

# EFNAFRÆÐI ÁRVATNS Á ÍSLANDI OG HRAÐI EFNAROFS\*

Sigurður R. Gíslason og  
Stefán Arnórsson  
*Raunvísindastofnun Háskólans*  
*Jarðfræðistofa Jarðfræðihúsi Háskólans*  
*101 Reykjavík*

## INNGANGUR

Almennt hefur verið talið að efnaveðrun og efnarof hafi verið óveruleg á Íslandi á nútíma vegna kalds loftslags (t.d. Þorleifur Einarsson 1985). Sú skoðun hefur meðal annars byggst á því að engin útskoluð „jarðvegslög“ frá nútíma finnast hér sem líkjast rauðu millilögnum í berglagastöflunum frá tertíer. En þau eru talin hafa myndast við efnaveðrun þegar loftslag var hlýrra en nú er á Íslandi.

Tilraunir hafa nýlega verið gerðar með leysnihraða bergs í vatni (Sigurður Gíslason og Eugster 1987a). Leysnihraðinn segir til um það magn efna sem losna frá yfirborði bergs í vatni á tímaeiningu. Þessar tilraunir og rannsóknir á efnainnihaldi linda- og árvatns á Íslandi hafa gert það mögulegt að meta hraða efnarofs og bera hann saman við hraða efnarofs á meginlöndunum. Í þessari grein er: 1) skýrt frá hraða efnarofs á Íslandi, 2) sýnt fram á hvaða þættir ráða efnainnihaldi árvatns og 3) fjallað um efnaskipti vatns við andrúmsloft og bergmylsnu í meginál vatnsfalla.

## FYRRI RANNSÓKNIR

Rannsóknir á flutningi uppleystra efna með árvatni má rekja rúmlega hundrað ár aftur í tímann (Walling og Webb 1986). Tilgangur slíkra rannsókna er margvíslegur. Hann tengist gæðum neyslu- og áveituvatns, umhverfismálum og mati á hraða efnarofs. Yfirlitsgreinar, þar sem efnagreiningum árvatns hvaðanæva úr heiminum er safnað saman (t.d. Livingstone 1963), eru mikilvægar rannsóknnum sem beinast að því: 1) að skilja breytileika í efnainnihaldi árvatns milli heimshluta, 2) að meta magn efnisflutninga með árvatni og 3) að áætla uppruna uppleystu efnanna í vatninu (t.d. Garrels og Mackenzie 1971, Maybeck 1987).

Rannsóknir á efnainnihaldi árvatns og grunnvatns á Íslandi hafa verið takmarkaðar allt til síðustu ára. Áhuginn hefur einkum beinst að áhrifum jarðhita á efnainnihald vatns í jökulhlaupum (Guðmundur Sigvaldason 1963, 1965; Sigurður Steinþórsson og Niels Óskarsson 1983, Helgi Björnsson og Hrefna Kristmannsdóttir 1984). Cawley o.fl. (1969) birtu niðurstöður rannsókna á styrk koltvísyrrings í Skjálfafljóti. Þeir komust m.a. að þeirri niðurstöðu að ekkert benti til þess að efnaveðrun á Íslandi væri óvenjulega hæð, þrátt fyrir

\* Grein þessi hefur þegar birst í *Náttúrufræðingnum* 58(4), bls. 183-197, 1988.

hið harðneskjulega loftslag sem hér ríkir. Langumfangsmesta rannsókn á árvatni hér á landi til þessa, var gerð á Suður- og Vesturlandi á árunum 1970 til 1974 (Halldór Ármannsson 1970, 1971; Halldór Ármannsson o.fl. 1973, Sigurjón Rist 1974, 1986). Megintilgangur þeirra rannsókna var að kanna efnæiginleika árvatnsins, mengun þess og hversu hæft árvatnið væri til neyslu og fiskeldis. Jón Ólafsson (1979, 1980), Unnsteinn Stefánsson (1950) og Unnsteinn Stefánsson og Björn Jóhannesson (1978) hafa rannsakað ýmis uppleyst efni í Mývatni, Laxá í Pingeyjarsýslu, Öskjuvatni, Meðalfellsvatni í Kjós og Miklavatni í Fljótum. Bragi Árnason (1976) notaði vetnissamsætur í grunnvatni til þess að skilgreina rennislleiðir grunnvatnsins og mat, út frá vitneskju um lekt jarðlaga, hversu langan tíma rennsli vatnsins tæki í ýmsum grunnvatnskerfum. Efnagreiningar eru til af grunnvatni á Þórisvatnssvæðinu (Guttormur Sigbjarnarson 1972), grunnvatni sunnan Langjökuls (Arió 1985) og grunnvatni norðan Vatnajökuls (Sigurður Gíslason 1985, Sigurður Gíslason og Rettig 1986, Sigurður Gíslason og Eugster 1987b). Gerðar hafa verið tilraunir sem leitast við að mæla hversu hratt einstök efni í basalti leysast upp í vatni og hvernig efnainnihald vatnsins breytist með efnaskiptum við bergið (Sigurður Gíslason 1985, Sigurður Gíslason og Eugster 1987a). Nokkrar upplýsingar eru til um efnainnihald úrkomu á Íslandi (Veðurstofa Íslands 1958-1987, Freysteinn Sigurðsson 1985, Sigurður Gíslason 1985, Sigurður Gíslason og Rettig 1986).

## VEÐURFAR, VATNSFÖLL OG BERGGRUNNUR

Á Suður og Vesturlandi og í innsveitum norðanlands og austan, er meðalhiti hlýjasta mánaðar ársins hærri en 10°C og meðalhiti kaldasta mánaðarins hærri en -3°C. Á annesjum norðanlands og á hálendinu nær meðalhiti ekki 10°C í hlýjasta mánuðinum, en meðalárshiti í byggð er nálægt 4°C (Jón Eypórsson og Hlynur Sigtryggsson 1971). Úrkoma er breytileg eftir landshlutum. Hún er minnst á Norðausturlandi þar sem hún nær ekki 400 mm/ári en hún er meiri en 4000 mm/ári þar

sem hún er mest, í hálendisbrúnum sunnan- og vestanlands (Jón Eypórsson og Hlynur Sigtryggsson 1971).

Heildarrennsli vatnsfalla er um 170 rúmkílómetrar á ári (Sigurjón Rist 1956) sem samsvarar 1,65 milljónum tonna afrennslis vatns af hverjum ferkílómetra lands á ári. Vatnsföll á Íslandi hafa verið flokkuð í dragár, jökulár og lindár (Guðmundur Kjartansson 1945). Ísland var hulið jökli á ísöld, en jöklar náðu nokkurn veginn núverandi stærð fyrir u.þ.b. 8000 árum (Þorleifur Einarsson 1985).

Ísland er um 103.000 km<sup>2</sup> að flatarmáli. Minna en 24.000 km<sup>2</sup> eru huldir gróðri, ógróið land er meira en 64.000 km<sup>2</sup>, jöklar þekja um 12.000 km<sup>2</sup> og vötn minna en 3.000 km<sup>2</sup> (Hagstofa Íslands 1984). Bergtegundir á Íslandi eru að langmestu leyti storkuberg og algengasta bergtegundin er basalt, 80-85%, samkvæmt Kristjáni Sæmundssyni (1979). Aflrænt rof á Íslandi (aurburður í ám o.fl.) er um 0,025 til 0,2 km<sup>3</sup> á ári eða u.þ.b. 500 tonn af hverjum ferkílómetra lands á ári (Haukur Tómasson 1986, Sigurður Steinþórsson 1987).

## HRAÐI EFNAROFS Á ÍSLANDI

Í töflu 1 má sjá skilgreiningar á ýmsum fræðilegum hugtökum sem notuð eru í grein þessari. „Molun og grotnun bergs og jarðvegs á staðnum nefnis veðrun... Brottflutningur bergmylsnu, jarðvegs og uppleystra efna, með hverjum hætti sem hann verður, nefnist rof“ (Þorleifur Einarsson 1985). Roft uppleystra efna köllum við efnarof en rof jarðvegs- og bergmylsnu aflrænt rof. Á sama hátt má skipta veðrun í efnaefna veðrun og aflræna veðrun. Árlegt magn efnarofs, er metið með svokölluðum efnarofshraða sem miðast við ákveðið flatarmál lands og tonn af uppleystum efnunum á ári.

Hraði efnarofs á Íslandi er verulega mikið meiri en meðalhraði efnarofs á meginlöndunum. Ef samanburður er gerður við tölur Garrels og Mackenzie (1971) er hann 3-4 sinnum meiri, en miðað við niðurstöður Walling og Webb (1986) rúmlega tvisvar sinnum meiri (tafla 2). Gögnin sem notuð eru við mat á hraða efnarofs eru: 1) meðalefna-

TAFLA 1. Skýringar á nokkrum fræðihugtökum.

Hugtak	Skýringar	Einingar
<i>Leysnihraði:</i>	Það magn efna sem losnar frá yfirborði bergs í vatni á tímaeiningu	<i>mól/cm<sup>2</sup> sek.</i>
<i>Efnarof:</i>	Brotflutningur uppleystra efna með vatni (chemical denudation)	
<i>Aflrænt rof:</i>	Brotflutningur jarðvegs- og bergmylsnu með hverjum hætti sem hann verður (mechanical denudation)	
<i>Efnaveðrun:</i>	Molun og grotnun bergs, á staðnum, vegna efnahvarfa (chemical weathering)	
<i>Aflræn veðrun:</i>	Molun og grotnun bergs, á staðnum, vegna aflrænna ferla (mechanical weathering)	
<i>Efnarofshraði:</i>	Árlegt magn efnarofs af ákveðnu flatarmáli lands talið í tonnum af uppleystum efnum	<i>tonn/km<sup>2</sup> ári</i>
<i>Styrkur uppleystra efna:</i>	Magn uppleystra efna í ákveðnu rúmmáli (1 lítri) eða ákveðinni þyngd (1 kg) vatns	<i>mól/líter, mg/kg</i>
<i>Hlutþrýstingur:</i>	Hluti ákveðinnar gastegundar í heildar þrýstingi. Ef loftþrýstingur (heildarþrýstingur) er t.d. 1 bar við yfirborð jarðar þá er hlutþrýstingur köfnunarefnis 0,78084 bör, súrefnis 0,20946 bör, argons 0,00934 bör og koltvísýrings 0,00033 bör	<i>bör</i>
<i>Kristöllumarorka:</i>	Sú orkulækkun sem fylgir því að steind fer úr bráðnu ástandi í kristallað	<i>t.d. kalóriur/mó</i>
<i>Efnavarmafræði:</i>	Sú grein eðlisefnafræðinnar er fjallar m.a. um vensl hitastigs, þrýstings og orkuástands efna. Með hjálp efnavarmafræðinnar (chemical thermodynamics) má segja til um það, hvort efni í ákveðnu umhverfi séu í jafnvægi eða ekki (stöðug eða óstöðug)	

samsetning árvatns á tilteknum stað á vatnasviði árinna, 2) meðalrennsli árinna á sýnatökustað, 3) flatarmál vatnasviðs ofan sýnatökustaðar og 4) áætluð efnasamsetning úrkomu á vatnasviði árinna ofan sýnatökustaðar. Við áætlun efnasamsetn-

ingar úrkomu er gert ráð fyrir að allt klór sem mælist í árvatni sé ættað úr úrkomunni og öll önnur efni í úrkomunni séu í sömu hlutföllum og í sjó. Magn uppleystra efna í úrkomunni er dregið frá magni uppleystra efna í árvatninu, þannig að til

TAFLA 2. Hraði efnarofs á Íslandi og meginlöndum.

Meginland	Árlegt efnarof (tonn/km <sup>2</sup> )
Norður-Ameríka	33
Suður-Ameríka	28
Asía	32
Afríka	24
Evrópa	42
Ástralía	2
Ísland	98
Jörðin, meðaltal (Earth average). Garrels og Mackenzie (1971)	27
Jörðin, meðaltal (Earth average), Walling og Webb (1986)	39,5

mats á efnarofshraða koma eingöngu efni sem upprunnin eru úr bergi og jarðvegi.

Langstærstur hluti efnagreininga sem eru til af árvatni á Íslandi er úr ám á Suður- og Vesturlandi. Búast má við að gildin um efnarofshraða sem sýnd eru fyrir Ísland í töflu 2, geti lækkað eitthvað þegar upplýsingar fást frá Norður- og Austurlandi þar sem berg er gamalt, meðallofthiti lægri og úrkoma minni en á Suður- og Vesturlandi.

Árlegur flutningur með vatnsföllum á Íslandi er þá samkvæmt tölunum hér að ofan: 1,65 milljón tonn af vatni, 500 tonn af aurburði og tæplega 100 tonn af uppleystum efnum af hverjum ferkílómetra lands.

Flest efni á yfirborði jarðar eru efnavarmafræðilega (tafla 1) óstöðug við ríkjandi aðstæður. Sláandi dæmi um þetta eru óveðraðar steindir í storkubergi og ýmis lífræn efni í jarðvegi sem hafa ekki náð að rotna.

Storkubergssteindirnar myndast við jafnvægisáðstæður þar sem hitastig er um 900 til 1100°C. Sumar steindirnar myndast djúpt í jörðu við mikinn þrýsting og eru því mjög orkuríkar. Á yfirborði

finnast storkubergssteindirnar við hitastig, þrýsting og lofttegundir sem eru allt öðru vísi en við myndun þeirra og þær eru því ekki lengur í jafnvægi, eru óstöðugar. Storkubergssteindirnar oxast (ganga í efnasambönd með súrefni), leysast upp og mynda nýjar orkulægri jafnvægissteindir, veðrunarsteindir, úr þeim efnum sem ekki flytjast burt með vatninu. Þessi veðrun storkubergssteindanna, getur tekið þúsundir og jafnvel milljónir ára. Það er þess vegna sem óveðraðar storkubergssteindir finnast á yfirborði jarðar.

Það er hins vegar sólarorkan sem gerir plöntum kleift að framleiða orkurík og þ.a.l. óstöðug lífræn efni með ljóstillífun. Við dauða plöntunnar stöðvast orkunám ljóstillífunar og lífræn efni hennar brotna niður (rotna, oxast) á orkulægri form. Ef hitastig er lágt, og eða lífrænu leifar plöntunnar komast ekki í snertingu við súrefni, getur þetta ferli rotunar tekið hundruð eða þúsundir ára.

Nær allt berg á Íslandi er storkuberg að uppruna. Það er í hrikalegu ójafnvægi við ríkjandi yfirborðsaðstæður. Um leið og vatn kemst í snertingu við bergið byrjar það að leysast upp. Glerkennt berg er mun orkuríkara og þ.a.l. óstöðugra en fullkristallað berg. Glerið endurspeglar þær aðstæður sem voru þegar bergið storknaði við háan hita áður en bergkvikan náði að kristallast og losa sig við kristöllumarkorku storkubergssteindanna (tafla 1). Glerkennt berg, eins og t.d. móberg, eldfjallaaska og gjallkargi á hraunum og í gígum er algengt á Íslandi. Það leysist upp u.þ.b. 10 sinnum hraðar en kristallað basalt sömu efnasamsetningar (Sigurður Gíslason 1985, Sigurður Gíslason og Eugster 1987a).

Leysnihraði bergs er háður ýmsum efna- og eðlisfræðilegum þáttum eins og hitastigi, sýrustigi vatnsins, rennslishraða þess ofl. Í töflu 3 má sjá aukningu á leysnihraða helstu bergmyndandi steinda við það að hitastig hækkar úr 4,5°C í 25°C. Leysnihraðaaukningin fyrir þessar steindir er u.þ.b. fimmföld að meðaltali fyrir þessa hitastigshækkun. Það er því ljóst að lágt hitastig á Íslandi dregur verulega úr hraða upplausnar miðað við mörg önnur lönd, en hröð upplausn efna úr glerkenndu bergi vegur þar á móti. Íslenskt storkuberg hefur

TAFLA 3. Aukning í leysnihraða steinda og basaltglers vegna hitgastigshækkunar úr 4,5 í 25°C.

Steindir	Margfölduð aukning
Díopsít	4,4-87
Enstatít	4,4
Ágít	10,5
Forsterít	3,1
Orþópýroxen	3,7
Kvart	7,4-9,3
Myndlaus kísill	6,2-6,9
Kalsít	2,7
Nefelín	5,0-8,3
Anortít	2,8
Basaltgler	2,6
Meðaltal (Average)	5,1
Reiknað með jöfnu Arrheníusar. Gildin fyrir þröskuldsorkuna eru fengin frá Lasaga (1984) og Sigurði Gíslasyni og Eugster (1987a).	

hlutfallslega stórt yfirborðsflatarmál vegna hrjúftrar áferðar, gasblaðra ofl. Ennfremur er aflræn veðrun hérlandis hröð, en hún klýfur og molar bergið og eykur því yfirborðsflatarmál þess. Allt þetta eykur á hraða upplausnar þar sem hún er háð snertimöguleikum vatnins við bergið. Mikil úrkomu á Íslandi eykur leysnihraða bergsins svo og tiltölulega mikill rennslisraði grunnvatns og yfirborðsvatns sem orsakast af mikilli lekt berggrunns (Jón Ingimarsson og Freysteinn Sigurðsson 1987) og mishæðóttu landslagi. Staðbundin áhrif jarðhita og gasústreymis frá eldfjöllum á leysnihraðann geta einnig verið töluverð.

Vegin meðalefnasamsetning vatnsfalla á Íslandi og á meginlöndum er sýnd í töflu 4. Styrkur uppleystra efna í íslenskum ám er minni en nemur meðaltalinu fyrir meginlöndin. Þrátt fyrir þetta er hraði efnarofs á Íslandi a.m.k. tvisvar sinnum meiri en meðaltalið fyrir meginlöndin (tafla 2). Stafar það fyrst og fremst af hinum mikla uppleysingarahraða glerkennds basalts eins og nefnt var hér að

ofan. Mikil úrkomu, lítil uppgufun og ört afrennsli veldur því að styrkur uppleystra efna í íslenskum fallvötnum er tiltölulega lágur.

## Efnafræðileg einkenni dragáa, jökuláa og lindáa

Vatnsföll á Íslandi hafa verið flokkuð í dragár, lindár og jökulár (Guðmundur Kjartansson 1945). Efnafræðileg einkenni þessara áa eru dregin saman í töflu 5. Hvað varðar hita, rennsli og styrk uppleystra efna eru lindár mun stöðugri en dragár og jökulár. Styrkur uppleystra efna í jökulám og dragám er meiri að vetri en sumri, þegar rennsli ána er í lágmarki. Styrkur uppleystra efna eykst svolítið með auknum hita í lindám. Styrkur uppleystra efna eykst ekki með auknum aurburði í ám (mynd 1) en svolítill aukning er á styrk uppleystra efna þegar mælt er niður eftir vatnasviði ána. Hlutþrýstingur (tafla 1) koltvísýrlings ( $pCO_2$ ) í ár- og lindarvatni er sýndur á mynd 2. Þar sést að hann er töluvert hærri í jökul- og dragám en í andrúmsloftinu, en hinsvegar lægri í lindum og lindám en í andrúmsloftinu. Ef árvatnið væri í jafnvægi við andrúmsloftið ætti hlutþrýstingur koltvísýrlings í því að vera sá sami og í andrúmsloftinu, 0.0003 bör ( $10^{-3,5}$  bör). Af ofangreindu leiðir að lindárnar hafa því tilhneigingu til að nema koltvísýrling úr andrúmsloftinu en jökul- og dragárnar að gefa frá sér koltvísýrling. Hlutþrýstingur koltvísýrlings í lindám kílómetrum neðan upptaka er enn 10-100 sinnum lægri en í andrúmsloftinu þannig að ljóst er að upptaka koltvísýrlingsins gengur treglega.

Sýrustig (pH) lindáa er yfirleitt á bilinu 8,5-9,5 en jökul- og dragáa á bilinu 7,0-7,5. Þessi mismunur á sýrustigi gerir eðlisefnafræðilega eiginleika ána gjörólíka. Vatn lindánna getur náð mettun miðað við veðrunarsteindir eins og smektít, geisla- steina og kalsít (sjá töflu 5) en vatn jökuláa og dragáa er hins vegar mettað miðað við veðrunarsteindir eins og gibbsít og kaólnít.

Lítill aukning í styrk uppleystra efna í árvatni er sjáanleg við það að ár renna um land sem var undir sjó við lok ísaldarinnar. Sjávarsöltin eru nú að mestu skoluð út úr þeim jarðlögum a.m.k. hið næsta árfarvegnum.

TAFLA 4. Meðalefnasamsetning árvatns á ýmsum stöðum í mg/kg.

Efni	Ísland	Afríka	Norður- Ameríka	Suður- Ameríka	Asía	Evrópa	Eyjaálfa	Jörðin
SiO <sub>2</sub>	12.03	12.0	7.2	10.3	11.0	6.8	16.3	10.4
Na	9.12	3.8	6.45	3.3	6.6	3.15	7.0	5.15
K	0.53	1.4	1.5	1.0	1.55	1.05	1.05	1.3
Ca	4.03	5.25	20.1	6.3	16.6	24.2	15.0	13.4
Mg	1.57	2.15	4.9	1.4	4.3	5.2	3.8	3.35
HCO <sub>3</sub>	35.4	26.7	71.4	24.4	66.2	80.1	65.1	52.0
SO <sub>4</sub>	4.81	3.15	14.9	3.5	9.7	15.1	6.5	8.25
Cl	5.18	3.35	7.0	4.1	7.6	4.65	5.9	5.75
Samtals	72.7	57.8	133.45	54.3	123.55	140.24	120.65	99.6

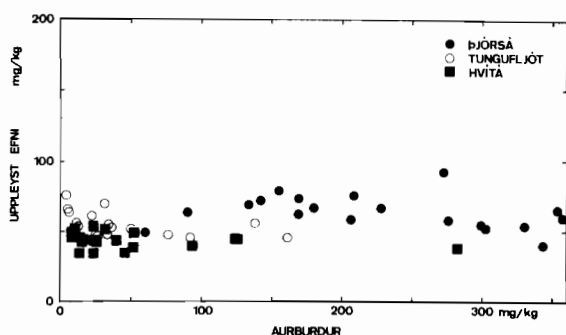
Meðalefnasamsetningin fyrir einstakar heimsálfur og Jörðina er frá Maybeck (1979).  
 Meðaltalið fyrir Ísland er vegin meðalefnasamsetning Þjórsár, Ölfusár og Hvítar  
 í Borgarfirði með hliðsjón af rennsli þeirra.  
 Gögnin eru frá Halldóri Ármannssyni o.fl. (1973) og Sigurjóni Rist (1974, 1986).

TAFLA 5. Efnæinkenni íslenskra vatnsfalla.

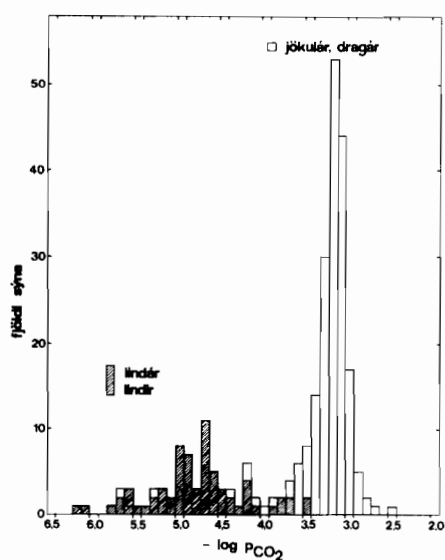
	Lindár	Dragár og jökulár
Sýrustig (pH)	8,5-9,5	7,0-7,5
Hlutþrýstingur koltvísýrlings (pCO <sub>2</sub> ).	10 <sup>-6</sup> -10 <sup>-4</sup> bör	10 <sup>-3</sup> -10 <sup>-2</sup> bör
Styrkur uppleystra efna.	Stöðugur, en vex með auknum hita	Óstöðugur. Hann er meiri á veturna en sumrin
Steindir sem gætu myndast úr efnum sem eru í upplausn í vatninu.	Smektít Zeólítar Kalsít Glerhallur Járnoxíð Maganoxíð	Gibbsít Kaólinít Glerhallur Járnoxíð Maganoxíð Áloxíð

Einfaldað líkan af efnaskiptum milli vatns og basalts er sýnt á mynd 3. Slík efnaskipti fela í sér myndun veðrunarsteinda samfara útskolun ýmissa efna og upptöku vatns. Við efnaskiptin ganga H<sup>+</sup> jónir inn í bergið en katjónir (jákvætt hlaðnar jón-

ir) losna úr því. Fyrir hverja jákvæða hleðslu sem fer úr bergi í lausn, verður ein jákvæð hleðsla að fara úr vatni í berg, t.d. þegar ein Ca<sup>++</sup> jón losnar úr bergi ganga tvær H<sup>+</sup> jónir úr vatninu í bergið í staðinn. H<sup>+</sup> jónirnar í vatninu koma frá klofnun

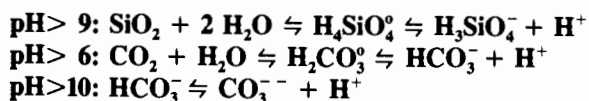
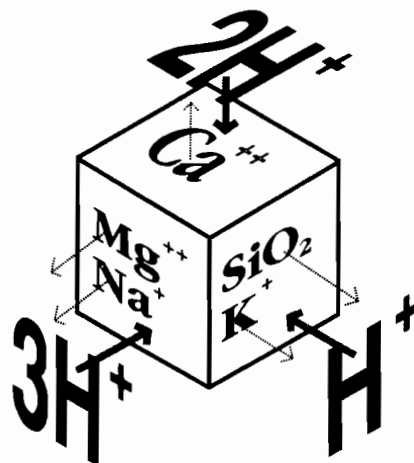


MYND 1. Styrkur uppleystra efna og aurburður í Þjórsá, Tungufljóti og Hvítá árin 1972 og 1973. Gögnin eru frá Halldóri Ármannssyni o.fl. (1973) og Sigurjóni Rist (1974).



MYND 2. Súlfur sem sýnir hlutþrýsting koltvísýrling (bör) í íslensku ferskvatni. Hlutþrýstingurinn er reiknaður með reiknilíkani (Stefán Arnórsson o.fl. 1982) út frá mældu sýrustigi, hitastigi og uppleystum koltvísýrlingi. Gögnin eru frá Ario (1985), Stefáni Arnórssyni (óbirt), Halldóri Ármannssyni o.fl. (1973), Sigurði R. Gíslasyni (1985) og Sigurjóni Rist (1974).

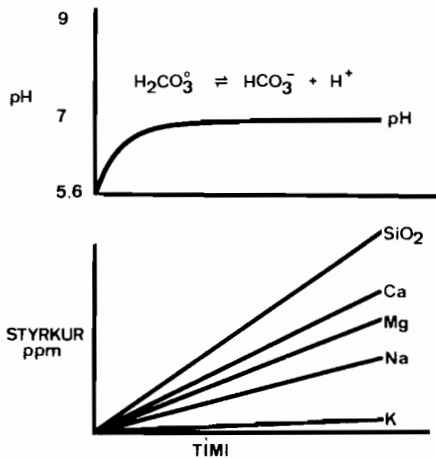
kolsýru ( $H_2CO_3$  og kísilsýru ( $H_4SiO_4$ ) er þær brotna niður (mynd 3). Kolsýran er upprunnin úr andrúmslofti, hún verður til við rotnun lífrænna jurta og dýraleifa, og við öndun dýra og plantna. Kísilsýran er ættuð úr berginu, en kísill skolest hraðast allra efna úr basalti (Sigurður Gíslason 1985, Sigurður Gíslason og Eugster 1987a).



MYND 3. Einfaldað líkan af upplausn basaltmola í vatni.  $H^+$  jónir ganga úr vatninu og inn í bergið en katjónir og kísill í berginu leysast upp og ganga út. Efnahvörfin neðst á myndinni sýna helstu  $H^+$  framleiðendur í ferskvatni. Ennfremur er sýnt við hvaða pH (sýrustig)  $H^+$  framleiðslu hvers hvarfs fer að gæta, við 25°C. Í táknum  $H_4SiO_4$  og  $H_2CO_3$  þýðir ° að efnasamböndin eru óhlaðin.

Mynd 4 sýnir hvernig styrkur uppleystra efna vex með tíma í tilraun þar sem basalt er leyst upp í eimuðu vatni sem er alltaf mettað andrúmslofti (Sigurður Gíslason og Eugster 1987a). Efst á myndinni má sjá hvernig sýrustig (pH) vatnsins, sem hvarfast við bergið, breytist með tíma. Sýrustigið rís snarlega frá upprunalega gildinu, 5,6 sem

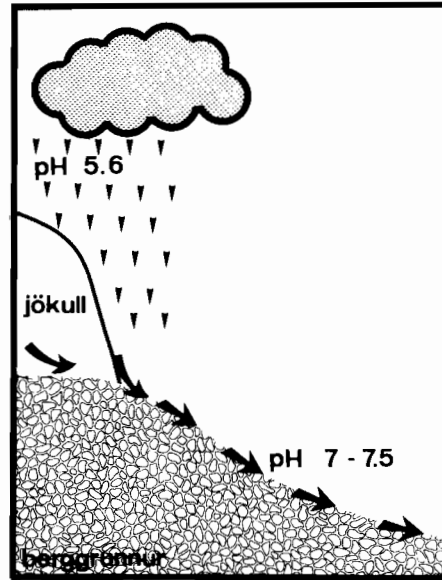
er jafnvægisgildi fyrir hreint vatn í jafnvægi við andrúmsloft við 25°C, en nær síðan stöðugu gildi við sýrustigið 7-7,5. Þetta stöðuga gildi er afleiðing af H<sup>+</sup> upptöku bergsins og H<sup>+</sup> framleiðslu samfara klofnun kolsýru (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) í bikarbónat (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Um leið og kolsýran klofnar, bætist meiri kolsýra við úr andrúmsloftinu til að viðhalda efnajafnvæginu sem sýnt er efst á 4. mynd. Myndun H<sup>+</sup> jónarinnar með klofnun kolsýru er hröðust um og yfir sýrustiginu 7. Nálægt þessu sýrustigi hefur framleiðsla H<sup>+</sup> jónanna auðveldlega undan upptöku þeirra í bergið og er það ástæðan til þess að veðrunin getur ekki valdið frekari hækkun sýrustigs.



MYND 4. Myndin sýnir hvernig efnainnihald vatns breytist með tíma í tilraunum, þegar loftmettað vatn hvarfast við basalt (Sigurður R. Gíslason og Eugster 1987a). Efnahvarfið á efri hluta myndarinnar sýnir hvernig H<sup>+</sup> jónimar myndast.

Mynd 5 sýnir einfaldað líkan af náttúrulegu kerfi þar sem afrennsli vatnasviðs er að mestu á yfirborði eins og gildir um dragár og jökulár. Sýrustig úrkomunnar er um 5,6, svipað og í eimuðu vatni mettuðu af koltvísýrtingi andrúmsloftsins. Um leið og úrkomman kemst í snertingu við berg og jarðveg hefst upplausn þeirra. Nær ótakmarkað magn er

af koltvísýrtingi til efnaskiptanna úr andrúmslofti og lofti, sem lokað er inni undir miklum þrýstingi í jöklum og frá rotandi jurta- og dýraleifum í jarðvegi. Sýrustig vatnsins rís því hratt frá 5,6 en stöðvast við 7-7,5, svipað og í tilraunum sem sýndar eru á mynd 4.



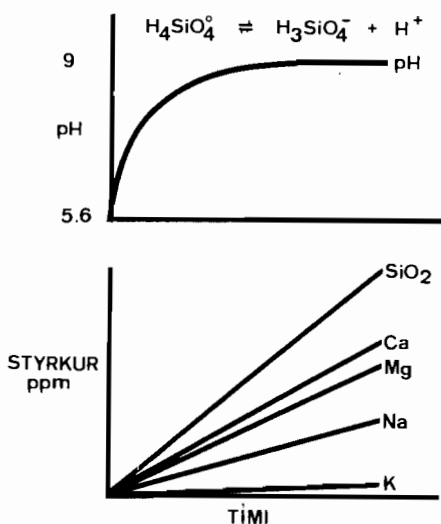
YFIRBORDSVATN

MYND 5. Einfaldað snið af landi þar sem afrennsli er á yfirborði. Sýrustig úrkomunnar er um 5,6 en sýrustig yfirborðsvatnsins er á bilinu 7-7,5.

Mynd 6 sýnir hvernig styrkur uppleystra efna vex með tíma í tilraun þar sem basalt er leyst upp í eimuðu vatni sem er upphaflega mettað af andrúmslofti, en er einangrað frá andrúmsloftinu um leið og bergið kemur í snertingu við vatnið (Sigurður Gíslason og Eugster 1987a). Styrkur uppleystra efna vex með tíma svipað og gerðist í opna kerfinu sem sýnt er á mynd 4 en sýrustig vatnsins í lokaða kerfinu (mynd 6) rís mun hærra en í því opna. Styrkur kolsýru í vatninu er mjög lágur, þ.e. einungis hinn upprunalegi jafnvægisstyrkur. Þegar sýrustig lausnarinnar kemst upp yfir u.þ.b. pH



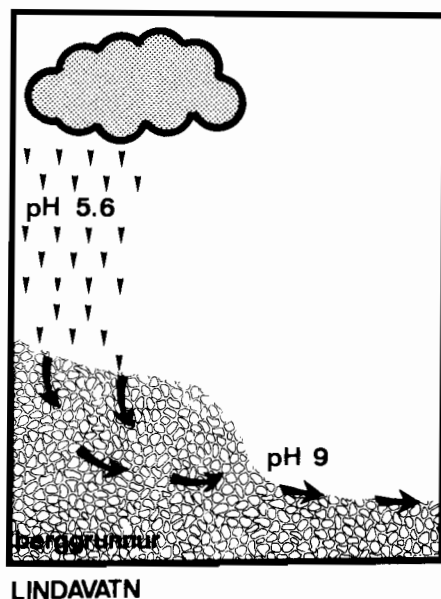
6, byrjar framleiðsla  $H^+$  jóna með klofnun kolsýru að verða veruleg en engin kolsýra bætist við, því kerfið er einangrað frá andrúmsloftinu. Sýrustig vatnsins hækkar því, en þegar pH er nálægt 9, fer kísilsýra ( $H_4SiO_4^0$ ) að klofna og framleiða  $H^+$  jónir sem þarf til upplausnar bergsins. Kísill ( $SiO_2$ ) skolast viðstöðulaust úr berginu, þannig að um leið og kísilsýran klofnar myndast meira af henni eins og sýnt er með efnajöfnunni á 3. mynd. Hækkun á sýrustigi vatnsins stöðvast þegar það er á bilinu 9-9,5, en þá myndast  $H^+$  jafnhvort við klofnun á kísilsýru og það eyðist við upptöku í bergið.



MYND 6. Myndin sýnir hvernig efnainnihald vatns breytist með tíma í tilraunum, þar sem vatn sem er upphaflega loftmettað er einangrað frá andrúmsloftinu og látið hvarfast við basalt (Sigurður R. Gíslason og Eugster 1987a). Efnahvarfið sýnir hvernig það  $H^+$  sem gengur inn í bergið myndast.

Á mynd 7 má sjá einfaldað líkan af náttúrulegu grunnvatnskerfi. Sýrustig úrkomunnar er nálægt 5,6 en um leið og vatnið kemur í snertingu við bergið hefst upplausn bergsins og sýrustig vatnsins hækkar. Vatn sem fer niður í berggrunninn ein-

angrast fljótlega frá andrúmsloftinu og lítið munar um rotandi jurta- og dýraleifar a.m.k. þar sem gegnumstreymi vatns er mikið. Framboð á kolsýru er því lítið og sýrustig vatnsins rís þar til að er komið upp í 9-9,5. En þá hefur stöðugt ástand náðst varðandi myndun og upptöku  $H^+$  jóna. Samfara hækkun sýrustigsins fellur hlutþrýstingur koltvísýrlings verulega því kolefnishvörf eins og þau sem sýnd eru á mynd 3 ganga til hægri þegar



MYND 7. Einfaldað snið af landi þar sem afrennsli er neðanjarðar og áhrif þess á sýrustig vatnsins. Sýrustig úrkomunnar er um 5,6 en sýrustig grunnvatnsins u.þ.b. 9.

sýrustigið hækkar. Vatnið sem kemur upp í lindunum er því með hátt sýrustig og lágan hlutþrýsting koltvísýrlings ( $pCO_2$ ). Um leið og það kemst á ný í snertingu við andrúmsloftið hefur koltvísýrlingur andrúmslofts tilhneigingu til að leysast upp í vatninu, en sú upplausn gengur hægt fyrir sig eins og fjallað er um í næsta kafla.

## EFNASKIPTIA VATNS VIÐ BERG OG ANDRÚMSLOFT Í MEGINÁL ÍSLENSKRA VATNSFALLA

Dvalartími vatns í meginál vatnsfalla á Íslandi er jafnan stuttur. Árnar eru stuttar miðað við ár meginlandanna og straumhraðinn mikill. Þjórsá, lengsta vatnsfall á Íslandi, er 230 km löng frá upptökum til sjávar (Hagstofa Íslands 1984). Dagsveiflur eru í rennsli Þjórsár á vorin og sumrin. En það tekur topp dagsveiflunnar í Þjórsá 30 klukkustundir að berast frá jöklum niður að Urriðafossi (Sigurjón Rist 1961) sem er um 25 km frá sjó. Það má því búast við að dvalartími vatns í meginálum vatnsfalla á Íslandi sé u.þ.b. einn sólarhringur eða minna.

Flæði vatns í ám er nær undantekningarlaust iðustreymi (Leopold o.fl. 1964). Vegna iðustraumanna blandast vatnið vel allt að mörkum vatns og lofts en þar breytist bygging vatnsins. Í stað þess að sameindum vatnsins er óreglulega fyrir komið, eins og er víðast í straumnum, þá verður samröðun þeirra þétt og regluleg í yfirborðshimnunni (t.d. Brutsaert og Gerhard 1984). Þessi þétta vatnshimna skilur í raun að vatn og loft. Hún myndar einskonar varnarlag sem tefur fyrir efnaskiptum á milli lofts og vatns. En gastegundir eins og koltvísýrlingur verða að berast í gegnum þetta lag til þess að komast út eða í vatnið. Þessi himna brotnar upp þegar vatn freyðir í ölduföldum, foss-um og flúðum og verða þá öll efnaskipti mun hraðari en ella.

Eins og sjá má á mynd 3 þá er hlutprýstingur koltvísýrling í lindám, 10 til 100 sinnum lægri en í andrúmslofti, en sum þessara sýna eru tekin kílómetrum neðan upptaka ána. Vatn í lindám getur þannig haldið efnaeinkennum sínum e.t.v. allt niður til ósa, vegna þess hve efnaskipti vatns og andrúmslofts eru hæg miðað við dvalartíma vatnsins í áni.

Eins og sýnt er á 1. mynd, þá vex styrkur uppleystra efna ekki með auknum aurburði í árvatni. Þetta bendir til þess að efnaskipti milli vatns og bergs í meginál ána hafa hverfandi áhrif á magn uppleystra efna í árvatninu. Þetta stafar af því, hve

tíminn til þessara efnaskipta er stuttur, u.þ.b. einn sólarhringur eða minna, en það er ekki nægilegur tími fyrir umtalsverða upplausn aurburðarins. Magn aurburðar vex með auknu vatnsrennsli, t.d. getur hann orðið geysimikill í stórflóðum (Sigurjón Rist 1974). Hins vegar minnkar styrkur uppleystra efna í flóðum. Stafar það eflaust af hlutfallslega mikilli aukningu á vatni sem hefur lítinn dvalartíma á vatnasviðinu og því stutt samskipti við bergið. Ef athuguð eru gögn um ár þar sem rennsli helst óbreytt, en aurburður er mismikill, er ekki að sjá að neitt samband sé á milli styrks uppleystra efna og aurburðarmagns.

### SAMANTEKT

Hraði efnarofs á Íslandi er a.m.k. tvisvar sinnum meiri en á meginlöndunum. Þetta stafar fyrst og fremst af tiltölulega mikilli úrkomu og afrennsli og því hve glerkennt basalt, eins og móberg, eldfjallaaska og gjallkargi leysist hratt upp miðað við ýmsar bergmyndandi steindir. Efnafræði lindáa er frábrugðin efnafræði dragáa og jökuláa. Hiti, rennsli og styrkur uppleystra efna er stöðugri í lindám en í jökul- og dragám. Sýrustig dragáa og jökuláa er í kringum 7-7,5 og stjórnast af klofnun kolsýru í vatninu. Sýrustig lindáa er um 8,5-9,5 og stjórnast af klofnun kísilsýru á meðan vatnið er neðanjarðar, en þegar vatnið kemur í snertingu við andrúmsloft getur sýrustig þess lækkað þegar koltvísýrlingur úr andrúmsloftinu leysist upp í því. Vegna tiltölulega stutts dvalartíma vatns í ám á Íslandi er tíminn til þessara efnaskipta í meginál lindáanna takmarkaður og getur valdið því að hátt sýrustig (pH 8-9) helst allt til ósa. Tíminn til efnaskipta milli vatns og aurburðar er sömuleiðis það stuttur að aurburður hefur ekki teljandi áhrif á styrk uppleystra efna í dragám og jökulám.

### ÞAKKIR

Málfríður K. Kristiansen, Sigurður Jakobsson, Niels Óskarsson og Páll Imsland veittu margvíslega aðstoð við þessar rannsóknir og skrif. Vísindasjóður Íslendinga og Rannsóknarsjóður Háskóla Íslands veittu fé til verksins. Þessum aðilum viljum við þakka góðan stuðning.

## HEIMILDIR

- Ario, J. 1985: "Chemistry of cold groundwater in the Langjökull volcanic zone." Research report 8701. Nordic Volcanological Institute, Reykjavík, Iceland. 26 s. LI Bragi Árnason 1976: *Groundwater systems in Iceland traced by deuterium*. Vísindafélag Íslendinga, rit 42. 235 s.
- Brutsaert, W. & H.J. Gerhard (ritstj.) 1984: *Gas Transfer at Water Surfaces*. D. Reidel Publishing Co., Dordrecht. 639 s.
- Cawley, J.L., R.C. Burruss & H.D. Holland 1969: Chemical weathering in central Iceland: An analog of Pre-Silurian weathering. *Science* 165. 164-165.
- Freysteinn Sigurðsson 1985: *On the chemistry of fresh ground-water in Iceland*. Óbirt handrit, Orkustofnun, Reykjavík. 14 s.
- Garrels, R.M. & F.T. Mackenzie 1971: *Evolution of sedimentary rocks*. W.W. Norton, New York. 397 s.
- Guðmundur Kjartansson 1945: Vatnsfallategundir. *Náttúrufraeðingurinn* 15. 113-126.
- Guðmundur E. Sigvaldason 1963: Influence of geothermal activity on the chemistry of three glacier rivers in southern Iceland. *Jökull* 13. 10-17.
- Guðmundur E. Sigvaldason 1965: The Grímsvötn area. Chemical analysis of jökulhlaup water. *Jökull* 15. 125-128.
- Guttormur Sigbjarnarson 1972: *Vatnafræði Þórisvatnssvæðisins*. Orkustofnun, Raforkudeild, Reykjavík, 64 s.
- Hagstofa Íslands 1984: *Tölfræðihandbókin 1984*. Reykjavík. 268 s.
- Halldór Ármannsson 1970: Efnarannsókn á vatni Elliðaánna og aðrennslis þeirra. *Rannsóknastofnun iðnaðarins, fjölrit nr. 26*. 67 s.
- Halldór Ármannsson 1971: Efnarannsóknir á vatni Elliðaánna og aðrennslis þeirra. II. Tímabilið maí 1970 - janúar 1971. *Rannsóknastofnun iðnaðarins, fjölrit nr. 35*. 56 s.
- Halldór Ármannsson, Helgi Magnússon, Pétur Sigurðsson & Sigurjón Rist, 1973: *Efnarannsókn vatna. Vatnasvið Hvítár - Ölfusár; einnig Þjórsár við Urriðafoss*. Orkustofnun, OS -RI, Reykjavík. 8 s. + töflur.
- Haukur Tómasson 1986: *Glacial and volcanic shore interactions. Part I: On land..* Í Iceland Coastal and River Symposium Proceedings (ritstj. Guttormur Sigbjarnarson). Háskóli Íslands o.fl. Reykjavík. 7-16.
- Helgi Björnsson & Hrefna Kristmannsdóttir 1984: The Grímsvötn geothermal area. *Vatnajökull*. Iceland. *Jökull* 34. 25-50.
- Jón Eypórsson & Hlynur Sigtryggsson 1971: The climate and weather of Iceland. *The Zoology of Iceland* 1,3. 1-62.
- Jón Ingimarsson & Freysteinn Sigurðsson 1987: Lekt íslenskra jarðefna. Í *Vatnið og landið, ágrip erinda*. Orkustofnun. Reykjavík, OS-87040/VOD-04. bls. 66.
- Jón Ólafsson 1979: *The chemistry of the Lake Mývatn and the River Laxá*. *Oikos* 32. 82-112.
- Jón Ólafsson 1980: Temperature structure and water chemistry of the caldera lake Öskjuvatn. Iceland. *Limnol. Oceanogr.* 25. 779-787.
- Kristján Sæmundsson 1979: Outline of the geology of Iceland. *Jökull* 29. 7-28.
- Lasaga, A.C. 1984: Chemical kinetics of water-rock interactions. *J. Geophys. Res.* 89. 4009-4025.
- Leopold, L.B., M.G. Wolman & J.P. Miller 1964: *Fluvial Processes in Geomorphology*. W.H. Freeman and Co. San Francisco. 522 s.
- Livingstone, D.A. 1963: Chemical composition of rivers and lakes. *Kaflí G í Data of Geochemistry*, 6. útg. (ritstj. M. Fleischer). US Geologic Survey Professional Paper No. 440. 64 s.
- Maybeck, M. 1979: Concentrations de eaux fluviales en éléments majeurs et apports en solution aux océans. *Révue de Géologie Dynamique et de Géographie Physique* 21. 215-246.
- Maybeck, M. 1987: Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads. *Am. Jour. Sci.* 287. 401-428.
- Sigurður R. Gíslason 1985: *Meteoric water - basalt interactions: A field and laboratory study*. Óprentuð doktorsritgerð við Johns Hopkins háskólann, Baltimore, Bandaríkjunum. 238 s.

- Sigurður R. Gíslason & S.L. Rettig 1986: Meteoric water-basalt interactions in N.E. Iceland: Methods and analytical results. *U.S. Geological Survey, Open-File Report 87-49*. 16 s.
- Sigurður R. Gíslason & H.P. Eugster 1987a: Meteoric water-basalt interactions: I. A laboratory study. *Geochim. Cosmochim. Acta* 51. 2827-2840.
- Sigurður R. Gíslason & P.H. Eugster 1987b: Meteoric water-basalt interactions: II. A field study in NE Iceland. *Geochim. Cosmochim. Acta* 51. 2841-2855.
- Sigurður Steinþórsson 1987: Hraði landmyndunar og landeyðingar. *Náttúrufræðingurinn* 57. 81-95.
- Sigurður Steinþórsson & Níels Óskarsson 1983: Chemical monitoring of jökulhlaup water in Skeiðará and the geothermal system in Grímsvötn, Iceland. *Jökull* 33. 73-86.
- Sigurjón Rist 1956: *Íslensk vötn*. Raforkumálástjóri - Vatnamælingar, Reykjavík. 127 s.
- Sigurjón Rist 1961: Vötn. Í *Náttúra Íslands* (ritstj. Sigurður Þórarinnsson). Almenna bókafélagið, Reykjavík. 169-193.
- Sigurjón Rist 1974: *Efnarannsókn vatna. Vatnsvið Hvítár - Ölfusár; einnig Þjórsár við Urriðafoss, 1973*. Orkustofnun, Reykjavík OSV7405. 11 s + töflur.
- Sigurjón Rist 1986: *Efnarannsókn vatna. Borgarfjörður, einnig Elliðaár í Reykjavík*. Orkustofnun, Reykjavík OS-86070/VOD-03. 46 s.
- Stefán Arnórsson, Sven Sigurðsson & Hörður Svavarsson 1982: The chemistry of geothermal waters in Iceland. I. Calculation of aqueous speciation from 0° to 370°C. *Geochim. Cosmochim. Acta* 46. 1513-1532.
- Unnsteinn Stefánsson 1950: Meðalfellsvatn. *Náttúrufræðingurinn* 20. 170-175.
- Unnsteinn Stefánsson & Björn Jóhannesson 1987: Miklavatn í Fljótum. *Náttúrufræðingurinn* 48. 24-51.
- Þorleifur Einarsson 1985: *Jarðfræði*. 5. útgáfa, Mál og menning, Reykjavík. 233 s.
- Walling, D.E. & B.W. Webb 1986: Solutes in river systems. Í *Solute Processes* (ritstj. S.T. Trudgill). John Wiley & Sons Ltd. New York. 251-327.
- Veðurstofa Íslands 1958-1987. Mælingar á nokkrum efnum í úrkomu og andrúmslofti. Í *Veðráttunni 1958-1987*.