

## Tsunami na talíři

Tsunami (z japonského „vlna na pobřeží“) je jednou z živelných katastrof, které doprovázejí život na naší planetě. Tsunami bývají vyvolány zemětřesením nebo vulkanickou činností na volném moři. K vyvolání vln tsunami je potřeba zemětřesení o velikosti nejméně 7,5 stupně Richterovy škály.

V roce 1935 vyvinul americký seismolog Charles Francis Richter (1900-1985) postup k hodnocení síly (magnitudy) zemětřesení. Jako měřítko si vzal výchylku fiktivního seismografu, který je umístěn ve vzdálenosti 100 km od epicentra zemětřesení. Skutečná zemětřesení se přepočítávají na tuto standardní situaci. Richterova stupnice není lineární, ale logaritmická se základem 10. Každý vyšší stupeň odpovídá 10násobně silnějšímu zemětřesení (např. stupeň 4 je 100x silnější než stupeň 2). Richterova stupnice je shora neomezená, ale vyšší stupeň než 10 není reálný. Při síle 10 by se uvolnila energie, která by roztříštila zeměkoulí.

Nejvyšší hodnota naměřená na Richterově stupnici je 9,5 (zemětřesení 1960 u pobřeží Chile). Zemětřesení 26.12.2004 mělo sílu 9,0 a bylo pátým nejsilnějším zemětřesením.

Vlna vznikající na volném moři vlivem zemětřesení se šíří podle zákonů o šíření vlnění. Amplituda vznikající vlny je malá (dm až desítky dm), nedochází k proudění vody (transportu vody). Oceánem se šíří vlna (mění se výška hladiny – vrch a důl) a energie obsažená ve vlně. Rychlost šíření vlny závisí na hloubce moře podle vztahu

$$v = \sqrt{g \cdot h}$$

Hloubka moře (m)	6000	2000	200	20
Rychlost (km.h <sup>-1</sup> )	800	500	150	50



Když se vlna dostane k pobřeží, část energie vlny se přemění na vnitřní tření vody, tření vody o dno, tření o břeh – dochází k přeměně energie v teplo; většina energie však zůstává i nadále ve vlně. Čím víc se vlna zpomalí, tím větší část energie se přemění na potenciální energii - což se projeví zvětšením výšky vlny a kinetická energie se projeví jako silný proud vodní masy směrem do vnitrozemí.

Blíží-li se vlna k pobřeží, jako první dosáhne břehu důl vlny. Tento jev registrujeme tak, že i voda z pobřeží steče do důlu vlny, moře ustoupí od pobřeží (mnoho desítek metrů až km). Teprve po určité době (podle vlnové délky vlny je časový odstup až několik minut) se k pobřeží dostane vrch vlny - v mělké vodě se mění rychlost vlny, velikost amplitudy (výška vlny), vlivem tření dojde k proudění.

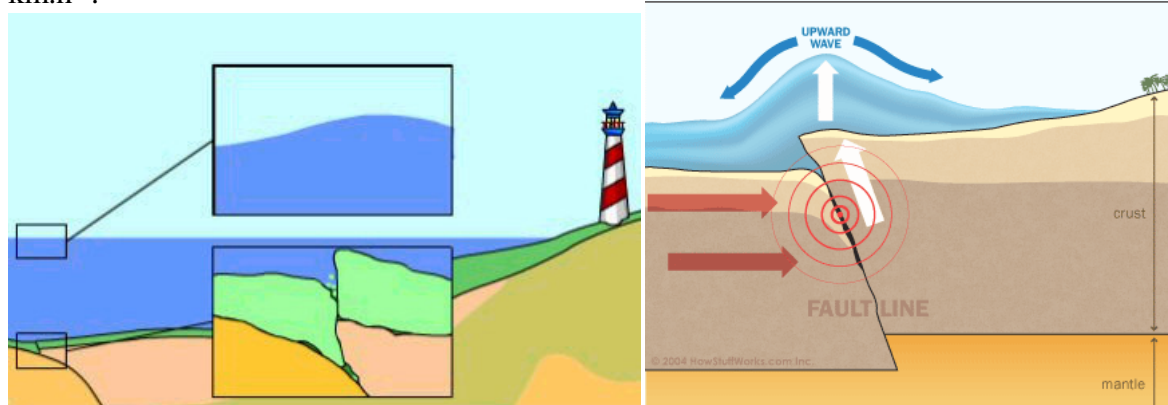
Zákony vlnění, kterými se řídí vznik a šíření ničivých vln tsunami, lze velice jednoduše modelovat. Stačí si vzít talíř s vodou, mapu světa a můžeme začít experimentovat.

### Tsunami na talíři

*Pomůcky:* 1 talíř s plochým dnem bez dekoru, 1 kapátko, 1 slámka, 1 kancelářská sponka, , mletý pepř nebo curry, voda, jar, pravítko, fix, mapa Asie

#### *Postup:*

Na talíři budeme modelovat průběh ničivého tsunami ze dne 26.12.2004, které se do dějin zapsalo jako jedna z nejničivějších živelných pohrom. V uvedený den se v blízkosti Sumatry mořské dno zvedlo v délce asi 1000 km (vlivem posunu Indické desky pod desku Barmskou) až o 20 m. Vlnová délka vzniklé vlny byla asi 125-250 km a vlna se šířila rychlostí 800 km.h<sup>-1</sup>.



Model vytvoříme tak, že postavíme talíř na stůl a nalijeme do něj vodu. Hladina vody by měla mít výšku 5 mm. Výšku hladiny odměříme pomocí pravítka. Voda v talíři představuje část Indického oceánu mezi Sumatrou a Srí Lankou. Fixem můžeme na okraj talíře označit polohu Sumatry a Srí Lanky.

V prvním kroku je třeba stanovit měřítko našeho modelu. Z mapy odečteme vzdálenost mezi Sumatrou a Srí Lankou. Potom změříme rozměry našeho modelového moře. Vypočítáme měřítko našeho modelu.

Jako příklad uvedu měřítko modelu  $M = 1: 10 \text{ milionům} = 1:10\,000\,000$ . To znamená, vzdálenost 1 mm v našem modelu odpovídá ve skutečném moři vzdálenosti 10 km. Hloubka „moře“ v našem modelu je 5 mm. Odpovídá tato hloubka skutečnosti? Podle mapy lze odhadnout, že hloubka oceánu leží v rozmezí 4000 – 5000 m. Budeme uvažovat hloubku 5000 m, kterou označíme  $h$ . Pomocí stanoveného měřítka vypočteme hloubky vody, která by měla být v talíři.

Výpočet hloubky modelu:  $5000: 10\,000\,000 = 0,0005 \text{ m} = 0.5 \text{ mm}$

Aby byl model správný, musela by hloubka vody v talíři být jen půl milimetru, hloubka v našem talíři je půl centimetru. Správnou hloubku vody v modelu nelze realizovat, tak malé množství vody nelze na talíř vlivem povrchového napětí vody nalít. Měřítka našeho modelu opravíme:  $hM = 5 \text{ mm}$  (hloubka modelu), tj. náš model je 10ti-násobně větší.

Vznik tsunami:

Vlivem podmořského zemětřesení dojde k tomu, že v místě, kde dříve bylo moře, se objeví pevnina – moře je jakoby vyzdvíženo, nad epicentrem se vytvoří hora vody. Kolik této vody bylo v případě zemětřesení 26.12.2004?

Předpokládejme délku zlomu 500 km, jeho šířku 10 km a zvýšení dna 20 m:

Výpočet objemu vody:

$$V = 0,02 \text{ km} \times 10 \text{ km} \times 500 \text{ km} = 100 \text{ km}^3 = 100\,000\,000\,000 \text{ m}^3 = 100\,000\,000\,000\,000 \text{ litrů}$$

$$\text{Model: } VM = 100\,000\,000\,000 \text{ m}^3 / (10\,000\,000)^3 = 0,000\,000\,000\,1 \text{ m}^3 = 0,1 \text{ mm}^3$$

Tsunami – vlnu v našem talíři lze vytvořit pomocí kapátka – na vodní hladinu necháme kápnout kapku vody. Tím vytvoříme tsunami pomocí hory vody klouzající na hladinu. Kapku necháme padat z výšky 15 až 20 cm. Výška padající kapky ovlivní tvar vlny.

Tsunami na talíři lze vytvořit i tak, že budeme foukat přes slámku pod hladinu (jako sopka). Aby proud vyfouknutého vzduchu nebyl příliš silný, stlačíme konec slámky a sepne se jej kancelářskou sponkou. Zahnutý stlačený konec slámky musí být pod hladinou, zbytek slámky trčí vzhůru. Snažíme se vyfouknout 1 bublinu, která stoupá vzhůru a vytvoří vlnu.

Vlnová délka skutečné vlny na moři je asi  $\lambda = 100 \text{ km}$ . Jak velká je vlnová délka vln v našem modelu?

Výpočet vlnové délky vln v modelu:  $\lambda M = 100 \text{ km} : 10\,000\,000 = 1 \text{ cm}$ ,  $\lambda M = 1 \text{ cm}$

Takovou délku lze měřit přibližně pravítkem.

Jak vysoká je vlna na moři?

Hora vody měla objem  $V = 100 \text{ km}^3$ . Z tohoto bodu se vlna šíří všemi směry. Ve vzdálenosti 1000 km se kruh zvětší na průměr 2000 km. Vzhledem k tomu, že vlnová délka  $\lambda = 100 \text{ km}$ , můžeme si představit, že vytlačený objem vody se roztáhl na horu o délce 50 km (ve směru pohybu) a je následován 50 km širokým důlem. (Jedná se o zjednodušení, většinou jsou pozorovány 1 až 3 po sobě následující vrchy vln). Vrch vlny je vzhledem ke kolmici na směr šíření široce roztažen – podle obvodu kruhu. Obvod kruhu dostaneme jako součin průměru a čísla  $\pi$ :

$$V = 2r\pi\lambda/2 H = r\pi\lambda H$$

kde  $r$  je vzdálenost od epicentra,  $H$  rozdíl výšek vrch-důl vlny. Odtud

$$H = \frac{V}{r\pi\lambda}$$

$$\text{Výpočet: } H = \frac{100 \text{ km}^3}{1000 \text{ km} \cdot 3,14 \cdot 100 \text{ km}} = 0,000\,3 \text{ km} = 0,3 \text{ m} = 30 \text{ cm}$$

$$\text{Model: } HM = 0,3 \text{ m} / 10\,000\,000 = 0,000\,03 \text{ mm} = 30 \text{ nm}$$

Výška vlny v našem modelu je nepozorovatelná.

Výška vlny na volném moři, jehož hloubka je 5 000 m, ve vzdálenosti 1000 km od epicentra je 30 cm. Loď na širém moři vlnu vůbec nezaznamená. Loď by vlnu nezaznamenala, ani kdyby byla 10krát vyšší, neboť je velmi široká.

Modelová situace – kolik vody je vytlačeno, jak vysoká je vlna?

Padající kapky mají objem asi  $VM = 10 \text{ mm}^3$ , tzn. že kapka má průměr asi  $d = 2,7 \text{ mm}$ .

Náš model neodpovídá skutečnosti. Je mnohem silnější – místo  $V = 10 \text{ mm}^3$  by podle měřítka modelu mělo být vytlačeno  $V = 0,1 \text{ mm}^3$  vody. Toto množství by bylo nepozorovatelné.

Jak vysoká je vlna na okraji talíře, kde je zakreslena Srí Lanka, tj. asi 10 cm od vystupující bubliny?

V modelu  $HM = 0,000\ 03\ \text{mm}$

Naše zvětšení  $HM+ = 7\ \text{mm}^3 / (100\ \text{mm} \times 3,14 \times 10\ \text{mm}) = 0,002\ \text{mm}$ .

Abychom vlnu pozorovali, musíme vytvářet super vlny - kapeme z větší výšky, tzn. že potenciální energie kapky je větší, tím vytvoříme větší vlnu (kapeme-li blízko povrchu vodní hladiny – vlna je slabá, nedosáhne okraje talíře).

Energie vln tsunami odpovídá potenciální energii, kterou voda získá nad epicentrem, když je dno náhle vyzdviženo. Tato energie se přemění v energii vlny. Potenciální energie se mění na kinetickou – zvýšení vlny proti tíhové síle a boční pohyb vody. Přeměny energie se šíří jako vlna. Voda zůstává tam, kde je.

Jak rychle se pohybuje voda v modelu?

Rychlost pohybu vlny odhadneme. Víme, že uplyne asi 1 s, když vyslovíme slovo „jedenadvacet“. Nahlas vyslovujeme „jedenadvacet“ a očima sledujeme vlnu až za okraj talíře, dokud slovo nedozní. Pravítkem odměříme vzdálenost (je to asi 30 cm). Uběhne-li vlna vzdálenost 20 nebo 40 cm, je její rychlost  $v = 0,2$  až  $0,4\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Pro výpočet rychlosti vlny platí vztah

$$v = \sqrt{g \cdot h}$$

$$vM = \sqrt{ghM} = \sqrt{9,81\ \text{m}\cdot\text{s}^{-2} \times 0,005\ \text{m}} = \sqrt{0,004905\ \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}} = 0,2\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Velikost rychlosti vln tsunami v Indickém oceánu:

$$v = \sqrt{gh} = \sqrt{9,81\ \text{m}\cdot\text{s}^{-2} \times 5000\ \text{m}} = \sqrt{49050\ \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}} = 200\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1} = 700\ \text{km}\cdot\text{h}^{-1} \quad (\text{hodnota odpovídá rychlosti letadla})$$

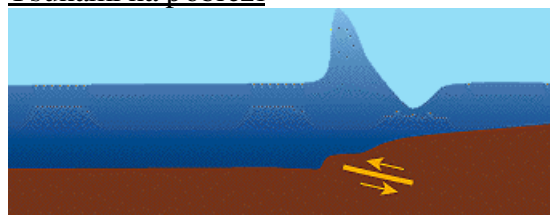
Kolik času uběhne mezi dvěma vrchy vlny, která nadzvedne loď?

$$T = \lambda v = 100\ 000\ \text{m} / 200\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1} = 500\ \text{s} = 8\ \text{min}$$

Jaká doba uplyne mezi zemětřesením a dopadem vlny na pobřeží Srí Lanky?

$$v = \frac{s}{t}, \quad s = 1\ 500\ \text{km}, \quad t = \frac{s}{v} = \frac{1500\ \text{km}}{700\ \text{km}\cdot\text{h}^{-1}} = 2\ \text{hodiny}$$

Tsunami na pobřeží



Na modelový oceán rozptýlíme loď, naplaveniny, které budou představovat zrníčka pepře. Skutečná loď má délku až 300 m, jak velké musejí být loď v našem modelu?

$$DM = 300\ \text{m} : 10\ 000\ 000 = 0,000\ 03\ \text{m} = 0,03\ \text{mm} = 30\ \mu\text{m}$$

Má-li lidský vlas průměr  $100\ \mu\text{m}$ , znamená to, že loď v modelu musí být představována jemným prachem.

Pobřeží musíme upravit tak, aby tam moře naléhalo ploše. Voda na talíři neteče vlivem povrchového napětí stejnoměrně. Změnu povrchového napětí docílíme potřením okraje talíře saponátem. Jeden okraj talíře podložíme tak, aby ležel šikmo. „Srí Lanka“ je nyní tak vysoko, že voda v talíři končí na jeho rovném dnu. Hloubka se mění od 5 mm až na 0. Talíř poprášíme pepřem, vyvoláme tsunami na hluboké vodě a pozorujeme, jak se pohybují zrníčka na vodě,

pobřeží, souši, i ta která byla pod vodou. Zrníčka před plochým pobřežím se pohybují asi 1 mm tam a zpět – skutečná loď by se tedy pohybovala 10 km tam a zpět. Ve skutečnosti není pohyb lodí tak velký, my však máme model zvětšený – vytváříme supertsunami.

Zpomalení vlny na pobřeží:

Hloubka moře u pobřeží se mění z hodnoty 5000 m na 10 m.

$$v_p = \sqrt{9,81 \text{ m.s}^{-2} \cdot 10 \text{ m}} = 10 \text{ m.s}^{-1} = 36 \text{ km.h}^{-1}$$

Při pobřeží jsou sousední vrchy vln tlačeny k sobě, vlna se zvedá, aby vodní masa odsunutá nad epicentrem, mohla zůstat v pohybu.

$$\text{Změna vlnové délky } \lambda_p = \lambda \frac{v_p}{v} = 100 \text{ km} \frac{10 \text{ m.s}^{-1}}{200 \text{ m.s}^{-1}} = 5 \text{ km},$$

kde  $\lambda$  a  $v$  jsou hodnoty pro hloubku 5000 m

Výška vlny: objem vody se nemění, výška vlny roste nepřímo úměrně k vlnové délce

$$H_p = H \lambda / \lambda_p = 0,3 \text{ m} \times 100 \text{ km} / 5 \text{ km} = 6 \text{ m}$$

Perioda mezi dvěma vlnami: vychýlení vody na pobřeží je vyvoláno změnou polohy vlny na moři – ve stejném rytmu, během několika minut docházejí vlny na pobřeží, to je možné jen při zkrácení jejich vlnové délky.

V hloubce 10 mm objem vody v čase mezi vrchem a dolem vlny působí jako kinetická energie v kanálu širokém 10 m.

Kolik litrů vody se pohybuje na každém metru pobřeží?

$$2500 \text{ m} \times 6 \text{ m} = 15\,000 \text{ m}^3 \text{ na } 1 \text{ m pobřeží tj. } 15 \text{ milionů litrů vody na } 1 \text{ m pobřeží.}$$

Podobný výsledek dostaneme, když vodu vytlačenou v epicentru roztáhneme na kruh o poloměru 1000 km:

$$100 \text{ km}^3 / 2 \times 3,14 \times 1000 \text{ km} = 0,016 \text{ km}^2 = 16\,000 \text{ m}^3 / 1 \text{ m délky}$$

Pochopení fyziky vln tsunami není dosud propracováno pro všechny fáze - od vzniku, šíření vln až po jejich dopad na pobřeží. Nejlépe propracovaná je teorie vzniku a šíření vln. Vzhledem k vlnové délce vln a hloubce vody v místě, kde tsunami vzniká, lze aplikovat teorii lineárního vlnění. Podle této teorie lze říci, že čím je voda hlubší a vlnová délka vln větší, tím větší rychlostí se vlnění šíří. Na pobřeží, kde dochází k odrazu vln a překrývání vln dopadajících a odražených a vzhledem k velké výšce vlny, nelze již tsunami modelovat lineárním vlněním.

Literatura:

- 1 <http://www.schulphysik.de/tsunami.html>
- 2 HowStuffWorks – How tsunami works
- 3 González, F.I.: Tsunami! Scientific American.com, May 18, 1999.