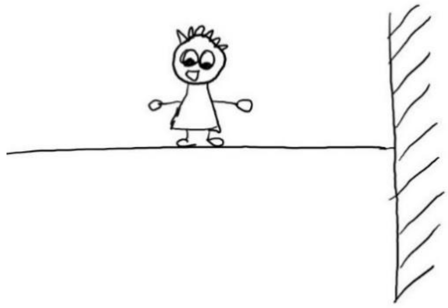
Obr. 2

Odraz vlnění nastává nejenom na pevném konci, ale také i na volném konci. Odražené vlnění se však bude lišit. Na **pevném** konci se vlnění odráží s **opačnou fází**, na **volném** konci se vlnění odráží se **stejnou fází**.

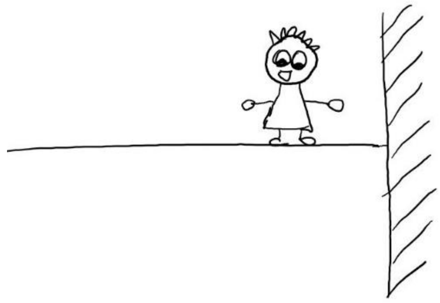
	
ostupná vlna se pohybuje zleva doprava.	tupná vlna se odrazila na pevném konci a postupuje zprava doleva.

	
ostupná vlna postupuje zleva doprava.	tupná vlna se odrazila na volném konci a postupuje doleva.

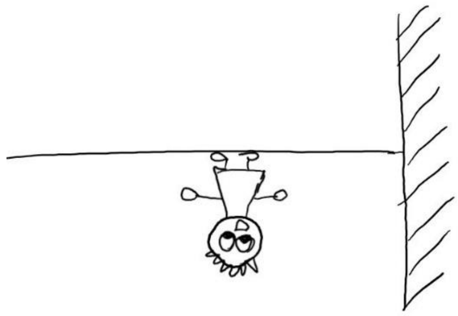
U stojatého vlnění kmitá každý bod se stejnou fází, ale s rozdílnou amplitudou. Při kmitání provazem pozorujeme, že v určitých místech provazu je amplituda nulová a v některých místech je amplituda maximální. **Uzel** stojatého vlnění je bod, ve kterém je nulová amplituda vlnění. **Kmitna** stojatého vlnění je bod, který kmitá s maximální amplitudou.



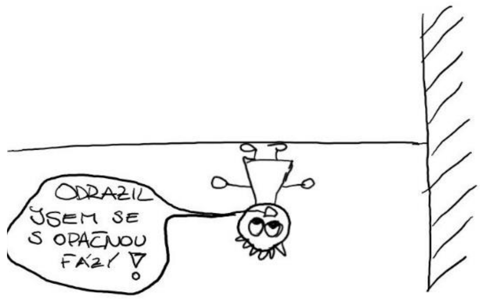
1.



2.



3.



4.

Shrnutí:

- kmitna je bod, který kmitá s maximální amplitudou vlnění
- uzel je bod, ve kterém je hodnota amplitudy nulová
- odraz vlnění na volném konci – se stejnou fází
- odraz vlnění na pevném konci – s opačnou fází

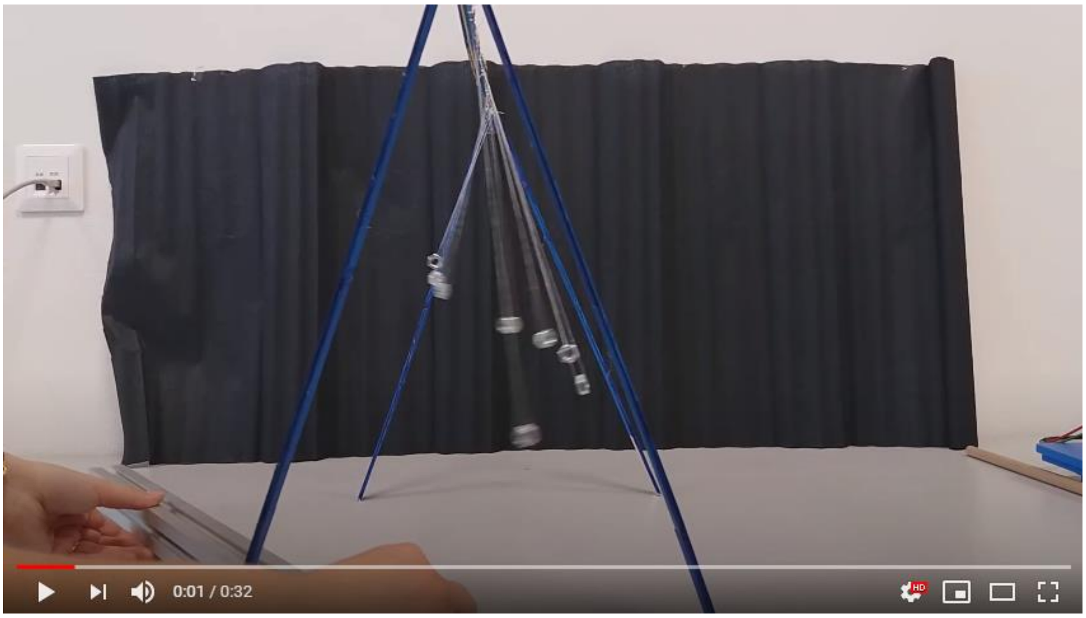
Videa s pokusy:

Zde jsou odkazy na videa s jednotlivými pokusy. Tato videa jsou dostupná pouze pomocí těchto odkazů.

Video obsahující záběry vlnostroje ze tří různých pohledů v reálné rychlosti i zpomaleně. Video je bez komentáře. Odkaz: https://youtu.be/8U2sIP9bg1U.

Následující video je stejně jako předešlé video s vlnostrojem, ale je doplněné o komentář pozorovaných jevů. Odkaz na video: https://youtu.be/YyN0KCqGEL4

Video obsahující kmitání kyvadel s různou délkou závěsu. Video je bez komentáře. Odkaz na video: https://youtu.be/sSuhFrmYvRg.



Video obsahuje pokus s ukázkou podélného i příčného vlnění na pružince. Video je s komentářem. Odkaz na video: https://youtu.be/XThfMzLSteA.

Video obsahující experiment sestrojený pomocí špejlí a lepicí pásky. Video je doplněno o komentář s vysvětlením pozorovaných jevů. Odkaz na video: https://youtu.be/EagAFRLwSRE

Zadání pretestu

Dobrý den,

chtěla bych Vám předem poděkovat za vyplnění dotazníku, který je součástí mé diplomové práce.

Dotazník je anonymní, prosím Vás tedy, abyste na otázky odpovídali podle svého nejlepšího vědomí a svědomí a nedohledávali jste správné odpovědi na internetu a v jiných dostupných materiálech.

Níže naleznete otázky s výběrem odpovědi a otevřené otázky. U každé otázky, u které budete vybírat z daných možností, je právě jedna správná odpověď. U některých otázek je vyžadována slovní odpověď. Pokud si nejste s odpovědí jistí, nevadí, napište i Vaše domněnky. Všechny otázky vyžadují odpověď, proto alespoň nějakou odpověď zkuste vymyslet, nebo napište, že nevíte. Určitě si nějak poradíte :-)

Celkem budete vyplňovat 13 otázek a bude Vám to trvat maximálně 30 minut.

Za vyplnění Vám ještě jednou děkuji.

Markéta Havlová

PřF UHK

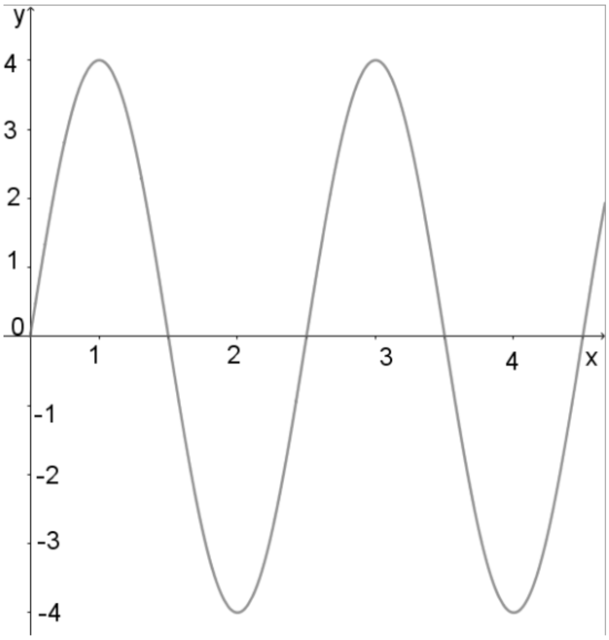
Jsem žák/žákyně třídy:

- ☐ A
- ☐ B

Moje známka z fyziky v pololetí byla:

- ☐ 1
- ☐ 2
- ☐ 3
- ☐ 4
- ☐ 5

1) Jaká je hodnota amplitudy vlnění, které je znázorněno na obrázku?



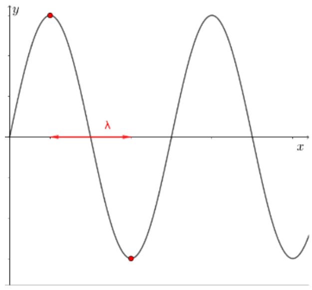
- ☐ 4
- ☐ 2
- ☐ 2,5
- ☐ 3,5

2) Jakou rychlostí se šíří vlnění, které má vlnovou délku 0,5 m a frekvenci 60 Hz?

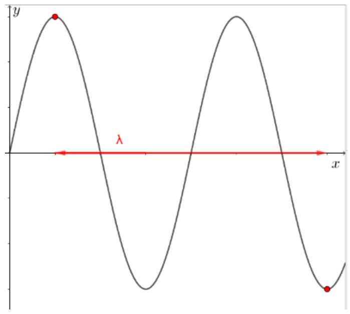
- ☐ 8,3 m/s
- ☐ 30 m/s
- ☐ 120 m/s
- ☐ 12 m/s

4) Vyber obrázek, na kterém je správně vyznačena vlnová délka.

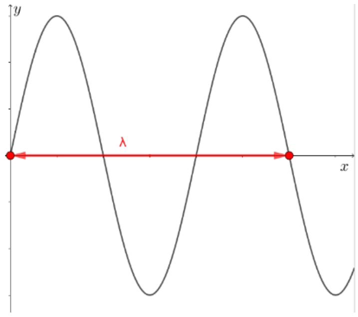
- ☐ a)



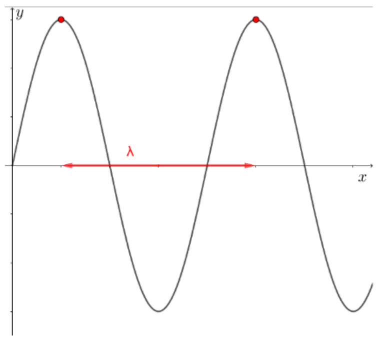
☐ b)



☐ c)



☐ d)



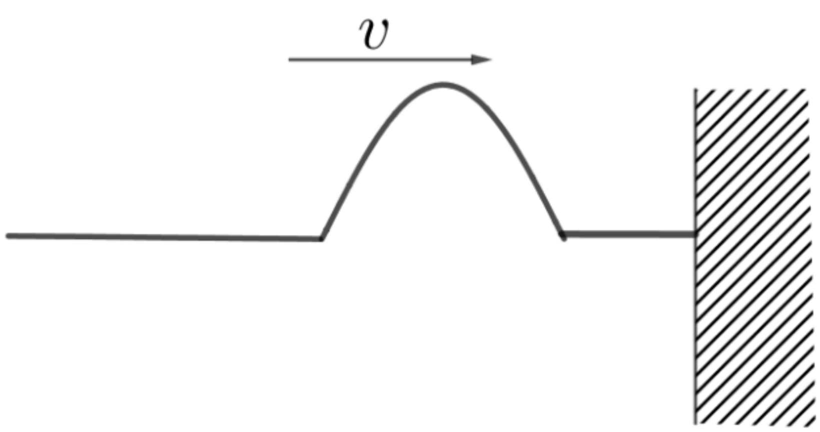
5) Při šíření příčného vlnění se přenáší:

- ☐ energie
- ☐ síla
- ☐ rychlost
- ☐ látka

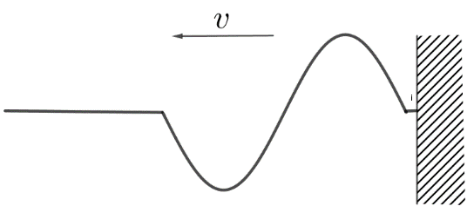
6) Popiš, jak se liší směr okamžité výchylky u příčného vlnění a podélného vlnění.

....

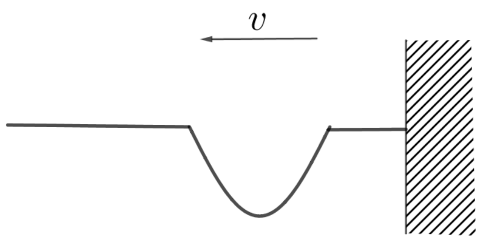
7) Na obrázku je znázorněna postupná vlna. Vyber obrázek, na kterém je správně zobrazeno, jak bude vypadat odražená vlna na pevném konci.



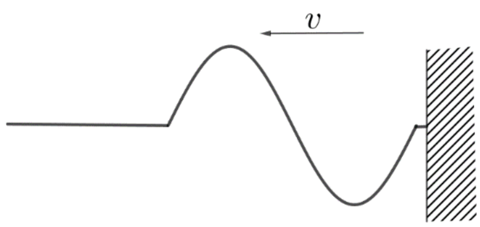
☐ a)



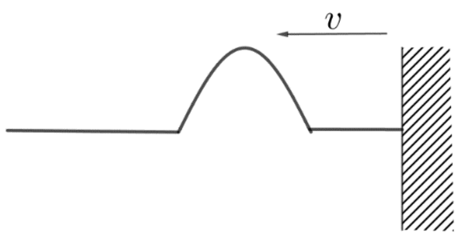
☐ b)



☐ c)



☐ d)



8) Popiš princip vzniku stojatého vlnění.

....

9) Vysvětli, co je kmitna a uzel stojatého vlnění.

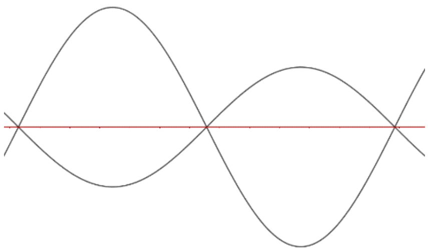
....

10) Jaká je podmínka pro dráhový rozdíl dvou vlnění, aby vzniklo interferenční minimum?

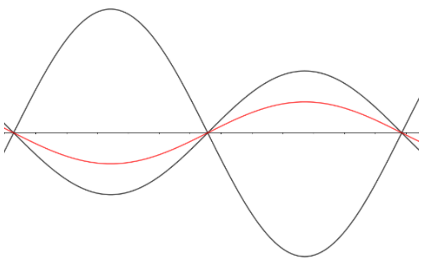
....

11) Na obrázcích jsou znázorněna dvě postupná vlnění. Červenou barvou je zobrazeno vlnění, které vzniklo interferencí (skládáním) těchto vlnění. Vyber obrázek, na kterém je správně zakreslen výsledek interference vlnění.

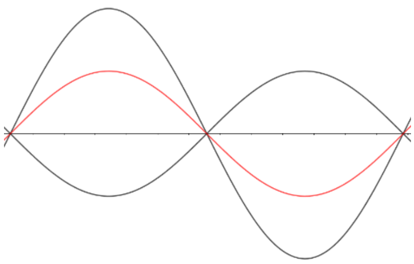
- ☐ a)



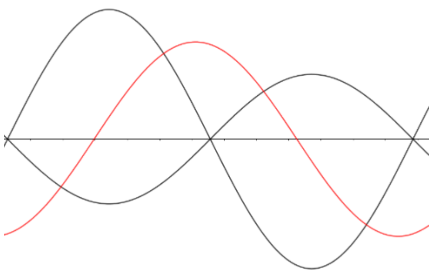
- ☐ b)



- ☐ c)



- ☐ d)



Zadání posttestu

Dobrý den,

níže se nachází 14 otázek. U otázek s výběrem odpovědi je vždy jedna správná odpověď. Všechny otázky jsou povinné. To už jste jednou skvěle zvládli, takže věřím, že si poradíte i tentokrát :-)

Odpovědi jsou opět anonymní. Proto prosím, odpovídejte na ně bez použití jiných materiálů a internetu.

Děkuji vám za vyplnění.

Markéta Havlová

PřF UHK

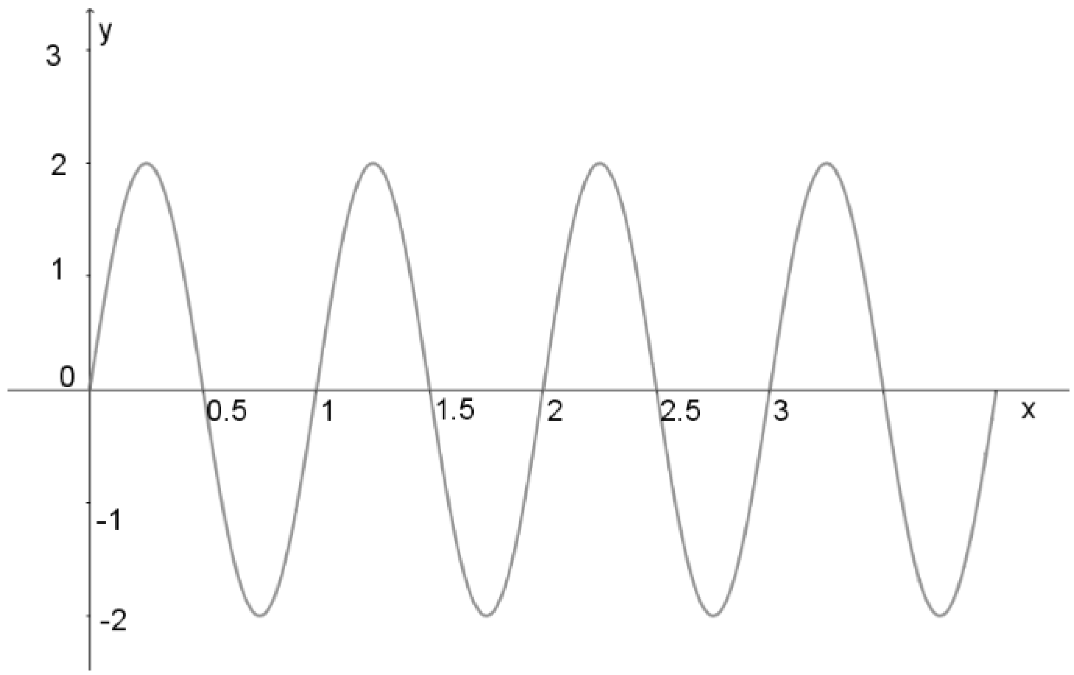
Jsem žák/žákyně třídy:

- ☐ A
- ☐ B

Moje známka z fyziky v pololetí byla:

- ☐ 1
- ☐ 2
- ☐ 3
- ☐ 4
- ☐ 5

1) Jaká je hodnota amplitudy vlnění, které je znázorněno na obrázku?



....

2) Jakou rychlostí se šíří vlnění, které má vlnovou délku 0,5 m a frekvenci 60 Hz?

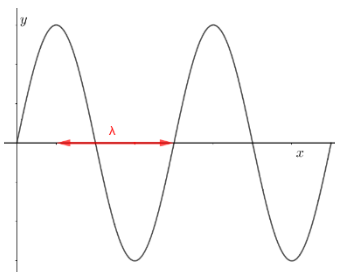
- ☐ 8,3 m/s
- ☐ 30 m/s
- ☐ 120 m/s
- ☐ 12 m/s

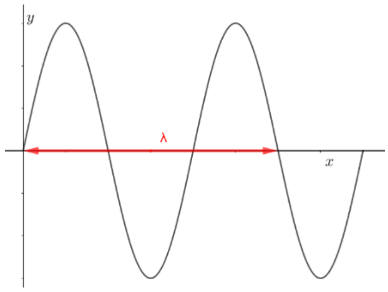
3) Napiš 3 příklady mechanického vlnění.

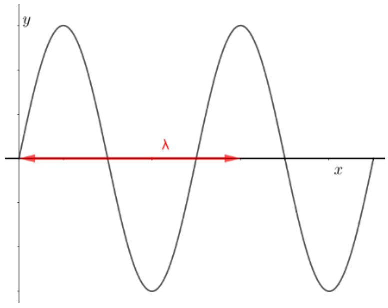
....

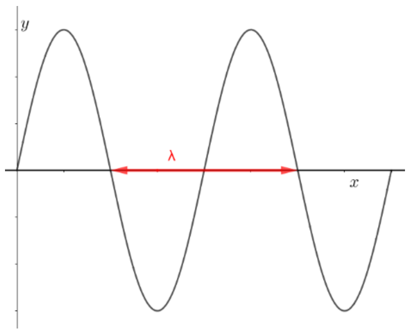
4) Vyber obrázek, na kterém je správně vyznačena vlnová délka.

☐ a)



☐ b) 

☐ c) 

☐ d) 

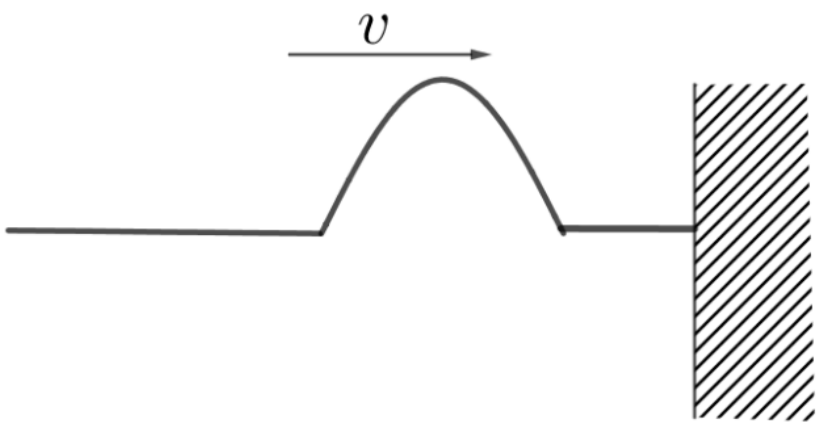
5) Při šíření příčného vlnění se přenáší:

- ☐ síla
- ☐ rychlost
- ☐ energie
- ☐ látka

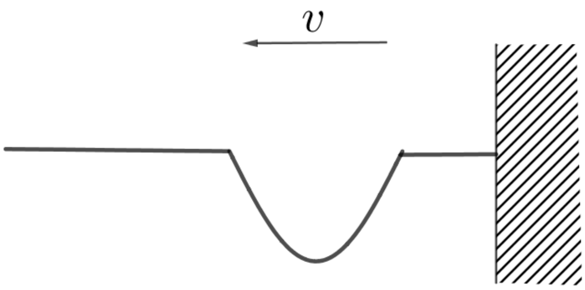
6) Popiš, jak se liší směr okamžité výchylky u příčného vlnění a podélného vlnění.

……

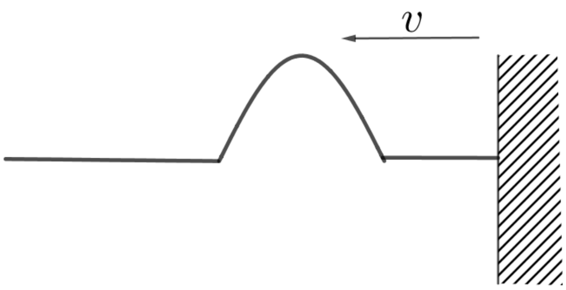
7) Na obrázku je znázorněna postupná vlna. Vyber obrázek, na kterém je správně zobrazeno, jak bude vypadat odražená vlna na pevném konci.



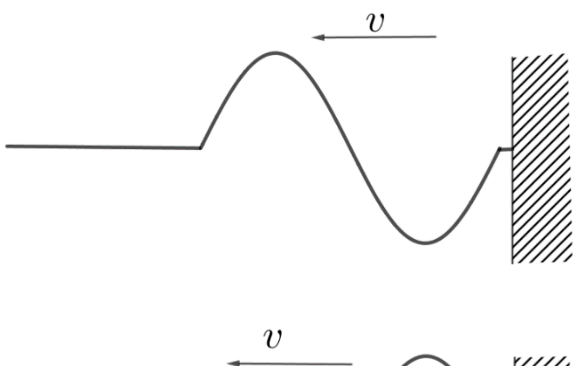
☐ a)



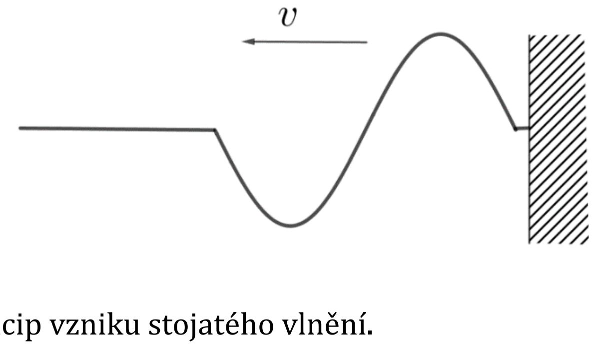
☐ b)



☐ c)



☐ d)



8) Popiš princip vzniku stojatého vlnění.

....

9) Vysvětli, co je kmitna a uzel stojatého vlnění.

....

10) Jaká je podmínka pro dráhový rozdíl dvou vlnění, aby vzniklo interferenční minimum?

☐ a) $d = 2k\frac{\lambda}{2} + 1$

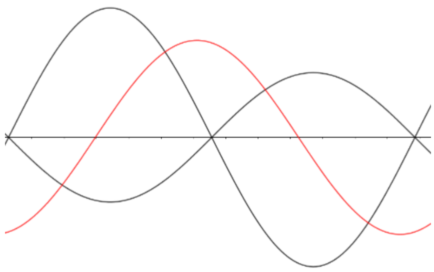
☐ b) $d = 2k\frac{\lambda}{2}$

☐ c) $d = (2+1)k\frac{\lambda}{2}$

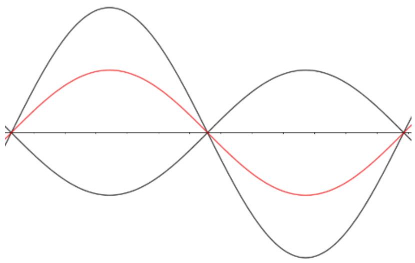
☐ d) $d = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$

11) Na obrázcích jsou znázorněna dvě postupná vlnění. Červenou barvou je zobrazeno vlnění, které vzniklo interferencí (skládáním) těchto vlnění. Vyber obrázek, na kterém je správně zakreslen výsledek interference vlnění.

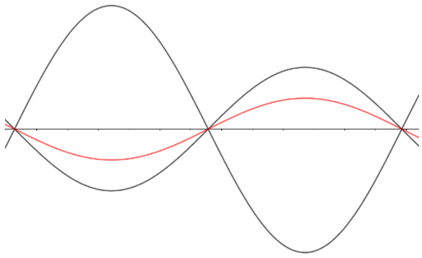
☐ a)



☐ b)



□ c)



□ d)