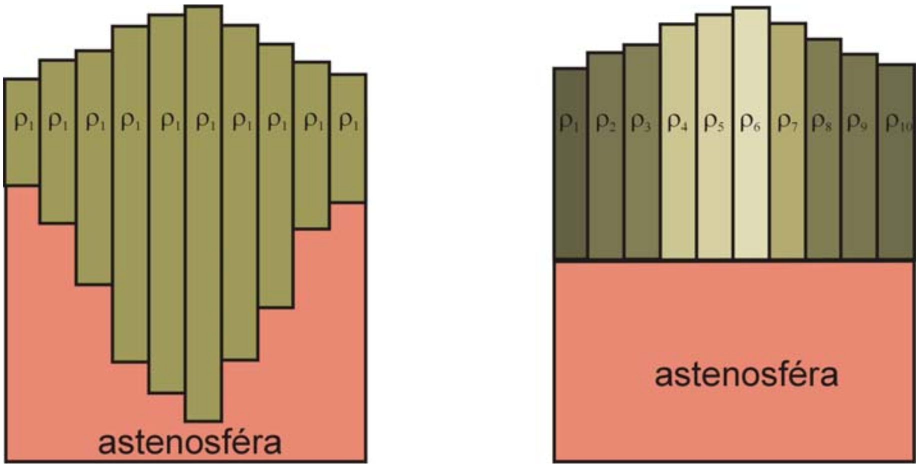
PRINCIP IZOSTÁZE – TEORIE

Princip izostáze spočívá v předpokladu, že existuje určitá hladina, na které je hodnota všesměrného tlaku konstantní na celé Zemi. Tato hladina se nachází na hranici pevné litosféry a viskózní astenosféry. Existence této *hladiny izostatického vyrovnání* ovlivňuje morfologii povrchu Země, určuje maximální výšku pohoří a má za následek kulovitý tvar zemského tělesa.

K objevení principu izostáze vedly studie zkoumající příčiny odlišné regionální morfologie zemského povrchu. Nejvýznamnějšími osobnostmi, kteří přispěli k objasnění této problematiky byl J. H. Pratt a G. B. Airy.

Airyho „ledovcový“ model izostáze (obr. 1a) vycházel z předpokladu, že litosféra má ve všech místech stejnou hustotu, a tedy topografie je odrazem rozdílných tlouštěk litosféry. Hory mají pod povrchem své kořenové zóny a vzplývají ve viskózní hmotě stejně jako ledovce ve vodě. Ukázalo se, že Airyho model je v podstatě správný: vnitřní viskózní část dnes nazýváme *astenosférou* a vnější pevnou část *litosférou*. Hranice mezi nimi je dána jejich odlišnými mechanickými vlastnostmi, přičemž tato hranice nemusí být ostrá (závisí na teplotě). Ztenčení litosféry tak vede k výzdvihu zemského povrchu, zatímco její ztluštění vede k poklesu.



a) b)

Obr. 1: Airyho (a) a Prattův (b) model izostáze

Pratt si naopak představoval, že jednotlivé bloky hornin mají různou hustotu (obr. 1b). Vyšší partie hor jsou pak tvořeny horninami o menší hustotě, zatímco v nižších polohách jsou zastoupeny horniny s větší hustotou.

Dnešní pohled na litosféru je poněkud komplikovanější; víme, že se Země skládá z několika vrstev. Tloušťka a hustota jednotlivých vrstev litosféry může být proměnlivá v důsledku měnících se geologických procesů, které skrze izostázi ovlivňují topografii a vodní hloubky. Hlavními z těchto procesů jsou:

- ukládání sedimentů a zanášení vodních nádrží
- výpar mořské vody z uzavřené pánve
- eroze hor
- zvětšování mocnosti zemské kůry vlivem průniků magmatických hornin
- ztlušťování/ztenčování kůry a pláště vlivem tektonické komprese/extenze
- chemické fázové přeměny

Představme si pro zjednodušení, že zemská litosféra je složena z bloků hornin, které mají všechny stejnou plochu podstavy. V případě, že existuje hladina izostatického vyrovnání, je na bázi každého bloku všude stejný všesměrný tlak p, tzn. pro libovolné dva bloky platí vztah

(1) $$p_1 = p_2$$

Dosadíme-li do rovnice (1) fyzikální vztah pro výpočet tlaku $p = \frac{F_g}{S}$, kde F_g je síla (tíha sloupce) působící na plochu S (podstava sloupce), bude mít rovnice (1) tvar

(2) $$\frac{F_{g1}}{S_1} = \frac{F_{g2}}{S_2}$$

Vzhledem k tomu, že pro sílu F_g platí $F_g = m \cdot g = V \cdot \rho \cdot g = S \cdot h \cdot \rho \cdot g$, (kde m je hmotnost sloupce hornin v nadloží, g je gravitační zrychlení, V je objem sloupce, ρ je průměrná hustota hornin, S je obsah podstavy sloupce, h výška horninového sloupce), můžeme rovnici (2) dále upravit na

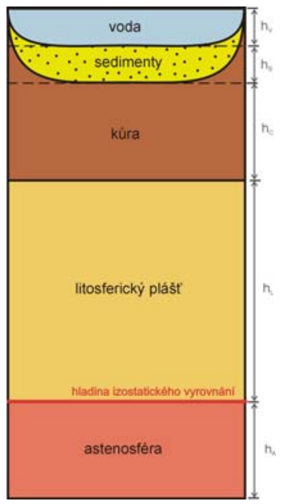
(3) $$\frac{S_1 \cdot h_1 \cdot \rho_1 \cdot g}{S_1} = \frac{S_2 \cdot h_2 \cdot \rho_2 \cdot g}{S_2}$$

a po zkrácení

(4) $$h_1 \cdot \rho_1 \cdot g = h_2 \cdot \rho_2 \cdot g$$

(5) $$h_1 \cdot \rho_1 = h_2 \cdot \rho_2$$

Dnes si představujeme, že úplný horninový profil se skládá z několika vrstev (obr.2) tvořených vodou – index V, sedimenty – S, horninami kůry – C, litosférickým pláštěm – L a astenosférou – A.



Obr. 2: Úplný horninový profil

Pokud má být hodnota všesměrného tlaku na hladině izostatického vyrovnání konstantní, lze tuto podmínku zapsat jako

(6) $$p = h_V \cdot \rho_V \cdot g + h_S \cdot \rho_S \cdot g + h_C \cdot \rho_C \cdot g + h_L \cdot \rho_L \cdot g + h_A \cdot \rho_A \cdot g = konst.$$

a pro libovolná dvě místa na Zemi pak na základě předpokladu (1) platí rovnost

(7) $$h_{V1} \cdot \rho_{V1} \cdot g + h_{S1} \cdot \rho_{S1} \cdot g + h_{C1} \cdot \rho_{C1} \cdot g + h_{L1} \cdot \rho_{L1} \cdot g + h_{A1} \cdot \rho_{A1} \cdot g =$$
$$h_{V2} \cdot \rho_{V2} \cdot g + h_{S2} \cdot \rho_{S2} \cdot g + h_{C2} \cdot \rho_{C2} \cdot g + h_{L2} \cdot \rho_{L2} \cdot g + h_{A2} \cdot \rho_{A2} \cdot g$$

přičemž vzhledem k předpokládané stejné mocnosti sloupců hornin můžeme sestavit druhou rovnici potřebnou pro řešení problematiky izostáze

(8) $$h_{V1} + h_{S1} + h_{C1} + h_{L1} + h_{A1} = h_{V2} + h_{S2} + h_{C2} + h_{L2} + h_{A2}$$

Jméno: …………………………….

Třída:………………………………

Datum:…………………………….

PRINCIP IZOSTÁZE
(Úloha č. 1)

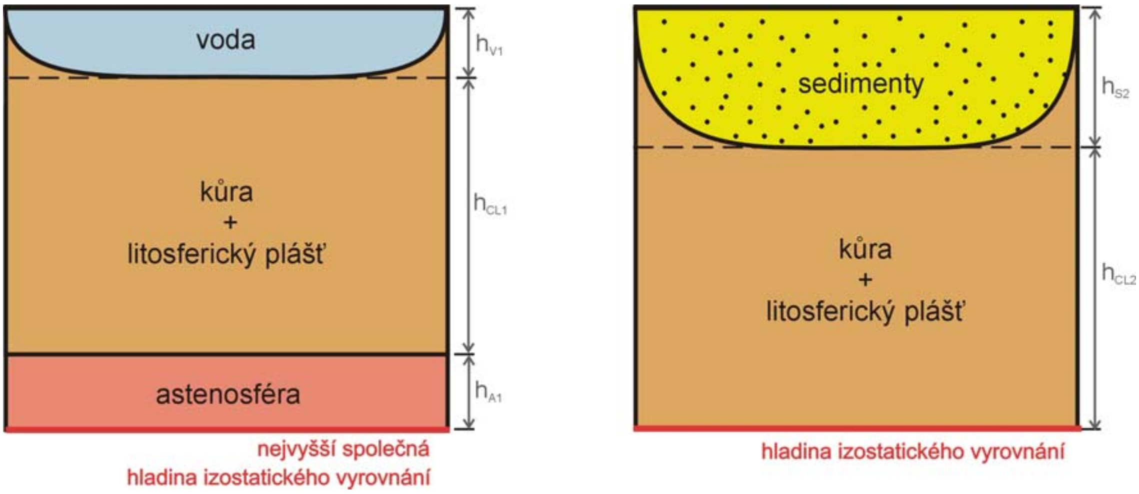
Zadání:

Původní hloubka pánve vyplněné sladkou vodou byla 1 km. Postupem času docházelo k zanášení pánve sedimenty vzniklými zvětráváním okolních hornin. Vypočtěte, jakou mocnost budou mít sedimenty v případě, že pánev zcela zaplní.
$\left(\rho_{voda} = 1gcm^{-3}; \rho_{sed} = 2{,}2gcm^{-3}; \rho_{astenosféra} = 3{,}3gcm^{-3};\right)$

Výsledek:………………………….

PRINCIP IZOSTÁZE – ŘEŠENÍ
(Úloha č.1)

Využijme rovnici (7) k řešení zadané úlohy. Vzhledem k tomu, že mají sedimenty vyšší hustotu než voda, bude hladina izostatického vyrovnání u pánve zanesené sedimenty ve větší hloubce oproti pánvi vyplněné vodou (obr. 3).



a) b)

Obr. 3: Horninový profil s pánví vyplněnou vodou (a) a sedimenty (b)

Pro úroveň nejvyšší společné hladiny izostatického vyrovnání pak můžeme rovnici (7) přepsat

(9)
$$h_{V1} \cdot \rho_{V1} \cdot g + h_{C1} \cdot \rho_{C1} \cdot g + h_{L1} \cdot \rho_{L1} \cdot g + h_{A1} \cdot \rho_{A1} \cdot g = h_{S2} \cdot \rho_{S2} \cdot g + h_{C2} \cdot \rho_{C2} \cdot g + h_{L2} \cdot \rho_{L2} \cdot g$$

a s využitím zjednodušujícího označení a zkrácení vytknuté veličiny g z obou stran rovnice pak získáme rovnici

(10) $$h_V \cdot \rho_V + h_{CL} \cdot \rho_{CL} + h_A \cdot \rho_A = h_S \cdot \rho_S + h_{CL} \cdot \rho_{CL}$$

a odečtením členu $h_{CL} \cdot \rho_{CL}$ od obou stran rovnice pak přejdeme k rovnici

(11) $$h_V \cdot \rho_V + h_A \cdot \rho_A = h_S \cdot \rho_S$$

Vzhledem k tomu, že oba bloky hornin jsou po nejvyšší společnou hladinu izostatického vyrovnání stejně vysoké, platí pro ně opět vztah (8), který má v tomto případě tvar

(12) $$h_V + h_{CL} + h_A = h_S + h_{CL}$$

který snadno zjednodušíme na

(13) $$h_V + h_A = h_S$$

Z rovnice (13) si můžeme vyjádřit neznámou h_A jako $h_A = h_S - h_V$ a dosadit ji do rovnice (11). Získáme tak rovnici

(14) $$h_V \cdot \rho_V + (h_S - h_V) \cdot \rho_A = h_S \cdot \rho_S$$

tj. po roznásobení

(15) $$h_V \cdot \rho_V + h_S \cdot \rho_A - h_V \cdot \rho_A = h_S \cdot \rho_S$$

Z rovnice (16) už snadno vyjádříme hledanou veličinu h_S, která je zde jedinou neznámou

(17) $$h_S = \frac{h_V \cdot \rho_A - h_V \cdot \rho_V}{\rho_A - \rho_S} = \frac{h_V \cdot (\rho_A - \rho_V)}{\rho_A - \rho_S}$$

Dosazením zadaných hodnot do odvozeného vztahu (17) dostáváme

(18) $$h_S = \frac{10^3 \cdot (3{,}3 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^3)}{3{,}3 \cdot 10^3 - 2{,}2 \cdot 10^3} = 2{,}09 \cdot 10^3 m = 2{,}09 km$$

Závěr: Sedimenty, které vyplní pánev, budou mít mocnost přibližně 2 km. Původní pánev vyplněná vodou měla hloubku 1 km. Sedimenty, kterými byla pánev zanášena, postupně zatěžovaly dno, takže tíhou sedimentů dno pokleslo až do hloubky přibližně 2 km.

Jméno:…………………………….

Třída:………………………………

Datum:…………………………….

PRINCIP IZOSTÁZE
(Úloha č. 2)

<u>Zadání</u>:

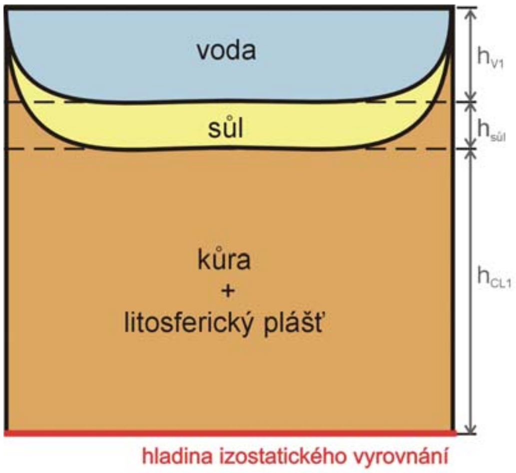
Zhruba před 6 miliony let krátkodobě vyschlo Středozemní moře a na jeho dně se usadila vrstva soli o mocnosti 1 km, která se tam dochovala dodnes. Dnes má Středozemní moře hloubku 3 km. Jaká byla hloubka dna vyschlého Středozemního moře? Jaká byla hloubka dna před vyschnutím?
$\left(\rho_{voda} = 1gcm^{-3}; \rho_{astenosféra} = 3{,}3gcm^{-3}; \rho_{sůl} = 2{,}2gcm^{-3}\right)$

Výsledek:………………………….

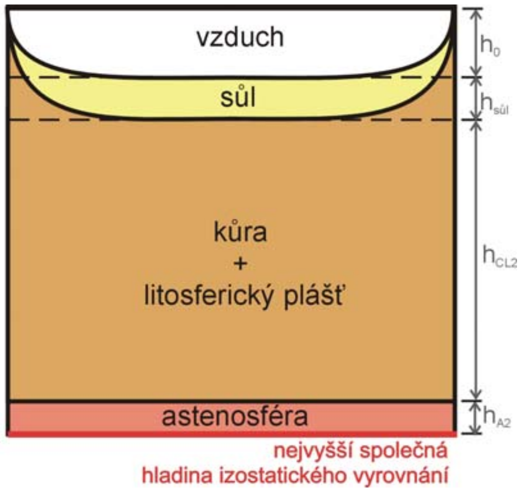
PRINCIP IZOSTÁZE – ŘEŠENÍ
(Úloha č. 2)

1. část

Při řešení první části druhé úlohy opět vyjdeme z rovnice (7). Srovnáme-li dnešní stav Středozemního moře se situací, kdy bylo moře vyschlé, bude hladina izostatického vyrovnání vyšší v případě pánve vyplněné vzduchem (Obr. 4).



a)



b)

Obr. 4: Horninový profil dnešního Středozemního moře (a) a jeho stav v době vyschnutí (b)

Rovnici (7) pak můžeme přepsat do podoby

(18)

$$h_{V1}\cdot\rho_{V1}\cdot g + h_{sůl}\cdot\rho_{sůl}\cdot g + h_{CL}\cdot\rho_{CL}\cdot g = h_0\cdot\rho_0\cdot g + h_{sůl}\cdot\rho_{sůl}\cdot g + h_{CL}\cdot\rho_{CL}\cdot g + h_{A2}\cdot\rho_{A2}\cdot g$$

a dalším zjednodušením získáme rovnici

(19) $$h_{V1}\cdot\rho_{V1}\cdot g = h_0\cdot\rho_0\cdot g + h_{A2}\cdot\rho_{A2}\cdot g$$

Vzhledem k tomu, že hustota vzduchu ρ_0 je prakticky nulová, převedeme rovnici (19) na tvar

(20) $$h_{V1}\cdot\rho_{V1}\cdot g = h_{A2}\cdot\rho_{A2}\cdot g \quad \text{tj.} \quad h_V\cdot\rho_V = h_A\cdot\rho_A$$

Vzhledem k tomu, že mocnosti obou profilů jsou opět shodné, můžeme sestavit obdobu rovnice (8) resp. (12)

(21) $$h_V + h_{sůl} + h_{CL} = h_0 + h_{sůl} + h_{CL} + h_A \quad \text{tj.} \quad h_V = h_0 + h_A \quad \text{tj.} \quad h_A = h_V - h_0$$

a jejím zpětným dosazením do rovnice (20) získáme rovnici

(22) $$h_V\cdot\rho_V = (h_V - h_0)\cdot\rho_A \quad \text{tj.} \quad h_V\cdot\rho_V = h_V\cdot\rho_A - h_0\cdot\rho_A$$

odkud přímo vyjádříme neznámou h_0

$$h_0 = \frac{h_V\cdot\rho_A - h_V\cdot\rho_V}{\rho_A} = \frac{h_V\cdot(\rho_A - \rho_V)}{\rho_A}$$

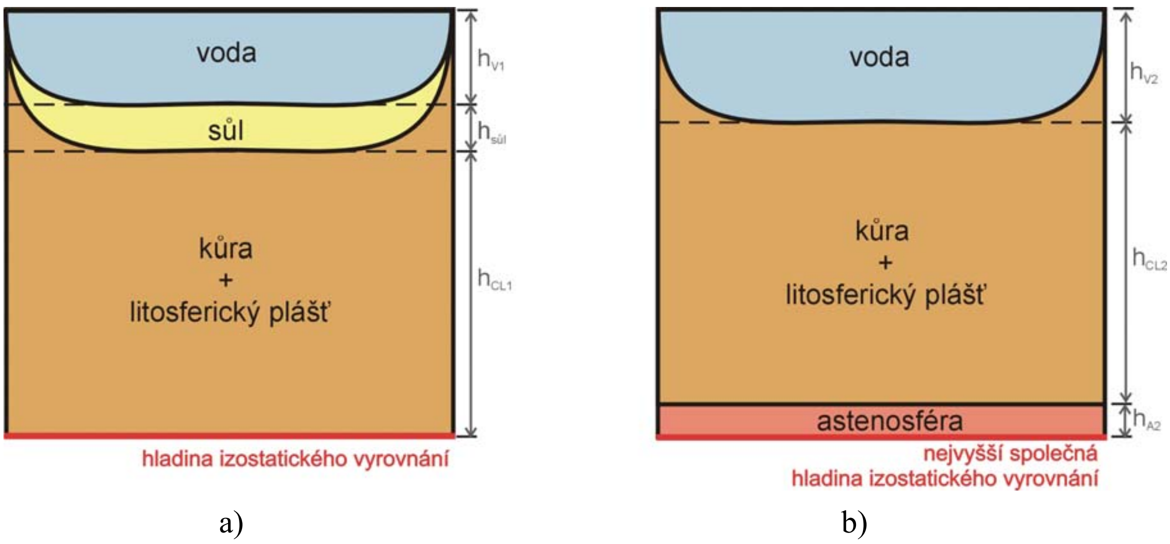
Dosazením vstupních dat dostaneme hledanou hodnotu h_0

$$h_0 = \frac{3\cdot10^3\cdot(3{,}3\cdot10^3 - 1\cdot10^3)}{3{,}3\cdot10^3} m = 2{,}09\cdot10^3 m = 2{,}09\cdot10^3 km$$

Závěr: Dno vyschlého moře se nacházelo v hloubce 2 km.Vyschnutím Středozemního moře došlo k odlehčení dna, které se tak vyzdvihlo přibližně o 1 km.

2. část

Řešíme-li otázku, jak hluboké bylo Středozemní moře před vyschnutím, vypadá situace následovně. V případě je-li pánev vyplněna vodou a vrstvou soli, má nadložní sloupec vyšší průměrnou hustotu než v případě je-li vyplněná pouze vodou. Hladina izostatického vyrovnání bude proto v nižší hloubce u pánve znázorňující stav před vyschnutím (Obr. 5).



Obr.5: Horninový profil dnešního Středozemního moře (a) a jeho stav v době před vyschnutím (b)

Rovnici (7) můžeme tentokrát přepsat do podoby

(23) $$h_{V1}\cdot\rho_{V1}\cdot g + h_{sůl}\cdot\rho_{sůl}\cdot g + h_{CL}\cdot\rho_{CL}\cdot g = h_{V2}\cdot\rho_{V2}\cdot g + h_{CL}\cdot\rho_{CL}\cdot g + h_A\cdot\rho_A\cdot g \quad \text{tj.}$$

$$h_{V1}\cdot\rho_{V1} + h_{sůl}\cdot\rho_{sůl} = h_{V2}\cdot\rho_{V2} + h_A\cdot\rho_A$$

přičemž pro rozsahy vrstev lze sestavit obdobu rovnice (12)

(24) $$h_{V1} + h_{sůl} + h_{CL} = h_{V2} + h_{CL} + h_A$$

z rovnice (24) pak vyjádříme neznámou h_A

$$h_A = h_{V1} + h_{sůl} + h_{CL} - h_{V2} - h_{CL} \quad \text{tj.} \quad h_A = h_{V1} + h_{sůl} - h_{V2}$$

a dosadíme ji do upraveného tvaru rovnice (23)

(25) $$h_{V1}\cdot\rho_{V1} + h_{sůl}\cdot\rho_{sůl} = h_{V2}\cdot\rho_{V2} + \left(h_{V1} + h_{sůl} - h_{V2}\right)\cdot\rho_A$$

roznásobíme

(26) $$h_{V1}\cdot\rho_{V1} + h_{sůl}\cdot\rho_{sůl} = h_{V2}\cdot\rho_{V2} + h_{V1}\cdot\rho_A + h_{sůl}\cdot\rho_A - h_{V2}\cdot\rho_A$$

a vyjádříme hledanou neznámou h_{V2}

(27) $$h_{V2} = \frac{h_{V1}\cdot\rho_{V1} + h_{sůl}\cdot\rho_{sůl} + h_{CL}\cdot\rho_{CL} - h_{V1}\cdot\rho_A - h_{sůl}\cdot\rho_A}{\rho_{V2} - \rho_A}$$

Dosazení zadaných hodnot do vztahu (26) vede k výsledku

$$h_{V2} = \frac{3\cdot 10^3\cdot 10^3 + 10^3\cdot 2{,}2\cdot 10^3 - 3\cdot 10^3\cdot 3{,}3\cdot 10^3 - 10^3\cdot 3{,}3\cdot 10^3}{10^3 - 3{,}3\cdot 10^3}\,m = 3478m = 3{,}478km$$

<u>Závěr</u>: Hloubka Středozemního moře před vyschnutím byla přibližně 3,5 km.