

# Bilanca vode na Zemlji

Mihael Brenčič\*

## Povzetek

Zemlja je planet, katerega razvoj je v veliki meri vezan na pojavljanje vode. Ta je vplivala tako na razvoj življenja, kot tudi na geološki razvoj kontinentov in morskega dna. Voda na Zemlji neprestano kroži, vendar to kroženje ni vezano zgolj na kroženje na površju v hidrosferi, temveč prihaja tudi do izmenjave vode med površino in Zemljino notranjostjo. Na kratko sta opisana plitvi in globoki vodni krog Zemlje ter globalni krog, ki ga tvorita oba skupaj, hkrati s tem pa so podane njihove osnovne bilančni značilnosti in zadrževalni časi vode v pomembnejših podsistemi globalnega vodnega kroga.

Ključne besede: globalna vodna bilanca, plitvi vodni krog, globoki vodni krog

Key words: global water balance, shallow water cycle, deep water cycle

## Uvod

Voda je spojina, ki v veliki meri opredeljuje Zemljo, od nastanka in razvoja življenja na njej, pa vse do vpliva na geofizikalne procese. Prav tako je voda ključna za preživetje človeštva, pri tem igra številne pomembne vloge, od fizioloških, higienskih do socioekonomskih, česar se kot družba premalo zavedamo. Zaradi pomena vode za številne segmente družbe z njo poskušamo upravljati, da pa bi to lahko čim bolj učinkovito počeli, moramo poznati njene količine ter njeno pojavljanje v času in prostoru. Vse to lahko zajamemo s pojmom vodna bilanca, ki je eno od osrednjih zanimanj tako znanstvenih ved, ki se ukvarjajo z vodo, kot tudi inženirsko strok. Vodno bilanco, odvisno od potreb, izračunavamo v različnih časovnih in prostorskih merilih. Tako poznamo globalno vodno bilanco, vodno bilanco na ravni posameznih političnih in gospodarskih združenj ali pa na ravni držav ali celo pokrajin. Pri podrobnejših analizah se vodne bilance lotevamo tudi v posameznih porečjih ali povodjih ali pa v posameznih prokrajinskih enotah. Toda vse te vodno bilančne izračune temeljimo predvsem na tistem delu vodnega kroga, ki je viden, ki ga lahko merimo ali zaznavamo kako drugače. To so na primer površinska vodna telesa, atmosferska voda ali voda v vodonosnikih. Zelo malo ali skoraj nič pa ne vemo o tem, kako je z vodo v globljih predelih Zemlje.

Prav zaradi tega v zadnjem času v znanstveni literaturi naletimo na objave, ki se intenzivno ukvarjajo z vodno bilanco v globljih predelih Zemlje in s tem z vtokom in iztokom vode pri subdukcijskih ter divergentnih procesih tektonike plošč. Razumevanje teh procesov ima pomembne posledice pri razumevanju razvoja in nastanka Zemlje, vse od nastanka z akrecijo pa do vzpostavitve delovanja tektonike plošč ter vseh posledic, ki izhajajo iz tega. Podroben premislek pokaže, da je globalni vodni krog sestavljen iz površinskega ali plitvega vodnega kroga, ki je običajno predmet raziskav v hidrologiji in globokega vodnega kroga, ki je vezan na tektoniko plošč, procese v plašču in v jedru. Namen prispevka je na kratko prikazati vodno bilančne značilnosti globalnega vodnega kroga, ki ga razumemo kot vsoto plitvega in globokega vodnega kroga. Besedilo prispevka

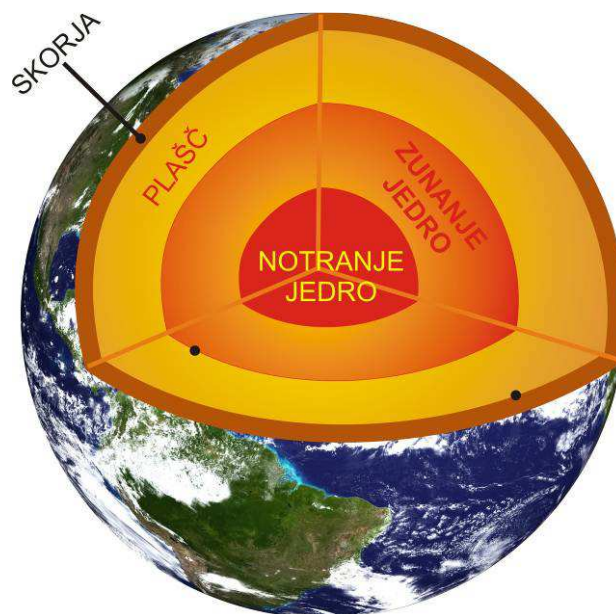
---

\* Oddelek za geologijo, Naravoslovnotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani, Aškerčeva 12, 1000 Ljubljana, in Oddelek za hidrogeologijo, Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ulica 14, 1000 Ljubljana

temelji na poznavanju literature in na samostojnih premislekih v zvezi z odprtimi vprašanji vezanimi na zgodovino vodnega kroga in na dolgo časovno spremenljivost vodne bilance Zemlje.

## Struktura Zemlje

Pri razumevanju globalnega vodnega kroga je pomembno poznavanje globalne strukture Zemlje in delovanje tektonike plošč. Zemlja je v notranjosti sestavljena iz treh glavnih delov, ki jih obravnavamo tudi kot lupine (Slika 1). V zgornjem delu imamo opravit s skorjo, navzdol ji sledi plašč, nato pa jedro. Mase posameznih lupin so predstavljene v Preglednici 1. Ti trije glavni deli pa seveda niso homogeni.



Slika 1. Shematski prikaz lupinate strukture Zemlje (skica ni v merilu)

Skorja predstavlja le 0,5% celotnega premera Zemlje, v primerjavi z globljimi predeli je najbolj preiskana, z razvojem geoloških znanosti pa smo dosegli tudi visoko stopnjo poznavanja geoloških procesov, ki jo preoblikujejo. Sestavljena je iz gostejše oceanske skorje, ki je debela od 5 do 10 km in nekoliko redkejše kontinentalne skorje, ki dosega večje globine, njena debelina znaša v povprečju 35 km, v predelih pod obsežnimi gorstvi pa sega tudi do 70 km globoko. Skorjo od toge litosfere loči Mohorovičičeva diskontinuiteta. Pod skorjo sledi toga litosfera, ki že predstavlja del Zemljinega plašča. Debelina litosfere je pod oceani 100 km, pod kontinenti pa je njena debelina v razponu od 100 do 200 km. Navzdol se litosfera nadaljuje v astenosfero. Skorjo in litosfero sestavlja 7 velikih plošč in številne makro in mikro plošče. Vse plošče se zaradi kroženja magme v plašču premikajo v različnih smereh in z različnimi hitrostmi zaradi česar se na njihovih stikih ustvarjajo kompleksne geološke razmere. Tako poznamo konvergentne stike, divergentne stike in zdrsne stike tektonskih plošč. Na konvergentnih stikih prihaja do podpiranja plošče z večjo gostoto pod ploščo z nižjo gostoto, takemu stiku pravimo subdukcija. Na območju divergentnih stikov prihaja do razmikavanja plošč. Večina teh stikov se nahaja na oceanskem dnu in predstavlja obsežna območja srednjeoceanskih grebenov. Poleg podpiranja in razpiranja plošč prihaja tudi do zdrsa med ploščami, najbolj znan primer je prelom Svetega Andreja na zahodu Združenih držav Amerike.

V primerjavi s skorjo plašč in jedro izgledata na videz bolj homogena, procesi, ki tečejo v notranjosti pa monotonejši. Vendar je takšno gledanje na globoko Zemljino notranjost prej posledica pomanjkanja podatkov, kot pa enostavnosti procesov. Da temu verjetno ni tako, napeljuje kompleksnost skorje.

Plašč razdelimo na tri glavne dele. Ta razdelitev je v prvi vrsti rezultat natančnih seizmičnih meritev in fizikalno kemijskega modeliranja in eksperimentiranja. Ker nekaterih anomalij v plašču ni mogoče razložiti le na podlagi faznih sprememb, je v razlago potrebno vključiti tudi mineraloške vzroke. Tako današnja tridelna razdelitev plašča temelji na interpretaciji prehodov med različnimi mineralni. Zgornji plašč se nahaja med Mohorovičičevo diskontinuiteto in naslednjo prvo veliko seizmično diskontinuiteto na globini okoli 410 km. Zgornji del plašča je pretežno sestavljen iz kamnin, ki jih imenujemo peridotiti. V njihovi sestavi prevladujeta minerala olivin in piroksen. V manjši meri v tem predelu nastopajo tudi eklogiti, ki jih sestavljajo minerali granati in pirokseni. (Koch, 2003) Nezveznost na globini 410 km je vezana na prehod z magnezijem bogatega olivina v mineral wadsleyit. Sprememba je vezana predsvem na tlačne razmere. Prehod je postopen in se dogodi na intervalu dolžin od 4 km do 20 km in pri temperaturah, ki so ocenjene na interval od 1400 do 1700°C. Pri prehodu iz olivina v wadsleyit se gostota poveča za 8%. (Ringwood, 1991; Flanagan & Shearer, 1998). Pomembna ugotovitev mineraloških raziskav pri visokem tlaku je, da wadsleyit lahko vsebuje do 3,3 ut% vode, kar je več kot olivin.

Preglednica 1. Mase posameznih lupin Zemlje (McDonough, 2004)

	Masa [kg]	Delež mase [%]
Skorja	1,55E+21	0,026
Plašč	4,04E+24	67,65
Zunanje jedro	1,84E+24	30,71
Notranje jedro	9,68E+22	1,62
Zemlja - skupaj	5,98E+24	

Naslednja velika seizmična nezveznost nastopa na globini 660 km. Območje med obema nezveznostima imenujemo območje prehoda. Območje prehoda vsebuje tudi manjšo nezveznost na globini 520 km. Na tej globini in pri temperaturah okoli 1500°C se wadsleyit pretvori v strukturo minerala špinel imenovano tudi  $\gamma$ -faza ali ringwoodit. Ta nezveznost je slabše izražena in se pojavlja na daljšem intervalu kot prva, v tem predelu gostota naraste za 2 % (Shearer, 1990, 1996). Nezveznost na globini 660 km je posledica disproporcionacijske reakcije med ringwooditom  $[(\text{Fe},\text{Mg})_2\text{SiO}_4]$  v perovskit  $[(\text{Mg},\text{Fe})\text{SiO}_3]$  in  $(\text{Mg},\text{Fe})\text{O}$  periklaz pri temperaturi 1600°C. Prehod na tej globini je oster, do sprememb pride le na dolžini 4 km, gostota pa naraste za 11%. (Ringwood, 1991) Spodnji del plašča vsebuje najobsežnejši predel od globine 660 km pa vse do jedra.

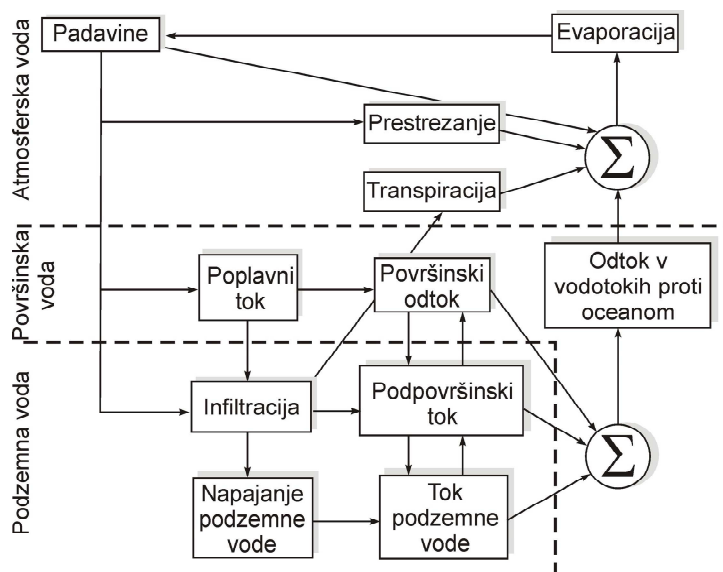
Zaradi nepravilne oblike Zemlje kot celote in procesov zgodnje diferenciacije po akreciji, je neenakomeren tudi prehod iz plašča v jedro. Ta predel je v seizmologiji označen tudi kot območje D" ali CMB (ang. core mantle boundary). Debelina tega območja se giblje od 200 do 250 km in je zelo nepravilna (Campbell & O'Neill, 2012). Območje prehoda iz plašča v jedro je vezano na prehod iz minerala perovskita v mineral posperovskit in je izrazito nehomogeno, kar se kaže v odboju seizmičnih valov. Meja med jedrom in plaščem se nahaja na globini  $2891 \pm 5$  km, kar pomeni, da je premer jedra  $3483 \pm 5$  km (Lister, 2008; Aubert et al., 2008). Tudi jedro ni homogeno, razdeljeno je na tri dele. Zunanji del jedra ima manjšo gostoto, kot je bi pričakovali na podlagi predpostavke, da je sestavljeno iz utekočinjenega niklja in železa. Ta razlika je verjetno posledica prisotnosti

lahkohlapnih elementov, vendar pa se ocene o njihovem deležu in kombinacijah zelo razlikujejo. Ta del jedra je pod vplivom magneto telurskih tokov v turbulentnem režimu, ki so odgovorni za zemljino magnetno polje (Lister, 2008; Aubert et al., 2008). Notranje jedro ima premer  $1220 \pm 10$  km. Novejši seizmični podatki kažejo, da je tudi notranje jedro nehomogeno. Seizmični modeli nakazujejo na razlike v mehanskih lastnostih med vzhodno in zahodno hemisfero jedra, do premera 600 km je vzhodna hemisfera plastovita, zahodna pa ne. Ta predel nekateri raziskovalci imenujejo tudi notranje notranje jedro (ang. inner inner core).

## Globalni vodni krog

Kroženje vode na Zemlji razdelimo na plitev in na globok vodni krog, ki skupaj tvorita globalni vodni krog. Plitvi vodni krog je dobro poznan in njegov prikaz najdemo skoraj v vsakem splošnem geografskem in hidrološkem učbeniku. Zato plitvega vodnega kroga na tem mestu ne bomo opisovali podrobneje. Primer konceptualnega modela plitvega vodnega kroga je prikazan na Sliki 2.

Plitvi vodni krog obravnavamo kot sistem, ki je sestavljen iz treh velikih podsistemov, to je podsistemov atmosferske, površinske in podzemne vode. V teh podsistemih so prisotne posamezne podkomponente, katerih opis in sistematizacija sta v veliki meri odvisna od koncepta in načina kako natančno želimo obravnavati vodni krog. Osnovna značilnost plitvega vodnega kroga je ta, da so posamezni podsistemi in njihove komponente med seboj povezani v povratnih zankah, med katerimi poleg prenosa mase oziroma količin vode, poteka tudi prenos energije.



Slika 2. Shematski prikaz plitvega vodnega kroga

V plitvem vodnem krogu si velja ogledati tudi količine po posameznih podkomponentah. Te so zbrane v Preglednici 2. Zaradi primerjave podatkov z vodo v notranjosti Zemlje, je poleg volumna podan tudi preračun mase. Daleč največjo maso predstavljajo oceani, ki predstavljajo kar 96,5% celotne mase vode v plitve vodnem krogu. Drug najpomembnejši rezervoar vode predstavljajo ledeniki, sledijo pa jim podzemne vode, v katere so zajete tako sladke podzemne vode, kot tudi slanice. Pri oceni slednje nastopa nekaj težav, saj ni jasno ali je to voda, ki bilančno že pripada litosferi in s tem

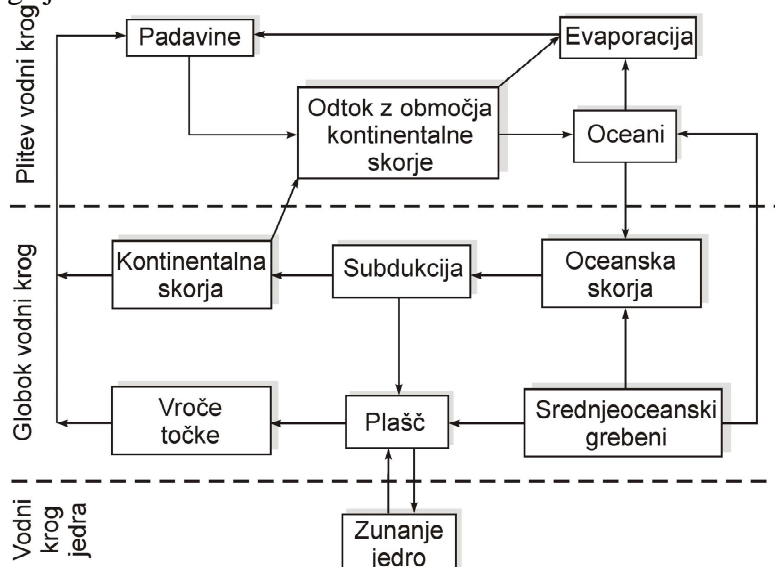
plašču, ali pa je to le voda, ki se nahaja v skorji. Celotna masa vode v plitvem vodnem krogu predstavlja le 0,23 ‰ celotne mase Zemlje.

V vsakdanjem življenju in praksi najlažje zaznavamo površinske vodotoke in njihov pretok. Celotni volumen vode v rekah znaša le 2120 km<sup>3</sup>, celoten letni pretok pa je mnogo večji in na globalni ravni za bilančno obdobje od 1958 do 2001 znaša 36812 km<sup>3</sup>/leto (van Beek et al., 2011).

Preglednica 2. Prikaz vodne bilance plitvega vodnega kroga (po Chow et al., 1988)

Komponenta	Volumen [km <sup>3</sup> ]	Masa [kg]
Oceani	1338000000	1,338E+21
Podzemna voda	12870000	1,287E+19
Vlaga v tleh	16500	1,650E+16
Ledeniki s stalnim ledom	24023500	2,402E+19
Led permafrosta	340600	3,406E+17
Voda v jezerih - sladka	91000	9,100E+16
Voda v jezerih - slana	85400	8,540E+16
Voda v močvirjih	11470	1,147E+16
Voda v rekah	2120	2,120E+15
Biološka voda	1120	1,120E+15
Atmosferska voda	12900	1,290E+16
Skupaj	1385984610	1,386E+21

Na podoben način kot plitev vodni krog lahko razdelimo tudi globoki in s tem tudi globalni vodni krog, katerega koncept v obliki sistema in podsistemov je prikazan na Sliki 3. Tudi v tem primeru imamo opraviti s kroženjem mase ali količin vode ter energije. V tem primeru sta glavna podisistema plitev in globok vodni krog. Na Sliki 3 je poleg obeh podisistemov, iz razlogov, ki bodo podani v nadaljevanju, prikazan še podsistem vodnega kroga Zemljinega jedra.



Slika 3. Shematski prikaz globokega vodnega kroga

V oceanih na območjih subdukcijskih con prihaja do velikega vrivanja vode v plašč. Voda skupaj s kamninami potuje v plašč, od koder se ponovno vrača na površje. Ta pot navzgor poteka preko vulkanizma na srednjeoceanskih grebenih, preko otočnega vulkanizma in s tem povezanimi vročimi točkami ali pa že med samo subdukcijo, kjer prihaja do dvigovanja z vodo bogate magme, ki se predvsem v obliki andezitnega vulkanizma razliva na površje skozi ločne in zaločne vulkane (ang. arc in back-arc). Tako

se voda, ki je bila vtisnjena s subdukcijo, vrača na površje in ponovno postaja del plitvega vodnega kroga.

Še vedno ostaja odprto vprašanje vodnega kroga v jedru. Izračuni kažejo, da je v zunanem delu jedra prisoten deficit mase, ki bi ga lahko razložili tudi s prisotnostjo lahko hlapnih elementov in spojin, med njimi tudi vode. Prav tako novejša raziskava kažejo, da nekatere subducirane plošče dokončno razpadejo šele na meji plašč jedro. V zunanem jedru imamo opraviti s turbulentnim režimom preko katerega prihaja do intenzivnega prenosa toplote v plašč in s tem posledično do zelo izrazitega vpliva na njegovo konvekcijo. Prej opisani procesi nakazujejo na to, da je pri teh procesih udeležena tudi voda, s tem pa je tudi jedro udeleženo pri globokem vodnem krogu.

Razumevanje izmenjave vode med plitvim vodnim krogom in plaščem je v veliki meri vezano na razumevanje porazdelitve vode v subduciranih ploščah. Na teh območjih transport vode poteka v obliki porne vode v sedimentih, ki so se odložili na dnu oceana ter v kamninah skorje ter litosfere, kjer je voda kemijsko vezana v sedimentih, oceanski skroji in serpentiniziranem delu litosfere. V subdukcijski coni se del vode pri visokih temperaturah in tlakih sprosti zaradi razpada mineralov, ki vsebujejo vodo. Ta voda povzroča taljenje kamnin v akrecijski prizmi v začetnem delu subdukcijskega območja in s tem nastanek magme, ki se dvigne na površje skozi ločni (ang. arc) in zaločni (ang. back-arc) vulkanizem (Slika 4). Vsa vode, ki je ostala v subducirani plošči tudi preko območja tvojenja magme predstavlja napajanje plašča z vodo. Tej vodi pravimo postmagmatska voda.

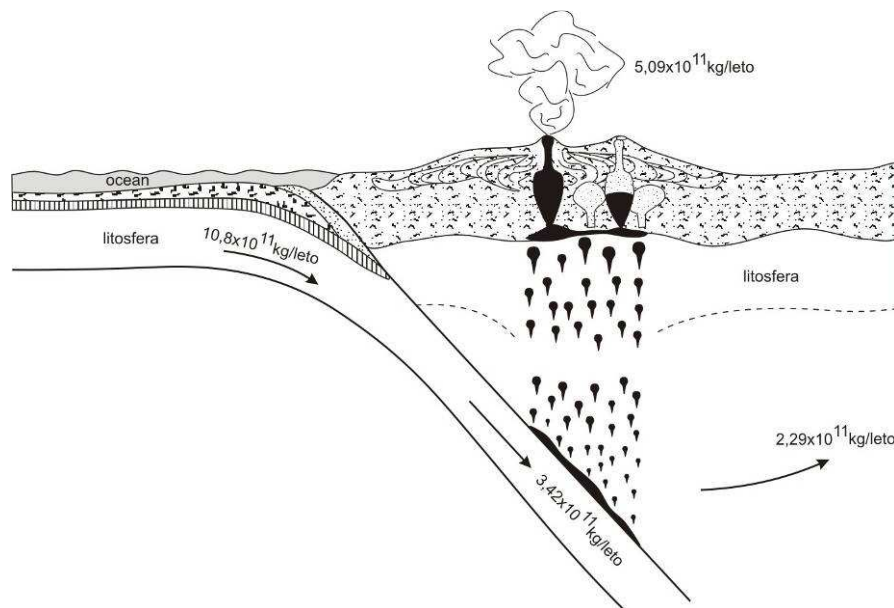
Do iztrazite magmatske aktivnosti prihaja tudi na območju srednje oceanskih grebenov, kjer nastajajo srednje oceanski bazalti (MORB – Mid Oceans Ridge Basalts). To so območja, ki jih masno bilančno opredelimo kot območja obnavljanja. Tu se oceanska skorja razriva in nastaja nova. V tem procesu naj bi na plano prihajala tudi postmagmatska voda. Del mase skorje se obnavlja tudi skozi vulkanizem srednje oceanskih otokov na katerih nastajajo srednje oceanski bazalti (OIB – Ocean Islands Basalts). Ta območja so vezana na vroče točke, katerih izvor naj bi bil v D'' območju (Campbell & O'Neill, 2012). OIB se od MORB razlikujejo tako po sestavi, kot tudi po vsebnosti vode.

### **Globoka vodna bilanca**

V literaturi bomo zasledili zelo raznolike ocene količin vode v plašču ter posameznih delih plašča. Prav tako bomo zasledili dokaj različne ocene vrivanja vode v plašč preko subdukcije. Ringwood (1975) je na podlagi pirolitskega modela plašča ocenil, da znaša masa vode v plašču od 4 do 21 mas današnjih oceanov, kar ustreza masi od  $5,35 \times 10^{21}$  kg do  $28,0 \times 10^{21}$  kg. Na podlagi kristalografskega modela minerala wadsleyita je Smyth (1994) ocenil, da lahko plašč vsebuje  $5,35 \times 10^{21}$  kg vode. Na podlagi analize nodul iz plašča je Wänke s sodelavci (1984) ocenil, da znaša masa vode v plašču od  $2,54 \times 10^{21}$  kg do  $4,95 \times 10^{21}$  kg, model magmatskega oceana (Liu, 1988) podaja oceno 10 kratne mase današnjih oceanov, to je  $13,38 \times 10^{21}$  kg, akrecijski model (Ahrens, 1989) podaja maso  $2,68 \times 10^{21}$  kg in analiza na podlagi razmerja  $K_2O/H_2O$  podaja oceno v razponu od  $2,14 \times 10^{21}$  kg do  $7,22 \times 10^{21}$  kg (Jambon & Zimerman, 1990). Iwamori (2007) ocenjuje, da je v plašču vode od  $6,01 \times 10^{21}$  do  $12,0 \times 10^{21}$  kg. Iz podatkov izhaja, da se masa vode v plašču nahaja na intervalu od  $2,14 \times 10^{21}$  kg do  $28,0 \times 10^{21}$  kg, pri čemer je slednja ocena verjetno pretirana. Hacker (2008) je kot najbolj zanesljivo uporabil oceno Iwamorija (2007).

Podobno različne so ocene vrivanja vode v subdukcijskih območjih. Peacock (1990) je ocenil, da znaša subdukcija vode  $8,7 \times 10^{11}$  kg/leto, Rea in Ruff (1996) sta na podlagi

geokemičnih izračunov ocenila, da znaša pretok  $9 \times 10^{11}$  kg/leto, Bebout (1996) je izračunal vtok na interval med  $9 \times 10^{11}$  do  $19 \times 10^{11}$  kg/leto, Javoy (1998) ocenjuje na podlagi akrecijskega modela vrednost na  $10 \times 10^{11}$  kg/leto, Maruyama (1999 v Bounama et al., 2001) na podlagi analize faznih diagramov podaja vrednost  $11,2 \times 10^{11}$  kg/leto, Schmidt in Poli (1998) sta podala oceno na intervalu od  $19,8 \times 10^{11}$  do  $22,8 \times 10^{11}$  kg/leto, Jarrad (2003) je podal oceno  $7,4 \times 10^{11}$  kg/leto, Rüpke in sodelavci (2004) so podali oceno na intervalu od  $8,6 \times 10^{11}$  kg/leto do  $18 \times 10^{11}$  kg/leto, Hacker (2008) je podal oceno  $13,3 \times 10^{11}$  kg/leto ter van Keken in sodelavci (2011) oceno  $10 \times 10^{11}$  kg/leto. Parai & Mukhopadhyay (2012) sta opravila analizo prej navedenih literaturnih podatkov in s pomočjo verjetnostnega modeliranja z metodo Monte Carlo prišla do ocene, da znaša pretok vtoka vode skozi subdukcijska območja od  $10,3 \times 10^{11}$  kg/leto do  $11,7 \times 10^{11}$  kg/leto s povprečno vrednostjo  $10,8 \times 10^{11}$  kg/leto.



Slika 4. Območje subdukcije z vrisanim delom globoke vodne bilance po Parai & Mukhopadhyay (2012)

Zelo pomembna je tudi ocena količine vode, ki se sprosti v ločnih vulkanih in postmagmatske vode, ki nadaljuje pot naprej v plašč ter vode, ki se sprosti na srednjeoceanskih grebenih in oceanskih otokih. Teh ocen je v literaturi manj, zato so zelo grobe in manj zanesljive. Peacock (1990) je ocenil, da se v ločnem vulkanizmu sprosti  $1,4 \times 10^{11}$  kg/leto vode, na srednje oceanskih grebenih pa  $0,6 \times 10^{11}$  kg/leto, po njegovem mnenju je tako postmagmatske vode  $4,0 \times 10^{11}$  kg/leto. Po mnenju Hackerja (2008) je postmagmatske vode  $9,0 \times 10^{11}$  kg/leto. Parai & Mukhopadhyay (2012) za postmagmatsko vodo podajata oceno masnega pretoka na intervalu od  $2,52 \times 10^{11}$  kg/leto do  $4,32 \times 10^{11}$  kg/leto, s srednjo oceno  $3,42 \times 10^{11}$  kg/leto. Po njunih izračunih je masni pretok vode skozi srednje oceanske grebene  $1,35 \times 10^{11}$  kg/leto, skozi vulkanizem srednje oceanskih otokov pa  $0,94 \times 10^{11}$  kg/leto. Iz bilančnih razlik izhaja, da znaša pretok vode skozi ločni vulkanizem  $5,09 \times 10^{11}$  kg/leto. Vodna bilanca po Parai & Mukhopadhyay (2012) je prikazana na Sliki 4.

Pregled podane literature pokaže na velika razhajanja v metodologiji ocene globokega vodnega kroga na podlagi katere so podane ocene vtokov in iztokov vode v in iz Zemljine notranjosti. Velike težave nastopijo že pri medsebojni primerjavi rezultatov, ki so podani v



zelo raznolikih enotah in za različno dolga časovna obdobja. Pri marsikaterem modelu opazimo krišitev osnovnega načela vodne bilance, po katerem mora biti ta zaključena.

### Vodnobilančna izhodišča

V izhodišču vsi vodno bilančni izračuni, ne glede na to kakšno je bilančno območje, bodisi da gre za plitev vodni krog bodisi za globok vodni krog, ali pa kar globalni vodni krog, temeljijo na preprosti enačbi, ki izhaja iz principa zveznosti:

$$I(t) = O(t) \pm S(t)$$

kjer so  $I(t)$  – vhodne količine vode,  $O(t)$  – izhodne količine vode in  $S(t)$  – uskladiščenje v (pod)sistemu. Osnovno načelo, ki izhaja iz enačbe, je da mora biti vodna bilanca zaključena. Ko obravnavamo kroženje vode skozi različne podsisteme globalnega vodnega kroga, nas pogosto zanima, kakšen je zadrževalni čas vode  $\tau$  v posameznem podsistemu. Ta je definiran kot

$$\tau = \frac{V(t)}{Q(t)}$$

kjer je  $V(t)$  – volumen ali masa vode v podsistemu,  $Q(t)$  pa masni ali volumski pretok skozi sistem.

Preglednica 3. Pregled osnovnih komponent globalne masne bilance vode na Zemlji

	Masa [kg]
Skupna masa vode na Zemlji	$10,5 \times 10^{21}$
Masa vode v plašču	$9,1 \times 10^{21}$
Masa vode v hidrosferi	$1,4 \times 10^{21}$

Kot izhodišče za obravnavo vodne bilance povzemamo volumne in mase plitve vodne bilance, kot jo je podal Chow s sodelavci (1988), za globoko vodno bilanco, izhajamo iz masnih pretokov, ki sta jih podala Parai & Mukhopadhyay (2012) in iz srednje ocene količine vode, ki jo je za plašč podal Iwamori (2007). Ker so podatki o količini vode v jedru zelo skopi in nezanesljivi morebitno maso vode v jedru iz ocene izpuščamo. Ocena glavnih komponent globalne vodne bilance je podana v Preglednici 3.

Iz podanih podatkov in ocen izhaja, da je skupna masa vode na Zemlji vsaj  $10,5 \times 10^{21}$  kg, kar predstavlja 0,18 % celotne mase Zemlje. Masa vode uskladiščene v plašču je vsaj 6,5 krat večja kot je masa vode v plitvem vodnem krogu.

Na podlagi pretokov in vtokov si je zanimivo ogledati tudi zadrževalne časa v posameznih pomembnejših delih globalnega vodnega kroga. Če izhajamo iz prej navedenih podatkov (Chow et al., 1988; van Beek et al., 2011) znaša v površinskih vodah povprečni zadrževalni čas 21 dni. V atmosferski vodi je zadrževalni čas še krajši in ob upoštevanja globalne količine padavin  $5,02 \times 10^5 \text{ km}^3/\text{leto}$  (Oki & Kanae, 2006) znaša le 9 dni. Če izhajamo zgolj iz predpostavke, da je kroženje vode v oceanih vezano le na oceanske tokove in da voda tudi v najglobljih predelih oceana ne stagnira in glede na evaporacijo s proste vodne površine oceana, ki ustreza  $4,38 \times 10^5 \text{ km}^3/\text{leto}$  (Oki & Kanae, 2006), zadrževalni čas vode v oceanih znaša 3065 let.

Oglejmo si sedaj še izračun zadrževalnih časov, ki izhajajo iz podatkov o globoki vodni bilanci. Celoten volumen oceanov se skozi ločni vulkanizem v ozračje povrne v 2,63 milijardah let. Če izhajamo le iz količin postmagmatske vode in ocenjenega volumna vode pa znaša zadrževalni čas v plašču 26,2 milijarde let, kar pa je nesmiselen rezultat, saj znaša



starost Zemlje 4,56 milijarde let. Kljub temu ta rezultat nakazuje na to, da porazdelitev vode v plašču bodisi ni homogena in da se preko srednje oceanskih grebenov in srednje oceanskih otokov zrači le del plašča, bodisi da voda na teh področjih izhaja iz še ne prezračenega diferenciranega materiala po akreciji Zemlje.

## **Sklep**

Razumevanje globalnega vodnega kroga je pomembno z več vidikov. Porazdelitev vode v notranjosti Zemlje ima pomemben vpliv na potek taljenja plašča, na reologijo plašča in skorje, na načine konvekcije in na strukturo skorje, kroženje vode v globljih predelih Zemlje pa vpliva tudi na kroženje ostalih lahkih elementov in spojin. Poznavanje dinamike globokega vodnega kroga je seveda pomembno tudi zaradi razumevanja obnašanja plitvega vodnega kroga skozi daljša – geološka časovna obdobja. Spremembe v tektoniki plošč in s tem v subdukciji ter razpiranju plošč imajo za posledico spremembe v transportu vode v notranjost Zemlje, s tem pa znatno vplivajo na evstatična nihanja gladine oceanov.

Poznavanje vpliva vode na subdukcijske procese je pomembno tudi s stališča razumevanja Wilsonovega cikla. Zemlja je v svoji preteklosti šla skozi vsaj pet ciklov pri katerem je superkontinent razpadel v več manjših kontinentov, ti pa so se nato ponovno združili. Posamezen cikel od razpada do združitve kontinenta traja od 300 do 500 milijonov let. Sedanja globalna slika porazdelitve kontinentov je posledica razpada superkontinenta Pange. Ob nastanku superkontinenta se subdukcija upočasni ali skoraj ustavi, to pa ima za posledico, da so v plašču zadržane večje količine vode. Te nato povzročijo spremembe v konvekciji plašča in nastanek razpornih jarkov, ki predstavljajo začetek novega cikla tektonike plošč.

In nenazadnje, poznavanje globalnega vodnega kroga je pomembno tudi za celovito razumevanje plitvega vodnega kroga, katerega učinke neposredno spremljamo vsak dan. Hidrološki izračuni vedno predpostavljajo, da je količina vode na površju konstantna. Kot lahko vidimo, takšne predpostavke držijo le v kratkem časovnem obdobju, merjenem s človekovimi očmi.

## **Zahvala**

Prispevek je bil pripravljen v okviru aktivnosti programske skupine »Podzemne vode in geokemija – P1-0020«, ki deluje na Geološkem zavodu Slovenije in ki jo financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije.

## **Viri in literatura**

- Ahrens, T.J., 1989: Water storage in the mantle. *Nature* 342, 122–123.
- Aubert, J., Amit, H., Hulot, G., Olson, P., 2008: Thermochemical flows couple the Earth's inner core growth to mantle heterogeneity. *Nature* 454, 758 – 761.
- Bebout, G.E., 1996: Volatile transfer and recycling at convergent margins: mass-balance and insights from high-p/t metamorphic rocks. *Geophysical Monograph* 96, 179–193.
- Bounama, C., Franck, S. & von Bloh, W., 2001: The fate of Earth's ocean. *Hydrology and Earth System Sciences* 5, 569-575.
- Campbell, I.H. & O'Neill, H.S.C., 2012: Evidence against a chondritic Earth. *Nature* 483, 553-558.

- Chow, V. T., Maidment, D. R. & Mays, L. W., 1988: Applied hydrology. McGraw-Hill Book Company, 572 pp., New York.
- Flanagan, M.P., Shearer, P.M., 1998: Global mapping of topography on transition zone velocity discontinuities by stacking SS precursor. *Journal of Geophysical Research* 97, 4489- 4495.
- Hacker, B.R., 2008: H<sub>2</sub>O subduction beyond arcs. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 9, Q03001.
- Iwamori, H., 1998: Transportation of H<sub>2</sub>O and melting in subduction zones: Earth and Planetary Science Letters, 160, 65–80.
- Jambon, A., Zimmermann, J.L., 1990: Water in oceanic basalts: evidence for dehydration of recycled crust. *Earth and Planetary Science Letters* 101, 323–331.
- Jarrard, R.D., 2003: Subduction fluxes of water, carbon dioxide, chlorine, and potassium. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 4, 8905
- Javoy, M., 1998: The birth of the Earth's atmosphere: the behaviour and fate of its major elements. *Chemical Geology* 147, 11–25.
- Koch, M., 2003: Phase relations and thermodynamic properties of spineloid phases in the system Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> – Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> – Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> at high temperatures and pressures. Dissertation – Ruperto – Carola University, Heidelberg, 85 pp.
- Lister, J., 2008: Structuring the inner core. *Nature* 454, 701 – 702.
- Liu, L.-G., 1988: Water in the terrestrial planets and the moon. *Icarus* 74, 98–107.
- Maruyama, S., 1999: Leaking water into the Earth. Abstract for the 1999 AGU Fall Meeting
- McDonough, W.F., 2004: Compositional model for the Earth's core. In: Carlson, R.W. (ed.), *The Mantle and Core, Treatise on Geochemistry 2*. Elsevier-Pergamon, Oxford, pp. 547–568.
- Ohtani, E., 2005: Water in the mantle. *Elements* 1, 25-30.
- Okai, T. & Kanae, S., 2006: Global hydrological cycles and world water resources. *Science* 313, 1068-1072.
- Parai, R., & Mukhopadhyay, S., 2012: How large is the subducted water flux? New constraints on mantle degassing rates. *Earth and Planetary Science Letters* 317 -318, 396-406.
- Peacock, S. M., 1990: Fluid processes in subduction zones. *Science* 248, 329-337.
- Rea, D.K., Ruff, L.J., 1996: Composition and mass flux of sediment entering the world's subduction zones: implications for global sediment budgets, great earthquakes, and volcanism. *Earth and Planetary Science Letters* 140, 1–12.
- Ringwood, A.E., 1975: *Composition and Petrology of the Earth's Mantle*. McGraw-Hill, New York, USA.
- Ringwood, A.E., 1991: Phase transformations and their bearing on the constitution and dynamics of the mantle. *Geochim et Cosmochim Acta* 55, 2083 – 2110.
- Rüpke, L.H., Morgan, J.P., Hort, M., Connolly, J.A.D., 2004: Serpentine and the subduction zone water cycle. *Earth and Planetary Science Letters* 223, 17–34.
- Shearer, P.M., 1990: Seismic imaging of upper mantle structure with new evidence for a 520 km discontinuity. *Nature* 344, 121 – 126.
- Shearer, P.M., 1996: Transition zone velocity gradients and the 520 km discontinuity. *Journal of Geophysical Research* 101, 3053 – 3066.
- Schmidt, M.W., Poli, S., 1998: Experimentally based water budgets for dehydrating slabs and consequences for arc magma generation. *Earth and Planetary Science Letters* 163, 361–379.
- Smyth, J. R., 1994: A crystallographic model for hydrous wadsleyite ( $\beta$  - Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>): An ocean in the Earth's interior? *American Mineralogist*, 79, 1021 – 1024.
- van Beek, Wada, Y., Bierkens, F.P., 2011: Global monthly water stress: 1. Water balance and water availability. *Water Resources Research* 47, W07517, 25.
- van Keken, P.E., Hacker, B.R., Syracuse, E.M., Abers, G.A., 2011: Subduction factory: 4. Depth-dependent flux of H<sub>2</sub>O from subducting slabs worldwide. *Journal of Geophysical Research - Solid Earth* 116, B01401.
- Wänke, H., Dreibus, G., Jagoutz, E., 1984: Mantle chemistry and accretion history of the Earth. In: Kröner, A. et al. (Eds.), *Archean Geochemistry*. Springer, Berlin/Heidelberg, 1-24.