

NÁTTÚRA MÝVATNS

Arnþór Garðarsson
og Árni Einarsson
ritstjórar

Hið íslenska náttúrufræðifélag
Reykjavík 1991

2.

Umbrotin við Kröflu 1975–89

Páll Einarsson

Umbrotin sem hófust í Þingeyjarsýslum 1975 eru umfangsmestu jarðsögulegir atburðir á Íslandi á þessari öld. Ummerki atburðanna eru sýnileg á mjórri ræmu lands, um 70 km langri, sem nær frá Hverfjalli í Mývatnssveit til sjávar í Öxarfirði. Mælanleg ummerki ná yfir miklu stærra svæði, a.m.k. 60 km breitt og 90 km langt. Jarðskorpan hefur gliðnað, gjár opnast, misgengi hrokkið til, land risið og sigið á stórum svæðum, bergkvika myndað ganga og eldgos hafa orðið 9 sinnum fram til þessa. Þessu hafa fylgt jarðskjálftar, stundum svo miklir að tjón hefur hlotist af.

Umbrotin eru bundin við eldstöðvakerfi, sem kennt er við Kröflu,^{217,219} og þversprungubelti sem tengist því í Öxarfirði.^{281,299} Kröflukerfið er eitt fimm eldstöðvakerfa, sem til samans mynda gosbeltið á Norðurlandi. Hvert kerfi hefur eina megineldstöð, sem það er kennt við, og í gegnum hana liggur sprungusveimur með NNA–SSV stefnu. Frá Kröflu liggur sprungusveimur til suðurs um Bjarnarflag í Mývatnssveit, allt suður að Sellandafjalli. Suðurhluti þessa svæðis hefur ekki enn orðið fyrir áhrifum umbrotanna. Til norðurs frá Kröflu liggur sprungusveimurinn um Gjástykki allt norður í Kelduhverfi og út í Öxarfjörð. Úti í firðinum tengist sprungusveimurinn þversprungubelti, sem liggur þaðan til norðvesturs í átt til Grímseyjar, og er það gjarnan við hana kennt. Allur norðurhluti sprungusveimsins og austurhluti Grímseyjarbeltisins hafa átt hlut í umbrotunum. Raunar hefur vesturhluti Grímseyjarbeltisins einnig verið talsvert virkur á sama tímabili, en ekki hefur enn verið hægt að sýna fram á bein tengsl þeirrar virkni við atburði á Kröflusvæðinu.

Megineldstöðin við Kröflu er eins konar nafla atburðanna (mynd 2–2). Jarðskorpuhreyfingar og skjálftavirkni hafa verið þar viðvarandi frá upphafi þeirra um

Mynd 2–1. Kvikustrókur í Gjástykki 31. janúar 1981.

mitt ár 1975, þó að fáein hlé hafi orðið nokkra mánuði í senn síðan 1985 (mynd 2–3). Annars staðar á umbrotasvæðinu hafa atburðirnir verið bundnir við einstakar umbrotahrinur, sem staðið hafa frá fáeinum klukkutímum upp í tvo mánuði. Hæðarbreytingar og jarðskjálftar við Leirhnjúk benda til þess að þar sé kvikuhólf undir á um 3 km dýpi.^{29,85,33} Deyfing skjálftabylgna sem fara um svæðið bendir til hins sama, og sýnir að kvikumassinn er talsvert umfangsmikill.²⁸⁸ Askja sem umlykur svæðið sýnir að einhvern tíma í fyrndinni hefur tæmst kvikuhólf á svipuðum slóðum og það sem nú er virkt. Ekki hafa öskjumisgengin haggast sjáanlega í yfirstandandi umbrotum, þótt ef til vill hafi ekki munað miklu að svo yrði í janúar 1976.

Gosbeltið á Norðurlandi er hluti af miklu umbrotasvæði sem skilur að tvo af stærstu jarðskorpuflekum jarðarinnar, Evrasíuflekann og Norðuramerikuflekann. Umbrot á flekaskilunum eru flest tengd hreyfingu flekanna hvors frá öðrum. Afstað rekstefna þeirra hér á Íslandi er 10–15° norðan við vestur (eða sunnan við austur), og rekhraði er að meðaltali um 2 cm á ári.³⁵⁷ Þetta þýðir að vesturhluti Norðurlands hreyfist að jafnaði með þessum hraða til vesturs miðað við Norðausturland, t.d. Vopnafjörð. Við þetta toggar jafnt og þétt á jarðskorpunni sem á milli liggur. Á 100–200 ára fresti rifnar skorpan, annaðhvort vegna þess að togspenna er orðin of há, eða að kvikuþrýstingur í skorpunni eða undir henni stuðlar að því að rífa hana. Einhver sprungusveimurinn gliðnar, barmar hans færast í sundur, og það slaknar á togspennunni í flekunum til beggja handa.

Sums staðar beygja flekaskilin til vinstri eða hægri, og liggja þannig samsíða rekstefnunni. Þar á sér ekki stað gliðnun, heldur núast flekarnir saman á jöðrunum. Á slíkum þverbeltum getur hlaðist upp mikil spenna, sem losnar um í stórum skjálftum. Grímseyjarbeltið er einmitt hluti af skjálftasvæði af því tagi. Kröfluumbrotin hafa því ekki verið bundin við megineldstöðina. Gefist hefur tækifæri til að fylgjast með samspili eldstöðvarinnar við gliðnun á flekaskilum og hliðrun á þverbelti. Aldrei áður hefur vísindamönnum gefist kostur á annarri eins lexíu í því hvernig jarðskorpan hagar sér á flekaskilum.

Í þessum kafla verður rakin atburðarás í Kröfluumbrotunum og leitast við að skýra hana í ljósi þess sem vitað er um jarðfræðilega umgjörð þeirra. Lýst verður helstu mælingum og mæliaðferðum sem beitt hefur verið við rannsókn atburðanna. Mæligögn og atburðarás eru síðan túlkuð í ljósi kvikuhlaupskenningarinnar, en samkvæmt henni stendur gliðnun á sprungusveimnum í beinu sambandi við færslu kviku lárétt út eftir sprungusveimnum frá kvikuhólfinu undir Leirhnjúki. Ekki er þessi kenning alveg óumdeild og verður reynt að gera mótbárum skil. Sagt er frá eftirliti og vöktun, sem tók drjúgan skerf af tíma vísindamanna meðan á umbrotunum stóð. Þá er talið upp helsta tjón sem af umbrotunum hefur hlotist.

ATBURÐARÁS

Aðdragandi

Fyrstu vísbendingar um að eitthvað óvenjulegt væri á seyði í Mývatnssveit bárust frá skjálftamælum, sem settir voru upp á Norðurlandi haustið 1974 og sumarið 1975. Þegar fyrstu gögn frá mælunum voru tekin saman og upptök skjálfta staðsett,

kom
þröng
svæði
uppby
var se
næstu
virkni
þá við
bætt v
Ýmsa
þrýsti
legu þ
rás, þ

Atbur
Eftir
Klukk
ugur o
braust
gasrík
leir- o
leirgo
virkni
Símal
glösur
Kröflu
ur eft
Nóttir
Anna
Öxarf
svæðu
ekki s
urðu þ
þeir 5
marki
hann
viða u
tjóni á
Mik
Kröflu
legt s
sprung
hreyfi
Keldu
fjarða

kom í ljós að talsverður hluti þeirra átti upptök á Kröflusvæðinu, á tiltölulega þröngu svæði umhverfis Leirhnjúk. Fram til þessa hafði ekki verið litið á Mývatnssvæðið sem sérstaklega skjálftavirkt svæði. Í framhaldi af þessu var áætlun um uppbyggingu mælanetsins breytt, og ákveðið að setja mæli í Mývatnssveit. Hann var settur upp í Reynihlíð í júlí 1975.³⁰⁵ Á hann mældist nokkuð stöðug virkni næstu mánuðina, um 10–15 kippir á sólarhring. Þegar leið að hausti var ljóst að virknin var meiri en áður var vitað um og ekki væri allt með felldu. Kippir fundust þá við og við í sveitinni, þeir stærstu upp undir 4 stig á Richterskvarða. Var þá bætt við tveimur skjálftamælum, öðrum við Kröfluvirkjun en hinum í Gæsadal.⁷⁷ Ýmsar tilgátur voru uppi um það hvað ylli þessari skjálftavirkni. Nefndar voru þrýstingsbreytingar í kvikuhólfi, gliðnun á sprungusveimnum og hliðrun á hugsanlegu þvergeni. Ekki grunaði menn að þetta væri upphaf að meiri háttar atburðarás, þar sem allar þessar hugmyndir ættu eftir að verða að veruleika.

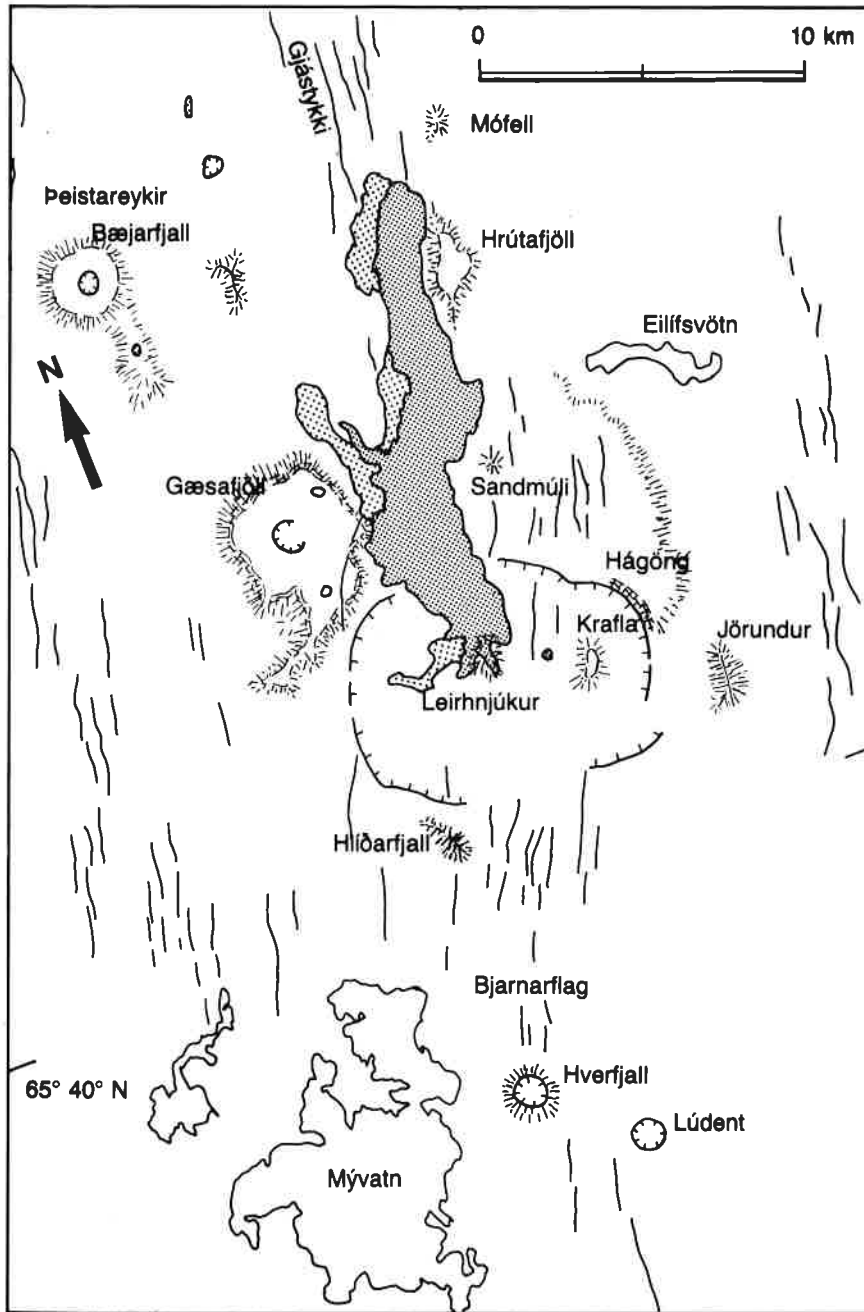
Atburðirnir í desember 1975 – mars 1976

Eftir þennan rólega aðdraganda urðu snögg og afgerandi þáttaskil 20. desember. Klukkan 10:17 hófst skjálftahrina á Kröflusvæðinu og fylgdi henni mikill og stöðugur órói, sem sást á skjálftamælum víða um land.²⁷⁴ Um fimmtán mínútum síðar braust út eldgos á stuttri sprungu við Leirhnjúk.^{261,262} Þunnfljótandi og ákaflega gasríkt basalthraun flæddi upp úr sprungunni á nokkrum stöðum, en á öðrum varð leir- og vatnsgos. Gosið stóð stutt. Hraun hætti að renna skömmu eftir hádegið og leirgos hættu á næstu tveimur sólarhringum. Öðru máli gegndi um skjálftavirknina. Stöðugur órói hélt áfram og var svo mikill að hann fannst í Mývatnssveit. Símalínur sveifluðust stöðugt og greina mátti látlausan titring á yfirborði í vatnsglösum. Jarðskjálftakippir voru tíðir og voru upptök þeirra í fyrstu bundin við Kröflusvæðið. Fljótlega urðu einnig kippir á sprungusveimnum til suðurs, og norður eftir Gjástykki. Upp úr hádegi var skjálftavirknin komin norður í Kelduhverfi. Nóttina eftir ágerðust skjálftar og voru eftir það á tveimur aðskildum svæðum. Annað svæðið var umhverfis Leirhnjúk en hitt í Kelduhverfi, og teygði það sig út í Öxarfjörð, fyrst til norðurs en síðan til norðvesturs (sjá mynd 2–3).³¹ Á báðum svæðunum hélt virkni áfram fram í miðjan mars. Framan af voru kippir tíðir en ekki sérlega stórir. Þegar á leið, tók að líða lengra á milli skjálfta, en jafnframt urðu þeir stærri.²⁹⁹ Stærstu skjálftar á Kröflusvæðinu urðu 6. og 19. janúar og náðu þeir 5 stigum á Richterskvarða. Á Öxarfjarðarsvæðinu náðu skjálftar einnig hámarki um miðbik janúar. Stærsti skjálftinn varð 13. janúar kl. 13:29 og mældist hann 6,5 á Richterskvarða samkvæmt yfirborðsbylgjum, sem komu fram á mælum víða um heim. Hann fannst víða um norðan- og austanvert landið og olli talsverðu tjóni á Kópaskeri og nágrenni eins og síðar verður lýst.

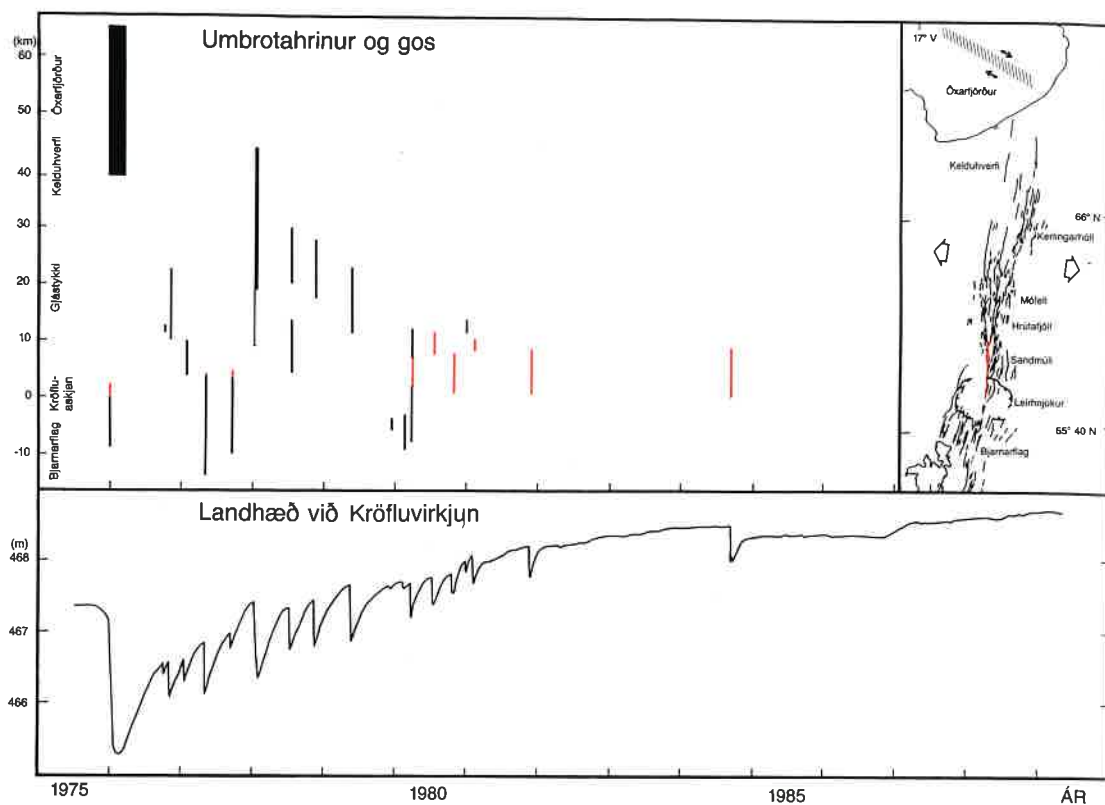
Miklar landslagsbreytingar urðu í þessum atburðum. Sigskál myndaðist á Kröflusvæðinu, með miðju við Leirhnjúk. Þar seig landið meira en 2 m, en mælanlegt sig náði allt niður í Mývatnssveit.³⁶ Sprungur höggudust og gliðnuðu á sprungusveimnum norður í Öxarfjörð og suður í Mývatnssveit. Langmestar voru hreyfingarnar á skjálftasvæðunum tveimur, þ. e. innan Kröfluöskjunnar og í Kelduhverfi. Dýptarmælingar bentu til að verulegt rask hefði orðið á botni Öxarfjarðar, en erfitt var að meta hversu mikið það var.³¹⁶ Í Kelduhverfi opnuðust



My
vin
í se
sva
ken
eld



Mynd 2-2. Yfirlitskort af Kröflusvæðinu, Mývatnssveit og nánasta umhverfi. Til vinstri er mynd tekin úr gervitungli með hitanæmum skynjara skömmu eftir eldgosið í september 1984. Rauði liturinn táknar heitt yfirborð s.s. nýrunnið hraun, jarðhitasvæði eða sólskinsbletti. Til hægri er kort í sama mælikvarða, sem sýnir helstu kennileiti og örnefni, hraun frá gosinu 1984 og eldri hraun Kröfluelda. Askja Kröflueldstöðvarinnar og helstu sprungusveimar eru greinanleg á myndinni og kortinu.



Mynd 2-3. Atburðarás Kröfluumbrotanna í hnotskurn. Neðri hluti myndarinnar sýnir landhæð á mælipunkti innan Kröfluöskjunnar. Þar má sjá hvernig land sígur hratt í umbrotahrinum en rís þess á milli. Mæligögnin eru frá Orkustofnun. Efri hluti myndarinnar sýnir hvar umbrotasvæði voru í hverri hrinu. Svartar rákir tákna skjálftahrinur, rauðar rákir eldgos. Lóðrétti ásinn táknað fjarlægð frá miðju öskjunnar. Yfirlitskortid til hægri er í sama mælikvarða. Þar eru sýndar sprungur og misgengi sem telja má til sprungusveims Kröflu,²¹⁸ rekstefnur flekanna báðum megin við hann, skjálftasvæðið í Óxarfirði og hreyfingarstefnur í jarðskjálftanum 13. janúar 1976.³⁰⁰

sprungur í þjóðveginn milli Lindarbrekku og Tóveggjar og lágu þær út á sandana til norðurs.^{82,83} Heildargliðnun þarna var metin 1,0–1,5 m. Jafnframt var landsig innna sprungusveimsins metið um 1 m. Í Gjástykki sáust ummerki eftir hreyfingar en þær voru óverulegar.

Stóri skjálftinn 13. janúar kom fram á mörgum skjálftamælum víða um heim. Út frá þeim mælingum má ákvarða hvers konar jarðskorpuhreyfingar voru honum samfara. Sýna má fram á að skjálftinn varð vegna hægri hliðrunar um þversprungu með norðvestlæga strikstefnu, þ.e. NA-barmur misgengisins færðist til SA en SV-barmurinn til NV.^{299,300} Skjálftinn varð því vegna sniðgengis en ekki vegna sigs og gliðunar eins og hefði mátt ætla eftir ummerkjum á landi.

Umbrot í Gjástykki haustið 1976 og í janúar 1977. Kvikuhlaupskenningin.

Skjálftavirkni á umbrotasvæðunum minnkaði jafnt og þétt þegar frá leið, og í apríl 1976 var ekkert sem benti til annars en að umbrotum væri að ljúka. Í maí og júní



AR

landhæð á
 rís þess á
 ði voru í
 fjarlægð
 og mis-
 skjálfta-

sandana
 landsig
 eyfingar

heim. Út
 honum
 sprungu
 en SV-
 a sigs og

og í apríl
 í og júní

kom hins vegar í ljós að skjálftavirkni á Kröflusvæðinu minnkaði ekki eins og búast hefði mátt við, heldur var hún tekin að aukast á ný.^{276,277,278} Þar við bætist að endurteknar hæðarmælingar sýndu landrís á því svæði sem hafði sigið í umbrotunum um veturinn. Þetta túlkuðu sumir sem merki um vaxandi kvikuþrýsting í hólfi á um 3 km dýpi undir Kröflueldstöðinni,¹²⁵ en sú skoðun var þó talsvert umdeild. Landrís hélt áfram um sumarið og skjálftavirkni óx. Í ágúst var eftirlit stóraukið á svæðinu.^{279,29} Útskrift skjálftamællanna þriggja var komið fyrir á sama stað, þannig að lesa mátti af þeim samtímis. Komið var fyrir hallamæli í stöðvarhúsi Kröfluvirkjunar til þess að fylgjast mætti með landrís frá degi til dags. Fylgst var reglulega með sprunguhreyfingum, hveravirkni, hitastigi í jarðvegi, gasústreymi og fleiru.

Í seinni hluta september var skjálftavirkni komin yfir 100 kippi á sólarhring, og land hafði risið sem nam helmingi sigsins um veturinn. En þá gerðust undur.²⁸⁰ Skjálftar hættu svo að segja alveg. Jafnframt sýndi hallamælirinn í stöðvarhúsinu að land seig með nokkrum hraða, sem benti til þess að kvikuþrýstingur færi nú minnkandi. Þetta olli jarðfræðingum talsverðum heilabrotum, því að ekki fundust greinileg merki um það hvert kvikan gæti verið að leita. Svárið kom þegar lesin voru saman línurit nokkurra skjálftamæla. Þá kom í ljós að siginu fylgdi stöðugur órói eins og sá sem fylgir gjarnan hröðu kvikustreymi. Jafnframt kom fram hrina lítilla skjálfta með upptök við Hnútafjöll í Gjástykki. Skjálftar þessir náðu hámarki um svipað leyti og stöðugi óróinn var mestur. Þetta mátti túlka á þann hátt að kvikuhólfið hefði brostið vegna aukins þrýstings, og kvikan hefði leitað neðanjarðar norður eftir Gjástykki, að Hnútafjöllum.

Landrís hófst aftur 4. október að lokinni þessari litlu hrinu. Skjálftavirkni var þó lítil sem engin fyrst í stað. Það er raunar í góðu samræmi við þekkta brotvegðun fastra efna undir álagi. Samkvæmt henni var skjálfta ekki að vænta fyrr en spenna í jarðskorpunni yfir kvikuhólfinu næði fyrra hámarki, þ. e. þegar landhæð yrði sú sama og fyrir sigið. Þetta gekk eftir með ótrúlegri nákvæmni. Hallamælirinn í stöðvarhúsinu benti til þess að landrís hefði náð þeim mörkum 27. október. Skjálftavirkni byrjaði að aukast 20. október og náði hámarki 28. október.

Landrís og skjálftar héldu nú áfram til 31. október, en þá dró aftur til tíðinda.^{165,282} Um klukkan tvö kom í ljós stöðugur órói á skjálftamælum og fór ört vaxandi. Honum fylgdu skjálftar sem áttu upptök á Kröflusvæðinu. Jafnframt sýndi hallamælirinn að hratt sig var hafið. Heldur dró úr óróanum þegar leið að morgni, og skjálftar hættu alveg. Um klukkan 7 hófst síðan áköf skjálftahrina í Gjástykki sem stóð sleitulítið í tvo sólarhringa. Hrinan byrjaði við suðurenda Hnútafjalla en breiddist síðan út til norðurs eftir sprungusveimnum. Á hálfum sólarhring náði skjálftasvæðið 15 km lengd. Sprungur á þessu svæði höggudust um nokkra tugi sentimetra, og fólk sem þarna var á ferð sá mekki stíga upp úr sprungum og fann brennisteinsfýlu.

Öll var atburðarásin í þessari hrinu mjög lík þeirri sem var mánuði fyrr. Atburðirnar voru þó allir meiri og greinilegri, órói öflugri, skjálftar stærri, landsig og sighraði meiri. Þá varð tilfærsla skjálftaupptakanna frekar til að styðja hugmyndir um lárétta kvikuflutninga norður eftir Gjástykki. Einnig þótti líklegt að munurinn á þessum hrinum og fyrstu hrinunni veturinn áður væri aðeins stigsmunur en ekki

eðlismunur. Fyrirbrigðið hlaut nafnið kvikuhlaup vegna nokkurrar samlíkingar við jökulhlaup. Smám saman dró úr sighraða á Kröflusvæðinu, og 2. nóvember byrjaði land að rísa á ný.

Nú fór í hönd atburðarás sem var býsna nákvæm eftirlíking af því sem á undan var gengið. Skjálftavirkni var lítil sem engin, þangað til land náði sömu hæð og var fyrir síðustu hrinu. Þá jókst virknin skyndilega og var í hámarki í nokkra daga meðan land reis umfram fyrri mörk. Ný hrina brast síðan á 20. janúar 1977.²⁸³

Hrinan hófst með óróa og hröðu sigi rétt eftir miðnættið. Skömmu síðar byrjaði ákóf skjálftahrina syðst í Gjástykki, milli Gæsafjalla og Sandmúla. Þar gliðnuðu sprungur mikið þennan dag, samtals um 1 m. Stærstu skjálftarnir voru stærri en 4 á Richterskvarða, nokkru stærri en í októberhrinunni. Mjög dró úr sigi og skjálftum þegar leið að kvöldi, og 22. janúar var land á Kröflusvæðinu aftur farið að rísa. Skjálftar voru nánast engir næstu vikurnar.

Nokkur jarðhiti kom fram í sunnanverðu Gjástykki í kjölfar hrinanna þriggja þennan vetur. Gufa steig upp frá nokkrum afmörkuðum svæðum, nyrst á móts við Hrutafjöll, syðst við Éthól. Líklega stafaði jarðhitinn af því að grunnvatn komst í snertingu við ganga sem urðu til í sprungusveimnum við kvikuhlaupin.

Umbrot í Bjarnarflagi í apríl og september 1977 og smágos norðan Leirhnjúks

Eins og búist var við, jókst skjálftavirkni á Kröflusvæðinu þegar landhæð náði fyrri mörkum, en það varð um mánaðamótin febrúar–mars 1977.²⁸⁴ Liðu nú næstum tveir mánuðir með áframhaldandi risi og talsverðum skjálftum. Greinilegt var að veggir kvikuhólfsins þoldu nú mun meiri umframþrýsting en áður, og kvika átti ekki lengur eins greiða leið norður í Gjástykki. Fóru menn þá að velta alvarlega fyrir sér þeim möguleika að kvikuhlaup yrðu til suðurs, með hugsanlegu gosi í Mývatnssveit.

Til tíðinda dró 27. apríl, skömmu eftir hádegi.^{285,263} Órói kom fram á skjálftamælum kl. 13:17 og óx hann ört. Þessu fylgdu skjálftar og hratt landsig, sem varð brátt hraðara en menn höfðu áður séð. Það varð því fljótlega ljóst að atburðirnir yrðu með stærra sniði en í undangengnum hrinum. Þegar líða tók á daginn ágerðust skjálftar mjög og færðust jafnframt til suðurs í átt til Bjarnarflags. Í nokkra klukkutíma fannst stöðugur hristingur í Mývatnssveit, en rólega var við Kröflu. Snarpasta skjálftahrinan stóð frá kl. 17:50 og fram yfir miðnætti og voru stærstu kippir tæplega 4 á Richterskvarða. Jafnframt byrjuðu gjár og sprungur við Bjarnarflag að gliðna, og hélt sú hreyfing áfram næstu daga. Sprungusveimurinn víkkaði þar um 2 m og miðbik hans seig um 1 m. Sprungur gengu líka mikið til við Leirhnjúk.

Veður var fremur slæmt þennan dag, og sást því ekki til atburða á Kröflusvæðinu sjálfu. Með hríðinni barst dökkt dust, og var því talið að uppi væri eldgos. Næsta dag kom í ljós að gosið hafði á tveimur stöðum norðan Leirhnjúks. Syðri gosstöðvarnar voru nálægt norðurenda sprungunnar sem gaus 20. desember 1975. Þarna kom mest upp leir og gufa, en einnig nokkurt gjall. Nokkru norðar, við öskjubarminn, kom upp svolítið hraun (sjá bls. 86). Rúmmál gosefna var óverulegt og það er alveg ljóst að mestur hluti kvikunnar, sem fór úr þró eldstöðvarinn-

ar, hljóp
Alls var

Landri
með. Sm
ust mörg
ágúst má
fundust
Grunnva
smáskjál

Óvissu
þróna ur
þróarinn
halla, þr
og skjálft
urinn í k
mánuðir
yrðu í n
hveravir
sprengin
stöðvarh
hallabrey

Ný um
Óróanum
vegna ór
brún ösk
hallamæl
gliðnuðu
Skömmu
skjálftav
úr gosinu
22:40, og
næsta m
þrjú ton
hana. Þe
miðnætti
Kröflusv

Sprung
unnar va
rask. Í h
vegir ófa
sprungu
haggadís
Gosið n
og heild
virkni í

ar, hljóp suður í sprungusveiminn undir Bjarnarflagi, allt suður undir Hverfjall. Alls var umbrotasvæðið um 17 km langt.

Landris hófst aftur á Kröflusvæðinu 29. apríl og var nokkuð hratt til að byrja með. Smáskjálftavirkni hélt áfram í Bjarnarflagi fram á sumar. Fyrst í stað mældust mörg þúsund smákipir á sólarhring, en jafnt og þétt dró úr virkninni, og í ágúst mældust fáeinir tugir á sólarhring.²⁸⁶ Þessir skjálftar voru mjög smáir og fundust lítið sem ekki. Jarðhiti jókst gífurlega í Bjarnarflagi eftir þessa hrinu. Grunnvatn virtist eiga greiða leið að ganginum til að kæla hann. Ef til vill stóðu smáskjálftarnir í sambandi við vatnskælingu og stuðlamyndun í ganginum.

Óvissa var nú nokkur um framvindu atburða. Landris sýndi að kvika safnaðist í þróna undir Leirhnjúkssvæðinu, en vegna sprunguhreyfinga og höggunar í þaki þróarinnar í aprílhrinunni var nú ekki sama samband og áður á milli landhæðar, halla, þrýstings í þrónni og skjálfta í þróarpakinu. Hallamælirinn í stöðvarhúsinu og skjálftavirkni gátu því ekki gefið örugga vísbendingu um það, hvenær þrýstingurinn í kvikuhólfinu færi yfir hættumörk. Ljóst var þó að ekki mundu líða margir mánuðir þangað til aftur drægi til tíðinda. Þá þótti einnig líklegt að næstu atburðir yrðu í nágrenni öskjunnar eða jafnvel innan hennar.²⁸⁶ Landrisinu fylgdi aukin hveravirkni á Leirhnjúkssvæðinu. Myndaðist þá meðal annars hverinn Nína með sprengingu í norðanverðum Leirhnjúk. Settur var upp síritandi hallamælir við stöðvarhús Kröfluvirkjunar³⁴⁶ og var eftir það hægt að fylgjast jafnóðum með hallabreytingum.

Ný umbrotahrina hófst 8. september 1977 kl. 15:47 með óróa og hröðu sigi.⁶² Óróanum fylgdu skjálftar innan öskjunnar, en ekki er unnt að staðsetja þá nánar vegna óróans. Um klukkan 18 hófst hraungos á 900 m langri sprungu við norðurbrún öskjunnar.^{263,166,167} Ekki virtist þetta hafa nein teljandi áhrif á óróann, en hallamælirinn sýndi óreglu í siginu um það leyti sem gosið kom upp.^{88,124} Sprungur gliðnuðu til suðurs og byrjuðu að opnast í Leirhnjúk 20 mínútum eftir gosbyrjun. Skömmu eftir kl. 20 fór að draga úr ákafa gossins, og um sama leyti varð ljóst að skjálftavirknin færðist suður úr öskjunni, í átt til Bjarnarflags.²⁸⁷ Jafnt og þétt dró úr gosinu og lauk því um kl. 22:30. Í Bjarnarflagi fóru sprungur að hreyfast um kl. 22:40, og um klukkustund síðar sáust rauðir blossom á jarðhitasvæðinu. Þegar birti næsta morgun kom í ljós að dálítið eldgos hafði orðið í Bjarnarflagi.^{130,32} Tvö til þrjú tonn af kviku höfðu þeyst upp úr borholu og lá dreif af basaltvikri umhverfis hana. Þetta er eina þekkta tilvikið í heiminum af eldgosi upp um borholu. Eftir miðnætti (9. september) tók að draga úr skjálftavirkni í Bjarnarflagi og sighraða á Kröflusvæðinu, og ris hófst að nýju þann dag.

Sprungur hreyfðust mikið í þessari hrinu. Á gosstöðvunum við norðurbrún öskjunnar var hreyfing á einstökum sprungum allt að 1 m, og við Leirhnjúk varð mikið rask. Í hálsunum milli Hlíðarfjalls og Dalfjalls sprakk jörð mikið og urðu jeppavegir ófærir af þeim sökum. Einnig varð þjóðvegurinn um Námaskarð ófær vegna sprunguhreyfinga og tjón varð á mannvirkjum Kísiliðjunnar. Sprungusvæðið sem haggðist var um 13 km langt. Í heild svipar þessari hrinu mjög til aprílhrinunnar. Gosið norðan Leirhnjúks var nokkru meira, kvikuhlaupið til suðurs heldur styttra, og heildarrúmmál kviku minna (sjá bls. 86). Einnig nú varð mikil smáskjálftavirkni í Bjarnarflagi í kjölfar hrinunnar, og jarðhitavirkni jókst enn.

Hrinan mikla í Kelduhverfi í janúar 1978

Eftir septemberhrinuna reis land á Kröflusvæði sleitulítið næstu mánuði. Truflun varð þó 2. nóvember 1977, en þá varð dálítið sig með tilheyrandi óróa. Skjálftar sem fylgdu óróanum voru svo litlir að ekki var unnt að staðsetja þá, og engar sprunguhreyfingar fundust. Það er því óljóst hvert kvika fór í þessu smáhlaupi, en mestar líkur eru á að hún hafi farið stuttan spöl til norðurs. Landris hélt að þessu loknu áfram, en þegar líða tók á desember dró talsvert úr rishraðanum. Í fyrstu viku janúar 1978 var ris orðið mjög hægt og óreglulegt, en 6. janúar tók atburðarásin nýja stefnu.

Atburðirnir hófust um kl. 18 með hægu landsigi á Kröflusvæðinu.^{289,290} Sighraði óx ekki verulega fyrr en að morgni 7. janúar, og þá sást einnig órói á skjálftamælum. Litlir skjálftar sem fylgdu óróanum áttu upptök í norðurhluta öskjunnar eða norðan hennar, svo greinilegt var að kvikuhlaup stefndi til norðurs. Þegar leið á daginn minnkaði óróinn nokkuð en sighraði breyttist lítið. Skjálftar færðust norður eftir Gjástykki, voru komnir skammt norður fyrir Hrutafjöll kl. 13 en voru enn litlir. Þarna varð hins vegar merkilegt frávik frá venjulegri hegðun. Skjálftavirkni færðist nú til norðvesturs í stað þess að halda áfram eftir sprungusveimnum. Virtist virknin stefna á Húsavíkurmisgengin. Ekki var þó alvara í þessu hliðarspori, því að brátt fór virknin áfram norður eftir Gjástykki og ágerðist mjög eftir miðnætti 8. janúar. Sprungur opnuðust um morguninn milli Mófells og Kerlingarhóls. Skjálftahrinan færðist áfram norður í Kelduhverfi og urðu skjálftar stærri, en strjáll. Stærstu kippirnir urðu 10.–11. janúar, 4,6 á Richterskvarða. Eftir það dró smám saman úr virkni. Kyrrð komst ekki á í Kelduhverfi fyrr en um miðjan febrúar.

Meginvirkni hrinunnar náði frá Mófelli í suðri og skammt norður fyrir Þjóðveg í Kelduhverfi í norðri. Á þessu svæði varð gríðarlegt rask. Miklar gjár opnuðust í Kelduhverfi, við Lyngás og fleiri bæi. Tilkomumestar eru vafalaust gjárnar skammt sunnan við Hlíðargerði. Þar myndaðist mikill sigdalur. Gliðnun á sprungusvæðinu milli Lindarbrekku og Tóveggjar mældist meiri en 2,5 m.²⁶⁵

Landsig á Kröflusvæði hætti að mestu 25. janúar og hafði þá Leirhnjúkssvæðið sigið rúman metra. Hvað rúmmál kviku snertir, er þetta því önnur stærsta hrinan í Kröfluumbrotunum til þessa. Einungis fyrsta hrinan var stærri.

Umbrot í Gjástykki í júlí og nóvember 1978 og maí 1979

Landris hófst aftur á Kröflusvæðinu í lok janúar 1978 og var fremur hratt fram í byrjun júní. Þá hægði nokkuð á, enda nálgadist landhæð fyrri mörk. Skjálftar voru nánast engir, og ekki við þeim búist, því að þróarþakið hafði brotnað mjög og aflagast í hrinunum árið áður.

Hægt sig kom fram á hallamælinum við Kröflu 10. júlí, um hádegisd.²⁰⁷ Sighraðinn óx þegar leið á daginn, og stuttu fyrir kl. 17 kom órói fram á skjálftamælum. Var þá ekki um að villast, að kvikuhlaup væri hafið. Jarðskjálftar bentu til þess að hlaupið stefndi til norðurs. Sighraði náði hámarki um kl. 20 og órói varð einnig mestur um það leyti. Um kl. 22 fór jarðskjálftavirkni að aukast verulega og áttu kippirnir í fyrstu upptök í sunnanverðu Gjástykki, rétt norðan við öskjubrúnina. Virknin færðist síðan næstu þrjár klukkustundirnar norður á móts við norðurenda Hrutafjalla.^{390,302} Þá dró úr skjálftum og stóð hléð í tvo tíma. Eftir það jókst virkn-

in verule
tök skjál
náði virk
áfram 12

Uppta
langt sk
báðum s
þegar gu

Landr
náði fyr
um innar
óróa.^{208,3}

og stóð
norðan
svæði. L
seinna h

Um m
hrinuna,
samband
ruglaði þ
reis hær

Fyrstu
hætti. Þe
þrónni.

Hann ná
Siginu fy
ágerðust

Eftir það
við suðu
1978 og
meta gli

á Kröflu
Hrinun
inu var á

af kviku
stykki og
undan, þ

Kvika ke
miklu að
Kröfluvi
líklega m

Hrinur í
Eftir ma
eftir land

in verulega aftur og hafði þá færst norður á móts við Mófell. Áfram færðust upp-tök skjálftanna norður eftir sprungusveimnum, allt norður að Kerlingarhóli. Þar náði virknin hámarki milli klukkan 7 og 16 hinn 11. júlí. Talsverð skjálftavirkni hélt áfram 12. júlí en síðan dró verulega úr henni.

Upptakasvæði skjálftanna í þessari hrinu var 25 km langt og tvískipt. Um 4 km langt skjálftalaust svæði var milli Hrótafjalla og Mófells. Sprungur hreyfðust á báðum svæðunum. Á syðra svæðinu gaus upp mikill gufumökkur að morgni 11. júlí þegar gufustreymi frá einu af gufusvæðunum frá haustinu 1976 margfaldaðist.

Landris hófst aftur á Kröflusvæðinu 13. júlí, með venjulegum hætti. Landhæðin náði fyrri mörkum í síðari hluta október og varð þá smávægileg aukning á skjálftum innan öskjunnar. Umbrotahrina hófst 10. nóvember um klukkan 10 með sigi og óróa.^{208,301,85} Kvikuhlaup stefndi í norður. Aðalskjálftahrinan hófst um miðnættið og stóð í tvo sólarhringa áður en hún fór að dvína verulega. Upptakasvæðið var norðan Mófells, um 12 km langt. Þéttastir voru skjálftarnir sunnan til á þessu svæði. Landsigið við Leirhnjúk hægði mjög á sér 13. nóvember og tveimur dögum seinna hófst landris að nýju.

Um miðjan mars 1979 var landhæð aftur orðin hin sama og var fyrir nóvember-hrinuna, og jukust þá skjálftar nokkuð. Það var því greinilegt að aftur var komið á samband milli landhæðar og skjálfta, líkt og verið hafði áður en aprílhrinan 1977 ruglaði því. Nú fjölgaði skjálftum jafnt og þétt fram í byrjun maí eftir því sem land reis hærra.

Fyrstu merki um næstu hrinu voru þau að skyndilega dró úr skjálftum og landris hætti. Þetta gerðist 12. maí 1979 og benti til þess að leki væri kominn að kvikuþrónni. Hægt sig byrjaði daginn eftir, og jókst hraðinn þegar á daginn leið.^{291,292} Hann náði hámarki 14. maí, en varð aldrei eins mikill og í undangengnum hrinum. Siginu fylgdi órói blandaður skjálftum, sem áttu upptök í Gjástykki. Skjálftar ágerðust mjög 15. maí, rétt fyrir miðnættið, og var mikil virkni næsta sólarhring. Eftir það dró úr. Skjálftasvæðið var um 12 km langt og var suðurendi þess á móts við suðurenda Hrótafjalla. Það fyllti því upp í eyðuna í skjálftasvæði júlíhrinnar 1978 og gott betur. Á þessu svæði gliðnuðu sprungur mikið, en víða var erfitt að meta gliðnunina vegna rasks. Smám saman dró úr sikhraða og 18. maí byrjaði land á Kröflusvæði að rísa á ný.

Hrinurnar þrjár sem á undan er lýst voru um margt líkar. Landsig á Kröflusvæðinu var álíka mikið í þeim öllum, 60–70 cm. Áætla má að 40–50 milljón rúmmetrar af kviku hafi hlaupið úr kvikuhólfi Kröflu í hverri hrinu. Allar urðu þær í Gjástykki og var aðalumbrotasvæði hverrar hrinu svolítið sunnar en þeirrar næstu á undan, þ.e. nær Kröflueldstöðinni. Svipuð hegðun kom oftast fyrir í umbrotunum. Kvika kom ekki upp á yfirborð í neinni hrinu, en sennilega hefur ekki munað miklu að gos yrði í Gjástykki í júlí. Í maíhrinunni stíflaðist ein borholan við Kröfluvirkjun. Þegar hún var hreinsuð, kom upp ferskt basaltgler.²⁰⁵ Þar hefur því líklega munað mjóu að upp úr gysi.

Hrinur í Bjarnarflagi í febrúar og mars 1980, þáttaskil

Eftir maíhrinuna 1979 var landris á Kröflusvæði með hraðara móti eins og oft áður eftir landsig. Rishraðinn minnkaði þegar á leið og um miðjan október var land

komið í sömu hæð og fyrir hrinuna. Skjálftavirkni jókst þá, en næsta umbrotahrina lét nokkuð á sér standa. Í byrjun desember hætti land að rísa og tók að síga hægt.²⁹³ Í samræmi við það hættu skjálftar alveg. Þessi atburðarás var mjög svipuð aðdraganda maihrinunnar, en að þessu sinni dró ekki til verulegra tíðinda. Órói kom ekki fram á skjálftamælum, enda var sigræði aldrei svo mikill að ástæða væri til að búast við því. Þeir fáu skjálftar, sem komu fram á mælum meðan á siginu stóð, áttu flestir upptök sunnan öskjunnar. Þessa atburði má túlka sem vísbendingu um smáhlaup úr kvikuþró Kröflu. Skjálftavirknin bendir til að kvikan hafi leitað til suðurs.

Ris hófst aftur 8. desember 1979 og var land komið upp í fyrri hæð fyrir jól. Þá jókst skjálftavirkni aftur og náði hámarki um áramótin. Talsverð virkni hélst til loka janúar 1980, en þá dró úr skjálftum jafnframt því sem ris hætti. Hægt landsig benti síðan til þess að kvika leitaði út úr kvikuhólfinu, en ekki var ljóst í fyrstu hvert hún stefndi.³⁹¹ Áköf smáskjálftahrina hófst að kvöldi 10. febrúar og átti hún upptök við suðurbrún öskjunnar, skammt norðaustan við Hlíðarfjall. Skjálftar ágerðust þegar líða tók á nóttina og sigræði jókst verulega eftir klukkan 3. Skjálftavirknin náði hámarki milli klukkan 4 og 5, og mældust þá allt að 10 kippir á mínútu. Enginn þeirra var þó stór, þeir stærstu náðu ekki 3 stigum. Upptökin færðust sunnar þegar kom fram á dag 11. febrúar, allt suður undir Bjarnarflag. Næstu daga hélt sigið áfram með mismiklum hraða. Skjálftavirkni í Bjarnarflagi fylgdi því skilmerkilega eftir. Sprunguhreyfingar á upptakasvæði skjálftanna voru að þessu sinni óverulegar, aðeins fannst ein sprunga á hálsunum norðan Bjarnarflags sem hafði haggast lítillega. Þá var það athyglisvert að upptök skjálftanna í þessari hrinu voru að mestu á 5–7 km dýpi. Í hrinunum 1977 á þessu sama svæði voru skjálftaupptök mest á 3–4 km dýpi. Það leit því svo út sem kvikuhlaup hefði fundið sér leið undir gangana sem mynduðust 1977. Kvika fór því ekki aðeins til hliðar út úr hólfinu, heldur leitaði hún líka talsvert niður á við í jarðskorpunni. Landsigið að þessu sinni var ekki mikið í samanburði við undangengnar hrinur. Magn kvikunnar sem hljóp var varla nema um sjöundi hluti þess sem hljóp í Gjástykkishrinunum.

Landris byrjaði aftur við Leirhnjúk 20. febrúar 1980 og skjálftavirkni í Bjarnarflagi dó út hægt og hægt. Land var um það bil að ná fyrri hæð, þegar næsta hrina dundi yfir fyrirvaralítið. Hratt landsig hófst 16. mars klukkan 15:15 og samtímis kom fram mikill órói á skjálftamælum.^{200,294} Um hálf tíma síðar jókst óróinn talsvert og blandaðist skjálftum. Eldgos kom síðan upp norðan Leirhnjúks klukkan 16:20 og rifnaði eldsprungan upp til norðurs, alls um 4,5 km, á um 25 mínútum.^{89,90,92} Ekki fylgdu eldsuppkomunni neinir áberandi skjálftar. Gosvirkni stóð stutt á suðurhluta sprungunnar, og þar runnu nokkrir einangraðir hraunbleðlar (sjá bls. 86). Á norðurhlutanum stóð gosið til klukkan 22:30, og þar kom mestur hluti hraunsins upp. Eftir að síðasta gossprungan opnaðist um kl. 16:45 dró talsvert úr óróa og einstakir skjálftar urðu meira áberandi. Þeir áttu upptök norðan öskjunnar og var virkinn komin norður á móts við Hrítafjöll um kl. 19. En þar með var ekki öll sagan sögð. Þegar leið að kvöldi varð breyting á skjálftavirkninni. Upptökin færðust suður fyrir öskjuna, skjálftar stækkuðu og tóku að finnast í Mývatnssveit. Þessi hrina náði hámarki milli klukkan 21 og 22 með nokkrum skjálftum sem voru um 3



Mynd 2



Mynd 2-4. Að ofan: Gossprungan í júlí 1980. Að neðan: Nýrunnið hraun í Gjástykki í júlí 1980.



Mynd 2–5. Eldgosið í júlí 1980 séð úr flugvél. Ofarlega til vinstri sést til eldstöðvanna við Snaga. Þaðan rennur breið hrauná til norðurs og fellur í fossi ofan í gjá við Hrutafjöll.

að stærð. Eftir þetta dró úr virkni og morguninn eftir var land byrjað að rísa á ný. Miklar sprunguhreyfingar urðu á yfirborði í þessari hrinu. Mestar voru þær innan öskjunnar, en einnig norður að Hrutafjöllum og suður undir Bjarnarflag, alls á um 20 km löngu svæði.

Í marshrinunni urðu í raun tvö kvikuhlaup, til norðurs og suðurs, og eldgos að auki. Hlutur gossins í rúmmáli kvikunnar er metinn aðeins um 10%, en þó var þetta langstærsta gosið sem komið hafði í nokkurri hrinu fram til þessa. Nú var greinilegt að atburðirnir voru farnir að gerast mest innan öskjunnar og í næsta nágrenni hennar. Sprungusveimurinn tók ekki eins greiðlega við og áður, og stærra hlutfall kvikunnar leitaði til yfirborðs. Mörgum þótti nú líklegt að marshrinan boðaði þáttaskil í umbrotunum, þáttur gliðnunar væri liðinn, en við tæki þáttur eldgosa.

Eldgosið í júlí 1980

Landrisið í kjölfar marsumbrotanna var mjög hratt, hið hraðasta sem mælt hefur á Kröflusvæði. Það var því ljóst að ekki þyrfti lengi að bíða nýrra tíðinda. Landhæð fór yfir fyrri mörk í maí, og var ris óreglulegt eftir það. Hinn 10. júlí klukkan 8 byrjaði hægt landsig^{201,295,266} og tæpum klukkutíma síðar var órói orðinn greinilegur á skjálftamælum. Skjálftar sem fylgdu óróanum bentu til þess að kvika leitaði til norðurs. Órói og skjálftar ágerðust eftir því sem leið á morguninn en gos lét þó á sér standa. Um hádegisbilið komu svokallaðir lágtíðniskjálftar sem bentu til þess að yfirborð væri farið að rifna. Eldgos kom síðan upp í sunnanverðu Gjástykki skömmu fyrir klukkan 12:53,³⁸⁹ en þá brá svo við að verulega dró úr óróa og skjálftum, og var tiltölulega rólegt á mælum fyrstu klukkustundirnar meðan ákafi gossins var mestur.

Gosið
stuttum s
Norðure
hámarki
gígaröð
sprungus
Parna ge
að. Hrau
hraunsin
við hraun
aukinn ó
um klukk
hún allt
ist gjáin
gufa á lö
jarðskorp
sprungu
hlaupi se

Eftir f
inu, þan
rúmmál
sprungu
magn af
Hér höf
boðuðu.

Eldgosið
Landris
Pegar lan
land örlí
suðurbrú
eldstöðv

Næsta
20:42 og
Sighraði
erfitt rey
óvissa va
sem bent
upp 2,3 k
urs. Rúm
frá norðu
sprungu,
öðrum. M
gosstöðv
af þessu

Gosið kom ekki upp á einni sprungu eins og fyrri gos, heldur gaus á nokkrum stuttum sprunguþyrpingum á 4 km löngu og 400–500 m breiðu svæði (mynd 2–4). Norðurendi svæðisins var á móts við móbergshólinn Snaga. Gosið náði fljótlega hámarki og gaus þá á öllum sprungunum. Síðan fækkaði gosopum og var stutt gígaröð við Snaga lengst virk. Hraun rann svo til eingöngu til norðurs eftir sprungusveimnum og safnaðist fyrir í lægð á móts við Hrútafjöll (sjá bls. 86). Parna gerðust síðan undur sem íslenskir jarðfræðingar höfðu ekki áður orðið vitni að. Hraunið flæddi ofan í gjá og virðist hafa fyllt hana fyrst í stað. Prýstingur hraunsins glennti gjána út og sjatnaði þá í henni. Gjáin hélt síðan áfram að taka við hrauni, sem féll ofan í hana í um 200 m breiðum fossi. Þessu fylgdu skjálftar og aukinn órói á skjálftamælum og virðist gjáin samkvæmt því hafa byrjað að gliðna um klukkan 16. Hraun streymdi í hana í a.m.k. 18 klukkutíma og á tímabili gleypiti hún allt hraun sem upp kom í gosinu 2 km sunnar (mynd 2–5). Næstu daga lengdist gjáin til norðurs og gliðnaði ferlega norðan hraunjaðarsins. Rauk þar úr henni gufa á löngum kafla. Hraunið sem í sprunguna rann hlýtur að hafa myndað gang í jarðskorpunni þegar það storknaði. Einnig er augljóst að gleikkun og lenging sprungunnar stafaði af hraunrennslinu í hana. Hér urðu menn því vitni að kviku-hlaupi sem fékk efni sitt ofan frá.

Eftir fyrsta daginn gaus einungis á einum stað, og þar dró jafnt og þétt úr gosinu, þangað til það lognaðist út af 18. júlí. Flatarmál hraunsins var um 6 km² og rúmmál er áætlað 20–30 milljón m³. Því til viðbótar fór verulegt magn niður í sprunguna miklu. Út frá stærð sigskálarinnar á Kröflusvæðinu má ætla að álíka magn af kviku hafi runnið úr hólfi megineldstöðvarinnar og það sem upp kom. Hér höfðu því orðið þáttaskil þau sem menn höfðu búist við og marsumbrotin boðuðu.²⁰⁵

Eldgosið í október 1980

Landris hófst aftur á Kröflusvæði 16. júlí, og fór á fullan skrið þegar gosinu lauk. Þegar landhæð nálgæðist fyrri mörk varð risið óreglulegt og nokkrum sinnum seig land örlítið. Í einu slíku smásigi 15.–16. september varð hrina af smáskjálftum við suðurbrún öskjunnar. Þessi smásig voru líklega merki um kvikutilfærslu í rótum eldstöðvarinnar, eins konar tilraunir til eldgoss.

Næsta eldgos átti sér nokkuð stuttan aðdraganda. Sig hófst 18. október klukkan 20:42 og fáum mínútum síðar kom órói fram á skjálftamælum og óx hratt.^{209,266} Sighraði var með því mesta sem mælst hefur. Óróinn var blandaður skjálftum, en erfitt reyndist að staðsetja upptökin vegna þess hve óróinn var mikill. Nokkur óvissa var því um rennslisstefnu kvikunnar. Klukkan 21:45 kom lágtíðniskjálfti, sem benti til þess að yfirborð væri tekið að rifna, og 19 mínútum síðar braust eldur upp 2,3 km norðan við Leirhnjúk. Gossprungan teygði sig fljótlega til suðurs og norðurs. Rúmum klukkutíma eftir gosbyrjun gaus á um 7 km löngu sprungukerfi sem lá frá norðurhlíðum Leirhnjúks til norðurs á móts við Sandmúla. Ekki gaus á samfelldri sprungu, heldur mörgum sprungubútum sem voru lítið eitt hliðraðir hver gagnvart öðrum. Mest var gosið á norðurhluta svæðisins. Nokkuð samfelld skýjahula var yfir gosstöðvunum, sem endurvarpaði gosbjarmanum niður á snævi þakta jörðina. Varð af þessu mikil og sérkennileg birta, svo að lesbjart var á stóru svæði (mynd 2–6).



Mynd 2-6. Gosbjarmi yfir Kröfluvirkjun, 19. október 1980.

Hraunrennsli var mikið frá gosstöðvunum og lágu straumarnir í fyrstu aðallega til vesturs. Um nóttina og morguninn dró nokkuð úr virkni og gos hættu á suðurhluta sprungukerfisins. Síðan smástyttist gossprungan og 20. október var einungis um 200 m langur bútur virkur, á móts við Sandmúla. Þar hlóðust upp gígaborgir en hraun rann mest til norðurs ofan á og austan við júlíhraunið. Sprunguhreyfingar voru talsverðar í nágrenni gosstöðvanna, allt frá Leirhnjúk norður í Sandmúla. Mestar voru þær austan gosstöðvanna við Sandmúla. Þar myndaðist um tveggja metra djúpur sigdalur á fyrsta sólarhring gossins. Hraunið sem rann norður í Gjástykki rann víða ofan í gjár, og mátti sjá á nokkrum stöðum hvernig þær gliðnuðu við það. Hvergi var þetta þó eins tilkomumikið og í júlígosinu. Landsig á Kröflusvæðinu var mjög hratt fyrstu klukkustundir gossins, en síðan dró mjög úr sighraða. Á tímabili reis land örlítið, en síðan hélt hægt landsig áfram þar til gosinu lauk, 23. október. Hraunrennsli hætti nokkuð skyndilega eftir að smásprengring varð í gígnum um klukkan 15. Svo til samtímis hófst ris aftur á Kröflusvæðinu.

Flatarmál hrauns sem upp kom er um 11,5 km² (sjá bls. 86) og rúmmál er áætlað 30–40 milljón rúmmetra.²⁰⁵ Erfitt er að meta rúmmál kviku, sem hljóp úr kvikuholfi Kröflu í þessu gosi, þar sem verulegar landslagsbreytingar urðu vegna sprunguhreyfinga innan öskjunnar. Ekki finnast á skjálftamælum merki um að kvika hafi rutt sér aðra leið en til gosstöðvanna. Því er líklegt að hún hafi að þessu sinni nánast öll komið upp í gosinu.

Eldgosið í janúar-febrúar 1981

Landris eftir októbergosið 1980 var með hraðara móti og í lok nóvember var landhæð komin að fyrri mörkum. Raunar var ekki fullljóst hvenær kvikuþrýstingur fór yfir hættumörk, vegna sprunguhreyfinga innan öskjunnar, sem áður er getið. Ris



Mynd 2-7. Kvikustöð

hélt áfram fram e
að síga hægt og
fjöll.³⁰³ Sigið hætt
Hægt landsig hélt
smáskjálftavirkni
mælum. Þessari lí
svæðinu. Atburðu
hvað snertir stærð

Aftur fór landh
risið orðið hægt o
sig og óx sighraði
óroa og fór þá e
bentu til norðurh
tók að hægjast un
áttu þeir flestir u
þótt ekki leyndi s
mjög tók að drag
klukkan 14:10, og

Gosið kom up
mynd 2-7). Rann
Hituhóla niður í
ofan á hraunin frá
en síðan styttist h
5 sólarhringa og l
hraunflákans veg



Mynd 2–7. Kvikustrókar í Gjástykki, 31. janúar 1981.

hélt áfram fram eftir desember og náði land hæstu stöðu á Þorláksmessu. Þá tók að síga hægt og fylgdu þessu sigi allmargir smáskjálftar í Gjástykki, við Hrutafjöll.³⁰³ Sigið hætti á aðfangadag, en hélt síðan áfram eftir hálfis sólarhrings hlé. Hægt landsig hélt síðan áfram í nokkra sólarhringa og fylgdi því áframhaldandi smáskjálftavirkni við Hrutafjöll. Stundum kom einnig fram veikur órói á skjálftamælum. Þessari litlu hrinu lauk 28. desember 1980 þegar aftur tók að rísa á Kröflusvæðinu. Atburðum þessum svipaði mjög til litlu hrinunnar í september 1976, bæði hvað snertir stærð og staðsetningu.

Aftur fór landhæð yfir fyrri mörk um 10. janúar 1981 og síðast í þeim mánuði var risið orðið hægt og óreglulegt. Að morgni 30. janúar klukkan 7 byrjaði hægt landsig og óx sighraði jafnt og þétt.^{303,266} Um hálf tíma síðar fóru skjálftamælar að sýna óróa og fór þá ekki milli mála að ný umbrotahrina var í uppsiglingu. Skjálftar bentu til norðurhlaups. Sighraði og órói náðu hámarki um klukkan 9, og eftir það tók að hægjast um. Jarðskjálftar urðu hins vegar stærri þegar dró úr óróanum og áttu þeir flestir upptök nálægt Éthólum. Öll var atburðarás með hægasta móti, þótt ekki leyndi sér hvers kyns var. Fyrsti lágtíðniskjálftinn kom klukkan 13:13 og mjög tók að draga úr skjálftum um klukkan 13:40. Eldgos hófst við Éthóla um klukkan 14:10, og var þá lokið lengsta aðdraganda goss í Kröflueldum til þessa.

Gosið kom upp á um 2 km langri sprungu vestarlega í sprungusveimnum (sjá mynd 2–7). Rann fljótlega mikill hraunstraumur frá henni norður á milli Snaga og Hituhóla niður í lægdina í Gjástykki vestan við Hrutafjöll og lagðist þar að hluta ofan á hraunin frá gosunum í júlí og október. Fyrstu nóttina var öll sprungan virk, en síðan styttist hinn virki hluti hennar eftir því sem leið á gosið. Gosið stóð í fulla 5 sólarhringa og lauk því 4. febrúar. Eins og í fyrri gosum gliðnuðu gjár í nágrenni hraunflákans vegna hraunrennslis ofan í þær. Sérstaklega áberandi var gjá við

austurrætur Hituhóla. Hún liggur þar undir nýja hraunið og kemur undan jöðrum þess að sunnan og norðan. Við hraunjaðrana sást hraun renna í gjána, en líklega hefur mikið hraun runnið ofan í hana undir meginhraunflákanum. Gjáin gliðnaði mikið á um 6 km löngum kafla og upp úr henni stigu miklar gufur. Nokkrir lágtíðniskjálftar urðu við norðurenda hraunsins 1. febrúar og eru þeir líklega tengdir þessum umbrotum.

Þegar gosið kom upp hafði þegar dregið verulega úr sighraða á Leirhnjúkssvæðinu. Síðan dró enn úr hraða, en hægt landsig hélt þó áfram meðan gosið stóð. Þegar gosið hætti, tók land að rísa kröftuglega á ný. Flatarmál hraunsins var 6,3 km² (sjá bls. 86) og rúmmál þess er áætlað 32 milljónir rúmmetra.²⁰⁵ Sigskálin á Kröflusvæðinu bendir til að álíka magn hafi hlaupið úr kvikuhólfi Kröflu.

Eldgosið í nóvember 1981

Í byrjun apríl var landhæð á Kröflusvæði komin upp að fyrri mörkum og fór þá að draga úr rishraða. Risið varð óreglulegt og því fylgdi svolítill skjálftavirkni. Leið svo sumarið og fram á haust að ekki dró til frekari tíðinda. Í október dró heldur úr skjálftavirkni, og fóru þá að heyrast vongóðar raddir um að ef til vill sæi nú fyrir endann á umbrotum. Aðrir vöruðu við of mikilli bjartsýni. Ný hrina brast svo á 18. nóvember 1981, eftir meira en 9 mánaða hlé. Klukkan 00:36 byrjaði hratt landsig og órói, og var þegar ljóst að til frekari tíðinda stefndi.²¹⁰ Atburðarásin var hröð, líkt og verið hafði í októberhrinunni árið áður. Sighraði náði hámarki milli kl. 01:15 og 01:35, fyrsti lágtíðniskjálftinn kom kl. 01:38 og eldgos braust út kl. 01:52. Eldur kom fyrst upp rúmmálum kílómetra norðan Leirhnjúks, nokkurn veginn á sama stað og í októbergosinu. Eldsprunga opnaðist síðan til suðurs og norðurs. Um klukkan 4 var gosið komið í hámark. Þá gaus á 8 km löngu svæði, frá hákollu Leirhnjúks norður fyrir Sandmúla. Eins og oftast áður var sprungan ekki bein, heldur gaus á stuttum bútum sem voru hliðraðir hver gagnvart öðrum. Sprungan var mjög nálægt októbersprungunni, en náði heldur lengra á báðum endum og var samfelldari. Hraun rann mest til vesturs frá sprungunni og breiddist út á sléttunni milli hennar og Gæsafjalla (sjá bls. 86). Mest var gos í gígum suðvestan við Sandmúla, um 1 km sunnan við aðalgígana frá októbergosinu. Eftir fyrsta gosdag var hraunframleiðsla einkum bundin við þessa gíga og þar hlóðust upp myndarlegar borgir. Þaðan lá breiður hrauntaumur til norðvesturs, norður fyrir Gæsafjöll. Eldur lifði að vísu á tveimur öðrum stöðum, þ.e. í Leirhnjúk og á sléttunni norðan við hann, en hraunrennsli var óverulegt þar. Á fyrri staðnum hætti gosvirkni 20. nóvember, en á þeim seinni lifði eldur allt til gosloka 23. nóvember. Landsig sem fylgdi gosbyrjuninni hætti síðdegis fyrsta gosdaginn og við tók hægt og óreglulegt ris. Rishraði óx síðan verulega þegar gos hætti í aðalgígnum 22. nóvember.

Hraunflákinn í þessu gosi var 17 km² að flatarmáli²⁰⁶ en nokkur óvissa er um rúmmál. Sömuleiðis er talsverð óvissa um rúmmál kvikunnar sem hljóp úr kvikuhólfi Kröflu, þar sem sprunguhreyfingar náðu inn í miðja öskjuna og aflöguðu sigskálina.

Eldgos

Landri

en þeg

síðan l

virkni

unnar

hraði r

tekið a

ið orðr

rishrað

komst

róleg t

saman

septem

erfitt r

Þegar

væri le

frá gos

út bré

umbro

Aðd

ið var

skjálft

og 23.

bjarmi

kom lí

til end

ur. Rú

km, og

úr mö

urn ve

norðan

sprung

Hraun

hraunl

vestur

klukka

an slit

ber ga

Gos ha

innan

norður

og lá þ

Um

fyrri g

Eldgosið í september 1984

Landris á Leirhnjúkssvæðinu var hratt fyrstu mánuðina eftir nóvembergosið 1981, en þegar líða tók að vori 1982 hægðist verulega um. Jarðskorpuhreyfingar voru síðan hægar og óreglulegar fram eftir sumri. Í samræmi við þetta var jarðskjálftavirkni lítil sem engin. Land var nú komið upp fyrir hæstu stöðu og þrýstingur kvikunnar því að líkindum meiri en nokkru sinni fyrr. Seinni hluta árs 1982 jókst ris hraði nokkuð, og í ágúst óx skjálftavirkni á Kröflusvæðinu. Greinilega var aftur tekið að hrikta í þaki kvikuhólfins vegna þrýstingsaukningar í kvikunni og ástandið orðið svipað og var fyrir febrúarhrinuna 1980, þ.e. skjálftavirknin endurspegladi rishraðann. Ris og skjálftar héldu áfram með mismiklum krafti til áramóta en þá komst ró á um stundarsakir. Árið 1983 og meginhluta ársins 1984 skiptust síðan á róleg tímabil með nánast engum jarðskorpuhreyfingum og óróleg tímabil þar sem saman fóru landris og skjálftar.^{296,297,298} Helstu ristímabilin voru í júní–júlí 1983, september–október 1983, febrúar–mars 1984 og í ágúst 1984. Kvikan virtist eiga erfitt með að finna framrás og þrýstingur hennar jókst því ýmist eða stóð í stað. Þegar ris byrjaði í ágúst 1984, voru orðnar háværar raddir um það að umbrotunum væri lokið, enda hafði land ekki risið teljandi í 5 mánuði og liðin voru næstum 3 ár frá gosi. Landrisið og skjálftarnir urðu tilefni þess að í byrjun september var sent út bréf til hlutaðeigandi aðila til að minna á að enn væri ekki séð fyrir endann á umbrotum í Mývatnssveit. Eldgos hófst síðan 4. september 1984 (mynd 2–8).

Aðdragandi gossins hófst klukkan 20:25 með landsigi á Kröflusvæði.³⁰⁴ Landsigið var hægt í fyrstu en herti fljótlega á sér. Um klukkan 20:40 kom fram órói á skjálftamælum. Óróanum fylgdu skjálftar sem ágerðust, einkum milli klukkan 22 og 23. Klukkan 23:40 kom fyrsti lágtíðniskjálftinn, og 9 mínútum síðar sást gosbjarmi. Gosið kom upp á sprungu skammt vestur af Sandmúla, en innan mínútu kom líka upp gos um 3 km sunnar, nálægt Rauðkollu. Báðar sprungurnar lengdust til endanna og upp kom eldur á milli þeirra þar til eldveggurinn varð nær samfelldur. Rúmlega klukkustund eftir gosbyrjun hafði gossprungan náð fullri lengd, 8,5 km, og náði frá suðurhlíðum Leirhnjúks allt norður fyrir Éthóla. Hún var samsett úr mörgum hliðruðum sprungubútum. Innan öskjunnar fylgdu sprungurnar nokkurn veginn eldri sprungum, frá gosunum í október 1980 og nóvember 1981, en norðan öskjunnar lágu sprungurnar svolítið vestar en fyrri gossprungur. Nyrstu sprungurnar voru á svipuðum slóðum og gossprungur frá júlí 1980 og janúar 1981. Hraunflæði frá gosstöðvunum var gífurlegt fyrstu klukkustundirnar, og var glóandi hraunbreiðan samfelld umhverfis þær. Fyrst í stað lagðist hraunrennsli mest til vesturs, en einnig til austurs við norður- og suðurenda sprungunnar. Eftir nokkrar klukkustundir tók að draga verulega úr hraunflæðinu og jafnframt varð gossprungan slitrótt þegar gos hættu á einstökum köflum hennar. Um miðjan dag 5. september gaus á 8 bútum. Sá syðsti var í norðurhlíð Leirhnjúks en sá nyrsti við Éthól. Gos hættu síðan á sprungunum hverri af annarri, og daginn eftir var allri gosvirkni innan öskjunnar lokið. Hinn 7. september gaus aðeins á tveimur stöðum. Við norðurbarm öskjunnar gaus gufu, ösku og leir, en við Éthól var talsvert hraungos og lá þaðan hrauná norður í Gjástykki.

Um þetta leyti urðu þáttaskil í gosinu. Í stað þess að fjara út eins og gerst hafði í fyrri gosum, tók virkni að aukast í hraungígnum sem eftir var. Bæði hraunrennsli



Mynd 2-8. Upphaf eldgoss 4. september 1984. Séð úr Haganesi norður yfir Mývatn og Hlíðarfjall.

og gosórói jukust smám saman, og kvikustrókar hækkuðu eftir því sem leið á mánuðinn. Myndarlegar borgir og hraundyngja hlóðust upp við gígopin og sömuleiðis hlóð hraunáin talsvert undir sig. Hraunið rann á þessu stigi svo til allt norður í Gjástykki vestan við Hrutafjöll og hlóðst ofan á hraunbunkann sem þar var fyrir frá fyrri gosum. Óróinn náði hámarki 16.-17. september og var útslag hans þá sjöfalt það sem verið hafði 7. september. Gufugosið við öskjubrúnina hætti 17. september og hraungosið hætti nokkuð skyndilega 18. september. Var engu líkara en tappi hefði hlaupið í gosrásina, því að gosvirkni hafði verið að aukast fram undir það síðasta.

La
Í byr
land
kom
kluk
hrað
gosið
Í g
þess.
Hrú
in fyl
gjána
liggu
þeytt
enn v
hvar
slíkur
laust
Go
líkur
hluti
2-9).
sig vo
lengu
(sjá b
hólfir
He
rúmn
sem r

Slitró
Eftir
hægð
kyrru
mæla
1987
þetta
ristim
það a
legur
land
stóð
Hér v
in eru
andi

Landhreyfingar við Leirhnjúk voru með nokkuð óvenjulegum hætti í þessu gosi. Í byrjun seig land yfir kvikuhólfinu eins og venja er, en að morgni 5. september fór land að rísa aftur líkt og venjulega gerist þegar umbrotahrinu lýkur. Um sama leyti kom sérkennilegur órói með óvenju hægum sveiflum, sem stóð í tæpar tvær klukkustundir. Risið hélt áfram þar til 9. september, en þá fór að síga aftur. Sig-hraðinn óx nokkuð þegar á leið, í samræmi við vaxandi gos og óróa. Um leið og gosið hætti hófst kröftugt landris á ný.

Í gosinu gafst tækifæri til að fylgjast með hraunrennsli í sprungur og afleiðingum þess. Áhrifamesta dæmið mátti sjá við austurjaðar hraunsins skammt sunnan við Hrutafjöll. Þar lagðist mikið hraunflóð að misgengisvegg fyrstu gosnóttina.³⁸⁵ Gjáin fylltist af hrauni áður en hún gleikkaði. Við gleikkunina streymdi hraun niður í gjána og hlýtur sá straumur að hafa staðið nokkuð lengi, því að mikil hrauntröð liggur að gjánni. Upp úr svelgnum stóðu kvikustrókar, eins konar gervigos, og þeyttust hraunslettur og gjall hátt yfir yfirborð hraunsins. Talsvert gas hefur því enn verið eftir í kvikunni þegar hún streymdi þarna niður. Víða mátti einnig sjá hvar hraun, sem farið hafði niður í sprungur, kom upp úr þeim á öðrum stað. Á slíkum „gosstöðvum“ myndast ekki gosstrókar, heldur vellur hraunið upp átaka-laust.

Gosið var í mörgum aðalatriðum líkt fyrri gosum á svæðinu. Aðdragandinn var líkur, og gossprungan var á sömu slóðum, einungis lítið eitt lengri en áður. Meginhluti hraunsins kom upp norðarlega á svæðinu á svipuðum slóðum og áður (mynd 2–9). Aðalmunurinn liggur í atburðarásinni eftir 7. september, þegar gosið sótti í sig veðrið í stað þess að lognast út af eins og fyrri gos, enda stóð þetta gos mun lengur en þau. Flatarmál hrauns var að þessu sinni 24 km², talsvert meira en áður (sjá bls. 86). Rúmmál hraunsins annars vegar og kvikunnar sem streymdi úr kvikuhólfinu hins vegar er erfitt að meta af sömu ástæðum og fyrr.

Heildarflatarmál allra hrauna í Kröflueldum til þessa er 36 km² og heildar-rúmmál er metið um fjórðungur úr rúmkílómetra.³⁵ Þetta er svipað magn og það sem rann í Mývatnseldum á átjándu öld.

Slitrótt ris 1985–89

Eftir septembergosið 1984 reis land með venjulegum hætti fyrst í stað. Í lok ársins hægði verulega á risi og stöðvaðist það alveg í byrjun árs 1985. Var nú allt með kyrrum kjörum fram á haust 1986. Þá í nóvember sýndu hallamælar og sprungumælar við Leirhnjúk að ris var aftur hafið. Hélt það áfram um veturinn. Í febrúar 1987 jókst skjálftavirkni, og sýndi hún að nú var þak hólfsins tekið að bresta. Eftir þetta var gott samræmi milli rishraða og skjálftavirkni frá degi til dags. Á þessu ristímabili fór landhæð á Kröflusvæði yfir það sem hún hafði verið mest áður, og það ásamt skjálftunum var vísbending um að þrýstingur í kvikuhólfinu væri nægilegur til að koma af stað gosi. Risið og skjálftarnir hættu síðan í apríl 1987. Lá nú land kyrrt um hríð, en 8. október varð lítil smáskjálftahrina á Kröflusvæðinu sem stóð í nokkrar klukkustundir. Skjálftunum fylgdi óregluleg hreyfing á hallamælum. Hér var líklega á ferðinni lítið kvikuinnskot í rótum eldstöðvarinnar, en mæligögnin eru ekki nægilega skýr til að hægt sé að túlka þau nánar. Ekki fylgdi þessu teljandi landsig.



Mynd 2-9. Yfirlit norður yfir eldstöðvar og hraun við Kröflu 6. október 1984.

Áfram var kyrrt fram í febrúar 1988, en þá tók við ristímabil sem stóð fram í mars. Aftur byrjaði ris í lok júní og fylgdi því talsverð aukning á skjálftavirkni. Síðan hafa skipst á tímabil með talsverðu risi og skjálftum og tímabil þegar hreyfingar hafa verið hægari. Skjálftavirkni náði hámarki um miðjan júlí 1988, um miðjan nóvember, í byrjun desember, um áramótin 1988-89, og í fyrri hluta mars 1989. Stöku sinnum hafa á þessu tímabili komið fram óreglulegar hreyfingar á hallamælum, sem e.t.v. má túlka sem afleiðingu smáinnskota. Mest kvað að þessu í byrjun desember 1988. Eftir það fór að bera á skjálftum af nýrri gerð á Kröflusvæðinu. Þeir hafa áberandi lægri sveiflutíðni en venjulegir skjálftar og eru óreglulegir útlits á skjálftalínuritunum. Þessum lágtíðniskjálftum fjölgaði mjög í febrúar og mars 1989, en ekki er á þessu stigi unnt að tengja þá öðrum þáttum í hegðun Kröflueldstöðvarinnar.

MÆLINGAR

Jarðskjálftar

Af þeim mælingum sem gerðar eru á Kröflusvæðinu gefa jarðskjálftamælingar einna heillegasta mynd af atburðarásinni. Jarðskorpuhreyfingum fylgja oftast skjálftar, og með því að staðsetja upptök þeirra fæst vitneskja um hvar hreyfingar eru hverju sinni. Skjálftamælingarnar gefa því upplýsingar um allt umbrotasvæðið, en aðrar mæliaðferðir gefa einungis upplýsingar um atburði næst mælistaðnum. Næmir skjálftamælar voru settir upp á Kröflusvæðinu sumarið og haustið 1975,³⁰⁵ nokkrum mánuðum áður en fyrsta umbrotahrinan dundi yfir. Auk þess hafði

næmur mælir verið á Akureyri síðan 1964. Jarðskjálftavirkni svæðisins fyrir umbrotin var því allvel þekkt. Árið 1982 var bætt við tveimur mælum og hafa síðan verið 5 mælur í gangi á umbrotasvæðinu. Mælur utan svæðisins eru líka mikils virði, einkum þeir sem eru í minna en 100 km fjarlægð. Í hrinum hefur auk þess stundum verið bætt við færanlegum mælum til að fá fyllri mynd af umbrotunum. Mikið af gögnum hefur safnast og verður úrvinnsla þeirra seint lokið.

Skjálftavirkninni má skipta í flokka eftir því hvernig hún tengist umbrotunum:

1. *Risskjálftar*. Þegar landris innan öskjunnar fer yfir ákveðin mörk, leiðir það til skjálftavirkni. Skjálftarnir eiga upptök á svæðinu umhverfis Leirhnjúk, á 0–4 km dýpi, þ.e. í þaki kvikuhólfsins. Stærstu skjálftar ná stærðinni 4 á Richterskvarða. Skjálftavirkni vex með auknum rishraða og hættir alveg ef ris hættir eða land tekur að síga. Hún byrjar ekki aftur fyrr en spennan í þakinu nær aftur fyrra hámarki. Dæmi um risskjálfta á tímabilinu mars–apríl 1977 má sjá á mynd 2–10.

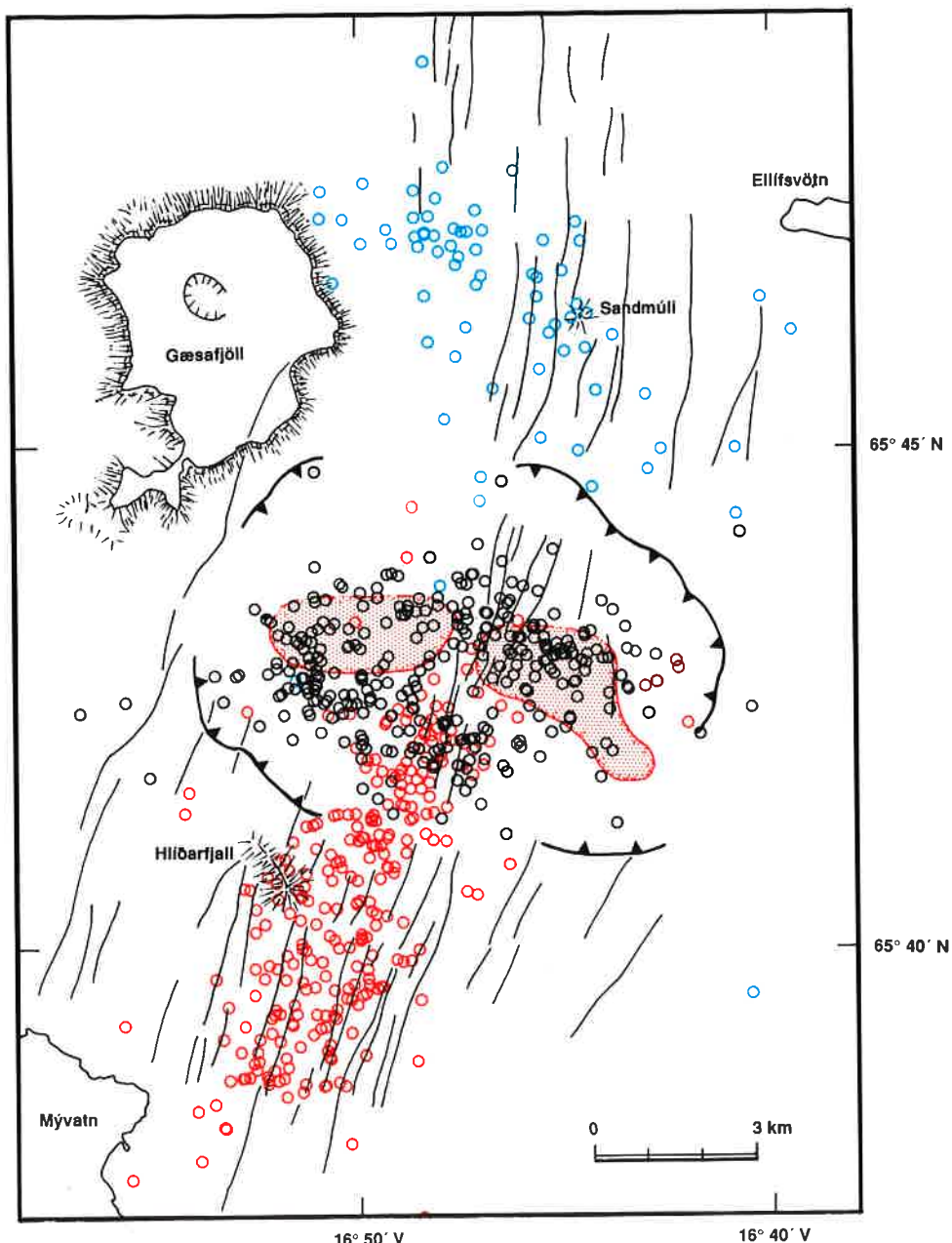
2. *Sigskjálftar*. Í tveimur stærstu umbrotahrinunum var sig innan öskjunnar svo mikið að þak kvikuhólfsins tók að breyta. Skjálftar sem þessu tengdust áttu upptök á sömu slóðum og risskjálftar, þ.e. á 0–4 km dýpi innan öskjunnar.²⁷⁵ Stærstu skjálftar náðu 5 stigum á Richterskvarða og urðu í janúar 1976. Sigskjálftar hafa ekki orðið nema landsig við Leirhnjúk hafi verið meira en 1 m.

3. *Hlaupskjálftar*. Skjálftahrina fylgir því gjarnan, þegar veggir kvikuhólfsins breyta og kvika hleypur úr því. Jarðskjálftar byrja oftast nálægt öskjunni, fljótlega eftir að sig hefst, en færast síðan út eftir sprungusveimnum til norðurs eða suðurs.^{62,302} Hraði færslunnar er mismikill, oftast á bilinu 0,5–1,2 m á sekúndu. Í fyrstu eru skjálftarnir tíðir en smáir, en þegar frá líður verða þeir stærri og strjálí. Hver hrina er bundin við ákveðið, vel afmarkað svæði innan sprungusveimsins. Þar verða oft verulegar hreyfingar á sprungum og misgengjum. Stærð skjálftanna fer sjaldan yfir 4 stig. Skjálftar eru áberandi sundurleitir á skjálftalínuritum. Bæði má finna venjulega skjálfta með hárrí sveiflutíðni, en líka lágtíðnikippi þar sem háu tíðnina vantar. Lágtíðniskjálftarnir virðast tengdir sprunguhreyfingum nálægt yfirborði. Upptök hlaupskjálfta í hrinunum í janúar og september 1977 eru sýnd á mynd 2–10.

4. *Hlaupórói*. Stöðugur órói kemur fram á skjálftamælum þegar kvika brýtur sér leið um jarðskorpuna. Þessi órói kemur venjulega fram um leið og sig hefst á Kröflusvæðinu eða fljótlega eftir það. Útslag hans fylgir venjulega sigráðanum, þ.e. verður þeim mun meira sem sigið er hraðara. Útslagið er annars áberandi ójafnt og óróinn er tíðum blandaður hlaupskjálftum. Tíðnisvið hans er breitt, þ.e. í honum er að finna bylgjur af talsvert mismunandi tíðni.

5. *Gosórói*. Þegar kvikuhlaup nær yfirborði og gos hefst, breytist yfirbragð óróans. Útslag hans verður jafnara og sveiflurnar reglulegri. Meginsveiflutíðni gosóróans er lægri heldur en hlaupóróans, og tíðnisviðið er þrengra. Útslagið virðist fylgja ákafa gossins, eins og hann lýsir sér t.d. í hæð kvikustrókanna. Gosórói er oft lítið blandaður skjálftakippum. Dæmi um hlaup- og gosóróa má sjá á mynd 2–11.

Með skjálftamælingum fást ekki einungis upplýsingar um atburðarásina, heldur gefa mælingarnar einnig vísbendingar um gerð og ástand jarðskorpunnar og möttulsins sem undir liggur. Frá upptökum skjálftanna berast tvær gerðir skjálftabylgna sem fara í gegnum bergið, svokallaðar P-bylgjur og S-bylgjur. Þær fyrirnefndu ber-



Mynd 2-10. Skjálftakort af Kröflusvæðinu. Svörtu hringirnir tákna upptök skjálfta á tímabilinu mars-apríl 1977. Þeir eru allir innan öskjunnar, umhverfis Leirhnjúk, enda reis land þar hratt. Undir upptakasvæði skjálftanna eru svæði þar sem S-bylgjur verða fyrir óvenju mikilli deyfingu (merkt með rauðum punktum). Bláir hringir tákna upptök skjálfta í hrinuinni 20.-22. janúar 1977. Þá glidnuðu sprungur í sunnanverðu Gjástykki. Skjálftaupptök í hrinuinni í september 1977 eru merkt með rauðum hringjum. Smágos varð þá við norðurbrún öskjunnar, en meginhluti kvikunnar leitaði suður í Bjarnarflag.

ast í g
Komi
svæðu
gefur
verða
heitt
skjálft
bráðm
ar. U
allt að
það,
kynna

Jarösi

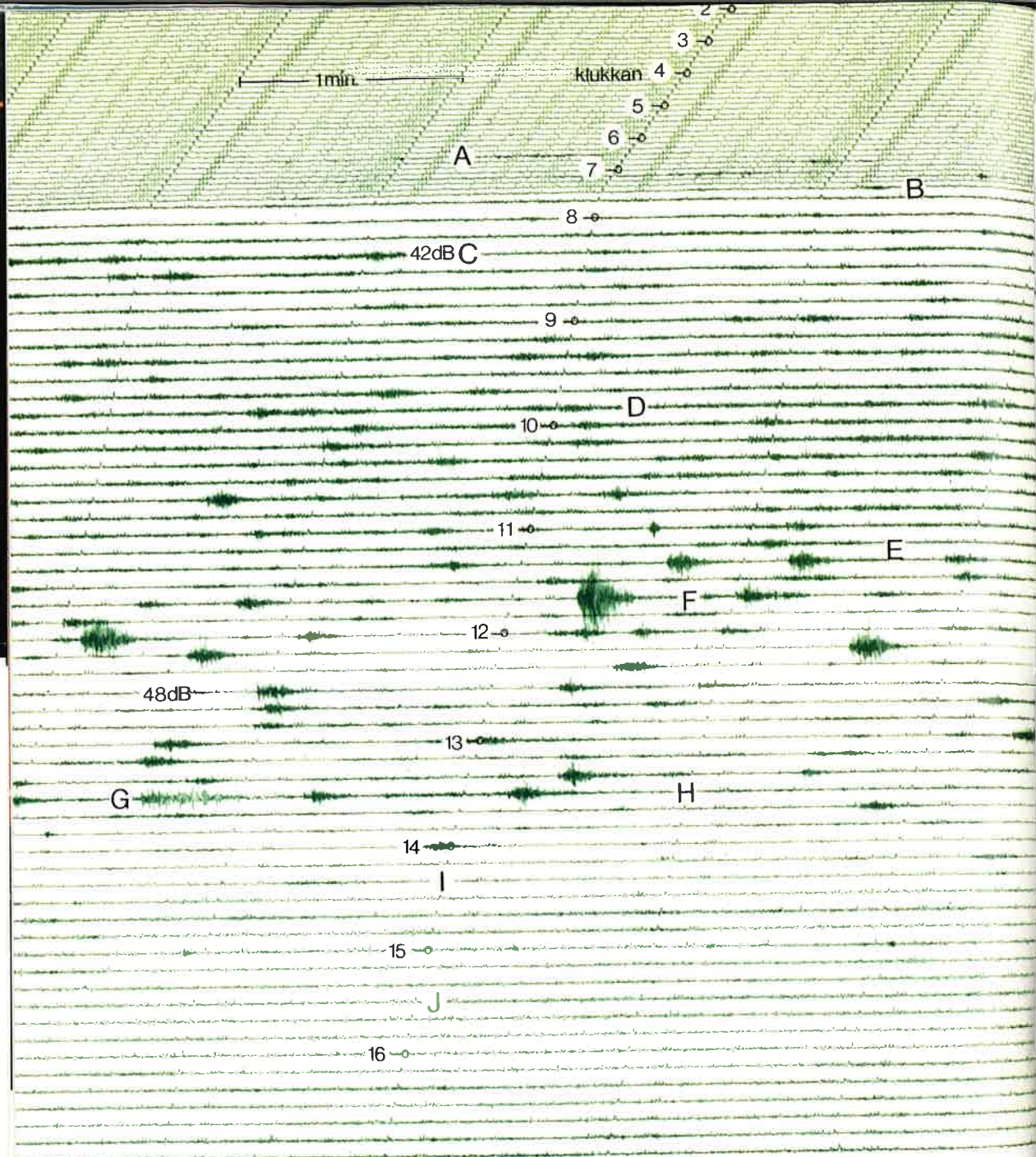
Umb
lagi, r
ingar,
voru g
ar ger
landr
aukna
um.^{III}
breið
Með
ingam
Vopn
frest.
og K
voru
punkt
Mýva
oft m
til sk
unarn
Rúmu
inn, v
neti n
innar
tilefni
Au
fjallas
umbr
eru þ
L-lag
öðru

ast í gegnum fast og fljótandi efni, en þær síðarnefndu einungis í gegnum fast efni. Komið hefur í ljós að S-bylgjur berast illa eða ekki um jarðskorpuna á ákveðnum svæðum innan Kröfluöskjunnar, sem bendir til þess að þar sé bráðið efni.²⁸⁸ Þá gefur dreifing skjálftaupptaka einnig upplýsingar um ástand efnisins. Skjálftar verða flestir við það að berg brotnar snögglega undan álagi. Ef bergið er mjög heitt eða að hluta bráðið, hnígur það en hrekkur ekki. Með því að kortleggja dýpi skjálfta má því fá hugmynd um það, hvar ekki eru fyrir hendi verulegir massar af bráðnu efni. Þannig má finna að líklega sé kvikuhólf á 3–7 km dýpi innan öskjunnar. Utan öskjunnar, bæði sunnan hennar og norðan, verða skjálftar hins vegar á allt að 9 km dýpi. Það sýnir að verulegir kvikumassar hljóta að liggja dýpra en það, ef þeir eru til. Útbreiðsla S-bylgna yfir gosbeltið gefur þetta einnig til kynna.³²⁶

Jarðskorpuhreyfingar

Umbrotunum hafa fylgt gríðarlegar jarðskorpuhreyfingar og breytingar á landslagi, miklu meiri en áður hafa mælst hér á landi. Svo vel vill til að fyrstu landmælingar, sem gerðar voru gagnert til að ákvarða jarðskorpuhreyfingar hér á landi, voru gerðar þvert yfir gosbeltið í Þingeyjarsýslum, m.a. Kröflusvæðið.²⁵⁵ Þjóðverjar gerðu þær árið 1938 og var tilgangurinn að sannreyna kenningar Wegeners um landrek. Mælingar voru ekki endurteknaðar fyrr en 1965, en síðan hafa þær verið auknar og endurteknaðar á nokkurra ára fresti með æ nákvæmari tækjum.^{111,112,248,249,321,372} Ákvörðuð hefur verið lárétt afstaða mælipunkta í 15–25 km breiðu mælineti sem nær frá Fnjóskadal allt austur fyrir Grímsstaði á Fjöllum. Með því má finna láréttar hreyfingar jarðskorpunnar. Auk þess hafa þýskir mælingamenn mælt hæð á fjölda punkta sem liggja á línu frá Akureyri allt austur til Vopnafjarðar.^{197,350} Mælinan var lögð 1965 og hefur verið mæld á a.m.k. 5 ára fresti. Styttri mælinútur hafa einnig verið mældar yfir sprungusveiminn í Gjástykki og Kelduhverfi, og eins meðfram sprungusveimnum. Vegna virkjunar jarðhita voru nokkuð ítarlegar hæðarmælingar gerðar á vegum Orkustofnunar á allmörgum punktum á Kröflusvæðinu áður en umbrotin hófust. Var m.a. lögð mælinan frá Mývatni, upp Hlíðardal og inn á Kröflusvæðið.³⁶ Þessi mælinan hefur verið mæld oft meðan á umbrotunum hefur staðið og hafa þær mælingar reynst ómetanlegar til skilnings á eðli atburðanna og við mat á ástandinu hverju sinni. Orkustofnarmenn hafa einnig mælt landhæð og fjarlægðir í Kelduhverfi og Öxarfirði.²⁶⁵ Rúmu ári eftir fyrstu hrinuna, þegar sýnt þótti að umbrotin myndu dragast á langinn, var hafist handa um að gera fjarlægðar- og hornamælingar á tiltölulega þéttu neti mælipunkta yfir umbrotasvæðið.^{84,88,94,95} Starfsmenn Norrænu eldfjallastöðvarinnar hafa síðan mælt netið með reglulegu millibili, og eins þegar umbrotin gefa tilefni til.

Auk landmælinga með hefðbundnum aðferðum hafa á vegum Norrænu eldfjallastöðvarinnar verið gerðar hallamælingar á allmörgum stöðum allt frá upphafi umbrotanna.^{86,87,91,93,96,97} Þrenns konar mæliaðferðir koma hér við sögu. Í fyrsta lagi eru það afstæðar hæðarmælingar á litlu neti fastmerkja, t.d. hringlaga, T-laga eða L-laga. Mælingarnar eru gerðar með hefðbundnum hæðarmæli og mælistöngum. Í öðru lagi má nefna svokallaðan vatnshallamæli. Hann er í raun ekki annað en tvær



Mynd 2-11. Skjálftarit úr Reynihlíðarmælinum sem sýnir aðdraganda og byrjun goss í janúar 1981. Tíminn gengur frá vinstri til hægri og ofan frá og niður, 10 mínútur eru milli lína. Fyrst í stað (efst) er engu hreyfingu að sjá á þenna mælisins utan sekúndumerki. Milli kl. 6 og 7 má greina titring frá bílum árrisulla Mývettinga (A). Klukkan 07:40 byrjar órói (B) og er þá línubil mælisins aukið til að koma í veg fyrir að línum slái saman. Óróinn vex og kl. 08:19 er mögnun mælisins lækkuð svo að tímamerki sjáist (C). Tíðni óróans er tiltölulega há og útslag ójafnt. Smáir skjálftar blandast saman við óróann. Þetta er dæmigerður hlaupórói (D). Um kl. 11 dregur úr óróa en skjálftar fara stækkandi (E). Ennþá eru allir skjálftar með ríkjandi háa tíðni (F). Klukkan 13:28 verður lágtíðniskjálfti (G) sem líklega táknar að yfirborð sé tekið að rifna. Nú dregur verulega úr skjálftavirkni (H). Gos hefst um kl. 14:10. Hlaupórói er þá hættur en við tekur gosórói (I) sem hefur hægari sveiflur og jafnara útslag.

dósir með vatni í og slöngu á milli. Með míkrómetraskrúfu má mæla vatnshæð í báðum dósunum og finna þannig hæðarmun þeirra með mikilli nákvæmni. Vatnshallamælir var settur upp í stöðvarhúsi Kröfluvirkjunar á fyrsta ári umbrotanna, og hefur hann reynst gefa traustar upplýsingar um ástand svæðisins frá degi til dags. Í þriðja lagi eru síritandi hallamælar, sem gefa stöðugar upplýsingar um hallabreytingar. Mæligögnin eru send jafnharðan með útvarpssendum til miðstöðvar þar sem hægt er að meta þau. Fyrsti mælirinn var settur upp við Kröfluvirkjun árið 1977, en síðan hefur verið bætt við mælistöðvum. Mælarnir gefa mikilsverðar upplýsingar um gang umbrotanna, en hafa verið óþarflega næmir fyrir truflunum, t.d. vegna frosthreyfinga í efstu jarðlögum.

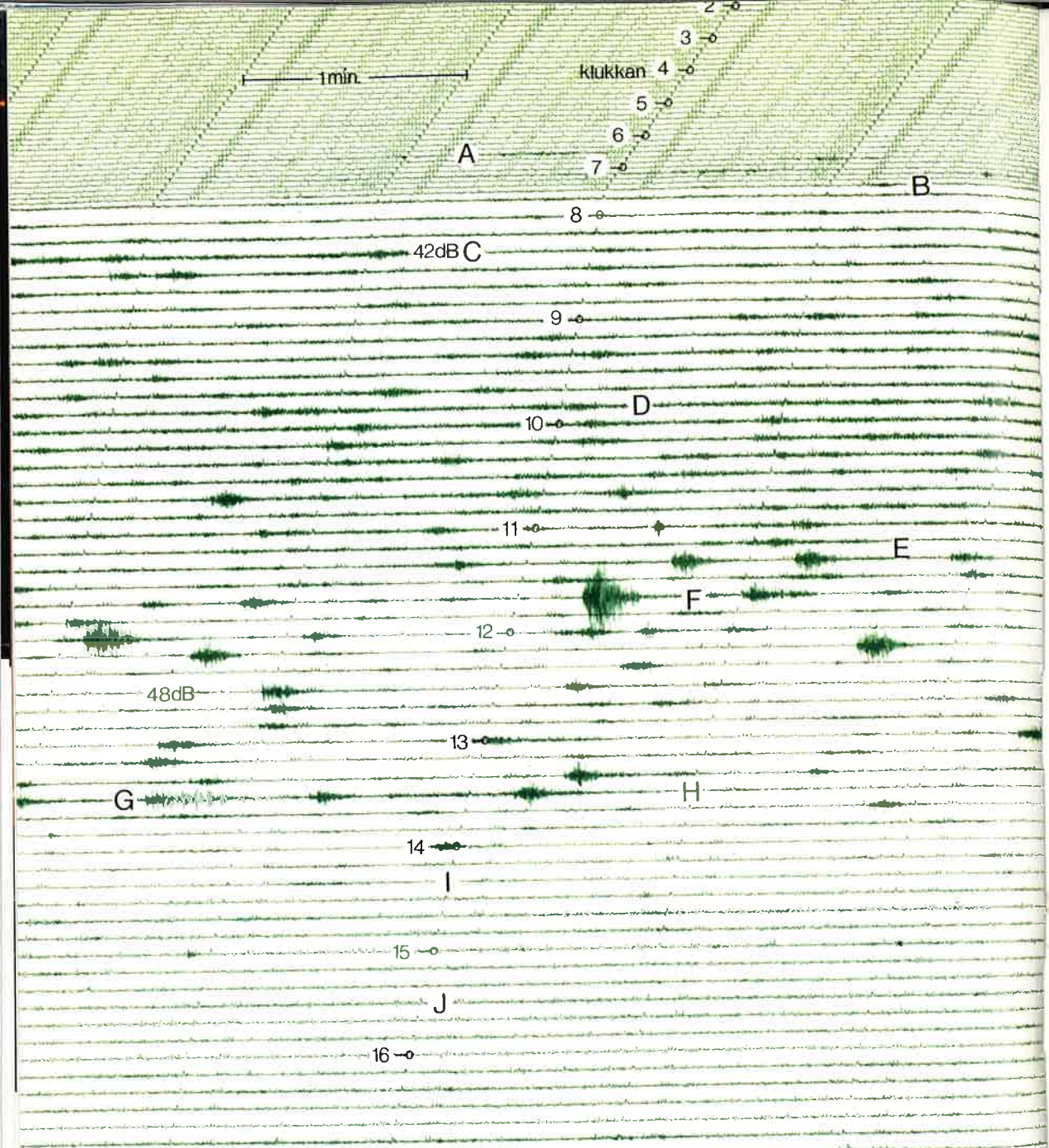
Fylgst hefur verið með vatnsborði Mývatns með það fyrir augum að ákvarða hallabreytingar jarðskorpunnar undir vatninu.^{264,98} Þá er hæð nokkurra punkta umhverfis vatnið fundin miðað við vatnsborðið, sem líta má á sem láréttan flöt. Með þessu má ákvarða afstæðar hæðarbreytingar sem nema fácinum millimetrum.

Umbrotunum hafa fylgt gifurlegar sprunguhreyfingar. Þegar eftir fyrstu hrinuna var komið fyrir búnaði við margar sprungur í Mývatnssveit og á Kröflusvæðinu til að mæla breytingar á sprunguvidd.³⁴ Í sprungubarmana voru steipt rör sem mættust yfir sprungunni, þannig að hægt væri að mæla milli þeirra með rennimáli. Síðar voru settir upp síritandi sprungumælar á nokkrum stöðum.⁷⁹ Sprungumælingar hafa gefist vel. Einkum hefur vídd sprungna á Leirhnjúkssvæðinu gefið góða vísbendingu um ástand eldstöðvarinnar. Æskilegt hefði verið að kanna og kortleggja sprungur sem opnuðust í hverri hrinu fyrir sig, en því miður hefur því ekki verið sinnt sem skyldi.

Með þeim mælingum sem hér hefur verið lýst hefur fengist nokkuð heilsteypt mynd af jarðskorpuhreyfingum sem fylgt hafa umbrotunum. Skipta má umbrotatímanum í tvenns konar tímabil, ristímabil og umbrotahrinur, eftir því hvernig jarðskorpan hreyfist. Á ristímabilum rís land hægt á afmörkuðu svæði umhverfis Leirhnjúk. Þar myndast e.k. kýli á landinu. Miðja rissvæðisins rís hraðast en hreyfingin er hægari út frá henni í allar áttir. Hreyfing er mælanleg út í a.m.k. 10 km fjarlægð frá rismiðjunni og kemur til dæmis vel fram í vatnsborðsmælingum á Mývatni. Hallamælingar sýna halla út frá rismiðjunni. Jafnframt því sem landið rís, færast það í lárétta stefnu út frá rismiðjunni. Hreyfingin kemur því líka fram í fjarlægðarmælingum, t.d. lengjast mælinúr sem liggja yfir rismiðjuna. Sprungur við Leirhnjúk gleikka, en aðrar hreyfast lítt eða ekki.

Þessar landslagsbreytingar má túlka sem afleiðingar af vaxandi þrýstingi í kvikuholfi í jarðskorpunni. Ef hólfíð er á litlu dýpi verða hreyfingarnar miklar, en ná yfir lítið svæði. Risbungan á landinu verður kröpp. Ef kvikan liggur dýpra, verður bungan lág en umfangsmikil. Með tiltölulega einföldu reiknilíkani²⁴⁵ má finna dýpi niður að kvikunni sem risinu veldur. Reiknaðir risferlar eru bornir saman við mælt landris,^{29,85,33} og þannig má finna að kvika á u.þ.b. 3 km dýpi veldur risi sem best fellur að mæligildum (mynd 2-12).

Í umbrotahrinum eru jarðskorpuhreyfingarnar tvíþættar. Annars vegar sígur land hratt þar sem það reis áður, hreyfingar undangengins ristímabils ganga að nokkru til baka.^{91,33} Hins vegar verða miklar hreyfingar á afmörkuðu svæði á sprungusveimnum. Hann sígur um miðbikið en barmarnir rísa (mynd 2-13).



Mynd 2-11. Skjálftarit úr Reynihliðarmælinum sem sýnir aðdraganda og byrjun goss í janúar 1981. Tíminn gengur frá vinstri til hægri og ofan frá og niður, 10 mínútur eru milli lína. Fyrst í stað (efst) er engu hreyfingu að sjá á þenna mælisins utan sekúndumerki. Milli kl. 6 og 7 má greina titring frá bílum árrisulla Mývetninga (A). Klukkan 07:40 byrjar órói (B) og er þá línubil mælisins aukið til að koma í veg fyrir að línur slái saman. Óróinn vex og kl. 08:19 er mögnun mælisins lækkuð svo að tímamerki sjáist (C). Tíðni óróans er tiltölulega há og útslag ójafnt. Smáir skjálftar blandast saman við óróann. Þetta er dæmigerður hlaupórói (D). Um kl. 11 dregur úr óróa en skjálftar fara stækkandi (E). Ennþá eru allir skjálftar með ríkjandi háa tíðni (F). Klukkan 13:28 verður lágtíðniskjálfti (G) sem líklega tákna að yfirborð sé tekið að rifna. Nú dregur verulega úr skjálftavirkni (H). Gos hefst um kl. 14:10. Hlaupórói er þá hættur en við tekur gosórói (I) sem hefur hægari sveiflur og jafnara útslag.

dósir með vatni í og slöngu á milli. Með míkrometraskrúfu má mæla vatnshæð í báðum dósunum og finna þannig hæðarmun þeirra með mikilli nákvæmni. Vatnshallamælir var settur upp í stöðvarhúsi Kröfluvirkjunar á fyrsta ári umbrotanna, og hefur hann reynst gefa traustar upplýsingar um ástand svæðisins frá degi til dags. Í þriðja lagi eru síritandi hallamælar, sem gefa stöðugar upplýsingar um hallabreytingar. Mæligögnin eru send jafnharðan með útvarpssendum til miðstöðvar þar sem hægt er að meta þau. Fyrsti mælirinn var settur upp við Kröfluvirkjun árið 1977, en síðan hefur verið bætt við mælistöðvum. Mælarnir gefa mikilsverðar upplýsingar um gang umbrotanna, en hafa verið óþarflega næmir fyrir truflunum, t.d. vegna frosthreyfinga í efstu jarðlögum.

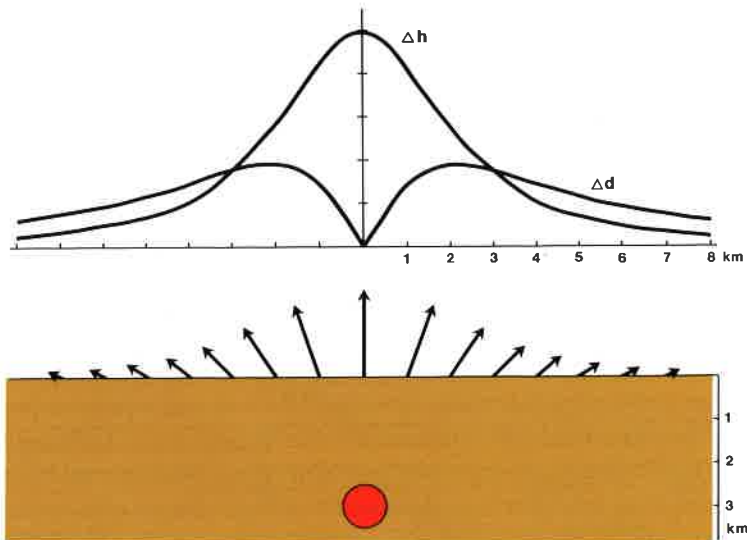
Fylgst hefur verið með vatnsborði Mývatns með það fyrir augum að ákvarða hallabreytingar jarðskorpunnar undir vatninu.^{264,98} Þá er hæð nokkurra punkta umhverfis vatnið fundin miðað við vatnsborðið, sem líta má á sem láréttan flöt. Með þessu má ákvarða afstæðar hæðarbreytingar sem nema fáeinum millimetrum.

Umbrotunum hafa fylgt gífurlegar sprunguhreyfingar. Þegar eftir fyrstu hrinuna var komið fyrir búnaði við margar sprungur í Mývatnssveit og á Kröflusvæðinu til að mæla breytingar á sprunguvídd.³⁴ Í sprungubarmana voru steipt rör sem mættust yfir sprungunni, þannig að hægt væri að mæla milli þeirra með rennimáli. Síðar voru settir upp síritandi sprungumælar á nokkrum stöðum.⁷⁹ Sprungumælingar hafa gefist vel. Einkum hefur vídd sprungna á Leirhnjúkssvæðinu gefið góða vísibendingu um ástand eldstöðvarinnar. Æskilegt hefði verið að kanna og kortleggja sprungur sem opnuðust í hverri hrinu fyrir sig, en því miður hefur því ekki verið sinnt sem skyldi.

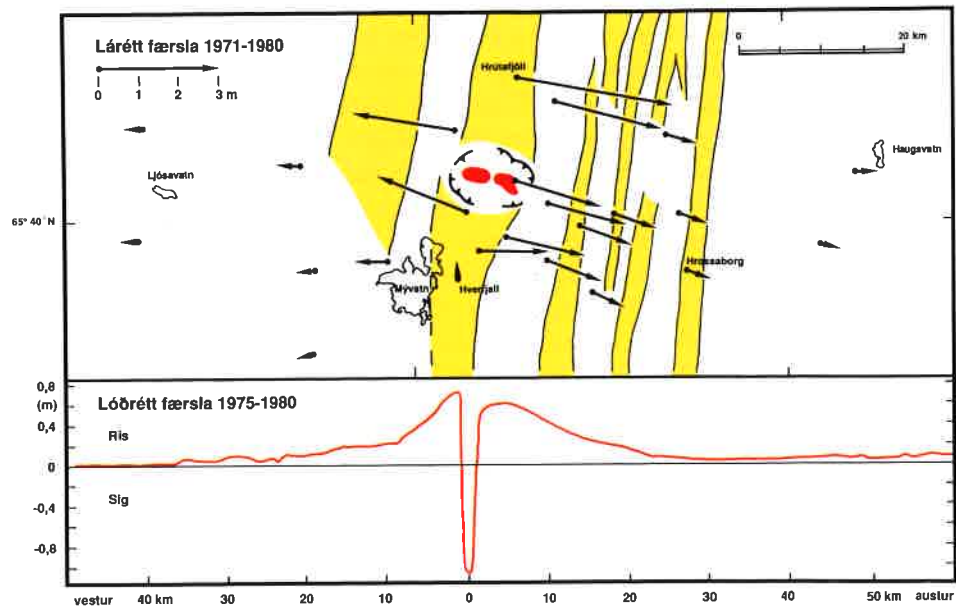
Með þeim mælingum sem hér hefur verið lýst hefur fengist nokkuð heilsteypt mynd af jarðskorpuhreyfingum sem fylgt hafa umbrotunum. Skipta má umbrotatímanum í tvenns konar tímabil, ristímabil og umbrotahrinur, eftir því hvernig jarðskorpan hreyfist. Á ristímabilum rís land hægt á afmörkuðu svæði umhverfis Leirhnjúk. Þar myndast e.k. kýli á landinu. Miðja rissvæðisins rís hraðast en hreyfingin er hægari út frá henni í allar áttir. Hreyfing er mælanleg út í a.m.k. 10 km fjarlægð frá rismiðjunni og kemur til dæmis vel fram í vatnsborðsmælingum á Mývatni. Hallamælingar sýna halla út frá rismiðjunni. Jafnframt því sem landið rís, færast það í lárétta stefnu út frá rismiðjunni. Hreyfingin kemur því líka fram í fjarlægðarmælingum, t.d. lengjast mælinúr sem liggja yfir rismiðjuna. Sprungur við Leirhnjúk gleikka, en aðrar hreyfast lítt eða ekki.

Þessar landslagsbreytingar má túlka sem afleiðingar af vaxandi þrýstingi í kvikuhólfi í jarðskorpunni. Ef hólfið er á litlu dýpi verða hreyfingarnar miklar, en ná yfir lítið svæði. Risbungan á landinu verður kröpp. Ef kvikan liggur dýpra, verður bungan lág en umfangsmikil. Með tiltölulega einföldu reiknilíkani²⁴⁵ má finna dýpi niður að kvikunni sem risinu veldur. Reiknaðir risferlar eru bornir saman við mælt landris,^{29,85,33} og þannig má finna að kvika á u.þ.b. 3 km dýpi veldur risi sem best fellur að mæligildum (mynd 2–12).

Í umbrotahrinum eru jarðskorpuhreyfingarnar tvíþættar. Annars vegar sígur land hratt þar sem það reis áður, hreyfingar undangengins ristímabils ganga að nokkru til baka.^{91,33} Hins vegar verða miklar hreyfingar á afmörkuðu svæði á sprungusveimnum. Hann sígur um miðbikið en barmarnir rísa (mynd 2–13).



Mynd 2-12. Reiknilíkan af hreyfingum á yfirborði jarðar vegna þrýstingsaukningar í kviku-hólfi á 3 km dýpi í jarðskorpunni. Gert er ráð fyrir því að hólfið sé lítið samanborið við dýpið niður á það. Örvarnar sýna heildarhreyfinguna, bæði stefnu og stærð, en línuritinn sýna lóðrétta færslu (Δh) og lárétta færslu (Δd) sem fall af fjarlægð frá rismiðju. Mælieiningin er hlutfall af mesta landrísni á miðju rissvæðinu. Líkan þetta er kennt við Mogi, japanskan jarðskjálftafræðing. Mælingar á Kröflusvæðinu falla best að þessu líkani, ef dýpi niður á kviku-hólf er um 3 km.



Mynd 2-13. Jarðskorpuhreyfingar umhverfis Kröflusvæðið samkvæmt mælingum Þjóðverja.^{249,197} Láréttar hreyfingar eru mestar nálægt sprungusveim Kröflu og verða minni þegar fjær dregur. Innan sprungusveimsins sígur land og gliðnar, barmarnir rísa. Myndin er gerð eftir teikningu Axels Björnssonar.³⁰ Sprungusveimar gosbeltisins eru gulir. Rauðir flekkir í öskjunni sýna svæðið þar sem S-bylgjur dofna.

Sprungusveimurinn gliðnar, þannig að mælilínur yfir hann lengjast og sprungur opnast. Utan sprungusveimsins kýtist landið hins vegar saman, þannig að mælilínur þvert á stefnu hans stytast. Hreyfingar verða síðan minni eftir því sem lengra dregur frá sprungusveimnum.^{265,249} Í hverri hrinu getur það verið 10–30 km langt stykki af sprungusveimnum sem verður fyrir áhrifum og þar skiptir gliðnunin tugum sentimetra eða metrum. Í næstu hrinu gliðnar nýr hluti sprungusveimsins, oft nær öskjunni en í undangenginni hrinu.

Stundum nær gliðnunarsvæðið inn í öskjuna og skarast þá við sigsvæðið. Við það verður myndin mjög flókin og erfitt getur verið að túlka mæligögnin. Þetta gerðist m.a. í goshrinunum í apríl og september 1977, mars og október 1980, nóvember 1981 og september 1984.

Þyngdarmælingar

Mælingar á aðdráttarkrafti jarðar geta gefið margvíslegar upplýsingar um gerð og hreyfingar jarðskorpunnar. Krafturinn er m.a. háður fjarlægð frá jarðarmiðju, og með nýjustu gerð þyngdarmæla má þannig skynja lóðréttu færslu landmælinga-punkta með einungis 5 cm óvissu. Þyngdarmælingar eru tiltölulega fljótgerðar og því eru þær handhægar til að fá yfirsýn yfir umfang jarðskorpuhreyfinga. Ef óháðar hæðarmælingar eru gerðar á sömu punktum má auk þess fá hugmynd um efnisflutninga í jarðskorpunni samfara umbrotunum. Þannig er til dæmis hægt að reikna út að efnid sem flyst til, meðan á risi og sigi á Kröflusvæði stendur, hefur eðlismassa kviku en ekki gufu eða gass.¹³³

Þyngdarmælingar voru fyrst gerðar í gosbelti Norðurlands árið 1938 í tengslum við landmælingarnar sem áður voru nefndar.²⁵⁵ Mælt var á mælilínu frá Akureyri austur að Grímsstöðum á Fjöllum. Árið 1965 voru gerðar ítarlegri mælingar, sem síðan voru endurteknar 1971 og var mælilínan þá lengd austur í Vopnafjörð. Enn var endurmælt 1975 og leiddu mælingarnar í ljós að þyngdarhröðun fór vaxandi innan gosbeltisins, sem túlka mátti sem afleiðingu af hægu sigi, 3–5 cm á ári.^{362,329} Eftir að umbrotin hófust hefur verið mælt nokkrum sinnum á þessari línu^{361,363,360} og hafa mælingarnar gefið gott yfirlit yfir umfang umbrotasvæðisins. Til dæmis kemur fram að mælanlegar þyngdarbreytingar ná yfir 60 km breitt svæði.

Nákvæmar þyngdarmælingar voru einnig gerðar á neti mælipunkta á Kröflusvæðinu sjálfu áður en umbrotin hófust. Tilgangurinn var að fylgjast með jarðhitavinnslu Kröfluvirkjunar sem þá var í smíðum. Þetta net var síðan útvíkkað eftir að umbrotin hófust, og voru gerðar tíðar mælingar á því, oft í tengslum við hæðarmælingar.^{132,133}

Gosefni og myndanir

Eldgosin sem upp hafa komið eru að mörgu leyti lík hvert öðru. Þau eru dæmigerð hraungos, aðeins óverulegt magn af ösku eða vikri hefur myndast. Gosin hafa venjulega hafist á einum stað eða tveimur, og síðan rifnar sprunga til beggja enda þangað til 1–8 km langt sprungusvæði er virkt (mynd 2–14). Sprungan er sjaldnast samhangandi, heldur gýs á sprungubútum, sem eru nokkur hundruð metra langir og hliðraðir hver gagnvart öðrum, ýmist til vinstri eða hægri. Upp úr sprungunum standa kvikustrókar svo þétt, að þeir mynda víðast samfelldan eldvegg, nokkra

tugi metra á hæð. Gosin ná venjulega hámarki á fyrsta klukkutímanum, en síðan tekur að draga hægt úr þeim. Á fyrstu klukkutímunum er hraunflæðið gífurlegt, mörg þúsund rúmmetrar á sekúndu, en erfitt er að meta það. Hraunið rennur þá yfir landið í stórum glóandi breiðum, enda er það mjög þunnfljótandi. Þegar á líður dregst virkinn saman á styttri sprungu, hraunrennslið minnkar og leggst í einstaka farvegi. Eftir fyrsta gosdaginn er gosvirkni oftast bundin við fá gosop á stuttri sprungu. Þar hlaðast upp eldborgir í kringum gosopin. Frá þeim liggur hrauná í hrauntröð.

Verulegt magn af hrauni hefur runnið ofan í sprungur, enda liggur meginhraunflákinn innan sprungusveimsins í Gjástykki. Í júlígosinu 1980 rann raunar á tímabili allt hraunið frá gosstöðvunum við Snaga ofan í sprungu 2 km norðar (sjá mynd 2–5). Að sjálfsgöðu mátti búast við hraunrennsli ofan í sprungur, en það kom þó verulega á óvart hversu mikil áhrif þetta hafði. Sprungurnar, sem hraunið rann ofan í, gliðnuðu mikið og rifnuðu upp svo að skipti metrum. Þær lengdust líka og hljóta að hafa dýpkað mikið. Hraunið rann því neðanjarðar bæði niður á við og til hliðar og myndaði ganga. Stundum kom hraunið upp aftur og myndaði hraunbleðil á yfirborði sem var úr tengslum við meginflákann.

Gefist hefur kostur á að sjá og fylgjast með ýmsum fyrirbrigðum tengdum hraunrennsli. Myndast hafa úfin apalhraun og eggslétt helluhraun, en einnig svokölluð blokkhraun. Þau myndast þegar hálfstorknað helluhraun brotnar upp vegna þess að hraun bætist undir storknaða helluna. Yfirborð þeirra er því alsett stórum helluhraunsbjörgum, og eru hraun þessi mjög ill yfirferðar. Stundum rennur hraun ofan í gamalt hraun sem undir er, einkum ef það er mikið sprungið. Þessu fylgir nokkurt umrót við jaðar nýja hraunsins, þegar gamla hraunið springur og stykki úr því lyftast.

Allt frá upphafi umbrotanna hafa verið tekin sýni af hraunum sem upp hafa komið í hverju gosi og þau efnagreind.^{203,204,205,206} Hraunin eru öll úr basalti af svipaðri gerð og fyrir eru á svæðinu. Þó eru hraunin ekki öll eins. Greina má tvær megingerðir. Önnur er svokallað kvarts-þóleiít, og kemur það upp sunnan til á gossvæðinu, þ.e. innan öskjunnar. Það er sömu gerðar og efnið sem kom upp á sömu slóðum í Mývatnseldum²⁰² og raunar í öðrum gosum innan öskjunnar síðastliðin 10.000 ár. Hin kvikugerðin er frumstæðari, þ.e. er líklega dýpra að komin, er heitari og hefur haft minni tíma til að aðlagast. Hún nefnist ólivín-þóleiít og kemur upp á nyrðri hluta gossvæðisins. Í sama gosinu og á sömu sprungunni geta þannig komið upp tvær kvikugerðir samtímis. Skilin eru skörp og ávallt á sama stað, við nyrðri öskjubrúnina.

Þegar kvika nálgast yfirborðið minnkar þrýstingur í henni og losnar þá úr henni gas. Kvikugasið gerir vart við sig með ýmsu móti, en erfitt er að ná af því ómengduðum sýnum til að ákvarða samsetningu þess. Gert er ráð fyrir því að helstu gastegundir í upprunalega kvikuginu séu H₂ (vetni), CO₂, CO og SO₂. Gasið blandast við andrúmsloft, grunnvatn og efni í jarðhitakerfinu á leið sinni til yfirborðsins og tekur þátt í efnahvörfum. Fylgst hefur verið með efnasamsetningu gass í hverum og borholum allt frá því fyrir umbrot.^{146,145,252,253} Einnig hefur radonstyrkur í hveralofti verið mældur.⁷⁸ Gasið hefur haft mikil áhrif á jarðhitasvæðin við Leirhnjúk og Kröfluvirkjun. Hlutföll uppleystra efna í jarðhitavatninu og gufunni hafa



Mynd 2-14. Byrjun eldgoss 4. september 1984 séð úr flugvél. Á fyrstu myndinni sjást tvær gossprungur, hvor um sig um 1 km að lengd. Nýjar sprungur opnast síðan milli þeirra og til norðurs og suðurs, þangað til gossprungan er um 9 km löng.

breyst og hefur það valdið ómældum vandræðum við virkjun jarðhitans. Borholur stífluðust vegna útfellinga, og gasið dró mjög úr afli þeirra. Vandræðin voru mest fyrst en síðan hefur svæðið jafnað sig að verulegu leyti.

Gasústreymi er mjög áberandi við eldstöðvar og hraunjaðra meðan á eldgosum stendur. Stingandi þefurinn af SO_2 leynir sér að sjálfsögðu ekki, en auk þess má víða sjá logandi stróka standa upp úr jörðinni. Logarnir eru ljósbláir eða næstum litlausir og sjást illa í dagsbirtu. Þarna er sennilega á ferðinni logandi vetni. Ef lengi logar á sama stað getur bergið umhverfis útstreymisopið orðið glóandi. Stundum getur gasið sprungið, og má víða sjá litla sprengigíga, allt að 1 m í þver-



Mynd 2–15. Vinstra megin er nýmynduð gjá skammt sunnan við Hrutáffjöll. Hægra megin er lítill gígur eftir gassprengingu.

mál, í lausum jarðvegi við hraunjaðrana (mynd 2–15). Slíkar sprengingar bæði heyrðust og sáust, og hefur jafnvel legið við slysum vegna þeirra.

Í nokkur skipti hefur gefist tækifæri til að meta gasmagn í kvikunni sem upp kemur. Þetta hefur einkum verið í upphafi gosa þegar hraun rennur yfir mishæðótt landslag og hættir síðan að renna. Þá hefur mátt sjá hvar lægðir hafa fyllst af nýgosnu hrauni, sem gasið rýkur síðan úr. Stundum verður þá ekki annað eftir en þunn hraunskán á botni lægðar. Fundist hafa dæmi þess að allt að 80% af rúmmáli kviku sé gas. Þetta á þó líklega ekki við um alla kvikuna, og e.t.v. einungis fyrstu gusurnar í gosi. Víða má sjá merki um það hvernig hraun hjaðna þegar gasið fer úr þeim, t.d. þar sem hraun leggst upp að hlið. Þá virðist stundum sem hraunið hafi runnið upp í móti, því að hraunjaðarinn er hærri en hraunbreiðan.

TÚLKUN

Hér verður leitast við að draga upp einfaldaða mynd, eins konar hugarlíkan af Kröfluumbrotunum. Reynt verður að skýra atburðarásina með hliðsjón af upplýsingum um gerð jarðskorpunnar og krafta sem á hana verka, og tengja þær hugmyndum um uppruna og flutningsleiðir kviku. Smíði líkana af þessu tagi er vanda- verk. Það þarf að vera í samræmi við öll mæligögn sem fyrir hendi eru, einnig atburðarásina. Jarðeðlisfræðileg mæligögn eru aldrei fullkomin og túlkun þeirra

ork
Þá
við
an
eða
hel

Jar
Me
stö
eins
Un
P-b
veg
ulsi
Hra
hra
sko
hlut
sam
ins.

í þv
möt
kem
þær
á að
Þá
und
mik
inu
ugas
stró
mik
einh
er þ
sem
anna

Þá
mar
ari e
um,
þær
skor
lag,
liggu

orkar oft tvímælis. Eins kann menn að greina á um hvað skiptir máli og hvað ekki. Þá reynir verulega á jarðfræðilegt og eðlisfræðilegt innsæi manna, og samanburður við aðrar eldstöðvar og atburði er einnig nauðsynlegur. Túlkun í jarðfræði er sjaldan einhlít og líkanið, sem hér verður lýst, kann að vera rangt í einstökum atriðum eða í heild sinni. Það er heldur ekki óumdeilt. Reynt verður að gera grein fyrir helstu mótbárum og rökum gegn þeim.

Jarðskorpa, möttull og uppruni kvikunnar

Með könnun á útbreiðsluhraða skjálftabylgna hafa menn komist að þeirri niðurstöðu að jarðskorpan undir Íslandi sé sömu gerðar og skorpan undir úthöfum, að eins þykkari.^{122,109} Íslenska jarðskorpan virðist vera 10–14 km þykk víðast hvar. Undir skorpunni tekur möttullinn við, en undir meginlöndum og úthöfum er hraði P-bylgna í honum verulega meiri en í skorpunni, eða 8 km/sek. Undir Íslandi, hins vegar, finnst ekki svo mikill hraði fyrr en komið er miklu dýpra. Í efsta hluta möttulsins hér er hraðinn 7 km/sek.¹⁰⁹ En fleira er afbrigðilegt við íslenska möttulinn. Hraði S-bylgna er einnig tiltölulega lágur, jafnvel svo að hlutfall P- og S-bylgjuhraðanna er óeðlilega hátt. Enn fremur deyfast S-bylgjur óvenju mikið fyrir neðan skorpuna hér á landi. Þetta hefur verið túlkað svo að möttullinn undir Íslandi sé í hlutbráðnu ástandi. Mælingar á rafsegulbylgjum styðja þessar niðurstöður, en samkvæmt þeim er lag af vel leiðandi efni efst í möttlinum undir meginhluta landsins.³⁰ Há rafleiðni á svo miklu dýpi er einnig merki um að efnið sé hlutbráðið, þ.e. í því sé að finna bólur og æðar með bráðnu efni.^{38,39,330} Áætlað hefur verið að efst í möttlinum sé allt að 20% efnisins bráðið, en hlutfallið verði lægra þegar dýpra kemur. Þessar niðurstöður koma vel heim við niðurstöður þyngdarmælinga,³⁶⁴ en þær benda til þess að möttulefnið undir landinu hafi lágan eðlismassa. Líta má svo á að landið „fljóti“ á púða úr léttu efni.

Þessar niðurstöður tengjast mjög hugmyndum um „heitan reit“ og möttulstrók undir Íslandi. Heitir reitir eru kallaðir þeir staðir á jörðinni sem hafa óvenjulega mikla eldvirkni ef miðað er við umhverfi þeirra. Þeir standa oft hátt yfir umhverfinu og þar er varmaflæði upp úr jarðskorpunni mikið. Ísland er einn stærsti og öflugasti heiti reiturinn. Hugmyndir eru uppi um að undir heitum reitum séu möttulstrókar, þ.e. tiltölulega mjóir strókar þar sem möttulefni leitar hægt upp á við af miklu dýpi. Möttulstrókar eru ekki endilega tengdir plötuskilum. Það er e.t.v. að einhverju leyti tilviljun að hér á landi fara saman flekaskil og möttulstrókur. Það er þó möttulstrókurinn sem veldur mestri eldvirkninni og það er af hans völdum sem Ísland er ofansjávar en ekki á 2000–3000 m dýpi eins og aðrir hlutar flekaskilanna.

Þegar efnið í möttulstrók færast upp, lækkar þrýstingur þess og þar með bræðslu-mark. Hlutar efnisins taka að bráðna og bergkvikan, sem þannig verður til, er léttari en fasta efnið sem eftir verður. Fyrst í stað er kvikan í smáum bóllum eða æðum, sem smám saman stækka og renna saman. Þegar þær ná ákveðinni stærð, ná þær að stíga hraðar en fasta efnið umhverfis. Þær ná þó ekki að brjótast upp í skorpuna að svo komnu og safnast því saman undir henni. Þar myndast kvikuríkt lag, með allt að 20% kviku, sem situr í eins konar svampi úr föstu bergi. Þetta lag liggur undir stórum hluta landsins og er undirrót eldvirkinnar. Ekki er þó kvikan

enn í jafnvægi við umhverfi sitt, því að ofan á henni er eðlisþyngra efni. Hún leitar því hærra þegar færi gefst, annað hvort þegar jarðskorpan brestur eða leið opnast upp í kvikuhólf í jarðskorpunni. Hið síðara virðist hafa gerst við Kröflu árið 1974 eða fyrri hluta árs 1975. Svo mikið er víst að um mitt ár 1975 var þrýstingur í kvikuhólfi Kröflueldstöðvarinnar orðinn svo hár að verulega var tekið að bresta í þaki hólsins. Áframhaldandi skjálftavirkni sýnir að þrýstingurinn fór hækkandi þar til veggir hólsins brustu í fyrstu umbrotahrinunni 20. desember. Það er því ljóst að innstreymi í kvikuhólfið við Kröflu hófst talsvert löngu áður en gliðnun varð á sprungusveimnum.

Kvikuhólf voru fyrir hendi undir Kröflusvæðinu áður en umbrotin hófust, um það vitnar deyfing á S-bylgjum. Þar má gera ráð fyrir að legið hafi kvika frá undangengnum öldum eða árpúsundum, m.a. kvika sömu gerðar og upp kom í Mývatnseldum. Kvikun, sem tók að streyma inn í hólfið í upphafi núverandi umbrota, er hins vegar nýkomin úr möttlinum og á sér talsvert aðra sögu. Ekki er ólíklegt að hún sé annarrar gerðar, frumstæðari og eðlisþyngri, og verður komið nánar að því síðar.

Bergspenna og brotþol

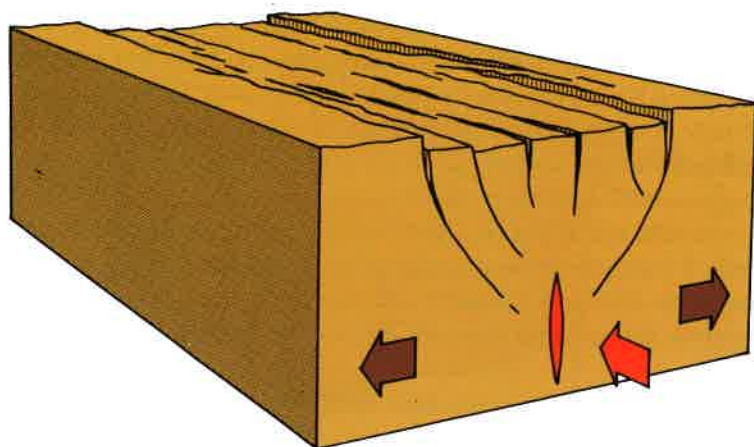
Í ótruflaðri jarðskorpu er spennu- eða þrýstingsástand líkt og í vökva. Þrýstingur vex með dýpi vegna þunga efnisins sem ofan á liggur, og spennan er jöfn í allar áttir. Ef aðrir kraftar en þyngdarkrafturinn verka á jarðskorpuna, bætast þeir við bergþungaspennuna og þrýstingur verður mismikill í mismunandi áttir. Mesti og minnsti þrýstingur eru hornréttir hvor á annan, og mismunur þeirra, mismunaspennan, veldur sveigju eða aflögun í berginu. Ef mismunaspennan fer yfir viss mörk, brotþol bergsins, brotnar það og veggir sprungunnar ganga til. Það kallast misgengi ef veggirnir hreyfast samsíða brotflatunum, en gjá eða togsprunga ef hreyfingin er hornrétt á brotflötinn. Gjár geta eingöngu myndast ef minnsti þrýstingur er neikvæður, þ.e. togspenna er ríkjandi. Við venjulegar aðstæður geta gjár eingöngu myndast nálægt yfirborði, því að bergþungaspennan sér til þess að þrýstispenna verður ríkjandi þegar neðar dregur í skorpunni. Þar verða því misgengishreyfingar ef bergið brotnar, en ekki gjár.

Það sem að ofan hefur verið sagt gildir um „þurra“ jarðskorpu. Brotþolið breytist verulega ef vökvi er í berginu, s.s. vatn eða bergkvika. Við aukinn vökvaþrýsting lækkar brotþolið, þannig að bergið brotnar við lægri mismunaspennu en ella. Bergið getur jafnvel brotnað fyrir tilverknað vökvaþrýstingsins eins saman. Þá myndast togsprunga eða gjá, sem fyllist jafnharðan af vökvanum. Sé vökvinn bergkvika, kallast þetta gangur. Vökvafylltar gjár geta myndast á miklu dýpi í jarðskorpunni. Skilyrði er að vökvaþrýstingur sé hærri en minnsti bergþrýstingur að viðbættum togstyrk bergsins.

Eins og fram kom í inngangi þessa kafla er eldstöðvakerfi Kröflu á flekaskilum, þar sem flekar færast í sundur. Þar bætist því lárétt togspenna jafnt og þétt við bergþungaspennuna. Aðstæður eru því þær, að minnsta spenna er lárétt og talsvert lægri en bergþungaspennan. Mesta spenna er að líkindum lóðrétt og jöfn bergþungaspennunni. Ef mismunaspennan er meiri en togstyrkur bergsins, geta skapast þær einkennilegu aðstæður, að vaxandi kvikuþrýstingur getur brotið berg-

Myn
myn
ar),
Gjár

ið, á
til y
Þar
skor
anna
hnei
Ú
miki
ræðs
fyr
sem
m.a.
min
við
0,5-
seigj
Þa
verð
breið
hann
meir
myn
Yfirb
grun



Mynd 2-16. Hugsað þversnið í gegnum sprungusveim, t.d. Gjástykki. Lóðréttur gangur myndast við kvikuhlaup úr suðri (rauð ör). Jarðskorpan beggja vegna færast til hliðar (örvar), en á yfirborði yfir ganginum sígur land og gjár gliðna. Þar myndast grunnur sigdalur. Gjárnar deyja út eða breytast í siggengi þegar dýpra dregur í jarðskorpunni.

ið, áður en hann er nógu hár til að yfirvinna bergþungaspennuna og flytja kvikuna til yfirborðs. Það myndast gangur, sem ekki getur náð yfirborði og valdið eldgosi. Þar við bætist að eðlismassi kvikunnar er að líkindum nálægt því jafn eðlismassa skorpunnar á 3–4 km dýpi. Þar er kvikan því í jafnvægi við umhverfi sitt nema annað komi til. Gangur sem myndast við þessar aðstæður er lóðréttur og hefur tilhneigingu til að breiðast út í lárétta stefnu.

Útbreiðsluhraði sprungu sem myndast vegna hárrar bergspennu í þurru bergi er mikill, Hann er á stærðarþrepinu kílómetrar á sekúndu. Útbreiðsluhraði gangs ræðst hins vegar af því hversu hratt kvika streymir um hann. Bergið rifnar ekki fyrr en kvika kemst að gangbroddinum og það er kvikan sem þegar er í ganginum sem þangað á greiðastan aðgang. Gangurinn lengist því með hraða sem stjórnast m.a. af breidd gangsins, hæð hans og lengd, og seigju kvikunnar.³⁰² Hraðinn minnkar eftir því sem gangurinn lengist. Þetta má sjá í mörgum umbrotahrinunum við Kröflu. Á fyrstu klukkustundum kvikuhlaupanna hefur mælst hraði á bilinu 0,5–1,2 metrar á sekúndu. Þessi hraði er í góðu samræmi við hugmyndir manna um seigju basaltkviku og vídd ganganna sem þarna mynduðust.

Það er háð breidd gangs og dýpi niður á hann hversu mikið og hvernig hans verður vart á yfirborði. Gangur djúpt í jarðskorpunni veldur landrasi á nokkuð breiðu svæði til hliðar, en landsigi á mjórri ræmu beint fyrir ofan. Eftir því sem hann liggur grynna, mjókkar áhrifasvæði hans, en jafnframt verða hreyfingarnar meiri. Ef hreyfingarnar verða meiri en bergið þolir, brotnar það og misgengur. Þá myndast sigdalur yfir ganginum, barmar hans rísa en botninn sígur (mynd 2-16). Yfirborðssprungur og sigdalur myndast ekki nema gangurinn sé breiður eða liggir grunnt.

Túlkun á atburðarás

Í upphafi Kröfluumbrotanna var togspenna há á flekaskilunum. Hún hefur væntanlega náð að hlaðast upp frá því í Mývatnseldum fyrir 250 árum. Spennan ein saman var þó ekki nógu há til að rífa skorpuna. Það var ekki fyrr en vaxandi kvikuþrýstingur á Kröflusvæðinu hafði lækkað brotmörk skorpunnar nægilega, að hún gat rifnað. Kvikuhólfið brast og gangar brutu sér leið til suðurs og norðurs. Einnig kom upp smágos, en það var líkast til ekki annað en jarðfræðilegt slys, því að gosið hætti um leið og kvikan fékk framrás annars staðar. Gangarnir fóru nokkuð djúpt, sem ráða má af því að í Mývatnssveit urðu sprunguhreyfingar á óvenju breiðu svæði. Í Gjástykki urðu óverulegar hreyfingar á yfirborði, og það var ekki fyrr en gangurinn kom í Kelduhverfi sem verulegar sprunguhreyfingar sáust. Þar hefur togspenna líklega verið hæst um þær mundir, og þar varð gangurinn breiðastur.

Á eftir fyrstu umbrotahrinunni kom fjögurra ára tímabil kvikuhlaupa, fyrst norður í Gjástykki, þá til suðurs og síðan aftur til norðurs. Í hlaupunum féll þrýstingur í kvikuhólfinu þegar kvikan leitaði lárétt út í sprungusveiminn, en á milli hlaupa óx þrýstingur við það að kvika streymdi upp í hólfið úr hlutbráðna laginu undir niðri. Í hvert sinn hækkaði þrýstingur umfram það sem hæst var fyrir næstu hrinu á undan. Þetta er skiljanlegt í ljósi þess, að hver gangur sem bætist við, hækkar minnstu þrýstispennuna í nágrenni hólfsins. Kvikuprýstingurinn þarf því að yfirstíga sífellt hærri mörk til að mynda nýjan gang. Þetta má orða þannig, að kvikuhólfið fái meira aðhald við hvern nýjan gang sem myndast út frá því.

Önnur merkileg regla kom fram í þessari atburðarás. Aðalumbrotasvæðin færðust yfirleitt nær Kröflusvæðinu með hverri hrinu (sjá mynd 2–3), þ.e. hver gangur fór styttri leið en sá næsti á undan. Þegar búíð er að slaka á togspennunni á hluta sprungusveimsins, verkar sá hluti sem hindrun fyrir ganga sem koma eftir sprungusveimnum frá Kröflusvæðinu. Þeir komast því ekki lengra. Þar við bætist að togspenna magnast við enda þess svæðis sem síðast gliðnaði mest. Næsti gangur er því líklegur til að staðnæmast þar og bóligna út. Það er athyglisvert að þetta gerðist alltaf við þann enda sem nær var Kröflusvæðinu.

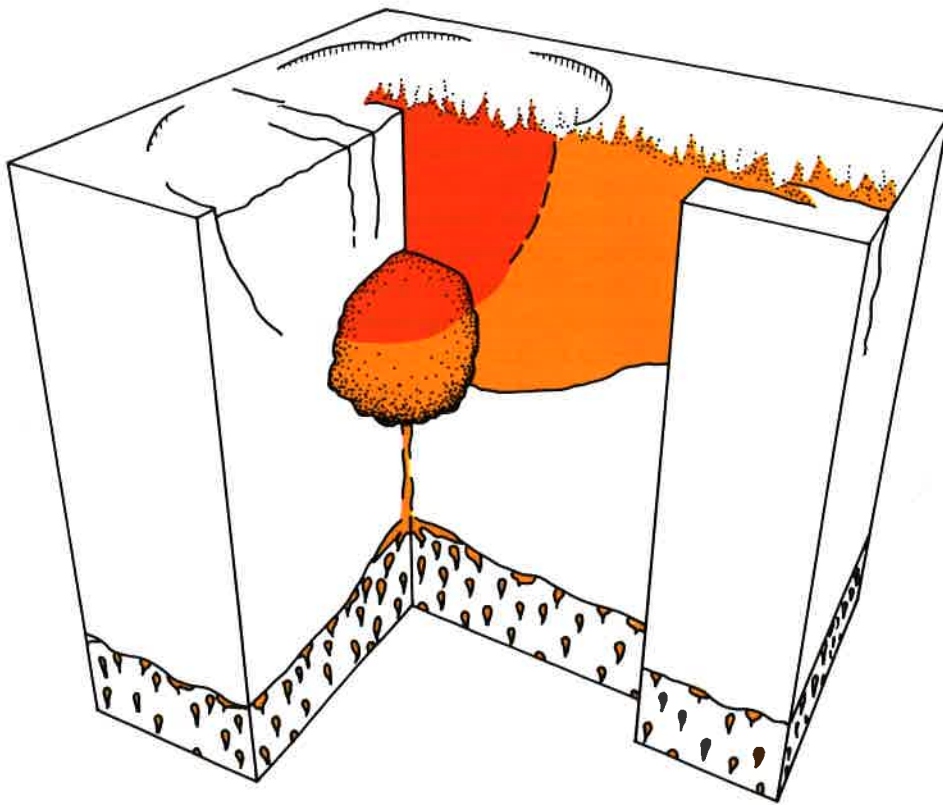
Við hvern gang sem myndaðist, lækkaði lárétta togspennan í nágrenni kvikuhólfsins, þ.e. minnsta þrýstispennan hækkaði og nálgadist bergpungaspennuna æ meir. Það var því fyrirsjáanlegt að fyrr eða síðar kæmi að því að ekki gætu myndast fleiri gangar og kvikuþrýstingur yrði nægilegur til að halda uppi stöðugu gosi um tíma. Þessi þáttaskil urðu, eins og áður sagði, í júlígosinu 1980. Þáttaskilin voru þó ekki alger. Nokkur gliðnun fylgdi þessu gosi og gosunum sem á eftir komu, einkum þar sem hraun flæddi ofan í gjár. Í desember 1980 varð einnig dálítið kvikuhlaup á milli gosa.

Í gosunum komu upp tvær gerðir af bergkviku. Telja verður líklegt að hér séu á ferðinni annars vegar gömul, þróuð kvika sem fyrir var í kvikuhólfinu, og hins vegar fersk, frumstæð kvika sem fór að streyma upp í kvikuhólfið í upphafi umbrotanna. Frumstæða kvikan er líklega eðlisþyngri en hin og gæti því legið undir henni í sama hólfinu án þess að blandast. Einnig er hugsanlegt að kvikutegundirnar séu aðskildar í einhvers konar undirhólfum. Þegar hólfið brestur, myndast líklega lóðrétt sprunga í vegg og þak þess, sem báðar kvikutegundirnar fara út í. Þró-

Mynd
hlu
kvika
konar
henni
veggir
fer upp

aða k
kvika
öskjun
sprung

Eftir
löng a
skömr
kviku
gosinu
farið e
meðan



Mynd 2-17. Einfaldað líkan af Kröflusvæðinu. Undir u.þ.b. 10 km þykkri jarðskorpu er hlutbráðið möttulefni. Kvikubólur stíga upp og safnast fyrir undir skorpunni. Þaðan streymir kvika upp í kvikuhólf á 3-7 km dýpi undir öskju Kröflueldstöðvarinnar. Í hólfinu er tvenns konar kvika. Efst er þróuð basaltkvika, ef til vill leifar frá fyrri umbrotum á svæðinu. Undir henni er frumstæðari og þyngri kvika, nýkomin að neðan. Þrýstingur í hólfinu vex þangað til veggir þess bresta og kvikan myndar gang. Efri kvikan leitar að mestu upp, en neðri kvikan fer upp og til hliðar út eftir sprungusveimnum.

Þaða kvikan er þá í efri hluta sprungunnar og gýs nær miðju svæðisins. Frumstæða kvikan fer út um vegg hólfins, rennur svo í dýpri hluta sprungunnar og gýs utan öskjunnar (mynd 2-17). Báðar kvikutegundirnar koma upp samtímis þegar sprungan opnast til yfirborðs.

Eftir 1981 hægði verulega á atburðarásinni. Aðstreymi kviku varð slitrótt og löng aðgerðalaus tímabil komu. Kvikan að neðan virðist koma upp í hólfid í skömmtum. Mótþrýstingur í hólfinu er orðinn hár og virðist megna að stöðva kvikurenslið langtímum saman. Þetta sást glögg þegar þrýstingur í hólfinu féll í gosinu 1984. Í kjölfar þess tók aðstreymi kviku mikinn fjörkipp. Aftur sótti í sama farið eftir að þrýstingur komst í hámark. Enn bætast kvikuskammtar í hólfid, og meðan svo er, er vart hægt að útiloka frekari gos og umbrot.

Mótbárur

Kvikuhlaupskenningin um atburðina í Kröflu, nokkurn veginn í þeirri mynd sem hún birtist hér, var fyrst lögð fram á fundi í Jarðfræðafélagi Íslands í október 1976. Mörgum fannst þá framandi sú hugmynd að kvika leitaði lárétt út eftir sprungusveimnum í stað þess að koma beint upp úr möttlinum, eins og áður var almennt talið. Menn voru þá nýbúnir að fylgjast með seigfljótandi hrauni renna í Vestmannaeyjum og fannst ólíklegt að slíkur vökvi gæti farið um þröngar sprungur á þeim hraða sem kom fram í Gjástykki. Þetta var að sjálfsögðu rétt, en seigja basaltkviku er nokkrum stærðarþrepum minni en seigja hraunsins í Heimaey. Það er raunar auðvelt að sýna með reikningum að hraði kvikuhlaupanna er vel innan skiljanlegra marka.³⁰² Þá var mönnum einnig tamt að líta á flotkrafta vegna mismunar á eðlisþyngd sem helsta drifkraft kvikunnar. Samkvæmt því er kvikunni eðlilegt að flytjast upp eða niður í skorpunni, en varla til hliðar. Hugmyndir um áhrif spennusviðs á rennislísiðir kviku voru skammt á veg komnar, en án þeirra er erfitt að skýra atburðina í Kröflu.

Spyrja má hvort hlutbráðna lagið undir skorpunni taki ekki meiri þátt í atburðarásinni í umbrotahrinum en kvikuhlaupskenningin gerir ráð fyrir. Vel mætti hugsa sér að atburðarásin byrjaði með gliðnun og gangamyndun einhvers staðar á sprungusveimnum.¹²³ Gangurinn fengi þar með efni sitt beint úr möttlinum undir niðri.³⁰ Þetta leiddi til þrýstingsfalls í hlutbráðna laginu, sem aftur leiddi til þess að kvika streymdi til baka niður úr kvikuhólfinu við Kröflu. Atburðarás sem þessi verður að teljast fremur líkleg í gosbeltum landsins, en hún á illa við atburðina við Kröflu. Í fyrsta lagi var uppstreymi í kvikuhólfið í Kröflu hafð mörgum mánuðum áður en sprungusveimurinn gliðnaði og fyrsti gangurinn myndaðist. Í öðru lagi byrja umbrotahrinurnar ævinlega við Kröflueldstöðina og breiðast þaðan út eftir sprungusveimnum. Í þriðja lagi skýrir þessi tilgáta ekki hvers vegna umbrotasvæðin færast sífellt nær öskjunni. Þau gætu allt eins færst fjær, vegna þess að sprungusveimurinn sem þegar hefur gliðnað er þar engin hindrun fyrir gangi sem kemur að neðan. Í fjórða lagi er þrýstingsferillinn við lok sigtímabils og í byrjun ristímabils ekki í samræmi við það, að landsigið verði vegna þrýstingsfalls í hlutbráðna laginu. Ef svo væri, mætti reikna með því, að í lok sigsins væri umframþrýstingur í hólfinu jafn umframþrýstingnum í hlutbráðna laginu. Til þess að innrennsli í hólfið geti hafist aftur, þarf þrýstingur í laginu að byggjast upp með aðstreymi úr möttlinum. Þetta gerist hægt, og því má búast við að uppstreymi í hólfið byrji hægt og aukist smám saman. Í rauninni er þessu öfugt farið. Innstreymi í hólfið er hratt í fyrstu en hægir síðan á sér. Þetta er vísbending um það að þrýstingur í laginu falli ekki svo teljandi sé í umbrotahrinum. Þvert á móti er munurinn á umframþrýstingi milli lagsins og hólsins mestur fyrst eftir umbrotahrinum. Samkvæmt kvikuhlaupskenningunni fellur þrýstingur í hólfinu vegna þess að gangur hleypur úr því út í skorpuna. Þrýstingsmunurinn sem rekur kvikurennslið upp í hólfið eykst, og við það örvast aðstreymið, sem er einmitt það sem mælingar sýna.

Ef til vill mætti hugsa sér að túlka hina skörpu landfræðilegu aðgreiningu kvikugerðanna tveggja sem rök gegn kvikuhlaupskenningunni. Frumstæða kvikan, sem upp kemur í Gjástykki, komi þá beint upp úr möttlinum en einungis þróaða kvikan, sem upp kemur innan öskjunnar, komi úr Kröfluhólfinu.³⁰ Þessi skipan kann

að virðast líkleg þegar horft er á tvívítt kort af svæðinu. Ef dæmið er athugað í þremur víddum, þ.e. dýptin tekin með, verður annað uppi á teningnum. Til viðbótar fyrri rökum sem tengjast goslokum og upphafi á nýju ristímabili, koma nú rök byggð á atburðarás í byrjun hrinu. Kvikurnar tvær koma upp samtímis og á sömu sprungunni. Annað hvort eru þær því nálægt hvor annarri frá byrjun, eins og kvikuhlaupskeningin gerir ráð fyrir, eða boð verða að berast langa leið frá annarri kvikunni til hinnar að nú sé kominn tími til að gjósa. Athugum nú síðari kostinn. Ef fyrst rifnar út frá hólfinu, þarf gangbroddur að fara norður og niður á 9–10 km dýpi til að hleypa hinni kvikunni af stað. Frumstæða kvikan þarf síðan að ná til yfirborðs á sama tíma og gangur sem fer frá hólfinu u.þ.b. 4 km skáhallt upp á við. Þetta er nánast óhugsandi. Boðin þurfa því að berast frá hlutbráðna laginu undir Gjástykki, og rifnunin að byrja þar. Gangur þarf nú að fara upp af 9–10 km dýpi, og til suðurs til að stinga á kvikuhólfinu á 3 km dýpi. Gangur úr hólfinu fer síðan upp og til norðurs. Þessi atburðarás er ekki óhugsandi, en ekki getur hún talist líkleg. Skjálftavirkni bendir t.d. til þess að alltaf rifni út frá hólfinu.

Til frekari glöggvunar eru í eftirfarandi skrá taldir nokkrir þættir í atburðarásinni sem eru í samræmi við kvikuhlaupskeninguna en virðast falla illa að öðrum hugmyndum um atburðarásina:

1. Aðstreymi kviku inn í kvikuhólf undir Leirhnjúk var hafið áður en fyrsta hrinan varð.
2. Á milli umbrotahrina eru jarðskorpuhreyfingar bundnar við Leirhnjúkssvæðið og nánasta umhverfi þess.
3. Umbrotahrinur byrja alltaf innan öskjunnar, og þaðan breiðist virknin út eftir sprungusveimnum.
4. Aðalgliðnunarsvæði í hverri umbrotahrinu er í flestum tilfellum nær öskjunni en í undangenginni hrinu.
5. Í umbrotahrinum er gott samræmi milli virkni úti á sprungusveimnum og sigræða innan öskjunnar. Þetta bendir til beins vökvasambands í gegnum gang í skorpunni, frekar en þrýstingsambands í gegnum hlutbráðið lag í möttli.
6. Landris byrjar venjulega aftur um leið og gliðnun eða gosvirkni hættir. Rishraði er mestur fyrst, en síðan dregur úr honum eftir því sem land hækkar.
7. Dæmi eru um að gangur myndist undir gangi sem áður var myndaður.
8. Í gosum koma upp tvær gerðir kviku. Skil milli gosstöðvanna eru skýr og ávallt á sama stað.

Ekki er hér verið að gera því skóna að allir gangar í gosbeltum Íslands verði til við lárétt kvikurensli. Ekkert er því til fyrirstöðu að kvika geti safnast fyrir við rætur jarðskorpunnar og brjóti sér þaðan leið upp á við og myndi gang. Slík atburðarás er raunar fremur líkleg. Þetta á hins vegar ekki við á Kröflusvæðinu í þetta sinn. Öll atburðarás í Kröflueldum bendir til þess að kvika hafi einungis safnast fyrir í grunnstæða hólfinu innan öskjunnar og þaðan hafi hún síðan brotist út í skorpuna og myndað ganga. Öll meginatriði mæligagna eru í samræmi við þessa túlkun, og sum verða varla skilin á annan hátt. Að sjálfsögðu er líklegt að raunveruleg mynd af atburðunum sé nokkru flóknari en sú sem hér er dregin upp.

Til dæmis bentu hæðar- og hallabreytingar lands í tengslum við gosið 1984 til þess að kvikugeymarnir væru fleiri en að framan greinir.⁹⁶ Þá benda mælingar á S-bylgjum til þess að kvikuhólfið sé tvískipt, a.m.k. ofan til.²⁸⁸

VÖKTUN OG SPÁR

Meðan á náttúruhamförum stendur er mjög eðlilegt að menn reyni að gera sér grein fyrir því hvert sé líklegt framhald atburðarásarinnar. Þetta er því mikilsverðara sem atburðirnir snerta líf og afkomu fleira fólks. Atriði sem skipta máli við spár um framvindu eldsumbrota eru m.a. eftirfarandi:

1. Góð þekking á jarðfræði svæðisins og skilningur á eðli og jarðfræðilegu umhverfi eldstöðvarinnar.
2. Samanburður við fyrri atburði í sömu eldstöð.
3. Samanburður við atburði í öðrum sambærilegum eldstöðvum, hér á landi eða annars staðar.
4. Mælitæki til að fylgjast með atburðarásinni og ástandi eldstöðvarinnar.

Þegar Kröfluumbrotin hófust voru nýkomnar út skýrslur um jarðfræði Kröflusvæðisins og gosbeltisins á Norðurlandi.^{120,217} Þar komu fram ýmis þau atriði sem skiptu sköpum í túlkun atburðanna sem á eftir komu. Megineldstöðin við Kröflu hafði verið skilgreind og afmörkuð ásamt öðrum svipuðum megineldstöðvum í gosbeltinu. Bent var á að megineldstöðvum fylgja sprungusveimar sem samsvara að öllum líkindum gangasveimunum sem liggja gegnum megineldstöðvar í rofna basaltstaflanum á Austfjörðum. Einnig vildi svo vel til að lokið var ýmsum grunnmælingum á Kröflusvæðinu, s.s. hæðar- og þyngdarmælingum, vegna virkjunar jarðgufu. Jarðfræðingar fengu þess vegna tiltölulega fljótt góða hugmynd um það hvaða atriði gæfu bestar vísbendingar um ástand eldstöðvarinnar.

Nærtækasti samanburður við aðra atburði var að sjálfsögðu við Mývatnselda á 18. öld, sem voru þá lengstu eldsumbrot á Íslandi sem menn þekktu. Sá samanburður benti þegar til þess að atburðirnir gætu dregist á langinn. Þar við bættist að sá skilningur sem fljótlega fékkst á atburðarás Kröfluelda¹²⁵ átti einnig mætavel við um Mývatnselda sem og atburðina 1874–75 í Öskju og Sveinagjá. Nærtækasta dæmið erlendis frá var eldfjallið Kilauea á Hawaii. Þar streymir stöðugt upp kvika í hólf innan öskju eldstöðvarinnar. Eldgos eru tíð og kvikuhlaup út eftir sprungusveimum eru þar alþekkt. Þessi atburðarás hefur verið í gangi eins lengi og menn muna þar í landi. Allt benti því til langvarandi umbrota, þar sem hlutur eldgosa færi vaxandi með tímanum.

Með þeim skilningi á eðli umbrotanna í Kröflu, sem kemur fram í undangengnum kafla, er ljóst að þrýstingurinn í kvikuhólfinu er sá þáttur sem mest áhrif hefur á rás atburðanna. Best væri því ef hægt væri að mæla hann beint. Það er að sjálfsögðu ekki hægt, en fylgjast má með þrýstingsbreytingum með ýmsum óbeinum hætti. Þar hafa reynst best halla- og hæðarmælingar, sprungumælingar og skjálftamælingar. Aukinn þrýstingur veldur landrasi sem fylgjast má með á síritandi hallamælum utan í riskúlunni. Sprungur á hvirfli riskúlunnar gleikka og þar má fylgjast með gleikkuninni á síritandi sprungumælum. Skjálftar sem eiga upptök í þaki kvikuhólfsins aukast oftast þegar þrýstingur fer yfir fyrri mörk, og er skjálftavirkn-

in háð rishraðanum. Stundum eru halla- og sprungumælingar mjög truflaðar af frosthreyfingum í yfirborðslögum, og eru þá skjálftar helsta vísbending um landris og þrýstingsaukningu í kvikuhólfinu. Með mælingunum má skipta umbrotatímanum niður í tímabil og flokka þau eftir hættustigi:

1. *Tiltölulega örugg tímabil.* Þrýstingur er lægri en hann var fyrir undangengnar umbrotahrinur. Á þessum tímabilum fer þrýstingur í kvikuhólfinu oft vaxandi, stundum hraðvaxandi, en hann nægir ekki til að kvikan geti brotist út úr því. Skjálftavirkni er lítil.

2. *Tímabil andvara.* Þrýstingur er orðinn hærri en fyrir undangengnar hrinur, en fer ekki vaxandi. Landhæð stendur í stað og skjálftavirkni er lítil sem engin. Eldgos gæti brotist út fyrir jarðfræðilega tilviljun eða áhrif annars staðar frá, en líkur fyrir því eru ekki sérlega miklar. Full ástæða er til að fylgjast náið með framvindu mála.

3. *Tímabil aðgæslu.* Þrýstingur er hærri en fyrir undangengnar hrinur og fer vaxandi. Þessu ástandi fylgir landris og oftast skjálftar. Kvika getur brotist út úr hólfinu og leitað út eftir sprungusveimnum í kvikuhlaupi eða upp til yfirborðs. Fylgjast þarf náið með mælitækjum ef ástæða þykir til að geta aðvarað fólk. Allar umbrotahrinur við Kröflu hingað til hafa byrjað á tímabilum í þessum flokki.

4. *Aðvörunartími.* Kvika brýst út úr hólfinu og þrýstingur í því fellur. Land sígur tiltölulega hratt og skjálftar í þaki hólsins hætta. Skjálftar fylgja hins vegar broddi gangsins þar sem hann skýst út frá hólfinu, út eftir sprungusveimnum eða í átt til yfirborðs. Ef gos verður innan öskjunnar, brýst það út eftir um eina klukkustund, en lengri tími líður ef gosið kemur upp utan öskjunnar.

5. *Umbrotahrina.* Kvikuhlaupum fylgja talsverðir skjálftar, sem ágerast eftir því sem tími líður og landsig hægir á sér. Ef kvikan nær yfirborði í gosi, hætta skjálftar að mestu. Aðgæslu er þörf ef skjálftar hætta ekki eftir að gos brýst út. Þá er líklegt að kvika sé enn að brjóta sér leið í jarðskorpunni. Landris hefst ekki að ráði aftur fyrr en gos eða kvikuhlaup hættir.

Mælingar hafa nánast alltaf sýnt ótvírætt hvenær tímabil í einum flokki hættir og nýtt tekur við. Á aðgæslutímabilum hefur oft þótt ástæða til að hafa vakt jarðfræðinga í Mývatnssveit til að vera almannavörnum til ráðuneytis. Jafnvel þótti stundum ástæða til að vakta mælitækin allan sólarhringinn til þess að unnt væri að gefa út aðvörun í tæka tíð. Þetta var einkum á fyrstu árum umbrotanna, meðan stórir vinnuflokkar voru við Kröflu vegna virkjunarframkvæmda. Alltaf hefur reynst unnt að gefa út aðvörun þegar kvikan hefur rofið vegg hólfsins, og aðeins í fyrstu hrinunni kom aðvörunin eftir að gos kom upp. Í öllum öðrum tilvikum kom aðvörunin tímanlega áður en gos braust út.

Gildi eftirlits á umbrotasvæðum er ekki einungis fólgið í því að geta sagt fyrir um yfirvofandi eldgos, heldur einnig að geta sagt til um hvenær *ekki* er ástæða til viðbúnaðar. Þannig hefur t.d. verið hægt í lok hveirrar umbrotahrinu að segja til um það hve langt muni líða þar til aftur megi búast við umbrotum. Þessar spár um örugg tímabil hafa alltaf staðist vel.

Stundum heyrir sú skoðun að lítið gagn sé í mælitækjum á umbrotasvæðum. Þau geri lítið annað en að auka fólk á áhyggjur. Reynsla mín, meðal annars af Kröflusvæðinu, er á annan veg. Á svæðum þar sem eldgos og jarðskjálftar hafa

gengið yfir er eðlilegt að fólk sé uggandi um framvindu mála. Til þess þarf ekki mælitæki. Það skapar hins vegar oft öryggiskennd að vita og skilja hvað er á seyði. Skilningur á eðli umbrotanna gerir mönnum kleift að greina hvenær ástæða er til að óttast og hvenær ekki. Mælitækin koma því oft í veg fyrir ástæðulausan ótta.

TJÓN

Enginn einstakur atburður við Kröflu hefur valdið tjóni sem jafnast á við það sem varð til dæmis í Vestmannaeyjum 1973, eða það sem orðið hefur og getur orðið í stórum Suðurlandsskjálftum. Þegar á heildina er lítið er þó ljóst að tjón er orðið talsvert í tengslum við Kröfluumbrotin. Enn hefur ekki verið gerð tilraun til að meta tjónið til fjár, en hér verða talin helstu atriði sem koma við sögu.

Mest varð tjónið vafalítið í Kísiliðjunni í Bjarnarflagi og Kröfluvirkjun, svo og á Kópaskeri. Á Kópaskeri varð tjónið allt í skjálftanum mikla 13. janúar 1976. Skjálftinn var 6,5 stig á Richterskvarða og átti upptök í Öxarfirði, um 12 km frá þorpinu. Áhrif hans voru mikil. Pung húsgögn færðust til, ljósakrónur slógust upp í loft, og brýr sunnan við þorpið gengu til og skemmdust. Fólk við vinnu í frystihúsinu var hætt komið þegar stæða af frosnu kjöti hrundi. Ker í hafnargarðinum gengu til og missigu. Tjón varð þó furðu lítið miðað við hve hristingur var mikill. Nokkur hús skemmdust, en þó aðeins eitt svo illa að það taldist ekki íbúðarhæft. Öll húsin sem skemmdust stóðu á misgengjum, sem gjöktu eða gengu til í skjálftanum.³¹⁶ Það verður að teljast líklegt, að tjón á húsum hefði lítið sem ekkert orðið, ef tekið hefði verið tillit til misgengja við skipulagningu byggðarinnar.

Í Kísiliðjunni varð tjónið aðallega í kvikuhlaupunum í Bjarnarflagi í apríl og september 1977. Verksmiðjan og hráefnisþrær voru innan sprungusveimsins sem gliðnaði. Tvær hráefnisþrær eyðilögðust, hráefnistankur fluttist til og skrifstofubyggingin klofnaði í tvennt. Tvær borholur, sem lögðu verksmiðjunni til gufu, gáfust upp. Þá jókst jarðhitavirkni svo í nágrenni rafstöðvarinnar að nauðsynlegt varð að flytja hana burt. Gerð var ný hráefnisþró utan aðalsprungusvæðisins og ný hola var boruð til gufuöflunar. Vegna þessara truflana rýrnuðu afköst verksmiðjunnar næstu árin og hlaust af því umtalsvert fjárhagstjón. Eftir þessa atburði var gerður varnargarður umhverfis Kísiliðjuna til að verja hana gegn hugsanlegu hraunrennsli.

Við Kröfluvirkjun varð tjónið ef til vill ekki eins áþreifanlegt og í Bjarnarflagi, en þó var það umtalsvert. Umbrotin breyttu eiginleikum jarðhitasvæðisins svo að það varð erfiðara til vinnslu. Hlutfall gass í jarðhitavökvanum jókst verulega, og olli það erfiðleikum. Útfellingar stífluðu borholur svo að borkostnaður jókst. Þá má telja líklegt að aukið hlutfall gufu hafi gert rennsli jarðhitavökvans að borholunum tregara, og þannig minnkað afl hveirrar holu. Í hrinunni í maí 1979 stíflaðist hola vegna kvikuinnskots. Talsverðir varnargarðar hafa verið reistir til að verja mannvirki gegn hugsanlegu hraunrennsli niður í Hlíðardal. Ekki eru þó áhrif umbrotanna eingöngu til ills. Benda má á að orka háhitasvæðanna við Kröflu og í Bjarnarflagi á líklega rót sína að rekja til atburða af því tagi sem nú hafa orðið. Atburðirnir nú eiga því vafalítið eftir að lengja nýtingartíma jarðhitans á þessum svæðum þegar til langs tíma er lítið.

Í Kelduhverfi varð mikið rask í stóru hrinunum tveimur, í desember 1975 – febrúar 1976 og janúar 1978. Miklar gjár mynduðust í tún og vegir rofnuðu. Símalínur og girðingar tognuðu eða slitnuðu. Vegna landsigs fór mikið land undir vatn og nýtt stöðuvatn, Skjálftavatn, varð til.⁸³ Farvegur Jökulsár breyttist einnig og urðu tvær jarðir á söndunum í Öxarfirði illbyggilegar vegna vatnagangs. Í hrinunum 1976–79 mynduðust miklar gjár í Gjástykki. Næstu árin kvörtuðu bændur nokkuð undan lélegum heimtum fjár af þessu svæði. Töldu menn að fé hefði týnst í gjánum. Svo mikið er víst að víða var Gjástykki hættulegt yfirferðar vegna nýrra sprungna, sem opnast höfðu undir jarðvegi. Í gosunum 1980, 1981 og 1984 fór talsvert landsvæði á þessum slóðum undir hraun. Tæpast gat það þó talist gott haglendi, og tjón var því varla mikið af þeim sökum.

Í Mývatnssveit hefur orðið margvíslegt tjón auk þess sem þegar er nefnt í Kísliðjuni. Í fyrstu hrinunni gengu til sprungur, m. a. Stóragjá. Laskaðist þá eitt hús sem stóð á henni. Í hrinunum 1977 rofnaði vegurinn austur yfir Námaskarð vegna sprunguhreyfinga. Einnig slitnuðu hitaveituleiðslan til Reykjahlíðarhverfis og símakaplar þar sem sprungur gliðnuðu undir. Varnargarður var gerður austan við byggðina til að tefja fyrir hugsanlegu hraunflóði úr Bjarnarflagi. Þá eru ótalin áhrif umbrotanna á fólkið sjálft sem hefur mátt búa við óvissu og öryggisleysi vegna umbrotanna í hátt á annan áratug.

Heimildir

1. Aðalbjörg Erlendsdóttir 1984. Framleiðsla rykmýs í Laxá 1978–1979. Rannsóknastöð við Mývatn, skýrsla 2. Náttúruverndarráð, fjölrit 14: 73–76.
2. Alerstam, T. 1981. The course and timing of bird migration. Bls. 11–54 í: *Animal Migration*. (Ritstj. D.J. Aidley). Society for Experimental Biology Seminar Series. Cambridge University Press.
3. Árni Einarsson 1979. Fáein orð um skötuorm (*Lepidurus arcticus* (Pallas)). Náttúrufræðingurinn 49: 105–111.
4. Árni Einarsson 1982. The palaeolimnology of Lake Mývatn, northern Iceland: Plant and animal microfossils in the sediment. *Freshwater Biology* 12: 63–82.
5. Árni Einarsson 1985. Botn Mývatns: Fortíð, nútíð, framtíð. Náttúrufræðingurinn 55: 153–173.
6. Árni Einarsson 1988. Distribution and movements of Barrow's goldeneye *Bucephala islandica* young in relation to food. *Ibis* 130: 153–163.
7. Árni Einarsson 1989. Fuglatalningar á Mývatni og Laxá árið 1989. Rannsóknastöð við Mývatn, skýrsla 6, 27 bls.
8. Árni Einarsson 1990. Lax í efri Laxá. Greinargerð um líkleg áhrif laxa á lífríki árinna ofan Brúa. Rannsóknastöð við Mývatn, skýrsla 7. Náttúruverndarráð, fjölrit 22, 37 bls.
9. Árni Einarsson 1990. Settlement into breeding habitats by Barrow's Goldeneyes *Bucephala islandica*: Evidence for temporary oversaturation of preferred habitat. *Ornis Scand.* 21: 7–16.
10. Árni Einarsson og Hafliði Hafliðason 1988. Predictive paleolimnology: Effects of sediment dredging in Lake Mývatn, Iceland. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 23: 860–869.
11. Árni Einarsson, Hafliði Hafliðason og Hlynur Óskarsson 1988. Mývatn. Saga lífríkis og gjóskutímatal í Syðriflóa. Rannsóknastöð við Mývatn, skýrsla 4. Náttúruverndarráð, fjölrit 17. 96 bls.
12. Árni Hjartarson og Ólafur Ingólfsson 1988. Preboreal glaciation of southern Iceland. *Jökull* 38: 1–16.
13. Árni Magnússon og Páll Vídalín 1943. Jarðabók. Hið íslenska fræðafélag, Kaupmh.
14. Arnþór Garðarsson 1961. Fugladauði af völdum netja í Mývatni. Náttúrufræðingurinn 31: 145–168.
15. Arnþór Garðarsson 1967. Hvinendur á Íslandi og nokkur orð um ákvörðun hvinandar. Náttúrufræðingurinn 37: 76–92.
16. Arnþór Garðarsson 1968. Ljós höfðændur (*Anas americana*) á Íslandi. Náttúrufræðingurinn 38: 165–175.
17. Arnþór Garðarsson 1978. Íslenski húsandarstofninn. Náttúrufræðingurinn 48: 162–191.
18. Arnþór Garðarsson 1979. Waterfowl populations of Lake Mývatn and recent changes in numbers and food habits. *Oikos* 32: 250–270.
19. Arnþór Garðarsson 1984. Fuglamerkingar við Mývatn 1977–1983. Rannsóknastöð við Mývatn, skýrsla 2. Náttúruverndarráð, fjölrit 14: 140–144.
20. Arnþór Garðarsson 1988. Stofnbreytingar í Mývatni og líklegar orsakir þeirra. *Tímarit Háskóla Íslands* 3: 55–66.
21. Arnþór Garðarsson og Árni Einarsson 1978. Athugun á svæðisbundnu fæðuvali bleikju í Mývatni sumarið 1977. Veiðimálastofnun, fjölrit 21.
22. Arnþór Garðarsson, Árni Einarsson og Erlendur Jónsson 1979. Fæða bleikju í Mývatni 1978. Rannsóknastöð við Mývatn, skýrsla 1. Náttúruverndarráð, fjölrit 5: 110–114.
23. Arnþór Garðarsson og Kristinn Haukur Skarphéðinsson 1984. A census of the Icelandic Whooper Swan population. *Wildfowl* 35: 37–47.
24. Arnþór Garðarsson og Kristinn Haukur Skarphéðinsson 1985. Veturseta álfatar á Íslandi. *Bliki* 4: 45–56.
25. Arnþór Garðarsson, Árni Einarsson, Gíslí Már Gíslason, Guðmundur V. Helgason og Jón Ólafsson 1987. Yfirlitskönnun á botnlífi Mývatns. Rannsóknastöð við Mývatn, skýrsla 3. Náttúruverndarráð, fjölrit 18. 57 bls.
26. Arnþór Garðarsson, Gíslí Már Gíslason og Árni Einarsson 1988. Long term changes in the Lake Mývatn ecosystem. *Aqua Fennica* 18: 125–135.
27. Áskell Löve og Doris Löve 1948. Jurtir í Slúttnesi. Náttúrufræðingurinn 18: 23–26.
28. Áskell Snorrason 1940. Öskulagið mikla á Norðurlandi. Náttúrufræðingurinn 36: 84–85.
29. Axel Björnsson 1976. Jarðhræringar við Kröflu. Náttúrufræðingurinn 46: 177–198.
30. Axel Björnsson 1985. Dynamics of crustal rifting in NE Iceland. *J. Geophys. Res.* 90: 10151–10162.
31. Axel Björnsson, Kristján Sæmundsson, Páll Einarsson, Eysteinn Tryggvason og Karl Grönvold 1977. Current rifting episode in north Iceland. *Nature* 266: 318–323.
32. Axel Björnsson og Oddur Sigurðsson 1978. Hraungos úr borholu í Bjarnarflagi. Náttúrufræðingurinn 48: 19–23.

33. Axel Björnsson, Gunnar Johnsen, Sven Sigurðsson, Gunnar Þorbergsson og Eysteinn Tryggvason 1979. Rifting of the plate boundary in North-Iceland 1975-1978. *J. Geophys. Res.* 84: 3029-3038.
34. Axel Björnsson, Grímur Björnsson og Hjörtur Tryggvason 1984. Breytingar á sprunguvidd og grunnvatnshita í Kröflueldum 1975-1983. Orkustofnun, fjölrít OS-84085/JHD-37B.
35. Axel Björnsson, Kristján Sæmundsson og Benedikt Steingrímsson 1984. Kröflueldar, staða og horfur í október 1984. Orkustofnun OS-84077/JHD-31. 21 bls.
36. Axel Björnsson, Grímur Björnsson, Ásgeir Gunnarsson og Gunnar Þorbergsson 1985. Breytingar á landhæð við Kröflu 1974-1984. Orkustofnun, fjölrít OS-85019. 67 bls.
37. Baldur Línadal 1959. Kísilgúrvinnsla úr leðju Mývatns. Tímarit Verkfræðingafélags Íslands 44: 19-29.
38. Beblo, M. og Axel Björnsson 1980. A model of electrical resistivity beneath NE-Iceland, correlation with temperature. *J. Geophysics* 47: 184-190.
39. Beblo, M., Axel Björnsson, Knútur Árnason, B. Stein og P. Wolfgram 1983. Electrical conductivity beneath Iceland. - Constraints imposed by magnetotelluric results on temperature, partial melt, crust and mantle structure. *J. Geophysics* 53: 16-23.
40. Bemmelen, R.W. van og M.G. Rutten 1955. Tablemountains of Northern Iceland. E.J. Brill, Leiden. 217 bls.
41. Bengtson, S.-A. 1970. Location of nest-sites of ducks in Lake Mývatn area, NE-Iceland. *Oikos* 21: 218-229.
42. Bengtson, S.-A. 1970. Density of passerine bird communities in Iceland. *Bird Study* 17: 260-268.
43. Bengtson, S.-A. 1971. Food and feeding of diving ducks breeding at Lake Mývatn, Iceland. *Ornis Fennica* 48: 77-92.
44. Bengtson, S.-A. 1971. Habitat selection of duck broods in Lake Mývatn area, North-East Iceland. *Ornis Scand.* 2: 17-26.
45. Bengtson, S.-A. 1971. Hunting methods and choice of prey of Gyrfalcon *Falco rusticolus* at Mývatn in Northeast Iceland. *Ibis* 113: 468-476.
46. Bengtson, S.-A. 1971. Variations in clutch-size in ducks in relation to the food supply. *Ibis* 113: 523-526.
47. Bengtson, S.-A. 1972. Athuganir á varpháttum fálka (*Falco rusticolus*) í Mývatnssveit 1960-1969. Náttúrufræðingurinn 42: 67-71.
48. Bengtson, S.-A. 1972. Ecological segregation, reproduction, and fluctuations in the size of duck populations in Iceland with special reference to the ducks in Lake Mývatn area and the harlequin duck *Histrionicus histrionicus* (L.). Doktorsritgerð við háskólann í Lundi, Svíþjóð.
49. Bengtson, S.-A. 1972. Breeding ecology of the harlequin duck *Histrionicus histrionicus* (L.) in Iceland. *Ornis Scand.* 3: 1-19.
50. Bengtson, S.-A. 1972. Reproduction and fluctuations in the size of duck populations at Lake Mývatn, Iceland. *Oikos* 23: 35-58.
51. Bengtson, S.-A. 1974. Jaktbeteende och byttesval hos en isländsk population av stenfalk. *Fauna och Flora* 70: 8-12.
52. Bengtson, S.-A. og S. Ulfstrand 1971. Food resources and breeding frequency of the harlequin duck *Histrionicus histrionicus* in Iceland. *Oikos* 22: 235-239.
53. Bernauer, F. 1943. Junge Tektonik auf Island und ihre Ursachen. Bls. 14-64 í: Spalten auf Island. K. Wittwer. Stuttgart.
54. Bjarni Sæmundsson 1901. Fiskirannsóknir 1900. Skýrsla til landshöfðingja. *Andvari* 26: 53-61.
55. Bjarni Sæmundsson 1905. Zoologiske Meddelelser fra Island VIII. Vidensk. Meddel. fra den naturh. Foren. i København.
56. Bjarni Sæmundsson 1915. Fiskirannsóknir 1913 og 1914. Skýrsla til Stjórnarráðsins. *Andvari* 40: 35-51.
57. Bjarni Sæmundsson 1923. Fiskirannsóknir 1921-1922. *Andvari* 48: 67-107.
58. Bjarni Sæmundsson 1926. Íslensk dýr 1. Fiskarnir. Bókaverslun Sigfúsar Eymundssonar. Reykjavík. XVI+528 bls.
59. Boström, B. 1984. Potential mobility of phosphorus in different types of lake sediment. *Int. Revue. ges. Hydrobiol.* 69: 457-474.
60. Bragi Árnason 1976. Groundwater Systems in Iceland Traced by Deuterium. *Vísindafélag Íslendinga, Rit* 42. 236 bls.
61. Brooks, J. L. og S.I. Dodson 1965. Predation, body size and composition of plankton. *Science* 150: 28-35.
62. Bryndís Brandsdóttir og Páll Einarsson 1979. Seismic activity associated with the September 1977 deflation of the Krafla central volcano in NE Iceland. *J. Volcanol. Geothermal Res.* 6: 197-212.
63. Cas, R.A.F. og J. Wright 1987. Volcanic successions, modern and ancient. Unwin Hyman, London. 528 bls.
64. Cholnoky, B.J. 1968. Die Ökologie der Diatomeen in Binnengewässern. Weinheim.
65. Clase, H.J., F. Cooke, T.A. Hill og W.J. Roff 1960. A survey of the slawonian grebe at Mývatn, Iceland. *Bird Study* 7: 76-81.
66. Conley, D.J., S.S. Kilham og E. Theriot 1989. Differences in silica content between marine and freshwater diatoms. *Limnology and Oceanography* 34: 205-213.
67. Cramp, S. og K.E.L. Simmons (ritstj.) 1977.

- Handbook of the Birds of Europe the Middle East and North Africa: the Birds of the Western Palearctic. Volume 1. Ostrich to Ducks. Oxford University Press. Oxford. 722 bls.
68. Cuker, B.E. og S.C. Mozley 1981. Summer population fluctuations, feeding and growth of *Hydra* in an arctic lake. *Limnology and Oceanography* 26: 697-708.
 69. Dales, R. P. 1967. Annelids. Hutchinson University Library, London. 200 bls.
 70. Dansgaard, W., Sigfús J. Johnsen, N. Reeh, N. Gundestrup, H.B. Clausen og C.U. Hammer 1975. Climatic changes, Norsemen and modern man. *Nature* 255: 24-28.
 71. Davies, D.M. og B.V. Peterson 1956. Observations on the mating, feeding, ovarian development and oviposition of adult blackflies (Simuliidae: Diptera). *Can. J. Zool.* 34: 616-655.
 72. Davies, D.M., B.V. Peterson og D.M. Wood 1962. The black flies (Diptera, Simuliidae) of Ontario. Part I. Adult identification and distribution with description of six new species. *Proc. ent. Soc. Ont.* 92: 70-154.
 73. Davies, R. W., F. J. Wrona og L. Linton 1979. A serological study of prey selection by *Helobdella stagnalis* (Hirudinoidea). *Journal of Animal Ecology* 48: 181-194.
 74. De Ridder, M. 1972. Rotatoria. *Zool. of Iceland II* (13). Einar Munksgaard, Kaupmannahöfn og Reykjavík.
 75. Dinesen, G. B. 1926. 10 Aars Ophold iblandt nordislandske Fugle. G. Dinesen, København. 52 bls.
 76. Edmondson, W.T. og G.G. Winberg (ritstj.) 1971. Secondary Productivity in Fresh Waters. IBP Handbook. Blackwell, Oxford. 358 bls.
 77. Egill Hauksson 1975. Jarðskjálftamælingar á Kröflusvæði. *Skjálftabréf* 4: 3-4.
 78. Egill Hauksson 1981. Episodic rifting and volcanism at Krafla in North Iceland: Radon (²²²Rn) emission from fumaroles near Leirhnjúkur. *J. Geophys. Res.* 86: 11806-11814.
 79. Egill Hauksson 1983. Episodic rifting and volcanism at Krafla in North Iceland: Growth of large ground fissures along the plate boundary. *J. Geophys. Res.* 88: 625-636.
 80. Erlendur Jónsson 1987. Rykmý. *Náttúrufræðingurinn* 57: 21-33.
 81. Erlendur Jónsson, Arnþór Garðarsson og Gísli Már Gíslason 1986. A new window trap used in the assessment of the flight periods of Chironomidae and Simuliidae (Diptera). *Freshwater Biology* 16: 711-719.
 82. Eysteinn Tryggvason 1976. Jarðskjálftar og jarðrask í Kelduhverfi og Mývatnssveit. *Skjálftabréf* 6: 6-7.
 83. Eysteinn Tryggvason 1976. Landslagsbreytingar samfara jarðskjálftunum 1975-1976. *Náttúrufræðingurinn* 46: 124-128.
 84. Eysteinn Tryggvason 1978. Distance measurements in 1977 in the Krafla-Mývatn area and observed ground movements. *Norræna eldfjallastöðin, fjölrit* 7810, 47 bls.
 85. Eysteinn Tryggvason 1978. Tilt observations in the Krafla-Mývatn area. 1976-1977. *Norræna eldfjallastöðin, fjölrit* 7802. 45 bls.
 86. Eysteinn Tryggvason 1978. Umbrotahrinan við Kröflu 10.-14. nóvember 1978. *Norræna eldfjallastöðin, fjölrit* 7815. 10 bls.
 87. Eysteinn Tryggvason 1979. Tilt observations in the Krafla-Mývatn area, progress report. *Norræna eldfjallastöðin, fjölrit* 7907. 55 bls.
 88. Eysteinn Tryggvason 1980. Distance measurements in the Krafla-Gjástykki geodimeter network. *Norræna eldfjallastöðin, fjölrit* 8002, 42 bls.
 89. Eysteinn Tryggvason 1980. Eldgosið norðan Leirhnjúks 16. mars 1980. *Skjálftabréf* 42: 11-12.
 90. Eysteinn Tryggvason 1980. Observed ground deformation during the Krafla eruption of March 16, 1980. *Norræna eldfjallastöðin, fjölrit* 8005. 12 bls.
 91. Eysteinn Tryggvason 1980. Subsidence events in the Krafla area, North Iceland, 1975-1979. *J. Geophys.* 47: 141-153.
 92. Eysteinn Tryggvason 1981. Kröflugosið 16. marz 1980. *Týli* 11: 17-18.
 93. Eysteinn Tryggvason 1982. Observed ground deformation during the Krafla eruption of March 1980. *Arquipelago, Seria Ciencias da Natureza, III*: 45-56. Ponta Delgada.
 94. Eysteinn Tryggvason 1983. Distance measurements in the Gjástykki-Krafla-Mývatn area 1979-1982. Progress report. *Norræna eldfjallastöðin, fjölrit* 8301, 48 bls.
 95. Eysteinn Tryggvason 1984. Widening of the Krafla fissure swarm during the 1975-1981 volcano-tectonic episode. *Bull. Volcanol.* 47: 47-69.
 96. Eysteinn Tryggvason 1986. Multiple magma reservoirs in a rift zone volcano: Ground deformation and magma transport during the September 1984 eruption of Krafla, Iceland. *J. Volcanol. Geothermal Res.* 28: 1-44.
 97. Eysteinn Tryggvason 1986. Progressive tilt in the Krafla-Mývatn area 1976-1985. *Norræna eldfjallastöðin, fjölrit* 8601.
 98. Eysteinn Tryggvason 1987. Mývatn lake level observations 1984-1986 and ground deformation during a Krafla eruption. *J. Volcanol. Geothermal Res.* 31: 131-138.
 99. Faber, F. 1822. *Prodromus der isländischen Ornithologie oder Geschichte der Vögel Islands*. Kopenhagen. 109 bls. + tafla.
 100. Famme, D. og J. Knudsen 1985. Anoxic sur-

- vival, growth and reproduction by the freshwater annelid, *Tubifex* sp., demonstrated using a new simple anoxic chemostat. Comp. Biochem. Physiol. A. 81A: 251-253.
101. Feddersen, A. 1886. Laxveiðar og silungsveiðar á Íslandi. Nokkur orð um rannsóknarferðina 1884. Andvari 11: 109-154.
 102. Finnur Guðmundsson 1951. The effect of the recent climatic changes on the bird life of Iceland. Proceedings Xth International Ornithological Congress. Uppsala: 502-514.
 103. Finnur Guðmundsson 1979. The past status and exploitation of the Mývatn waterfowl populations. Oikos 32: 232-249.
 104. Fisher, J. B. 1982. Effects of macrobenthos on the chemical diagenesis of freshwater sediments. Bls. 177-218 í: Animal-Sediment Relations. (Ritstj. P. L. McCall og M.J.S. Tevesz). Plenum Press. New York.
 105. Fjeldsá, J. 1973. Feeding and habitat selection of the horned grebe, *Podiceps auritus* (Aves), in the breeding season. Vidensk. Meddr dansk naturh. Foren. 136: 57-95.
 106. Fjeldsá, J. 1973. Territory and the regulation of population density and recruitment in the horned grebe *Podiceps auritus arcticus* Boje, 1822. Vidensk. Meddr dansk naturh. Foren. 136: 117-189.
 107. Fjeldsá, J. 1975. En taksering af Hættemåge *Larus ridibundus* og Havterne *Sterna parasaea* i Mývatn-området, N.Ø. Island. Dansk orn. Foren. Tidsskr. 69: 65-72.
 108. Fjeldsá, J. 1975. Recent changes in the waterfowl situation in the lakes Mývatn and Vikingavatn, Iceland. Dansk orn. Foren. Tidsskr. 69: 89-102.
 109. Gebrande, H., H. Miller og Páll Einarsson 1980. Seismic structure of Iceland along RRISP-Profile I. J. Geophysics 47: 239-249.
 110. Geir Gígja 1972. Vatnalffræðilegar athuganir við Mývatn. Íslenskar landbúnaðarrannsóknir 4: 3-121.
 111. Gerke, K. 1977. Über neuere horizontale und vertikale Krustenbewegung in Island. Mitteilungen der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig 12: 3-6.
 112. Gerke, K., D. Möller og B. Ritter 1978. Geodätische Lagemessungen zur Bestimmung horizontaler Krustenbewegungen in Nordost-Island. Bls. 23-33 í: Festschrift für Walter Höpcke zum 70. Geburtstag. Hannover.
 113. Gísli Már Gíslason 1981. Predatory exclusion of *Apatania zonella* (Zett.) by *Potamophylax cingulatus* (Steph.) (Trichoptera: Limnephilidae) in Iceland. Proc. 3rd. int. Symp. Trich. Series Entomologia 20: 93-98. Junk. The Hague.
 114. Gísli Már Gíslason 1985. The life cycle and production of *Simulium vittatum* Zett. in the River Laxá, North-East Iceland. Verh. Internat. Verein. Limnol. 22: 3281-3287.
 115. Gísli Már Gíslason og Arnþór Garðarsson 1988. Long term studies on *Simulium vittatum* Zett. (Diptera: Simuliidae) in the River Laxá, North Iceland, with particular reference to different methods used in assessing population changes. Verh. Internat. Verein. Limnol. 23: 2179-2188.
 116. Gísli Már Gíslason og Vigfús Jóhannsson 1985. Bitmýið í Laxá í Suður-Pingeyjarsýslu. Náttúrufræðingurinn 55: 175-194.
 117. Gísli Már Gíslason og Vigfús Jóhannsson. Effects of food and temperature on the life cycle of *Simulium vittatum* Zett. (Diptera: Simuliidae) in the River Laxá, N-Iceland. Verh. Internat. Verein. Limnol. 24 (í prentun).
 118. Granéli, W. 1979. The influence of *Chironomus plumosus* larvae on the exchange of dissolved substances between sediment and water. Hydrobiologica 66: 149-159.
 119. Grotnes, P. og A. Klementsen 1989. Et stortilt ökologisk experiment. Ottar 176: 42-49.
 120. Guðmundur Guðmundsson, Guðmundur Pálmason, Karl Grönvold, Karl Ragnars, Kristján Sæmundsson og Stefán Arnórsson 1971. Námafjall - Krafla. Áfangaskýrsla um rannsókn jarðhitasvæðanna. Orkustofnun, fjölrit.
 121. Guðmundur A. Guðmundsson 1984. Fæða holdýrsins *Hydra* í Mývatni. Rannsóknastöð við Mývatn, skýrsla 2. Náttúruverndarráð, fjölrit 14: 77-82.
 122. Guðmundur Pálmason 1971. Crustal Structure of Iceland from Explosion Seismology. Vísindafélag Íslendinga, Rit 40. 187 bls.
 123. Guðmundur Pálmason 1981. Crustal rifting, and related thermo-mechanical processes in the lithosphere beneath Iceland. Geol. Rundschau 70: 244-260.
 124. Guðmundur Sigvaldason 1983. Volcanic prediction in Iceland. Bls. 193-213 í: Forecasting Volcanic Events. (Ritstj. H. Tazieff og J.C. Sabroux). Developments in Volcanology 1. Elsevier.
 125. Guðmundur Sigvaldason, Karl Grönvold, Eysteinn Tryggvason og Páll Einarsson 1976. Greinargerð um jarðfræðilegt ástand Kröflusvæðisins og ályktanir um hættu á eldgosí. Morgunblaðið 27. ágúst.
 126. Guðni Guðbergsson 1989. Bleikjan í Mývatni 1987 og 1988. Veiðimálastofnun, fjölrit VMSTR-/89013. 26 bls.
 127. Guðrún Larsen 1982. Gjóskutímatal Jökuldals og nágrennis. Bls: 51-65 í: Eldur er í norðri. Sögufélag. Reykjavík.
 128. Guðrún Larsen 1984. Recent volcanic history of the Veiðivötn fissure swarm, southern Iceland - an approach to volcanic

risk a
Res. 2
129. Guðrún
1977. Jökull
130. Guðrún
Pórar
a geol
land. I
131. Gunná
tributio
in Lak
drobio
132. Gunná
í M
JHD78
133. Gunná
Sven S
change
neath
J. Geo
134. Hachis
Birds o
iv + 12
135. Hákon
vatns.
136. Hákon
miðlun
svífs. C
bls.
137. Hákon
í vötn
fjölrit
138. Hákon
tion a
Crustal
32: 195
139. Hákon
arctic
back C
vatn. C
140. Hákon
and its
Mývatn
141. Hákon
Pórisva
kvísl.
VOD-1
142. Hákon
í Mýv
Mývatn
rit 14: 5
143. Hákon
Mývatn
OS-870
144. Hákon
Náttúru
145. Halldór
1986. C
Krafla

- risk assessment. *J. Volcanol. Geothermal Res.* 22: 33–58.
129. Guðrún Larsen og Sigurður Þórarinnsson 1977. H_2 and other acid Hekla tephra layers. *Jökull* 27: 28–46.
 130. Guðrún Larsen, Karl Grönvold og Sigurður Þórarinnsson 1979. Volcanic eruption through a geothermal borehole at Námafjall, Iceland. *Nature* 278: 707–710.
 131. Gunnar Steinn Jónsson 1987. The depth-distribution and biomass of epilithic periphyton in Lake Thingvallavatn, Iceland. *Arch. Hydrobiol.* 108: 531–547.
 132. Gunnar V. Johnsen 1978. Þyngdarmælingar í Mývatnssveit. Orkustofnun, fjölrít JHD7849.
 133. Gunnar V. Johnsen, Axel Björnsson og Sven Sigurðsson 1980. Gravity and elevation changes caused by magma movement beneath the Krafla caldera, Northeast-Iceland. *J. Geophys.* 47: 1–3.
 134. Hachisuka, M.U. 1927. *A Handbook of the Birds of Iceland*. Taylor & Francis. London. iv + 128 bls.
 135. Hákon Aðalsteinsson 1975. Fiskstofnar Mývatns. *Náttúrufræðingurinn* 45: 154–177.
 136. Hákon Aðalsteinsson 1976. Þórisvatn, áhrif miðlunar og Köldukvíslarveitu á líffskilyrði svífs. Orkustofnun, fjölrít OS-ROD 7643, 30 bls.
 137. Hákon Aðalsteinsson 1978. Plöntu og dýralíf í vötnum á Auðkúluheiði. Orkustofnun, fjölrít OS-ROD 7806, 113 bls.
 138. Hákon Aðalsteinsson 1979. Seasonal variation and habitat distribution of benthic Crustacea in Lake Mývatn in 1973. *Oikos* 32: 195–201.
 139. Hákon Aðalsteinsson 1979. Size and food of arctic char *Salvelinus alpinus* and stickleback *Gasterosteus aculeatus* in Lake Mývatn. *Oikos* 32: 228–231.
 140. Hákon Aðalsteinsson 1979. Zooplankton and its relation to available food in Lake Mývatn. *Oikos* 32: 162–194.
 141. Hákon Aðalsteinsson 1981. Afdrif svífsins í Þórisvatni eftir miðlun og veitu úr Köldukvísl. Orkustofnun, fjölrít OS-81025/VOD-11, 55 bls.
 142. Hákon Aðalsteinsson 1984. Framvinda svífs í Mývatni 1972–1982. Rannsóknastöð við Mývatn, skýrsla 2. Náttúruverndarráð, fjölrít 14: 93–139.
 143. Hákon Aðalsteinsson 1987. Vöktun svífs í Mývatni 1986. Orkustofnun, fjölrít OS-87017/VOD-04, 7 bls.
 144. Hákon Aðalsteinsson 1987. Veidivötn. Náttúrufræðingurinn 57: 185–204.
 145. Halldór Ármannsson og Jón Benjamínsson 1986. Changes of gas concentrations in Krafla geothermal fluids. *Proc. 5th Symposium on Water-Rock Interaction*. Reykjavík: 13–15.
 146. Halldór Ármannsson, Ásgrímur Guðmundsson og Benedikt S. Steingrímsson 1987. Exploration and development of the Krafla geothermal area. *Jökull* 37: 13–30.
 147. Halldór Kjartansson 1972. Leirmýndanir í Dalasýslu og Þingeyjarsýslum. Orkustofnun, fjölrít, 53 bls.
 148. Hantzsch, B. 1905. *Beitrag zur Kenntniss der Vogelwelt Islands*. R. Friedländer & Sohn. Berlin. 341 bls.
 149. Haraldur Sigurðsson 1978. Kortasaga Íslands frá lokum 16. aldar til 1848. Bókaútgáfa Menningarsjóðs og Þjóðvinafélagsins, Reykjavík. 279 bls.
 150. Haraldur Sigurðsson og B. Loebner 1980. Deep-sea record of Cenozoic explosive volcanism in the North Atlantic. *Bls.* 289–316 í: *Tephra Studies*. Nato Advanced Study Inst. Series C.
 151. Head, C.D. 1896. Ornithological notes from Iceland. *Ornithologist* 1: 125–129.
 152. Heimir Þorleifsson og Ólafur Hansson 1970. *Mannkynssaga BSE. I. Fram til 800*. Bókaverslun Sigfúsar Eymundssonar, Reykjavík. 411 bls.
 153. Helgi Hallgrímsson 1969. Útbreiðsla plantna á Íslandi með tilliti til loftslags. Fyrri hluti. *Landleitin útbreiðsla*. Náttúrufræðingurinn 39: 17–31.
 154. Helgi Hallgrímsson 1973. Rannsóknir á svifi í Mývatni og Laxá 1970–71. Náttúrugripasafnið á Akureyri, fjölrít nr. 4. 110 bls.
 155. Helgi Hallgrímsson 1975. Vatnsaugu (*Nos-toc prunifforme*). *Týli* 5: 10–12.
 156. Helgi Hallgrímsson 1979. *Veröldin í vatninu*, handbók um vatnalíf á Íslandi. Askur, Reykjavík. 215 bls.
 157. Helgi Hallgrímsson 1982. Um Gæsadal við Gæsafjöll og uppruna hans. *Bls.* 145–158 í *Eldur er í norðri*. Afmælisrit Sigurðar Þórarinnssonar. Sögufélagið.
 158. Helgi Jóhannesson og Sturla F. Birkisson 1989. Setflutningar í Mývatni. Yfirborðssetið í Mývatni og botnrof í Ytriflóa. Vegagerð ríkisins, fjölrít, 28 bls.
 159. Helgi Jónasson 1937. Gróður í Slúttnesi. Náttúrufræðingurinn 7: 150.
 160. Helgi Jónasson 1972. Flóra Mývatnssveitar. *Acta Botanica Islandica* 1: 32–42.
 161. Helgi Jónasson. Óbirtar ferðadagbækur. Varðveittar á Héraðsskjalasafni Þingeyinga.
 162. Hill, D. A. og N. Ellis 1984. Survival and related changes in the foraging behaviour and time budgets of Tufted Ducklings *Aythya fuligula*. *Ibis* 126: 544–550.
 163. Hilmar J. Malmquist, Sigurður S. Snorrason og Skúli Skúlason 1985. Bleikjan í Þingvallavatni I. Fæðuhættir. Náttúrufræðingurinn

- 55: 195–217.
164. Hindar, K., N. Ryman og G. Ståhl 1986. Genetic differentiation among local populations and morphotypes of Arctic Char, *Salvelinus alpinus*. Biological Journal of the Linnean Society 27: 269–285.
165. Hjörtur Tryggvason 1976. Jarðskjálftahrina í sunnanverðu Gjástykki 31. október til 2. nóvember 1976. Skjálftabréf 16: 4–5.
166. Hjörtur Tryggvason 1977. Náttúruhamfarir í Mývatnssveit í september 1977. Skjálftabréf 25: 2–5.
167. Hjörtur Tryggvason 1977. Stutt skýrsla um eldgosið norðan Leirhnjúks 8.–9. september 1977. Týli 7: 57–58.
168. Howarth, R.W., R. Marino, J. Lane og J.J. Cole 1988. Nitrogen fixation in freshwater, estuarine, and marine ecosystems. 1. Rates and importance. Limnology and Oceanography 33: 669–687.
169. Hrbacek, J.M., M. Dvorakova, V. Korinek og L. Prochazkova 1961. Demonstration of the effect of the fish stock on the species composition of zooplankton and the intensity of metabolism of the whole plankton association. Verh. Internat. Verein. Limnol. 14: 192–195.
170. Hunding, C. 1979. The oxygen balance of Lake Mývatn, Iceland. Oikos 32: 139–150.
171. Hynes, H.B.N. 1975. The stream and its valley. Verh. Internat. Verein. Limnol. 19: 1–15.
172. Hörður Kristinsson 1984. Um gróður á Reykjanesskaga. Árbók Ferðafélags Íslands 57: 113–125.
173. Häberle T. 1979. Bárugarðarnir við Mývatn. Prófrítgerð í landafræði við háskólann í Zürich. 84+47 bls.
174. Imbrie, J. og K.P. Imbrie 1979. Ice Ages. Solving the Mystery. Enslow Publishers Hillside, N.J. 224 bls.
175. Jakob H. Línal 1964. Með huga og hamri, jarðfræðidagbækur og ritgerðir. Bókaútg. Menningarsjóðs. 410 bls.
176. Jóhannes Sigfinnsson 1964. Landnemar meðal fugla við Mývatn. Árbók Þingeyinga 1964 (1965) 7: 179–182.
177. Jóhannes Sigfinnsson og Ragnar Sigfinnsson 1943. Um fuglamerkingar við Mývatn. Náttúrufræðingurinn 13: 119–124.
178. Johnson, L. 1980. The Arctic Charr, *Salvelinus alpinus*. Bls. 15–98 í: Charrs, Salmonid Fishes of Genus *Salvelinus*. (Ritstj. E.K. Balon). Dr. W. Junk. The Hague.
179. Jón Benediktsson (Jón Bendixsen) 1747 (Útg. 1957). Description over Nordersijssels udi Island Situation, Biærge, Klipper, Fiælde, Dale og adskillige Producter og Beskaffenhed til Land og Vand. Sýslulýsingar 1744–1749. Sögurit 28: 218–251. Reykjavík.
180. Jón Benjamínsson 1981. Tephra layer „a“. Bls. 331–337 í: Tephra Studies. (Ritstj. S. Shelf og R.S.J. Sparks). D.Reidel Publ. Comp., Dordrecht.
181. Jón Jónsson 1877. Jón Jónsonn's saga. The genuine autobiography of a modern Icelander. Fraser's Magazine 15: 1–33. Endurútgefin 1966 af Ísafoldarprentsmiðju.
182. Jón Kristjánsson 1973. Fiskifræðilegar athuganir á Þingvallavatni. Bráðabirgðaskýrsla. Veidimálastofnun, fjölrit, 11 bls.
183. Jón Kristjánsson 1978. Niðurstöður úr tilraunaveiðum í Mývatni 2.–8. júní 1978. Veidimálastofnun: Skýrsla til Veidifélags Mývatns, dags. 12. júní 1978. 4 bls.
184. Jón Kristjánsson 1978. Urriðaveiðin í Laxá í Þingeyjarsýslu ofan Brúa 1977. Veidimálastofnun, fjölrit 22, 9 bls.
185. Jón Kristjánsson 1979. Stofnstærðarsveiflur, affli og veiðiálag í Mývatni 1977 og 1978. Rannsóknastöð við Mývatn, skýrsla 1. Náttúruverndarráð, fjölrit 5: 100–109.
186. Jón Kristjánsson 1979. Urriðarannsóknir í Laxá 1974–1978. Rannsóknastöð við Mývatn, skýrsla 1. Náttúruverndarráð, fjölrit 5: 94–99.
187. Jón Kristjánsson 1979. Urriðaveiðin í Laxá í Þingeyjarsýslu ofan Brúa 1978. Veidimálastofnun, fjölrit 28, 8 bls.
188. Jón Kristjánsson 1982. Urriðaveiðin í Laxá í Þingeyjarsýslu 1979–1981. Veidimálastofnun, fjölrit 34, 10 bls.
189. Jón Kristjánsson 1986. Fiskifræðilegar rannsóknir í Mývatni 1985. Veidimálastofnun, fjölrit R86001, 17 bls.
190. Jón Ólafsson 1979. Könnun á aukningu fosfórs og köfnunarefnis í jarðvatni við Mývatn. Rannsóknastöð við Mývatn, skýrsla 1. Náttúruverndarráð, fjölrit 5: 48–58.
191. Jón Ólafsson 1979. Physical characteristics of Lake Mývatn and River Laxá. Oikos 32: 38–66.
192. Jón Ólafsson 1979. The chemistry of Lake Mývatn and River Laxá. Oikos 32: 82–112.
193. Jón S. Ólafsson 1987. Fæða mýlirfa (Diptera: Chironomidae) í Mývatni. Prófrítgerð í líffræði við Háskóla Íslands. 62 bls.
194. Jonsson, B., Skúli Skúlason, Sigurður S. Snorrason, O. T. Sandlund, Hilmar J. Malmquist, Pétur M. Jónasson, R. Gydemo og T. Lindem 1988. Life history variation of polymorphic Arctic charr. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 45: 1537–1547.
195. Jón Sæmundsson 1726. Sandferdig Relation om det udi Island Brændende Field Krabla, og andre der omkring liggende Smaae Fielde, baade med Jordskielv, Torden og Aske-Fald. Khöfn. 3 bls. Endurprentað í Týli 6: 41–42.
196. Kamp-Nielsen, L., H. Mejer og S. E. Jörgensen 1982. Modelling the influence of

biot
sed
Hyd
Kan
gro
Geo
198. Kar
and
sur
Nor
stö
199. Kar
cher
Cen
bls.
200. Kar
gos
42:
201. Kar
10.–
202. Kar
172
Nor
203. Kar
com
um
for
Oce
um
204. Kar
ical
Nor
205. Kar
198
47:
206. Kar
198
4–6
207. Kar
Kvi
Skj
208. Kar
bro
197
209. Kar
Bra
18.–
210. Kar
Bra
Eld
198
10.
211. Kos
ness
to e
Eur
212. Koz
of th
ficie
213. Krap

- bioturbation on the vertical distribution of sedimentary phosphorus in L. Esrom. *Hydrobiologia* 91: 197–206.
197. Kanngieser, E. 1983. Vertical component of ground deformation in north Iceland. *Ann. Geophys.* 1: 321–328.
198. Karhunen, R. 1988. Eruption mechanism and rheomorphism during the basaltic fissure eruption in Biskupsfell, Kverkfjöll, North-Central Iceland. *Norræna eldfjallastöðin*, fjölrit 8802, 91 bls.
199. Karl Grönvold 1972. Structural and petrochemical studies in the Kerlingarfjöll region, Central Iceland. *Doktorsritgerð Oxford*. 237 bls., fjölrituð.
200. Karl Grönvold 1980. Umbrotahrina og eldgos við Kröflu 16. mars 1980. *Skjálftabréf* 42: 8–10.
201. Karl Grönvold 1980. Eldgosið í Gjástykki 10.–18. júlí 1980. *Skjálftabréf* 43: 5–7.
202. Karl Grönvold 1984. Mývatn fires 1724–1729. Chemical composition of the lava. *Norræna eldfjallastöðin*, fjölrit 8401.
203. Karl Grönvold 1988. Krafla lavas and lava composition within a fault swarm. Symposium on Geologic and Geochemical Evidence for Segmentation of Continental and Oceanic Rifts, Woods Hole. Abstract Volume: 16.
204. Karl Grönvold og H. Mäkipää 1978. Chemical composition of Krafla lavas 1975–1977. *Norræna eldfjallastöðin*, fjölrit 7816.
205. Karl Grönvold og Kristján Sæmundsson 1981. Hraungos í Kröflueldum. *Skjálftabréf* 47: 6–14.
206. Karl Grönvold og Kristján Sæmundsson 1982. Hraun í Kröflueldum. *Skjálftabréf* 51: 4–6.
207. Karl Grönvold og Páll Einarsson 1978. Kvikuhaup úr Kröflueldstöðinni í júlí. *Skjálftabréf* 32: 4–7.
208. Karl Grönvold og Páll Einarsson 1978. Umbrotahrina við Kröflu 10.–15. nóvember 1978. *Skjálftabréf* 35: 2–3.
209. Karl Grönvold, Páll Einarsson og Bryndís Brandsdóttir 1980. Eldgos á Kröflusvæðinu 18.–23. október. *Skjálftabréf* 45: 5–10.
210. Karl Grönvold, Páll Einarsson, Bryndís Brandsdóttir og Hjörtur Tryggvason 1982. Eldgosið á Kröflusvæði 18.–23. nóvember 1981 og aðdragandi þess. *Skjálftabréf* 49: 7–10.
211. Koskimies, J. og L. Lahti 1964. Cold-hardiness of the newly hatched young in relation to ecology and distribution in ten species of European ducks. *Auk* 81: 281–307.
212. Kozlovsky, D.G. 1968. A critical evaluation of the trophic level concept. I. Ecological efficiencies. *Ecology* 49: 48–59.
213. Krapu, G.L. 1974. Feeding ecology of pin-tail hens during reproduction. *Auk* 91: 278–290.
214. Kristinn P. Magnússon og M.M. Ferguson. 1987. Genetic analysis of four sympatric morphs of Arctic charr, *Salvelinus alpinus*, from Thingvallavatn, Iceland. *Environmental Biology of Fishes* 20: 67–73.
215. Kristján Lilliendahl 1984. Viðkoma toppandar við Mývatn 1982. *Rannsóknastöð við Mývatn*, skýrsla 2. Náttúruverndarráð, fjölrit 14: 83–86.
216. Kristján Sæmundsson 1973. Straumrákaðar klappir í kringum Ásbyrgi. *Náttúrufræðingurinn* 43: 52–60.
217. Kristján Sæmundsson 1974. Evolution of the axial rifting zone in Northern Iceland and the Tjörnes fracture zone. *Geol. Soc. Amer. Bull.* 85: 495–504.
218. Kristján Sæmundsson 1977. Jarðfræðikort af Íslandi. Blað 7, Norðausturland. Landmælingar Íslands og Náttúrufræðistofnun Íslands.
219. Kristján Sæmundsson 1978. Fissure swarms and central volcanoes of the neovolcanic zones of Iceland. *Geol. Journal, Spec. Iss.* 10: 415–432.
220. Kristján Sæmundsson 1982. Öskjur á virkum eldfjallasvæðum á Íslandi. Bls. 221–239 í: *Eldur er í norðri*. Sögufélag. Reykjavík.
221. Kristján Sæmundsson 1984. Gossaga Kröflu, Hverfjallsskeið. Ráðstefna um stöðu Kröfluvirkjunar 1.–2. 11. Rarik/Kröfluvirkjun, fjölrituð skýrsla.
222. Krüper, T. 1857. Der Mývatn und seine Umgebung. *Naumannia* 7 (1): 33–66.
223. Krüper, T. 1857. Der Mývatn und seine Umgebung. *Naumannia* 8 (2): 1–33.
224. Krüper, T. 1857. Die Inseln des Mývatn. *Naumannia* 7 (2): 33–42 + kort.
225. Kvamme, T., J. Mangerud, H. Furnes og W.F. Ruddiman 1989. Geochemistry of Pleistocene ash zones in cores from the North Atlantic. *Norsk Geol. Tidsskr.* (í prentun).
226. Lamb, H.H. 1977. *Climate: Present, Past and Future. 2: Climatic History and the Future*. Methuen & Co, London. 835 bls.
227. Lamb, H.H. 1982. *Climate History and the Modern World*. Methuen & Co, London, New York. 387 bls.
228. Lamby, K. 1941. Zur Fischereibiologie des Mývatn, Nord-Island. *Zeitschrift für Fischerei und deren Hilfswissenschaften* 39: 749–805.
229. Langeland, A. 1982. Interactions between zooplankton and fish in a fertilized lake. *Holarct. Ecol.* 5: 273–310.
230. Langeland, A. og P. Larsson 1980. The significance of the predator food chain in lake metabolism. *Prog. Wat. Tech.* Vol. 12,

- Norway, bls. 181-187. IAWPR/Pergamon Press Ltd.
231. Leonardson, L. 1984. N₂ fixation by blue-green algae in two South Swedish lakes. Methodology and effects of sewage diversion and lake restoration. Institute of Limnology, University of Lund.
 232. Lindegaard, C. 1979. The invertebrate fauna of Lake Mývatn, Iceland. *Oikos* 32: 151-161.
 233. Lindegaard, C. 1979. A survey of the macroinvertebrate fauna, with special reference to Chironomidae (Diptera) in the rivers Laxá and Kráká, northern Iceland. *Oikos* 32: 281-288.
 234. Lindegaard C. og Pétur M. Jónasson 1975. Life cycles of *Chironomus hyperboreus* Staeger and *Tanytarsus gracilentus* (Holmgren) (Chironomidae, Diptera) in Lake Mývatn, Northern Iceland. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 19: 3155-3163.
 235. Lindegaard C. og Pétur M. Jónasson 1979. Abundance, population dynamics and production of zoobenthos in Lake Mývatn, Iceland. *Oikos* 32: 202-227.
 236. Lindemann, R.L. 1942. The trophic dynamic aspect of ecology. *Ecology* 23: 399-418.
 237. Loden, M.S. 1974. Predation by Chironomidae (Diptera) larvae on oligochaetes. *Limnology and Oceanography* 19: 156-159.
 238. Lorenz, V. 1974. Vesiculated tuffs and associated features. *Sedimentology* 21: 273-291.
 239. Mangerud, J., S.E. Lie, H. Furnes, I.L. Kristiansen og L. Lømo 1984. A younger Dryas ash bed in Western Norway and its possible correlations with tephra in cores from the Norwegian Sea and in North Atlantic. *Quaternary Research* 21: 85-104.
 240. Margrét Lilja Magnúsdóttir 1990. Dreifing duggandar og skúfandar á Mývatni. Prófrítgerð í líffræði við Háskóla Íslands. 131 bls.
 241. Markús Á. Einarsson 1979. Climatic conditions of the Lake Mývatn area. *Oikos* 32: 29-37.
 242. Markús Á. Einarsson 1989. Hitafar á Íslandi á þessari öld. *Veðurstofa Íslands. Fjölrit*, 66 bls.
 243. McCall, P. L. og M. J. S. Tevesz 1982. The effects of benthos on physical properties of freshwater sediments. Bls. 105-176 í: *Animal-Sediment Relations.* (Ritstj. P. L. McCall og M. J. S. Tevesz). Plenum Press. New York.
 244. Merritt, R. W., K. W. Cummins og T. M. Burton 1984. The role of aquatic insects in the processing and cycling of nutrients. Bls. 134-163 í: *The Ecology of Aquatic Insects.* (Ritstj. V. H. Resh og D. M. Rosenberg). Praeger. New York.
 245. Mogi, K. 1958. Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformation of the ground surfaces around them. *Bull. Earthquake Res. Inst.* 36: 99-134.
 246. Monakov, A. V. 1972. Review of studies on feeding of aquatic invertebrates conducted at the Institute of Biology of Inland Waters, Academy of Sciences, USSR. *J. Fish. Res. Bd. Canada* 29: 363-383.
 247. Moss, B. 1980. *Ecology of Fresh Waters.* Blackwell, Oxford. xv + 332 bls.
 248. Möller, D. og B. Ritter 1980. Geodetic measurements and horizontal crustal movements in the rift zone of NE-Iceland. *J. Geophys.* 47: 110-119.
 249. Möller, D., B. Ritter og K. Wendt 1982. Geodetic measurement of horizontal deformations in Northeast Iceland. *Earth Evolution Sciences* 2: 149-154.
 250. Müller, K. 1954. Investigations on the organic drift in North Swedish streams. *Ann. Rep. Inst. Freshw. Res. Drottningholm* 35: 173-148.
 251. Newton, A. 1864. Letter to the editor. *Ibis* for 1864 Vol VI, no 21: 131-132.
 252. Niels Óskarsson 1978. Effect of magmatic activity on fumarole gas composition in the Námafjall-Krafla volcanic center, N-Iceland. *Norræna eldfjallastöðin, fjölrit* 7803.
 253. Niels Óskarsson 1984. Monitoring of fumarole discharge during the 1975-1982 rifting in Krafla volcanic center, North Iceland. *J. Volcanol. Geothermal Res.* 22: 97-121.
 254. Nielsen, P. 1921. *Havørnens (Haliaëtus albicilla) Udbredelse paa Island i de sidste 30 Aar.* *Dansk orn. Foren. Tidsskr.* 15: 69-83.
 255. Niemczyk, O. og E. Eschermann 1943. *Spalten auf Island.* Konrad Wittwer, Stuttgart. 180 bls.
 256. Noakes, D.L.G., Skúli Skúlason og Sigurður S. Snorrason 1989. Alternative life-history styles in salmonine fishes with emphasis on Arctic charr, *Salvelinus alpinus*. Bls. 331-346 í: *Alternative Life-History Styles of Animals.* (Ritstj. M.N. Bruton). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
 257. Noll, H. 1967. *Maare und maar-ähnliche Explosionskrater in Island. Ein Vergleich mit dem Maar-Vulkanismus der Eifel.* *Sonderveröffentlichungen Geol. Inst. Univ. Köln* 11. 117 bls.
 258. Nordeng, H. 1961. On the biology of char (*Salmo alpinus* L.) in Salangen, North Norway. I. Age and spawning frequency determined from scales and otoliths. *Nytt Magazin for Zoologi* 10: 67-123.
 259. Nordeng, H. 1983. Solution to the „char problem“ based on Arctic char (*Salvelinus alpinus*) in Norway. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 40: 1372-1387.
 260. Nyman, L., S. Hammar og R. Gydemo

1981.
locked
northe
ningh
261. Oddur
eldgos
262. Oddur
Pinge
3-20.
263. Oddur
Pinge
56.
264. Oddur
ingar v
við Mý
fjölrit
265. Oddur
tion of
ing eve
266. Oddur
Pinge
267. Ogilvie
sea-ice
A.D. I
268. Ólafur
leika n
Önunda
gerð í l
269. Ólafur
of the
tive no
Doktors
270. Opheim
1989. F
and rela
swarm,
Bull. 10
271. Ostentfel
1906. A
the plan
Thingval
Soc. Edi
272. Owen, M
Salmon
útg. Ca
bridge. 6
273. Páll Ber
liðnum
(Ritstj.
bókafélag
274. Páll Ein
Leirhnjú
sýslum. S
275. Páll Ein
Kröflu. S
276. Páll Eina
svæði. Sk
277. Páll Eina
virkni við
278. Páll Eina

1981. The systematics and biology of landlocked populations of Arctic charr from northern Europe. *Inst. Freshw. Res. Drottningholm Rep.* 59: 128–141.
261. Oddur Sigurðsson 1976. Eftirhreytur um eldgosíð við Leirhnjúk 1975. *Týli* 6: 95–96.
262. Oddur Sigurðsson 1976. Náttúruhamfarir í Þingeyjarþingi veturinn 1975–1976. *Týli* 6: 3–20.
263. Oddur Sigurðsson 1977. Náttúruhamfarir í Þingeyjarþingi (II), 1976–1978. *Týli* 7: 41–56.
264. Oddur Sigurðsson 1979. Landhæðarbreytingar við Mývatn 1970–1979. Rannsóknastöð við Mývatn, skýrsla 1. Náttúruverndarráð, fjölrit 5: 42–47.
265. Oddur Sigurðsson 1980. Surface deformation of the Krafla fissure swarm in two rifting events. *J. Geophys.* 47: 154–159.
266. Oddur Sigurðsson 1981. Náttúruhamfarir í Þingeyjarþingi (III) 1978–1981. *Týli* 11: 7–16.
267. Ogilvie, A.E.J. 1984. The past climate and sea-ice record from Iceland, part 1: Data to A.D. 1780. *Climatic Change* 6: 131–152.
268. Ólafur K. Nielsen 1980. Rannsóknir á þéttleika mófugla í Mývatnssveit 1978 og við Önuðarfjörð og Dýrafjörð 1979. Prófrítgerð í líffræði við Háskóla Íslands.
269. Ólafur K. Nielsen 1986. Population ecology of the Gyrfalcon in Iceland with comparative notes on the Merlin and the Raven. *Doktorsritgerð við Cornell University.*
270. Opheim, J.A. og Ágúst Guðmundsson 1989. Formation and geometry of fractures, and related volcanism of the Krafla fissure swarm, northeast Iceland. *Geol. Soc. Am. Bull.* 101: 1608–1622.
271. Ostenfeld, C.H. og C. Wesenberg-Lund 1906. A regular fortnightly exploration of the plankton of the two Icelandic lakes, Thingvallavatn and Mývatn. *Proc. Royal Soc. Edinb.* 25: 1092–1167.
272. Owen, M., G. L. Atkinson-Willes og D. G. Salmon 1986. *Wildfowl in Great Britain*. 2. útg. Cambridge University Press. Cambridge. 613 bls.
273. Páll Bergþórsson 1969. Hafís og hitastig á liðnum öldum. Bls. 333–345 í Hafisinn. (Ritstj. Markús Á. Einarsson). Almenna bókafélagið, Reykjavík, 552 bls.
274. Páll Einarsson 1976. Byrjun eldgoss við Leirhnjúk og jarðskjálftahrinu í Þingeyjar-sýslum. *Skjálftabréf* 6: 4–5.
275. Páll Einarsson 1976. Jarðskjálftar við Kröflu. *Skjálftabréf* 8: 2–4.
276. Páll Einarsson 1976. Skjálftavirkni á Kröflusvæði. *Skjálftabréf* 10: 3–4.
277. Páll Einarsson 1976. Breytingar á skjálftavirkni við Kröflu. *Skjálftabréf* 11: 3–5.
278. Páll Einarsson 1976. Skjálftavirkni á Mývatns- og Kröflusvæði. *Skjálftabréf* 12: 3–4.
279. Páll Einarsson 1976. Eftirlit hert með Kröflusvæði. *Skjálftabréf* 14: 3–4.
280. Páll Einarsson 1976. Kröflusvæðið í september. *Skjálftabréf* 15: 6–7.
281. Páll Einarsson 1976. Relative location of earthquakes within the Tjörnes Fracture Zone. *Vísindafélag Íslendinga, Greinar* 5: 45–60.
282. Páll Einarsson 1976. Sig. ris, skjálftar og órói á Kröflusvæði. *Skjálftabréf* 16: 5–9.
283. Páll Einarsson 1977. Tíðindi af Kröflusvæði og Gjástykki. *Skjálftabréf* 19: 6–8.
284. Páll Einarsson 1977. Skjálftar á Kröflusvæði og í Gjástykki. *Skjálftabréf* 20: 4–6.
285. Páll Einarsson 1977. Viðburðir við Kröflu og í Bjarnarflagi. *Skjálftabréf* 22: 4–5.
286. Páll Einarsson 1977. Atburðarás á Kröflusvæði. *Skjálftabréf* 24: 6–9.
287. Páll Einarsson 1977. Skjálftahrinan í september og atburðarás á Kröflusvæði. *Skjálftabréf* 27: 4–6.
288. Páll Einarsson 1978. S-wave shadows in the Krafla caldera in NE-Iceland, evidence for a magma chamber in the crust. *Bull. Volcanol.* 41: 1–9.
289. Páll Einarsson 1978. Umbrot enn í Þingeyjar-sýslum. *Skjálftabréf* 28: 6–9.
290. Páll Einarsson 1978. Skjálftahrinan í Gjástykki og Kelduhverfi í janúar. *Skjálftabréf* 29: 2–4.
291. Páll Einarsson 1979. Umbrotahrina við Kröflu 13.–18. maí 1979 og aðdragandi hennar. *Skjálftabréf* 37: 4–7.
292. Páll Einarsson 1979. Skjálftahrina í Gjástykki í maí 1979. *Skjálftabréf* 38: 8–9.
293. Páll Einarsson 1980. Atburðarás á Kröflusvæði seinni helming ársins 1979. *Skjálftabréf* 40: 5–7.
294. Páll Einarsson 1980. Skjálftavirkni, kvikuhlaup og gos á Kröflusvæði í mars. *Skjálftabréf* 42: 12–14.
295. Páll Einarsson 1980. Kröflusvæðið í júlí – september 1980. *Skjálftabréf* 44: 5–8.
296. Páll Einarsson 1982. Aukin tíðni skjálfta á Kröflusvæði. *Skjálftabréf* 53: 6–8.
297. Páll Einarsson 1983. Jarðskjálftar á Íslandi árið 1982. *Skjálftabréf* 54: 4–10.
298. Páll Einarsson 1984. Jarðskjálftar á Íslandi árið 1983. *Skjálftabréf* 58: 5–14.
299. Páll Einarsson 1986. Seismicity along the eastern margin of the North American Plate. Bls. 99–116 í: *The Geology of North America, bindi M, The Western North Atlantic Region.* (Ritstj. Vogt, P.R. og B.E. Tucholke). Geological Society of America.
300. Páll Einarsson 1987. Compilation of earthquake fault plane solutions in the North Atlantic and Arctic Oceans. Bls. 47–62 í: *Recent Plate Movements and Deformation.*

- (Ritstj. K. Kasahara). Geodynamics Series, Vol. 20. Am. Geophys. Union.
301. Páll Einarsson og Bryndís Brandsdóttir 1979. Jarðskjálftar í Gjástykki í nóvember 1978. Skjálftabréf 39: 3-5.
 302. Páll Einarsson og Bryndís Brandsdóttir 1980. Seismological evidence for lateral magma intrusion during the July 1978 deflation of the Krafla volcano in NE-Iceland. J. Geophys. 47: 160-165.
 303. Páll Einarsson, Karl Grönvold og Bryndís Brandsdóttir 1981. Eldgosið í Gjástykki í janúar og aðdragandi þess. Skjálftabréf 46: 4-10.
 304. Páll Einarsson og Karl Grönvold 1984. Eldgosið á Kröflusvæði í september 1984 og aðdragandi þess. Skjálftabréf 59: 7-10.
 305. Páll Einarsson og Sveinbjörn Björnsson 1987. Jarðskjálftamælingar á Raunvísindastofnun Háskólans. Bls. 251-278 í: Í hlutarins eðli, afmælisrit til heiðurs Þorbirni Sigurgeirssyni prófessor. Menningarsjóður.
 306. Pearl, H.W. 1988. Nuisance phytoplankton blooms in coastal, estuarine, and inland waters. Limnology and Oceanography 33: 823-847.
 307. Pejler, B. 1965. Regional-ecological studies of Swedish freshwater zooplankton. Zool. Bidr. Upps. 36: 407-505.
 308. Peterson, B.V. 1977. The black flies of Iceland (Diptera: Simuliidae). Can. Ent. 109: 449-472.
 309. Pétur M. Jónasson 1972. Ecology and production of the profundal benthos in relation to phytoplankton in Lake Esrom. Oikos Suppl. 14: 1-148.
 310. Pétur M. Jónasson, ritstj. 1979. Ecology of eutrophic, subarctic Lake Mývatn and the River Laxá. Oikos 32.
 311. Pétur M. Jónasson 1979. The Lake Mývatn ecosystem, Iceland. Oikos 32: 289-305.
 312. Pétur M. Jónasson og Hákon Aðalsteinsson 1979. Phytoplankton production in shallow eutrophic Lake Mývatn, Iceland. Oikos 32: 113-138.
 313. Poulsen, E.M. 1924. Islandske Ferskvandsentomotraker, en ekologisk, dyregeografisk Undersøgelse. Vid. Meddr dansk naturh. Foren. 78: 81-171.
 314. Poulsen, E.M. 1939. Freshwater Crustacea. Zoology of Iceland 3(35): 1-50. Ejnar Munkegaard, Kaupmannahöfn og Reykjavík.
 315. Pringle, C. M. 1985. Effects of chironomid (Insecta:Diptera) tube-building activities on stream diatom communities. J. Phycol. 21: 185-194.
 316. Ragnar Stefánsson 1976. Jarðskjálftinn við Kópasker. Skjálftabréf 7: 6-11.
 317. Ranta-aho, K. 1983. Rödingens (*Salvelinus alpinus* L.) yngelbiologi och ekologi i sjön Mývatn. Prófrítgerð við líffræðiskor Háskóla Íslands. 56 bls.
 318. Richey, J.E. 1939. The dykes of Scotland. Edinburgh Geol. Soc. Transactions 13: 393-435.
 319. Richter, K. 1960. Genetische Einstufung isländischer geröllführender Ablagerungen mit Hilfe von Morphometrie und Einregelungsmessungen. N. Jb. Geol. Paläontol. Mh. 9: 385-397.
 320. Riemschneider, J. 1896. Reise nach Island und vierzehn Tage am Mývatn (Juni-Juli 1895). Ornithologische Beobachtungen. Ornitholog. Monatsschrift 21: 268-288; 22: 305-322, 330-342.
 321. Ritter, B. 1982. Untersuchungen geodätischer Netze in Island zur Analyse von Deformationen von 1965 bis 1977. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, H. 271. 194 bls.
 322. Rittmann, A. 1938. Die Vulkane am Mývatn. Bull. Volcanol. 2(4): 1-38.
 323. Rittmann, A. 1939. Threngslaborgir, Eine isländische Eruptionsspalte am Mývatn. Natur und Volk 69: 275-289.
 324. Roback, S. S. 1969. Notes on the food of Tanypodinae larvae. Entomological News 80: 13-18.
 325. Salomonsen, F. 1968. The moult migration. Wildfowl 19: 5-24.
 326. Sanford, A.R. og Páll Einarsson 1982. Magma chambers in rifts. Bls. 147-168 í: Continental and Oceanic Rifts. Geodynamics Series 8. (Ritstj. Guðmundur Pálmason). Am. Geophys. Union.
 327. Scarnecchia, D.L. 1983. Age at sexual maturity in Icelandic stocks of Atlantic salmon (*Salmo salar*). Can. J. Fish. Aquat. Sci. 40: 1456-1468.
 328. Scarnecchia, D.L. 1984. Climatic and oceanic variations affecting yield of Icelandic stocks of Atlantic salmon. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 41: 917-935.
 329. Schleussener, A. og W. Torge 1971. Investigations of secular gravity variations in Iceland. Z. Geophys. 37: 679-701.
 330. Schmeling, H. 1985. Partial melt below Iceland: A combined interpretation of seismic and conductivity data. J. Geophys. Res. 90: 10105-10116.
 331. Shepherd, C. W. 1867. The North-West Peninsula of Iceland: Being the Journal of a Tour in Iceland in the Spring and Summer of 1862. Longmans, Green and Co. London.
 332. Sigrún Huld Jónasdóttir 1984. Fæða svifdýra í Mývatni. Prófrítgerð í líffræði við Háskóla Íslands. 49 bls.
 333. Sigurður Már Einarsson 1985. Fiskirannsóknir í Mývatni 1984. Veidimálastofnun fjölrit R85013. 17 bls.
 334. Sigurður Þórarinn Laxárhraun. A t Geogr. Ann. Sto
 335. Sigurður Þórarinn Náttúrufræðingur
 336. Sigurður Þórarinn groups in Iceland 2: 1-44.
 337. Sigurður Þórarinn hraun und die no Die Erde 89: 48-4
 338. Sigurður Þórarinn history of the Mýva and Jökulsá á Fjö Geology and Geogr Guide to Excursion prentað í Geografi 156-162.)
 339. Sigurður Þórarinn fjalls- og Hekluvi 32: 124-131.
 340. Sigurður Þórarinn myndun Aðaldals. 84-85.
 341. Sigurður Þórarinn gjóskulaganna úr H geislaklómatali. 99-105.
 342. Sigurður Þórarinn history of the Mýva
 343. Sigurjón Rist 1969; 478 í: Hafsinn, (R son). Almenna bóka
 344. Sigurjón Rist 1979. Laxá. Oikos 32: 27
 345. Sigurjón Rist 1979. and ice cover of L 67-81.
 346. Sigurjón Sindrason 1978. A magnetore monitoring ground eldfjallastöðin. fjölri
 347. Sigurvin Elíasson Gjástykki. Náttúrufr
 348. Skovgaard, P. 1933. Ynglefugl paa Island
 349. Skúli Skúlason. S D.L.G. Noakes, M. J. Malmquist. 1989. ing and early life h phic Arctic charr, Thingvallavatn, Icel (Suppl. A): 225-232.
 350. Spickernagel, H. 19 measurements in N 1977. J. Geophysics-
 351. Starkweather, P.L. feeding behavior and pension-feeding rotifera. (Ritstj. H. D.

334. Sigurður Þórarinnsson 1951. Laxárgljúfur and Laxárhraun. A tephrochronological study. Geogr. Ann. Stockholm H. 1-2: 1-89.
335. Sigurður Þórarinnsson 1952. Hverfjall I-II Náttúrufræðingurinn 22: 113-129 og 145-172.
336. Sigurður Þórarinnsson 1953. The crater groups in Iceland. Bulletin volcanologique 2: 1-44.
337. Sigurður Þórarinnsson 1958. Das Ódáðahraun und die nordisländischen Tafelberge. Die Erde 89: 48-52.
338. Sigurður Þórarinnsson 1960. The postglacial history of the Mývatn area between Mývatn and Jökulsá á Fjöllum. Bls. 60-74 í: On the Geology and Geomorphology of Iceland. Guide to Excursion nr. A2. Rvík. (Einnig prentað í Geografiska Annaler 41 (1959): 156-162.)
339. Sigurður Þórarinnsson 1962. Trjáför í Hverfjalls- og Hekluvíkri. Náttúrufræðingurinn 32: 124-131.
340. Sigurður Þórarinnsson 1966. Merk ritgerð um myndun Aðaldals. Náttúrufræðingurinn 36: 84-85.
341. Sigurður Þórarinnsson 1971. Aldur ljósu gjóskulaganna úr Heklu samkvæmt leiðréttu geislakolstímatali. Náttúrufræðingurinn 41: 99-105.
342. Sigurður Þórarinnsson 1979. The postglacial history of the Mývatn area. Oikos 32: 17-28.
343. Sigurjón Rist 1969. Mývatnsísar. Bls. 470-478 í: Hafsinn. (Ritstj. Markús Á. Einarsson). Almenna bókafélagið, Reykjavík.
344. Sigurjón Rist 1979. The hydrology of River Laxá. Oikos 32: 271-280.
345. Sigurjón Rist 1979. Water level fluctuations and ice cover of Lake Mývatn. Oikos 32: 67-81.
346. Sigurjón Sindrason og Halldór Ólafsson 1978. A magnetoresistor geotiltmeter for monitoring ground movement. Norræna eldfjallastöðin, fjölrít 7806. 7 bls.
347. Sigurvin Elfsson 1979. Kerlingarhólar í Gjástykki. Náttúrufræðingurinn 49: 51-63.
348. Skovgaard, P. 1933. Hættemaagen som ny Ynglefugl paa Island. Danske Fugle 4: 46.
349. Skúli Skúlason, Sigurður S. Snorrason, D.L.G. Noakes, M.M. Ferguson og Hilmar J. Malmquist. 1989. Segregation in spawning and early life history among polymorphic Arctic charr, *Salvelinus alpinus*, in Thingvallavatn, Iceland. J. Fish Biol. 35 (Suppl. A): 225-232.
350. Spickernagel, H. 1980. Results of height measurements in Northern Iceland 1965-1977. J. Geophysics 47: 120-124.
351. Starkweather, P.L. 1980. Aspects of the feeding behavior and trophic ecology of suspension-feeding rotifers. Bls. 63-72 í: Rotatoria. (Ritstj. H. Dumont og J. Green). Junk Publ.
352. Steindór Steindórsson 1932. Gróður í Slúttnesi. Náttúrufræðingurinn 2: 90-92.
353. Streit, B. 1977. Morphometric relationships and feeding habits of two species of *Chaetogaster*, *Ch. limnaei* and *Ch. diastrophus* (Oligochaeta). Arch. Hydrobiol. Suppl. 48: 424-437.
354. Strickland, J.H.D. 1965. Production of organic matter in the primary stages of the marine food chain. Bls. 477-690 í: Chemical Oceanography I. (Ritstj. J.P. Riley og G. Skirrow). Academic Press, London. 610 bls.
355. Svárdsson, G. og N. A. Nilsson 1964. Fiskebiologi. LTs förlag, Stockholm. 252 bls.
356. Tabida, F.R. 1987. Carbon dioxide fixation and its regulation in Cyanobacteria. Bls. 95-117 í: The Cyanobacteria. (Ritstj. P. Fay og C. Van Baalen). Elsevier Science Publishers.
357. Talwani, M. og O. Eldholm 1977. Evolution of the Norwegian-Greenland Sea. Geol. Soc. Amer. Bull. 88: 969-999.
358. Tátrai, I. 1986. Rates of ammonia release from sediments by chironomid larvae. Freshwater Biology 16: 61-66.
359. Thienemann, A. 1954. Chironomus. Leben, Verbreitung und wirtschaftliche Bedeutung der Chironomiden. Die Binnengewässer 20. Stuttgart. 834 bls.
360. Torge, W. 1981. Gravity and height variations connected with the current rifting episode in Northern Iceland. Tectonophysics 71: 227-240.
361. Torge, W. og H. Drewes 1977. Gravity changes in connection with the volcanic and earthquake activity in northern Iceland 1975. Jökull 27: 60-70.
362. Torge, W. og H. Drewes 1977. Gravity variations with time in Northern Iceland 1965-1975. J. Geophysics 43: 771-790.
363. Torge, W. og E. Kanngieser 1980. Gravity and height variations during the present rifting episode in Northern Iceland. J. Geophys. 47: 125-131.
364. Trausti Einarsson 1954. A Survey of Gravity in Iceland. Vísindafélag Íslendinga, Rit 30. 22 bls.
365. Trausti Einarsson 1965. The ring-mountains Hverfjall, Lúdent and Hrossaborg in Northern Iceland. Vísindafélag Íslendinga, Greinar IV, 1. 28 bls.
366. Tumi Tómasson 1987. The connection between growth and size at sexual maturity in Icelandic arctic char (*Salvelinus alpinus*). Handrit, 27 bls.
367. Tumi Tómasson 1989. Laxaseiðasleppingar í Laxá ofan Brúa. Greinargerð til Náttúruverndarráðs. Handrit, 7 bls.

368. Unnsteinn Stefánsson 1970. Fáeinar athuganir á efnafræði Mývatns sumarið 1969. Náttúrufræðingurinn 40: 187–196.
369. Vigfús Jóhannsson og Guðni Guðbergsson 1988. Súrefnismælingar í Mývatni 1986–1987. Veidmálastofnun, fjölrit VMST-R/8840.
370. Vollenweider, R. A. 1968. Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters, with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication. OECD Tech. Rep., DAS/CSI/68.27. Paris.
371. Walker, G.P.L. 1988. The problem of thin and densely welded tuffs. Jarðfræðafélag Íslands. Fréttabréf nr. 42: 2.
372. Wendt, K., D. Möller og B. Ritter 1985. Geodetic measurements of surface deformations during the present rifting episode in NE Iceland. J. Geophys. Res. 90: 10163–10172.
373. Wetzel, R.G. 1983. Limnology (2. útg.). Saunders College Publ. 858 bls.
374. Whiteside, M.C., J.B. Williams og C.P. White 1978. Seasonal abundance and pattern of chydorid Cladocera in mud and vegetative habitats. Ecology 59: 1177–1188.
375. William F. Pálsson 1936. Úr bréfi. Náttúrufræðingurinn 6: 55.
376. Williams, T.R., R.C. Connelly, H.B.N. Hynes og W.I. Kersaw. 1961. The size of particulate material ingested by *Simulium* larvae. Ann. trop. Med. Parasitol. 55: 125–127.
377. Wink, M. 1973. Siedlungsdichteuntersuchungen in Heidebiotopen und Lavafeldern Nord-Islands. Die Vogelwelt 94: 41–50.
378. Wohlerz, K.H. 1983. Mechanisms of hydro-volcanic pyroclast formation: grain size, scanning electron microscopy and experimental studies. J. Volcanol. Geothermal Res. 17: 31–63.
379. Wolff, T. 1979. Zoologi. Bls. 1–162 í: Det matematisk-naturvidenskabelige Fakultet. 2. del. Københavns Universitet 1479–1979. (Ritstj. T. Wolff). G.E.C. Gads Forlag. København.
380. Wootton, R.J. 1984. A Functional Biology of Sticklebacks. Croom Helm. London and Sydney. 265 bls.
381. Young, J. O. og R. M. Procter 1986. Are the lake-dwelling leeches, *Glossiphonia complanata* (L.) and *Helobdella stagnalis* (L.) opportunistic predators on molluscs and do they partition this food resource? Freshwater Biology 16: 561–566.
382. Þóra Hrafnadóttir 1991. Mý í Laxá í S-Pingeyjarsýslu: Dreifing tegunda frá upptökum til ósa. Prófrítgerð í líffræði við Háskóla Íslands. 58 bls.
383. Þorleifur Einarsson 1968. Jarðfræði. Saga bergs og lands. Heimskringla. 335 bls.
384. Þóroddur F. Þóroddsson og Guttormur Sigbjarnarson 1983. Kísiliðjan við Mývatn. Grunnvatnsrannsóknir. Orkustofnun, fjölrit OS-83118.
385. Þóroddur F. Þóroddsson og Sigurvin Elíasson 1984. „Dunaði gjá og loga spjó“. Gosnóttin í Gjástykki 5. september 1984. Týli 14: 13–18.
386. Þórólfur Jónsson 1971. Umsögn um silungsveiði o.fl. í Laxá í Laxárdal. Handrit, 4 bls.
387. Þorvaldur Thoroddsen (útg.) 1907–1915. Skýrslur um Mývatnselda 1724–1729. Safn til sögu Íslands 4: 385–411.
388. Þorvaldur Thoroddsen 1958–60. Ferðabók. 1–4. 2. útg. Reykjavík.
389. Ævar Jóhannesson 1981. Upphaf Gjástykkisgoss. Týli 11: 18.
390. Páll Einarsson og Karl Grönvold 1978. Jarðskjálftahrinan í Gjástykki í júlí og atburðarás á Kröflusvæði. Skjálftabréf 33: 2–4.
391. Páll Einarsson og Bryndís Brandsdóttir 1980. Kvikuhaup í febrúar. Skjálftabréf 41: 5–7.
392. Fairbanks, R.G. 1990. Barbados coral cores establish first continuous and detailed record of sea level changes during last deglaciation. Lamont Newsletter 23: 1–3.
393. Pearson, G.W., J.R. Pilcher, M.G.L. Baille, D.M. Corbett og F. Qua 1986. High-precision ¹⁴C measurement of Irish oaks to show the natural ¹⁴C variations from AD 1840 to 5210 BC. Radiocarbon 28: 911–934.
394. Calderone G. M., Karl Grönvold og Niels Óskarsson 1990. The welded air-fall tuff layer at Krafla, northern Iceland: a composite eruption triggered by injection of basaltic magma. J. Volcanol. Geothermal Res. 44: 303–314.

Viðauki 1 MEÐALFJ SVÆÐUM

Tegund

Tanytarsus gracilis
Chironomus islandicus
Tubifex tubifex
Pogonocladus communis
Pisidium spp.
Procladius islandicus
Psectrocladius spp.
Cricotopus sylvaticus
Hydra sp.
Nais sp., *Uncinia*
Chaetogaster spp.
Orthocladus obliquus
Lumbriculus variegatus
Cricotopus tibialis
Macropelopia nebulosa
Lymnaea peregrina
Ablabesomyia spp.
Helobdella stagnalis
Arctopelopia grisea
Pelosclex ferox
 Enchytraeidae

Samtals

Grot- og jurtaet
 Rándýr alls

* g: grotæta, h: jurtaet