

Um segulstefnu í hraunlögum og óvissu í túlkun hennar

Leó Kristjánsson og Haraldur Auðunsson

Raunvísindastofnun Háskólans og Háskólinn í Reykjavík

Vefútgáfa: 13. apríl 2007

Ágrip – Ýmiskonar skekkjuvaldar hafa áhrif á mælda stefnu varanlegrar segulmögnunar jarðlaga. Skekkjurnar takmarka möguleika á að draga ályktanir af mælíniðurstöðunum, bæði um eiginleika hins hnatt-ræna segulsviðs jarðarinnar og um jarðfræðileg atriði. Einn þessara skekkjuvalda í gosbergi eru staðbundin frávik í segulsviðinu, orsökun af misleitri segulmögnun nálæggra jarðmyndana þegar bergið var að kólna. Höfundar hafa kannað í því sambandi, hve segulmögnunarstefnur innan nokkurra hraunlaga eða hraunasyrpa eru breytilegar frá einum sýnatökustað til annars, bæði lárétt innan hrauns (allt að nokkrir km) og lóðrétt. Breytileikinn reynist vera lítill, miðað við hið náttúrulega flókt sviðsins vegna breytilegra rafstrauma í jarðkjarnanum. Mæld staðalfrávik stefnanna voru um 3° fyrir eldri hraun (frá Tertíer) og um helmingi lægri fyrir þau yngstu (frá Nútíma).

1. Inngangur

Þegar á 18. öld höfðu bæði ferðalangar og vísindamenn veitt því athygli, að jarðlög gátu verið segulmögnuð og því haft staðbundin áhrif á stefnu áttavita (sjá t.d. Kristjánsson, 1995). Mælingar á seguleiginleikum sýna úr jarðlögum leiddu í ljós um aldamótin 1900, að þessi segulmögnun er að hluta varanleg og situr í smákornum járnseglandi steinda í berginu. Hún getur í ýmsum tilvikum endurspeglad stefnu jarðsegulsviðsins þegar viðkomandi lög urðu til. Í tilviki gosbergs á borð við blágrýtishraunlög er þá um að ræða svonefnda hita-segulmögnun (e. thermal remanence) sem bergið tekur í sig þegar það er að kólna. Stuttu neðan við Curie-hitastig viðkomandi steinda eiga skilveggir milli svæða (e. domains) með mismunandi segulmögnun innan korna mjög auðvelt með að færast til af völdum ytra segulsviðs, þótt það sé veikt eins og jarðsegulsviðið (um 50 mikro-Tesla). Þegar hitastig hraunsins lækkar enn frekar, má segja að veggirnir „frjósi fastir“, m.a. vegna vaxandi áhrifa frá lögum kornanna og misátta eiginleikum steindanna miðað við kristalásana. Við herbergishita getur því þurft svið sem nemur tugum milli-Tesla til að færa þessa veggir úr stað og þannig breyta hinni varanlegu segulmögnun sem kornin hafa fengið. Ef þau eru úr hreinum seguljárn-

steini (magnetite, Fe_3O_4) er Curie-hitastigið $578^\circ C$, en í hraunlögum er seguljárnsteinninn oft blandaður titani sem gerir að verkum að það getur verið allt niður undir $100^\circ C$. Í fínkornóttum setlögum sem mynduð eru í kyrru vatni eða sjó, hefur jarðsegulsviðið hnikað kornunum (sem oftast innihalda hematit, Fe_2O_3 , fremur en seguljárnstein) meðan þau falla, þannig að segulstefna hvers þeirra leitast við að vera samsíða því þegar kornin setjast til. Með tíð og tíma límast þau saman í þeirri stöðu og varðveita þannig segulstefnuna.

Niðurstöður fengnar úr mælingum á segulstefnu jarðlaga höfðu margháttað og mikilvæg áhrif á þróun jarðvísinda á síðari hluta 20. aldar. Hvað varðar ferli í skorpu og möttli jarðar, áttu þær niðurstöður t.d. þátt í endurlíffun hugmynda um landrek (og síðar gliðnun úthafshryggja og plötutektonik), auk þess að varpa ljósi á færslu og snúning einstakra landsvæða. Segulstefnumælingarnar sýndu einnig fram á það, að í jarðkjarnanum höfðu breytilegir hring-rafstraumar verið í gangi í hundruð milljóna ára. Þessir rafstraumar hafa orðið tilefni mikilla fræðilegra rannsókna, ekki síst sú staðreynd að þeir virðast snúast við með óreglulegu millibili og valda þannig umsnúningi segulsviðs jarðar. Yfirleitt telja menn að stefna segulsviðs jarðar á hverjum stað, ef tekið er meðaltal þess yfir all-

langan tíma (líklega nokkur hundruð þúsund ár), líkist mjög því sem búast megi við frá litlu segultvískauti í jarðmiðju samsíða snúningsásnum. Frekari upplýsingar um hegðun segulsviðs jarðar, svo sem flökt í stefnu þess og styrk, hafa mikið til fengist með mælingum á segulstefnum í hraunlögum.

Fræðilegu rannsóknirnar hafa einkum byggt á tilgátum sem fram komu um 1950 (svonefndri rafalshenningu), um það hvernig að hreyfingar innan mjög stórra vel leiðandi hluta sem snúast um fastan ás, geti viðhaldið slíkum rafstraumum af sjálfu sér. Í hinum seigfljótandi ytri hluta jarðkjarnans kemur þar einkum til álita iðustreymi vegna varmaframleiðslu frá geislavirkni og fasabreytingum auk spuna jarðar. Á síðasta áratug hefur ofurtölvum verið beitt til að reikna þessar hreyfingar og segulsviðið sem þær valda (t.d. Glatzmaier og Roberts, 1995). Sömuleiðis hafa tilraunir verið gerðar með að láta rafstrauma viðhaldast í fljótandi málmum í stórum flátum sem snúast hratt.

Mælingar á segulstefnu hraunlaga á Íslandi hafa átt nokkurn þátt í ofantaldri þróun innan jarðeðlisfræðinnar, og má þar einkum nefna rannsóknir J. Hospers, Trausta Einarssonar og Þorbjörns Sigurgeirssonar sem birtust á sjötta áratug síðustu aldar (sjá Kristjánsson, 1993). Sérstaða Íslands að þessu leyti felst í því, að hér eru mjög aðgengilegar þykkan syrpur hraunlaga og ummyndun þeirra af völdum veðrunar eða jarðhita er lítil. Hefur því verið hægt að draga ítarlegri ályktanir af segulstefnumælingum hér en víðast annarsstaðar, til dæmis þá að flökt segulskautsins hafi farið minnkandi á síðustu 15 milljón árum (Kristjánsson, 2002).

2. Óvissa í segulstefnum

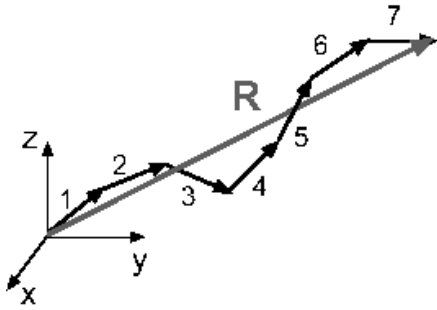
Af reynslu undanfarinna áratuga hefur komið í ljós, að mæld stefna segulmögnunar í jarðlögum víða um heim er oft hvorki upphafleg, né samsvarar hún stefnu jarðsegulsviðsins á einhverju einu augnabliki jarðsögunnar. Þannig veldur samþjöppun sjávar- og vatnasetts (undan fargi laga sem ofan á leggjast) því, að stefnunni hallar minna en hún ætti að gera. Margskonar bergmyndanir hafa endur-segulumagnast af völdum upphitunar löngu eftir að þær urðu til. Í sumum tilfellum er upphaflega segulmögnunin með svo lágt afseglunarsvið (e. coercive force) að hún dofna smátt og smátt af sjálfu sér. Segulsteindir geta eyðst og nýjar vaxið í þeirra stað, og algengt er einnig að berg aflagist m.a. vegna fellingar og samkýtingar. Verður í öllum þessum tilvikum erfitt að túlka þær segulstefnur sem mælast.

Ef menn vilja rannsaka segulstefnur í jarðlögum til þess að fá sem óspilltast safn augnabliks-gilda fyrir stefnu þess sviðs sem átti uppruna í jarðkjarnanum, mælir flest með því að nota til þess fersk hraunlög af lítt hreyfðum svæðum. Túlkun slíkra mælinga út frá hugsanlegum eiginleikum kjarnans verður mun traustari og marktækari en ella, ef ekki þarf að slá varnagla um áhrif truflana frá óskyldum ferlum, eða áætla leiðréttingar fyrir þeim. Óvissa í ákvörðun segulmögnunarstefnu getur einnig skipt máli við jarðfræðirannsóknir, ef menn vilja til dæmis kanna hvort stefnan sé sú sama á tveim stöðum (opnum) sem safnað er úr. Hafa slík atriði verið rædd talsvert í tímaritum um jarðeðlisfræði undanfarna áratugi.

Nokkrir hugsanlegir skekkjuvaldar í segulstefnumælingum verða taldir upp hér á eftir, en fyrst þarf að taka fram að einkum eru tvær hornstærðir notaðar í óvissureikningum fyrir hóp margra mælinga sem eiga allar að gefa sömu stefnuna en geiga tilviljanakennt frá henni. Önnur stærðin er hliðstæð við staðalfrávik venjulegrar normaldreifingar, og eru við kjöraðstæður 63% allra mældra stefna, sem meðaltal er tekið af, innan þessa horn-staðalfráviks frá meðalstefnunni. Hún er því oft kölluð θ_{63} eða "angular standard deviation". Hin stærðin (α_{95}) gefur stærð horns kringum meðalstefnuna, þannig að 95% líkur eru á að hið rétta meðaltal sem reynt er að finna, liggja innan þess horns. Samsvarar hún 95% öryggismörkum sem oft eru notuð við að lýsa nákvæmni meðaltals venjulegrar normaldreifingar. Þessi síðarnefnda óvissa minnkar eftir því sem sýnum úr þýði með gefið staðalfrávik fjölgar; fyrir fimm mælingar ($N = 5$) eru þær um það bil jafnstórar.

2.1. Reikningur á meðalstefnu og dreifingu mældra stefna

Tölfræði Fishers (1953) á vel við þegar verið er að lýsa dreifingu mældra segulstefna í sýnum. Hún er nokkuð góð nálgun við sveim (e. random walk) á kúluyfirborði ef staðalfrávikkið er ekki of hátt (Roberts og Ursell, 1960). Sérhver mæld stefna er gefin sem einingarvektor með stefnuhornunum D og I . Þar er D hornið milli hánorðurs og ofanvarps segulstefnunnar á lárétt plan ($0 - 360^\circ$, mælt til austurs og oft kallað misvísun), og I er halli segulstefnunnar niður frá láréttu ($+90^\circ$ beint niður, 0° lárétt, -90° beint upp). Besta mat á meðalstefnu N mælinga er stefna vektorsins sem fæst með því að leggja alla N einingarvektorana saman (sjá Mynd 1).



Mynd 1. Summa mældra stefnuvektora (einingarvektorar 1, 2, ... 7) myndar vektorinn \mathbf{R} sem gefur meðalstefnu þeirra.

Þáttur hvers einingarvektors í norður er x , í austur y og niður z , þar sem $x = \cos D \cos I$, $y = \sin D \cos I$ og $z = \sin I$.

Ef N svona einingarvektorar eru lagðir saman fást þættir meðalstefnunnar \bar{x} , \bar{y} og \bar{z} (sem er einnig einingarvektor):

$$\bar{x} = \frac{1}{R} \sum_{i=1}^N x_i, \quad \bar{y} = \frac{1}{R} \sum_{i=1}^N y_i \quad \text{og} \quad \bar{z} = \frac{1}{R} \sum_{i=1}^N z_i, \quad (1)$$

þar sem

$$R^2 = \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N y_i \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N z_i \right)^2. \quad (2)$$

Stefnuhorn meðalstefnunnar eru \bar{D} og \bar{I} sem auðvelt er að reikna samkvæmt $\tan \bar{D} = \bar{y}/\bar{x}$ og $\sin \bar{I} = \bar{z}$.

Frávik mældrar stefnu i frá meðalstefnunni er hornið Δ_i og mælikvarði á dreifingu stefnanna um meðaltalið er áætlaða horn-staðalfrávikðið s :

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \Delta_i^2}. \quad (3)$$

Allgóð nálgun fyrir θ_{63} fæst einnig með $\cos^{-1}(R/N)$. Í umfjölluninni hér á eftir er leitast við að greina dreifingu í segulstefnum innan eins hraunlags með því að bera saman meðalstefnurnar sem fást frá mismunandi stöðum í hrauninu, en innan hvers staðar fæst meðalstefna frá nokkrum sýnum með sinni eigin dreifingu. Til að fá réttan mælikvarða á dreifingu segulstefna innan hraunlags þarf að leiðrétta fyrir dreifingunni innan hvers staðar og er það gert á eftirfarandi hátt. Ef s_m stendur fyrir rétt staðalfrávik stefna milli staða, s_h er heildar staðalfrávik fyrir öll meðaltölin og s_i staðalfrávik stefna innan staða, fæst

$$s_m^2 = s_h^2 - \frac{s_i^2}{a}. \quad (4)$$

þar sem \bar{a} er meðalfjöldi sýna á hverjum stað ($\bar{a} =$ heildarfjöldi sýna/fjöldi staða). Þar eð mæld gildi á s_i eru svolítið breytileg, er notað rms-gildi allra staðalfrávika staðanna (jafna (4) er nálgun og er hliðstæð við það sem almennt er gert í úrvinnslu þar sem skekkjur koma inn á tveim stigum í söfnum mæligagna (sjá t.d. bls. 86 í Merrill og McElhinny, (1983))).

2.2. Beinar mæliskekkjur

Sýnum er safnað úr hraunlagi með því að bora nokkurra cm langa kjarna, 2,5 cm í þvermál, og mæla stefnu þeirra. Stefna segulmögnunar sýnanna er síðan mæld í næmum tækjum og umreiknuð í landfræðilegt hnita kerfi. Gerðar eru nokkrar mælingar á stefnunni og styrk segulmögnunarinnar í hverju sýni, milli þess að það er sett í spólur með riðstraumi sem eyðir úr því óæskilegri segulmögnun. Er þar einkum um að ræða svonefnda seigjusegulmögnun (e. viscous remanence) sem bergið hefur tekið í sig á löngum tíma í núverandi jarðsegulsviði. Heildaróvissa af völdum allra tilviljanakenndra og kerfisbundinna skekkja í svona stefnumælingu á einu sýni má áætla að sé um 3° ef segulmögnun þess er þolanlega sterk ($> 0,5$ A/m) og stöðug. eru venjulega tekin fjögur sýni á hverjum stað í hraunlagi.

2.3. Ýmsir skekkjuvaldar í bergsegulmælingum

Ýmsir þættir geta valdið skekkjum í mælingum á stefnu segulmögnunar bergs, s.s. hreyfing kólnandi og storknandi hrauns, brot segulsviðslína, staðbundin frávik í segulsviðinu og jarðlagahalli.

Ofan og utan á hrauninum er mikið af lausu gjalli og flekum sem legið hafa ofan á bráðnu undirlagi og borist með því langa leið. Hafa þeir flekar þá yfirleitt snúist á ýmsa vegu og sporðreistst. Við sýnasöfnun er þess gætt að komast sem best inn í kjarna hraunsins, til dæmis þar sem rof hefur unnið á því, eða að reynt er að taka sýni á ólíkum og fjarlægum stöðum úr hrauninu og innra samræmi stefnanna skoðað.

Það er vel þekkt, að ljósgeisli brotnar við að fara gegnum efni eins og glerplötu. Hið sama gerist með kraftlínur segulsviðs þegar þær fara gegnum plötur úr efnum sem geta segulmagnast: ef slík plata er lárétt, verður sviðið inni í henni með minni halla en fyrir utan. Þarna skiptir einkum máli svonefndur segulhrifastuðull (segulviðtak, e. susceptibility) hraunsins. Útreikningar á því hvort þessi brotnun kraftlína inni í

kólnandi hraunlögum sé næg til þess að hafa merkjanleg áhrif (t.d. Knudsen o.fl., 2003) sýna að stefnubreytingin nái vart einni gráðu við aðstæður eins og eru hér á landi.

Sá þáttur sem líklegt er að hafi einna mest truflandi áhrif á túlkun bergsegulmælinga, eru staðbundin frávik (e. anomalies) í jarðsegulsviðinu sem geta verið fyrir hendi þegar hraun er að kólna. Þessi frávik stafa af því að jarðlög undir hverjum stað og umhverfis hann eru ekki öll með sömu segulmögnun. Þar getur komið við sögu óreglulegt landslag á svæðinu, nálægir skilfletir milli t.d. hrauna og móbergs, óregluleg yfirborð laganna næst undir því hrauni sem er að kólna, misgengi eða innskot, og tilvist stórra „linsa“ af eldri berglögum djúpt niðri. Frávik af þessu tagi eru greinilega því alvarlegri eftir því sem bergið sem orsakar þau er sterkar segulmagnað. Lítið er til af nákvæmum mælingum á stefnu segulsviðs á jörðu niðri á Íslandi, en til eru mælingar á styrk segulsviðs yfir öllu landinu á þéttum fluglínunum (sjá Jónsson og Kristjánsson, 1991) og má áætla út frá þeim að í 1000 m hæð flókti stefna sviðsins víða um hálfá gráðu til og frá ef flogið er fáeina tugi km. Slíkt flókt ætti að sjálfsögðu að vera meira á jörðu niðri. Í grein Hagstrums og Champions (1994) er könnuð segulstefna í mörgum nýlegum hraunstraumum á Hawaii, og þeir álykta að áhrif undirliggjandi landslags á hana séu óveruleg. Í rannsóknunum á sögulegum hraunlögum úr Etnu og Vesuviusi (Tanguy o.fl., 2005) hefur komið fram að segulstefnur í þeim fylgja allvel breytingum á jarðsegulsviðinu síðustu aldirnar. Á hinum eldri blágrýtissvæðum Íslands eru skil milli hraunlaga yfirleitt nokkuð slétt og stundum með setlögum á milli sem draga úr segultruflunum.

Á Íslandi er halli jarðlaga lítill, innan við 8° á flestum þeim stöðum Tertier-svæðanna þar sem bergsegulstefna hefur verið könnuð. Stærð hallans og stríkstefna eru hinsvegar oft nokkuð breytileg með staðsetningu og hæð í jarðlagastaflanum, og ekki eru alltaf tók á að mæla þau nákvæmlega þar sem sýnum er safnað. Áætla má að heildaróvissa í þeim hallaleiðréttingum á segulstefnum sem notaðar hafa verið, geti náð 2° að meðaltali.

3. Prófun á samræmi segulstefna í íslenskum hraunlögum

Hér verður einkum hugað að tveim leiðum til að prófa innra samræmi segulstefna í íslenskum hraunlögum, og hugsanlegum skekkjuvöldum (grein 2.3 hér að ofan). Önnur leiðin er með sýnasöfnun úr stök-

um lögum yfir talsverðar vegalengdir „lárétt“ eins og aðgengileiki í þau leyfir. Best væri að sjálfsögðu að þær vegalengdir næðu tugum kílómetra eins og í Þjórsárhrauninu sem nefnt verður hér að neðan, en aðstæður bjóða í raun sjaldan upp á meira en hálfan til nokkra km eða svo. Hin aðferðin er að safna sýnum „lóðrétt“ í gegnum stök hraun, og athuga hvort segulstefnan er þá að breytast með breytilegri fjarlægð frá hugsanlegum frávikavöldum í næsta nágrenni.

3.1. Fyrri athuganir á óvissu segulstefnumælinga á Íslandi, „lárétt“

Mælingar á segulstefnu hraunlaga hérlendis hafa frá upphafi að mestu beinst að því að nota grófa drætti jarðsegulsviðsins (einkum tilvist umsnúninga þess) í jarðfræðilegum tilgangi. Sýni úr hverju hrauni hafa gjarna verið dreifð á svæði sem nemur fáeinum metrum til tuga metra á breiddina og 0-2 metrum á hæðina. Eina athugunin þar sem breiddir sýnasöfnunar-svæða hafa birst fyrir mikinn fjölda hrauna var gerð af Doell (1972) við söfnun úr um 100 hraunum, flestum < 3 millj. ára. Þær voru oftast á bilinu 20-100 m, og liggja meðalstefnur úr 8 sýnum þar að meðaltali með 95% -vissu innan hrings (m.ö.o. topphorns keilu) með um 4° radía. Kristjánsson og Sigurgeirsson (1993) tóku sýni á sex stöðum úr Þjórsárhrauninu mikla sem rann fyrir um 8600 árum, 7-11 sýni á hverjum stað. Vegalengdir milli staðanna voru af stærðargráðu 20 km. Þótt sýnatökustaðirnir væru ekki allir fyrsta flokks, reyndust meðalstefnur þeirra hafa mjög litla dreifingu. Staðalfrávik stefnanna innan hvers sýnatökustaðar var um 5° , og meðalstefnan úr þeim öllum lá með 95% vissu innan 2° -hrings.

3.2. Nýjar rannsóknir með „lárétrí“ sýnasöfnun

Safnað hefur verið bergsýnum úr nokkrum hraunlögum og lagasyrþum, sem nú verður lýst stuttlega. Í töflunum hér á eftir eru gefin stefnuhornin D (misvísun) og I (halli) fyrir hvern stað innan hraunanna, n er fjöldi sýna á hverjum stað og N er fjöldi staða. Fyrstu þrjú lögin eru úr eldri blágrýtis-hraunasyrþum landsins (áður en jökull ísaldartímans fór að segja til sín fyrir um 2,5 millj. ára). Þær mynda hina reglulegu lagskiptingu sem má víða sjá í fjallshlíðum hér á landi.

3.2.1. Tvö hraunlög í Eyrafjalli (~2,5 millj. ár)

Þykkt hraunlag með nokkru af feldspat-dílum er í 380 m hæð næstum efst í fjallinu innan við Fossá.

Tafla 1. Mældar segulstefnur í hraunlagi í Eyrafjalli í Kjós

Staður	n	$D[^\circ]$	$I[^\circ]$	$\theta_{63}[^\circ]$
1	4	340,0	59,7	3,2
2	4	344,3	60,9	2,4
3	5	345,2	57,4	3,6
4	4	347,6	55,0	2,9
5	8	343,8	58,2	3,5
6	4	343,8	60,9	2,3
7	5	345,3	58,3	2,7
8	5	341,1	60,7	2,5
Alls 8 staðir		343,2	58,9	2,6

Sýnum var safnað á 8 stöðum neðst í hrauninu nokkurnveginn á beinni línu, og er vegalengdin milli endapunktanna um 1350 m. Hluti $2,6^\circ$ -staðalfráviksins frá heildar-meðalstefnunni stafar af flökti innan sýnatökustaðanna átta, sem eru dreifðir á um 20 m bili hver. Með leiðréttingu skv. jöfnu (4) fyrir flöktinu innan sýnatökustaða lækkar staðalfrávikid í $2,3^\circ$. Annað hraunlag í sama fjalli þykkar mjög staðbundið utan við Fossá í 120 m hæð, og voru tekin 22 sýni neðst úr því á fimm stöðum jafndreifðum á 300 m löngu svæði. Þar fengust svipaðar niðurstöður, halli meðalstefnunnar var $+72^\circ$ með staðalfrávik 2,6° eftir leiðréttingu fyrir flöktinu innan sýnatökustaða.

3.2.2. Hraunlag í Akrafjalli (~4 millj. ára)

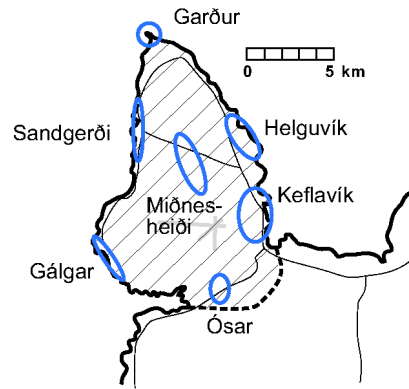
Þetta þóleiti-hraunlag er í 150 m hæð við þjóðveg 1 austarlega í Akrafjalli. Safnað var sýnum á sex stöðum neðantil í laginu, sem hver náði yfir 10–20 m og dreifðust þeir nokkuð jafnt á 540 m bil. Staðalfrávikid milli sýnatökustaða lækkar úr $4,4^\circ$ í $4,0^\circ$ þegar leiðrétt er fyrir flöktinu innan þeirra.

Tafla 2. Mældar segulstefnur í hraunlagi í Akrafjalli

Staður	n	$D[^\circ]$	$I[^\circ]$	$\theta_{63}[^\circ]$
A	4	352,7	73,6	4,5
B	4	351,4	71,7	2,3
C	4	348,0	64,2	3,9
D	4	334,7	68,8	3,5
E	4	329,9	66,0	3,4
F	4	345,2	68,4	3,5
Alls 6 staðir		343,1	69,0	4,4

3.2.3. Hraunlag á Dynjandisheiði (~13 millj. ára)

Safnað var úr hraunbrún austan við veginn á Dynjandisheiði, í 350 m hæð. Fjórir sýnatökustaðir náðu yfir 450 m. Með leiðréttingu lækkar staðalfrávikid úr $3,8^\circ$ í $3,3^\circ$.

**Mynd 2.** Myndin sýnir þá 7 staði þar sem sýnum var safnað úr Miðnesheiðardyngjunni, 4 til 15 borsýnum á hverjum.**Tafla 3.** Mældar segulstefnur í hraunlagi á Dynjandisheiði

Staður	n	$D[^\circ]$	$I[^\circ]$	$\theta_{63}[^\circ]$
1	5	226,4	-69,2	4,1
2	4	221,1	-69,5	3,8
3	5	244,6	-66,7	4,9
4	5	236,7	-71,0	2,2
Alls 4 staðir		233,4	-69,0	3,8

3.2.4. Dyngja á Miðnesi (< 0,8 millj. ára)

Miðnes á Reykjanesskaga er dyngja sem varð til á einu af hlýskeyðum ísaldar og er hún samsett af mörgum þunnum hraunlögum. Á Miðnesinu var kjarnasýnum safnað víðsvegar eins og sýnt er á Mynd 2 og er þeim skipt á 7 staði. Vegalengd milli kjarna innan hvers staðar er frá 0,1 til 3,5 km og fjarlægðin milli staða er frá 0,2 til 15 km. Segulstefnurnar sýna að þegar þessi hraunlög runnu, var segulsvið jarðar það óvenjulegt að segulskautid (virtual geomagnetic pole) virðist vera við Aralvatn (um 45°N). Með leiðréttingu, eins og áður, lækkar staðalfrávikid úr $2,0^\circ$ í $1,5^\circ$.

Tafla 4. Mældar segulstefnur Miðnesheiðar-dyngjunnar

Staður	dreifing	n	$D[^\circ]$	$I[^\circ]$	$\theta_{63}[^\circ]$
Garður	0,2 km	4	66,7	58,0	3,1
Sandgerði	3,5 km	4	67,9	61,3	2,6
Miðnesheiði	3,5 km	7	73,9	61,5	3,0
Helguvík	2,0 km	12	70,3	60,7	3,9
Keflavík	3,0 km	15	72,4	61,5	5,3
Ósar	1,5 km	6	73,8	58,8	4,1
Gálgar	2,0 km	9	70,2	61,7	3,2
Alls 7 staðir			70,7	60,5	2,0

3.2.5. Hraun frá Nútíma

Við söfnuðum sýnum úr 11 hraunum frá Nútíma (þ.e. eftir að ísöld lauk fyrir um ellefu þúsund árum). Eins og lýst er hér að framan er oft torvelt að ná sýnum úr innri og óhreyfðum hluta hraunanna, en með útsjónarsemi gengur það og þá sérstaklega á þeim stöðum þar sem brim eða ár hafa náð að kroppa í þessi hraun. Stampahraun er hér notað sem dæmi um hvernig sýna-söfnunin fór fram og til að sýna dreifingu mælinganna. Það er talið hafa runnið 1226 (Sigurgeirsson, 1995) og er því frá sögulegum tíma. Kjarnasýnum var safnað á 4 mismunandi stöðum úr hrauninu og 4 til 5 kjarnar á hverjum stað (sjá Mynd 3). Sökum þess að þetta er óslétt hraun með mikið af lausum karga á yfirborðinu, voru kjarnar boraðir þar sem brimið hafði brotið úr hrauninu og hægt að komast inn undir kargann.

Tafla 5. Mældar segulstefnur í Stampahrauni (frá 13. öld)

Staður	dreifing	<i>n</i>	<i>D</i> [°]	<i>I</i> [°]	θ_{63} [°]
A (fjörुकlettur)	8 m	4	14	69,8	3,1
B (hraunstál)	5 m	4	12	68,0	3,2
C (gangur)	1 m	4	5	69,8	1,0
D (hraunstál)	30 m	5	9	71,3	2,1
Alls 4 staðir		10		69,8	1,9

Með leiðréttingu lækkar fráviksið úr $1,9^\circ$ í $1,5^\circ$.

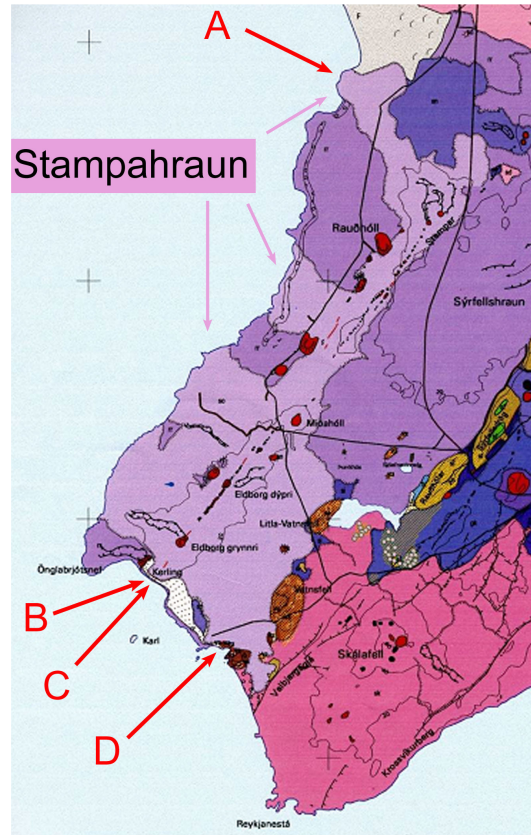
Sami háttur var hafður á við að safna kjarnasýnum úr hinum níu hraununum frá Nútíma (Tafla 6).

Tafla 6. Mældar segulstefnur í ungum hraunum frá Nútíma (yngri en 11 þús. ára). Hér er *N* fjöldi sýnatökustaða og *n* heildarfjöldi sýnanna. Fyrri fráviksgildin sýna θ_{63} á milli staða, en hið seinna er leiðrétt gildið.

Hraun	dreifing, km	<i>n</i>	<i>N</i>	θ_{63} [°]
Ögmundarhraun	0,3 - 1,2	16	3	1,5 0,9
Hellnahraun	0,5 - 3,7	20	3	3,0 2,3
Tvíbollahraun	0,7 - 4,0	11	3	3,6 3,0
Óbrinnishólahraun	0,02 - 5,6	12	3	1,8 0,0
Hvaleyrrahraun	0,7 - 1,1	19	3	0,7 0,0
Hallmundarhraun	0,7 - 9,0	22	4	3,0 2,7
Svínahraun	0,5 - 3,5	19	4	1,8 0,0
Þurárhraun	0,3 - 10	24	4	1,8 1,1
Nesjahraun	0,3 - 3	17	4	2,0 0,9
Stampahraun	0,1 - 5,0	17	4	1,9 1,5

3.3. Fyrri athuganir á segulstefnu í íslenskum hraunlögum, „lóðrétt“

Furðu erfitt er að finna staði á hinum eldri svæðum landsins þar sem hægt er að safna mörgum stefnumældum borkjarnasýnum með stuttu millibili upp í



Mynd 3. Söfnunarstaðir borsýna í Stampahrauni á Reykjanesi. A: fjörुकlettur, B: hraunstál, C: aðfærslugangur hraunsins og D: hraunstál. Sjá einnig Töflu 5. Myndin er hluti stærra jarðfræðikorts (Sæmundsson, 1995).

gegnum heilt hraunlag eða syrpu þunnra laga sem eru meira en 10 m að þykkt eða svo. Ýmist eru hlutar opnanna of brattir til þess, of gjallkenndir, eitthvað hreyfðir, eða huldur jarðvegi. Wilson o.fl. (1968) tóku 30 sýni úr 17 metra þykku hraunlagi í Berufirði til bergsegulmælinga. Ef sleppt er einu sýni þar sem e.t.v. var um mistök við söfnunina að ræða, er staðalfrávik stefnanna um 5° .

3.4. Nýjar rannsóknir á segulstefnum í íslenskum hraunlögum, „lóðrétt“

3.4.1. Tvö hraun við Dýrafjörð (~14 millj. ára)

Í hraunlagi TI 5 í Hafnardal við Dýrafjörð (sjá Kristjánsson o.fl., 2003) var safnað 14 sýnum á hallandi sniði sem náði frá 0,3 til 6,3 m hæð frá botni. Þar ofaná voru um 3 m af gjallkenndu efni sem ekki var hægt

að safna úr. Meðal-segulstefnan hafði halla $+56,5^\circ$ og var staðalfrávik $3,8^\circ$. Í lagi TI 3 þar nálægt var safnað 13 sýnum í hæð 0,4-2,1 m og öðrum 13 í hæð 2,3-4,8 m tveim metrum frá. Heildarþykkt hraunsins var 12-15 m að meðtöldu gjalli efst. Halli segulstefnunnar var $+67^\circ$. Um 4° munur var á meðalstefnum þessara tveggja sniðbúta, að mestu í misvísuninni, en staðalfrávik allra 26 sýnanna var $3,6^\circ$.

3.4.2. Flæðieiningar í Eyrarfjalli á Snæfellsnesi (~7 millj. ára)

Hér að ofan var greint frá mælingum á segulstefnum sýna sem er safnað „lóðrétt“ gegnum stök hraun. Einnig má skoða breytingar milli svonefndra „flæðieininga“ (flow units) sem sum hraun eru samsett úr: hafa þá komið margar spýjur hver eftir annarri úr sömu gosrás með stuttu millibili eins og sjá má til dæmis í Surtsey. Þar eð stefna jarðsegulsviðsins hefur á síðustu öldum breyst um nokkrar gráður á öld, er líklegt að flæðieiningar sem til samans spanna aðeins fáein ár ættu allar að kólnað við nokkurnveginn sömu segulstefnuna. Í Eyrarfjalli austan Álftafjarðar á Snæfellsnesi eru þyklar syrur af þunnum flæðieiningum úr ólvinbasalti. Sjá snið HB og HC í grein eftir Kristjánsson og Jóhannesson (1999), aldur þeirra gæti verið um 7-8 milljón ár. Neðst í HC eru nokkrar flæðieiningar með öfuga segulstefnu (sem við köllum hér lag HC 0), en síðan tekur við rétt segulstefna og voru þessi skil notuð við tengingu milli sniðanna. Safnað var sýnum úr fimm einingum í HC 0 og fjórum í laginu HC 1, hvoru um sig á u.þ.b. 15 m hæðarbili. Skil milli eininganna eru ekki alltaf glögg og hefur að líkindum einhverjum verið sleppt úr.

Tafla 7. Segulstefnur í syrurum í Eyrarfjalli á Snæfellsnesi

Eining	n	$D[^\circ]$	$I[^\circ]$	$\theta_{63}[^\circ]$
HC 0	4	195,2	-60,0	3,3
HC 0A	4	197,4	-59,8	1,7
HC 0B	4	189,0	-65,6	2,5
HC 0C	4	193,3	-66,3	2,7
HC 0D	4	185,7	-63,5	2,7
Meðaltal	5	192,3	-63,1	3,3 (2,8° leiðrétt)
HC 1	4	305,7	64,3	2,9
HC 1A	5	299,9	66,5	4,2
HC 1B	4	309,5	69,6	4,1
HC 1C	5	291,4	58,5	3,6
Meðaltal	4	300,7	64,9	5,0 (4,7° leiðrétt)

4. Niðurstöður og samantekt

Safnað hefur verið kjarnasýnum á nokkrum stöðum „lárétt“ og „lóðrétt“ bæði úr eldri Tertier berglögum, hrauni frá hlýskeyði jökultímans sem og nokkrum ferskum hraunum frá Nútíma. Var þar beitt vinnubrögðum eins og hefðbundin hafa verið við slíka söfnun en ekki gerðar sérstakar ráðstafanir til að auka nákvæmni. Stefnur varanlegrar segulmögnunar voru mældar í þessum sýnum og staðalfrávik stefnanna innan hvers sýnatökustaðar er lítið bæði í þessum rannsóknnum og öðrum eldri, á bilinu 1° til 5° og langoftast 2° til 4° þótt sýnataka spanni mörg hundruð metra í lárétta stefnu. Ekki sjást þess þá heldur merki að segulstefnan sé að breytast á kerfisbundinn hátt frá öðrum enda sýnatökusvæðisins til hins.

Þessi rannsókn sýnir að staðalfrávik meðalstefna sýna sem tekin eru á mismunandi stöðum úr hrauni, sem er þá mælikvarði á breytileika segulstefnu innan hvers hrauns, er að meðaltali 3° fyrir hraun frá Tertier og um helmingi lægri í hraunum frá Nútíma. Þessi breytileiki er lítill miðaður við önnur frávik og þær breytingar sem verið er að skoða í jarðsviðinu. Þessar niðurstöður sýna að ef vel er gætt að því að engin augljós hreyfing hafi orðið á berginu sem safnað er úr eftir að það kólnaði niður fyrir Curie-hitastig sitt þá er meðalstefna sem fæst frá mælingum sýna frá einum stað úr hrauni dæmigerð fyrir hraunið og því er oftast fullnægjandi að safna sýnum á einum stað úr hverju hrauni. Curie-hitastigið ($100 - 578^\circ\text{C}$) er langt undir þeim mörkum sem bergið er fullstorknað og hætt að síga (um eða yfir 900°C , sjá t.d. Pinkerton (2002)).

Flökt í mældum stefnum upp á 3° er lítið miðað við hið eðlilega flökt jarðsegulsviðsins á Íslandi á Tertiertíma. Staðalfrávik sviðstefnanna frá meðaltali sínu (eftir að „öfugum“ segulstefnum hefur verið snúið við) í hraunasyrurum hér sem spanna fáeinir milljónir ára hver, er almennt yfir 20° (Kristjánsson, 2002). Það má því draga þá ályktun af niðurstöðunum, að skekkjuvaldar á borð við staðbundin segulsviðsfrávik hafi ekki afgerandi áhrif til að breyta segulstefnum í hraunlögum frá því sem orsakast hefur af rafstraumum í jarðkjarnanum. Áhyggjur sem sumir hafa lýst yfir í því sambandi (t.d. Baag o.fl., 1995) virðast byggðar á ýktum forsendum. Þess er að gæta hér, að öll hraunin sem könnuð voru, voru flest með algengar og mikið hallandi segulstefnur, og þokkalegan styrk segulmögnunar. Vel er hugsanlegt að meira flökt reynist vera milli staða en hér hefur komið fram, ef safnað væri úr hraun-

lögum sem hafa runnið þegar jarðsegulsviðið hér var dauft og nálægt láréttri stefnu. Þau hraun eru hinsvegar tiltölulega fá, og er því leitun að víðáttumiklum opnum í einhver þeirra.

Breytileikinn í mældum segulstefnum yngstu hraunanna (staðalfrávik að jafnaði $0 - 3^\circ$) reynist það lítil að þau eru einstaklega góður efniviður til að rekja sögu segulsviðs jarðar á Nútíma (sjá t.d. Auðunsson, 1992). Hraunin sem könnuð voru hafa öll stutta kólnunarsögu miðað við hraða breytinga í segulsviðinu, þannig að þykkt laganna skiptir hér óverulegu máli (t.d. Auðunsson og Levi, 1997). Þekkt er að gerð og efnasamsetning segulsteindanna innan hraunlags er háð hæð þeirra innan lagsins (t.d. Auðunsson o.fl., 1992) og þess vegna var reynt að safna sýnum á sem ólíkustum stöðum úr hverju lagi til að fá fram sem mestan mögulegan mun í segulstefnum, en svo virðist sem þessi áhrif séu hverfandi lítil.

Það er niðurstaða þessarar rannsóknar, að basalt-hraunlög á Íslandi eru að jafnaði mjög góður efniviður fyrir mælingar á segulstefnum. Horn-staðalfrávik er að meðaltali um eða innan við 3° , hvort sem fjallað er um dreifingu stefna innan eins sýnatökustaðar eða innan heils hraunlags.

Þakkir: Vísindasjóður studdi þessar rannsóknir að hluta með styrkveitingu 2001.

Heimildir

- Auðunsson, H., 1992. Segulsviðið á Íslandi á Þjóðveldisöld (The geomagnetic field in Iceland in the period 1000 AD-1200 AD). Í: Ágrip erinda á vörðstefnu Jarðfræðafélags Íslands 1992.
- Auðunsson, H., S. Levi og F. Hodges, 1992. Magnetic property zonation in a thick lava flow. *J. Geophys. Res.* 97, 4349-4360.
- Auðunsson, H. og S. Levi, 1997. Geomagnetic fluctuations during a polarity transition. *J. Geophys. Res.* 102, 20259-20268.
- Baag, C., C.E. Helsley, S. Xu og B.R. Lienert, 1995. Deflection of paleomagnetic directions due to magnetization of the underlying terrain. *J. Geophys. Res.* 100, 10013-10027.
- Doell, R.R., 1972. Palaeomagnetic studies of Icelandic lava flows. *Geoph. J. R. Astr. Soc.* 26, 459-479.
- Fisher, R., 1953. Dispersion on a sphere. *Proc. R. Soc.* A217, 295-305.
- Glatzmaier G.A. og P.H. Roberts, 1995. A three-dimensional convective dynamo solution with rotating and finitely conducting inner core and mantle. *Phys. Earth Planet. Int.* 91, 63-75.
- Hagstrum, J. og D.E. Champion, 1994. Paleomagnetic correlation of Late Quaternary lava flows in the lower east rift zone of Kilauea volcano, Hawaii. *J. Geophys. Res.* 99, 21679-21690.
- Jónsson, G. og L. Kristjánsson, 1991. *Náttúrufr.* 61, 47-55.
- Knudsen, M.F., B.H. Jacobsen og N. Abrahamsen, 2003. Paleomagnetic distortion modelling and possible recovery by inversion. *Phys. Earth Planet. Int.* 135, 55-73.
- Kristjánsson, L., 1993. Investigations on geomagnetic reversals in Icelandic lavas, 1953-78. *Terra Nova* 5, 6-12.
- Kristjánsson, L., 1995. Misvísun áttavita á Íslandi - sögulegt yfirlit. *Jökull* 43, 45-60.
- Kristjánsson, L., 2002. Estimating properties of the paleomagnetic field from Icelandic lavas. *Phys. Chem. Earth* 27, 1205-1213.
- Kristjánsson, L. og M. Sigurgeirsson, 1993. The R3-N3 and R5-N5 palaeomagnetic transition zones in Iceland revisited. *J. Geomag. Geoelect.* 45, 275-288.
- Kristjánsson, L., B.S. Hardarson og H. Auðunsson, 2003. A detailed palaeomagnetic study of the oldest (ca. 15 Myr) lava sequences in Northwest Iceland. *Geophys. J. Int.* 155, 991-1005.
- Kristjánsson, L. og H. Jóhannesson, 1999. Secular variation and reversals in a composite 2.5 km lava section in central western Iceland. *Earth, Planets and Space* 51, 261-276.
- Merrill, R.T. og M.W. McElhinny, 1983. *The Earth's Magnetic Field: Its History, Origin and Planetary Perspective.* Academic Press, New York, NY, 401 bls.
- Pinkerton, H., M. James og A. Jones, 2002. Surface temperature measurements of active lava flow on Kilauea volcano, Hawaii. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 113, 159-176.
- Roberts, P. H. og H. D. Ursell, 1960. Random walk on a sphere and on a Riemannian manifold. *Phil. Trans. R. Soc.* A252, 317-356.
- Sigurgeirsson, M.Á., 1995. Yngra-Stampagosið á Reykjanesi. *Náttúrufr.* 64, 211-230.
- Sæmundsson, K., 1995. Jarðfræðikort af Svartsengi, Eldvörpum og Reykjanesi (berggrunnur), 1:25.000. Orkustofnun, Hitaveita Suðurnesja og Landmælingar Íslands.
- Tanguy, J.-C., C. Principe og A. Simone, 2005. Comment on "Historical measurements of the Earth's magnetic field compared with remanence directions from lava flows in Italy over the last four centuries" by R. Lanza, A. Meloni, and E. Tema. *Phys. Earth Planet. Int.* 152, 116-120.
- Wilson, R.L., S.E. Haggerty og N.D. Watkins, 1968. Variation of palaeomagnetic stability and other parameters in a vertical traverse of a single Icelandic lava. *Geophys. J. R. Astr. Soc.* 16, 79-96.

Summary: Various natural disturbances can affect the measured direction of remanent magnetization in geological formations. These disturbances are

of concern when using the directions to infer information about the source and behavior of the geomagnetic field, as well as in more applied geological work. For volcanic formations like lavas one source of disturbance is anomalous magnetic fields caused by strongly magnetized formations at depth, which may affect the magnetization vector acquired during their initial cooling. In order to ascertain the effect of these disturbances we measured the variability of magnetic directions in lavas, both within single outcrops and laterally by comparing directions from several outcrops of the same lava. The lavas we sampled are of different ages, from the oldest lavas in Iceland (16 my) to historical. Samples were collected by the conventional method used in paleomagnetism: drillcores 2,5 cm in diameter drilled 5 to 10 cm into the rock and then demagnetized in an alternating field. The material we used was magnetically stable and had little, if any, secondary remanence, e.g. viscous remanence. Variations within single outcrops were between 1° and 5° and most often between 2° and 4° , as measured by the angular standard deviation. We

sampled several outcrops from individual lavas separated by from tens of meters to several kilometers. After correction for within-site variations, the between-site angular standard deviation was on average 3° for the older lavas from Tertiary and only half this value for the younger postglacial and historic lavas. These values are small compared to natural fluctuations in the main geomagnetic field (originating in the Earth's core); our study hence confirms that the measured directions of remanent magnetization in lavas from Iceland provide accurate readings of the main field. Also, a single judiciously selected outcrop represents sufficiently well the true remanent direction of a lava.

Um höfundana: Leó Kristjánsson er jarðeðlisfræðingur við Jarðvísindastofnun Háskólans. Haraldur Auðunsson er dósent við tækni- og verkfræðideild Háskólans í Reykjavík.

Tækni- og verkfræðideild Háskólans í Reykjavík,
Kringlan 1, 103 Reykjavík, haraldura@ru.is
Jarðvísindastofnun Háskólans, Háskóla Íslands,
Askja, Sturlugötu 7, 101 Reykjavík, leo@raunvis.hi.is

Móttekin: 12. desember 2006