

Meranie Dopplerovho javu

Úlohy merania

Zmerajte posun frekvencie zvukovej vlny, pokiaľ pozorovateľ (prijímač) a zdroj (vysielač) tejto vlny budú vo vzájomnom pohybe.

Porovnajte namerané hodnoty s teoretickými hodnotami.

TEORETICKÝ ÚVOD - Dopplerov jav

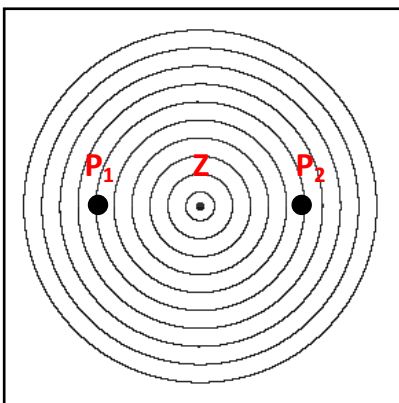
Ak sa voči pozorovateľovi pohybuje zdroj zvuku, vníma pozorovateľ pri približovaní zdroja vyššiu frekvenciu, ako je skutočná frekvencia zdroja. Potom, ako sa zdroj a pozorovateľ minú, vnímaná frekvencia poklesne a je dokonca nižšia ako tá, ktorú produkuje zdroj. Podobný jav možno pozorovať aj vtedy, keď je zdroj v klude a pozorovateľ sa pohybuje, alebo v prípade, keď sa súčasne pohybuje ako zdroj, tak aj pozorovateľ. Tento jav nastáva vždy pri vzájomnom pohybe zdroja zvuku a pozorovateľa a je tým výraznejší, čím rýchlejšie sa pohybuje zdroj zvuku vzhľadom k pozorovateľovi. Podstatu tohto javu objavil v polovici 19. storočia významný rakúsky fyzik a matematik Christian Doppler. Tento jav sa uplatňuje pre všetky známe druhy vlnenia, nielen pre mechanické vlny, ale aj pre elektromagnetické vlny.

Uvažujme zvukové vlnenie generované zo zdroja vlnenia Z (technicky realizovaný generátorom napojeným na reproduktor) a pozorovateľov P_1 , P_2 (technicky realizovaných detektormi – mikrofónmi): môžu nastať tieto tri situácie:

a) Statická situácia

Nepohybujú sa: P_1 , P_2 , Z
(sústredné kružnice označujú šírenie zvuku)

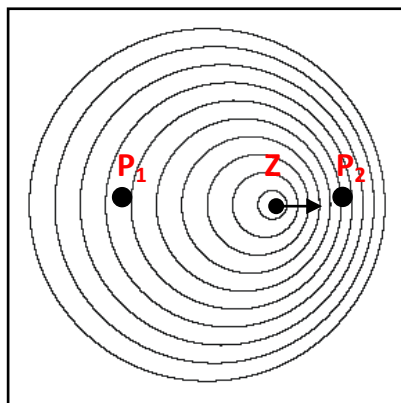
Sledujeme rovnomerné šírenie sa zvukovej vlny



b) Doppler 1: pohyb zdroja

Nepohybujú sa: P_1 , P_2
(kružnice označujú šírenie zvuku v smere šípky pohyblivého zdroja)

Profil šírenia zvukovej vlny reaguje na pohyb zdroja

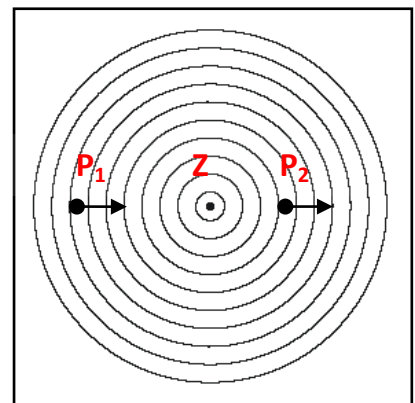


c) Doppler 2: pohyb P_1 a P_2

Nepohybujú sa: Z
(sústredné kružnice označujú šírenie zvuku)

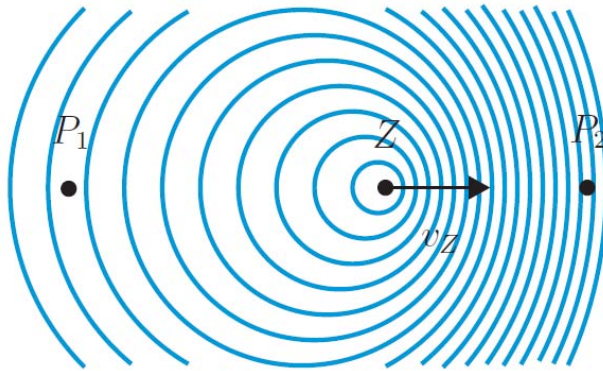
P_1 prichádza k zdroju s rýchlosťou v_{p1}

P_2 sa vzdaluje od zdroja s rýchlosťou v_{p2}



V nasledujúcej časti sa budeme detailnejšie venovať iba posledným dvom situáciám, pri ktorých sa prejavuje Dopplerov jav.

Situácia – Doppler 1 - Zdroj sa pohybuje rýchlosťou v_z a pozorovateľ je v klude



Obr.1

Pokiaľ sa zdroj pohybuje, stred vyžarovaných zvukových vln sa posúva, takže pred zdrojom dochádza k zahusťovaniu vlnoplôch a za zdrojom naopak, k ich zriedovaniu (obr. 1). Zdroj sa pohybuje smerom k pozorovateľovi P_2 rýchlosťou v_z , čo znamená, že v priebehu každej periódy T sa priblíži o vzdialenosť $v_z T$. Vrcholy vln pred zdrojom teda nie sú vzdialené o vlnovú dĺžku $\lambda = cT$, kde c je rýchlosť zvuku, ale o vzdialenosť $\lambda = \lambda' - v_z T$, čo je vlnová dĺžka, ktorú registruje pozorovateľ. Tejto vlnovej dĺžke odpovedá frekvencia

$$f' = \frac{c}{\lambda'} = \frac{c}{\lambda - v_z T} = \frac{c}{cT - v_z T} = \frac{c}{c - v_z} f \quad (1.1)$$

kde $f = 1/T$ je frekvencia emitovaná zdrojom. Pokiaľ $v_z < c$, bude $f' > f$, čiže pozorovateľ bude registrovať vyššiu frekvenciu. Ak sa zdroj vzdaluje od pozorovateľa P_2 rýchlosťou v_z , potom je vzdialenosť susedných vrcholov vln predĺžená o hodnotu $v_z T$, takže pre ním registrovanú vlnovú dĺžku platí $\lambda = \lambda + v_z T$, čomu odpovedá frekvencia

$$f' = \frac{c}{c + v_z} f. \quad (1.2)$$

Pozorovateľ, od ktorého sa zdroj vzdaluje, preto registruje nižšiu frekvenciu.

Zo vzťahov (1.1) a (1.2) vyplýva, že **pozorovateľom registrovaná frekvencia f' závisí od rýchlosti zdroja nelineárne**. Ak použijeme Taylorov rozvoj, dostaneme

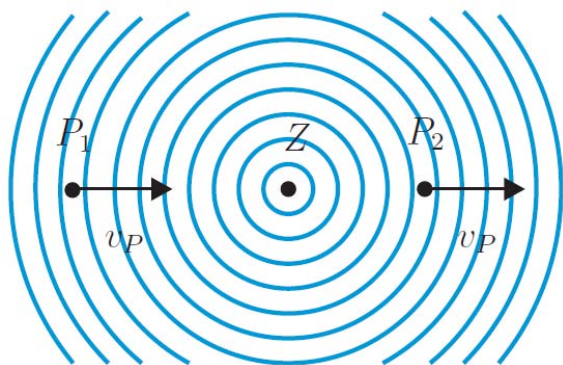
$$\frac{c}{c \mp v_z} = \frac{1}{1 \mp v_z/c} = 1 \pm \frac{v_z}{c} + \left(\frac{v_z}{c}\right)^2 \pm \left(\frac{v_z}{c}\right)^3 + \dots$$

takže pre $v_z \ll c$ stačí uvažovať iba prvé dva členy rozvoja a vzťahy (1.1) a (1.2) možno písať v tvare

$$f' = \frac{c \pm v_z}{c} f \quad (1.3)$$

kde kladné znamienko odpovedá približujúcemu sa a záporné znamienko vzdalujúcemu sa zdroju zvuku.

Situácia – Doppler 2 - Zdroj je v klude a pozorovateľ sa pohybuje rýchlosťou v_p



Obr. 1.2

Situácia, keď je zdroj v klude a pozorovateľ sa pohybuje, je znázornená na obr.1.2. Tým, že sa pozorovateľ P_1 pohybuje rýchlosťou v_p smerom k zdroju, skracuje sa doba medzi stretnutiami s jednotlivými vrcholmi vln. Relatívna rýchlosť vln vzhľadom k pozorovateľovi je $c' = c + v_p$, zatiaľčo vlnová dĺžka vln sa nemení a platí pre ňu $\lambda = cT$. Frekvencia, ktorú pozorovateľ registruje, je preto

$$f' = \frac{c'}{\lambda} = \frac{c + v_p}{cT} = \frac{c + v_p}{c} f. \quad (1.4)$$

Relatívna rýchlosť vln vzhľadom k pozorovateľovi P_2 , ktorý sa od zdroja vzdaluje, je $c' = c - v_p$, takže pre registrovanú frekvenciu dostaneme vzťah

$$f' = \frac{c - v_p}{c} f. \quad (1.5)$$

CIELE MERANIA

Základné úlohy cvičenia (pohyblivý reproduktor, statický mikrofón):

a) Pre konštantnú frekvenciu vychádzajúcu zo zdroja zmerať zmenu detekovanej frekvencie v prípade oboch pozorovateľov:

- P_1 ... približuje sa k statickému mikrofónu

- P_2 ... vzdaluje sa od statického mikrofónu

Meranú zmenu frekvencie môžeme zaznamenávať ako funkciu rýchlosti pohybujúceho sa objektu

b) porovnať zadané (nastavené) a merané (vypočítané) hodnoty

(tu potvrdíme rozdielnosť nameraných frekvencií f_1 a f_2)

c) porovnať teoretické a namerané hodnoty

(diskutujte o vplyve teploty vzduchu na rýchlosť šírenia sa zvuku)

PRINCÍP VYHODNOTENIA

Pre vyhodnotenie merania musíme porovnať teoretické a namerané hodnoty. Pre splnenie tejto úlohy možno vychádzať z toho, že vzorec (1.3) predstavuje rovnice dvoch priamok. Jedna priamka odpovedá znamienku plus a druhá znamienku mínus vo vzorci (1.3).

Teoretický výsledok je obsiahnutý v tvrdení, že smernice týchto priamok sú $(+f/c)$ a $(-f/c)$. Aby sme mohli tento teoretický výsledok porovnať s výsledkom nášho merania, musíme vyniesť grafy závislosti $f' = f'(v_z)$ pre viacero hodnôt v_z nášho merania. Budú to priamky a ak bolo meranie dokonale presné, musia sa smernice týchto priamok zhodovať so smernicami teoretického výsledku. To isté urobíme pre pohybujúci sa prijímač zvuku. Pri vyhodnocovaní musíme uvážiť, že rýchlosť zvuku závisí od teploty prostredia, v ktorom sa zvuk šíri.

POSTUP MERANIA (rozpísaný pre prípad pohybujúceho sa zdroja)

1. Skontrolujte zapojenie prístrojov a zoznámte sa s ovládaním programu **Measure** a s ovládaním vláčika.
2. Nastavte zosilnenie frekvenčného generátora a amplitúdu výstupného signálu tak, aby fungovalo meranie kmitočtu aj v krajných polohách dráhy vláčika. Optickú závoru pre meranie rýchlosti umiestnite do stredu, v ktorom už je rýchlosť vláčika konštantná.
3. Nastavte pre 3 rýchlosti vláčika (v_{\min} , v_{stred} , v_{\max} vždy pri oboch smeroch) frekvenciu zdroja v prípade pohybujúceho sa zdroja/reproduktora. Rýchlosť vláčika vždy zmerajte 10-krát a vypočítajte priemernú hodnotu rýchlosti.
4. Zmerajte teplotu v miestnosti, pretože rýchlosť zvuku závisí od teploty podľa vzťahu

$$c = 331,06 + 0,61t \text{ [m/s, } ^\circ\text{C]}.$$

OVLÁDANIE MERACIEHO SOFTVÉRU

Spustíte program **Measure** a po jeho spustení v menu **File** zvolíte položku **New measurement**. Malo by sa objaviť jedno z okien zobrazených v prílohe. Ak sa tak nestane, skontrolujte, či je v menu **Gauge** zaškrtnutá položka **Cobra 3 Timer/Counter**.

Meranie rýchlosti vláčika

V ovládacom okne kliknite na **Timer** a nastavte parametre tak, ako je uvedené na obrázku „nastavenie Timer“. Po stlačení tlačítka **Continue** sa objaví okno, v ktorom sa bude zobrazovať rýchlosť vláčika vypočítaná z doby zakrytia svetelnej závory. Meranie sa automaticky opakuje vždy pri zakrytí závory. Zastavuje sa tlačítkom **Stop**.

Príloha A – meracie prístroje a práca so softwarom

Prístroje tvoriace experimentálnu zostavu:

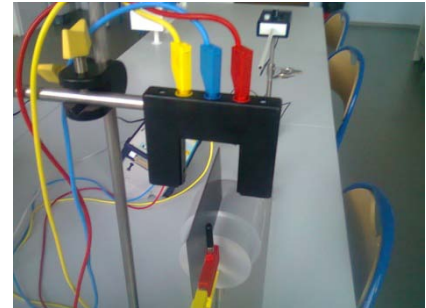
- frekvenčný generátor
(foto dole)



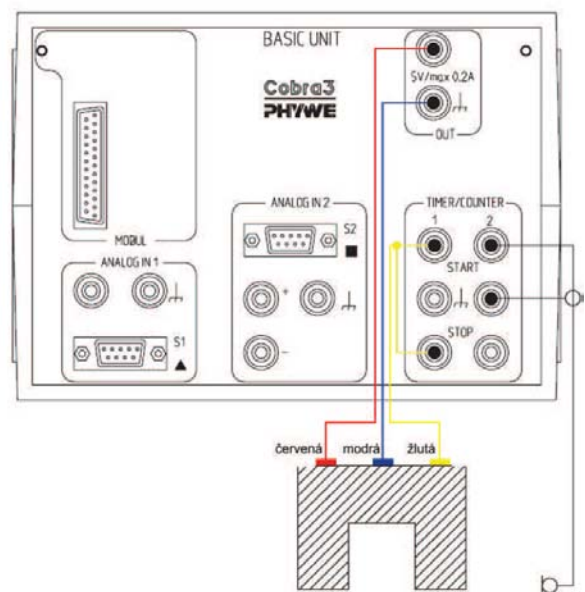
- meracia jednotka Cobra 3
napojená na PC, (foto dole)



- optický senzor a mikrofón
napojený na jednotku Cobra
(foto a schéma zapojenia dole)



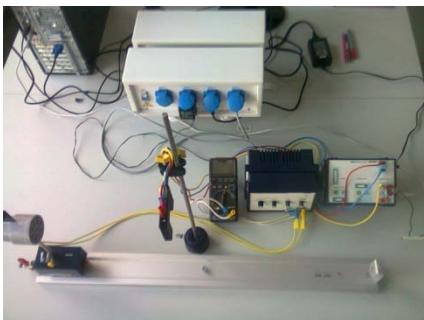
- vozík s reproduktorom
regulujem rýchlosť a smer
pohybu vozíka po vodiacej
koľajnici (foto dole)



Ukážka experimentálnej zostavy: časové sekvencie merania

Detektor – mikrofón napojený na meraciu jednotku Cobra – jeho úlohou bude registrovať pohybujúci sa signál
Zdroj vlnenia – reproduktor pohybujúci sa v dvoch smeroch: približuje sa – rýchlosť v_1 , vzdaluje sa – rýchlosť v_2

Pre manuálne nastavenú frekvenciu f odčítanú na multimetri Metex pomocou programu Measure zistíme číselnú hodnotu rýchlosti (v_1, v_2) šírenia sa vlny medzi statickým pozorovateľom a pohybujúcim sa zdrojom



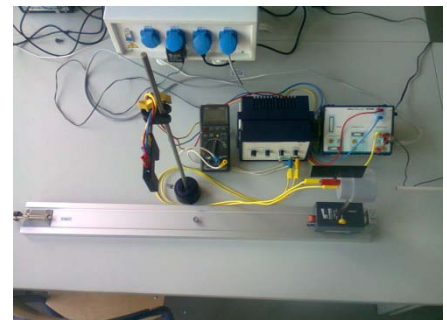
Štart merania:

- poznám f



Odčítavanie rýchlosti:

v_1 : približovanie sa zdroja k detektoru
 v_2 : vzdalovanie sa zdroja od detektora



Koniec merania:

- manuálne zastavím vozík
- vypočítam frekvencie (f'_1, f'_2)

Ukážka výpočtu frekvencie podľa vzorca (1.3)

vstupné údaje: $c = 333 \text{ ms}^{-1}$ $f = 16\,520 \text{ Hz}$	namerané rýchlosti: $v_1 = 0,297 \text{ ms}^{-1}$ $v_2 = 0,330 \text{ ms}^{-1}$	vzorce - výpočet frekvencie $f'_1 = [f_0(c + v_1)]/c$ $f'_2 = [f_0(c - v_2)]/c$	vypočítali sme: $f'_1 = 15\,534 \text{ Hz}$ $f'_2 = 16\,503 \text{ Hz}$
---	---	---	---

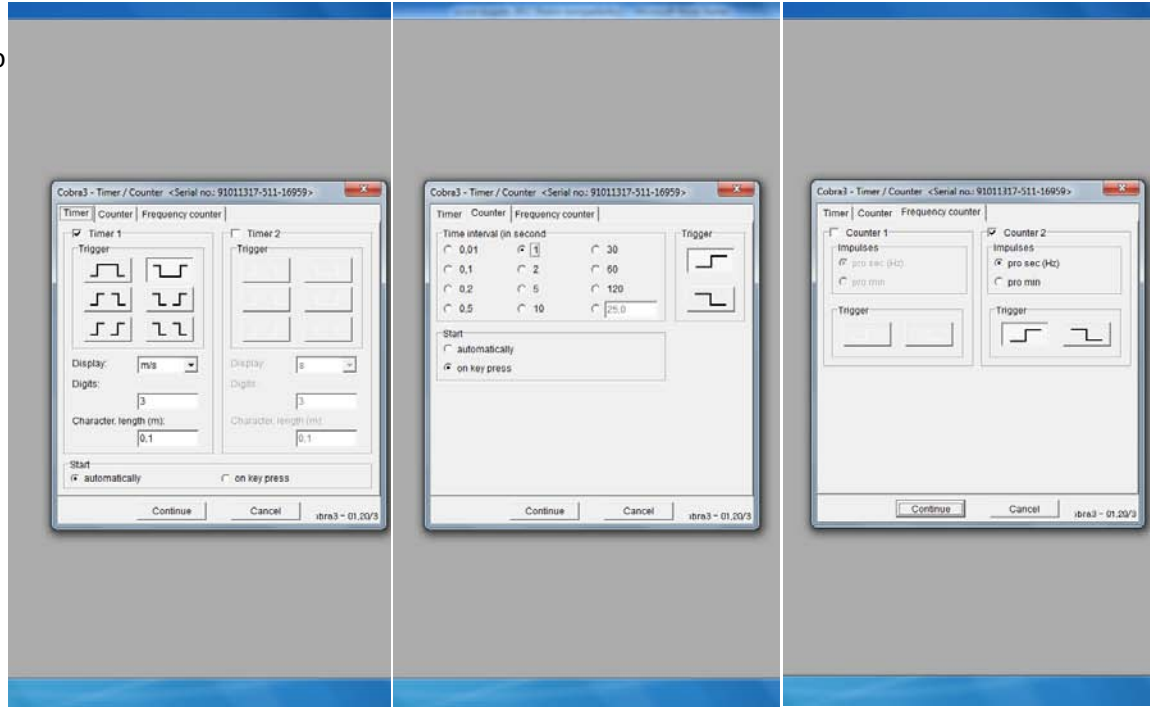
Pre každé meranie následne porovnáme frekvencie z generátora vln so získanými

Práca s programom Measure

Po spustení programu measure sa objaví okno **Cobra 3 - Timer**.

Horná lišta obsahuje položky:

- Timer
- Counter
- Frequency Counter



nastavenie **Timer**:
 Trigger 1:
 Digits: 3
 Character length (m): 0,1
 Start – automatically

nastavenie **Counter**:
 Trigger:
 Time (in second): 1

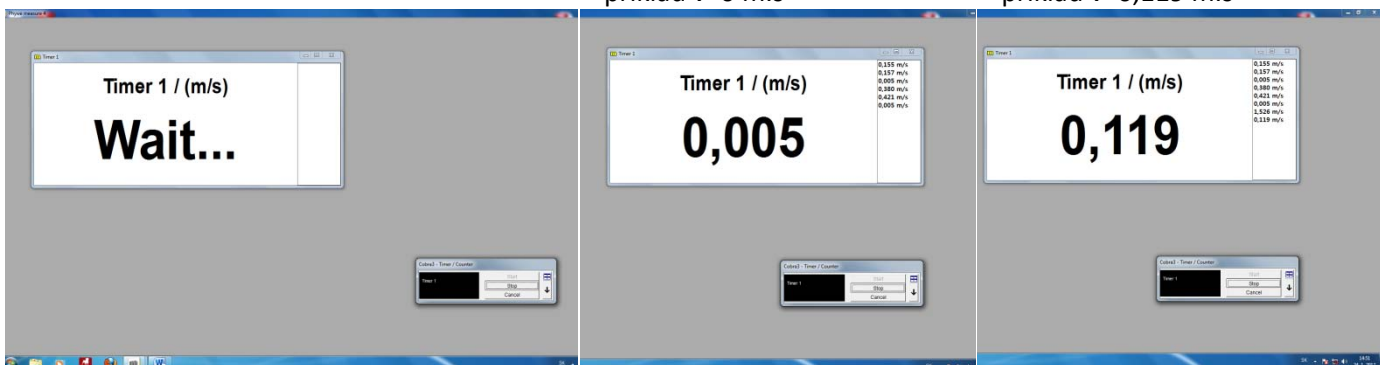
Nastavenie **Frequency counter**:
 Trigger:
 pro sec (Hz)

Ukážkové meranie :

Meranie spúštam cez **Continue** objaví sa:

Ukážky meraní rýchlostí
 a) reproduktor sa nehýbe -
 senzor pohyb neregistruje:
 príklad $v=0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

b) reproduktor v pohybe –
 senzor pohyb zaregistruje:
 príklad $v=0,119 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$



Upozornenia pre prácu „vláčika s reproduktorom“:

- Pri pohybe „vláčika“ sledujeme vodiče, aby nedošlo k ich prípadnému zachyteniu o iný predmet
- Po prejdení „vláčika“ cez optickú závoru sa pripravíme na manuálne zastavenie vláčika. Nasleduje experiment so zmeneným smerom vláčika pri pôvodne nastavenej rýchlosti (vždy meriame obe rýchlosti približovania sa a vzdalovania sa zdroju vlnenia od pozorovateľa)
- Optickú závoru (fixovanú držiakom) inštalujeme do stredu dráhy pohybu systému. Overíme stabilitu umiestnenia a inštalácie pred meraním. Prepojenie optickej závoru so systémom Cobra 3 robíme podľa uvedenej schémy.
- Mikrofón (fixovaný držiakom) inštalujeme vo výške reproduktora (v osi reproduktora) tak, aby svojím rozmerom nebránil dojazdu vláčika. Overíme stabilitu umiestnenia a inštalácie pred meraním. Prepojenie optickej závoru so systémom Cobra 3 robíme podľa uvedenej schémy.

Príloha B - Tabuľky

Rýchlosť zvuku vo výbraných materiáloch		Rýchlosť zvuku od teploty	
Prostredie	Rýchlosť (m.s ⁻¹)	Teplota (°C)	Rýchlosť (m.s ⁻¹)
Vodík (0 °C)	1286	-20	319
Kyslík (25 °C)	316	-10	325
Suchý vzduch (0 °C)	331,4	0	331
Suchý vzduch (25 °C)	346,3	10	337
Destilovaná voda (25 °C)	1 497	20	343
Morská voda (13 °C)	1 500	30	349
Ľad (13 °C)	3 200	40	355
Meď (20 °C)	3 500 / 4 720	50	360
Oceľ (20 °C)	5 000 / 6 000	100	387
Hliník (20 °C)	5 200 / 6 400	200	436

Schematické znázornenie šírenia sa zvuku okolo prekážky a cez štrbinu

- zdroj = ●
- prekážka = ●
- štrbina = — —

