

1. JAK VZNIKAJÍ SOPEČNÉ KALDERY?



Na vrcholcích některých sopek se nachází rozsáhlé krátery, které nevznikly srážkou Země s asteroidem, ale vlivem sopečné činnosti. Bývají zpravidla několik kilometrů široké a stovky metrů hluboké a odborně se nazývají **sopečné kaldery**. Kaldery vznikají během fáze sopečné erupce či po jejím skončení propadem vrcholku sopky do částečně vyprázdněného magmatického krbu.

Zatímco v přírodě je pozorování vzniku kaldery nesmírně nebezpečnou záležitostí, ve třídě se dá jejich formování názorně ilustrovat za pomoci jednoduchého pokusu využívajícího vrstvu mouky a balónek.

Pomůcky:

- krabice s pevnými okraji (např. kartonová) o minimální velikosti 40 × 40 × 30 cm
- umělohmotná hadička o průměru ~5 mm a délce okolo 1 m
- balónek
- lepicí páska
- hladká mouka

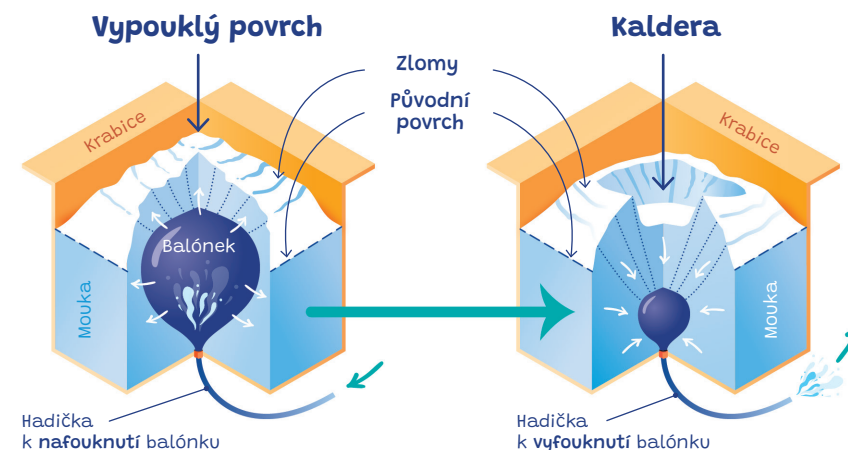
Nálady na pořízení pomůcek k experimentu přibližně 250 Kč

Postup výroby:

Balónek připevníme pomocí lepicí pásky k jedné straně umělohmotné hadičky. Ujistíme se, že hadička je uchycena pevně a že kolem spoje neuniká vzduch. Případně pro utěsnění spoje hadičky a balónku použijeme gumičku, stahovací zip, pásek či drátek. Uprostřed spodní části krabice uděláme díru o průměru hadičky a hadičku pak dírou protáhneme, tak aby konec s balónkem zůstal na dně krabice. Vhodné je oblepit okraj díry okolo hadičky lepicí páskou, aby mouka nepropadávala z krabice. Poté vysypeme krabici hladkou moukou, a to přibližně 3 cm pod okraj krabice. Během vysypávání upravíme pozici balónku, aby neležel na dně krabice, ale současně si dáváme pozor, aby nebyl blízko k povrchu mouky. Pro zhuštění materiálu je vhodné krabici zatřást. Mouka si „sedne“ a zpevní se.

Průběh experimentu:

Koncem hadičky foukáme do balónku vzduch. Balónek se zvětšuje a tlačí na okolní mouku. Jelikož se okolo nachází stěny krabice, jediná možnost, kam se může mouka přemísťovat, je vzhůru. Mouka je vytlačována, takže se povrch vyklenuje a praská. Podél prasklin dochází k přemísťování bloků mouky. Při dalším nafukování dosáhne balónek maxima (občas je možné spatřit jeho vrchol, tehdy pozor, mohl by prasknout). Poté když necháme vzduch z hadičky unikat, balónek se kvůli váze mouky vyfoukne. Během toho dochází k poklesu vyboulené oblasti a propadu mouky do prostoru, který do té doby zaujímal nafouknutý balónek. Pokles materiálu je nejvýraznější nad balónkem, kde vzniká výrazný kráter – sopečná kaldera.



Obrázek 2

Ilustrativní náčrt experimentu.

Balónek spojený s hadicí je na začátku zcela zakryt moukou. Během nafukování zvětšuje balónek objem a díky tomu tlačí na mouku (bílé šipky). V mouce vznikají zlomy (tečkované čárky), po kterých dochází k jejímu pohybu. Když přestane do balónku proudit vzduch a pustíme ústí hadičky, váha mouky vytlačí z balónku vzduch, následkem čehož se mouka propadne.

Obrázek 1

Letecký pohled na vrchol kompozitní sopky Mount Aniakchak, na jejímž vrcholku se nachází rozsáhlá sopečná kaldera.

Aljaška, USA. Autor: M. Williams, National Park Service, licence: Public Domain



Pozorujeme:

Nafukování balónku simuluje proces hromadění magmatu v oblasti magmatického krbu. Hromadění magmatu v přírodě zpravidla vede k vyklenování horninového nadloží, čehož se dá za pomoci GPS stanic využívat pro předpověď možné sopečné erupce. To lze ukázat, pokud rozmístíme kostičky stavebnice na povrch mouky a sledujeme pohyb kostiček vůči sobě. Výzdvih povrchu je doprovázen vznikem četných slabých zemětřesení a vznikem zlomů, což se dá opět měřit, tentokrát za pomoci seismických stanic.



Kde kaldery najdeme?

Příklady kalder vzniklých tímto procesem můžeme najít poblíž Neapole, kde se nachází 9 kilometrů široký kráter *Campi Flegrei*, nebo v americkém Oregonu, kde je podobně velký kráter *Crater Lake*. Kaldery se nachází i mimo Zemi, např. na Marsu. Na vrcholku nejvyšší hory Sluneční soustavy, Olympus Mons, můžeme spatřit dokonce několikanásobnou kalderu.

Reference:

Návrh experimentu převzat ze stránek USGS (<http://gallery.usgs.gov/videos/333>).

a.

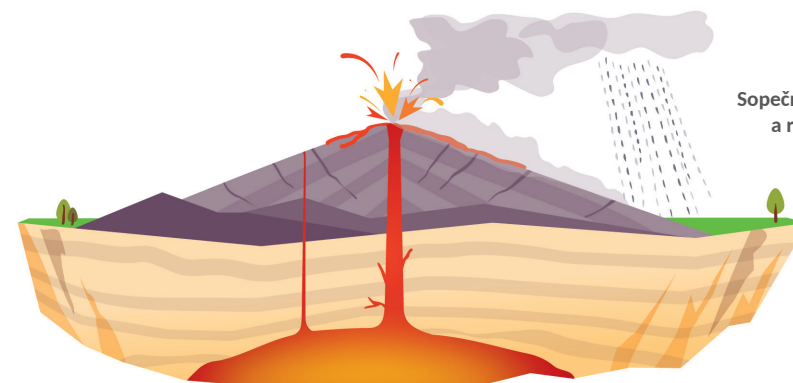
Po naplnění magmatického krbu často dochází k sopečné erupci, během které je magma vytlačeno k povrchu. Jakmile k tomu dojde, magma se označuje termínem láva. Láva pak může vytvářet lávové proudy roztékající se do okolí. Pokud je ale v magmatu dostatek sopečných plynů, může se trhat na malé kousky.

b.

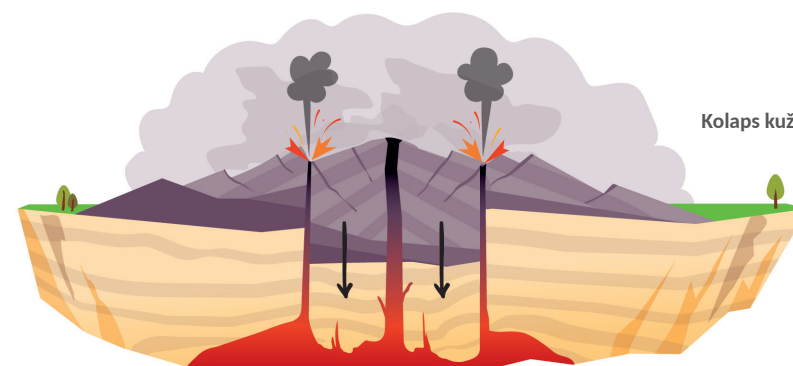
Unikající magma postupně vyprazdňuje magmatický krb. Tím klesá tlak, který magma vyvíjelo na okolní vrstvy hornin. Jelikož na tyto vrstvy působí gravitace, ony pro změnu tlačí na magmatický krb. Když jejich tlak převládne, dokáží se do částečně vyprázdněného magmatického krbu propadnout. V experimentu je tato část zastoupena vyfukováním balónku, propadem mouky a vznikem kráteru.

c.

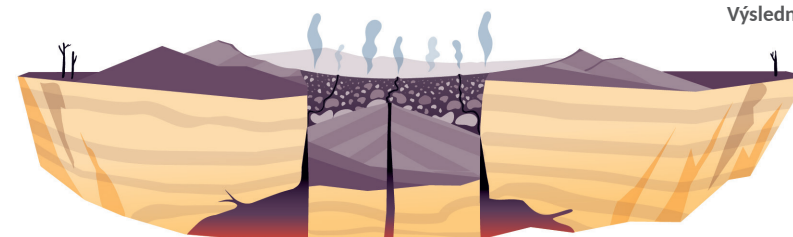
Výsledkem tohoto řízení je pak vznik sopečné kaldery.



Obr. 3a
Sopečné erupce
a růst sopky



Obr. 3b
Kolaps kužele sopky



Obr. 3c
Výsledná kaldera



TIP: Pokus se dá za pomoci chytrého telefonu zdokumentovat a ze série fotografií pak vytvořit 3D model.



2. PROČ NĚKTERÉ SOPKY BOUCHAJÍ A Z JINÝCH JEN VYTÉKÁ LÁVA?

Sopečná činnost se projevuje dvěma hlavními způsoby. Zatímco z některých sopek převážně vytéká láva, jiné vybuchují. Během sopečných explozí dochází k tomu, že se vystupující magma trhá na různě velké kusy, které jsou následně vyvrhovány do okolí. A to buď v podobě sopečných bomb, nebo sopečného prachu či popela.

Když ze sopky jen vytéká láva, označujeme tento druh sopečné činnosti jako efuzivní (výlevnou). Pokud dochází k trhání magmatu, používá se termín explozivní (výbušná). Jestli pro danou sopku budou charakteristické výlevy, nebo výbuchy, přitom záleží hlavně na množství sopečných plynů, které jsou v magmatu rozpuštěny. A v menší míře i na schopnosti magmatu téci (tzv. viskozitě), která ovlivňuje rychlost, jakou mohou sopečné plyny z magmatu unikat.

Jelikož bývá problematické si magma ve škole v rámci výuky přímo vyrobit (nicméně by to za použití speciální pece na tavení hornin šlo), je potřeba si pomoci experimentem. Ten vhodně ilustruje, jak plyny rozpuštěné v kapalině mohou náhle unikat a způsobit její trhání na kousky.



Obrázek 1

Koláž fotografií dvou typů sopečné činnosti.
Autor snímku vpravo: Peter Hartree, lic.: CC BY-SA 3.0,
licence snímku vlevo: Public Domain

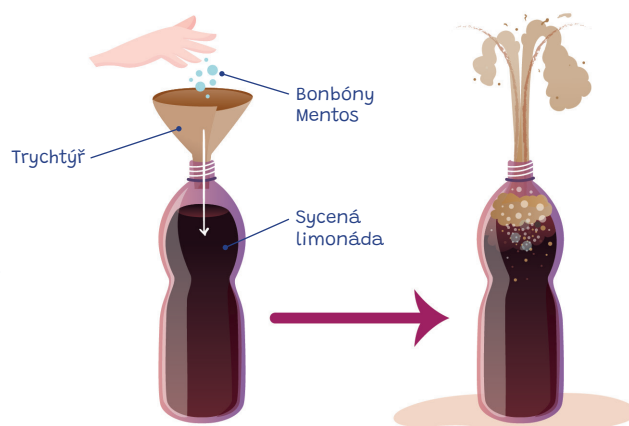
✓ Pomůcky:

- láhev sycené limonády či vody (minimálně 1,5 litru)
- balíček mentolových Mentos (pozor, některé ovocné příchutě příliš nefungují...) či hrst písku
- trychtýř pro vhození mentosky či písku do nádoby
- ochranné brýle
- táč (pokud provádíte experiment v místnosti)

Náklady na pořízení pomůcek k experimentu přibližně 80 Kč

Postup výroby:

Umístěte láhev limonády do volného prostoru, ideálně venku, aby nedošlo k poškození okolního nábytku, stěn či stropu vystříknutou tekutinou. Připravte si několik bombónů (případně hrst písku) a vložte je do papírové trubičky nebo trychtýře, které umožní jejich rychlé vhození do láhve. Důležité je rychle nasypat všechny bombóny do láhve najednou, protože rychlé odplynění nápoje je podstatné pro názornou demonstraci pokusu.



Obrázek 2

Ilustrativní nákres experimentu

Průběh experimentu:

Jakmile bombóny spadnou do láhve, okamžitě dochází k prudkému uvolňování oxidu uhličitého rozpuštěného v kapalině. Tento proces je doprovázen silným pěněním a proudem tekutiny vystřikujícím z láhve do výšky několika desítek centimetrů. Ke spuštění produkce bublin přitom nedochází kvůli chemické reakci, ale protože povrch bombónů obsahuje mikroskopické póry. Ty usnadňují únik plynů z kapaliny, jelikož poskytují příležitosti pro vznik (nukleaci) bublinek plynu. Expandující bublinky oxidu uhličitého způsobují náhlý nárůst tlaku uvnitř láhve, což vede k rychlému vytlačení tekutiny směrem ven. Podobně dokáží unikající sopečné plyny urychlit výstup magmatu k povrchu. Během výtrysku limonády dochází k jejímu roztrhání na různě velké kapičky, které jsou pak rozstříknuty do okolí. Ze stejné příčiny dochází i k trhání magmatu při sopečné erupci. Expandující bublinky sopečných plynů totiž dokáží narušit celistvost magmatu.

Pokus lze pak opakovat s použitím hrsti písku, což umožňuje vysvětlit, že odplynění není výsledkem chemické reakce, ale nukleace plynu na výčnělcích ostrohranných částic.



Pozorujeme:

Erupce láhve limonády ukazuje **explozivní fázi** odplyňování magmatu, kdy plyn v magmatu náhle expanduje a vytváří tlak, který může způsobit sopečnou erupci. Tento model ukazuje, jak zásadní roli hrají sopečné plyny při explozích sopek.

Podobně jako sycená limonáda i magma v sobě obsahuje rozpuštěné plyny, které se mohou rychle z magmatu uvolňovat. Nejčastějšími sopečnými plyny rozpuštěnými v magmatu jsou **vodní pára, oxid uhličitý a oxid siřičitý**.

Zatímco v rámci pokusu uvolnění plynů obstarává přidání bonbónu (nebo písku) s velkým množstvím nukleárních bodů, v přírodě se magma odplyňuje z jiné příčiny. Může za to zpravidla pokles **litostatického tlaku**.

! Zajímavost

Všechny výše vyjmenované plyny dokáží **výrazně ovlivňovat světové klima**. Zatímco vodní pára a oxid uhličitý jsou důležitými skleníkovými plyny přispívajícími ke skleníkovému jevu, oxid siřičitý dokáže atmosféru zahřívát, ale i ochlazovat, podle toho, jak vysoko v atmosféře se dostane (otepluje, když je v troposféře, ochlazuje, když je ve stratosféře).

Sopky tak odplyňováním magmatu dokáží v dlouhodobém časovém měřítku recyklovat skleníkové plyny, které jsou geologickými procesy z atmosféry odstraňovány a ukládány do hornin.

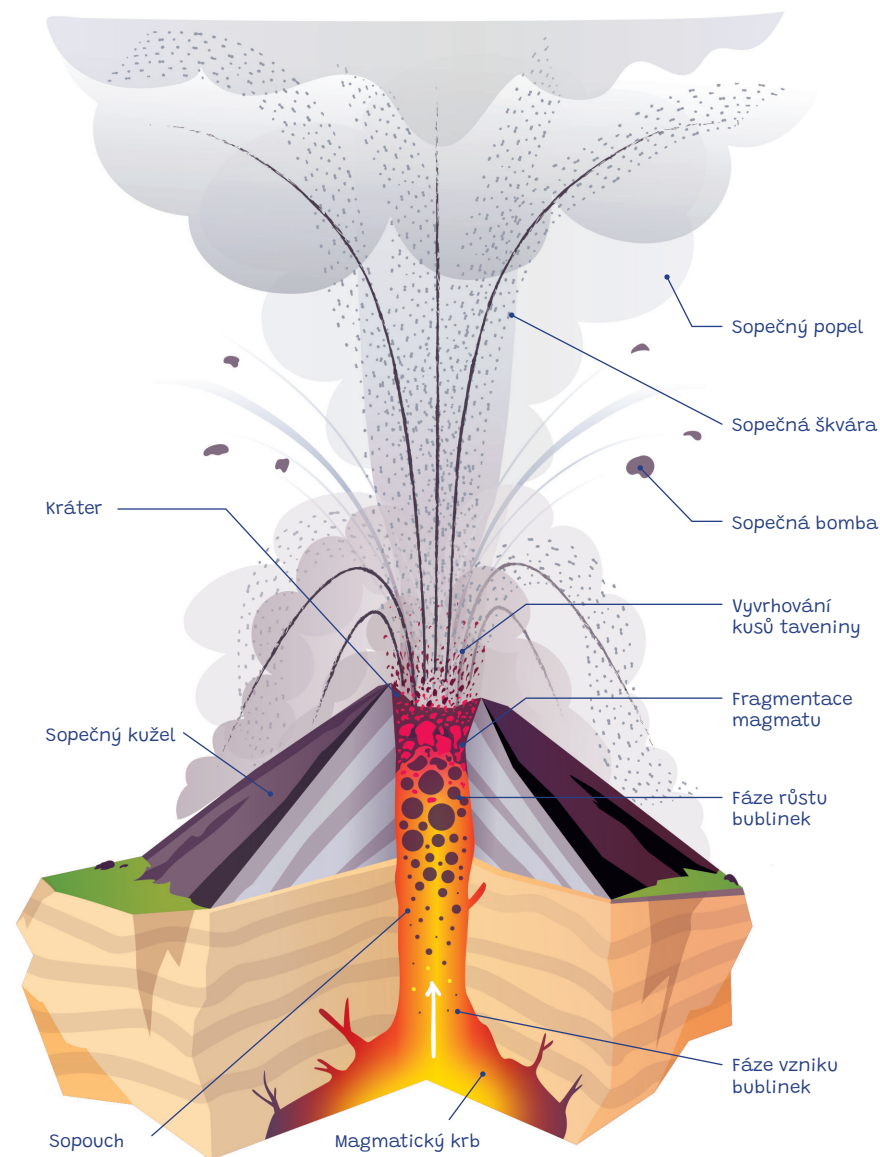
a. Jak magma vystupuje blíže k povrchu, působí na něj svou vahou stále menší množství hornin. V určitý moment pak litostatický tlak nadložních hornin poklesne natolik, že se rozpuštěný plyn může z **magmatu uvolnit a začít vytvářet bublinky**. Během dalšího výstupu dochází k dalšímu poklesu tlaku, vlivem čehož mohou bublinky zvětšovat svůj objem. K jejich růstu ale přispívá i spojování s dalšími bublinkami během výstupu k povrchu.

b. Blízko pod povrchem narůstá objem bublin tak výrazně, že **plyn zabírá naprostou většinu objemu magmatu**. Když se pak ocitnou bubliny mimo přívodní dráhu, expandují do okolního vzduchu a během toho trhají v průběhu procesu **fragmentace** taveninu na kusy. Ty jsou vyvrhovány společně se sopečnými plyny do okolí.

c. Dle velikosti vyvržených kusů hovoříme o **sopečných bombách** (větší než 64 milimetrů), **škváře** (od 2 mm do 64 mm) či o **sopečném popelu** (menší než 2 milimetry).

Obrázek 3

Idealizovaný řez sopkou znázorňující proces trhání (fragmentace) magmatu. Magma obsahuje rozpuštěné sopečné plyny, které s klesajícím litostatickým tlakem mohou z magmatu unikat, růst a nakonec ho trhat na malé kousky.



3. JAK PRONIKÁ MAGMA ZEMSKOU KŮROU?

✓ Pomůcky:

- mísa/nádoba s rozměry minimálně 30 × 20 cm
- několik balení želatiny (dostatečné pro naplnění nádoby)
- 1 tabulka mléčné čokolády
- mléko
- voda
- vaříč
- injekční stříkačka (větší velikost, 50 ml nebo více)
- hadička

Náklady na pořízení pomůcek k experimentu přibližně 150 Kč

Aby mohlo dojít k sopečné činnosti, musí se magma dostat na povrch Země, čemuž ale brání pevný obal Země v podobě zemské kůry. Pevné a relativně chladné horniny totiž tvoří vrstvu, přes kterou se nemůže magma snadno dostat, a magma si musí skrze zemskou kůru doslova razit cestu otevíráním trhlin, kterými může následně postupovat k povrchu. Jelikož se ale tento proces odehrává kilometry pod povrchem, není možné ho přímo pozorovat a prozkoumat. Naštěstí je možné proces výstupu magmatu skrze pevné horniny snadno demonstrovat za pomoci jednoduchého experimentu využívajícího želatinu a roztavenou čokoládu.

Postup výroby:

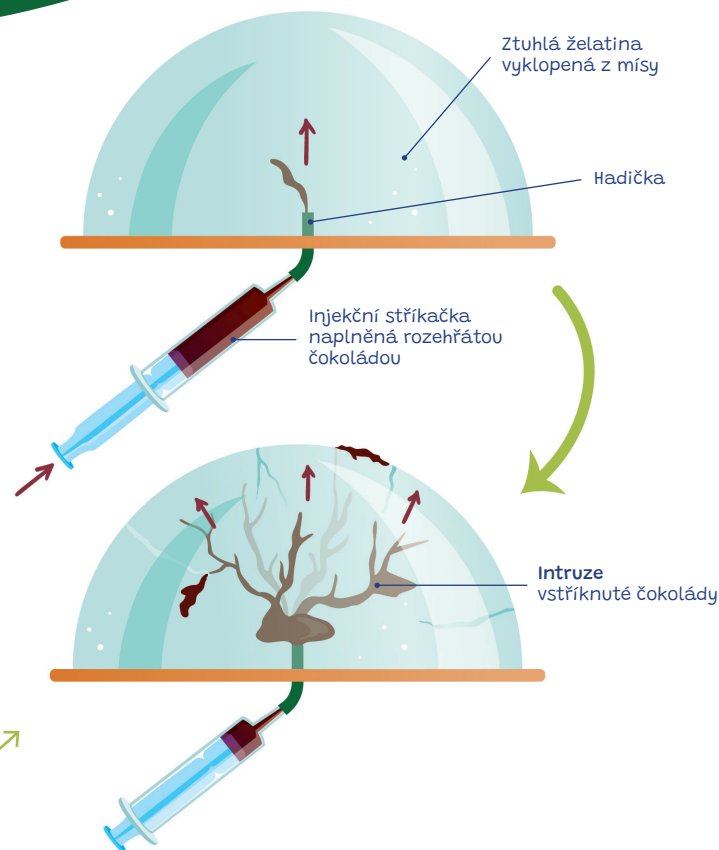
Nejprve je potřeba dle návodu na obalu připravit želatinu a tu následně nalít do připravené nádoby. Platí, že čím větší objem želatiny připravíme a čím tlustější vrstvu vytvoříme, tím bude následný pokus názornější. Když je nádoba vyplněna, umístíme ji do ledničky do doby, než želatina správně ztuhne (zpravidla stačí přes noc).

Druhý den ve vodní lázni rozejdeme čokoládu a smícháme ji s troškou mléka. Cílem je vytvořit směs, která dobře poteče a bude se snadno nabírat do injekční stříkačky.

Existují dvě možnosti, jak experiment provést. Buď opatrným vyklopením ztuhlé želatiny na podložku, která má ve svém středu navrtanou díрку, skrze níž je zespodu možné vstříknout čokoládu do želatiny. Nebo použitím průhledné plastové nádoby, kterou před nalitím želatiny uprostřed navrtáme a následně z vnější strany zalepíme díрку izolepou.

Obrázek 2

Ilustrativní nákres experimentu



Obrázek 1

Žila (vertikální) protínající horizontální vrstvy sedimentární horniny v Makhtesh Ramon, Izrael.
Autor: Andrew Shiva, Wikipedia, licence: CC BY-SA 4.0

Průběh experimentu:

Když máme nachystanou želatinu a čokoládu ve stříkačce, připojíme plastovou hadičku na ústí injekční stříkačky. Následně zasuneme hadičku zespodu do želatiny, ideálně tak, aby v ní byla alespoň půl centimetru hluboko, ale klidně i trochu víc. Snižíme tím možnost, že až budeme do želatiny vtlačovat čokoládu, bude čokoláda unikat okolo hadičky (ideální je ale prostor mezi hadičkou a stěnou nádoby něčím utěsnit...). Následně pozvolna tlačíme na píst injekční stříkačky, čímž vytlačujeme čokoládu do želatiny.

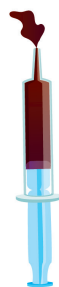


Pozorujeme:

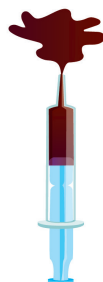
Když čokoládu vtlačujeme do želatiny, sledujeme, jak se „magma“ (čokoláda) chová při průchodu „zemskou kůrou“ (želatinou). Zatímco želatina představuje pevnou, ale pružnou (elastickou) vrstvu zemské kůry, čokoláda tekuté magma, které se snaží proniknout na povrch.

TIP 1: Experiment se dá **opakovat s namícháním čokoládové směsi s menším množstvím mléka**, a tedy o vyšší viskozitě. Jelikož taková směs hůře poteče, změní se i vzhled otevřených trhlín uvnitř želatiny. Viskóznější čokoládové magma se pohybuje pomaleji a vytváří větší tlak pod povrchem, což může vést k výraznějšímu výtrysku čokolády, pokud trhlina s čokoládou dosáhne povrchu želatiny. Naopak řidší magma snadněji stoupá k povrchu a vede ke klidnějšímu „erupcím“ s lávovými proudy.

TIP 2: V přírodě je pohyb magmatu komplikován rozdílnými vlastnostmi hornin, přes které musí magma projít. To se dá ukázat, když se změní pevnost želatiny přidáním/ubráním vody oproti návodu a **vytvořením dvou a více želatinových vrstev** v nádobě. V takovém případě je možné pozorovat, jak se bude čokoládové magma chovat na kontaktu mezi dvěma rozdílnými vrstvami. V experimentu pak nemusí vznikat jen vertikálně orientované žíly, ale i žíly horizontální, které se v geologii nazývají **ložní žíly**.



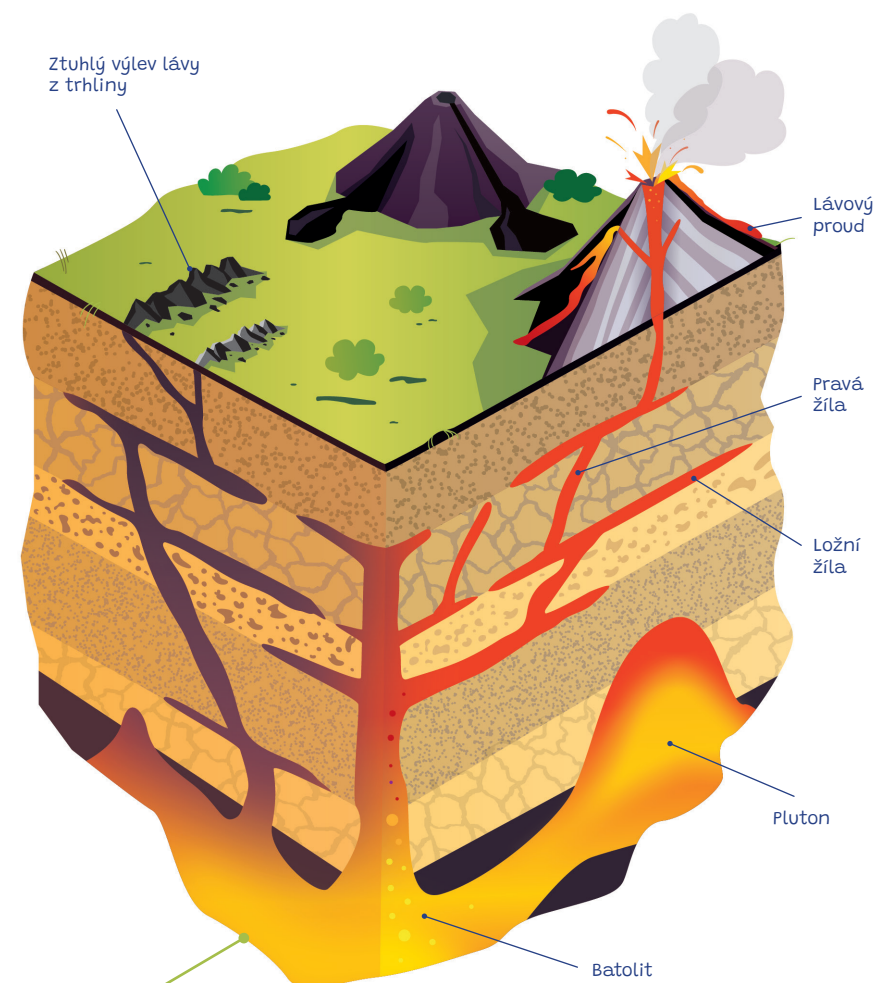
Při aplikaci **malého množství** může čokoláda pronikat želatinou pomalu a vytvářet útvary podobné magmatickým žilám, které v reálném světě mohou vyplňovat trhliny a pukliny v horninách. Pokud vtlačíme jen malé množství čokolády, nemusí se trhlina otevřít až k povrchu. V takovém případě vznikají podpovrchová magmatická tělesa, která označujeme **intruze**. V přírodě je přitom velice časté, že se magma na povrch nedokáže dostat, takže následně vychladne pod povrchem bez projevu sopečné činnosti.



Pokud vtlačíme **větší množství** čokolády, je možné pozorovat, jak se želatina začne deformovat a nakonec praskne. Tím dojde k simulaci sopečné erupce, které předchází prasknutí zemského povrchu. Následně se čokoláda rozlije na povrch želatiny, což modeluje výlev lávy na povrch Země a druh sopečné erupce, který se odborně nazývá **výlev z trhliny**.

Během výstupu čokolády skrze želatinu je možné pozorovat, jak v ní vznikají drobné trhliny, do kterých následně proniká čokoláda. Často během pronikání čokolády vzniknou zvláštní lalokovité útvary na okrajích trhlín vyplněných čokoládou, což ukazuje, jak napětí z intruze želatinu oslabuje.

Obrázek 3
Idealizovaný řez zemskou kůrou ukazující pronikání magmatu z hlubin směrem k povrchu za pomoci žil



4. JAK ZEMĚ PŘEDÁVÁ TEPLA Z NITRA K POVRCHU?



Stejně jako chladne horký nápoj v hrnečku, i Země předává své vnitřní teplo do okolního kosmického prostoru. Zatímco povrch Země vyzařuje teplo do okolí, uvnitř planety je teplo předáváno hlavně vedením (kondukcí) a prouděním (konvekci). Každý z těchto způsobů přenosu tepla převažuje v jiné části Země v závislosti na vlastnostech zemských vrstev a má i jinou účinnost.

✓ Pomůcky:

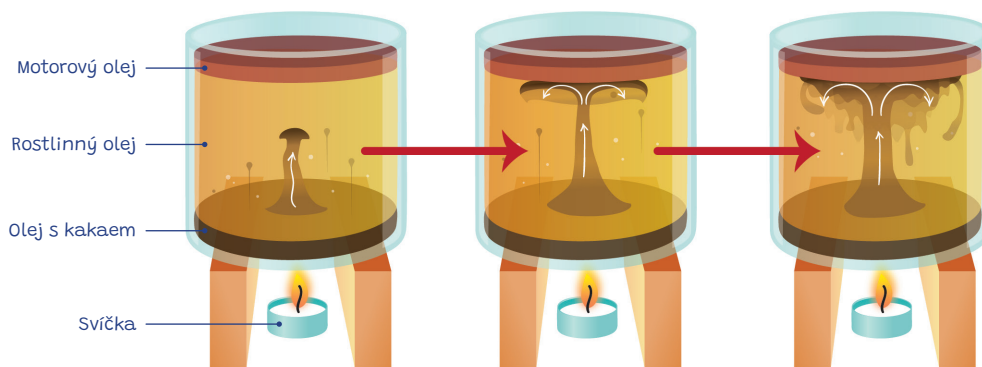
- nádoba z varného skla
- svíčka
- rostlinný olej
- motorový olej
- nadrcený jemnozrnný materiál (např. kakao)
- dva dřevěné špalíčky pro podložení varného skla

Náklady na pořízení pomůcek k experimentu přibližně 250 Kč

Ke kondukcí dochází převážně ve vnitřním jádře a zemské kůře, jelikož jsou v pevném skupenství. Teplo se totiž tímto způsobem předává mezi jednotlivými atomy tvořícími pevný materiál. Naopak u konvekce dochází k pohybu hmoty. Obvykle se odehrává v kapalném či plynném prostředí. Jelikož ale zemský plášť i vnější zemské jádro tvoří částečně natavený, plastický materiál, který je natolik měkký, že může v dlouhodobém měřítku pomalu téci, ke konvekci dochází i v těchto „pevných“ vrstvách. Obecně přitom platí, že vlivem hustotního kontrastu teplejší materiál stoupá vzhůru, kdežto chladnější klesá do hlubin.

Proudění je rychlejší a efektivnější způsob přenosu tepla než vedení. Odhaduje se, že v zemském plášti materiál proudí rychlostí přibližně 20 mm za rok a je zodpovědný za přenos 80 až 90 % veškerého tepla.

V rámci demonstrace pozorujeme vznik konvektivního proudění jako analogii k předávání tepla v zemském plášti či vnějším jádře (Obr. 2).



Obrázek 1

Umělecká představa konvektivního proudu v zemském nitru.

Od jádra vystupuje roztavený materiál k zemské kůře, pod kterou se ochlazuje a opět klesá do hlubších partií.

Obrázek 2

Sekvence ukazující průběh experimentu.

Na počátku dochází k převalování oleje smíchaného s kakaem na dně nádoby. Po jeho zahřátí se tvoří lalok vystupující vzhůru, všimněte si široké „hlavy laloku“. Po dosažení motorového oleje se ohřátý olej obarvený kakaem ochlazuje a zanořuje zpět.

Postup výroby:

Varnou nádobu postavíme na špalíčky a vložíme pod ní svíčku. Plamen svíčky by se měl dotýkat jejího dna. Na dno nasypeme přibližně jednu až dvě čajové lžičky jemného materiálu (např. kakaa). Následně do nádoby pozvolna nalijeme rostlinný olej. Kakaový prášek s rostlinným olejem promícháme. Poté přidáme další rostlinný olej, nejlépe po lžičkách, aby se nepromíchal s obarvenou vrstvou oleje. Vhodné je dosáhnout mocnosti vrstvy alespoň 10 centimetrů. Na závěr přilijeme motorový olej o menší hustotě (vhodné vyzkoušet na malém vzorku předem). Tím vznikne svrchní vrstva tvořící překážku pro vystupující konvektivní proud.

Průběh experimentu:

Zapálená svíčka ohřívá rostlinný olej s práškem kakaa. Zahřátý olej je méně hustý než okolní chladnější. Zahřívání oleje proto stoupá vzhůru a předává vedením teplo do chladnějšího okolí, čímž se pozvolna ochlazuje. Jelikož se při povrchu nachází vrstva motorového oleje o jiné hustotě, která funguje jako nepropustná vrstva, nemůže se přes ni ohřátý olej dostat. Vystupující proud tedy nemůže dosáhnout povrchu, proto se o tuto hranici rozdílných hustot zastaví a začne se rozšiřovat podélně. Tím se urychlí jeho chladnutí, vlivem čehož naroste jeho hustota. Olej s kakaem se tak stane těžším a začne klesat na dno nádoby. Tím se cyklus uzavře a zacyklí.



Pozorujeme:

V experimentu je nejprve vidět, jak se vrstva s kakaem zahřívá a místy se vyklenuje. Když se zahřeje dostatečné množství materiálu, vytvoří se úzké těleso s kloboukovitou strukturou na vrcholku, tzv. **chochol**. Předpokládá se, že obdobně vypadají plášťové chocholy, které vystupují z rozhraní jádro – plášť k zemskému povrchu.

Když se vystupující materiál dostane na hustotní přechod mezi dvěma druhy oleje, nemá možnost touto bariérou prostoupit. Proto se začne rozlévat do stran. Tím se materiál ochlazuje, stává se opět hustším, a proto klesá zpět na dno nádoby.



Zajímavost

S konceptem plášťových chocholů přišel ve snaze vysvětlit vulkanická souostroví uprostřed oceánů (jako Havajské ostrovy) v roce 1971 americký **geofyzik William Jason Morgan**. Od té doby se povedlo pomocí seismické tomografie zdokumentovat široké spektrum chocholů různých tvarů a rozsahu. Některé pravděpodobně dosahují až k zemskému povrchu, jiné pouze do středního pláště.



Kde najdeme příklady?

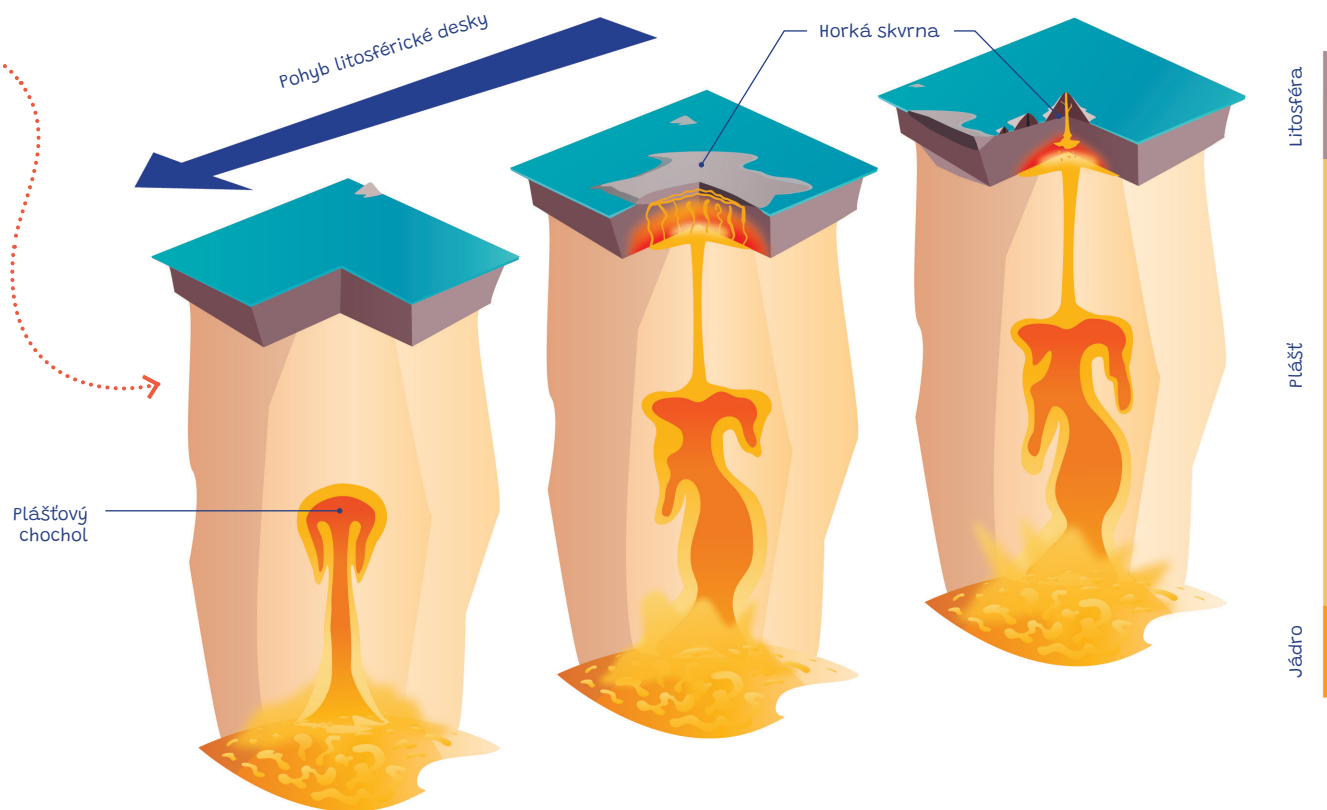
Havajské souostroví a pás podmořských hor táhnoucích se od něj ke Kamčatce, Kanárské ostrovy, Yellowstone, ale také středooceánský hřbet v Atlantickém, Tichém či Indickém oceánu.

V přírodě se vystupující materiál může chovat obdobně. Konkrétně se **rozlévat pod litosférou** tvořenou litosférickými deskami, **ochlazovat se a klesat**.

Oproti předváděnému experimentu má ale možnost způsobit **masivní tavení hornin ve svrchním plášti** a tím vytvořit magma, které se dokáže skrze litosféru dostat a na povrchu způsobit rozsáhlou sopečnou činnost.

V takovém případě vznikají **horké skvrny** (viz experiment č. 5), či pokud k přenosu tepla v plášti nedochází bodově, ale plošně, vznikají na povrchu takzvané riftové oblasti. V nich dochází k dělení litosférické kůry a vzniku nové kůry. Jedním typem riftového rozhraní jsou i středooceánské hřbety (viz navazující experiment), na kterých vzniká nová oceánská kůra.

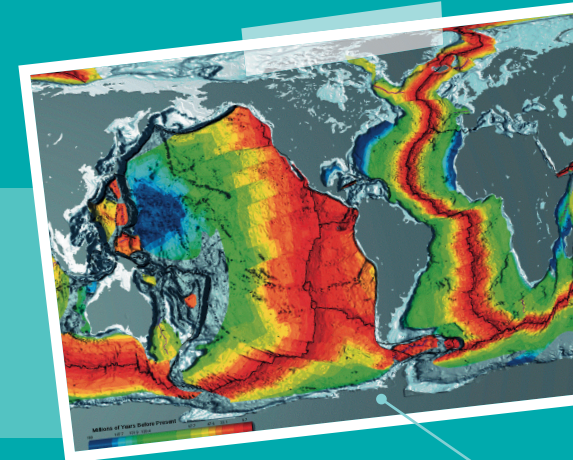
Konvekce je významný proces, který umožňuje efektivní transport tepla z hlubších partií planety k povrchu.



Obrázek 3
Trojice schematických řezů ukazuje pohled na zemský plášť, ve kterém vystupuje plášťový chochol



5. PROČ SE OCEÁNSKÉ DNO ROZPÍNÁ?



Začátkem 20. století si německý vědec Alfred Wegener všiml, že se zkameněliny stejných rostlinných i živočišných druhů vyskytují v západní Africe i části Jižní Ameriky. Jak se mohly přes tisíce kilometrů široký Atlantik dostat? Pro vysvětlení rozvinul myšlenku pohybujícího se zemského povrchu, jenže trvalo téměř půl století, než se podařilo rozpínání oceánského dna potvrdit.

Významně k tomu přispěly tři objevy. Práce Marie Tharp, která na oceánském dně objevila rozsáhlá pohoří, tzv. středooceánské hřbety; odhalení magnetické zonálnosti hornin oceánského dna (Obr. 1) a určení stáří oceánského dna (Obr. 2).

Pomůcky:

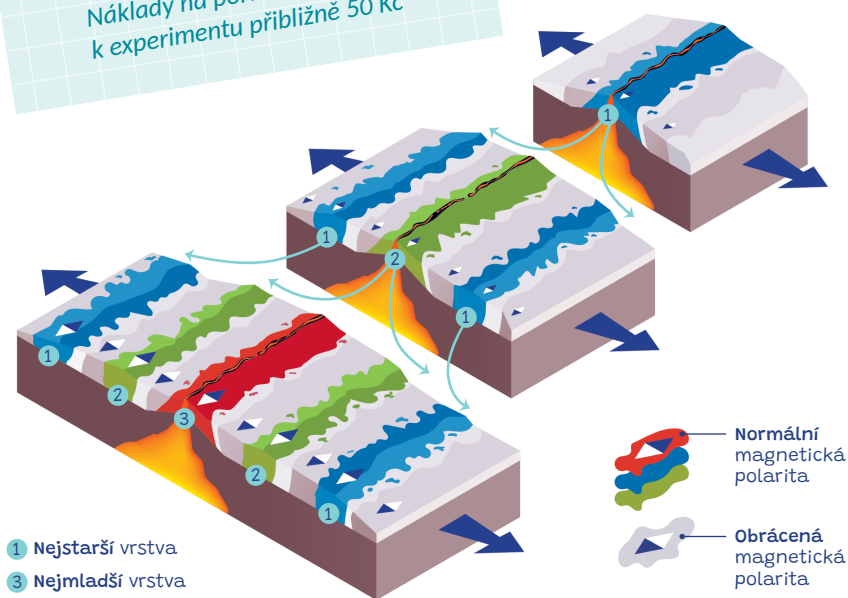
- kartonová deska či krabice
- nůžky
- list papíru o velikosti A3
- různě barevné fixy (ideálně tlusté)

Náklady na pořízení pomůcek
k experimentu přibližně 50 Kč

Výzkum magnetické zonálnosti ukázal, že opakující se vzory v magnetické orientaci hornin v podobě rovnoběžných pásů rozšířených na obě strany od středooceánských hřbetů odpovídají normálnímu nebo reversnímu záznamu magnetického pole. Jedná se tedy o doklad přepólovávání magnetického pole Země.

Naproti tomu datování hornin tvořících oceánské dno doložilo, že zatímco nejmladší horniny najdeme v blízkosti středooceánských hřbetů, ty nejstarší u okrajů kontinentů (Obr. 2). To jednoznačně prokázalo, že v oblasti hřbetů dochází ke vzniku nové oceánské kůry!

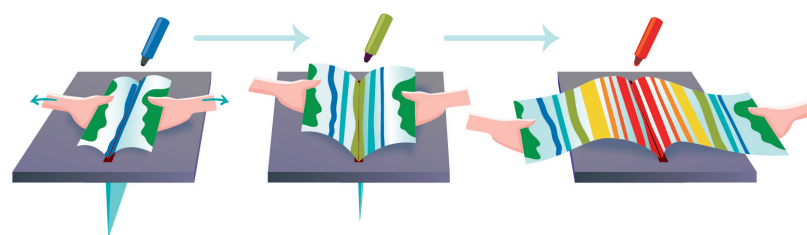
Tento pokus umožňuje proces rozpínání oceánského dna, vznik magnetické zonálnosti hornin i to, proč je stáří hornin vyšší s tím, jak se vzdalujeme od středooceánského hřbetu, snadno ilustrovat a vysvětlit.



Obrázek 1

Model magnetické zonálnosti hornin.

Nová oceánská kůra vzniká na středooceánském hřbetu a odtlačuje starší kůru stranou. Horniny v sobě mají záznam magnetické polarity z doby svého utužení.



Obrázek 3

Ilustrace znázorňuje vytahování pruhu papíru ze štěrbin v kartonové desce a kreslení pruhů magnetického páskování hornin

Postup výroby:

Do kartonu vyřízneme štěrbinu o délce 10 centimetrů a šířce pár milimetrů. Z připraveného listu A3 podélně odstříháme pruh o menší šířce, než má štěrbina. Pruh přeložíme a přehybem zasuneme do vyříznuté štěrbin, tak aby koukaly jen jeho okraje. Pro větší názornost lze na vykukující okraje nakreslit obrysy kontinentů.

Průběh experimentu:

Předvádějící uchopí okraje papíru a pomalu směrem od sebe vytahuje přehnutý papír. Asistent za pomoci střídání fixů kreslí v místě štěrbiny tlusté čáry do doby, než je papír vytažen skoro celý ven.

Obrázek 2

Stáří oceánské kůry na Zemi. Nejmladší kůra se nachází v oblasti středooceánských hřbetů, nejstarší u kontinentů.

Autor: U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration, licence: Public Domain



Pozorujeme:

Během demonstrace pozorujeme vznik nové oceánské kůry (vystupující pruh papíru) na středooceánském hřbetu (štěrbina). Tedy v místě, kde vystupující magma dává vzniknout novým horninám. Jelikož se v magmatu nachází minerální zrna, tzv. feromagnetické částice schopné reagovat na magnetické pole, dochází ke stočení jejich vnitřní magnetizace jedním směrem. Částice se tak polarizují. Pruh fixu dané barvy odpovídá jednomu směru stočení magnetického momentu částice dle aktuální orientace magnetického pole Země. Jejich existence na oceánském dně tak dokládá změny magnetického pole Země v čase a jeho přepólování. Když se následně vytvoří mapa magnetického pole oceánské kůry, můžeme pozorovat magnetickou zonálnost hornin stejně, jako vidíme barevné pruhy na listu papíru.

Jak se k povrchu na středooceánském hřbetu tlačí další magma, vznikají nové horniny, které odtlačují ty starší do strany. Z roztahování pásku je zřejmé, že části papíru, za které táhneme, jsme z kartonu vytáhli jako první. Nový papír se vynořuje ze štěrbiny a postupně se posunuje dále od ní. Obdobně je to s oceánskou kůrou, která vzniká v oblasti hřbetu. Nově vzniklá oceánská kůra tlačí na starší a pomáhá ji odtlačovat dále od hřbetu. To vysvětluje, proč se nejstarší oceánská kůra nachází při okrajích kontinentů a nejmladší naopak v místě středooceánských hřbetů (Obr. 2).

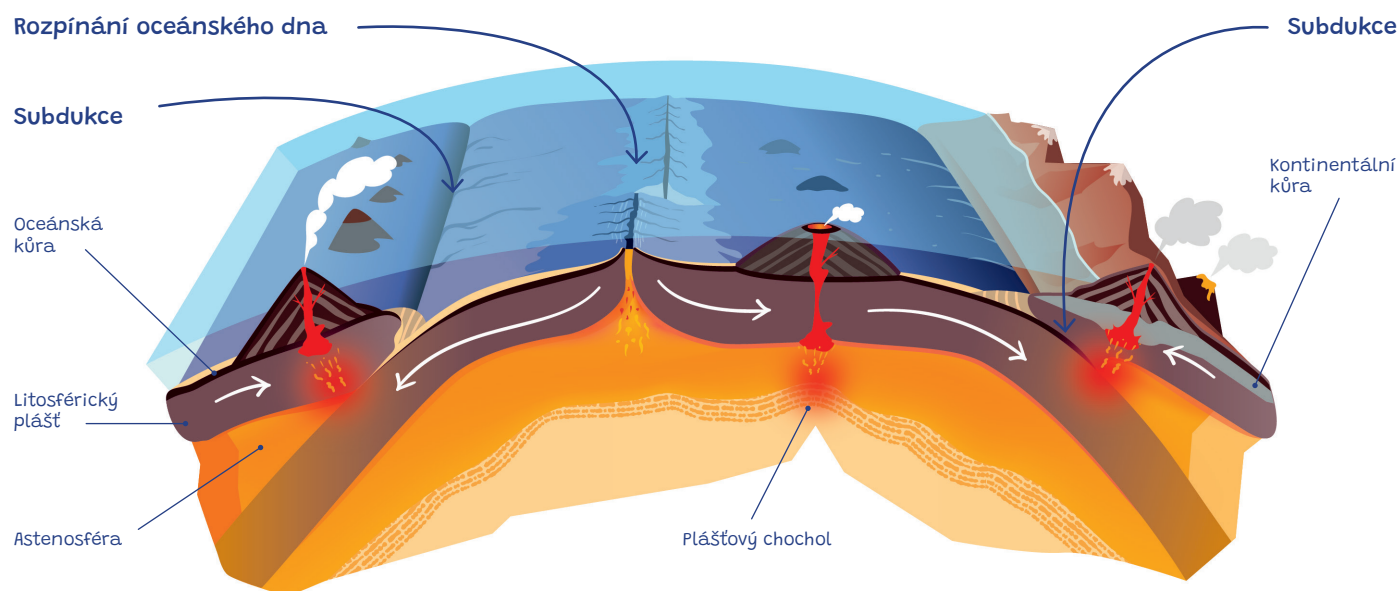
Objev rozpínání oceánského dna přispěl ke vzniku **deskové tektoniky**. Stěžejní geologické teorie hlásají, že je povrch Země rozpraskaný do litosférických desek schopných pohybu. Vlivem jejich pohybu dochází ke vzniku pohoří, formování kontinentů, uzavírání a vzniku oceánů, ale řídí i rozložení většiny sopečné činnosti a vznik zemětřesení na zemském povrchu.

Jelikož je Země kulatá a je na ní omezený prostor, oceánská kůra během pohybu naráží na kontinentální kůru, která má menší hmotnost než oceánská kůra. To způsobuje, že se oceánská kůra pod kontinentální kůru zasunuje, takovému procesu říkáme **subdukce**, a později se v hloubce taví.

Dnes si myslíme, že ponořování subdukující desky kvůli vyšší hustotě je **hlavním hnacím motorem pohybu oceánských desek**.

Kvůli tomuto pohřbívání staré oceánské kůry v oblastech subdukce a jejímu zániku nemůžeme na povrchu Země pozorovat oceánskou kůru starší než přibližně 200 milionů let. Starší oceánská kůra je totiž zasunuta pod povrch, kde dochází k jejímu přetavení. Velké části Země se tak dlouhodobě recyklují, během čehož se do hlubin planety zasouvají horniny obsahující vodu a uhlík. Tedy plyny, které jsou pak hojně vypouštěny zpět na povrch během sopečné činnosti.

Rozpínání oceánského dna



TIP: Stáhněte si šablonu pro výrobu papírového 3D modelu subdukce a sopky:
<https://www.ig.cas.cz/pro-verejnost/edukativni-materialy/>

Obrázek 4
Průřez litosférou zachycuje
životní cyklus oceánské kůry



6. PROČ PO POVRCHU ZEMĚ MIGRUJÍ NĚKTERÁ SOPEČNÁ CENTRA?



Postup výroby:

Položíme svíčku na stůl a pak ji zapálíme. Uchopíme list papíru a pomalu s ním přejíždíme nad plamenem. Během demonstrace dbáme opatrnosti, aby list nevzplanul!

Průběh experimentu:

Plamen nahřívá papír a tím ho postupně ztmavuje. Vlivem posunování papíru se nahnědlá oblast postupně posunuje. Vzniká pás tmavších skvrn, které demonstrují pohyb litosférické desky nad plášťovým chocholem v podobě svíčky.

Obrázek 1

Stáří ostrovů na dně Tichého oceánu dle Raymond a kolektiv, 2000.
Autor: National Geophysical Data Center / USGS, licence: Public Domain

Při pohledu na mapu oceánského dna si v oblasti Tichého oceánu všimneme, že se tam nachází pás podmořských hor táhnoucích se od Havaje až ke Kamčatce. Když za pomoci radioaktivního datování hornin určíme jejich stáří, zjistíme, že nejmladší horniny tvoří sopečně aktivní ostrov Havaj, kdežto ty nejstarší podmořské hory jsou u Kamčatky (Obr. 1). Tento podmořský pás je dokladem existence horké skvrny.

Tímto termínem se označuje část zemského povrchu s abnormálně vysokým tepelným tokem. Jedná se o povrchový projev plášťového chocholu (viz další experiment), tedy oblasti v zemském plášti, ve které dochází k pomalému výstupu teplejšího materiálu vzhůru. I když přesný způsob vzniku plášťových chocholů je zatím nejasný (existuje vícero teorií), většina vědců a vědkyň se domnívá, že vznikají na rozhraní zemského jádra a pláště.

Pomůcky:

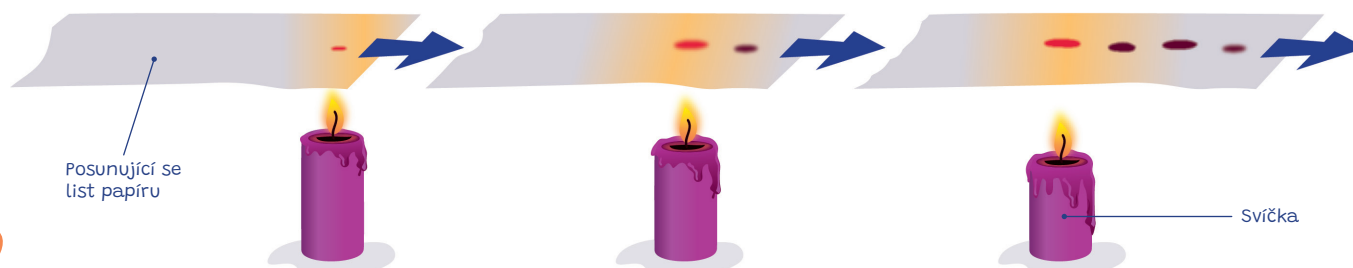
- svíčka
- zápalky
- list papíru

Náklady na pořízení pomůcek k experimentu přibližně 10 Kč

Při pohledu na mapu oceánského dna se zdá, že plášťové chocholy v hlubinách Země musí migrovat. Nicméně tento pohyb je jen zdánlivý. Ve skutečnosti se nad chocholy vlivem pohybu litosférických desek posunuje zemská kůra. A tento zdánlivý pohyb se dá snadno vysvětlit za pomoci následující demonstrace (Obr. 2).

Obrázek 2

Svíčka plamenem zahřívá list papíru, který se díky tomu zbarvuje. Vzniká pás skvrn, který se odsouvá od zdroje tepla.



TIP:

Pokud máte k dispozici termokameru, neváhejte ji do demonstrace zapojit.



Pozorujeme:

Z demonstrace je patrné, že za pohyb centra sopečné činnosti (tmavé oblasti na listu papíru) není zodpovědný pohyb plášťového chocholu (svíčky), ale litosférické desky (listu papíru). V přírodě je sice pohyb litosférických desek značně pomalý – desky se v průměru pohybují rychlostí několika centimetrů za rok –, jelikož ale k pohybu dochází v rámci geologického času, kde se běžně operuje s desítkami až stovkami milionů let, může se sopka výrazně vzdálit od zdroje magmatu (Obr. 3).

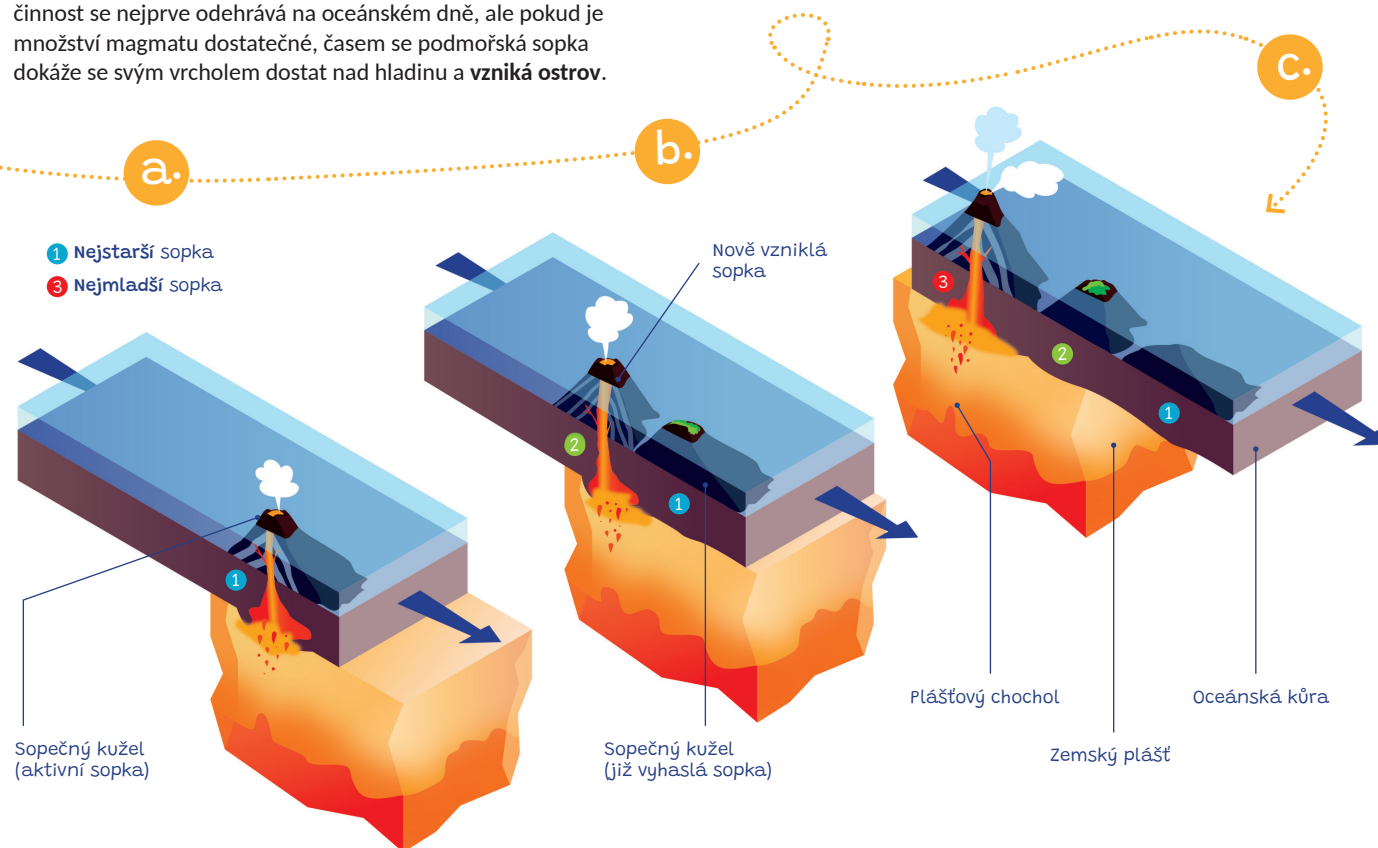
! Zajímavost

Koncept existence horkých skvrn poprvé popsal v roce 1963 kanadský geofyzik **J. Tuzo Wilson** právě na příkladu Havajských ostrovů. Od té doby se teorie rozšířila ve vědecké komunitě. Nicméně do současnosti neexistuje mezi vědci shoda na množství plášťových chocholů, které se na zemském povrchu projevují v podobě horkých skvrn. Jejich množství se udává od 20 až po několik stovek. Nejednoznačnost vychází z toho, že současné geofyzikální metody neumožňují ve všech případech jednoznačně potvrdit, co se pod horkými skvrnami nachází.

Pro horké skvrny je typická masivní sopečná činnost, která je způsobená vysokým tepelným tokem a s tím spjatým tavením hornin svrchního pláště a spodní kůry. Vznikají převážně lávy, které mají velice nízkou viskozitu, a tedy dobře tečou. Proto se mohou snadno roztékat a vytvářet desítky až stovky kilometrů široké sopky s mírně se svažujícími svahy. Takové sopky nazýváme štítové sopky, z dálky totiž vypadají jako štít antického válečníka.

Když k tomu dojde, **sopka vyhasne**, a pokud se nachází v oceánu, začne být erodována vlnami. To vede k jejímu snižování, až může zcela zaniknout ta část, která byla nad hladinou. Naopak v části oceánského dna, které se nad vrchol plášťového chocholu přesunulo, si magma hledá nové cesty k povrchu a **dává vzniknout novým sopkám**. Sopečná činnost se nejprve odehrává na oceánském dně, ale pokud je množství magmatu dostatečné, časem se podmořská sopka dokáže se svým vrcholem dostat nad hladinu a **vzniká ostrov**.

Pokud by k pohybu litosférických desek nedocházelo, láva by se hromadila na jednom místě a to by umožnilo vznik enormně vysokých sopek. A to je důvod, proč na Marsu mohla vzniknout skoro 22 kilometrů vysoká sopka Olympus Mons. Litosféra se tam nepohybuje.



Obrázek 3

Diagram znázorňuje idealizovaný řez litosférou s výstupem magmatu na povrch přes zemský plášť. Když magma dosáhne povrchu, začne vznikat sopečný kužel. Litosféra tvořená litosférickými deskami se v čase ale pohybuje (vyznačeno šipkou). Sopka tak odjede od zdroje magmatu, který se i nadále pod povrchem nachází. Vzniká tak nová sopka.



7. PROČ SE VYVRÁSNĚJÍ HORY?



Formování horských pásů je jedním z nejdůležitějších a nejzajímavějších procesů, které na Zemi probíhají. Tato činnost je daná pohybem litosférických desek a je spojená s rozsáhlou sopečnou, magmatickou i seismickou činností, ale i s formováním řek a údolí. Jelikož tyto procesy probíhají rychlostí jen několika centimetrů za rok, je těžké je přímo sledovat. Naštěstí je možné využít analogové modely, kdy se horniny nahrazují vhodně zvolenými materiály a ty se v laboratoři deformují. Jeden takový experiment je možné připravit i ve škole a ukázat na něm, proč a jak se hory vrásní.

✓ Pomůcky:

- krabice s průhlednou boční stěnou (např. akvárium nebo dvě skleněné desky)
- destička, která vyplní prostor mezi boky boxu
- kelímek od jogurtu
- pravítko
- mobil se stativem
- barevný písek (možno i vícero hrubostí)
- plastelína nebo silikonová pasta

Náklady na pořízení pomůcek k experimentu přibližně 400 Kč

Postup výroby:

Potřebujeme úzký, ale dlouhý box, jehož stěny budou průhledné. Na jednu stranu boxu zasuneme destičku, která bude fungovat jako píst. Ten by měl mít odstup od čela boxu, aby bylo možné vložit ruku nebo vodičí tyčku a na píst tlačít (lepší, ale složitější postup je přidělat k destičce tyč se závitem a na stěnu boxu maticí, tedy vytvořit systém lisu). Po přípravě boxu je potřeba vytvořit z různobarevných vrstev písku (písek se dá snadno obarvit barvami pro fixy), které odpovídají různým vrstvám hornin, základnu, jež bude následně stlačována. Vrstvičky mohou být 1 cm tlusté, ale čím více tenkých vrstev, tím je experiment krásnější a přehlednější. Dle délky boxu zvolíme celkovou tloušťku modelu. Např. na 50 cm délky a 30 cm výšky boxu zvolíme tloušťku modelu 5–10 cm, tedy 5–10 centimetrových vrstviček písku. Pro sypání je vhodné použít proděravěný kelímek. Snažíme se, aby nasypané vrstvy byly rovné, a případně je dodatečně uhlazujeme pravítkem.

Tato demonstrace se dá provést v několika obměnách. Je možné použít pro přípravu jednotlivých vrstev například různě hrubé písky nebo různě syké materiály (např. střídat vrstvy písku a hladké mouky) či střídat vrstvy nepravidelně. Současně se dá první vrstva, na kterou budou nasypány další vrstvy, vytvořit z plastelíny nebo silikonové pasty. Taková vrstva by měla být 0,5–1 cm široká. V případě této varianty je dobré použít gumu jako těsnění pod pístem.

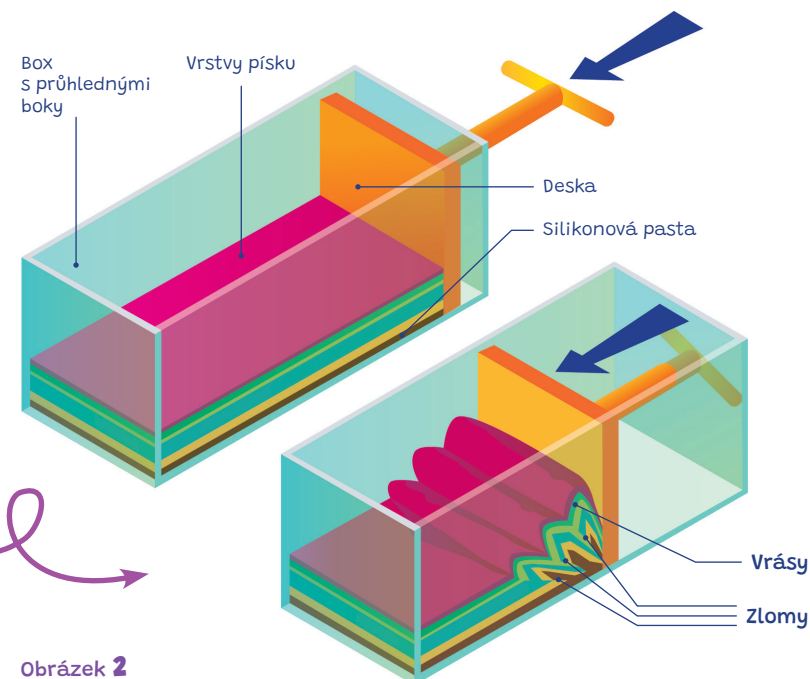
Průběh experimentu:

Když je experiment připravený, začneme tlačít na píst proti písku, čímž napodobujeme pohyb jedné litosférické desky proti druhé a s tím spojený tlak, který na desky během jejich pohybu působí.

Obrázek 1

Ukázka vrás a zlomů, Senhora do Salto, Porto, Portugalsko.

Autor: Nuno Correia, licence: CC BY 3.0



Obrázek 2

Ilustrativní náčrt experimentu



Pozorujeme:

Jak se píšť pohybuje, vrstvy písku se deformují a skládají do zvláštního vybouleného útvaru, ve kterém je možné vidět **sérii zlomů**, ale v němž současně dochází k výstupu materiálu. Odborně se takový útvar nazývá **akreční klín** a v přírodě se nachází na okrajích podsouvajících se litosférických desek. Akreční klíny jsou známkou hromadění převážně usazených hornin „seškrabávaných“ z povrchu zasouvající se litosférické desky a při jejich průzkumu se může zdát, že jsou tvořeny zdánlivě nelogicky promíchanými vrstvami hornin.

V případě, že jsme dospod modelu dali silikonovou pastu či plastelínu, tedy materiál, který se deformuje nikoliv křehce, ale plasticky, namísto vzniku série zlomů dochází **ke zvrásnění** této vrstvy a k pronikání plastického materiálu blíže k povrchu.



TIP:

Průběh experimentu je vhodné dokumentovat na časosběrném videu, kde pak posun jednotlivých vrstev a posun materiálu pěkně vyniknou. Současně se dá pravítkem měřit vzdálenost vznikajících zlomů od destičky či jejich orientace.



TIP2:

Stáhněte si šablonu pro výrobu papírového 3D modelu subdukce a sopky: <https://www.ig.cas.cz/pro-verejnost/edukativni-materialy/>

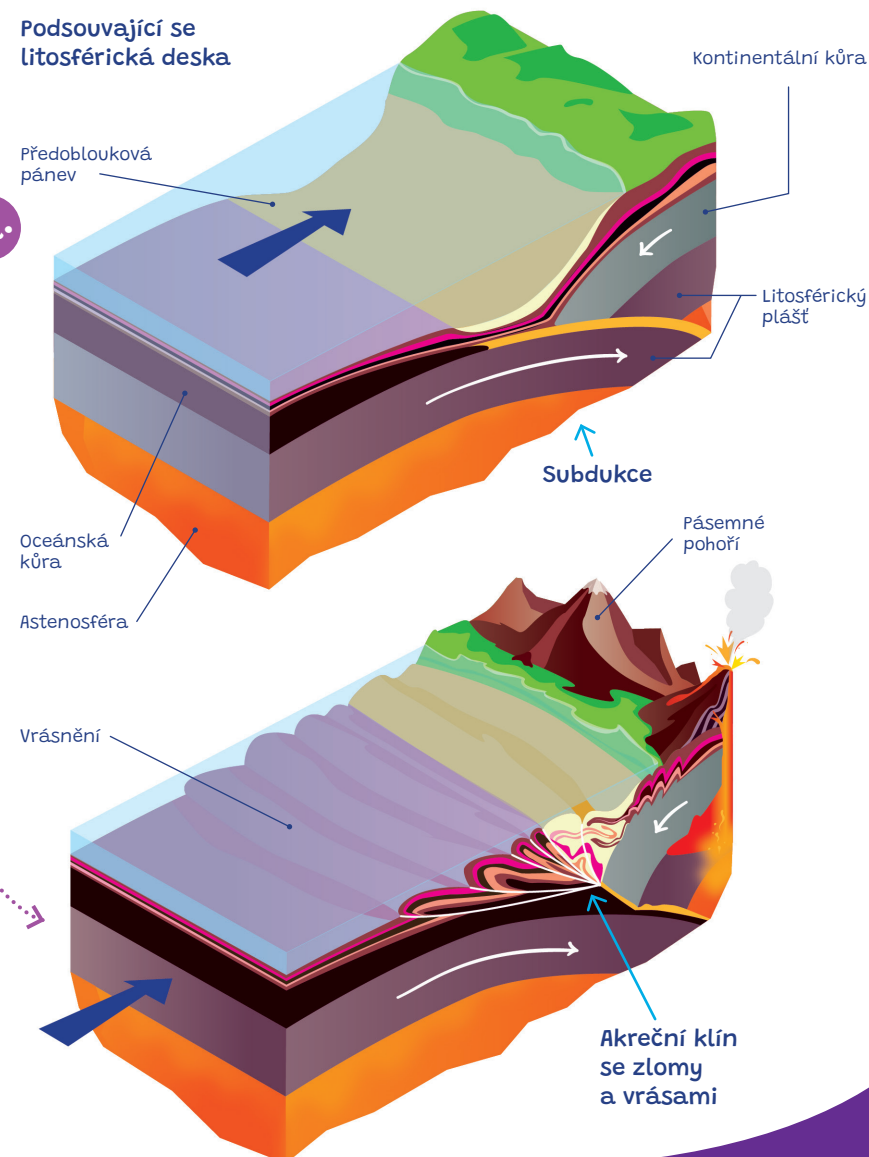
Tyto dva procesy jsou zjednodušeným modelem horotvorného procesu, kde tlak způsobený pohybem tektonických desek vytváří základ budoucího pohoří – s rostoucím tlakem a pohybem desek se vrstvy **v akrečním klínu** zvrásňují, hromadí se a dochází k jejich zvedání směrem k povrchu. Takto postupně vzniká pohoří, které je výsledkem nejen dlouhodobé akumulace a deformace materiálu v akrečním klínu, ale také působení horotvorných sil, které vytvářejí vysoké a složité horské pásy během procesu tzv. **orogeneze**. V přírodě probíhá tento proces po miliony let a zahrnuje nejen pohyb desek, ale i komplikované reakce mezi kůrou a pláštěm Země.

Experiment současně názorně ukazuje i **rozdíly mezi křehkým a plastickým chováním materiálů**. To umožňuje pochopit, jakým způsobem vznikají různé struktury v závislosti na podloží. Pokud je na dně plastická vrstva, jako například silikonová pasta, dochází spíše ke zvrásnění bez přítomnosti zlomu, což je podobné procesům, které probíhají ve skutečné zemské kůře, pokud je přítomna vrstva tvárnějších hornin. Tento pokus tedy nejenom poskytuje vizuální představu o tom, jak vznikají hory, ale také napomáhá pochopit rozdílné chování vrstev a vliv různých materiálů, což je klíčové pro komplexní studium tektoniky a geologie horotvorných procesů.

Obrázek 3

Schematický náčrt vzniku akrečního klínu v místě, kde se oceánská deska zasouvá pod kontinentální desku a během toho dochází ke stlačování svrchních horninových vrstev

Podsouvající se litosférická deska



8. JAK VZNIKAJÍ PŘÍKOPOVÉ PROPADLINY?

Příkopové propadliny, též nazývané rifty, jsou geologické útvary, které vznikají na povrchu Země díky pohybu tektonických desek. Tyto útvary se tvoří v místech, kde se dvě litosférické desky od sebe vzdalují, či případně v místech, kde se kontinentální deska trhá ve dví. Tyto oblasti se označují divergentní rozhraní a vznikají kvůli vzestupným proudům v zemském plášti (Obr. 3). Proces jejich vzniku zpravidla doprovázejí výlevy magmatu, které se dostává na povrch, a dává tak vzniknout nové zemské kůře. Jelikož procesy pohybu litosférických desek jsou z pohledu lidského života velice pomalé, je těžké vznik příkopových propadlin pozorovat přímo. Proces se dá ale ilustrovat za pomoci jednoduchého experimentu, který rozpínání litosférických desek a vznik poklesových zlomů ukazuje.

Postup výroby:

Do dvou protilehlých stěn papírové krabice vyřízneme těsně nad jejím dnem škvíru, skrz kterou bude možné natěsno protáhnout pás gumy či neoprenu. Je vhodné, aby šířka gumy/neoprenu byla stejná jako šířka krabice (hodí se tak např. použít krabici od bot). Následně protáhneme škvírami kus gumy/neoprenu, tak aby z krabice ven koukaly její/jeho konce.

Na gumovou/neoprenovou podložku poté nanášíme vrstvy barevného písku nebo mouky. Případně je možné vrstvičky mouky a barevného písku střídat. Vhodné je mít alespoň tři různě barevné vrstvy. Tloušťka jednotlivých vrstev záleží na délce gumové/neoprenové podložky, ale pro podložku s délkou okolo 40 centimetrů je vhodné udělat vrstvy o tloušťce okolo 4 centimetrů. Snažíme se, aby jednotlivé vrstvy byly rovné.

Je důležité, aby nasypané vrstvy nekončily až u stěn krabice, ve kterých jsou škvíry s gumou/neoprenem. Je totiž potřeba, aby během roztahování gumy/neoprenu měl být materiál kam odnášen.

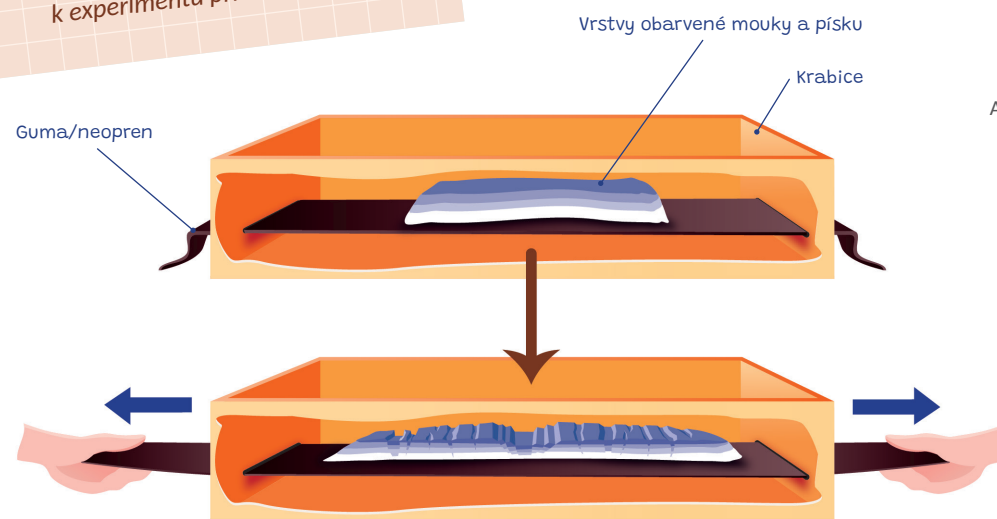
Průběh experimentu:

Po nanesení vrstev uchopíme konce gumové/neoprenové podložky a pozvolna roztahujeme podložku směrem od sebe. Snažíme se, aby rychlost roztahování byla konstantní a aby nedocházelo k otřesům, které by ničily útvary vznikající na povrchu nasypaných vrstev.

✓ Pomůcky:

- pás gumy nebo neoprenu (alespoň 20 × 40 cm, ale klidně i větší)
- papírová krabice
- mouka a barevný písek
- hladítko nebo proděravěný kelímek od jogurtu

Náklady na pořízení pomůcek k experimentu přibližně 300 Kč



Obrázek 2
Ilustrativní nákres experimentu



Obrázek 1
Satelitní snímek části
Velké příkopové propadliny v Africe.
Autor snímku: ESA, licence: CC BY-SA 3.0 IGO



TIP:

Průběh experimentu je vhodné dokumentovat na časosběrném videu, kde pak posun jednotlivých vrstev a posun materiálu pěkně vyniknou. Současně se dá pravítkem měřit vzdálenost vznikajících zlomů od destičky či jejich orientace.



Pozorujeme:

Jak odtahujeme konce gumové/neoprenové podložky od sebe, pozorujeme na povrchu nasypaných vrstev vznik poklesových zlomů, mezi kterými vzniká **centrální propadlina**. Pokud jsou vrstvy vytvořeny z různobarevných písků/materiálů, je možné skrze odhalené barvy pozorovat odkrývání spodních vrstev.

Zdárný průběh experimentu ale záleží na volbě pevnosti podložky a na způsobu roztahování. Je potřeba, aby bylo možné podložku výrazněji natáhnout, a tím došlo k dostatečnému přemístění nasypaného materiálu a vzniku výše popisovaných útvarů. Současně bývá vhodnější použít mouku než písek, protože má mouka větší soudržnost, a proto je v ní vznik poklesových zlomů lépe viditelný.

! Zajímavost

Příkopové propadliny hrají významnou roli v geologickém cyklu, protože fungují jako místa pro tvorbu nové oceánské kůry, což přispívá k obnově a změně povrchu Země. V oblasti riftů vznikají rozmanité geologické útvary, jako jsou lávové proudy, horké prameny a geotermální pole, které mohou být významným zdrojem energie.

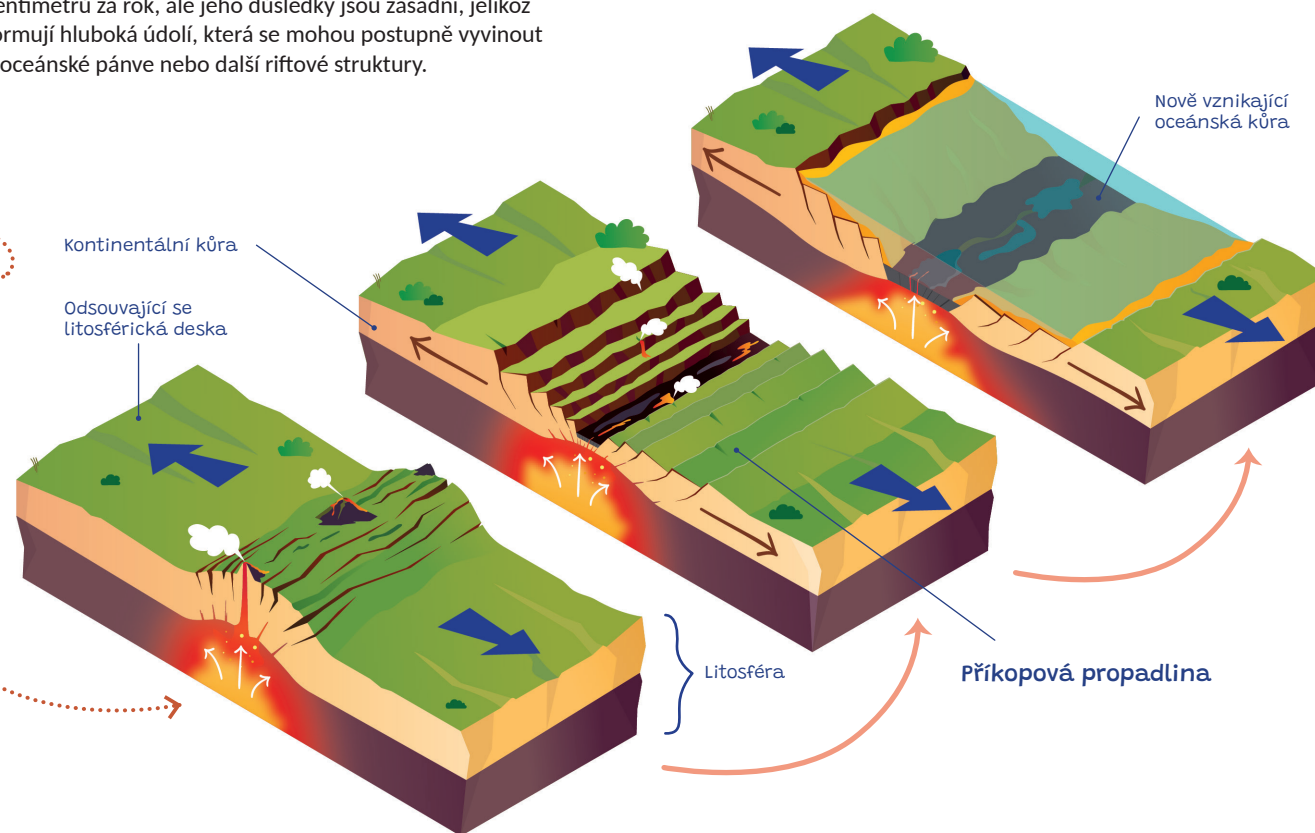
V okolí příkopových propadlin se často vyskytují i poměrně slabá zemětřesení, protože tenčící se a napjatá zemská kůra reaguje na síly působící při rozpínání desek.

V **přírodě** se s takovými propadlinami můžeme setkávat všude **tam, kde dochází k roztahování zemské kůry**. Při oddělování desek se zemská kůra tenčí a snižuje, zatímco ze zemského pláště vystupuje magma, které často zaplňuje vzniklé mezery a skrze ně se dostává k povrchu. Pokud se na povrch dostane, dojde ke vzniku sopečné činnosti. Výlevy magmatu po povrchu, ale i tuhnutí v mezerách pod povrchem pak dochází ke vzniku nových částí zemské kůry. Tento pohyb desek bývá pomalý, probíhá tempem několika centimetrů za rok, ale jeho důsledky jsou zásadní, jelikož formují hluboká údolí, která se mohou postupně vyvinout v oceánské pánve nebo další riftové struktury.



Kde se propadliny nachází?

Ke ztenčování zemské kůry v **současnosti** dochází například v Africe v oblasti Velké příkopové propadliny. **Dříve** k němu docházelo ale i u nás v oblasti Oherského riftu nacházejícího se v severozápadních Čechách v okolí řeky Ohře.



Obrázek 3

Ukázka vzniku středooceánské hřbetu nad zemským pláštěm.

Horké proudy zemského pláště vyklenou část kůry, dojde k nastavení horninového materiálu a posunu sousedních oblastí litosféry směrem od ztenčené a měkké centrální části. Jako doprovodný jev vznikají poklesové zlomy, tvořící centrální propadlinu a lemované případným výstupem magmatu na povrch.



Vyrobil Geofyzikální ústav AV ČR v. v. i. v roce 2024 v rámci projektu Vesmír pro lidstvo.

Text: Petr Brož a Ondřej Krýza / Ilustrace a grafická úprava: Lucie Škodová

Texty a obrázky (pokud není uvedeno jinak) jsou uvolněny pod licencí CC BY-SA 3.0

» <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>

Prohlédněte si
k tomuto experimentu
doprovodné materiály

www.ig.cas.cz/pokusy



9. PROČ JSOU NĚKTERÉ HORNINY ZVRÁSNĚNÉ?

Při prohlídce hromady kamení si snadno všimneme, že některé úlomky jsou tvořeny horninami s velkými zrny, jiné jsou jemnozrné a u dalších nás zaujme množství drobných pásků a vrás. Jak bude struktura horniny vypadat, je přitom závislé na způsobu jejího vzniku i na tom, co následně hornina prožila.

Vyvřelé horniny vznikají krystalizací zrn minerálů z magmatu. Tento proces často vytváří pravidelná zrna rovnoměrně uspořádaná do různobarevné mozaiky. Mezi nejznámější zástupce této skupiny patří **žula**. Jenže občas se stane, že vlivem vysokých teplot a tlaku panujících v hlubinách Země je žula výrazně zahřátá a stlačená. Dochází tak k její přeměně a vzniku metamorfované (přeměněné) horniny v podobě

ortoruly. Pro tu je charakteristická přítomnost velkých světlých zrn obklopených tmavými pásky, které mohou, ale nemusí být výrazně zvrásněny.

Tento jednoduchý experiment umožňuje přeměny hornin a jejich vzhledu vysvětlit a přiblížit tak procesy, ke kterým dochází hluboko v zemské kůře za vysokých teplot a tlaku.

✓ Pomůcky:

- barevná plastelína
- nůž
- pevná podložka

Náklady na pořízení pomůcek k experimentu přibližně 45 Kč

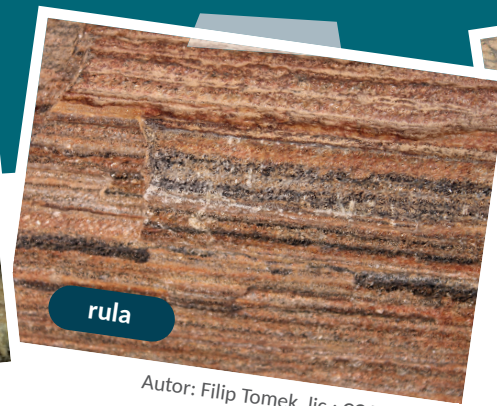
Obrázky 1 Příklady přeměněných hornin

Průběh experimentu:

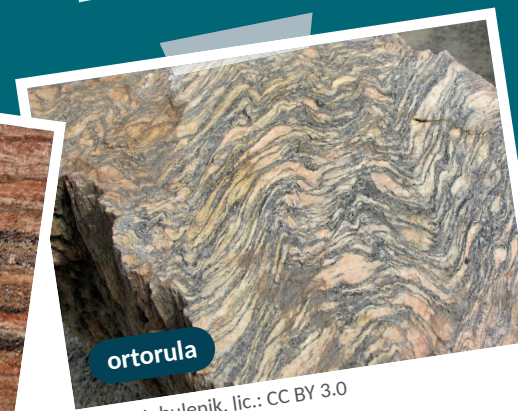
Plastelínu rozdělíme na menší části. Můžeme ji natrhat nebo nakrájet, nevadí, když kousky budou mít různé tvary a velikost. Kousky plastelíny budou představovat jednotlivá minerální zrna, která tvoří dohromady horninu a která vznikla krystalizací z magmatu během jeho chlazení. Malé kousky modelíny následně stlačíme dohromady podobně, jako když děláme ze sněhu kouli.



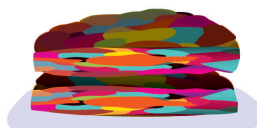
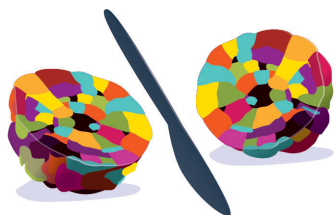
Autor: Filip Tomek, lic.: CC BY-SA 3.0



Autor: Filip Tomek, lic.: CC BY-SA 3.0



Autor: Huhulenik, lic.: CC BY 3.0



a.

Když pak tuto **kouli rozřízneme**, uvnitř uvidíme vzor podobající se stavbě žuly.

b.

Následně polokoule spojíme zpátky do tvaru koule a **rozmáčkneme ji na placku**. I tu **rozřízneme** a v její vnitřní stavbě spatříme protažená zrna dávající vzniknout páskované struktuře, se kterou se můžeme setkat u ruly.

c.

Když pak **placku stlačíme ze stran**, dojde k jejímu ohnutí a zkrabacení. Po rozříznutí pozorujeme vrásky podobné těm, které dávají vzniknout zvrásněné ortorule.

Obrázky 2

Ilustrativní nákresy průběhu pokusu



Pozorujeme:

Pomocí jednoduchého pokusu máme možnost pozorovat a vysvětlit, proč se horniny mohou deformovat a jak tyto deformace mění jejich vzhled. Pokud jsou horniny blízko zemskému povrchu, chovají se kvůli nízké teplotě křehce. Jenže pokud se nachází hlouběji pod povrchem, kde panují vyšší teploty a horniny se tak mohou zahřát, budou se chovat plasticky. Teploty, za kterých se horniny stávají plastickými, se liší podle složení hornin. Například mramor se může plasticky deformovat již za 250 °C, kdežto žula až při teplotách okolo 400 °C.

Horniny zahřáté na tyto jejich kritické teploty mohou relativně snadno reagovat na tlak a deformovat se. V takovém případě zrna jednotlivých minerálů tvořících horniny (v našem případě kousky plastelíny) mohou měnit svůj tvar a přeuspořádávat se. V rámci pokusu tento aspekt demonstruje zplacatění různě barevných částí plastelíny.

V přírodě vzniká v horninách výrazný pruhovaný vzor v podobě **páskování**, které je tvořeno „vrstvičkami“ uspořádaných, plochých minerálních zrn. Tato páskovaná struktura hornin se odborně označuje **foliace** a vzniká tehdy, když jsou horniny hluboko v kůře Země mačkány. Geologovi pomáhají tyto vrstvičky určit způsob a směr deformace hornin a tím lépe porozumět tomu, čím si daná hornina během svého vzniku a vývoje prošla.

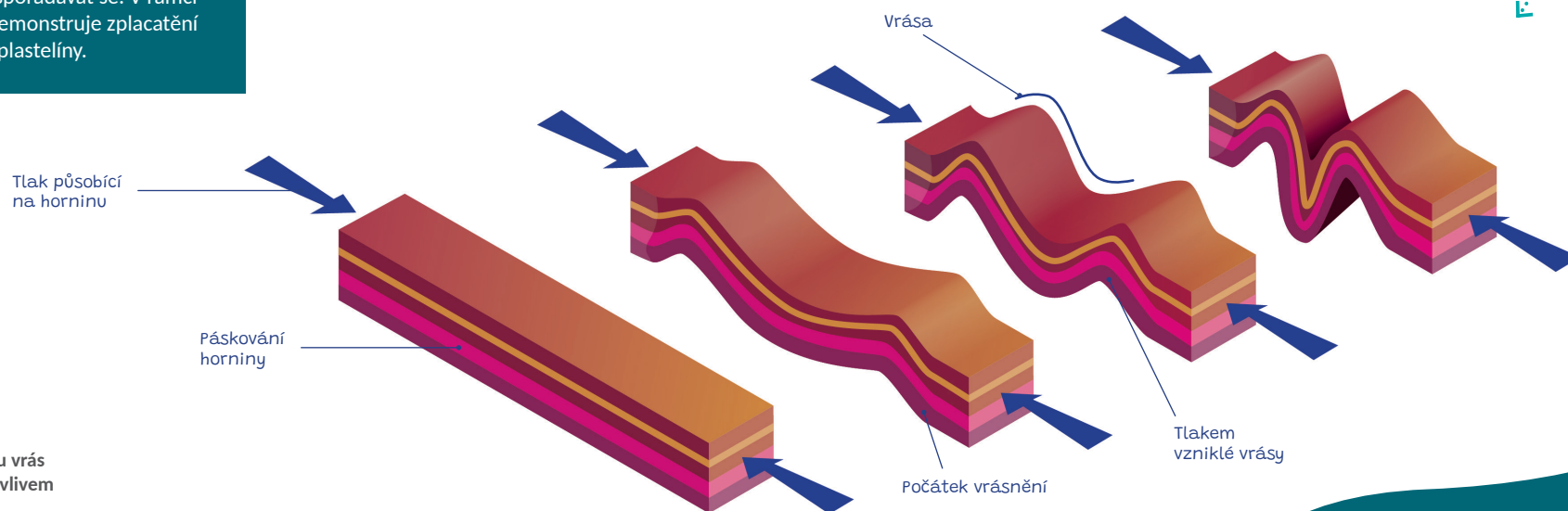
Páskované horniny, ať už ty přeměněné, nebo i usazené, ve kterých pásy tvoří jednotlivé usazené vrstvy, se navíc mohou i dále vrásnit. To znamená, že dochází k výraznému zahýbání pásků či existujících vrstev kvůli působení napětí. Tentokrát je ale nutné, aby deformace probíhala ve směru podél pásků či vrstev. **Čím víc pásy mačkáme, tím jsou vrásy víc uzavřené.** Pokud bychom v mačkání/deformaci nepřestali, získáme opět páskovanou plastelínu a v přírodě horninu, ve které už vrásy neuvidíme. Jako v předchozím případě i tady vrásy a jejich orientace pomáhají určit charakter a směr této deformace.



Zajímavost

Vrásnění hornin probíhá v přírodě v různých měřítkách. Můžeme narazit na vrásy viditelné jen pod mikroskopem, ale i na vrásy tvořící celá horská úbočí či části kontinentů. Deformace hornin a jejich vrásnění umožňují přesun hmoty v Zemi z jednoho místa na druhé, z hloubky směrem k povrchu, ale i naopak. Často se též stává, že horniny procesem přeměny a stlačování prošly hned několikrát. S takovými případy se můžeme setkat například v oblasti Českého masivu.

Popis a interpretace deformačního záznamu v horninách tvoří jeden ze základů pro pochopení tektonických procesů, které vedly ke vzniku pásemných pohoří či rozpadu kontinentů.



Obrázek 3

Schematická ilustrace vzniku vrás vyvolaných ohybem hornin vlivem působícího tlaku



10. PROČ ZAČNE BĚHEM ZEMĚTŘESENÍ TĚCT PŮDA POD NOHAMA?

✓ Pomůcky:

- plastová krabice (minimálně 40 × 30 × 20 cm)
- jemný písek
- voda
- vibrační zařízení (např. elektrický kartáček, aku vrtačka nebo gumová palička)
- menší předměty (např. mince, kameny, modely budov ze stavebnice atd.)

Náklady na pořízení pomůcek k experimentu přibližně 150 Kč

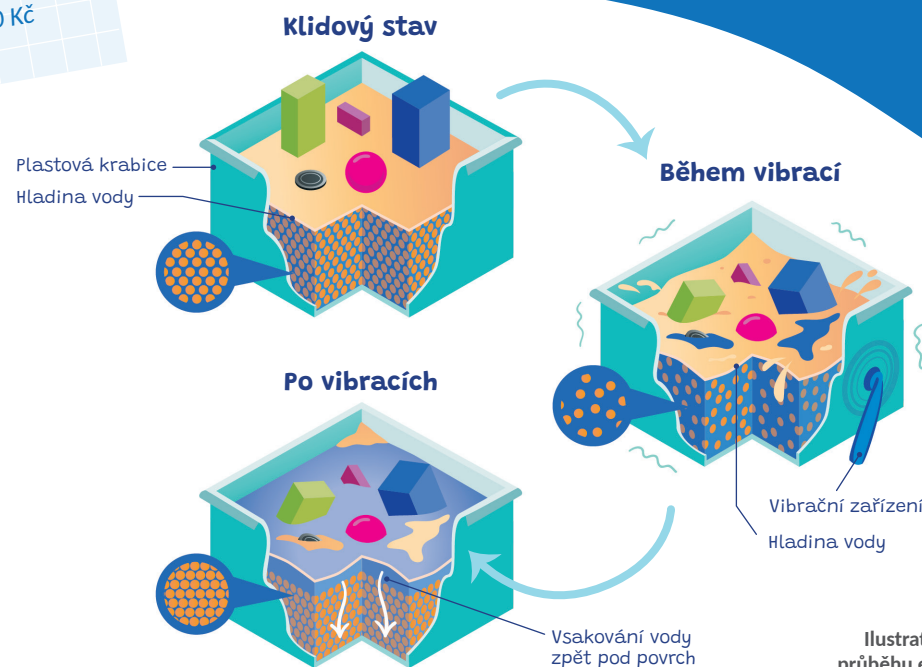
Postup výroby:

Plastovou krabici naplníme do výšky 10 centimetrů pískem a vrstvou pravítkem zarovnáme. Poté přes nálevku naléváme rovnoměrně vodu na písek, než je zcela nasycen. Je důležité, aby se voda vsákla až do spodních partií a písek nikde nebyl suchý. Současně hladina vody nesmí přesahovat povrch písku a tvořit „kaluže“.

Poté umístíme na písek několik malých předmětů, jako jsou mince, kameny či kusy stavebnice. Tyto předměty budou představovat budovy nebo jiné stavby. Je možné na písku ze stavebnice vystavět celé město a mezi jednotlivými budovami nechat malé mezery.

Představte si, že stojíte uprostřed města, když se pod vašimi nohama začne země náhle třást. Okolní budovy se chvějí, slyšíte řinčení skla, praskání zdí a lidé v panice vybíhají z budov. Naštěstí jsou domy postavené podle přísných předpisů, aby přečkaly i silné zemětřesení. Přesto se mnoho budov zřítí. Když se usadí prach, je ale patrné, že za jejich zničení nemůžou nekvalitně postavené zdi, ale zanedbaná příprava stavby. Vyjma zřícených budov je totiž mnoho těch, které se propadly do země či se výrazně naklání. Půda, která měla být jejich oporou, náhle ztratila svou pevnost a nemohla unést jejich váhu.

Tento ničivý jev, známý jako likvefakce (ztekucení), způsobuje, že se pevná půda promění v kapalinu. Proces lze snadno demonstrovat jednoduchým experimentem s pískem a vodou, který simuluje, jak se půda na krátkou dobu stane nestabilní a tekutou.



Obrázek 2

Ilustrativní schéma průběhu experimentu



Obrázek 1

Koláž fotografií s následky po ztekucení půdy v Niigatě.

Zdroj spodní f.: <https://ecom-plat.jp/19640616-niigata-eq/>, licence: CC BY 4.0
Licence horní fotografie: Public Domain

Průběh experimentu:

Po nachystání krabice přiložíme vibrační zařízení ke straně krabice (nebo pod ni) a zapneme ho. Alternativně použijeme gumovou paličku a začneme jemně klepat na stěnu krabice. Vibrace simulují průchod seismických vln skrze půdu. Sledujeme, jak se pevná půda začne chovat jako kapalina – předměty na povrchu se pomalu propadají do písku, některé se mohou naklánět nebo spadnout. Jakmile vibrace ustoupí, voda se díky gravitaci začne znovu vsakovat do hlubších vrstev a písek na povrchu opět získá pevnost. Předměty však zůstanou částečně zapadlé nebo nakloněné, což ukazuje, jak mohou být stavby při zemětřesení a následné likvefakci poškozeny.



Pozorujeme:

Během vibrací/klepání pozorujeme, jak se pevná půda začíná chovat jako kapalina. Předměty, které jsou na vrstvě písku umístěné, se začínou pomalu propadat do písku a některé se mohou začít naklánět, případně spadnout. Jakmile s vibracemi ustaneme, voda vlivem gravitace začne zase pronikat do hlubších partií písčité vrstvy a písek na povrchu získává zpět pevnost. Předměty na povrchu však zůstanou částečně zapadlé nebo nakloněné, což ukazuje, jak mohou být budovy při zemětřesení a s ním spjatém procesu likvefakce poškozeny či zničeny.

K likvefakci dochází, když jsou zrna sedimentů, jako je písek či štěrky, obklopena malými prostory (póry) naplněnými vodou. Za normálních okolností tato zrna vytvářejí pevnou síť, která umožňuje sedimentu chovat se jako pevný materiál. Při zemětřesení však seismické vlny způsobí, že se zrna stlačují a přeuspořádávají, což naruší jejich vzájemné kontakty. Současně narůstá tlak vody v pórech, který je dostatečně silný, aby zrna oddělil a půda ztratila svou pevnost. V důsledku toho se sediment začne chovat jako kapalina. Nutno ale dodat, že ztekucení může vyvolat i řada dalších procesů (například povodeň, která zvýší tlak ve vodních pórech, či samotná výstavba na nestabilním podloží).



Kde k tomu došlo?

V přírodě dochází k likvefakci zejména v oblastech s půdou nasycenou vodou. Jak ukázalo zemětřesení v japonské Niigatě v roce 1964, likvefakce může mít katastrofální následky. Silné otřesy tehdy způsobily ztekucení nestabilního podloží pod velkou částí města, což vedlo ke zničení a poškození mnoha tisíců budov. Podobné následky mělo i zemětřesení v Christchurch na Novém Zélandu v roce 2011.

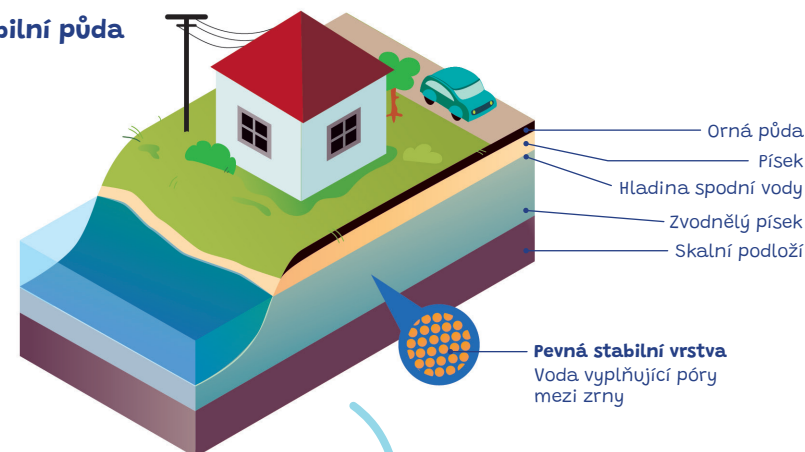
Tento proces může způsobit rozsáhlé škody na budovách i infrastruktuře. Budovy se mohou propadat, naklánět, nebo dokonce zřít, zatímco podzemní infrastruktura, jako jsou plynové či vodovodní potrubí, může vystoupit na povrch. Tento jev lze v rámci experimentu simulovat skrytím pingpongového míčku do vrstvy písku – během otřesů se dostane na povrch.

Zemětřesení spojená s likvefakcí **nejsou jen záležitostí minulosti** oblastí. Tento fenomén může postihnout jakékoli místo s nasycenou půdou, a to včetně moderních měst. Z toho důvodu je dnes kladen obrovský důraz na urbanistické plánování a stavební normy, které musí počítat s tímto rizikem. Moderní technologie umožňují posílit základy budov nebo stabilizovat půdu pomocí různých metod, jako je injektáž cementu do podloží či vytváření pevných pilotů, které přenášejí zátěž staveb do hlubších a stabilnějších horninových vrstev.

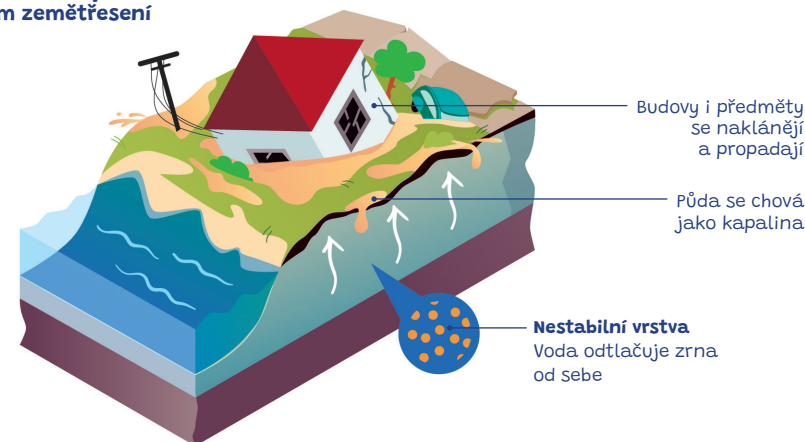
I přes pokrok v technologiích však likvefakce stále **představuje závažnou hrozbu**. Katastrofické důsledky zemětřesení v oblastech, kde došlo k likvefakci, stále ukazují, jak **klíčová je prevence a správná výstavba**.

Obrázek 3
Schematický náčrt procesu likvefakce

Stabilní půda



Ztekucená půda vlivem zemětřesení



11. JAK VZNIKÁ ZEMĚTŘESENÍ?



Obrázek 2
Ilustrativní nákres experimentu

Postup výroby:

Velký pás brusného papíru připevníme lepenkou na rovnou plochu (např. na stůl), tak aby nedocházelo k jeho pohybu. Tento brusný papír představuje plochu zlomu, po kterém bude dřevěný blok představující druhou litosférickou desku „klouzat“. Následně připravíme dřevěný blok tak, že na jeho spodní stranu přilepíme druhý kus brusného papíru. Tím simulujeme drsný povrch litosférické desky, která se při pohybu tře o povrch. Na jeden konec dřevěného bloku připevníme gumičku či provázek. Následně položíme blok na plochu tak, aby se brusné papíry dotýkaly.

Obrázek 1
Pohled na zříceně budovy po zemětřesení v roce 1906 v San Francisku. Autor: NARA, licence: Public Domain

Zemětřesení je jedním z nejničivějších přírodních jevů, který způsobuje výrazné změny na povrchu Země. Ta nejsilnější vznikají v důsledku náhlého uvolnění energie v zemské kůře, která se pak ve formě seismických vln šíří do okolí. Aby mohlo silné zemětřesení vzniknout, je potřeba nahromadit obrovské množství energie. Oblasti, ve kterých se může takové množství energie snadno akumulovat, jsou nejčastěji spjaté s pohybem litosférických desek utvářejících povrch Země. Konkrétně s místy, kde se litosférické desky pohybují proti sobě nebo se o sebe svými okraji třou.

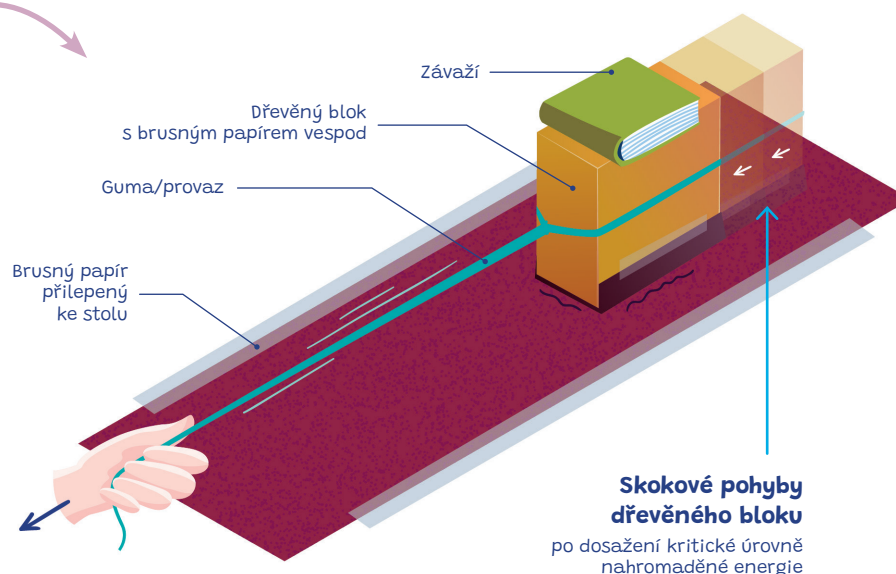
Nejčastěji k zemětřesením dochází na rozhraní dvou litosférických desek, kde se nachází nejvíce zlomů. Přestože není pohyb litosférických desek nikterak závatný – je přibližně stejně rychlý jako růst našich nehtů, tedy pár centimetrů za rok, probíhá tento proces v rámci geologického času. To způsobuje, že se může energie v podobě

napětí hromadit v blízkosti litosférických rozhraní dlouhodobě a po dosažení kritické úrovně napětí a překonání odporu hornin být skokově uvolněna. Kvůli tomu může na zlomech dojít k rychlému posunu částí litosférické desky až o několik metrů. Následující pokus umožňuje tento proces hromadění a náhlého uvolnění napětí snadno ilustrovat.

✓ Pomůcky:

- dřevěný blok
- dva kusy brusného papíru (jeden přilepený na spodní straně bloku a druhý na podložce)
- gumička nebo provázek
- pravítko pro měření vzdálenosti
- těžítka (např. kniha)

Náklady na pořízení pomůcek
k experimentu přibližně 100 Kč



Průběh experimentu:

Po nachystání pokusu opatrně taháme za provázek/gumičku směrem k sobě. Napínání gumičky představuje napětí, které se hromadí v zemské kůře během pohybu litosférických desek. I přesto, že postupně zvyšujeme tah, dřevěný blok se nebude okamžitě pohybovat. Tření mezi brusnými papíry ho totiž udržuje na místě. S pokračujícím natahovááním gumičky se tření mezi blokem a podložkou překoná a blok se náhle pohne. **Rychlý pohyb simuluje** okamžik, kdy dojde k **zemětřesení**. Během „utržení“ se blok současně výrazně posune.

Experiment několikrát zopakujeme a pravítkem se snažíme měřit vzdálenost, o kterou se blok posune při každém „zemětřesení“. Současně je možné na dřevěný blok umístit závaží (například knihu) a porovnat, jak se změní potřebné napětí pro náhlý skok i vzdálenost, kterou blok urazil.



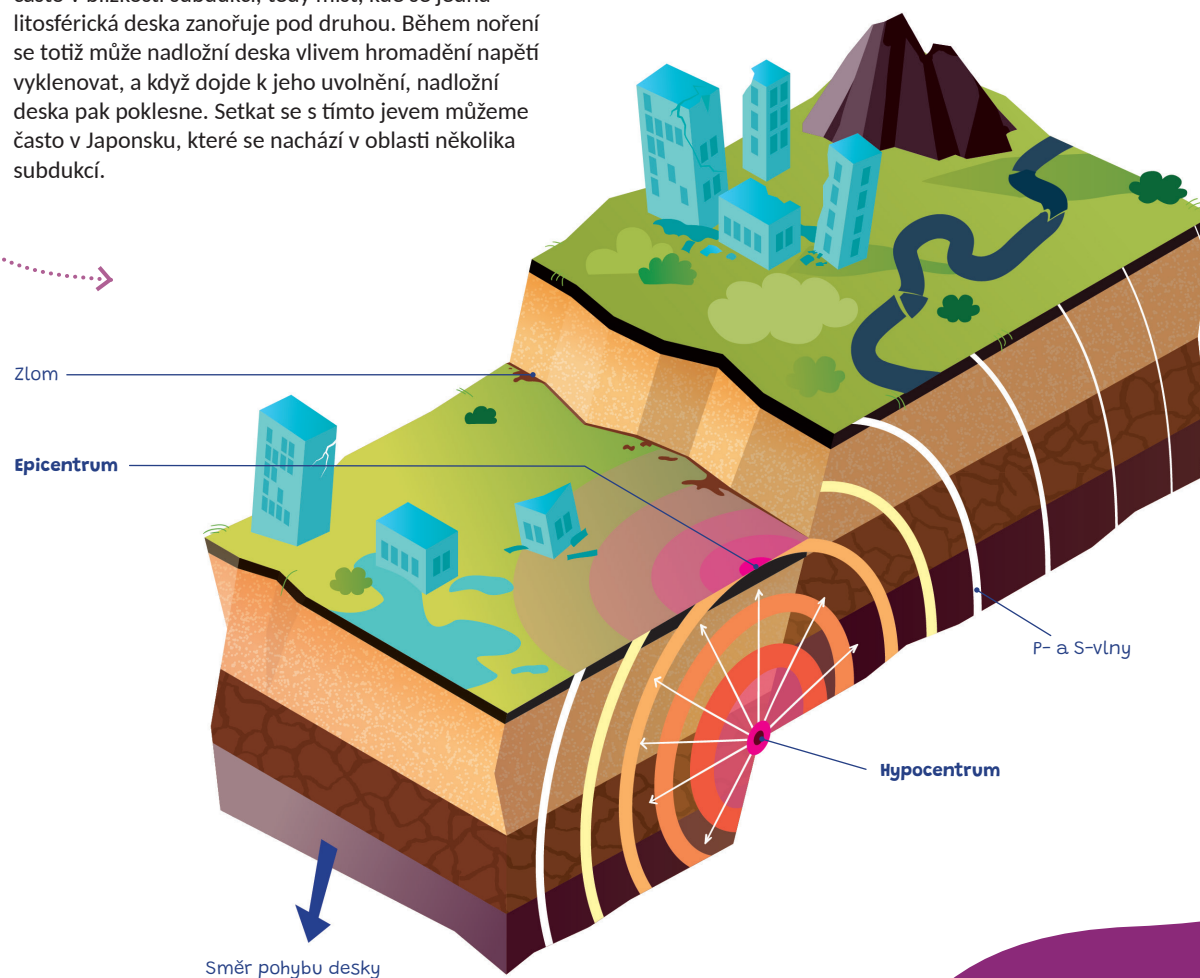
Pozorujeme:

Během experimentu pozorujeme, jak se energie hromadí, dokud nedosáhne **kritické úrovně**, která umožňuje překonat tření a způsobit náhlý pohyb. V přírodě energii pro růst napětí poskytují pohybující se litosférické desky. Jak bylo uvedeno v prvním odstavci, ty se sice pohybují relativně pomalu, ale dlouhodobě. Vlivem jejich pohybu přitom dochází k tření a hromadění napětí. Energie spojená s pohybem litosférických desek se tak může roky, desetiletí, staletí, ale klidně i tisíciletí hromadit v podzemí.

Podobně jako v provedeném experimentu ani zemětřesení **neprobíhají neustále**, ale pouze tehdy, když se napětí mezi deskami dostatečně nahromadí a překoná odpor mezi nimi. Obecně platí, že **čím déle se energie hromadí, tím více se jí může najednou uvolnit**. A tím silnější zemětřesení může tedy nastat. Ale není to obecně platným pravidlem. Záleží totiž i na rychlosti pohybu litosférických desek. Pokud se desky pohybují rychle, na nahromadění kritického množství napětí stačí kratší doba, než když se desky pohybují pomalu.

Když se energie na rozhraní dvou litosférických desek nakonec uvolní, může to mít na krajinu výrazné dopady. Může dojít k poklesu části zemského povrchu, a pokud se jedná o příbřežní oblasti, mohou být následně zaplaveny. Naopak některé oblasti se mohou zvednout, což může zvýšit existující kopce nebo vrchy, vyzvednout kus mořského dna. K tomu dochází často v blízkosti subdukcí, tedy míst, kde se jedna litosférická deska zanořuje pod druhou. Během noření se totiž může nadložní deska vlivem hromadění napětí vyklenovat, a když dojde k jeho uvolnění, nadložní deska pak poklesne. Setkat se s tímto jevem můžeme často v Japonsku, které se nachází v oblasti několika subdukcí.

Posun o několik metrů také může způsobit vznik nových rozsáhlých trhlin na povrchu, což může výrazně poničit existující infrastrukturu, nebo dokonce způsobit změny ve vodních tocích. S tímto druhem zemětřesení se hojně setkáváme v Turecku v rámci Severoanatolského zlomu nebo v Kalifornii na zlomu San Andreas.



Obrázek 3

Schematický náčrt pohybu na zlomu, během kterého dochází k poklesu. To má za následek uvolnění energie, která se šíří v podobě seismických vln do okolí. Místo pod povrchem, kde ke vzniku zemětřesení dochází, se označuje jako hypocentrum. Jeho průmět na zemský povrch se pak označuje termínem epicentrum.



12. ŘÍČNÍ SYSTÉM NA STOLE

✓ Pomůcky:

- plastová přepravka či velká kartonová krabice
- PET láhev
- cca metr dlouhá hadička s malým průměrem (0,5 cm)
- jemnozrnný písek
- kbelík
- igelit a lepenka (v případě použití kartonové krabice)

Náklady na pořízení pomůcek k experimentu přibližně 300 Kč (záleží na množství použitého písku)

Řeky jsou neodmyslitelně spjaty s tváří krajiny, kterou po tisíciletí utváří a přeměňují. Tekoucí voda má totiž dostatečnou sílu, aby dokázala odnášet horninový materiál a následně ho ukládat jinde a tím říční koryto utvářet i zahlubovat (Obr. 1). Jenže pokud bychom chtěli vidět na vlastní oči, jak se koryto mění a vyvíjí, není to snadné. K výraznějším změnám totiž dochází jen pozvolna. Za pomoci jednoduchého experimentu využívajícího tekoucí vodu a jemnozrnný písek je ale možné si procesy spjaté se vznikem a změnami vzhledu říčního koryta přiblížit i v rámci školní výuky. A tak lépe pochopit procesy spjaté s vývojem vodního koryta v horní části říčního toku, jeho postupným překládáním a zahlubováním, ale i pozorovat přenos úlomků hornin a jejich ukládání v podobě naplavenin.

Obrázek 1

Letecký snímek horní části řeky Waimakariri na Novém Zélandu, kde řeka „divočí“. Autor: Greg O'Beirne, licence: CC BY-SA 3.0



Postup výroby:

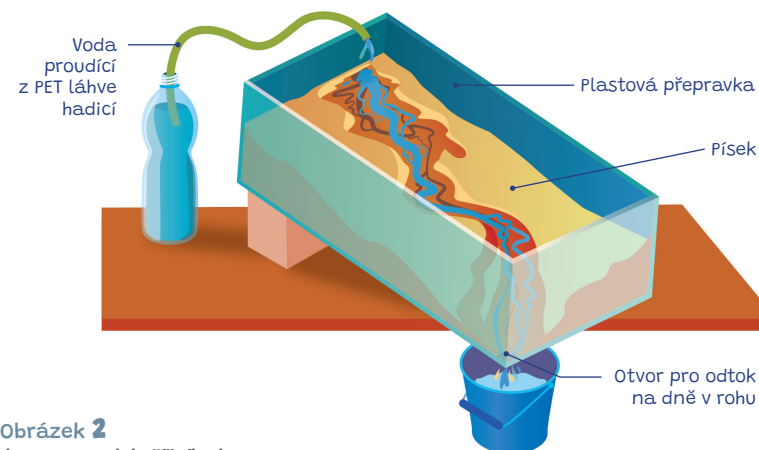
V rohu přepravky vyřízneme otvor pro odtok vody. V případě kartonové krabice je vhodné po vyříznutí otvoru vložit igelit až po okraj bočních stěn. Igelit proděravíme v místě otvoru pro odtok a přilepíme lepenkou.

Přepravku/krabici položíme na podložku tak, aby díra pro odtok zůstala mimo ni. Pod odtok umístíme kbelík. Je vhodné přepravku/krabici podložním trochu naklonit. Poté ji vysypeme pískem do výšky několika centimetrů. Lepší je použít písek jemnozrnný, který slabý proud vody lépe unášejí.

Snažíme se písek rozsypávat rovnoměrně, aby nevznikala vyšší a nižší místa. V takovém případě by tekoucí voda nerovností obtékala a naopak v prohlubních by vytvářela kaluže. PET láhev naplníme vodou a zasuneme do ní hrdlem hadičku (můžeme ji k hrdlu láhve přilepit lepenkou, aby lépe držela, či navrtat víčko). Natáhneme ústy vodu do hadičky, díky čemuž začne voda proudit, a umístíme ji do protilehlého rohu, než jsme vyřízli otvor (načež ji taktéž přichytíme lepenkou). Pokud provádíme demonstraci venku, lépe poslouží zahradní hadice se silnějším proudem vody.

Průběh experimentu:

Tekoucí voda se začne na písku hromadit a částečně se vsakovat. S přibývajícím množstvím se rozlévá do okolí, přičemž sleduje sklon podložky. Během tečení unášejí voda jemnozrnný materiál a hledá nejnižší místo, kde se nachází odtok. Jak voda proudí, vytváří si koryto, které neustále zahlubuje odnášením materiálu. Současně dochází k erozi (odnosu) materiálu ze stran koryta v některých částech toku, kde je proud vody silný. Dochází tak k posouvání břehu. Naproti tomu v některých oblastech (tam, kde je rychlost proudící vody nízká) se materiál ukládá. Celý tento vzniklý systém se v čase vyvíjí a neustále přeměňuje. Utváří se nová koryta, jelikož ta starší se zanášejí či je ničí eroze.



Obrázek 2

Ilustrace modelu říčního koryta.

Voda je přiváděna v pravém horním rohu, odtéká v levém spodním.



TIP:

Toto krásně vynikne, když experiment poběží několik desítek minut a když použijeme chytrý telefon na pořízení časosběrného videa. V takovém případě je ale potřeba do PET láhve doplňovat vodu a z kbelíku vracet písek do přepravky.



Pozorujeme:

Při experimentu pozorujeme **divočení říčního toku**. Během tohoto procesu dochází k větvení, tedy rozdělení vodního toku do více ramen. Tím se nejen zvyšuje množství vody, které je schopno protéci korytem řeky, ale i snižuje rychlost a unášecí energie vody. Následkem toho se, nejčastěji v zákrutech, usazují hrubozrnné naplaveniny a vytvářejí břehové nebo středové lavice a ostrůvky. Unášený materiál může mít v přírodě charakter štěrku nebo písku. Pro podhorské bystřiny je charakteristickým materiálem štěrk, pro nižší části toků je to písek o různých zrnitostech.



Možné modifikace

Tento experiment umožňuje řadu úprav, které se různě projeví na útvarech, jež budou vznikat. Máme možnost regulovat množství vody, které do přepravky přitéká, a tím ovlivňovat průtok. Čím více vody do soustavy poteče, tím více se bude odnášet sedimentu. Taktéž je možné měnit sklon krabice a tím měnit rychlost proudící vody. Obecně bude platit, že čím je sklon vyšší, tím vyšší bude rychlost proudící vody. Bude pak docházet k napřimování koryta a k většímu odnosu materiálu.



Kde najdeme příklady?

Divočící toky vznikaly na našem území převážně v chladných obdobích pleistocénu (období, které začalo před 2,58 milionu let a skončilo před 11 700 let), kdy vyšší intenzita přirozeného zvětrávání skalnatého podloží vedla k zanesení údolí mocnými vrstvami sedimentů. Nicméně v dnešních podmínkách kulturní krajiny jsou takové vodní toky v Česku vzácné. I přesto se s nimi můžeme setkat v horních a středních úsecích podbeskydských řek, jako jsou Morávka, Ostravice, Lomná, Olše, Rožnovská Bečva, a na jejich přítocích, kde dochází k ukládání štěrkového materiálu.



Úskali

Tento model neumožňuje přesně kopírovat vznik a průběh celého říčního systému, jelikož zde existují problémy se škálováním. Proud, který protéká modelem, má příliš malou rychlost, a tedy sílu, aby unášel hmotná zrnka křemenného písku na větší vzdálenosti a v samotném proudu vody. Jednotlivá zrnka se tak vlivem nízké rychlosti pouze převalují po dně, což neumožňuje vytvářet útvary charakteristické pro střední a nižší část toku (např. meandry). V takovém případě je potřeba zvolit jiný materiál, který má menší hustotu, a tedy hmotnost (například drcené plasty).

Obr. 3
Schematická ilustrace ukazující divočící řeku

Dočasné koryto

Dočasně vyschlé koryto

Břeh

Dočasný ostrov

