



ORKUSTOFNUN

Rannsóknasvið

JARÐHITAKERFIÐ Á REYKJANESI

Mat á innra ástandi og afkastagetu

Grímur Björnsson

Unnið fyrir Hitaveitu Suðurnesja

1998

OS-98047



ORKUSTOFNUN
Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Verknr. 630

Grímur Björnsson

JARÐHITAKERFIÐ Á REYKJANESI

Mat á innra ástandi og afkastagetu

Unnið fyrir Hitaveitu Suðurnesja

OS-98047

Ágúst 1998

ISBN 9979-68-022-9



Skýrsla nr.:	Dags.:	Dreifing:
OS-98047	Ágúst 1998	<input checked="" type="checkbox"/> Opin <input type="checkbox"/> Lokað til
Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill: JARÐHITAKERFIÐ Á REYKJANESI Mat á innra ástandi og afkastagetu		Upplag: 30
		Fjöldi síðna: 16
Höfundar: Grímur Björnsson		Verkefnistjóri: Sverrir Þórhallsson
Gerð skýrslu / Verkstig: Mat á jarðhitakerfi		Verknúmer: 630 222
Unnið fyrir: Hitaveitu Suðurnesja		
Samvinnuaðilar:		
Útdráttur: <p>Í skýrslunni er dregin saman þekking sem aflað hefur verið um jarðhitakerfið á Reykjanesi með rannsóknum og borunum í ríflega 40 ár, og lagt mat á afkastagetu svæðisins. Verkið er unnið í tengslum við áform Hitaveitu Suðurnesja að bora nýjar holar á svæðinu og auka þar með vinnslu úr jarðhitakerfinu. Gerð er grein fyrir gagnasafni um boranir á Reykjanessvæðinu og mati á stærð jarðhitasvæðisins út frá viðnámsdreifingu á skaganum. Lagt er fram hugmyndalíkan að innri gerð jarðhitakerfisins sem einkennist af lóðrétttri hræringu tæplega 300 °C heits jarðsjávar milli 900 og 2000 m dýpis. Einnig er lýst reiknilíkön sem spá fyrir um áhrif aukinnar vinnslu. Stærð svæðisins út frá hitamælingum þar sem hiti er eða hefur náð 250 °C er amk. 10 ferkm. Hiti og þrýstingur neðan 1000 m dýpis gefa til kynna afkastamikið jarðhitakerfi. Af tiltækum reiknilíkönum af Reykjaneskerfinu má ráða að litlar breytingar verði í djúpástandi svæðisins þótt vinnsla sé margfölduð. Ekki er talið að þrýstilækkun vegna vinnslu dragi úr virkni hverasvæðisins. Settar eru fram tillögur um framtíðarvinnslueftirlit á svæðinu.</p>		
Lykilord:	ISBN-númer:	
Reykjanes, jarðhitakerfi, vinnsla, ástand, afköst, mat, líkan, spá, eftirlit	9979-68-022-9	
Undirskrift verkefnistjóra: 		
Yfirfarið af: S P		

EFNISYFIRLIT

1. Inngangur	3
2. Borholur og vinnslusaga	3
3. Viðnámsdreifing, gossaga og yfirborðshiti	7
4. Hugmyndalíkan af jarðhitakerfinu	9
5. Reiknilíkön og spár um afköst jarðhitakerfisins	10
5.1 Rúmmálsreikningar	10
5.2 Hermireikningar	11
6. Aðstreymi til hverasvæðisins og áhrif aukinnar vinnslu	12
7. Vinnslueftirlit í framtíðinni	14
8. Niðurstöður	15
9. Heimildaskrá	15

MYNDIR

Mynd 1: Vinnslusaga holna 8 og 9 á Reykjanesi	4
Mynd 2: Mældur hiti (punktar) og áætlaður berghiti (lína) á Reykjanesi	5
Mynd 3: Saga þrýstings á 1400 m dýpi í holu 9	6
Mynd 4: Saga hita á 1400 m dýpi í holu 9	6
Mynd 5: Háviðnámskjarninn, borholur og gosreinar á Reykjanesi	8
Mynd 6: Helstu þættir í hugmyndalíkani jarðhitasvæðisins á Reykjanesi	9
Mynd 7: Spár um þrýsting í jarðhitakerfunum á Reykjanesi	11
Mynd 8: Hugmyndalíkan af aðfærslurásum hverasvæðisins á Reykjanesi	13

1. Inngangur

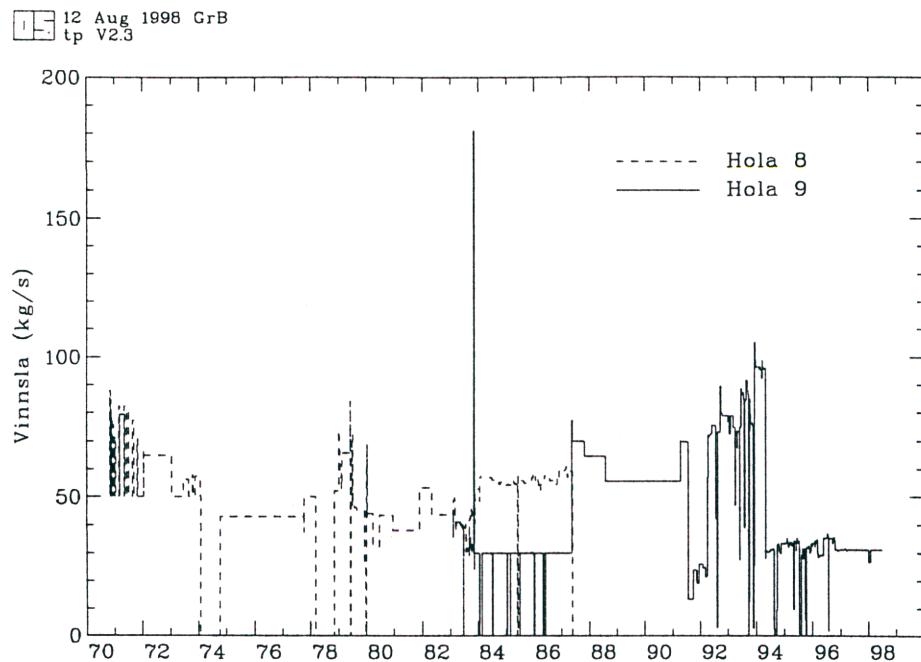
Í skýrslu þessari er dregin saman sú þekking og innsýn sem ríflega 40 ára rannsókna- og borsaga hefur skilað um jarðhitakerfið á Reykjanesi. Skýrslan er unnin að beiðni Hita-veitu Suðurnesja. Í bígerð er að bora nýjar holar í jarðhitakerfið og geta þannig aukið vinnslu. Sjálfsagður liður í slíku verki er að meta afkastagetu svæðisins og þar eru reiknilíkön hvers konar í forgrunni. Áreiðanleiki reiknilíkana byggist hins vegar á vand-aðri forvinnu þar sem höfuðáherslan er lögð á að skilgeina innri gerð jarðhitasvæðisins, vatnsleiðara, hita, þrýsting og efnasamsetningu.

Í texta er gerð grein fyrir því gagnasafni sem nú liggar fyrir um boranir í Reykjanessvæðið. Lýst er hvernig viðnámsdreifing á Reykjanesskaga kemur inn í mat á útbreiðslu svæðisins. Eins er tæpt á jarðfræði svæðisins og hugsanlegum tengslum jarðhitans við goshrinur sem hafa riðið yfir Reykjanesið. Í ljósi þessara þátta og með hliðsjón af þrýsti-breytingum í Svartsengi og Eldvörpum, er svo lagt fram hugmyndalíkan af jarðhitakerfinu. Lýst er reiknilíkönum sem spá fyrir um áhrif aukinnar vinnslu og metin áhrif hennar á hveri í yfirborði. Loks eru gerðar tillögur um framtíðarvinnslueftirlit á svæðinu.

2. Borholur og vinnslusaga

Rekja má sögu borana á Reykjanesi aftur til ársins 1956 að hola 1 er boruð. Síðan er hlé í borsögunni fram til 1968, en í millitíðinni voru gerðar ýmsar yfirborðsathuganir ásamt því að skjálftahrina árið 1967 skilaði mikilsverðum upplýsingum. Boranir hófust á ný sumarið 1968 og stóðu fram á haust 1969. Á þessu tímabili voru holar 2-8 boraðar. Þríðisgott yfirlit um þennan rannsóknarfasa er að finna í skýrslu Sveinbjörns Björnssonar o.fl. (1971). Hola 9 er svo boruð vorið 1983 (Hjalti Franzson o.fl., 1983). Holur 8 og 9 reyndust ágætar vinnsluholar og var hola 9 t.d. talin um tíma heimsmeistari í afli og afköstum. Þær hafa blásið meira og minna samfellt frá borlokum. Hola 8 þjónaði sjóefnavinnslunni um árabil en vegna skemmda í fóðurröri var fyllt í hana með steypu haustið 1993 (Benedikt Steingrímsson og Grímur Björnsson, 1993b).

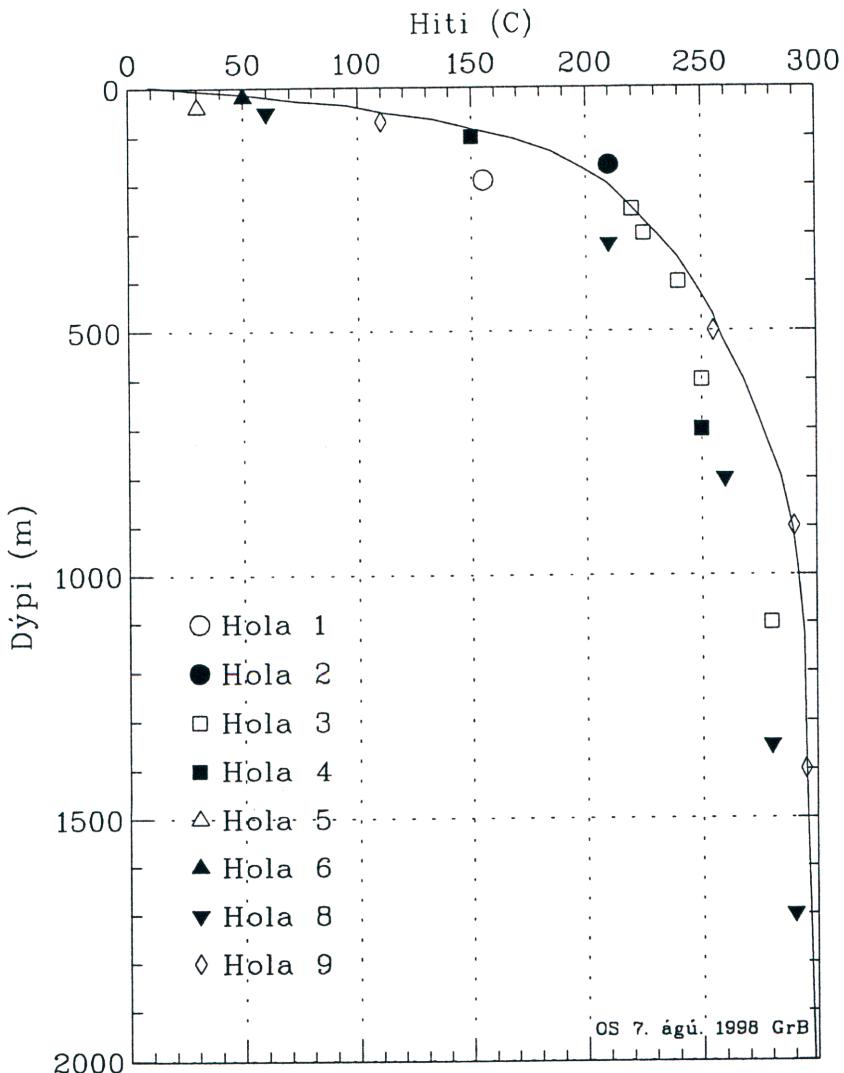
Verkfræðistofan Vatnaskil (1998a) hefur unnið árlegar skýrslur um massatökuna og vinnslu úr borholmum á Reykjanesi. Í þeirri nýjustu, sem nær fram í júlí 1998, kemur fram að heildarmassatakan úr svæðinu, frá ársbyrjun 1970, nemi um 43 milljónum tonna. Meðalvinnslan er því tæp 50 kg/s þetta árabil eða um $1\frac{1}{2}$ milljón tonna á ári. Heldur hefur dregið úr vinnslunni eftir árið 1993, að hola 8 er fyllt af steypu og hola 9 laskaðist í hreinsiborun. Er vinnslan nú um 32 kg/s að jafnaði. Mynd 1 sýnir nánar vinnslusögu holna 8 og 9 fram á mitt ár 1997.



Mynd 1: Vinnslusaga holna 8 og 9 á Reykjanesi.
Gögnin eru úr skýrslu Verkfæðistofunnar Vatnaskila (1998a).

Mikil afköst borholna á Reykjanesi eru í samræmi við reynsluna af borunum í Eldvörpum og Svartsengi. Þessi staðreynd skilar tvennu, 1) að borkostnaður á orkueiningu er lágor, og 2) að orkuframleiðsla á flatareiningu yfirborðsmannvirkja verður með því allra mesta sem þekkist.

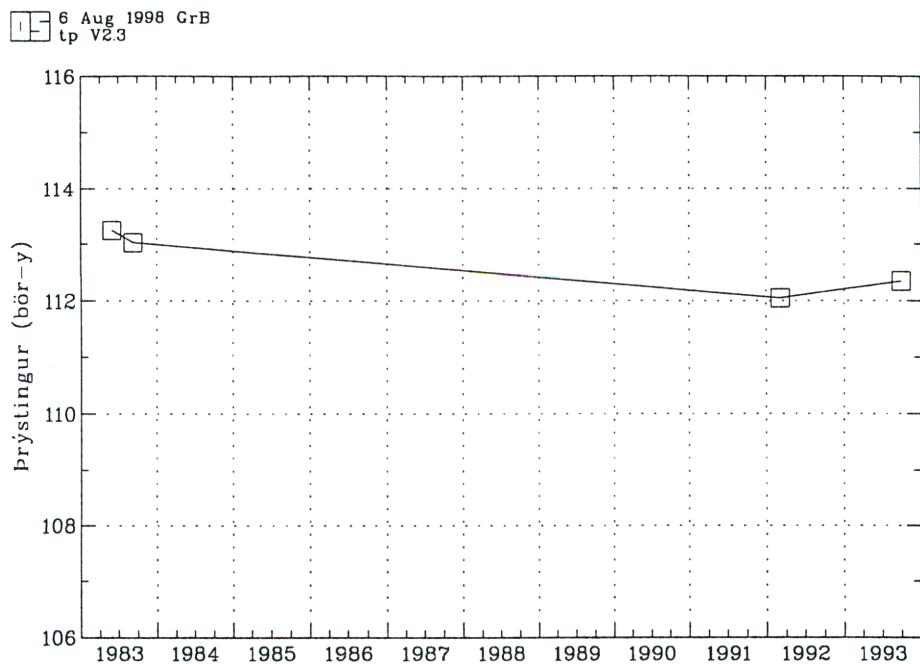
Hita- og þrýstimælingar hafa verið gerðar niðri í Reykjanesholunum, allt frá upphafi borana. Þær eru varðveittar í gagnasafni Orkustofnunar. Mynd 2 sýnir áætlaðan berghita (upphafshita) í jarðhitasvæðinu, næst holu 9. Er þá búið að taka tillit til hitamælinga í öllum holum. Tvennt einkennir berghitaferilinn. Annars vegar er hann íbjúgur frá yfirborði niður undir 900 m dýpi. Skýring þessa er að jarðhitakerfið er í suðu á þessu bili, strjálar gufubólur stíga upp gegnum annars nánast vatnsmettað bergið, gufubólurnar þéttast síðan og síga niður aftur sem vatn. Þetta ástand er algengt í háhitasvæðum og er merki um að svæðið sé í jafnvægi. Á 900 m dýpi er hitinn kominn í 280-290 °C og gæti hafa náð u.p.b. 300 °C í 2000 m. Hér er engin suða í kerfinu, heldur hrærist vatn tiltölulega greitt í lóðréttum sprungum. Sækir kerfið þá varma úr enn heitara bergi, annað hvort að neðan eða til hliðar við 2000 m dýpið.



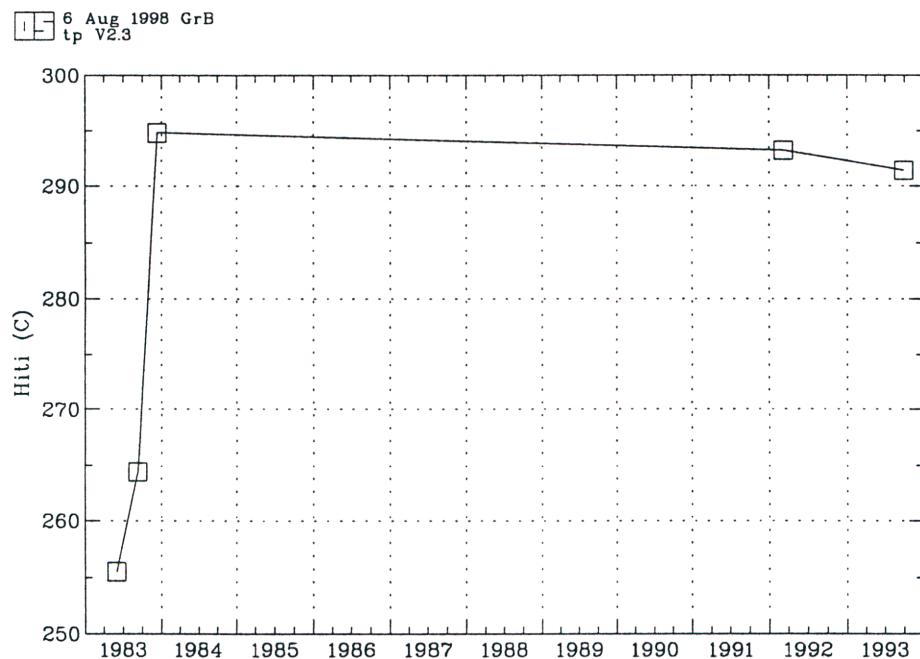
Mynd 2: Mældur hiti (punktar) og áætlaður berghiti (lína) á Reykjanesi.

Berghitaferillinn á mynd 2 tekur 100 °C hitann nokkru neðan yfirborðs. Það þýðir að jarðhitakerfið er lítillega undirþrýst miðað við grunnvatnið og sjóinn í yfirborði. Massi sleppur því ekki til yfirborðs nema vegna áhrifa mikillar suðu.

Engar mælingar voru gerðar djúpt í holu 9 milli áranna 1983 og 1992 að Hitaveita Suðurnesja er tekin við rekstri svæðisins. Þá er holan hita-, þrýsti- og körfumæld tvívegis til að kanna útfellingar og hugsanlegar breytingar í svæðisástandi (Benedikt Steingrímsson og Grímur Björnsson, 1993a). Mynd 3 sýnir sögu þrýstings í holunni á 1400 m dýpi og mynd 4 sýnir sögu hita á sama stað. Skemmst er frá því að segja að breytingar í þessum lykilstærðum jarðhitasvæðisins eru hverfandi og vitni þess að svæðið taki vart eftir 50 kg/s jafnaðarvinnslu. Niðurstöður þessar þóttu lofa mjög góðu á sínum tíma og áttu áreiðanlega sinn þátt í að áhugi vaknaði fyrir frekari nýtingu jarðhitans.



Mynd 3: Saga prýstings á 1400 m dýpi í holu 9.



Mynd 4: Saga hita á 1400 m dýpi í holu 9.

3. Viðnámsdreifing, gossaga og yfirborðshiti

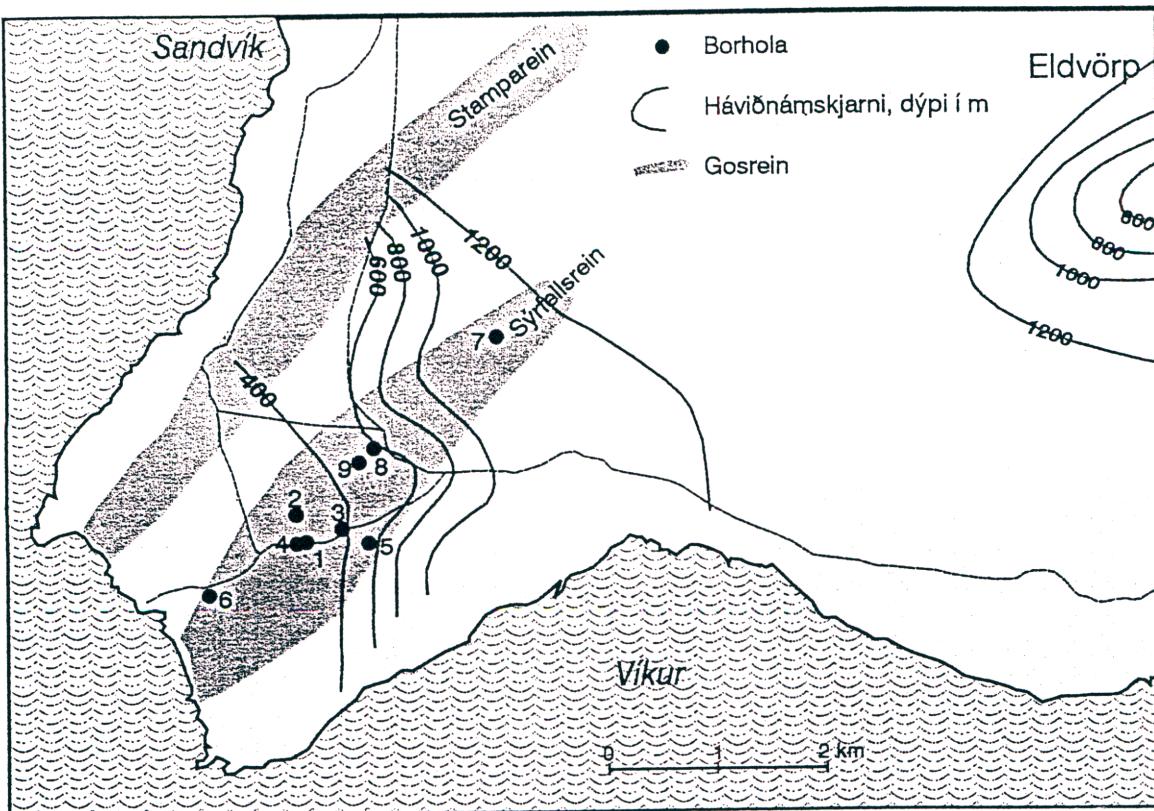
Einn þátturinn í rannsóknum Orkustofnunar fyrir Hitaveitu Suðurnesja á Reykjanesi, fólst í endurgerð korta af djúpviðnámi svæðisins (Ragna Karlsdóttir, 1997 og 1998). Mynd 5 sýnir dýpi á svonefndan háviðnámskjarna jarðhitasvæðisins. Með því er búið að afmarka bergrúmmál þar sem hiti er eða hefur náð u.p.b. 250°C . Háviðnámskjarninn er opinn til suðvesturs en lokaður til norðausturs sökum þess hve hratt dýpkar þar á háviðnámskjarnann. Út frá þessum mælingum má ætla flatarmál heitasta hluta svæðisins a.m.k. 10 km^2 . Svipar því þannig að útbreiðslu til háviðnámskjarnans í borsvæði Kröfluvirkjunar (Knútur Árnason og Ragna Karlsdóttir, 1996).

Mynd 5 sýnir einnig háviðnámskjarna í Eldvörpum, en hann tengist því víðáttumikla jarðhitakerfi sem er á milli Eldvarpa og Svartsengis. Háviðnámskjarnar Eldvarpa og Reykjaness ná ekki saman, a.m.k. ofan 1000 m dýpis. Vinnsla hefur nú staðið í yfir 20 ár í Svartsengi og hefur hún orsakað rúmlega 20 bara niðurdrátt djúpt í svæðinu. Eins er kringum 15 bara þrýstilækkun mælanleg í Eldvörpum. Þrýstilækkun er hins vegar ekki sjáanleg á Reykjanesi (mynd 3). Því hníga öll rök til þess að Reykjanesskerfið sé aðskilid Svartsengis-Eldvarpakerfinu, bæði með tilliti til viðnámsdreifingar og þrýstisögu.

Jarðfræðirannsóknir eiga sér langa sögu úti á Reykjanesi (sjá t.d. Magnús Sigurgeirsson, 1995 og Kristján Sæmundsson o.fl., 1995). Við virkjun Nesjavallasvæðisins kom í ljós að náin tengsl voru milli nýlegrar eldvirkni í Kýrdalshrygg og heitasta hluta jarðhitasvæðisins (Hjalti Franzson, 1988). Ástæða er til að ætla að svipað sé uppi á teningnum á Reykjanesi. Síðustu 1100 árin hefur gosið einu sinni uppi á landi en oft úti í sjó. Þetta yngstahraun Reykjanessins, Yngra-Stampahraun, rann snemma á 13. öld úr um 4ra km langri gossprungu sem náði út í sjó. Hún tilheyrir gosrein sem er vestan til á Reykjanesi og gosið hefur á a.m.k. 4 sinnum síðustu 10 þúsund árin. Önnur gosrein, Sýrfellsrein, er austan til á Nesinu. Í henni hefur gosið a.m.k. 6 sinnum á nútíma og rekja má virknina lengra aftur. Innan hennar eru allar borholurnar svo og yfirborðshitinn (mynd 5).

Freistandi er að ætla að sprungugos, eins og þau sem raða sér á Stampa- og Sýrfellsgosreinarnar, virki sem varmagjafi háhitakerfisins sem nú er á Reykjanesi. Í gosunum verður þá umtalsverður hluti kvíkunnar eftir neðanjarðar, storknar og kólnar svo með tímanum jarðhitasvæðinu til góðs. Nokkuð samfelld gosvirkni á Reykjanesi ásamt tíðum sprunguhreyfingum sjá því til þess að nú er tiltækt vinnsluhæft og langlít háhitasvæði á þessum stað. Eftirtektarvert er á mynd 5 að viðnámsdreifingin skuli einmitt teygja sig til NA eftir þessum tveimur gosreinum.

Gangi eftir að sprungugosin fæði háhitakerfið á Reykjanesi er fyllsta ástæða til að ætla að það nái út í sjó. Sem dæmi sýna sjókort að goshryggir Reykjanesskerfisins teygja sig 9 km til suðvesturs frá Reykjanestánni (Sveinn Jakobsson o.fl., 1978). Jarðhitasvæðið getur því hæglega verið enn stærra en þeir 10 km^2 sem mælast á landi. Þessu til stuðnings má nefna að grynnst er á háhitaummyndunina epidót í holu 6, sem er lengst til SV af Reykjanessholunum (Sveinbjörn Björnsson o.fl., 1971).



Mynd 5: Háviðnámskjarninn, borholur og gosreinar á Reykjanesi.

EKKI ER HÆGT AÐ SKILJA VIÐ YFIRBORÐSRANNSÓKNIR Á REYKJANESI ÁN ÞESS AÐ TÆPT SÉ Á SÖGU HVERASVÆÐISINS OG ÞÁ EINKUM ÞEIRRÆ UNDARHVERFA SEM ÞAR HAFA VERIÐ. KRISTJÁN SÆMUNDSSON (1997) HEFUR TEKIÐ SAMAN YFIRLIT UM HVERINA Á REYKJANESI OG FLEIRA ÞEIM TENGÐ. LJÓST ER AF ÞVÍ YFIRLITI AÐ ENGIN GOSHVERAVIRKNI ER ÞARNA A.M.K. FRÁ 1863 TIL 1906 AÐ UNDARHVERFA SEM SPÚÐI UPPI SJÓ, EN EINUNGIS Á FLÓÐI. TILURÐ ÞESSA HVERS ER RAKIN TIL JARÐHRÆRINGA SEM URÐU 1899 OG AUKNU GUFUÚTSTREYMI ÞEIM TENGÐUM. Í BYRJUN HEFUR ÞAÐ HINS VEGAR VERIÐ OF KRÖFTUGT TIL AÐ GOSHVER FÆRI AF STAÐ. ÞESSI HVERAVIRKNI VIRÐIST SÍÐAN STANDA MEÐ HLÉUM FRAM TIL 1930 AÐ HVERINN HÆTTIR AÐ GJÓSA.

Hverirnir lifna síðan á ný í jarðskjálftunum haustið 1967. Um jarðskjálftahrinuna segir svo í skýrslu Sveinbjörns Björnssonar o.fl. (1971):

Sumarið 1967 voru gerðar athuganir á smáskjálftum á Suðvesturlandi. Reyndust þeir mjög tíðir á Reykjanesi (um 23 á dag). Í lok september 1967 varð mikil skjálftahrina á Reykjaneskaga, sem virtist færast vestur skagann frá svæðinu norðan Grindavíkur og ná hámarki með snörpum kippum ($M \leq 4,4$) á Reykjanesi 30. sept. Hreyfing varð á Valbjargargjá, sem liggur frá sjó til norðausturs um hita- svæðið, og seig vesturhlutinn næst sjónum um 5-8 cm. Vitahúsið sprakk þvert yfir. Þessir skjálftar höfðu veruleg áhrif á jarðhitann. Frá því í ársbyrjun 1967 hafði jarðhitinn á yfirborði verið að aukast á svæðinu, en við skjálftana lifnuðu allir hverir verulega við, og varmaútstreymi jókst að miklum mun. Nýjar sprungur mynduðust í jarðvegi yfir Valbjargargjá, og streymdi þar út gufa. Rennsli jókst í

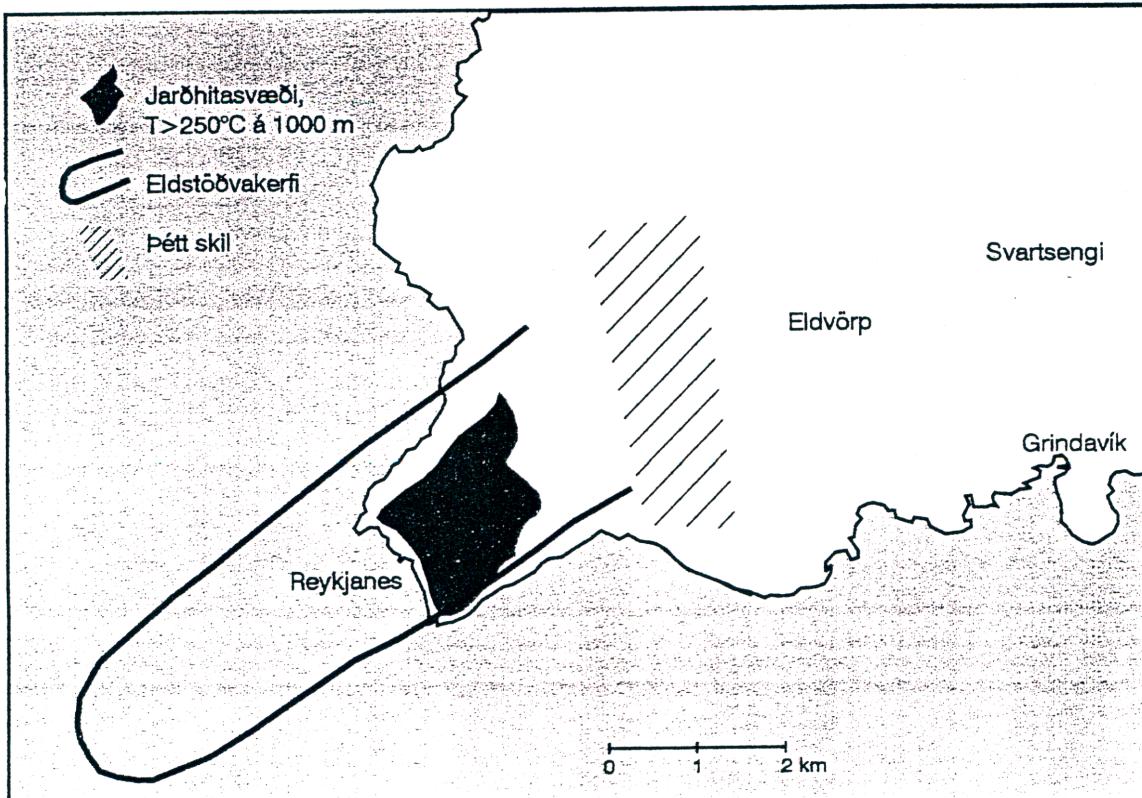
hverum, og Stóri-Geysir tók að gjósa allt að 15 m háum gosum. Magnesíum mældist hærra í hverum, og var það talið merki um, að sjór hefði komist inn í jarðhitasvæðið við skjálftana.

Þá er á Reykjanesi gamall goshver sem er nefndur Kísilhóll (Kristján Sæmundsson, 1997). Hann hefur hlaðist upp eithvað líkt Geysi í Haukadal. Kísillinn í hólnum er augljóslega gamall og langt síðan þarna var virkur goshver.

4. Hugmyndalíkan af jarðhitakerfinu

Á mynd 6 er búið að draga upp helstu þætti sem nota má til að setja fram hugmyndalíkan af jarðhitakerfinu á Reykjanesi. Jarðhitinn er bundinn við SV-NA-lægt sprungu- og goskerfi sem teygir sig sunnan úr hafi og inn á Reykjanesskagann. Gosin og sprunguhreyfingar í því virka sem varmagjafi jarðhitans og viðhalsa jafnframt góðri, lóðréttir lekt. Milli Reykjanessvæðisins og Eldvarpa er hins vegar þéttur jaðar og hefur vinnsla úr öðru kerfinu því lítil áhrif á hitt.

Viðnámsmælingar benda til að undir Reykjanesinu sé eða hafi verið samfellt háhitakerfi sem er greinilega afmarkað til NA en ekki til SV. Sá hluti þess sem hefur náð 250°C hita þekur a.m.k. 10 km^2 lands, en allar líkur eru á að svæðið teygi sig til SV út í haf og sé þar með enn stærra.



Mynd 6: Helstu þættir í hugmyndalíkani jarðhitasvæðisins á Reykjanesi.

Mælingar í borholum sýna að í efstu 900 m svæðisins einkennast hiti og þrýstingur af suðumarksferli, þar sem strjálar gufubólar bera varma af dýpi upp á við. Neðan 900 metranna tekur hins vegar við hreint vatnskerfi, 280-290 °C heitt í NA-kanti svæðisins en líklega heitara bæði til SV svo og dýpra.

Jarðhitakerfið á Reykjanesi fæðir hverasvæði sem er í yfirborði. Hverasvæðið er með hærri þrýstistöðu en jarðhitakerfið og nær jarðsjór þess því ógjarnan upp í hverasvæðið nema í lokuðum, sjóðandi rásum. Tíðar skjálftahrinur sjá til þess að útstreymi jarðhitakerfisins snareykst í kjölfar brotahreyfinganna en einungis tímabundið. Dvínar þá jarðhitinn á ný og gæti meðalævi þekktra goshvera verið á bilinu 10-30 ár.

5. Reiknilíkön og spár um afköst jarðhitakerfisins

Ýmsar aðferðir má nota til að meta afköst jarðhitakerfisins á Reykjanesi. Allar verða þær þó að hvíla á hugmyndalíkani eins og því sem er sýnt á mynd 6. Hér verður tæpt á þremur aðferðum til slíks mats. Mikilvægt er að hafa í huga þá heildarvinnslu sem kæmi til greina úr svæðinu. Síðustu 30 ár er hún tæp 50 kg/s að meðaltali eða um $1\frac{1}{2}$ milljón tonna á ári.

5.1 Rúmmálsreikningar

Hægt er að meta þann massa- og varmaforða sem nú er fólginn í jarðhitakerfinu á Reykjanesi og bera hann saman við árlega vinnslu úr borholum. Ef mið er tekið af borkjörnum er poruhluti kerfisins greinilega kringum 10 % (Sveinbjörn Björnsson o.fl., 1971). Nú er flatarmál yfir 250°C hitans talið a.m.k. 10 km^2 og þykkt a.m.k. 1 km. Rúmmál vatnsins í porunum er því 1 km^3 en þyngd um 750 milljónir tonna ef miðað er við 270°C hita og saltið undanskilið. Núverandi vinnsla þyrfti því a.m.k. 500 ár til að skipta um allann vökvann í kerfinu, en riflega hundrað ár ef nettó vinnslan yrði 300 kg/s.

Hér má nefna til samanburðar rúmmálsreikninga sem gerðir hafa verið fyrir Reykjasvæðin í Mosfellsbæ. Þau innihalda yfir 10 km^3 af bergi sem er yfir 90 °C heitt. Heildarvinnslan úr svæðinu til þessa (≈ 600 milljónir tonna) jafngildir því að búið sé að skipta út helming vökvans sem var þar í upphafi. Það gerist án umtalsverðra hitabreytinga djúpt í borsvæðinu (Grímur Björnsson og Benedikt Steingrímsson, 1995).

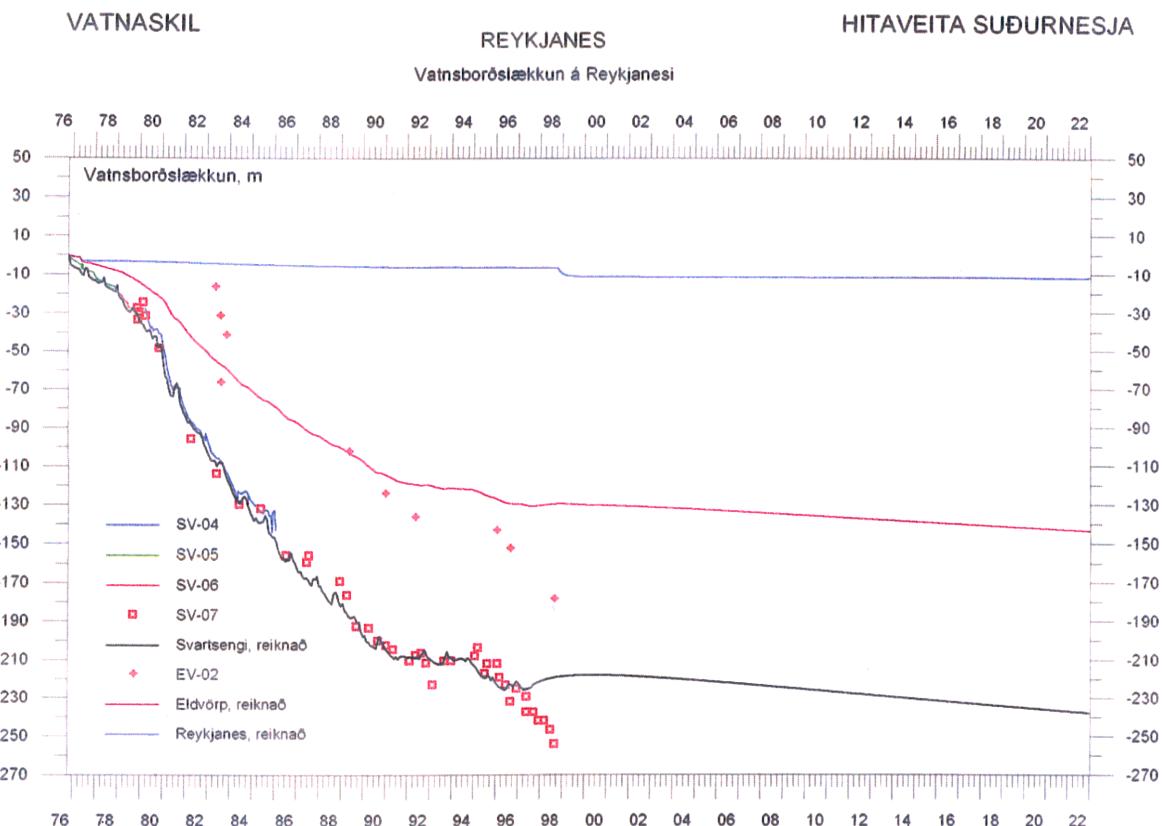
Stöðugur þrýstingur í jarðhitakerfinu þýðir að jaðrar þess skila vatni inn í dýpri hlutann í nánast sama magni og unnið er úr borholum. Hita innstreymisins má varlega áætla 200 °C og sá vöksi kemur svo 290 °C heitur inn í borholu. Varmanámið miðað við $1\frac{1}{2}$ milljóna tonna ársvinnslu er þá $6 \times 10^{14} \text{ J}$ en það er 0,01 % af varmanum sem er í forða bergisins milli 1000 og 2000 m dýpis (alls $6 \times 10^{18} \text{ J}$). Sexföldun vinnslunnar í 300 kg/s tæki að sama skapi innan við 0,1% varmaforðans árlega, að því tilskildu að innstreymi um jaðra verði svo kalt sem hér er áætlað.

Ofangreindir reikningar sýna að umtalsverður orku- og massaforði er undir Reykjanesi og er svæðið til mikils víst. Annmarkar eru samt á svona aðferð, einkum sá að hún gerir

ráð fyrir að allt rúmmál jarðhitakerfisins sé í varma- og massastraumnum.

5.2 Hermireikningar

Verkfræðistofan Vatnaskil og Orkustofnun hafa þróað og haldið við reiknilíkönum af jarðhitakerfunum í Svartsengi, Eldvörpum og á Reykjanesi allt frá upphafi vinnslu. Í nýrri skýrslu er birt spá um áhrif þess að vinnslan á Reykjanesi sé aukin úr 30 í 300 kg/s (Verkfræðistofan Vatnaskil, 1998b). Skemmt er frá því að segja að við þessa vinnslu fellur svæðispýrstingurinn einungis um 1 bar. Þá er spáð 5 °C kólnun vinnsluholna eftir 20 ára samfellda vinnslu. Mynd 7 sýnir þetta.



Mynd 7: Spár um þrýsting í jarðhitakerfunum á Reykjanesi (Vatnaskil 1998b).

Orkustofnun mun einnig setja upp reiknilíkan af Reykjanesskerfinu síðar á þessu ári. Til verksins verður notað reiknitækið TOUGH2 (Pruess, 1992). Þegar það líkan er fullgert verða gerðar spár um mismikla vinnslu með tímanum og metnar hugsanlegar breytingar fram í tímann. Niðurstöður verða svo bornar saman við líkan Vatnaskila.

6. Aðstreymi til hverasvæðisins og áhrif aukinnar vinnslu

Hverasvæðið á Reykjanesi er í raun afrennsli og aðeins smáangi djúpa og víðáttumikla háhitakerfisins sem þarna er undir. Á mynd 8 er sett fram hugmyndalíkan um virkni hverasvæðisins. Höfuðdrættir þess eru:

1. Lóðrétt hræring 280-290 °C jarðsjávar skilar varmastraumi að u.þ.b. 900 m dýpi. Þar er suðumarksþrýstingi náð, gufubólur losna og stíga upp. Jarðsjórinn heldur hins vegar áfram að streyma, berst til hliðar og sekkur síðan niður á við uns nægum hita er náð til að hann stígi upp aftur.
2. Boranirnar 1968-1969 leiddu í ljós að á utanverðu Reykjanesi flæðir kaldur sjór greiðlega um jarðög á 100-200 m dýpi. Sjórinn er hafsjór og með þrýstistöðu sjávar. Lag þetta þekur stóran hluta hverasvæðisins og e.t.v. alls Reykjanessins.
3. Þrýstistaða jarðhitakerfisins er hins vegar a.m.k. 20 m lægri en þrýstistaða hverasvæðisins. Það sést vel vinstra megin á myndinni, þar sem sami suðumarksferillinn nálgar bæði botnhita holu 2 og 280-290 °C heitt suðuborð jarðhitakerfisins á 900 m dýpi.
4. Tíðar jarðhræringar á Reykjanesi sjá til þess að virk og lek brot safna til sín gufu og jarðsjó. Lækkuð eðlisþyngd blöndunnar, miðað við hreinan jarðsjó, verður til þess að hún nær gegnum kalda sjávarlagið og upp til yfirborðs. Þar myndast svo með tíð og tíma hverasvæði.
5. Kaldi sjórinn á 100-200 m svo og grunnvatn sækja hins vegar að lóðréttu gufustreymingu og ná stundum að blandast saman við það, einkum eftir umbrot.
6. Þá geta við sérstakar aðstæður myndast goshverir. Þeir eru öflugir í fyrstu en svo virðist aðstreymið til þeirra minnka með tímanum. Rénun hveranna verður áreiðanlega af sömu orsökum og aflminnkun holna 8 og 9, þ.e. af útfellingu.

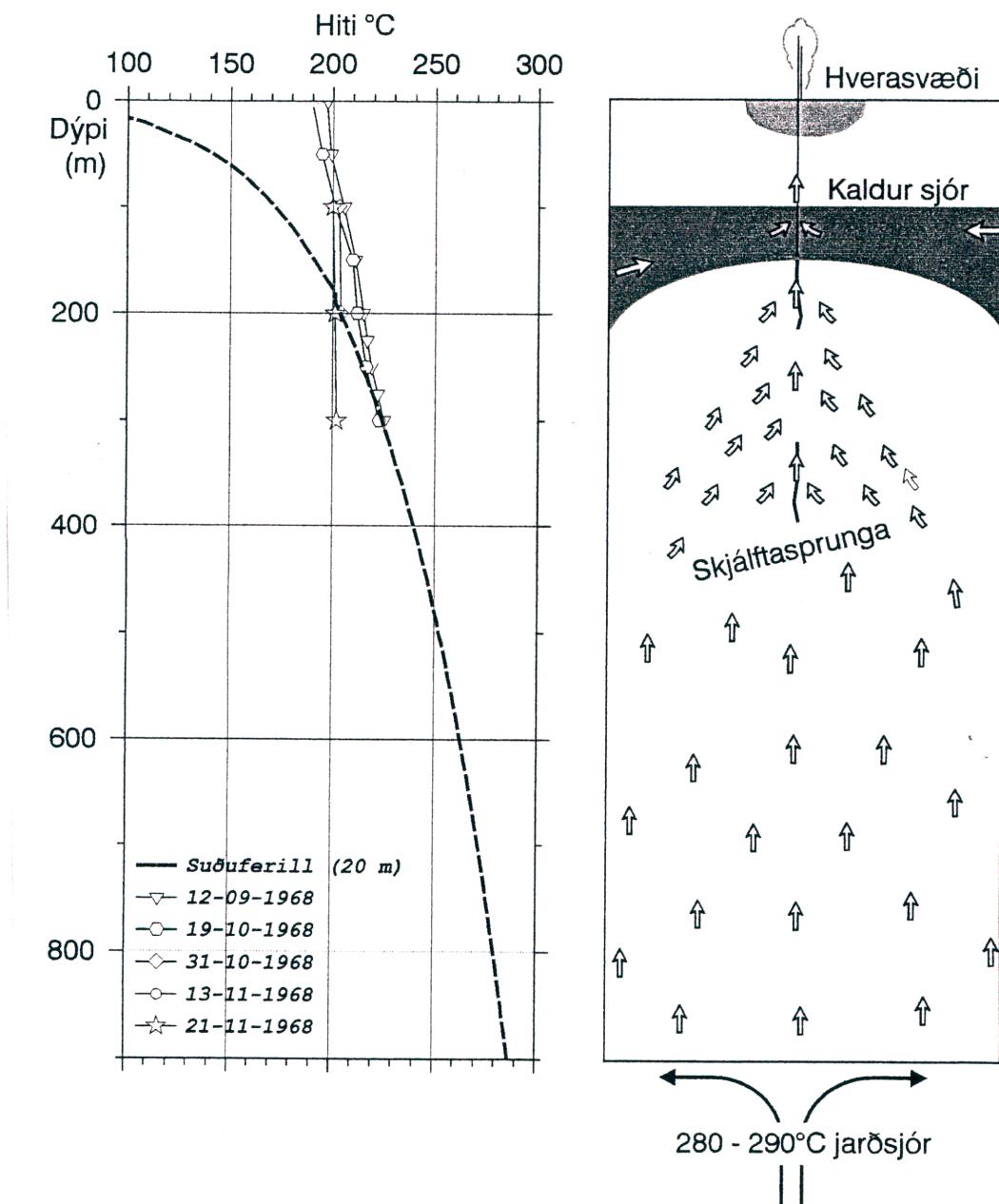
Orkan úr jarðhitakerfinu berst því til hverasvæðisins með suðu í þróngum rásum. Við þessar aðstæður og með hliðsjón af greinilegu sambandi hvera- og skjálftavirkni, má álykta sem svo að hverirnir á Reykjanesi séu í eðli sínu skammlíf fyrirbrigði. Þeir munu hér eftir sem hingað til eiga líf og heilsu undir því að brotahreyfingar örvi reglulega aðstreymið úr djúpa háhitakerfinu.

Hugmyndalíkan hverasvæðisins leiðir til þess að unnt er að meta hlutlægt áhrif aukinnar vinnslu á Reykjanesi. Við aukna vinnslu úr djúpum holum má gera ráð fyrir þrýstilækkun upp á örfá bör. Það leiðir til afsuðu gufu í jarðhitakerfinu. Gufan er hreyfanleg og mun stíga upp á við. Það getur hækkað þrýsting grunnt í svæðinu og þar með streymi til yfirborðs. Slík varð t.d. raunin við lækkun þrýstings í Svartsengi. Áhrif vinnslunnar, ef einhver verða, eru því þau helst að hveravirkni mun aukast tímabundið.

Hægt er að ímynda sér að skjálftavirkni geti opnað það vel aðstreymisrásir hverasvæðisins að þær fyllist sjó, einkum og sér í lagi ef búið er að lækka djúpþrýsting svæðisins. Áhrif þessa myndu vara stutt ef mið er tekið af eftirtöldum tveimur þáttum. Þar er fyrst að

nefna að kalt innstreyymi hefur margfalt meiri seigju en jarðhitavökvinn, sem ógreiðir leið þess mjög niður á við. Í öðru lagi er mikill varmi fólginn í veggjum slíkra niðurfalla. Hann leiðist inn í vatnið og hitar það. Það verður til þess að steindin anhydrit fellur út, sem smáþéttir rásina með tíð og tíma.

Á fyrstu árum vinnslu í Svartsengi gusaðist kaldur vöki nokkrum sinnum inn í jarðhita-kerfið (Grímur Björnsson og Benedikt Steingrímsson, 1991). Þó ekki sé fullljóst um or-sakir aðstreymisins er víst að það var skammvinnt eða á bilinu 1-2 vikur.



Mynd 8: Hugmyndalíkan af aðfærslurásum hverasvæðisins á Reykjanesi.

7. Vinnslueftirlit í framtíðinni

Núverandi vinnslueftirlit á Reykjanesi er í öllum aðalatriðum fullnægjandi miðað við hvað gerist á öðrum svæðum. Þannig er toppþrýstingur (afköst) holu 9 lesinn reglulega, efnasýni tekin af vatni og gufu tvisvar á ári og á 5-10 ára fresti hefur landhæð og þyngdarsvið verið mælt til að meta hvort vinnsla úr svæðinu leiði til breytinga í landhæð og varanlegrar skerðingar í vökvaforða Reykjanessvæðisins (Hjálmar Eysteinsson, 1993). Helsti vankantur á vinnslueftirlitinu er að ekki er lagt í að renna hita- og þrýstimælum djúpt í holu 9 vegna skemmda sem eru á leiðara hennar.

Þegar viðbótarholur hafa verið boraðar á Reykjanesi er lagt til að eftirfarandi vinnslueftirlitsmælingar verði stundaðar. Eru þær í aðalatriðum þær sömu og áratuga hefð er fyrir í Svartsengi og víðar.

1. Toppþrýstingur holna í vinnslu verði skráður a.m.k. vikulega og vinnslan þannig metin úr hverri holu.
2. Djúphiti og -þrýstingur verði mældur a.m.k. árlega í öllum nýjum holum. Kannaður verði möguleikinn á sískráningu djúpþrýstingsins.
3. Efnasýni af vatni og gufu verði tekin a.m.k. árlega úr öllum vinnsluholum.
4. Landhæð og þyngdarsvið á Reykjanesi verði mæld áður en vinnsla er aukin og síðan t.d. á 5 ára fresti. Tími milli mælinga er reyndar háður því hvort mælanlegar breytingar verði og þá hve hraðar. Skoðað verði sérstaklega hvort nota megi þyngdarmælingar einar og sér til að meta gufuinnihald grunnt í svæðinu.
5. Kerfisbundið verði fylgst með ástandi jarðhitans á yfirborði t.d. með sýnatöku, töku hitamynnda og með mælingum á yfirborðshita og rennsli.
6. Einnig kann að vera ástæða til að eiga grunnar mælingaholur í svæðið og meta með þeim áhrif vinnslu grunnt. Með því ætti t.d. að sjást hvort breytingar í yfirborðsvirkni séu mannanna verk eða stafi af náttúrulegum orsökum. Hola 2 er upplögð í þetta verkefni.
7. Áfram verði könnuð áhrif jarðskjálfta á Reykjanessvæðið. Nú þegar eru uppsettar 3 nettengdar skjálftamælistöðvar til þessa verks (Kristján Ágústsson o.fl., 1998).

Síðast en ekki síst mun sú viðbótarþekking sem safnast með ofangreindum mælingum, skorða enn betur af reiknilíkön af svæðinu í framtíðinni og stuðla þannig að markvissum og farsælum rekstri.

8. Niðurstöður

Helstu niðurstöður þessarar samantektar hvað varðar möguleika á því að spá um framtíðarástand jarðhitakerfisins á Reykjanesi eru:

1. Lagt hefur verið fram einfalt hugmyndalíkan að innri gerð jarðhitasvæðisins. Það einkennist af lóðréttir hræringu tæplega 300°C heits jarðsjávar milli 900 og 2000 m dýpis. Ofar í svæðinu stíga strjálar gufubólur upp á við og færa þannig hita og þrýsting að suðumarksferli. Út frá viðnámsmælingum og vinnslueftirliti í Svartsengi og Eldvörpum, er jarðhitakerfið talið skorðað af til norðausturs frá Reykjanesi. Vel má vera að það teygi sig til SV út í sjó.
2. Stærð svæðisins þar sem hiti er eða hefur náð 250°C er a.m.k. 10 km^2 , ef mið er tekið af viðnámsmælingum. Slagar það því upp í núverandi vinnslusvæði í Kröflu. Óoverlegar breytingar í sögu hita- og þrýstings neðan 1000 m dýpis gefa einnig til kynna afkastamikið jarðhitakerfi.
3. Reiknilíkön af Reykjanekerfinu eru nú þegar tiltæk eða í bígerð. Af þeim má ráða, sem stendur, að litlar breytingar verði í djúpástandi svæðisins þótt vinnsla sé margfölduð.
4. Hverasvæðið á Reykjanesi á allt sitt undir því að skjálftar viðhaldi lekt aðfærsluða. Mikil hveravirkni hefur farið í gang eftir skjálftahrinur, en hún dalar svo með tímanum. Þar valda að öllum líkindum útfellingar vegna suðu í aðstreymisæðunum. Prýstilækkun vegna aukinnar vinnslu er ekki talin afdrifarík fyrir virkni hverasvæðisins. Ef eitthvað er gæti hún aukist sökum þrýstihækkunar á litlu dýpi.

9. Heimildaskrá

Benedikt Steingrímsson og Grímur Björnsson, 1993a: *Hola RNG-9 á Reykjanesi. Mælingar í september 1993*. Orkustofnun, greinargerð, BS/GrB-93/01.

Benedikt Steingrímsson og Grímur Björnsson, 1993b: *Hola RNG-8 á Reykjanesi*. Orkustofnun, greinargerð, BS/GrB-93/02.

Grímur Björnsson og Benedikt Steingrímsson, 1991: *Hiti og þrýstingur í jarðhitakerfinu í Svartsengi. Upphafsstand og breytingar vegna vinnslu*. Orkustofnun, OS-91016/JHD-04, 69 s.

Grímur Björnsson og Benedikt Steingrímsson, 1995: *Hitalíkan af Reykjaskvæðunum í Mosfellsbæ*. Orkustofnun, OS-95016/JHD-02, 110 s.

Hjalti Franzson, Guðjón Guðmundssøn, Jens Tómasson og Þorsteinn Thorsteinsson, 1983: *Borun holu RnG-9 Reykjanesi*. Orkustofnun, OS-83040/JHD-12 B, 31 s.

- Hjalti Franzson, 1988: *Nesjavellir. Borholujarðfræði. Vatnsgengd í jarðhitageymi.* Orkustofnun, OS-88046/JHD-09, 58 s.
- Hjálmar Eysteinsson, 1993: *Hæðar- og þyngdarmælingar á utanverðum Reykjanesskaga 1992.* Orkustofnun, OS-93029/JHD-08, 53 s.
- Knútur Árnason og Ragna Karlsdóttir, 1996: *Viðnámsmælingar í Kröflu.* Orkustofnu, OS-96005/JHD-03, 96 s.
- Kristján Ágústsson, Sigurður Th. Rögnvaldsson, Bergur H. Bergsson og Ragnar Stefáns-son, 1998: *Jarðskjálftamælinet Veðurstofu Íslands og Hitaveitu Suðurnesja. Lýsing á mælaneti og fyrstu niðurstöður.* Rit Veðurstofu Íslands, VÍ-R98002-JA02, 17 s.
- Kristján Sæmundsson, Magnús Á. Sigurgeirsson og Sverrir Þórhallsson, 1995: *Potential Building Sites at Reykjanes with Regard to Natural Risk.* Orkustofnun, greinargerð, KS/MS/SP-95/13.
- Kristján Sæmundsson, 1997: *Hverirnir á Reykjanesi og fleira þeim tengt.* Óbirt handrit á Orkustofnun.
- Magnús Sigurgeirsson, 1995: *Yngra-Stampagosið á Reykjanesi.* Náttúrufræðingurinn 64 (3), bls. 211-230.
- Pruess, Karsten, 1991: *TOUGH2 - A General-Purpose Numerical Simulator for Multiphase Fluid and Heat Flow.* Lawrence Berkeley Laboratory Report no. LBL-29400. California, USA.
- Ragna Karlsdóttir, 1997: *TEM-viðnámsmælingar á utanverðum Reykjanesskaga.* Orkustofnun, OS-97001, 63 s.
- Ragna Karlsdóttir, 1998: *TEM-viðnámsmælingar í Svartsengi 1997.* Orkustofnun, OS-98025, 44 s.
- Sveinbjörn Björnsson, Birna Ólafsdóttir, Jens Tómasson, Jón Jónsson, Stefán Arnórsson og Stefán G. Sigurmundsson, 1971: *Reykjanes. Heildarskýrsla um rannsókn jarðhitasvæðisins.* Orkustofnun, febrúar 1971, 188 s.
- Sveinn Jakobsson, Jón Jónsson og F. Shido, 1978: *Petrology of the Western Reykjanes Peninsula, Iceland.* J. Petrology 19, 669-705.
- Verkfræðistofan Vatnaskil, 1998a: *Reykjanes. Vinnslueftirlit júlí 1997 til júlí 1998.* Orkustofnun, OS-98044.
- Verkfræðistofan Vatnaskil, 1998b: *Svartsengi. Vinnslueftirlit júlí 1997 til júlí 1998.* Orkustofnun, OS-045.