

Páll Einarsson:

Jarðskjálftaspár

INNGANGUR

Það hefur löngum verið eitt af meginmarkmiðum náttúruvísindamanna að segja fyrir um náttúruhamfarir og koma þannig í veg fyrir tjón á lífi og verðmætum. Hinar ýmsu greinar náttúruvísinda eru þó komnar mislangt á leið sinni að þessu markmiði. Einna lengst hafa veðurfræðingar náð. Veðurspár frá degi til dags eru orðnar tiltölulega áreiðanlegar, þótt langtímapár um veðurfar séu enn langt undan. Eldjallafræðingar geta sagt fyrir um ýmsa þætti í hegðun eldstöðvar svo fremi að þeir hafi ráðrúm og aðstöðu til að koma fyrir tólum sínum og tækjum í nágrenni hennar. Fyrir um það bil 15 árum álitu flestir jarðskjálftafræðingar það fjarlægán draum að hægt yrði að segja fyrir um jarðskjálfta af þeirri nákvæmni að gagn væri að. Margir trúðu því raunar að jarðskjálftar væru svo tilviljanakenndir atburðir að það væri helst í verkahring stjörnu-spekinga og draumaráðningafólks að reyna að sjá þá fyrir.

Á árunum kringum 1970 voru gerðar mælingar á nokkrum stöðum í heiminum sem sýndu svo ekki varð um villst að mælanlegar breytingar verða á eiginleikum jarðskorpunnar á undan a.m.k. sumum jarðskjálftum. Jafnframt voru settar fram kenningar sem skýrðu þessar breytingar. Við tók tímabil mikillar bjartsýni. Helst leit út

fyrir að öll vandamál væru leyst og lítið væri eftir annað en að koma fyrir mælitækjum á réttum stöðum. Hámarki náði bjartsýnin árið 1975, en þá tókst kínverskum jarðskjálftafræðingum að segja fyrir um jarðskjálfta nálægt borginni Haicheng í NA-Kína af mikilli nákvæmni, og koma þannig í veg fyrir mikið tjón. Síðan hafa skipst á skin og skúrir. Nokkrum skjálftum hefur verið spáð réttilega, aðrar spár hafa ekki ræst, en stærsta áfallið varð þegar einn mannskæðasti jarðskjálfti veraldarsögunnar varð í NA-Kína árið 1976 án þess að unnt væri að gefa út viðvörðun. En þótt nokkuð hafi slegið á bjartsýnina, þá eru flestir jarðskjálftafræðingar nú sannfærðir um að jarðskjálftaspár séu ekki lengur fjarlægur draumur, heldur verði á næstu áratugum unnt að gefa út viðvaranir um jarðskjálfta á sumum hættulegustu jarðskjálftasvæðunum.

Í þessari grein verður reynt að skýra þær kenningar sem jarðskjálftaspár byggjast á, rakinn aðdragandi skjálftans í Haicheng og athuganir sem leiddu til þess að honum var spáð, og að síðustu verður svipast um á Suðurlandsundirlendi, en því hefur verið haldið fram, að þar megi búast við landskjálftum á næstu áratugum. En fyrst þurfum við að gera okkur grein fyrir því, hvað felst í orðinu spá.

HVAÐ ER SPÁ?

Flestir munu skilja orðið spá sem einhvers konar umsögn um óorðinn atburð. Ekki má þó umsögnin vera svo almenns eðlis að hún sé sjálfsgöð. Það getur til dæmis vart talist spá, þegar við segjum að sólin komi upp á morgun, eða að það eigi eftir að verða jarðskjálfti á jörðinni. Það er heldur ekki nóg að segja, að það verði jarðskjálfti á Íslandi, eða jafnvel að það verði jarðskjálfti á Reykjanesi h. 26. apríl 1986, því á Reykjanesi einu verða margir smáskjálftar á degi hverjum. Þessar umsagnir gera því ekki annað en að staðhæfa sjálfsgöða hluti. Út á slíkar umsagnir gæti því margur orðið spámaður, jafnvel í eigin föðurlandi. En hversu mikið þarf að þrengja umsögnina til þess að hún geti talist spá? Jarðskjálftafræðingar hafa komið sér saman um að í fullgildri jarðskjálftaspá þurfi að koma fram að minnsta kosti þrjú atriði, þ.e. stærð skjálftans, upptakasvæði og tímabilið sem til greina kemur. Helst þarf að gefa óvissumörk á öllum þremur atriðum, svo hægt sé að meta eftir á hversu vel spáin hafi ræst. Dæmi um jarðskjálftaspá gæti hljóðað eitthvað á þessa leið:

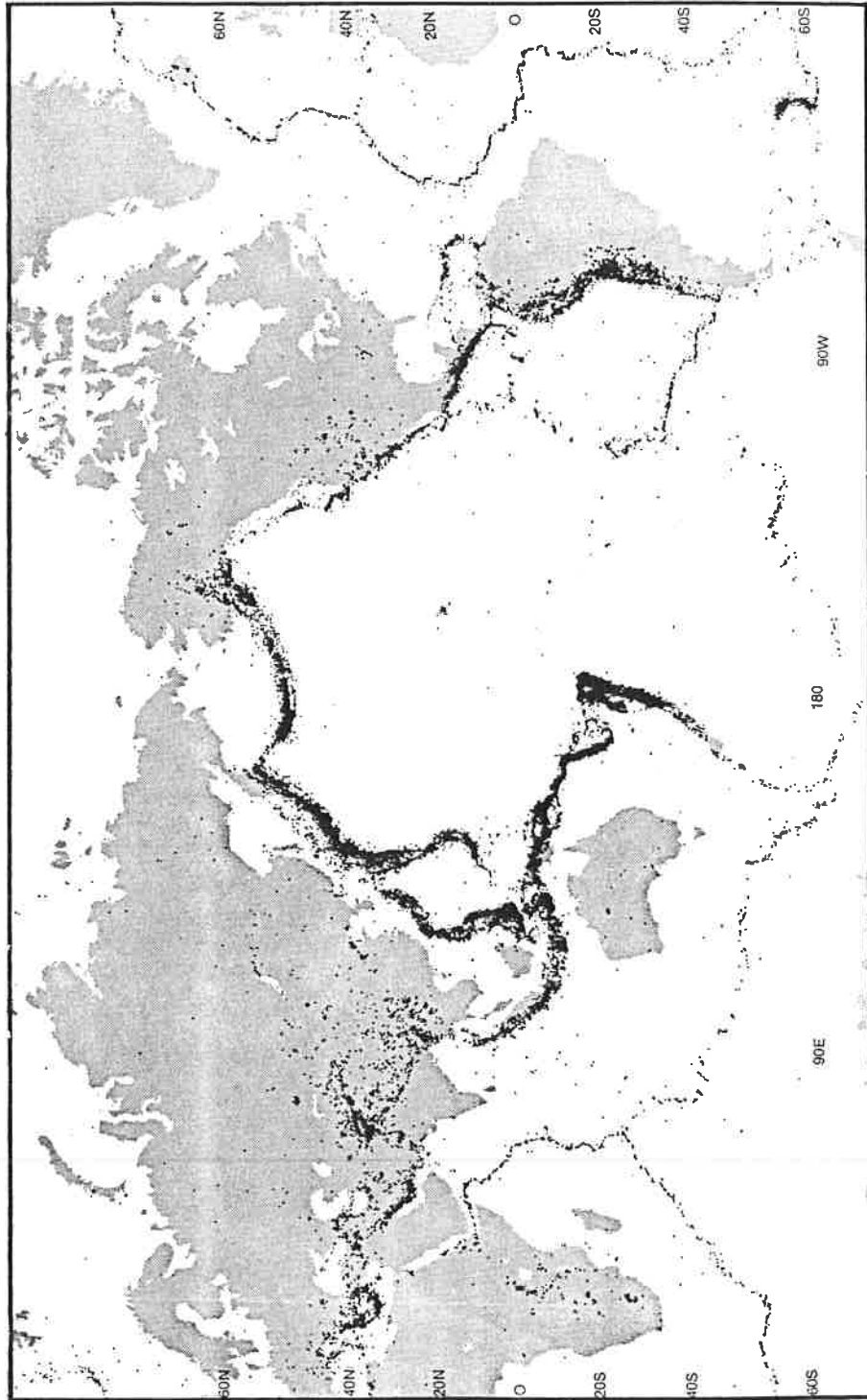
„Jarðskjálfti að stærð 6,3–7,5 á Richterskvarða mun eiga upptök á svæði sem afmarkast af breiddarbaugunum 63°50' og 64°N og lengdarbaugunum 19°50' og 20°40' V á næstu áratugum. Meira en 80% líkur eru til þess að skjálftinn verði á næstu 25 árum“.

Hér er öllum skilyrðum jarðskjálftaspár fullnægt, þó óneitanlega sé spáin nokkuð óákveðin, einkum hvað tímann varðar. Slíka spá er augljóslega ekki hægt að nota til að gefa út viðvörðun til íbúa svæðisins um yfirvofandi háska, en hún getur samt sem áður komið að gagni við skipulag og

mannvirkjagerð. Einnig væri eðlilegt í framhaldi af spánni að hefja undirbúning að viðbrögðum við því tjóni sem jarðskjálfti af þessari stærð óhjákvæmilega hefur í för með sér. Spá af þessu tagi þarf að fylgja greinargerð um, hverjar séu forsendur hennar, svo að þeir sem þurfa að taka afstöðu til hennar geti metið hversu áreiðanleg hún sé. Það kynni til dæmis að ráða nokkru um viðbrögð stjórnvalda hvort spáin er grundvölluð á gangi himintungla, fyrri sögu jarðskjálfta á þessu svæði, eða draumförum fólks.

SKJÁLFTAHEYÐUR, FLEKA-KENNINGIN

En hvaðan dregur jarðskjálftafræðingur vitneskju um atriðin þrjú sem jarðskjálftaspáin þarf að innihalda? Athugum fyrst upptakasvæðið. Hér kemur flekakenningin til hjálpar, en samkvæmt henni má skipta yfirborði jarðar niður í nokkra misstóra fleka, sem eru á hægri hreyfingu hver með tilliti til annars. Hreyfingin nemur víðast nokkrum sentimetrum á ári. Ísland liggur til dæmis á mótum tveggja slíkra fleka. Hér mætast Norður-Ameríku-flekinn, sem inniheldur allt meginland Norður-Ameríku og vestanvert Norður-Atlantshaf, og Evrasíuflekinn, sem inniheldur austanvert Norður-Atlantshaf, allt meginland Evrópu og norðanverða Asíu. Aðrir stórir flekar eru Kyrrahafsflökinn, Suður-Ameríkuflökinn, Afríkuflökinn, Suðurskautsflökinn og Indlandsflökinn, en auk þeirra eru margir minni. Jarðskjálftar eru yfirleitt bundnir við tiltölulega þröng og vel afmörkuð svæði meðfram flekajöðrunum þar sem flekarnir núast saman (1. mynd). Vegna hægra hreyfinga flekanna hleðst upp spennan í jarðskorpunni við flekajaðrana. Þegar spennan fer yfir ákveðin mörk verður jarðskjálfti við það að bergið hrekkur



1. mynd. Upptök jarðskjálfta í heiminum 1963–1977, að stærð 4,5 og stærr. Upptökin ræða sér víðast á tiltölulega mjó svæði, sem fylgja flekajöðrum. Gert eftir korti frá National Oceanic and Atmospheric Administration (NGDC), sem byggt er á gögnum frá U.S. Geological Survey og fleiri stofnunum. — *Earthquake epicenters of the world, 1963–1977, for events of magnitude 4.5 and greater. The epicentral zones are relatively narrow in most places, and delineate the plate boundaries. Made from a map by the National Oceanic and Atmospheric Administration (NGDC), which is based on data from the U.S. Geological Survey and other organizations.*

og hluti af spennuorkunni berst burtu sem jarðskjálftabylgjur. Misgengið sem myndast getur verið tugir eða jafnvel hundruð kílómetra að lengd, og fer stærð jarðskjálftans að nokkru leyti eftir því. Ef jarðskjálftinn er mikill, getur losnað um spennuna á stóru svæði. Það tekur því langan tíma, tugi eða hundruð ára, fyrir flekahreyfingararnar að byggja spennuna svo upp, að aftur megi búast við miklum skjálfta á sömu slóðum.

Samkvæmt þessum hugmyndum eru því upptakasvæði nýafstaðinna land-skjálfta tiltölulega örugg. Á sama hátt má álykta að líkur fyrir stórum jarðskjálftum í næstu framtíð séu miklar á þeim svæðum við flekamótin, þar sem langt er liðið frá síðasta stórskjálfta. Slík svæði eru kölluð skjálftaeyður. Með því að kanna jarðskjálftasöguna má þannig afmarka þau svæði, sem líklegust eru til að breyta í náninni framtíð, og beina athyglinni að þeim. Því stærri sem eyðan er og því lengra sem liðið er frá síðasta stóra jarðskjálfta, þeim mun stærri er yfirvofandi jarðskjálfti líklegur til að verða.

Þessi aðferð er nothæf fyrst og fremst þar sem flekamót eru einföld og skýrt afmörkuð eins og víða er umhverfis Kyrrahafið (sjá 1. mynd). Þar hafa margir meiri háttar jarðskjálftar á síðustu 15 árum einmitt orðið í skjálftaeyðum sem búið var að benda á (McCann og fleiri 1979). Erfiðara er að beita aðferðinni þar sem flekamót eru óskýr og skjálftavirknin er dreifð yfir breitt svæði eins og víða er í sunnan- og austanverðri Asíu, til dæmis í Kína. Þar verður að beita öðrum aðferðum til að afmarka verðandi upptakasvæði, og verður komið nánar að því síðar.

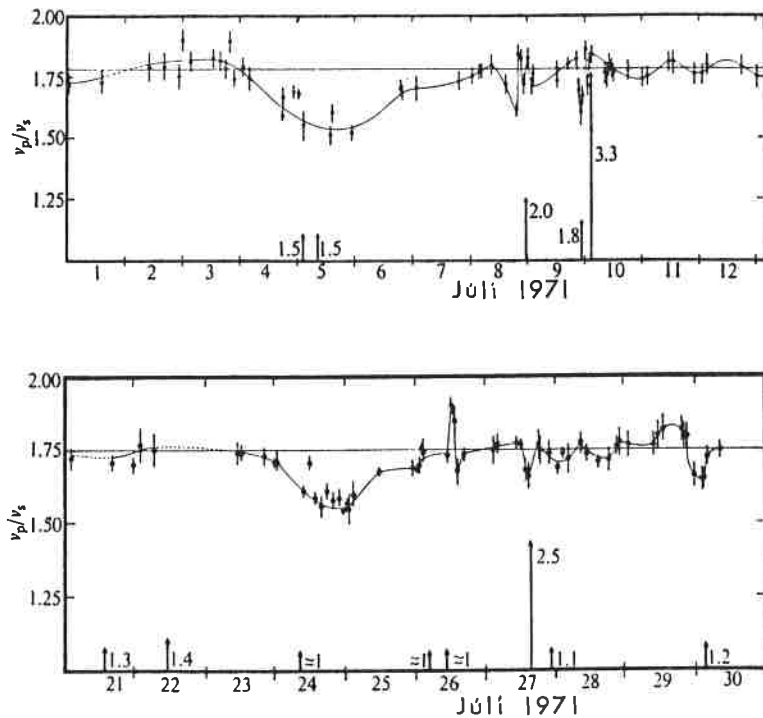
FORBOÐAR JARÐSKJÁLFTA

Segjum nú sem svo, að búið sé að

ákvarða upptakasvæði næsta stóra jarðskjálfta. Þá liggur næst fyrir að reyna að ákvarða, *hvenær* búast megi við honum. Fyrst er eðlilegt að kanna sögu fyrri skjálfta á svæðinu. Tímabil milli stórra jarðskjálfta á sama svæði eru sjaldnast mjög reglubundin, en þó má fá hugmynd um það hvort þau skipti hundruðum ára eða ef til vill ekki nema tugum. Til þess að ákvarða tímann betur þarf að gera mælingar og athuganir sem beinast að því að finna breytingar sem túlka megi sem beinan undanfara jarðskjálftans. Hér þarf að styðjast við reynslu og fræðilegar kenningar um það hverju megi búast við.

Víða um heim hafa verið gerðar mælingar sem sýna einhvers konar breytingar á undan stórum jarðskjálftum. Þessar mælingar hafa verið nokkuð tilviljanakenndar, enda sjaldnast gerðar með neins konar vitneskju um verðandi atburð í huga, og oftast tilkynnt um niðurstöðurnar eftir að jarðskjálftinn varð. Fátítt er að mælst hafi breytingar á tveimur eða fleiri ólíkum þáttum á undan sama jarðskjálftanum. Það hefur því verið erfitt að túlka breytingarnar og gera heildarlíkan af tengslum þeirra við skjálftann. Af slíkum mældum breytingum má nefna breytingar á rafleiðni jarðskorpunnar, aukning á útstreymi radons, sem er lofttegund mynduð við geislavirkni í jarðskorpunni, óeðlilegar jarðskorpuhreyfingar svo sem landris og hallabreytingar, breytingar á jarðvatni, streymi í lindum, grugg og loftbólur í vatni, breytingar á segulsviði og fleira. Einnig er til fjöldi sagna um óeðlilega hegðun dýra, torkennileg ljós og bjarma á himni, og sérkennilegt veður á undan jarðskjálftum.

Þegar þessi reynsla er metin verður að hafa það í huga að sumar af þessum breytingum hefðu getað mælst eða



2. mynd. Hlutfall milli hraða P- og S-bylgna mælt við Blue Mountain Lake í Adirondacks-fjöllum í New York. Örvar sýna hvenær stærstu skjálftarnir urðu, og talan gefur stærð þeirra. Venjulegt gildi á hraðahlutfallinu er um 1,75. Greinilega má sjá, hvernig hlutfallið lækkar í nokkra daga á undan stærstu skjálftunum. Myndin er tekin með smávægilegum breytingum úr grein eftir Aggarwal o.fl. (1973). – *Ratio of P- to S-wave velocity as a function of time, measured near Blue Mt. Lake in the Adirondacks, New York. The arrows and numbers indicate the time of occurrence and magnitude of the largest earthquakes. Pronounced minima in the velocity ratio are seen a few days prior to the largest shocks. After Aggarwal et al. (1973) with minor changes.*

komið fram án þess að jarðskjálfti hefði orðið á eftir. Jarðskjálftinn gæti beinlínis verið orsök þess að reynslunni var haldið til haga. Tökum sem dæmi drauma. Á Íslandi búa rúmlega 200.000 manns, og flestir hafa orðið fyrir þeirri eftirminnilegu reynslu að finna jarðskjálfta. Það er því ekki ólíklegt að hvern einstakan dreymi jarðskjálfta eða atburði sem tengja má jarðskjálfta nokkrum sinnum á ævinni. Þannig er mjög líklegt að

á hverri nóttu dreymi nokkurn hóp Íslendinga draum sem túlka má sem undanfara jarðskjálfta, hvort sem skjálfti fylgir eða ekki. Þegar svo skjálfti verður, getur því örugglega einhver á landinu haldið því fram að sig hafi dreymt fyrir honum. Svipaða röksemdafærslu má nota á annars konar reynslu sem fólk verður fyrir á undan jarðskjálftum, en þó ekki alla. Að minnsta kosti sumar mælingar verða ekki vefngdar á þennan hátt. Gallinn

er bara sá, að mælingarnar hafa verið býsna sundurleitar og því ekki að undra þótt vísindamenn tækju þeim með varúð.

Segja má að hugarfarsbreyting hafi orðið árið 1973, en þá tókst hópi bandarískra vísindamanna að mæla sams konar breytingar á undan skjálftum í New York (Aggarwal og fleiri 1973) og sovéskir vísindamenn höfðu fengið fáum árum áður fyrir skjálfta í Garm héraði í Mið-Asíu (Semenov 1969). Rannsóknirnar voru í því fólgnar, að mælt var hversu hratt jarðskjálftabylgjur berast um jarðskorpuna á skjálftasvæðunum.

Þegar jarðskjálfti verður, berast bylgjur frá upptökum hans líkt og öldur á vatni þegar steini er kastað í það. Bylgjurnar berast með ákveðnum hraða, sem fer eftir eiginleikum og ástandi efnisins sem þær berast um. Frá skjálftaupptökum berast tvær tegundir af bylgjum, svokallaðar P-bylgjur og S-bylgjur. P-bylgjan er þrýsti-bylgja sem getur borist í gegnum fast efni, vökva og loft. Ef P-bylgja er af nægilega hárrí tíðni, skynja eyru okkar hana sem hljóð. Margir kannast til dæmis við þytinn sem oft heyrst með jarðskjálftum. S-bylgjan getur hins vegar einungis borist um fast efni. Þegar S-bylgjan fer um, svignar efnið, en þrýstingur þess breytist ekki. Hraði P-bylgjunnar er meiri en S-bylgjunnar, og í venjulegu, föstu efni er hraðahlutfallið, það er tala sem fæst ef S-bylgjuhraðanum er deilt upp í P-bylgjuhraðann, nálægt 1,75. Ef lítill jarðskjálfti verður á svæði þar sem nokkrir hæfilega dreifðir jarðskjálftamælar eru, má tiltölulega auðveldlega ákvarða hraðahlutfallið, jafnvel þó nokkrum erfiðleikum sé háð að ákvarða hraðana sjálfa.

Sovésku vísindamennirnir höfðu notað marga minni háttar skjálfta í

Garm til þess að ákvarða hraðahlutfallið í jarðskorpunni og höfðu komist að því að það breyttist á reglubundinn hátt á undan stærstu jarðskjálftunum. Nokkrum vikum fyrir skjálftana lækkaði hlutfallið, stundum niður í allt að 1,50, en skömmu áður en aðalkippurinn kom hækkaði það aftur upp í venjulegt gildi.

Þegar langdregin skjálftahrina hófst í Adirondacks-fjöllum í New York árið 1971, var tækifærið notað til að kanna hvort hægt væri að fá sams konar niðurstöður þar. Tilraunin tókst vel, (sjá 2. mynd), og nú var einnig hægt að ganga úr skugga um, að tíminn sem leið frá því að hlutfallið lækkaði og þangað til það hækkaði aftur, stóð í beinu sambandi við stærð skjálftans sem á eftir fór. Þetta var næstum of gott til að geta verið rétt.

Ef hægt væri að beita þessari aðferð á öllum skjálftasvæðum, væri ekki einungis hægt að gefa út langtíma- og skammtímaviðvörðun um yfirvofandi skjálfta, heldur væri einnig hægt að gefa upp stærð hans. Þetta var raunargert í Adirondacks með góðum árangri, en þar sem skjálftarnir voru allir litlir, hafði þetta fyrst og fremst fræðilega þýðingu. En gildi þessarar uppgötvunar var ekki einungis fólgið í notkun aðferðarinnar sjálfrar, heldur miklu fremur í því að hún varð kveikja að frekari mælingum og rannsóknum. Nú voru menn almennt sannfærðir um að mælanlegar breytingar yrðu á undan jarðskjálftum. Það lá því beint við að leita skýringa, gera sér einhvers konar líkan af hegðun jarðskorpunnar og athuga hvort mætti nota það til að skýra önnur fyrirbrigði.

Einn úr hópi bandarísku vísindamannanna hafði umfangsmikla reynslu í mælingum á ýmsum eiginleikum bergs, meðal annars hvernig berg bregst við álagi. Bergsýni er þá tekið

og sett í pressu, álagið aukið og mældir ýmsir þættir svo sem aflögun sýnisins, brestir í því, rafleiðni, hljóðhraði og fleira. Meðan álagið er tiltölulega lítið hagar venjulegt stinnt berg sér á reglubundinn hátt, til dæmis er aflögunin í réttu hlutfalli við álagið. Þegar álagið hins vegar fer að nálgast hámark þess sem bergið þolir án þess að brotna, byrja undarlegir hlutir að gerast. Örlitlar sprungur myndast milli korna bergsins, og taka að glennast út. Af þessu þenst bergsýnið út, jafnvel þótt þrýstingur sé hár. Samhliða þenslu bergsins verða breytingar á ýmsum eiginleikum þess, svo sem á hraða P- og S-bylgna, vatnsleiðni og rafleiðni. Ef bergsýnið er vatnssósa, fellur þrýstingur vatnsins þegar rúmmálið vex, sem veldur aftur breytingum, t.d. á P-bylgjuhraðanum. Heildarútkoman er, að P-bylgjuhraðinn minnkar meira en S-bylgjuhraðinn, þannig að hlutfall þeirra minnkar. Þessa þekkingu á hegðun bergs má nú heimfæra upp á jarðskorpuna á upptakasvæði jarðskjálfta. Þá kemur í ljós, að ekki er einungis hægt að skýra hvers vegna hraðahlutfall jarðskjálftabylgna minnkar, heldur verða ýmis önnur fyrirbrigði skiljanleg (Scholz og fleiri 1973).

Athugum nú hvernig atburðarásin gæti verið á jarðskjálftasvæði, þar sem spenna er að hlaðast upp vegna flekahreyfinga. Fyrstu áratugina gerist fátt nema það, að spennan hækkar og bergið aflagast í hlutfalli við það. Heildarspennan er þó enn lág, svo að smáskjálftavirkni er lítil sem engin. Eftir svo sem 50 ár gæti spennan á einstökum svæðum verið farin að nálgast brotmörk bergsins þótt enn sé spennan að meðaltali lág. Skjálftavirkni gæti því vaxið nokkuð þegar fram í sækir. Við áframhaldandi upphleðslu spennu fer svo, að bergið á

stóru svæði nálgast brotmörk og þenst út, og þá ættu að gerast hlutir sem má túlka beint sem forboða jarðskjálfta. Við þensluna rís land á verðandi upptakasvæði. Landrisið getur numið fáeinum tugum sentimetra og ætti að vera mælanlegt, til dæmis með síritandi hallamæli staðsettum við útjaðar rissvæðisins. Risið kemur til viðbótar við þá aflögun bergsins sem stafar af flekahreyfingum. Á þessum tíma ætti því að koma fram truflun á öllum mælingum sem gerðar eru á aflögun bergsins, svo sem nákvæmum fjarlægðarmælingum milli fastpunkta. Hlutfallið milli hraða P- og S-bylgna ætti nú að minnka, og með því að mæla skjálftabylgjur ætti að vera hægt á þessu stigi að afmarka það svæði, sem mest hefur þanist. Við þensluna breytist vatnsþrýstingur í berginu og einnig vatnsleiðni þess, sem hvort tveggja veldur breytingum á vatnsrennsli í berggrunnum. Því mætti búast við að vatnshæð í borholum breytist, rennsli úr lindum og þess háttar. Vatnið í berginu fær nú einnig aðgang að nýjum, ferskum brotflötum, og getur því skolað út meira magni af radongasi, sem verður til í berginu. Mælingar á radoni í grunnvatni ættu því að sýna verulega aukningu. Breytingar á rafleiðni ættu að vera mælanlegar beint, auk þess sem þær ættu að valda breytingum á jarðstraumum og segulsviði, sem líka gætu mælst.

Þær breytingar sem hér eru upptaldar mætti kalla langtímaforboða, því þær verða vikum, mánuðum eða árum áður en jarðskjálftinn ríður yfir, allt eftir því hversu stór hann verður.

Skammtímaforboðar hafa líka mælst, mínútum, klukkustundum og dögum á undan jarðskjálftum, en erfiðar gengur að finna skýringar á sumum þeirra út frá þekktri hegðun bergs. Þegar hraðahlutfallið, til dæm-

is, hækkar aftur upp í venjulegt gildi skömmu á undan skjálftanum, gæti það stafað af því, að vatn í berginu hafi nú aftur náð upphaflegum þrýstingi vegna aðstreymis frá nærliggjandi svæðum. Sumir af skammtímaforboðunum gætu líka stafað af því að bergið sé byrjað að gefa eftir á einhverjum hluta svæðisins áður en sjálfur landskjálftinn ríður yfir. Við það verða hraðar og ef til vill óreglulegar breytingar á spennuástandi jarðskorpunnar, sem aftur valda breytingum á eiginleikum bergsins. Um þessi atriði eru nokkuð skiptar skoðanir (sjá t.d. Press 1975), og verður sjálfsagt ekki úr skorið fyrir en meiri reynsla safnast.

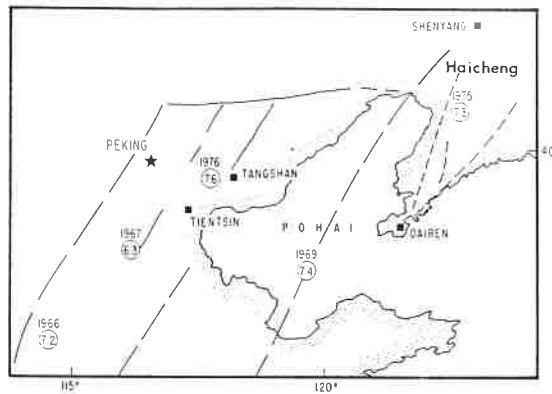
Forskjálftar eru algengasta tegund mældra skammtímaforboða, en það eru minni háttar skjálftar sem verða skömmu á undan meginskjálftanum. Það rýrir þó notagildi þeirra, að það er talsverðum erfiðleikum bundið að þekkja þá frá öðrum skjálftum. Ekki verða heldur forskjálftar á undan öllum stórum skjálftum, til dæmis er ekki vitað til þess að forskjálftar hafi fundist á undan stærstu skjálftunum á Suðurlandi.

JARÐSKJÁLFTASPÁIN Í HAICHENG

Víkjum nú sögunni til Kína. Árið 1975 reið mikill jarðskjálfti yfir Liaoning-hérað í NA-hluta Kína (sjá 3. mynd). Skjálftinn mældist 7,3 stig á Richterskvarða og átti upptök um það bil 20 km frá borginni Haicheng, sem hefur 90.000 íbúa. Jarðskjálftinn varð að kvöldi dags 4. febrúar og lagði í rúst eða stórskemmdi um 90% mannvirkja í borginni, auk tjóns á nærliggjandi svæðum. Miðað við tíma dags, kalt veður og að u.þ.b. 500.000 manns búa á svæði þar sem eyðilegging á mannvirkjum var meiri en 50%, hefði mátt búast við að allt að 100.000 manns

færust. Í raun fórust aðeins fáir og er það fyrst og fremst að þakka því að jarðskjálftanum var spáð með mikilli nákvæmni. Kippurinn kom klukkan 19:36, en síðasta aðvörun til íbúa var gefin um kl. 14. Aðvörunin kom engan veginn óvænt því allt frá árinu 1970 hafði þessi hluti landsins verið undir sérstöku eftirliti vegna jarðskjálftahættu. Hér verður reynt að rekja atburðarásina sem leiddi til þess að jarðskjálftanum var spáð svo nákvæmlega. Nánari upplýsingar er að finna í grein eftir Raleigh og fleiri (1977).

Fyrsta langtímaspáin um jarðskjálfta á þessum slóðum var gerð árið 1970, en þá var samþykkt á fundi kínverskra jarðskjálftafræðinga að auka jarðeðlisfræðilegar mælingar í Liaoninghéraði. Ástæðan virðist fyrst og fremst hafa verið sú, að skjálftavirkni í NA-Kína hafði árin áður fært sig til á reglubundinn hátt frá suðvestri til norðausturs eins og sést á 3. mynd. Ef svo héldi fram sem horfði, var líklegt að næsti stóri skjálfti yrði í Liaoninghéraði innan fárra ára. Í framhaldi af þessari samþykkt voru gerðar umfangsmiklar mælingar á gerð og eðli jarðskorpunnar í héraðinu. Sprungur og misgengi á yfirborði voru kortlögð og mælt var segulsvið, þyngdarsvið og hljóðhraði, með það fyrir augum að finna misgengi og brotalamir sem ekki sjást á yfirborði. Skjálftasaga svæðisins var rannsökuð nánar og 17 nýjar skjálftamælistöðvar voru settar upp. Hæðarmælingar, sem áður höfðu verið gerðar, voru endurteknar til þess að finna hvort breytingar hefðu orðið, og nýjum hæðarmælingalínunum var bætt við. Settir voru upp siritandi hallamælar og segulmælar. Jarðeðlisfræðingum var fjölgað á svæðinu, en auk þess var skipulagt starf fjölda leikmanna og áhugamanna, sem söfnuðu upplýsingum, til dæmis um vatn í



3. mynd. Kort af norðaustur hluta Kína. Sýnd eru helstu skjálftamísgengi og upptök stærstu jarðskjálfta síðan 1966. Tölur gefa til kynna stærð á Richterskvarða og ártal. Úr grein eftir B. Raleigh o.fl. (1977). — *Map of NE-China, showing major faults and the largest earthquakes since 1966. Year of occurrence and magnitude are shown. From Raleigh et al. (1977).*

brunnum og borholum, um hegðun dýra og fleira.

Um mitt ár 1974 voru þessar mælingar farnar að skila verulegum árangri og var þá spáin tekin til endurskoðunar. Fundist höfðu virk misingi, stór svæði höfðu lyft frá því að mælingar voru síðast gerðar, og hallabreytingar virtust fara vaxandi. Jarðskjálftavirkni óx merkjanlega fyrstu 5 mánuði ársins 1974 miðað við fyrri ár, og á segulsviðinu mældust breytingar sem rekja mátti til breytinga í jarðskorpunni.

Á fundi sem haldinn var í júní 1974 var ályktað, að líklega yrði skjálftinn á næstu 1–2 árum, og var stærðin áætluð 5–6 stig á Richterskvarða. Hugsanlegt upptakasvæði var einnig þengt. Á þessu stigi var hafist handa við að dreifa upplýsingum til almennings í héraðinu um eðli jarðskjálfta, jarðskjálftahættu og almannavarnir. Einnig voru mælingar og athuganir stóráuknar.

Í desember 1974 bárust tilkynningar um breytingar á vatni í brunnum og radoni á nokkrum stöðum, og 22. desember varð jarðskjálftahrina nálægt útjadhri svæðisins. Þessir atburðir urðu til þess að enn var hert á viðbúnaði, og

voru gerðar ráðstafanir til að koma upplýsingum til allra fjölskyldna á svæðinu. Tilkynningum um óeðlilega hegðun dýra, og breytingar á vatnsborði, radoni og rafstraumum í jörðinni fjölgaði mjög í lok ársins, og á fundi jarðskjálftafræðinga 13. janúar 1975 var spáin enn endurskoðuð og hljóðaði nú upp á jarðskjálfta að stærð 5,5–6 á fyrstu 6 mánuðum ársins 1975.

Þegar hér var komið sögu má því segja að almenningur og vísindamenn hafi almennt verið undir jarðskjálfta búnir, og einungis hafi verið beðið eftir nánari vísbendingum um hvenær hann yrði. Þessar vísbendingar komu fyrstu daga febrúarmánaðar, og er ekki vafi á því að þar hafa forskjálftar vegið þyngst. Skjálftarnir hófust 1. febrúar, en jukust fyrst að ráði að kvöldi 3. febrúar og náðu hámarki fyrir hádegi næsta dag með skjálfta að stærð 4,8. Næstu klukkustundirnar var aftur tiltölulega kyrrt, og virðist sem þessi kyrrð hafi verið tekin sem loka-viðvörðun um stóran skjálfta. Það mun vera byggt á reynslu frá fyrri skjálftum í Kína.

En það voru einnig önnur teikn á lofti þessa fyrstu daga febrúar. Einn af

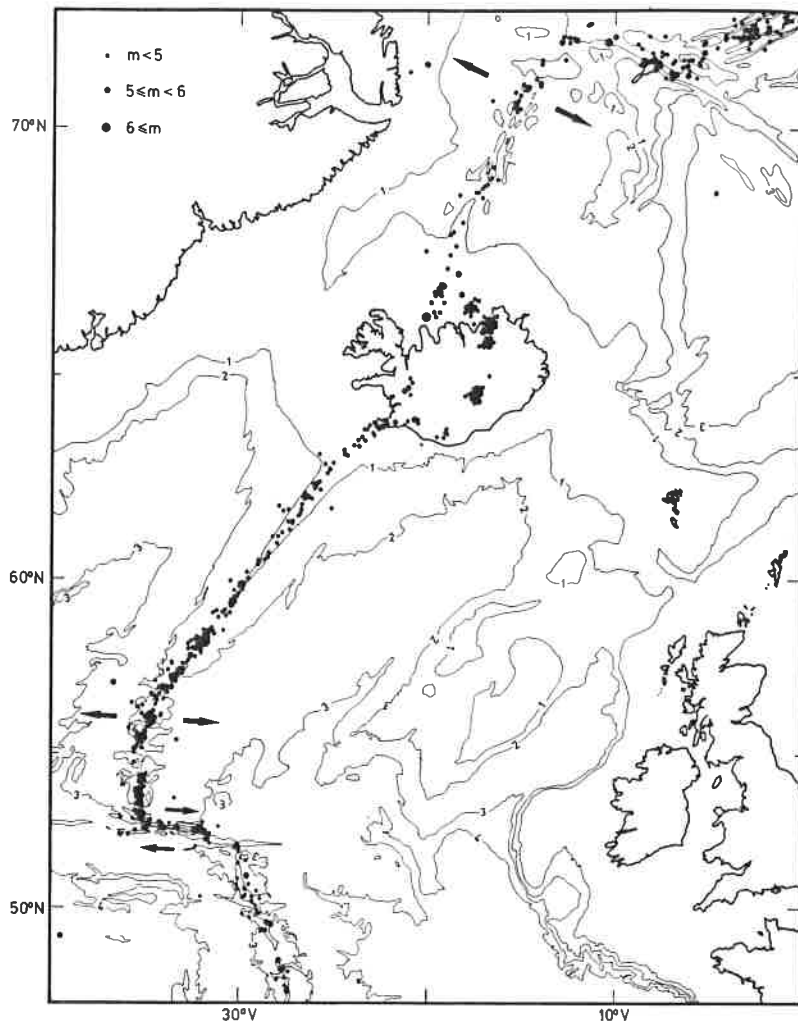
hallamælunum sýndi mikið frávik frá venjulegri hegðun og óvenjulegir rafstraumar í jörðu voru mældir á nokkrum stöðum. Margvíslegar breytingar urðu á jarðvatni, einkum 3. og 4. febrúar. Vatn tók skyndilega að streyma úr jörðu á tveimur stöðum, annars staðar varð vatn gruggugt, og enn annars staðar þornuðu brunnar. Fregnir um óeðlilega hegðun dýra voru tíðar, og voru margar tegundir dýra nefndar í því sambandi. Hænsni fengust ekki til að fara inn í hæsnakofa, hundar ýlfrudu og þefudu niður í jörðina eins og þeir fyndu óvenjulega lykt, rottur höguðu sér sem drukknað væru og kýr stukku yfir girðingar. Í nokkrum þorpum voru gerðar ráðstafanir til að setja upp bráðabirgðaskýli og flytja fólk úr húsum 3. febrúar, þegar forskjálftar jukust. En almennri aðvörðun var ekki dreift til bæjar- og sveitarstjórna fyrr en snemma morguns hinn 4. febrúar, og var þá spáð, að sterkur jarðskjálfti yrði nálægt Haicheng þann dag. Klukkan 14 var síðan dreift fyrirmælum um ráðstafanir til varnar almennings. Fólk flutti úr húsum sínum, og sett voru upp tjöld og bráðabirgðaskýli. Hjálparveitir voru kallaðar út og sjúkraskýli sett upp utan dyra. Einnig voru skipulagðar kvikmyndasýningar undir beru lofti til þess að létta fólki biðina úti í vetrarfrostinu. Jarðskjálftinn reið yfir kl. 19:36, eins og áður sagði, og olli gífurlegu eignatjóni, en litlu sem engu manntjóni.

En hver er lykillinn að því hversu vel tókst til í Haicheng? Þrennt virðist skipta meginmáli í þessu sambandi. Í fyrsta lagi er Kína þéttbýlt land með langa menningarsögu. Saga jarðskjálfta er því þekkt langt aftur í tímann, og fyrir hendi er mikil reynsla af jarðskjálftum og aðdraganda þeirra. Í öðru lagi er mikil áhersla lögð á jarð-

skjálftarannsóknir í Kína. Líklega vinna í engu öðru landi jafnmargir við jarðskjálftarannsóknir, jafnvel þó miðað sé við höfðatölu. Þessi mikla áhersla á rætur að rekja til ársins 1966, en þá varð mikið tjón í jarðskjálfta við borgina Hsingtai, sem er um 370 km suðvestan við Peking. Þá voru jarðskjálftarannsóknir, og þó sérstaklega rannsóknir sem gætu leitt til árangurs í jarðskjálftaspám, gerðar að forgangsverkefni í kínverskum vísindum. Þriðja meginatriðið er hin mikla þátttaka áhugafólks og sjálfbodaliða í jarðskjálftarannsóknum í Kína. Mikill fjöldi fólks hefur með höndum einhvers konar mælingar eða athuganir sem ekki krefjast vísindalegrar þjálfunar, svo sem að mæla vatnshæð í borholu, fylgjast með hegðun dýra eða sinna síritandi mælitæki. Þetta starf er skipulagt í samvinnu við vísindamenn, og gegnir tvíþættu hlutverki. Í fyrsta lagi fást með þessu margvíslegar upplýsingar sem ógerningur væri að afla á annan hátt, og í öðru lagi myndast tengiliður milli vísindamanna og fólksins sem býr á jarðskjálftasvæðunum. Slíkir tengiliðir gegna mikilvægu hlutverki þegar koma þarf upplýsingum til fólksins. Hvers konar fræðsla og tilkynningar eiga þannig greiðari leið til almennings. En látum nú útrætt um Kína og lítum okkur nær.

JARÐSKJÁLFTAR Á SUÐURLANDI

Eins og áður sagði liggja flekamót í gegnum Ísland og eru jarðskjálftar og eldvirkni landsins tengd þeim á einn eða annan hátt (4. mynd). Vesturhluti landsins er á Norður-Ameríkuflekanum og hreyfist hann til vesturs miðað við Austurland, sem er á Evrasíuflekanum. Þannig er landið í heild að gliðna í sundur. En ekki eru allir hlutar flekamótanna jafnvirkir. Sums



4. mynd. Upptök jarðskjálfta á Íslandi og hafsvæðunum umhverfis landið á tímabilinu 1960–1983. Teiknaðir eru skjálftar sem staðsettir hafa verið með gögnum frá 10 eða fleiri skjálftamælum. Langflestir skjálftarnir eru stærri en $4\frac{1}{2}$ á Richterskvarða. Gögnin eru frá U.S. Geological Survey, Earthquake Data File. Örvarnar sýna rekstefnur flekanna út frá Reykjaneshrygg og Kolbeinseyjarhrygg, og sniðgengishreyfingu um Charlie-Gibbs sprungusvæðið nálægt 53°N . Grunnkort er eftir General Bathymetric Chart of the Oceans, Sheet 5.04, Canada Hydrographic Service, Ottawa, 1978. Dýptarlínur í þúsundum metra. — Epicentral map of Iceland and the surrounding oceans for the period 1960–1983. Epicenters located with data from 10 or more seismic stations are included. Most of the earthquakes shown are of magnitude 4.5 and larger. Data are from the Earthquake Data File of the U.S. Geological Survey. The arrows show the spreading direction of the lithospheric plates away from the Reykjanes and Kolbeinsey Ridges, and the strike-slip movement along the Charlie-Gibbs Fracture Zone near 53°N . Base map is from the General Bathymetric Chart of the Oceans, Sheet 5.04, Canada Hydrographic Service, Ottawa, 1978. Bathymetric contours are in thousands of meters.

Tafla 1. Jarðskjálftar, tjón og sprungumyndun á Suðurlandi. – *Destruction and faulting during large earthquakes in Southern Iceland.*

Ár Year	Ölfus	Flói	Gríms- nes	Skeið	Holt	Hreppar	Land	Rangár- vellir
1164	x	x	+	*	*	*	*	*
1182	?	?	?	*	*	*	?	?
1211	?	?	?	*	*	*	?	?
1294	*	*	*	⊕	*	*	x	⊕
1300	*	*	*	*	*	*	*	+
1308	?	?	?	*	*	*	?	?
1339	.	+	*	+	⊕	*	*	+
1370	+	.	*	*	*	*	.	.
1389	.	.	*	*	*	*	x	x
1391	+	⊕	+	*	*	*	.	.
1510	.	*	*	*	*	*	x	x
1546	+	*	*	*	*	*	x	x
1581	.	*	*	*	*	*	*	+
1597	+	*	*	*	*	*	*	*
1614	x	x	x	+	*	*	*	*
1624	*	+	*	*	*	*	*	*
1630	*	*	*	*	x	+	⊕	*
1633	+	*	*	*	*	*	*	*
1657	.	+	*	*	*	*	*	*
1671	+	.	+	*	*	*	*	*
1706	+	+	*	*	*	*	*	*
1725	*	*	*	*	*	*	*	+
1726	*	*	*	*	*	*	*	+
1732	*	*	*	*	*	+	+	+
1734	+	+	+	*	*	*	*	*
1749	+	*	*	*	*	*	*	*
1752	+	*	*	*	*	*	*	*
1766	+	*	*	*	+	*	+	*
1784	+	+	+	+	⊕	+	+	+
1789	+	*	*	*	.	*	.	.
1829	.	*	*	*	.	*	+	+
1896	+	+	+	⊕	+	+	⊕	+
1912	*	*	*	*	*	*	⊕	⊕

+ Heimildir geta þess að bæir hafi hrunið í viðkomandi sveit. – *Annals state that houses fell in this district.*

x Sveitin ekki nefnd í heimildum, en næstum öruggt að þar hafi hrunið bæir. – *It is inferred from annals that houses fell in this district.*

? Bæir hrundu á Suðurlandi, en óvíst í hverjum þessara hreppa. – *Houses fell in South Iceland, but uncertain in which district.*

⊕ Sprungur mynduðust. – *Surface fracturing.* (eftir grein Páls Einarssonar o.fl. 1981).

staðar liggja flekamótin því sem næst hornrétt á hreyfingarstefnu flekanna. Þar á sér stað gliðnun í jarðskorpunni, gjár myndast og eldgos eru tíð, en jarðskjálftar verða aldrei mjög stórir. Gott dæmi um slíka virkni er umbrotin sem gengið hafa yfir í Þingeyjarsýslum á síðustu árum. Annars staðar hafa flekamótin sömu stefnu og hreyfingin. Þar núast flekajaðrarnir saman án þess að gliðnun eigi sér stað. Á þessum svæðum eru eldgos sjaldgæf, en jarðskjálftar geta orðið miklir. Á Íslandi eru tvö slík svæði, annað við norðurströndina, en hitt á Suðurlandsundirlendi. Á báðum svæðum hafa orðið skjálftar á þessari öld, sem mælst hafa 7 stig á Richterskvarða; á Rangárvöllum 1912 og fyrir mynni Skagafjarðar 1963. Í skjálftanum á Rangárvöllum varð mikið tjón, en Skagafjardarskjálftinn olli litlu tjóni, enda voru upptök hans nokkuð undan ströndinni. Af sömu ástæðu hafa skjálftar á Norðurlandi yfirleitt valdið litlu tjóni, ef frá eru taldir skjálftarnir á Húsavík 1872 og Dalvík 1934.

Öðru máli gegnir um Suðurland. Þar liggur skjálftabeltið um byggð hérud frá Ölfusi í vestri til Rangárvalla í austri. Frá því að land byggðist er vitað um að skjálftar hafi a.m.k. 33 sinnum valdið umtalsverðu tjóni á þessu svæði (sjá töflu I). Er þá örugglega nokkuð vantalið. Því heimildir eru glöppóttar, einkum um fyrstu tvær aldir byggðar í landinu og um fimmtánda öld. Síðustu meiri háttar jarðskjálftar urðu 1896 og 1912, en síðan hafa lífshættir allir, meðal annars húsagerð, gjörbreyst. Á skjálftasvæðinu og í næsta nágrenni þess, hafa þorp, kaupstaðir og virkjanir risið, og erfitt er að gera sér grein fyrir því hver áhrif jarðskjálfti kann að hafa á það mannlíf sem nú hrærist á Suðurlandi. Það væri þó skref í áttina, ef hægt væri

að átta sig á því hvers konar atburð við eigum yfir höfði okkar og helst, hvenær megi búast við honum. Í þessu skyni skulum við skyggast í heimildir um fyrri skjálfta.

Langbestar eru heimildirnar um skjálftana 1896, en afleiðingar þeirra kannaði Þorvaldur Thoroddsen og skrifaði um í bók sinni um landskjálfta á Suðurlandi (Þorvaldur Thoroddsen 1899). Skjálftarnir hófust 26. ágúst með miklum kipp sem átti upptök í Landssveit. Þar varð mikið tjón, sem og í nærliggjandi sveitum. Morguninn eftir kom á sömu slóðum annar kippur, að því er virðist jafnmikill, og bætti hann við tjónið sem orðið var. Miklar sprungur mynduðust í þessum skjálftum, og má enn sjá þær við bæina Lækjarbotna og Flagbjarnarholt (Flagveltú). En þar með var skjálftunum ekki lokið, því níu dögum síðar urðu enn miklir skjálftar, og nú vestar á svæðinu. Skjálftarnir virðast hafa verið tveir með stuttu millibili. Annar átti upptök á Skeiðum, og mynduðust þá sprungur og gjár sem enn má sjá við bæina Kálfhól, Kílhraun, Borgarkot og Arakot. Hinn kippurinn átti upptök við Selfoss, og gjörféllu þá allir bæir þar í nágrenni. Daginn eftir varð enn skjálfti og féllu þá bæir í Ölfusi. Eftir þetta dró úr skjálftum, og ekki er getið um að tjón hafi orðið eftir 10. september.

Stærð skjálftanna verðum við að meta óbeint, enda voru jarðskjálftamælingar í heiminum ófullkomnar. Með því að bera saman tjónasvæði skjálftanna 1896 og 1912 má álykta að kippirnir 26. og 27. ágúst hafi verið um 7 stig á Richterskvarða, en kippirnir á Skeiðum, við Selfoss og í Ölfusi nokkru minni, ef til vill 6–6,5 stig (Sveinbjörn Björnsson og Páll Einarsson 1981).

Nú vaknar sú spurning, hvort þessir

skjálftar séu einstæðir í sögunni, eða hvort eitthvað sé líkt með fyrri skjálftum. Athugum til dæmis skjálftana 1784, en þeir hófust með miklum kipp 14. ágúst. Eftir tjónasvæði hans að dæma, er hann líklega stærsti jarðskjálfti, sem orðið hefur á Íslandi á síðari öldum, gæti verið allt að 7,5 stig. Mest var tjónið í Biskupstungum, á Landi, í Efri-Holtum, á Skeiðum og ofarlega í Grímsnesi. Djúpar sprungur mynduðust í Efri-Holtum og verður að teljast líklegt að þar sé upptaka skjálftans að leita, en ekki er það þó fullvíst. Tveimur dögum síðar varð annar skjálfti, sem olli tjóni aðallega í Flóa, Ölfusi og neðarlega í Grímsnesi. Þessi kippur var minni en sá fyrsti, þó varla undir 6,5 stigum. Ýmislegt er líkt með skjálftunum 1784 og 1896. Í bæði skiptin hefjast umbrotin með miklum jarðskjálftum austan til á svæðinu, en síðan verða minni kippir vestar, þar til meginhluti svæðisins hefur komið við sögu.

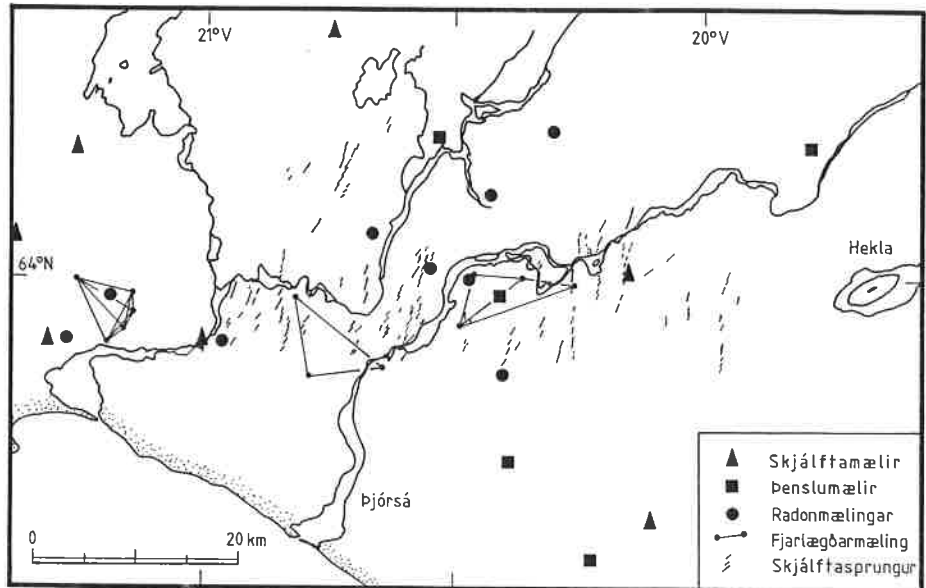
Ef skyggst er enn lengra aftur í tímann má finna fleiri dæmi um svipada atburðarás. Árið 1732 varð jarðskjálfti í Landssveit, og tveimur árum síðar annar í Flóa. Árið 1630 voru skjálftar í Landssveit og má enn sjá sprungur sem þá mynduðust við bæinn Minnivelli. Þremur árum síðar voru skjálftar í Ölfusi. Í enn eldri heimildum má finna dæmi um jarðskjálfta, þar sem meginhluti svæðisins kemur við sögu, þó ekki megi af heimildunum ráða hvort skjálftavirknin færðist frá austri til vesturs eða öfugt. Árið 1389 voru jarðskjálftar sem felldu hús, líklega austast á svæðinu, skjálfti 1391 olli tjóni í Grímsnesi, Ölfusi og Flóa. Skjálftar árið 1339 felldu hús á svæðinu allt austan frá Rangárvöllum vestur í Flóa. Telja verður líklegt í ljósi reynslu síðari alda, að þar hafi fleiri en einn kippur komið við sögu. Í sam-

bandi við jarðskjálfta árið 1294 er getið um að jarðsprungur hafi myndast bæði á Rangárvöllum og Skeiðum, og verður á sama hátt að álykta að þær hafi ekki myndast í einum skjálfta.

Allir þeir skjálftar eða skjálftahviður sem hér voru taldar hafa það sameiginlegt að taka til mikils hluta jarðskjálftasvæðisins, og þar sem heimildir eru bestar má sjá, að skjálftavirknin byrjar austan til á svæðinu og færir síðan vestur á bóginn (Páll Einarsson og fleiri 1981). Tíminn, sem hviðan stendur yfir hverju sinni, er breytilegur, allt frá tveimur dögum upp í þrjú ár. Tíminn milli hviðanna er einnig breytilegur. Stysta bilið er 45 ár, og meðaltími milli hviða er um 100 ár. Það er þó líklega of há tala, því þá er talið með langa bilið milli 1391 og 1630 sem líklega stafar af heimildaleysi frekar en skjálftaleysi. Þetta er einmitt sá tími í Íslandssögunni sem heimildir eru eina glöppóttastar um. Með öskulagarannsóknnum hefur til dæmis verið sýnt fram á, að á þessu tímabili urðu stórgos, sem engar ritaðar heimildir eru til um. Ef þetta bil er frátalið, er lengsta þekkta tímabil milli hviða 112 ár. Þetta er athyglisvert í ljósi þess að nú eru liðin 88 ár frá síðustu skjálftahviðu af þessu tagi.

Nú má reikna út tölfræðilegar líkur á því að næsta hviða verði innan einhvers ákveðins tíma, en útkoman fer talsvert eftir því, hvaða forsendur menn gefa sér og hvernig áreiðanleiki heimildanna er metinn. Það getur þó vart talist óhófleg svartsýni að áætla meira en 80% líkur á því að næsta hviða verði innan 25 ára.

Nú er rétt að taka fram að undangengnar vangaveltur eiga einungis við um þá skjálfta sem ganga yfir stóran hluta skjálftasvæðisins. En að fleiru þarf að hyggja, því staðbundið tjón hefur orðið í miklu fleiri jarðskjálftum



5. mynd. Jarðskjálftasvæðið á Suðurlandsundirlendi, skjálftamælir, þenslumælir, radonmælistaðir og fjarlægðarmælingar sem gerðar höfðu verið 1983. Sýnd eru helstu sprungukerfi, sem þekkt eru og líklegt er að tengd séu jarðskjálftum á síðustu árbúsundum. Sprungur eru teiknaðar eftir grein Páls Einarssonar og Jóns Eiríkssonar (1982), jarðfræðikorti Hauks Jóhannessonar o.fl. (1982), óbirtu sprungukorti Helga Torfasonar og eigin athugunum. – *The South Iceland Seismic Zone, location of seismographs, volumetric strainmeters, radon sampling stations and geodimeter distance measurements. Fracture and fracture systems thought to be associated with recent earthquakes are shown, compiled from Einarsson and Eiríksson (1982), Jóhannesson et al. (1982), and unpublished map by Helgi Torfason and the present author's observations.*

en hér voru taldir (sjá töflu I). Þessa skjálfta virðist mega flokka í tvennt. Annars vegar eru skjálftar með upp-tök austast á svæðinu, þ.e. á Rangárvöllum, hins vegar eru skjálftar eða skjálftahrinur vestast í Ölfusi. Í fyrri flokknum eru skjálftarnir 1912, 1829, 1726 og 1581, en í seinni flokknum mætti telja skjálfta 1789, 1766, 1752, 1706, 1671, 1597, 1546 og 1370. Þegar þessir skjálftar leggjast við stóru skjálftahviðurnar, er ekki að undra þótt Ölfus og Rangárvellir hafi verið taldir mestu jarðskjálftasveitir landsins.

En hversu stórir geta Suðurlands-skjálftar orðið? Stærð jarðskjálfta er fundin frá útslagi sem hann veldur á jarðskjálftamælum, og jarðskjálftamælingar hófust ekki fyrir alvöru í heiminum fyrr en upp úr síðustu aldamótum. Jarðskjálftinn á Rangárvöllum 1912 er því eini stóri skjálftinn sem mældur hefur verið, og var stærð hans 7 á Richterskvarða. Stærð annarra skjálfta verðum við að finna eftir krókaleiðum. Áður var þess getið að stærstu kippirnir 1896 hafi verið álíka miklir og skjálftinn 1912. Sú niðurstaða er fengin með því að bera

saman tjónasvæði þeirra. Stærsti kippurinn 1784 telst vera nokkru stærri, ef sömu aðferð er beitt, gæti hafa verið 7,1–7,5 stig (Eysteinn Tryggvason 1973; Ragnar Stefánsson 1979). Heimildir um aðra skjálfta eru ekki nógu góðar til að lengra verði farið á þessari braut.

En skjálftarnir höfðu fleira í för með sér en tjón á húsum. Í nokkrum heimildum er getið um að sprungur og gjár hafi myndast í skjálftum, stundum svo miklar að reiðgötur urðu ófærar. Best eru þekktar sprungurnar sem mynduðust í skjálftunum 1912 og 1896, en það eru engan veginn einu sprungurnar sem finna má. Á skjálftasvæði Suðurlands úir og grúir af sprungum (sjá 5. mynd) og eru sumar þeirra talsvert tilkomumeiri en þær sem mynduðust 1912 og 1896. Ekkert bendir því til að fyrri skjálftar hafi verið minni.

Könnun á sprungunum hefur leitt í ljós, að þær ræða sér í aflöng kerfi, sem yfirleitt stefna í norður og suður (Páll Einarsson og Jón Eiríksson 1982). Þær gefa væntanlega til kynna legu misgengisins sem skjálftanum olli. Þetta hefur mikla þýðingu, þegar stærð skjálftans er metin, því ef lengd misgengisins er þekkt og hægt er að sjá hversu mikið barmar þess hafa hreyfst, má reikna út stærð skjálftans. Svo vel vill til, að á einum stað má sjá slíka misgengishreyfingu. Í landi Lunansholts í Landssveit hefur hláðinn garður hlíðrast um 80 cm þar sem hann liggur yfir sprungurnar frá jarðskjálftunum 1896. Samkvæmt því ætti stærð jarðskjálftans að hafa verið um 6,3 stig á Richterskvarða. Þess er þó að geta að þetta er líklega lágmarksstærð. Sprungurnar eru víðast miklu stærri en við Lunansholt og meðaltílfærslan því líklega meiri en 80 cm. Miðað við það að hér er verið að beita

óbeinum aðferðum við að ákvarða stærð, verður samræmið að teljast nokkuð gott.

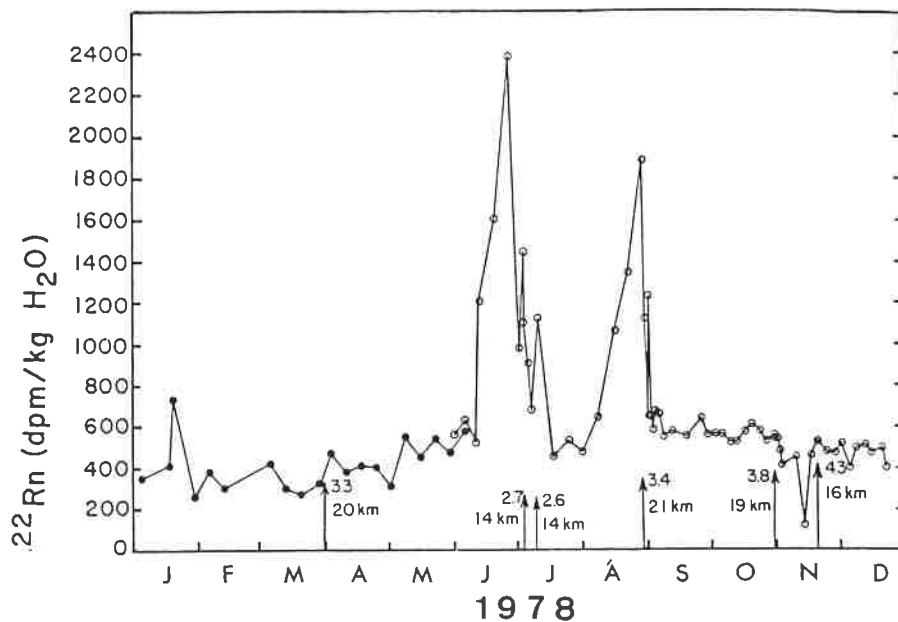
Til samanburðar má líta til annarra skjálftasvæða þar sem jarðskorpuhreyfingar eru með líkum hætti og á Suðurlandi. Nærtækust eru þá sprungusvæðin við Jan Mayen og annað sprungusvæði sem er í Atlantshafi um 1200 km fyrir sunnan Ísland, Charlie-Gibbs sprungusvæðið (sjá 4. mynd). Á báðum þessum svæðum hafa orðið á síðasta áratug skjálftar allt að 7 stigum á Richterskvarða. Allt ber því að sama bruni hvað stærð stærstu skjálfta á Suðurlandi varðar, þeir eru varla minni en 6,3 stig og varla stærri en 7,5 stig.

Niðurstöður þessara vangaveltna má nú taka saman og búa til spá, sem uppfyllir þau skilyrði sem nefnd voru í upphafi þessarar greinar, og gæti hún hljóðað svo: Meira en 80% líkur eru til þess að á næstu 25 árum gangi meiri háttar jarðskjálftar yfir Suðurlandsundirlendi. Jarðskjálftarnir hefjast líklega á austurhluta skjálftasvæðisins með kipp að stærð 6,3–7,5, en á næstu dögum, mánuðum eða árum færast skjálftavirknin vestur á bóginn, um Skeið, Grímsnes, Flóa eða Ölfus.

Þetta er dæmigerð langtímaspá, byggð á þeirri meginforsendu að jarðskjálftavirkni á Suðurlandi haldi áfram með líkum hætti og verið hefur síðustu aldirnar.

MÆLINGAR Á SUÐURLANDS-UNDIRLENDI

Í framhaldi langtímaspár er edlilegt að spurt sé, hvort hægt verði að gera nákvæmari spá þegar nær dregur skjálftunum, og ef til vill gefa út aðvörun í tæka tíð. Við núverandi aðstæður verðum við að svara því neitandi, til þess höfum við hvorki næga reynslu af skjálftum á Suður-



6. mynd. Radon mælt í sýnum af jarðhitavökva, sem tekin eru úr borholu á Flúðum í Hrunamannahrepp. Örvarnar gefa til kynna hvenær jarðskjálftar urðu á Suðurlandsundirlendi, einnig er sýnd stærð skjálftanna og fjarlægð upptakanna frá Flúðum. Mikil radonaukning varð á undan skjálftahrinu í júlí og skjálfta í lok ágúst, en á undan skjálfta í nóvember minnkaði radon. Kippirnir áttu upptök efst í Holtum. Myndin er úr grein Egils Haukssonar og J. Goddard (1981). – Radon time series for 1978 from a drill hole in Flúðir, S-Iceland. The arrows show the time of earthquakes in the South Iceland Seismic Zone. Magnitude of the events and the distance between the epicenter and the sampling station are also shown. Anomalies are seen before an earthquake swarm in July and single events in late August and November. From Hauksson and Goddard (1981).

landi né nægileg mælitæki til að sýna þær breytingar sem búast mætti við. En jafnvel þótt ekki verði unnt að spá nákvæmlega um næsta skjálfta, þá skiptir miklu máli að fylgst sé náið með aðdraganda hans. Af því fengist dýrmæt reynsla, sem gæti komið öðrum að notum, og ekki síst afkomendum okkar þegar að því kemur að aftur má fara að búast við skjálftum á Suðurlandi.

Á síðustu árum hafa jarðeðlisfræðilegar mælingar verið auknar nokkuð á Suðurlandi. Má þar nefna skjálftamæl-

ingar, radonmælingar, þenslumælingar og fjarlægðarmælingar (sjá 5. mynd). Jarðskjálftamælar eru nú á um 35 stöðum á landinu, og eru nokkrir þeirra á skjálftasvæði Suðurlands og í næsta umhverfi þess. Á skjálftasvæðinu sjálfu eru mælar á Bjarnastöðum í Ölfusi, Selfossi og á Hellum í Landsveit, í næsta umhverfi eru mælar við Kaldársel, skíðaskála ÍR í Hamragili, í Menntaskólanum á Laugarvatni, á Árgilsstöðum í Hvolhreppi og í Selkoti undir Eyjafjöllum. Aðrir mælar á Suður- og Vesturlandi nýtast að sjálf-

sögðu einnig við þessar mælingar. Með þessu mælakerfi má staðsetja upptök skjálfta á svæðinu með allgóðri nákvæmni og ákvarða stærð þeirra. Þannig má fá upplýsingar um það hvar helstu brestirnir eru í jarðskorpunni, og einnig fylgjast með því hvernig jarðskorpan bregst við áður en hún brestur í stórum jarðskjálfta.

Radonmælingar hafa verið gerðar á nokkrum stöðum síðan 1978. Mælingarnar eru gerðar á vegum Raunvísindastofnunar Háskólans og fara þannig fram, að vatnssýni eru tekin úr borholum á fáeinna vikna fresti og radoninnihald þeirra mælt. Þessar mælingar hafa skilað mjög áhugaverðum árangri (Egill Hauksson og J. Goddard 1981). Árið 1978 urðu nokkrir skjálftar í Landssveit að stærð 2,7–4,0. Á undan þeim mældust greinilegar óreglur á útstreymi radons. Óreglurnar voru skýrastar á Flúðum, og eru það einhver bestu dæmin um radonóreglu á undan skjálftum sem þekkt eru í heiminum (6. mynd).

Á vegum Veðurstofunnar eru gerðar þenslumælingar á nokkrum stöðum. Mælitæki er komið fyrir í borholu á nokkurra tuga til hundruða metra dýpi og skynjar hvernig jarðskorpan þenst út eða dregst saman. Mælingarnar eru skráðar á sírita og má þannig fá samfellt yfirlit um það hvernig spennan safnast upp. Bæði þenslu- og radonmælingarnar hafa verið gerðar í samvinnu við bandarískar vísindastofnanir, og hafa verið kostaðar af þeim að hluta.

Fjarlægðarmælingar hafa einungis verið gerðar í litlum mæli enn sem komið er. Fastmerkjum er þá komið fyrir með nokkurra kílómetra millibili, og fjarlægð milli þeirra mæld með leysigeisla. Við endurteknar mælingar má þannig sjá ef annar punkturinn hreyfist miðað við hinn, jafnvel þó

hreyfingin nemi aðeins fáeinum sentímetrum.

Mælingarnar, sem hér var getið eru þýðingarmiklar svo langt sem þær ná, en betur má ef duga skal. Endurbæta þyrfti skjálftamælingarnar, hanna fullkomnari mæla og bæta við þá sem fyrir eru. Þá þyrfti að setja upp síritandi hallamæla á nokkrum stöðum, og gera hæðarmælingar á mælinúnum langsum og þversum yfir svæðið. Með því móti mætti sjá ef einhver hluti svæðisins tæki að rísa óeðlilega. Endurteknar mælingar á þyngdarkrafti jarðar gætu einnig gefið vísbendingar um slíkt ris. Ef land rís meira en 5 cm, veldur það mælanlegri breytingu á rissvæðinu. Þá þyrfti að gera fjarlægðarmælingar á neti fastpunkta, sem næði yfir allt skjálftasvæðið. Þannig mætti fylgjast með því hvernig jarðskorpan aflagast þegar spennan hleðst upp í henni. Setja þyrfti síritandi vatnshæðarmæla á nokkrar borholur til að fylgjast með breytingum á jarðvatni.*

En allar þessar mælingar kosta nokkurt fé, og við óbreyttar aðstæður verður ekki hægt að sinna þeim svo nokkru nemi. Til eru þó mælingar og athuganir, sem hægt væri að gera með aðstoð heimamanna að kínverskri fyrirmynd án verulegra fjármuna. Hér mætti nefna til dæmis mælingar á vatnshæð í borholum. Víða á Suðurlandi eru borholur, sem ekki eru notaðar til vinnslu á heitu eða köldu vatni. Með lítilli fyrirhöfn mætti koma fyrir útbúnaði til að mæla hvar vatnsborðið er í þeim. Þá mætti fylgjast með rennsli í sjálfrennandi lindum og

* Sumarið 1984, eftir að grein þessi fór í prentun, voru gerðar umfangsmiklar fjarlægðarmælingar á Suðurlandi á vegum Orkustofnunar og Raunvísindastofnunar Háskólans. Þá voru mældar hæðarmælingalínur og gerðar þyngdarmælingar á vegum Orkustofnunar.

athuga t.d. hvort grugg eða óeðlilegar loftbólur séu í vatninu. Hér á landi eru sögur um óeðlilega hegðun dýra á undan jarðskjálftum ekki algengar, en talsverð áhersla virðist vera lögð á slíkt í Kína. Á Suðurlandi ættu aðstæður til að fylgjast með dýrum að vera mjög ákjósanlegar. Fleiri athuganir mætti telja, en hér verður látið staðar numið.

Samvinna vísindamanna og áhugafélks við rannsóknir hefur oft gefist vel, og á sumum sviðum, til dæmis við jarðskjálftaspár, gæti hún verið ein af forsendunum fyrir því að vel takist til. Raunar er löng hefð fyrir slíkri samvinnu hér á landi, og má þar nefna rannsóknir í jarðfræði, jöklafræði og jarðskjálftafræði.

Í þessum pistli hefur verið fjallað almennt um jarðskjálftaspár og reynt að skýra fræðilegar forsendur þeirra. Þá var rakinn aðdragandi skjálftans mikla í Haicheng 1975, en þá var tugum þúsunda mannlífa bjargað með nákvæmri jarðskjálftaspá. Að síðustu var rætt um jarðskjálfta á Suðurlandi og möguleika okkar að sjá þá fyrir. Rannsóknir á þessu sviði hafa farið mjög vaxandi á síðasta áratug, og er spáin í Haicheng glæsilegasta dæmið um árangur af þeim. Ekki er vafi á því, að verulegra framfara er að vænta á næstu árum, eftir því sem meiri reynsla fæst. Það skiptir okkur Íslendinga miklu að fylgjast vel með framförum á þessu sviði; af því kynnum við að hafa ómælt gagn. En við þurfum ekki einungis að vera þiggjendur, hér höfum við betri möguleika en á flestum öðrum sviðum til að leggja þungt lóð á vogarskálarnar. Auknar rannsóknir á aðdraganda næstu jarðskjálfta á Suðurlandi kynnu að leiða til framfara sem nýst gætu öllu mannkyni í baráttu gegn mannskæðum vágæsti.

HEIMILDIR

- Aggarwal, Y.P., L.R. Sykes, J. Armbruster & M.L. Sbar. 1973. Premonitory changes in seismic velocities and prediction of earthquakes. – *Nature* 141: 101–104.
- Egill Hauksson & J.G. Goddard. 1981. Radon earthquake precursor studies in Iceland. – *J. Geophys. Res.* 86: 7037–7054.
- Eysteinn Tryggvason. 1973. Seismicity, earthquake swarms and plate boundaries in the Iceland region. – *Bull. Seismol. Soc. Am.* 63: 1327–1348.
- Eysteinn Tryggvason, Sigurður Thoroddson & Sigurður Þórarinnsson. 1958. Greinargerð jarðskjálftanefndar um jarðskjálftahættu á Íslandi. – *Tímarit Verkfræðingafélags Íslands* 43: 81–97.
- Haukur Jónhannesson, Sveinn P. Jakobsen & Kristján Sæmundsson. 1982. Jarðfræðikort af Íslandi, blað 6, Miðsuðurland, önnur útgáfa. – Náttúrufræðistofnun Íslands og Landmælingar Íslands, Reykjavík.
- McCann, W.R., S.P. Nishenko, L.R. Sykes & J. Krause. 1979. Seismic gaps and plate tectonics: Seismic potential for major boundaries. – *Pageoph.* 117: 1082–1147.
- Páll Einarsson & Jón Eiríksson. 1982. Earthquake fractures in the districts Land and Rangárvellir in the South Iceland Seismic Zone. – *Jökull* 32: 113–120.
- Páll Einarsson, Sveinbjörn Björnsson, Gillian Foulger, Ragnar Stefánsson & Þórunn Skaftadóttir. 1981. Seismicity pattern in the South Iceland Seismic Zone. – Í: *Earthquake Prediction- An International Review*: 141–151. Maurice Ewing Series 4, American Geophys. Union, Washington.
- Press, F. 1975. Earthquake prediction. – *Scientific American* 232 (5): 14–23.
- Ragnar Stefánsson. 1979. Catastrophic earthquakes in Iceland. – *Tectonophysics* 53: 273–278.
- Raleigh, B., G. Bennett, H. Craig, T. Hanks, P. Molnar, A. Nur, J. Savage,

- C. Scholz, R. Turner & F. Wu. 1977. Prediction of the Haicheng earthquake. – EOS, Trans. Am. Geophys. Union 58: 236–272.
- Scholz, C.H., L.R. Sykes & Y.P. Aggarwal. 1973. Earthquake prediction: A physical basis. – Science 181: 803–809.
- Semenov, A.N. 1969. Variation in the travel time of transverse and longitudinal waves before violent earthquakes. – Izv. Acad. Sci. USSR Phys. Solid Earth 4: 72–77.
- Sveinbjörn Björnsson & Páll Einarsson. 1981. Jarðskjálftar. – Í: Náttúra Íslands: 121–155. Almenna Bókafélagið, Reykjavík.
- Þorvaldur Thoroddsen. 1899. Jarðskjálftar á Suðurlandi. – Hið Íslenska Bókmenntafélag, Kaupmannahöfn: 199 bls.

SUMMARY

Earthquake prediction

by
Páll Einarsson
Science Institute
University of Iceland
Reykjavík

Considerable progress has been made in the last 15 years or so towards the goal of seismologists to predict earthquakes. This progress is intimately linked with new theories on global tectonics, improvements in the seismograph coverage of the world and better understanding of physical processes taking place at the earthquake source. The theory of plate tectonics, e.g., led to the concept of the „seismicity gap“, which has been successfully applied to delineate areas along plate boundaries where the probability for large earthquakes is highest. The discovery and documentation of changes in the velocity of seismic waves prior to earthquakes in the Garm region of the USSR, and in New York demonstrated that measureable changes pre-

cede at least some earthquakes, and provided the impetus for further research. Physical models were developed to explain these changes. The models are based on experimental results from rock mechanics, especially the observed phenomenon of dilatancy, i.e. the volume increase that occurs in a rock specimen shortly before it breaks under loading. The models predict the changes in velocities, seismicity, resistivity, ground water, radon exhalation and surface uplift that have been observed prior to some earthquakes.

The success of the models to explain the observations led to optimism, that culminated in 1975, when Chinese seismologists successfully predicted an earthquake of magnitude 7.3 near Haicheng in NE-China, but the prediction was refined and narrowed as time went on. Premonitory changes were observed in tilt, earth currents, the geomagnetic field, seismicity and the flow of ground water. Anomalous animal behavior also seems to have played a large role in the short term prediction of the event. A pronounced foreshock sequence was considered to be the final warning, resulting in evacuation of buildings few hours before the earthquake occurred.

Most destructive, historic earthquakes in Iceland have originated in the South Iceland Seismic Zone, a transform fault zone connecting the submarine Reykjanes Ridge and the Eastern Volcanic Zone. At least 33 earthquakes have caused considerable damage in this zone in the last 1000 years. Sequences of earthquakes affecting most of the 70 km long zone recur at intervals ranging between 45 and 112 years. The sequences characteristically begin with a large event (M 7) in the eastern part of the zone followed by similar or slightly smaller events farther west. A sequence may last from a few days to three years. The last sequence of this type occurred in 1896, and one must conclude that there is more than 80% probability that a major sequence recurs in the next 25 years. A modest effort to monitor changes in physical parameters preceding the next sequence has been initiated, including the operation of a seismograph network, installation of volumetric strainmeters and sampling of fluid from geothermal wells for radon analysis.