

Jarðvarmavirkjanir

Viðauki 02 af 92 við skýrslu Orkustofnunar OS-2015/02

Virkjunarkostir til umfjöllunar í 3. áfanga rammaáætlunar

Jarðvarmavirkjanir

Viðauki 02 af 92 við skýrslu Orkustofnunar OS-2015/02

Virkjunarkostir til umfjöllunar í 3. áfanga rammaáætlunar



EFNISYFIRLIT

1	Jarðvarmi.....	7
2	Jarðhitaauðlindin á Íslandi.....	7
3	Hugmyndir um eðli auðlindarinnar.....	8
4	Flokkun jarðhitakerfa.....	9
4.1	Lághitakerfi.....	12
4.2	Háhitakerfi.....	14
5	Varmastraumur og orkuforði.....	16
6	Jarðvarmavirkjanir.....	20
7	Sjálfbær vinnsla jarðhita.....	20
8	Nýtingarsvæði.....	22
9	Jarðhitarannsóknir.....	23
10	Yfirborðsmælingar.....	24
10.1	Viðnámsmælingar.....	24
10.2	Segulmælingar.....	25
10.3	Hitastig í jarðvegi.....	25
10.4	Þyngdarmælingar.....	25
11	Fjármögnun.....	25
12	Borun.....	26
13	Losun.....	26
14	Gufuveita.....	27
15	Rafstöð.....	30
16	Munurinn á virkjun lághita og háhita.....	33
17	Eiginleikar jarðvarmavirkjana.....	34
18	Dæmi um Jarðvarmavirkjanir.....	35
18.1	Bjarnarflag.....	35
18.2	Kröflustöð.....	36
18.3	Reykjanesvirkjun.....	36
18.4	Hellisheiðarvirkjun.....	37
19	Forsendur umfjöllunar í 3. áfanga rammaáætlunar.....	38
20	Heimildir.....	40

Mynd 2-1: Stílfærð yfirlitsmynd sem sýnir skiptingu ysta hluta jarðar í meginlandsskorpu, úthafsskorpu, og möttul með deighvolfi. Undir Íslandi er hvort tveggja, möttulstrókur og flekaskil..... 8

Mynd 4-1: Kort sem sýnir aldur jarðlaga og dreifingu jarðhita á Íslandi. Unnið upp úr Axel Björnsson o. fl. (1990)..... 10

Mynd 4-2: Kort af fornum sprungusveimi (hér gangasveimi). Margt má læra af eldstöðvakerfum þar sem 1-2 km hafa rofist ofan af landinu. Hér er dæmi um eitt af fyrstu eldstöðvakerfunum sem kortlögð voru fyrir rúmri öld, Mull-kerfið á Bretlandseyjum..... 11

Mynd 4-3: Þverbrotabelta (e. transform fault zone). Úthafshrygg rekur til vestnorðvesturs (rauðar örvar) miðað við möttulstrókinn (rauður hringur). Þangað leitar kvikan þar til leiðin beint upp opnast og nýtt gosbelti myndast..... 11

Mynd 4-4: Helstu hnikþættir á Íslandi. Rekbeltin (e. spreading axis eða rift zone) (svört) hliðrast til austurs frá Reykjaneshrygg (RH) og Eyjafjarðarál (EÁ). Rekhraði er um 1 cm/ári í hvora átt	12
Mynd 4.1-5: Stílfært líkan af dæmigerðu lághitakerfi á Íslandi	13
Mynd 4.2-6: Stílfært líkan af háhitakerfi.....	15
Mynd 5-1: Kort sem sýnir hitastigul í grunnum og nokkrum djúpum borholum utan jarðhitasvæða. Jafnstigulslínur eru dregnar með svörtum, grönnum línunum. Tölurnar eru °C/km. Rauðu línurnar sýna áætlaðan stigul út frá dýpi niður á 1100°C hlutbráð samkvæmt MT-mælingum.....	17
Mynd 5-2: Byggt á mynd Valgarðs Stefánssonar (1998). Gunnar Böðvarsson (1982a) mat varmastrauminn en Guðmundur Pálmason o.fl (1985) lögðu mat á bundna orku í jarðskorpunni	19
Mynd 6-1: Nesjavallavirkjun.....	20
Mynd 7-1: Dæmi um spá um leyfilegan niðurdrátt. Vikmörkin eru skilgreind innan kassana og svörtu línurnar tákna útmörk	22
Mynd 10.1-1: Viðnámslíkan af Nesjavöllum	25
Mynd 11-1: Fjármögnun jarðvarmavirkjunar. Þýðing: Orkustofnun (Gehring & Loksha, 2012).....	26
Mynd 14-1: Rennslismyndir í láréttu tvífasa rennsli (Þorbjörn Karlsson, 1979)	28
Mynd 14-2: Skiljustöð Kröfluvirkjunar og stofnæðar	29
Mynd 14-3: Stöðvarhús Kröfluvirkjunar.....	30
Mynd 15-1: Tveir 30 MWe hverflar Kröfluvirkjunar	31
Mynd 15-2: Fyrirhuguð jarðvarmavirkjun í Bjarnarflagi	32
Mynd 15-3: Borholuteigur á Hellsheiði (Vísindavefur, 2014).....	32
Mynd 15-1: Framleiðslukerfi Orkuveitu Húsavíkur.....	34
Mynd 18.1-1: Núverandi jarðgufustöð í Bjarnarflagi (Landsvirkjun, 2014).....	35
Mynd 18.2-1: Kröflustöð (Landsvirkjun, 2014).....	36
Mynd 18.3-1: Reykjanesvirkjun (HS Orka, 2014).	36
Mynd 18.4-1: Hellsheiðarvirkjun.	37
Mynd 18.4-2: Vinnslurás Hellsheiðarvirkjunar (Orka náttúrunnar, 2014).....	37
Tafla 19-1: Helstu kennistærðir.....	38

1 JARÐVARMÍ

Reglugerð um virkjunarkosti í verndar og orkunýtingaráætlun nr. 530/2014 tilgreinir hvaða gögn og upplýsingar skulu lýsa hverjum virkjunarkosti. Hvað jarðhitakosti varðar þarf að tilgreina mörk nýtingarsvæðis og eftir því sem við á staðsetningu, útlínur og hæð helstu mannvirkja, borholur, pípulagnir, efnistökuastaði og stöðvarhús. Tilgreina þarf einnig markmið um sjálfbærni virkjunar, þ.e. samspil nýtingar og endingartíma, áform um niðurdælingu og förgun affallsvatns og möguleg áhrif á grunnvatnshlot, áform um öflun og förgun affallsvatns og markmið um losun brennisteinsvetnis og staðbundinn hámarksstyrk þess í andrúmsloftið eins og kveðið er á um í reglugerð.

Um fjöllum um jarðhitaauðlindina á Íslandi í kafla 2 er fengin úr álitsgerð faghóps rammaáætlunar og Orkustofnunar og birtist hér að mestu orðrétt (Jónas Ketilsson o.fl., 2010). Þar er fjallað um eðli jarðhitans, flokkun jarðhitakerfa, nýtingu jarðhita og viðbrögð við vinnslu á auðlindinni, umhverfið og samfélagið í stærra samhengi ásamt umfjöllun um sjálfbæra nýtingu og vinnslu jarðhita. Í skýrslu Landsvirkjunar (Landsvirkjun, 2012) er að finna frekari upplýsingar um jarðvarmavirkjanir, dæmi um útlínur og hæð mannvirkja þ.m.t. borholur, pípulagnir, vegi, efnistökuastaði og stöðvarhús.

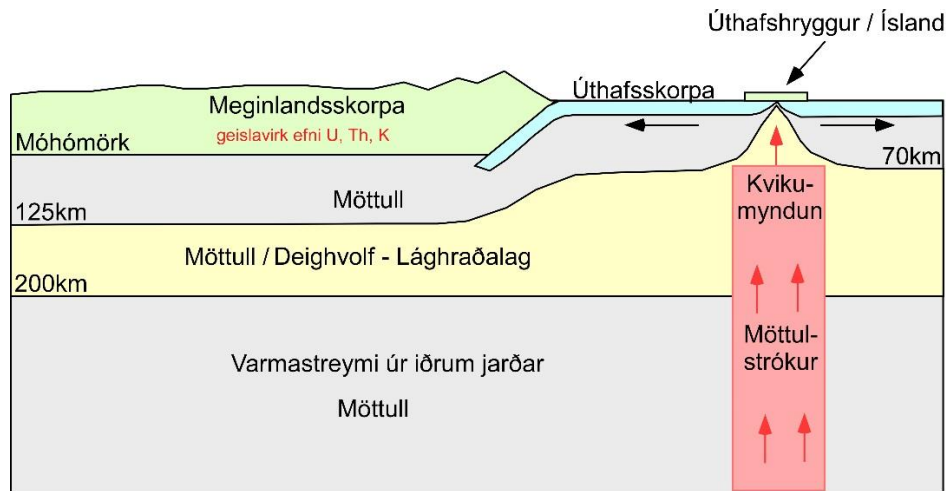
Við mat Orkustofnunar á gagnakröfum skv. reglugerð er, á grundvelli ákvæða laganna sem hún er sett eftir, miðað við gagnakröfur sem að öllu jöfnu eiga við umhverfismat áætlana, ekki umhverfismat framkvæmda. Það er svo ákvörðun hvers aðila fyrir sig sem óskar eftir mati á virkjunarkostinum hvort viðbótarupplýsingar verða lagðar fram eða ekki. Í tilfelli jarðhitanýtingar er ekki hægt að fara fram á staðsetningu, útlínur og hæð helstu mannvirkja, borholna, pípulagna, efnistökuastaða og stöðvarhúss meðan engar rannsóknarboranir hafa farið fram. Það er því alfarið undir hverjum aðila fyrir sig komið hvort hægt sé að leggja slík gögn fram og mun Orkustofnun ekki gera kröfur til þeirra á þessu stigi málsins. Að sama skapi er ekki hægt að útfæra nákvæmlega með hvaða hætti losun á vökva mun eiga sér stað. Í slíkum tilfellum vísast í lög og reglugerðir og skilyrði leyfisveitingar Orkustofnunar og annarra, sem m.a. munu byggjast á niðurstöðum umhverfismats framkvæmda, ásamt hugsanlegum takmörkunum og heimildum landeigenda og skipulagsyfirvalda.

Í kaflanum verður einnig farið yfir hvaða stærðir það eru sem þurfa að liggja til grundvallar virkjunarkostum á sviði jarðvarma, til þess að hægt sé að leggja slíka valkosti fyrir verkefnisstjórn þriðja áfanga rammaáætlunar.

2 JARÐHITAAUÐLINDIN Á ÍSLANDI

Eftirfarandi kafli er tekinn nær orðrétt úr álitsgerð faghóps rammaáætlunar og Orkustofnunar frá 2010 (Jónas Ketilsson o.fl., 2010).

Í þessum kafla er leitast við að gera grein fyrir hugmyndum um eðli jarðhitans, flokkun hans og uppruna varmastraumsins undir Íslandi. Jarðhiti er sú varmaorka sem streymir djúpt úr jörðu til yfirborðs og bundin er í jarðskorpunni. Jarðskorpan er þunn, stökk og brotin upp í stóra og smáa fleka sem færast til með deighvelinu, hlutbráðnu lagi ofarlega í möttlinum. Skorpan skiptist í meginlands- og úthafsskorpu. Úthafsskorpan er aðeins um 8 km þykk og endurnýjast stöðugt á úthafshryggjum þar sem tvo fleka rekur í sundur. Á nokkrum stöðum eru svokallaðir möttulstrókar, afmarkaðar rásir, nokkrir tugir eða hundruð km í þvermál, þar sem uppstreymi kviku er meira en undir venjulegum úthafshrygg. Ísland hefur þá sérstöðu að vera staðsett á flekaskilum á miðjum úthafshrygg auk þess sem möttulstrókur er undir landinu.



Mynd 2-1: Stílfærð yfirlitsmynd sem sýnir skiptingu ysta hluta jarðar í meginlandsskorpu, úthafsskorpu, og möttull með deighvolfi. Undir Íslandi er hvort tveggja, möttulstrókur og flekaskil.

Meðalvarmastraumur upp til yfirborðs jarðar er aðeins um 87 mW/m^2 . Hann er að meðaltali hærri í úthöfunum, um 101 mW/m^2 , en lægri á meginlöndunum, um 65 mW/m^2 (Lowrie, 2006). Þessi varmastraumur stafar að hluta af hægfara kólnun jarðarinnar og að hluta frá geislavirkum efnum. Lítið er af geislavirkum efnum í úthafsskorpunni og þar ræður mestu varmaflutningur úr iðrum jarðar. Í meginlandsskorpunni er umtalsvert magn geislavirkra efna og veldur niðurbrot þeirra um helmingi varmastraumsins á móti helmingnum sem kemur að neðan upp í skorpuna (Lowrie, 2006). Þennan varmastraum er hægt að nýta í smáum stíl, t.d. með varmadælum til húshitunar. Á mörgum afmörkuðum stöðum er jarðfræðilegum aðstæðum hins vegar þannig háttáð, m.a. vegna lektar bergs, að óvenju mikil varmaorka berst með heitum efnum upp í skorpuna og til yfirborðs. Kvikva getur flutt varma neðan úr möttlinum upp í skorpuna þar sem varmi kvikunnar hitar upp grunnvatn. Einnig getur staðbundin djúp hringrás vatns flutt varma úr neðri hluta skorunnar til yfirborðs. Yfirleitt eru orðin jarðhitasvæði og jarðhitakerfi einungis notuð um staði þar sem varmaorka hefur safnast fyrir og hitar grunnvatn á afmörkuðu svæði eða flyst ört til yfirborðs einkum um lekar sprungur.

Vatn, bæði í gufu- og vökvaformi, er miðillinn sem flytur orkuna í jarðhitakerfum en mestur hluti hennar er þó bundinn í berginu og vatni í holrýmum þess.

3 HUGMYNDIR UM EÐLI AUÐLINDARINNAR

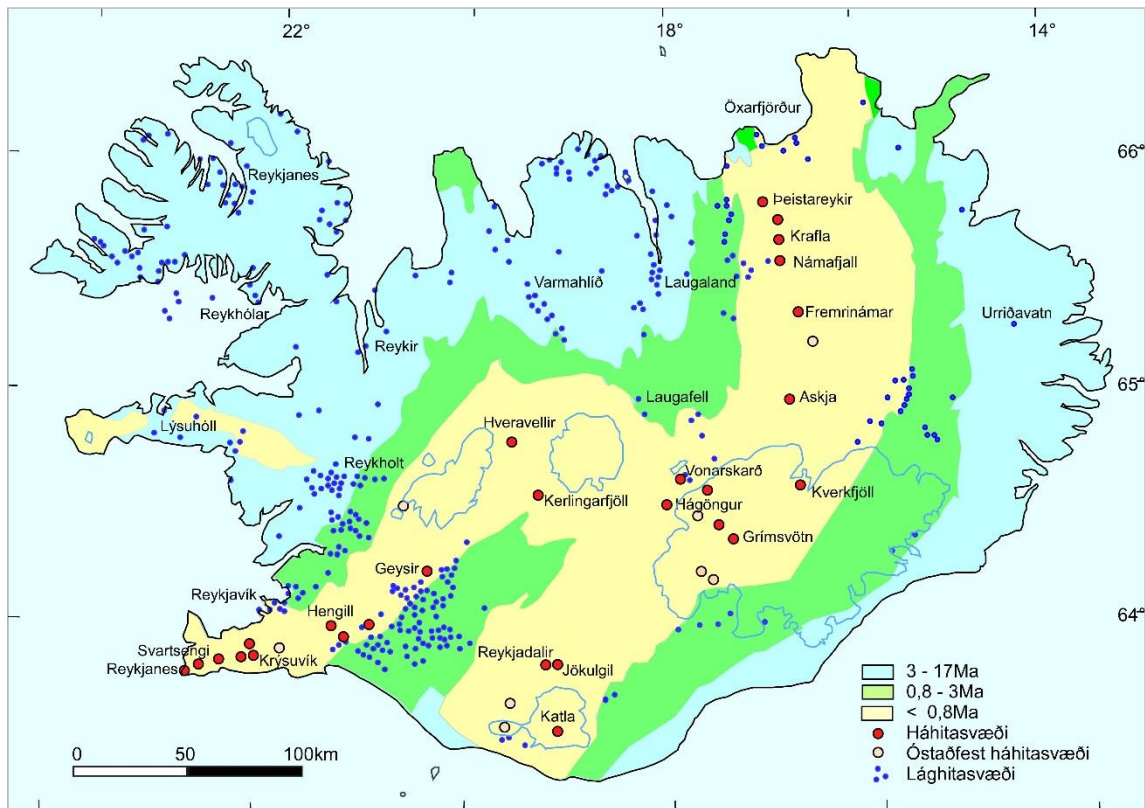
Eðli jarðhitas hefur um margar aldir verið mönnum hugleikið. Sú skoðun var lengi ríkjandi að jarðhitavatn kæmi með kviku úr iðrum jarðar. Það var ekki fyrir en um miðja 19. öld þegar einn helsti frumkvöðull í nútíma efnafræði, Þjóðverjinn Robert Bunsen, rannsakaði hveru á Íslandi, að fram kom önnur skýring á uppruna jarðhitas (Bunsen, 1847). Hann safnaði yfir 100 gassýnum auk vatns- og grjótsýna sem síðar voru greind í rannsóknarstofum vítt og breitt um Evrópu. Bunsen áttaði sig á samspili vatns og bergs og myndun útfellinga. Hann tengdi saman brotalínur, eldvirkni og jarðhita og komst að þeirri niðurstöðu að jarðhitavatnið væri regnvatn að uppruna, sem hefði náð að hitna djúpt í jörðu. Hann áttaði sig á tengslum eldvirkni og háhita og taldi að hitagjafi lágheatavæða væru kólnandi innskot. Það kom hins vegar í ljós að Bunsen var of langt á undan sinni samtíð. Niðurstöður hans gleymdust að mestu og jarðfræðingar héldu áfram að trúa því að jarðhitavatn væri ættað úr kviku og óskýlt regnvatni. Það var ekki fyrir en eftir aldamótin 1900 að jarðhitarannsóknir hérlendis eflust á ný með þátttöku jafnt íslenskra sem erlendra vísindamanna. Þeir komust að sömu niðurstöðu og Bunsen að jarðhitavatn væri regnvatn að uppruna, sem fengi varmann úr bergkviku eða kólnandi innskotum, jafnt í háhita- sem lágheatakerfum.

Trausti Einarsson (1937, 1938, 1942) gerði ítarlegar athuganir á lághitasvæðum landsins, einkum á Norðurlandi. Hann komst að þeirri niðurstöðu að hitagjafi lághitakerfa væri ekki kólnandi innskot heldur hinn stöðugi varmastraumur upp í gegnum jarðskorpuna. Trausti taldi einnig að vatnið rynni eftir sprungum, einkum meðfram berggöngum, niður á nokkurra kílómetra dýpi. Þar hitnaði það þar til það næði hitastigi bergsins og leitaði upp til yfirborðs í hverum og laugum. Samkvæmt kenningum Trausta ríkir jafnvægi milli varmastraumsins að neðan og þess varma sem lághitavatnið flytur til yfirborðs. Líkan hans hefur af þeim sökum verið kallað sístætt (æstætt). Í fyrstu virtist Trausti telja þessa hringrás bundna við einstök jarðhitakerfi, en seinna útvíkkaði og alhæfði hann kenninguna og taldi hana eiga við öll jarðhitakerfi landsins, bæði lág- og háhitasvæði (Trausti Einarsson, 1950, 1966), en fór þar villur vegar. Gunnar Böðvarsson (1950) skrifaði tímamótagein þar sem hann sýndi fram á að ofangreindar hugmyndir Trausta gætu ekki staðist varmafræðilega. Gunnar sýndi að varmastraumurinn nægði ekki til að hita allt jarðhitavatn sem kemur til yfirborðs í laugum og hverum á Íslandi. Hann taldi að jarðhitinn væri í raun óstöðugt, og tímabundið fyrirbæri á hverjum stað. Vatnið taki varmann upp með því að kæla smátt og smátt bergið umhverfis rennslirásirnar djúpt í jörðu og flytji hann upp til yfirborðs. Vatnið fær því varmann ekki nema að litlu leyti úr almenna varmastraumnum.

Þegar farið var að bora dýpra en 1500 m djúpar borholur á lághitasvæðum utan Reykjavíkursvæðisins árið 1970 kom í ljós að neðri hluti jarðhitakerfanna, sem borað var í, var mun kaldari en búast mátti við út frá venjulegum hitastigli. Þetta sýndi að á lághitasvæðunum á sér stað hræring, sem flytur varma af miklu dýpi upp í grynri hluta kerfanna. Upp úr 1980 endurvakti Gunnar Böðvarsson þrjátíu ára gamlar hugmyndir sínar, útfærði frekar og studdi með nýlegum gögnum og hitaferlum úr borholum (Gunnar Böðvarsson, 1983). Á þessum grundvelli setti Gunnar fram kenningu um eðli lághitans þar sem reiknað er með staðbundnum varmaflutningi með hræringu úr neðri hlutum jarðskorpunnar upp í jarðlög nær yfirborði í lóðréttum sprungum innan jarðhitakerfanna. Þróun hugmynda um eðli háhitasvæðanna var nokkuð önnur en hvað lághitasvæðin snerti. Bunsen taldi augljóst að kvika eða kólnandi innskot væru meginhitagjafi háhitasvæðanna og varð það almenn skoðun jarðhitamanna bæði hér á landi og erlendis. Um þróun hugmynda og þekkingar á eðli jarðhitans vísast m.a. í Axel Björnsson (2005), Jarðhitabók Guðmundar Pálmasonar (2005), Stefán Arnórsson (1995a og 1995) og Stefán Arnórsson o.fl. (2008).

4 FLOKKUN JARÐHITAKERFA

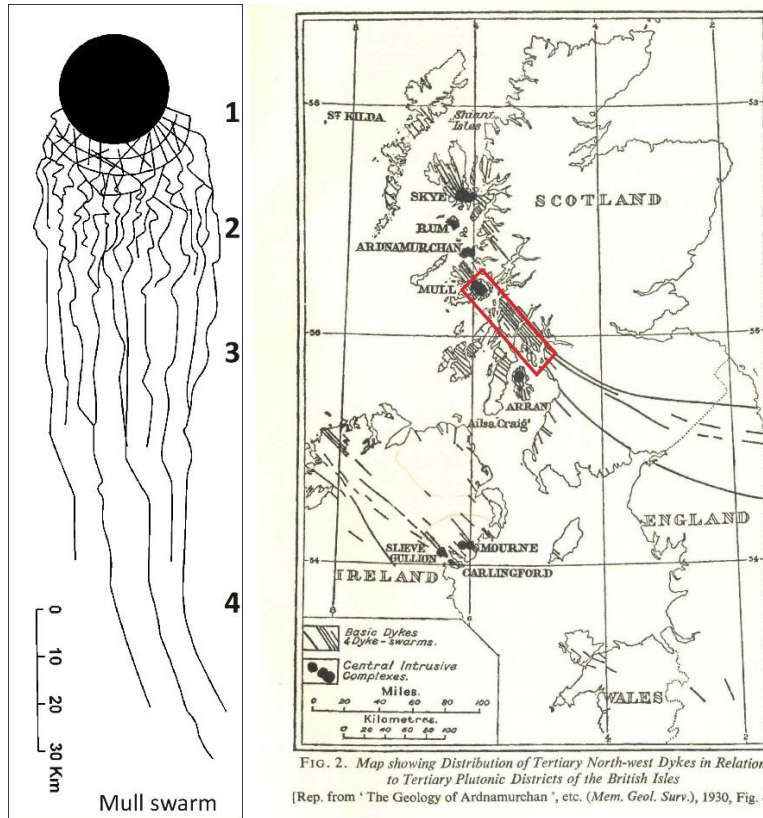
Jarðhitakerfi er afmarkað rúmmál í jarðskorpu þar sem hræring grunnvatns á sér stað. Það inniheldur alla þætti kerfisins, þ.e. aðrennsli, uppstreymisrás, lauga- og hverasvæði og afrennsli. Jarðhitakerfi hafa verið flokkuð á mismunandi vegu eftir eðli og eiginleikum þeirra. Algengustu gerðir jarðhitakerfa hér á landi eru háhita- og lághitakerfi. Háhitakerfin fá varmann úr heitum innskotum og kviku á eldfjallasvæðum, en lághitakerfin úr staðbundnum varmaflutningi með varmaleiðingu úr neðri hluta jarðskorpunnar í vatnsgeng jarðlög og sprungur nær yfirborði og varmanámi með hræringu grunnvatns. Oft er stuðst við þær skilgreiningar að lághitakerfi séu kaldari en 150°C á eins kílómetra dýpi og háhitakerfi heitari en 200°C á því dýpi. Jarðhitakerfi með hitastig á bilinu 150-200°C á þessu dýpi eru reyndar þekkt hér á landi. Sum þeirra eru annað hvort afrennsli frá háhitakerfum eða gömul háhitakerfi, langt komin í kólnun. Mynd 4-1 sýnir aldur jarðlaga og legu helstu háhita- og lághitasvæða á Íslandi (Unnið upp úr Axel Björnsson ofl. (1990)).



Mynd 4-1: Kort sem sýnir aldur jarðlaga og dreifingu jarðhita á Íslandi. Unnið upp úr Axel Björnsson o. fl. (1990).

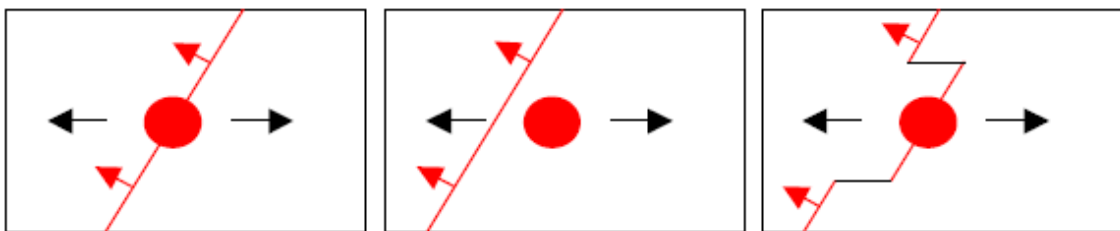
Minnstur hluti jarðhitakerfa er sýnilegur og sum eru dulin með öllu. Aðrennslið til þeirra er í flestum tilfellum lítt þekkt. Það á einkum við um lághitakerfin. Hverir og laugar sýna hvar jarðhitakerfi er undir og stundum sjást sprungurnar sem leiða vatnið til yfirborðs. Afrennsli kerfanna kemur stundum fram í laugum og volgrum. Á háhitasvæðum sýna gufuhverir hvar sýður upp af grunnvatni og gas sem fylgir gufunni ummyndar bergið í leir næst yfirborði. Kulnaðar skellur og leirflákar vitna um breytilega virkni. Í fáeinum tilfellum kemur djúpvatn háhitakerfa fram á svæðum lágt í landi (Hveravellir á Kili, Geysir og Hveragerði). Afrennsli háhitakerfanna neðanjarðar er þekkt í nokkrum tilfellum, en einungis þar sem það er grunnt, nær mest nokkur hundruð metra undir yfirborð.

Myndun jarðhitakerfa á Íslandi er háð lekt bergs og eðli brotakerfanna og má flokka þau eftir þeim. Eldstöðvakerfin með megineldstöðvum sínum og sprungusveimum eru þær jarðfræðilegu einingar sem hafa byggt landið upp. Virkniskeið þeirra er oft um hálf til ein milljón ár. Kerfi þessi eru mörg hver um 100 km á lengd og oft um og yfir 10 km breið. Háhitasvæðin eru öll innan þeirra virku, langflest í megineldstöðvunum sjálfum, gjarnan tengd innskota- og brotakerfum út frá þrýstimiðju í rótum þeirra. Út frá megineldstöðvum ganga sprungusveimarnir, kerfi af samsíða gjám og misgengjum. Í þeim er mikil lekt sem býður upp á hræringu vatns. Í einstöku tilfellum verða þar til háhitakerfi, en oftar lághitakerfi þar sem sprungusveimarnir ganga inn í og brjóta upp gamla jarðskorpu.



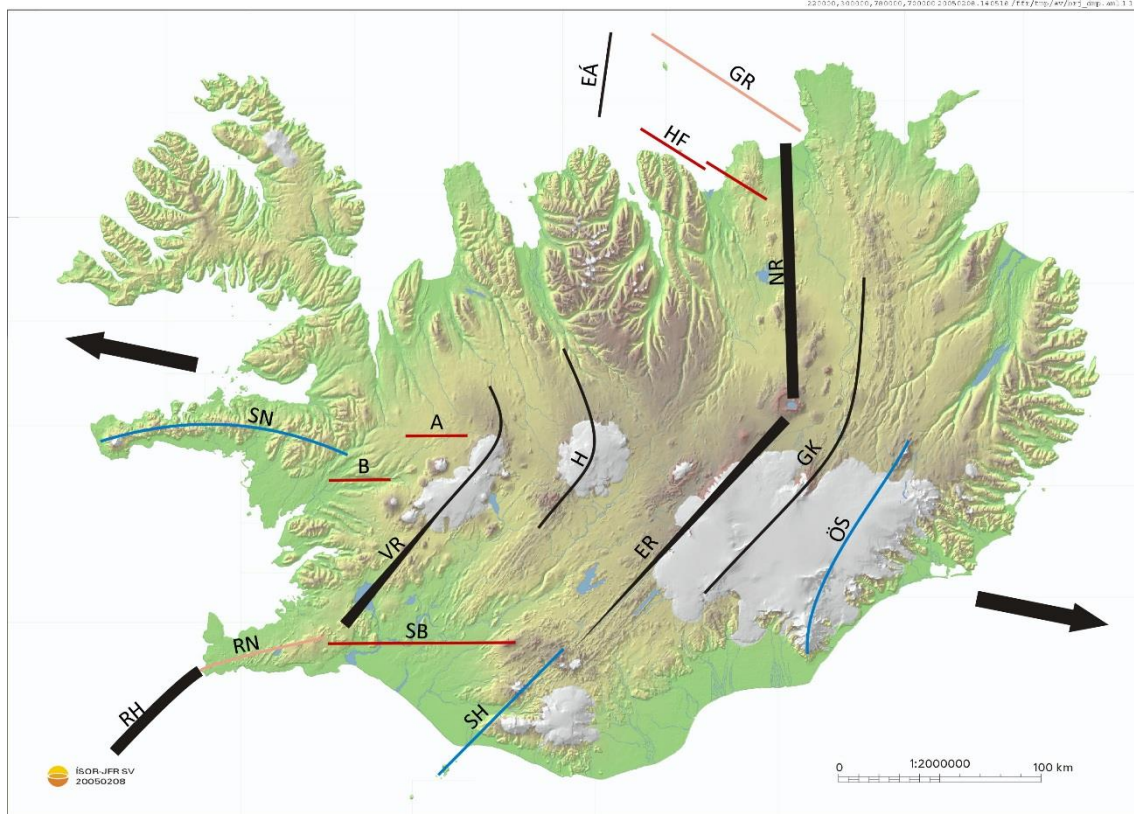
Mynd 4-2: Kort af fornum sprungusveimi (hér gangasveimi). Margt má læra af eldstöðvakerfum þar sem 1-2 km hafa rofist ofan af landinu. Hér er dæmi um eitt af fyrstu eldstöðvakerfunum sem kortlögð voru fyrir rúmri öld, Mull-kerfið á Breiðlandseyjum.

Byggingareiningum landsins var lýst hér að ofan, en jarðhnikið skiptir jafnmiklu máli fyrir jarðhitann. Víkjum þá að helstu hnikipáttunum. Úthafshrygginn rekur afstætt til vest-norðvesturs miðað við möttulstrókinn, en hann togar í uns nýtt hryggjarstykki myndast ofan hans. Við það verða til þverbrotabelti og sniðrekbelti.



Mynd 4-3: Þverbrotabelta (e. transform fault zone). Úthafshrygg rekur til vestnorðvesturs (rauðar örvar) miðað við möttulstrókinn (rauður hringur). Þangað leitar kvikan þar til leiðin beint upp opnast og nýtt gosbelti myndast.

Mynd 4-4 sýnir helstu hnikipætti á Íslandi. Rekbeltin (e. spreading axis eða rift zone) (svört) hliðrast til austurs frá Reykjaneshrygg (RH) og Eyjafjarðarál (EÁ). Rekhraði er um 1 cm/ári í hvora átt.



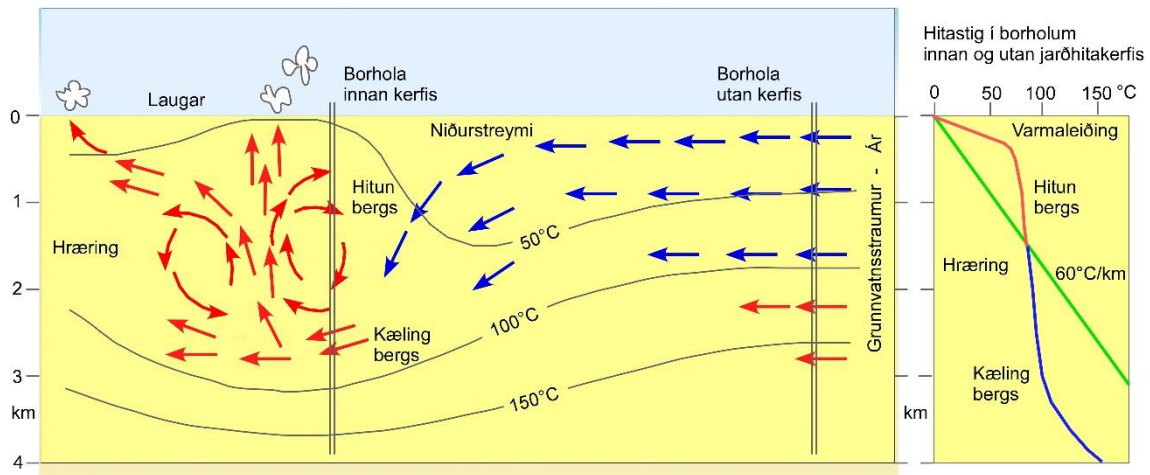
Mynd 4-4: Helstu hníkþættir á Íslandi. Rekbeltin (e. spreading axis eða rift zone) (svört) hliðrast til austurs frá Reykjanes hrygg (RH) og Eyjafjardarál (EÁ). Rekhraði er um 1 cm/ári í hvora átt.

4.1 LÁGHITAKERFI

Lághitasvæði einkennast af volgum, laugum og hverum þar sem hitastig er á bilinu 15- 100°C. Vatnið er regnvatn sem rennur niður á 1- 4 km dýpi um sprungur og lek jarðlög, hitnar og leitar síðan upp til yfirborðs. Þessi hringrás getur verið staðbundin en einnig með langri aðrennslisleið. Dæmi um rennsli langan veg er ferskvatn í laugum í Breiðafjardareyjum, um og yfir 20 km frá hálendissvæðum Vestfjarða.

Með hringrásinni flyst varmi djúpt úr jörð til efri jarðlaga. Varmagjafinn er því ekki annar en sá varmi sem er í berginu á hverjum stað sem hringrás vatnsins nær til. Hitastig vatnsins er lægra en 150°C á 1 km dýpi. Það inniheldur lítið gas og leysir upp óverulegt magn efna úr berginu. Lághitavatn er því efnasnautt og yfirleitt hæft til neyslu og í hitaveitur án sérstakrar meðhöndlunar.

Hitastig og rennsli á lághitasvæðum ræðst af hækkun hita með dýpi og lekt jarðlaga. Öflugustu lághitasvæðin eru nálægt jöðrum rekbeltanna, t.d. í Mosfellssveit, Árnessýslu, Borgarfirði og Reykjahverfi þar sem hitastigull er hár og lekt allmikil. Mynd 4.1-5 er einfölduð skýringarmynd af dæmigerðu íslensku lághitakerfi byggð á varmaflutningslíkani Gunnars Böðvarssonar (1983).



Mynd 4.1-5: Stílfert líkan af dæmigerðu lághitakerfi á Íslandi.

Lághitakerfin tengjast oftast brotakerfum eða brotum og má flokka þau eftir ráðandi brotakerfi:

1. **Þverbrotabelti** er notað yfir sniðgengi eða kerfi sniðgengja sem tengja ása rekkyruggja eða hliðarbelta. Hér á landi má nefna þrjú slík brotabelti: Tjörnes- Húsavíkur-brotabeltið tengir suðurenda Kolbeinshrýggjar við Norðurgosbeltið, Suðurlands-brotabeltið tengir Reykjanes og Austurgosbeltið og Borgarfjarðarbrotabeltið tengir út á Snæfellsnes. Öflug lághitakerfi eru í tveim af þessum brotabeltum. Annað er á Suðurlandi. Þar byggjast 70-80 hitaveitur á vinnslu heits vatns úr borholum sem tengjast jarðskjálftasprungum. Sem dæmi má nefna Oddgeirshóla í Flóa. Þar eru einnig stórar veitur sem búa að sjálfrennandi hveravatni svo sem í Laugarási og á Syðri-Reykjum. Hitt þverbrotabeltið er í Borgarfirði. Þar eru öflugustu hverirnir á jarðhitasprungu milli Kleppjárnsreykja og Hurðarbaks. Sjálfrennsli úr þeim er um 300 l/s, þar af 180 l/s úr Deildartunguhver. Þar sem rennsli úr hverum og laugum nægir ekki hefur verið bætt úr því með borunum. Sem dæmi um veitur af þessu tagi má nefna Varmaland, Bæ, Snartarstaði, Reykholt og Síðumúla.
2. **Endar sprungusveima** sem ganga frá megineldstöðvum í virku rekkbeltunum út fyrir þau. Þar má nefna Reykjavík, Mosfellssveit, Hvalfjörð, Laugardal í Árnassýslu, Mývatnssveit vestanverða, Reykjadal, Aðaldal, Brúaröræfi, Fljótsdalsheiði norðaustur í Urriðavatn í Fellum og Skagafjörð. Í viðauka er sýnt dæmi um hvernig jarðhitinn í Skagafirði tengist sprungukerfinu norðvestur úr Hofsjökli.
3. **Norður-suður gangakerfi og brot á Mið-Norðurlandi** mynduðust hornrétt á stefnu minnstu spennu þegar gliðnun var ríkjandi á upphleðslutíma berglaganna. Stefna minnstu spennu í núverandi spennusviði er sú sama, tengd gliðnun í gosbelti sem lá suður og inn á land frá Eyjafjarðarál. Það er enn virkt sem brotabelti á landi. Skýr dæmi um þessi tengsl eru utan til á Tröllaskaga, t.d. í Skeggjabrekkudal, þar sem annað af tveim vinnslusvæðum Hitaveitu Ólafsfjarðar er. Það er eitt elsta vinnslusvæði landsins..
4. **Á Vestfjörðum eru NV-SA og N-S-sprungur** og gangar ráðandi í dreifingu jarðhitans. Sjö þorp og skólasetur njóta þar hitaveitu: Sveinseyri, Suðureyri, Reykjanes við Djúp, Drangnes, Klúka, Krossholt og Reykhólar. Auk hitaveitu á Sveinseyri er vatnsmikið sjálfrennandi kerfi, 10-50°C heitt, við Tálknafjörð nýtt til fiskeldis.
5. **Jarðhitakerfi í setlögum.** Undir Eyjafjöllum og í Mýrdal hafa fundist nýtanleg jarðhitakerfi í setmyndunum, ofan um það bil 500 m dýpis. Í þessum kerfum er ekki lóðrétt hræring vatns að ráði ef undan er skilið vatnskerfið sem tengist Seljavallalaug,

en það sker sig úr um hita og tengsl við sprungur og innskot. Vatnsgæfni í setlagakerfunum minnkar með dýpi, en hiti hækkar, nær þó sjaldnast 50°C. Skógaveitan er stærst nokkurra smáveitna á þessu svæði.

6. **Stök jarðhitakerfi með óvissum tengslum við brotakerfi landsins.** Nokkur þeirra eru í fornum megineldstöðvum, líklega tengd brotakerfum þeirra. Svo er um þrjú í Dalasýslu, tvö í Strandasýslu, tvö í Vestur-Húnavatnssýslu og tvö í Borgarfjarðarsýslu. Önnur gætu helst fallið í flokk 1 hér að ofan. Allstórar hitaveitur byggjast á nokkrum þessara kerfa. Sem dæmi um veitur af þessu tagi má nefna Grenivíkurveitu frá Reykjum í Fnjóskadal, Stórutjarnir, Blönduósveitu frá Reykjum við Reykjabraut, Hvammstangaveitu frá Reykjum í Miðfirði, Reykjaskóla í Hrutáfirði, Búðardalsveitu frá Grafarlag í Reykjadal, Laugar í Sælingsdal, Húsafell og Leirárhverfið í Borgarfirði.

Afrennsli lághitavatns frá háhitakerfum er talið vera í Kelduhverfi, annars vegar frá Þeistareykjum og hins vegar frá Kröflu eða Gjástykki. Afrennsli Þeistareykjakerfisins kemur fram í volgum lindum sem spretta fram syðst í Lónunum. Afrennsli Kröflu og/eða Gjástykkis kemur aðallega fram í Litlá í Kelduhverfi, en einnig t.d. í Grjótagjá. Hæstur hiti í Litlá var um og innan við 20°C, en í Kröflueldum hækkaði hann á tímabili upp fyrir 50°C. Þar hefur líklega gætt varma frá berggöngum sem söfnuðust í sprungusveiminn skammt upp og suður af byggðinni í langvarandi kvikuhlaupi sem fylgdi upphafshrinu Kröfluelda.

Annars konar afrennsli lághitavatns, líklega tengt kvikuinnskotum eða djúpstæðu háhitakerfi, er einnig þekkt. Það kemur fram í giljum niður undan gígsvæði Eyjafjallajökuls sunnan megin (Seljavallalaug). Annað dæmi um slíkt er í suðvesturhlíð Prestahnúks. Þetta sama gæti átt við um jarðhitakerfin í Staðarsveit (Lýsuhóll og Ölkelda). Það eina sem bendir til tengsla við háhita er nálægðin við virk eldfjöll og eldfjallasvæði.

Dulin lághitakerfi hafa fundist á undanförunum áratugum þar sem þeirra sér ekki merki á yfirborði (Guðni Axelsson o.fl., 2005a). Fjöldi dulinna kerfa er kominn á þriðja tuginn og flest þeirra eru nýtt til hitaveitu. Öflug og heit (>85°C) kerfi sem þannig hafa fundist eru við Eyjafjörð (Hjalteyri og Árskógssandur), inn af Eskifirði, vestan við Stykkishólm, í Miklaholtshreppi á Snæfellsnesi (Eiðhús-Straumfjarðartunga), í Skorradal (Stóra-Drageyri), á Hvalfjarðarströnd og Kjós (Miðsandur og Hrafnabjörg- Hvammsvík), á Seltjarnarnesi og norðan við Selfoss (Ósabotnar).

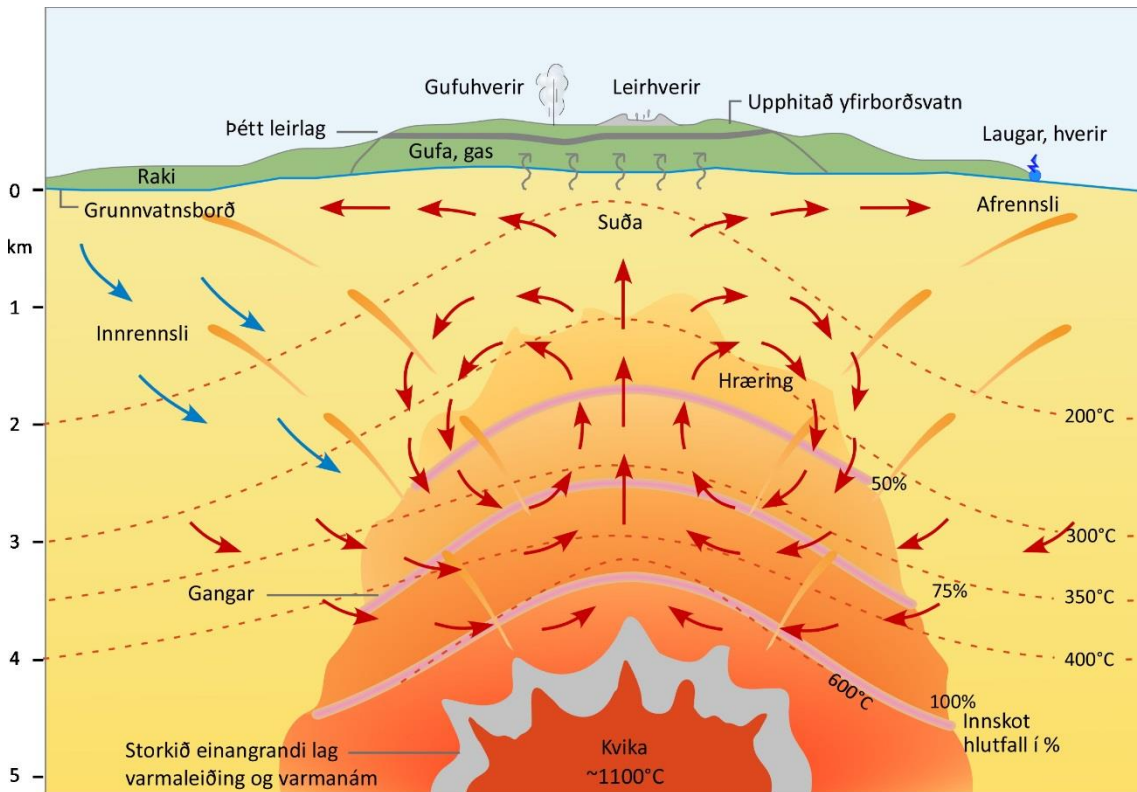
4.2 HÁHITAKERFI

Háhitasvæðin einkennast m.a. af gufuaugum, leirhverum, brennisteini, hverasöltum og í stöku tilfellum sjóðandi vatnshverum. Alls staðar nema á ysta hluta Reykjanesskagans er djúpvatn þeirra, eins og á lághitasvæðunum, regnvatn sem hringrásar í sprungum en meginhitagjafinn eru kólnandi kvikuinnskot á fárra km dýpi í jarðskorpunni. Háhitasvæðin eru því öll tengd eldstöðvum innan gosbelta landsins eða kólnandi innskotum nærri jöðrum þeirra. Hitastigið fylgir gjarnan suðumarksferli og er því oft um eða yfir 300°C á 2 km dýpi og mun herra næst hitagjafanum.

Vegna hás hitastigs og kvikugasa sem leysast upp í vatninu er vatnið súrt sem veldur því að verulegt magn efna úr berginu leysast upp. Gasið kemur úr storknandi kvikunni. Yfirleitt er vatnsborð á margra tuga metra dýpi í háhitakerfunum. Vatnið í þeim sýður og leitar þá gufa upp til yfirborðs í gufuaugum eða gufuströkum. Einnig þéttist gufan og blandast regnvatni næst yfirborði og myndar leirhveru. Gastegundir úr kvikunni gera gufuna tærandi og veldur það leirmyndun kringum uppstreymið. Einnig falla út efni, einkum brennisteinssambönd.

Þar sem grunnvatn er nærri yfirborði og djúpvatn nær að streyma til yfirborðs einkennast háhitasvæði af hverum með breiðum af kísilhrúðri í kring. Dæmi um slík svæði eru Geysissvæðið, Hveragerði, Reykjanes og Hveravellir á Kili. Það sem einkum ræður afli háhitasvæða er stærð og

dýpt á varmagjafann og lekt jarðlaga. Eðli hveravirkinnar á yfirborði ræðst einkum af stöðu grunnvatnsborðs yfir jarðhitageyminum og lekt sprungna sem leiða gufu upp til yfirborðs.



Mynd 4.2-6: Stílfært líkan af háhitakerfi.

Líftími háhitakerfa samsvarar virkniskeiði eldstöðvakerfanna sem þau nærast á. Flest eru í megineldstöðvunum sjálfum, en í nokkrum tilfellum einnig í sprungusveimum sem ganga út frá þeim. Alls eru háhitakerfin um 24 talsins á Íslandi. Af þeim eru 10 í megineldstöðvum með eldfjallsögun og miðlægu sigi (öskju): Krafla, Dyngjufjöll, Kverkfjöll, Grímsvötn, Vonarskarð, Torfajökull, Mýrdalsjökull, Tindfjöll, Hofsjökull og Kerlingarfjöll. Þrjú ofantalinnu eru utan rekbeltanna (Tindfjöll, Mýrdalsjökull og Torfajökull). Hin háhitakerfin eru í megineldstöðvum þar sem gosvirknin er mest og hefur í flestum tilfellum hlaðið upp fjallapýrpingu fremur en eldfjalli út frá miðlægri gosvirkni. Meðal þeirra eru Þeistareykir, Fremrinámar, Hengill og Krýsuvík. Virknin er ekki söm og jöfn allt virknitímabil megineldstöðvanna, né heldur er hún staðbundin. Hún ræðst af þróun þeirra og innskotavirkni sem er lotubundin bæði á löngum tímaskala, með fáum fösum með nokkurra tuga eða hundruða árpúsunda millibili, og á stuttum tímaskala, með nokkurra áratuga eða alda millibili.

Kvikuhólf ráða langtímasveiflum og staðbundinni gos- og jarðhitavirkni í megineldstöðvum/ eldfjöllum, en í rekbeltunum kemur spenna á flekaskilunum til viðbótar og getur hún ein ráðið virkninni.

Á þróunarskeiði megineldstöðvar í rekbelti klofnar eldstöðin um sprungusveiminn og sígur. Gliðnun, og þar með stækkun í rekstefnu, getur numið nokkrum kílómetrum á breiddina á virkniskeiði eldstöðvarinnar. Innskotavirknin sem skapar hitagjafann helst langtímum saman, jafnvel allt æviskeiðið, á sama stað eða stöðum. Þannig verður til kjarnasvæði sem haldast heit, en vaxa í rekstefnu og kólna til endanna.

Með ofangreint í huga má greina nokkra undirflokkka háhitakerfa út frá brotakerfum, jarðfræðilegu umhverfi og þróunarstigi:

1. **Háhitakerfi í megineldstöð rekbeltis.** Megineldstöðvar markast af mestri upphleðslu á takmörkuðu svæði í eldstöðvakerfunum með vísbendingu um kvikuhólf út frá tengdum gígaröðum og sprungukerfum, oft hringlægum sem og rýólíti. Í flestum þessara megineldstöðva er askja. Krafla og Dyngjufjöll eru dæmi. Önnur dæmi án öskju eru Hengill, Þeistareykir og Fremrinámar.
2. **Háhitakerfi í sprungusveimi megineldstöðvar.** Í Kröflukerfinu er háhitakerfi af þessari gerð í staðbundinni þyrpingu gosstöðva (Námafjall) og annað í Gjástykki nálægt norðurenda gosvirkni í kerfinu. Þriðja dæmið er kennt við Hverahlíð, sunnan við Hellisheiði.
3. **Háhitakerfi í sniðrekbelti.** Basaltkerfi Reykjanesskagans milli Brennisteinsfjalla og Reykjaness hýsa háhitakerfi. Rýólít kemur þar ekki fyrir. Tímabil gliðunar með gosvirkni og sniðgengisfærslu skiptast á. Hvort um sig stendur í nokkrar aldir. Yfirstandandi sniðgengistímabil hefur staðið í 750 ár, álíka lengi og það næsta á undan.
4. **Háhitakerfi í eldkeilu utan rekbelta.** Öskjur og sveiglægar gossprungur vísa á kvikuþró og undirliggjandi kvikurás. Mýrdalsjökull er dæmi. Í honum er djúp og mikil askja. Jarðhiti er ekki sýnilegur en kemur fram í afrennsli (Jökulsá). Í Mýrdalsjökli hefur kvikuþró greinst á fárra kílómetra dýpi í skjálftamælingum sem S-bylgjuskuggi. Eyjafjallajökull er annað dæmi enn sem komið er án öskju. Þar benda laugar sunnan í fjallinu til afrennslis frá háhitakerfi. Eyjafjallajökull gýs aðallega basalti en einnig ísúrri og súrri (þ.e. kísilsýruríkri) kviku. Vísbending er um kvikuþró á 7-10 km dýpi.
5. **Háhitakerfi í rýólíteldfjalli utan rekbelta.** Torfajökull og Kerlingarfjöll eru dæmi um rýólíteldfjöll hér á landi. Einkenni slíkra er að eldfjallið sjálft gýs nær eingöngu rýólíti, gjarnan í stórgosum með löngum hléum. Skýringin er talin vera grunnstæð kvikuþró með súru bergi sem basaltkvika brýst ekki upp úr en kemur upp utan við. Þannig þróaðist Torfajökull í hliðarbelti (gosbelti utan rekbeltis) fram á síðasta jökulskeið, að rekbelti færðist suðvestur yfir hann. Feiknaöflug háhitakerfi tengjast rýólíteldfjöllum. Svo er um Torfajökul, en hann hýsir öflugasta háhitakerfið hér á landi.
6. **Háhitakerfi í megineldstöð á kólnunarstigi.** Háhitakerfin deyjá út með eldvirkninni. Nokkur slík eru þekkt, mislangt komin í kólnun. Þau einkennast af hlutfallslega háum styrk koldíoxíðs í hveragasi. Lengst komið í kólnun og kolsýruríkast er Grímsneskerfið. Hæstur hiti í því er um 185°C. Ölkelduhálskerfið er með svipuðum einkennum, rúmlega 200°C heitt sá hluti kerfisins sem er þekktur. Hveragerðiskerfið með Grændal er enn eitt dæmi. Það er yfir 235°C heitt, hitnar til norðurs en kólnar í suður, og er um 175°C syðst í Hveragerði.

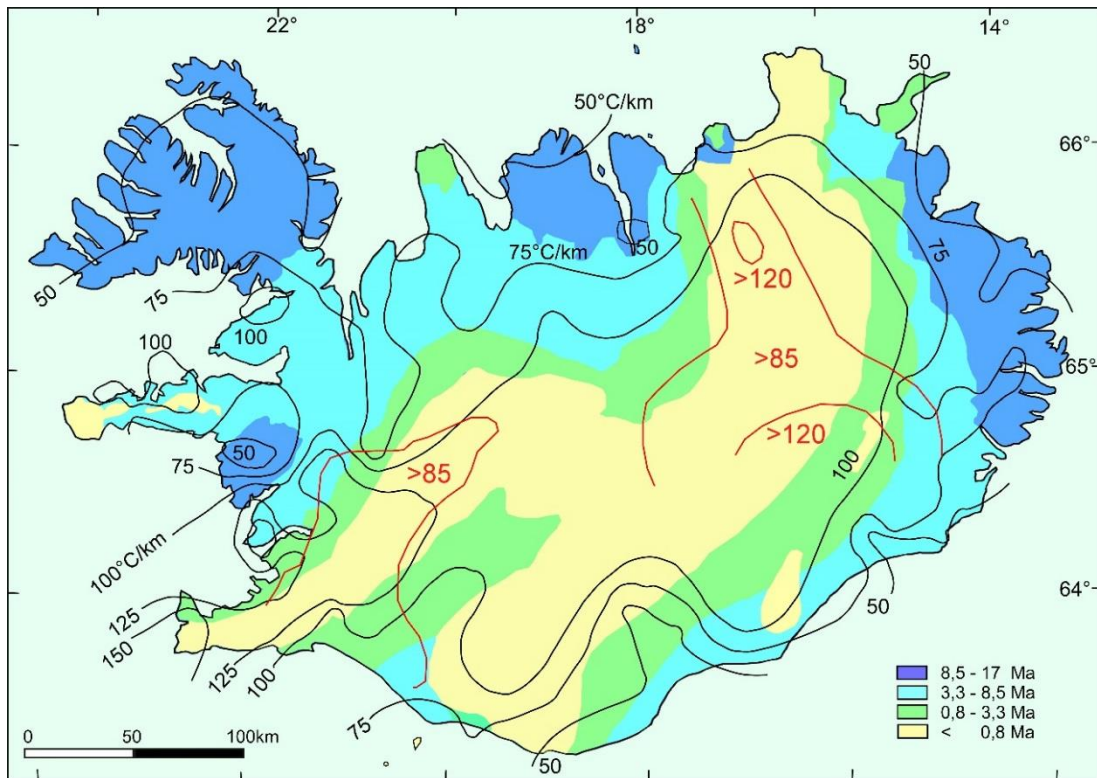
5 VARMASTRUMUR OG ORKUFORÐI

Eins og komið hefur fram byggir jarðhitinn á Íslandi annars vegar á þeim mikla orkuforða, sem bundinn er í jarðskorpunni og hins vegar á varmastrumnum neðan úr möttli upp í gegnum jarðskorpuna. Á níunda áratug síðustu aldar var lagt mat á stærð þessara þátta. Fyrstur mat Gunnar Böðvarsson (1982a) stærð heildarvarmastrumsins gegnum jarðskorpu Íslands og síðan Orkustofnun bundna varmaorku í jarðskorpu landsins (Guðmundur Pálmason o.fl., 1985). Í þessum tveimur athugunum var því sinn hvor þáttur jarðhitans metinn, þ.e. sístæði varmastrumurinn að neðan og varmaorkan sem geymd er í skorpunni.

Nú liggja fyrir betri upplýsingar um hitaástand jarðskorpunnar á Íslandi einkum byggðar á hitamælingum í borholum (Guðmundur Pálmason og Kristján Sæmundsson, 1979; Ólafur Flóvenz og Kristján Sæmundsson, 1993; Kristján Sæmundsson o.fl., 2003) en einnig á öðrum

jarðeðlisfræðilegum mælingum eins og viðnámsmælingum og jarðstraumamælingum (MT) sem ná niður á mikið dýpi (Axel Björnsson o.fl., 2005). Farið verður stuttlega yfir þessar upplýsingar hér á eftir. Ekkert stórvægilegt hefur þó komið fram sem er í mótsögn við niðurstöður Gunnars Böðvarssonar (1982a) og vinnuhóps Orkustofnunar (Guðmundur Pálmason o.fl., 1985).

Mynd 5-1 sýnir aldur berggrunnins undir Íslandi og hitastigul í jarðskorpunni, sem er ákvarðaður með mælingum í grunnum og djúpum borholum utan áhrifasvæða jarðhitakerfa auk þess að vera metinn út frá MT-mælingum. Þessi stigull er kallaður ótruflaður hitastigull og hefur verið talinn endurspeglar varmastreymið með varmaleiðingu upp í gegnum skorpuna. Innan gosbeltanna er berg mjög lekt og kælt af greiðu streymi grunnvatns niður á um það bil 1 km dýpi. Þar eru því engar grunnar borholur sem geta sagt til um ótruflaðan hitastigul. Lega $100^{\circ}\text{C}/\text{km}$ línunnar er því dregin með verulegri óvissu á Mynd 5-1.



Mynd 5-1: Kort sem sýnir hitastigul í grunnum og nokkrum djúpum borholum utan jarðhitasvæða. Jafnstigulsínur eru dregnar með svörtum, grönnum línum. Tölurnar eru $^{\circ}\text{C}/\text{km}$. Rauðu línurnar sýna áætlaðan stigul út frá dýpi niður á 1100°C hlutbráð samkvæmt MT-mælingum.

Einnig má meta hitastigullinn út frá hámarksdýpi jarðskjálfta. Við um það bil 600°C hættir basaltberg að fjaðra og verður seigfljótandi. Mesta dýpi skjálfta endurspeglar því 600°C jafnhitaflöt. Önnur leið til að meta hitastigul er að kortleggja með MT mælingum dýpi niður á lágviðnámslag sem er talið stafa af hlutbráð (um 5% bráð við 1100°C hita) í basalti (Axel Björnsson, 1985; 2007). Gott samræmi er á milli stiguls sem fundinn er út frá skjálftadýpi og hitastigli samkvæmt dýpi niður á hlutbráð. Það bendir til þess að reikna megi með því í fyrstu nálgun að hitastigullinn sé línulegur frá yfirborði og niður að hlutbráðna laginu. Hitastigullinn á Kröfluslóðum og yfir möttulstróknun norðan við Vatnajökul er samkvæmt MT mælingum $110\text{--}140^{\circ}\text{C}/\text{km}$ og um $80\text{--}90^{\circ}\text{C}/\text{km}$ nær jöðrum gosbeltisins á Norðurlandi. Á Suðvesturlandi er hann um $80^{\circ}\text{C}/\text{km}$ í gosbeltinu og því mun lægri en mælingar í grunnum holum við jaðrana sýna.

Nýlegar djúpar rannsóknarholur á Hellisheiði og Reykjanesi benda til þess að hitastigullinn í gosbeltinu á þessum slóðum sé aðeins um $100^{\circ}\text{C}/\text{km}$ og því mun lægri en sá stigull sem fram kemur í grunnum holum og sýndur er á mynd 8. Hugsanlegt er að hitastigull mældur í grunnum

holum sé truflaður af lárétu rennsli jarðhitavatts, einkum á Suðvesturlandi og víðar við jaðra gosbeltanna.

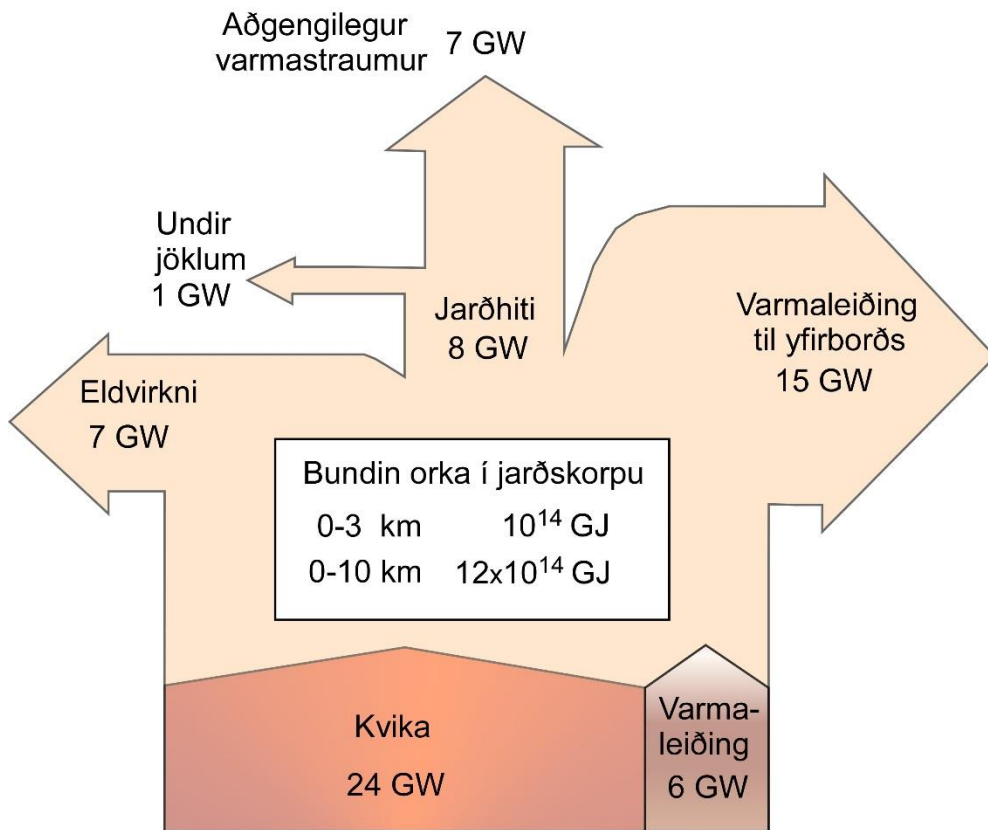
Þessar tölur um hitastigul falla í grófum dráttum að líkani Guðmundar Pálmasonar (1973; 1986) er lýsir myndun jarðskorpunnar á Íslandi. Það líkan gefur allt að 200°C/km stigul í miðju gosbeltinu en lækkar síðan með aldri jarðlaga og með fjarlægð frá rekásnum.

Rétt er að fjalla nánar um mat Gunnars Böðvarssonar (1982a) á orkuflæði upp í gegnum skorpuna og um mat Guðmundar Pálmasonar o.fl. (1985) á orkuforðanum í skorpunni því með þessum rannsóknum var lagður grunnur að umfjöllun um stærð og eðli jarðhitaauðlindarinnar. Valgarður Stefánsson sameinaði síðar niðurstöður beggja. Á mynd 5-2 er einföld skýringarmynd af þessum þáttum jarðhitans byggð á niðurstöðum Valgarðs. Varmastraumurinn að neðan er sýndur lengst til vinstri, orkuforðinn í skorpunni í miðjunni og varmastreymi til yfirborðs hægra megin.

Gunnar Böðvarsson áætlaði að varmastraurmurinn að neðan upp undir Ísland væri alls um 30 GW (1 GW = 10^9 W), þar af berast um 24 GW með kvikustreymi og 6 GW með varmaleiðingu (sjá mynd 5-2). Hann mat aðeins þann hluta landsins, sem er ofansjávar, en auðvitað er einnig varmastreymi upp undir landgrunnið. Þessi orka streymir um jarðskorpu landsins upp í gegnum yfirborðið. Í skorpunni áætlaði Gunnar að varmastraurmurinn skiptist í 7 GW sem fylgja eldvirkni, 8 GW berast með vatni og gufu á jarðhitasvæðum og 15 GW með varmaleiðingu. Þessi varmaleiðing samsvarar um 150 mW/m² á Íslandi sem er um tvisvar sinnum meira en heimsmeðaltalið, en svipað og á mörgum öðrum virkum brotasvæðum og úthafshryggjum á jörðinni. Hins vegar er varmaflutningur með kviku og jarðhitavirkni óvenju mikill upp í gegnum Ísland eða jafnmikill og með varmaleiðingu.

Meginniðurstaða jarðvarmamats Orkustofnunar frá 1985 eru þær að orkuforði Íslands niður á 10 km dýpi sé um $12 \cdot 10^{14}$ GJ, en ofan 3 km dýpis sé orkuforði $1 \cdot 10^{14}$ GJ. Til samanburðar nam frumorkunotkun mannkyns árið 2008 $5 \cdot 10^{11}$ GJ. Geta má þess að samkvæmt niðurstöðum Orkustofnunar er orkuþéttleikinn (varmaorka á rúmmálseiningu, J/m³) mestur innan gosbeltis landsins, einkum á háhitasvæðunum. Þá var metið að orkuforði 5 stærstu háhitasvæðanna; Torfajökuls, Grímsvatna, Hengils, Krýsuvíkur og Kröflu væri um 70% af orkuforða allra háhitasvæða landsins.

Með því að bera saman tölurnar um orkuforða og varmaflæði er hægt að meta gróflega hve langan tíma það hefur tekið varmann ofan 10 km dýpis að safnast fyrir í berggrunninum, eða hve langan tíma það tekur hann að endurnýjast. Niðurstaðan er tímalengd af stærðargráðunni 1,3 milljónir ára. Ljóst er að þessi endurnýjun gerist mishratt. Sá hluti hennar sem gerist með streymi kviku, vatns og gufu endurnýjast margfalt hraðar en sá hluti sem endurnýjast aðeins með varmaleiðingu. Þessir reikningar og vangaveltur sýna glögg þann mikla orkuforða sem er til staðar í jarðskorpu Íslands og að fræðilega er hægt að vinna mikla orku ef samfélagið telur ásættanlegt að ganga á hluta orkuforðans í örlitlum mæli.



Mynd 5-2: Byggt á mynd Valgarðs Stefánssonar (1998). Gunnar Böðvarsson (1982a) mat varmastrauminn en Guðmundur Pálmason o.fl (1985) lögðu mat á bundna orku í jarðskorpunni.

6 JARÐVARMAVIRKJANIR

Á Íslandi eru háhitasvæði virkjuð til að framleiða rafmagn með gufu sem snýr hverflum, en einnig eru virkjanir á háhitasvæðum sem nýta gufuna til að hita upp kalt grunnvatn t.d. Nesjavellir (sjá Mynd 6-1). Jarðvarmavirkjanir henta vel sem grunnálagsvirkjanir (e. *Base load power plants*) þar sem framleiðslan er stöðug allan sólarhringinn, allt árið um kring. Það er vegna þess að auðlindin er hvorki háð veðri né árstíðum. Aðrir endurnýjanlegir orkugjafar eins og vind- og vatnsorka henta betur til að anna álagstoppum í kerfinu, sérstaklega vatnsorkuver þar sem hægt er að auka eða minnka framleiðsluna með litlum fyrirvara. Jarðvarmavirkjanir eru almennt ekki frekar á landsvæði, og er skipulagt iðnaðarsvæði stórrar virkjunar um 1 km², og er þar með talið allt svæði sem fer undir stöðvarhús og önnur mannvirki. Tækniframfarir síðustu áratuga hafa einnig gert það að verkum að nú er hægt að skáborá margar borholur frá sama borteignum, svo að raskað svæði er minna.

Jarðvarmavirkjanir eru eins mismunandi og þær eru margar, en þó hefur reynsla undanfarinna áratuga leitt ýmislegt í ljós sem segja má að gildi almennt um þær. Það er ekki hægt að spá með algerri vissu fyrir um hvort borun eftir jarðhita muni bera árangur fyrir en henni er lokið, en forrannsóknir eru í sífelltri þróun og í dag er hægt að spá fyrir um hvort borun beri árangur með meiri nákvæmni en áður. Í dag er algengt að yfir 70% borana beri árangur og hægt sé að nýta holurnar til vinnslu.



Mynd 6-1: Nesjavallavirkjun.

Ef skoðað er einfalt dæmi um 90 MW virkjun þá er hægt að fá ágæta mynd af þeim fjölda holna sem þarf að bora yfir líftíma virkjunarinnar. Ef gert er ráð fyrir því að afl meðalvinnsluhölu sé um 5 MW, þá þyrfti að bora um 22 holur til að afla nægjanlegrar gufu, auk tveggja niðurdælingarholna. Við arðsemismat miðar Orkustofnun við 3% gufuryrnun á ári að meðaltali út líftíma virkjunarinnar. Ef gert er ráð fyrir 60 ára líftíma virkjunarinnar, þá þarf að bora um 50 uppbótarholur, og gerir þetta því samtals um 75 holur sem þarf að bora (Björn Már Sveinbjörnsson, 2014).

7 SJÁLFBÆR VINNSLA JARÐHITA

Í lögum um rannsóknir og nýtingu á auðlindum í jörðu er tekið fram að þegar nýtingarleyfi er veitt skuli þess gætt að nýting auðlindar í jörðu sé með þeim hætti að tekið sé tillit til umhverfissjónarmiða, að nýtingin sé þjóðhagslega hagkvæm og að tekið sé tillit til nýtingar sem þegar er hafin í næsta nágrenni. Ef þessi skilyrði eru ekki uppfyllt hefur Orkustofnun heimild til þess að afturkalla leyfið.

Í álitserð faghóps rammaáætlunar og Orkustofnunar frá 2010 (Jónas Ketilsson o.fl., 2010) koma fram tillögur að markmiðum sjálfbærrar jarðhitanýtingar. Síðan álitserð faghópsins kom fram voru lög um stjórn vatnamála sett árið 2011 (lög nr. 36/2011) þar sem, ólíkt auðlindalögum, skilgreining hugtaksins grunnvatn innifelur heitt vatn. Samkvæmt 12. gr. laganna skal „*tryggja sjálfbæra nýtingu grunnvatns þannig að jafnvægi sé milli vatnstöku og endurnýjunar*“. Einnig má finna skilgreiningu á sjálfbærri þróun í skipulagslögum (lög nr. 123/2010) þar sem stendur: „*Sjálfbær þróun: Þróun sem mætir þörfum samtímans án þess að draga úr möguleikum kynslóða til að mæta þörfum sínum. Í þessu felst að sókn eftir efnahagslegum gæðum verður að haldast í hendur við vernd umhverfisins og grunnæða jarðar.*“ Við leyfisveitingar hefur Orkustofnun lagt áherslu á að rekstur jarðvarmavirkjana hafi það að markmiði að sem jöfnust afkastageta virkjunarinnar sé tryggð til lengri tíma með því að leggja áherslu á að jafnvægi sé milli vatnstöku og endurnýjunar.

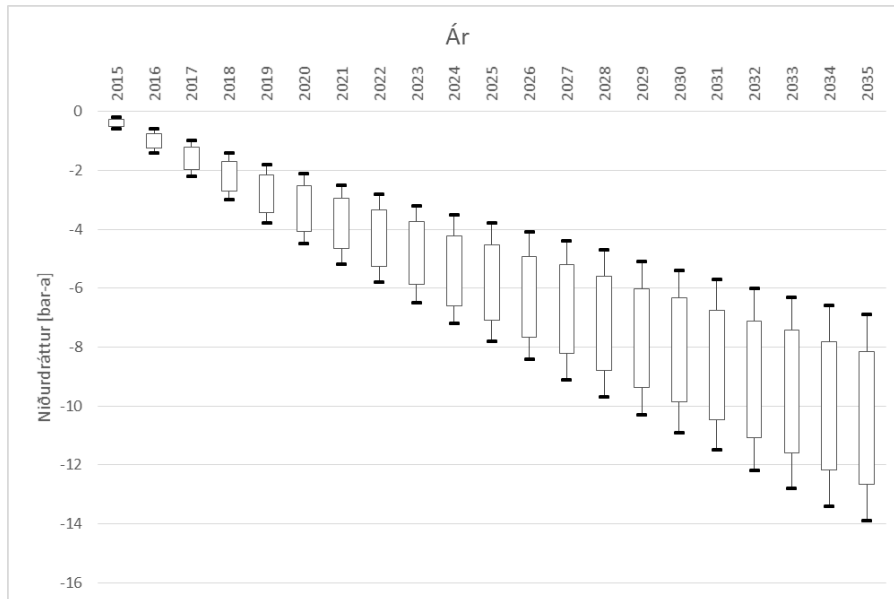
Orkustofnun áréttar að krafa um sjálfbæra vinnslu er einn af þeim þáttum sem koma til álita þegar sjálfbærni jarðhitanýtingar er skoðuð, en er ekki hugsuð sem algildur mælikvarði á sjálfbæra þróun, enda koma þar fram önnur sjónarmið inn í heildarmyndina eins og fram kemur m.a. í álitserð faghópsins sem ekki er til umræðu hér í ljósi þess að reglugerðin kveður á um kröfu um sjálfbærni virkjunar, þ.e. samspil nýtingar og endingartíma, en ekki sjálfbæra þróun í víðara samhengi.

Aðferðin við mat á sjálfbæra vinnslu byggir á að fyrir sérhvert jarðhitasvæði og fyrir sérhverja vinnsluáferð, sé til ákveðið hámarksvinnslustig E_0 , sem er þannig háttað að með lægra vinnslustigi en E_0 er unnt að viðhalda óbreyttri orkuvinnslu úr kerfinu í að minnsta kosti 100 ár. Sé vinnsluálag umfram E_0 er ekki unnt að viðhalda óbreyttri orkuvinnslu svo lengi. Jarðvarmavinnsla minni en, eða jöfn, E_0 er skilgreind sem sjálfbær, en vinnsla umfram E_0 telst ekki sjálfbær.

Bent skal á að hámarksvinnslustig og sjálfbær vinnslugeta (e. *sustainable yield*) jarðhitakerfa er ekki þekkt við upphaf vinnslu. Það má hins vegar meta samhliða vinnslu út frá fyrirbyggjandi gögnum um innri gerð og eðli kerfanna og gögnum um viðbrögð þeirra við vinnslu. Sjálfbær vinnslugeta er einnig háð vinnslutækninni, jafnt vinnsluáferðinni sem beitt er og tækniframförum. Djúplosun affallsvatns í jarðhitageyminn stuðlar að jafnvægi í vatnsbúskap kerfisins. Með rannsóknum og ferilefnaprófunum er hægt að draga úr áhættu á kæliáhrifum af djúplosun sem getur dregið úr vinnsluhæfni til skemmri tíma lítið. Dýpri borholur kunna einnig í framtíðinni að auka möguleika á meiri orkuvinnslu úr mörgum jarðhitakerfum, ekki síst tengdum eldstöðvum og stuðla orkufyrirtækin og ríkið í gegnum Orkustofnun að rannsókn á slíkri borun með Djúpborunarverkefninu. Hætta er á að bergið sé ekki nægilega sprungið á miklu dýpi til vinnslu en vonir eru bundnar við að með rannsóknum verði hægt að auka skilning á rótum jarðhitakerfa og vinnsluhæfni þeirra á næstu áratugum.

Samkvæmt reglugerð um virkjunarkosti í verndar- og nýtingaráætlun er gerð krafa um markmið um sjálfbærni virkjunar, þ.e. samspil nýtingar og endingartíma. Almennt hefur Orkustofnun eftirlit með ýmsum atriðum sem gefa til kynna ástand jarðhitageymisins, til dæmis er fylgst með breytingum á þrýstingi og hitastigi í borholum. Erfitt er að spá fyrir um vinnslugetu jarðhitakerfisins í upphafi þó hægt sé að gera spár með hliðsjón af öðrum jarðhitakerfum í nýtingu sem talin eru vera svipuð. Með rannsóknarborunum og yfirborðsrannsóknum er þó hægt að auka líkur á réttum skilningi og þar af leiðandi væntanlegum viðbrögðum við vinnslu. Samhliða vinnslu er svo hægt að bæta reiknilíkanið sem spáir fyrir um þrýstings- og hitastigsþróun kerfisins. Gagnvart þeim orkukostum sem Orkustofnun setur fram er skilyrði áður en vinnsla hefst að sett verði leyfileg þrýstingsmörk í tíma sem hefur það að markmiði að tryggja langtímanýtingu auðlindar. Sömuleiðis setur Orkustofnun samskonar skilyrði í nýtingarleyfi jarðvarmavirkjana sem gefin hafa verið út á undanförunum árum. Að auki er ákvæði um djúplosun ef aðstreymi í jarðhitageymi er undir áætlun. Í upphafi nýtingar er spáð fyrir um líkleg viðbrögð jarðhitakerfisins

með því að skilgreina árleg útmörk þrýstingslækkunar, sem og vikmörk, sem reiknuð eru sem 10% og 90% líkindi útmarka (sjá Mynd 7-1).



Mynd 7-1: Dæmi um spá um leyfilegan niðurdrátt. Vikmörkin eru skilgreind innan kassana og svörtu línurnar tákna útmörk.

Áður en vikmörkum er náð er reiknilíkanið endurskoðað. Falli þrýstingur hins vegar út fyrir útgildi, eða ef uppfærðir líkanreikningar eða gögn gefa til kynna að óbreytt vinnsla leiði til gufurýrnunar umfram 3% á ári, eða ef losun gengur illa, þarf virkjunaraðili að leggja til mótvægisáðgerðir. Þær geta t.d. falist í því að minnka eða færa til massavinnslu, auka djúplosun, eða bora uppbotarholur. Orkustofnun gerir sömuleiðis yfirleitt þá kröfu á grundvelli umhverfismats framkvæmda að myndun lóna á yfirborði sé með öllu óheimil og því þurfi að haga losun með slíkum hætti að það gerist ekki. Undantekningar frá þessu geta verið fyrir hendi vegna atvinnustarfsemi með viðeigandi leyfi, t.d. vegna heilsuáætlana, eða annarra gildra ástæðna.

Eðli málsins samkvæmt liggja á skipulagsstigi ekki fyrir niðurstöður tilraunaborana eða önnur gögn sem geta gefið marktækar upplýsingar um sjálfbæra vinnslugetu viðkomandi jarðhitasvæða. Í skilgreiningu orkukosta vegna rammaáætlunar er því annað hvort hægt að vísa til að fylgt verði aðferðafræði Orkustofnunar eða leggja fram eigin rökstudda greinargerð um með hvaða hætti sjálfbær vinnsla verði tryggð.

8 NÝTINGARSVÆÐI

Það landsvæði sem framkvæmdir á yfirborði fara fram á er skilgreint sem iðnaðarsvæði af skipulagsyfirlöndum, en áhrifasvæði virkjunar á auðlindina undir yfirborði jarðar einskorðast ekki við það framkvæmdasvæði og er nýtingarsvæðið því skilgreint víðara og tekur jafnframt tillit til hins óþekkta. Áætlað áhrifasvæði nýtingar á auðlindina afmarkar þannig nýtingarsvæðið. Þetta nýtingarsvæði er því stærra heldur en iðnaðarsvæðið, en hafa ber í huga að nýtingin fer fram undir yfirborði jarðar, en allar framkvæmdir á yfirborðinu eru háðar samþykki skipulagsyfirlöndum og ákvarðast á síðari stigum mats á umhverfisáhrifum framkvæmda hvar og hvernig mannvirki, lagnir og borholur geta verið innan nýtingarsvæðis að teknu tilliti til þeirra verndarsjónarmiða sem fram koma við nánari skoðun á virkjunarkostinum.

Ef miðað er við að það þyrfti að bora um 22 holur í upphafi reksturs 90 MW virkjunar, þá má áætla stærð framkvæmdasvæðisins út frá svæðum sem nú eru þegar nýtt á Hengilssvæðinu. Samkvæmt skýrslu Gríms Björnssonar um endurskoðun hugmyndalíkans af jarðhitakerfum í Hengli þá má sjá að virkjanirnar á Nesjavöllum og á Hellisheiði nýta hvor um sig 25 borholur, og er stærð framkvæmdasvæðanna áætluð sem 1200 metra geirar dregnir í kringum núverandi og áætlaða borteiga. Fyrir þessar virkjanir á Hengilssvæðinu eru framkvæmdasvæðin því 16–20 km², sem hægt er að nota sem grófa áætlun fyrir nýja virkjun af svipaðri stærð (Grímur Björnsson, 2007).

Nýtingarsvæði fyrir sjóðandi lág hita er ekki hægt að afmarka með sama hætti og á háhitasvæðum. Svæðin sem afmörkuð eru fyrir virkjanakosti Orkustofnunar á þessu stigi markast af þekktum og áætluðum jarðhita, jarðfræði og landslagi, skv. mati sérfræðinga. Sem nærtækt þekkt dæmi má nefna Mosfellsdal, en þar gefa 6 holur dreifðar yfir um 12 km² svæði ríflega 40 l/s af lág hitavatni. Rannsóknarboranir munu leiða í ljós staðsetningu og stærð nauðsynlegra framkvæmdasvæða innan nýtingarsvæðanna, auk þess að minnka sjálf nýtingarsvæðin miðað við fyrstu áætlun í ljósi frekari þekkingar, ef að líkum lætur. Hafa ber í huga að gert er ráð fyrir fjölnýtingu jarðhitans og má gera ráð fyrir að framkvæmdasvæði vegna t.d. ræktunar í gróðurhúsum eða eldis í volgu vatni yrðu stærri heldur en þau framkvæmdasvæði sem tengjast borunum eða raforkuframleiðslu.

9 JARÐHITARANNSÓKNIR

Borkostnaður vinnsluholu fyrir jarðvarmavirkjun er um hálfur milljarður króna. Til að auka líkur á árangri er beitt ýmsum yfirborðsrannsóknum sem á undanförunum árum hafa leitt til bættra líkinda á árangri ef horft er til vinnslugetu þeirra háhitaholna sem boraðar hafa verið á undanförunum áratugum.

Vandaðar forrannsóknir minnka áhættuna við borun og hafa markvert lækkað kostnaðinn við uppbyggingu og rekstur hitaveitna og jarðvarmavirkjana, en jarðhitarannsóknir eru hinsvegar tímafrekar og ekki er hægt að meta árangur þeirra fyrir en búið er að bora. Þannig hefur árangur rannsóknarborana þrefaldast frá því sem var á 7. áratug síðustu aldar þegar árangurinn af rannsóknarborunum var einungis 25% en er í dag 70% (Björn Már Sveinbjörnsson, 2014).

Á lág hitasvæðum er hægt að framkvæma yfirborðsrannsóknir og boranir svo framarlega sem ekki er búið að setja viðkomandi orkunýtingarkost í verndarflokk. Boranir á háhitasvæðum kalla hins vegar á umfangsmiklar framkvæmdir sem eru leyfisskyldar, og ekki er hægt að fara í slíkar rannsóknir nema fyrir þá virkjanakosti sem búið er að setja í nýtingarflokk. Forsendur fyrir ákvörðun á staðsetningu borholna, lagna á yfirborði og stöðvarhúss er því ekki hægt að sannreyna fyrir slíka virkjanakosti nema búið sé að setja þá í nýtingarflokk. Af þessum sökum er það óumflýjanleg staða að upplýsingar um mannvirki á háhitasvæðum eru afar almennar á þ.e. á stigi umhverfismats áætlana og þar með við umfjöllun í rammaáætlun. Ljóst er að borstæði, pípur og stöðvarhús eru staðsett innan nýtingarsvæðis en verkhönnun sem síðan leiðir til afmörkunar á nauðsynlegu framkvæmdasvæði, getur ekki átt sér stað fyrir en tilheyrandi rannsóknum er lokið.

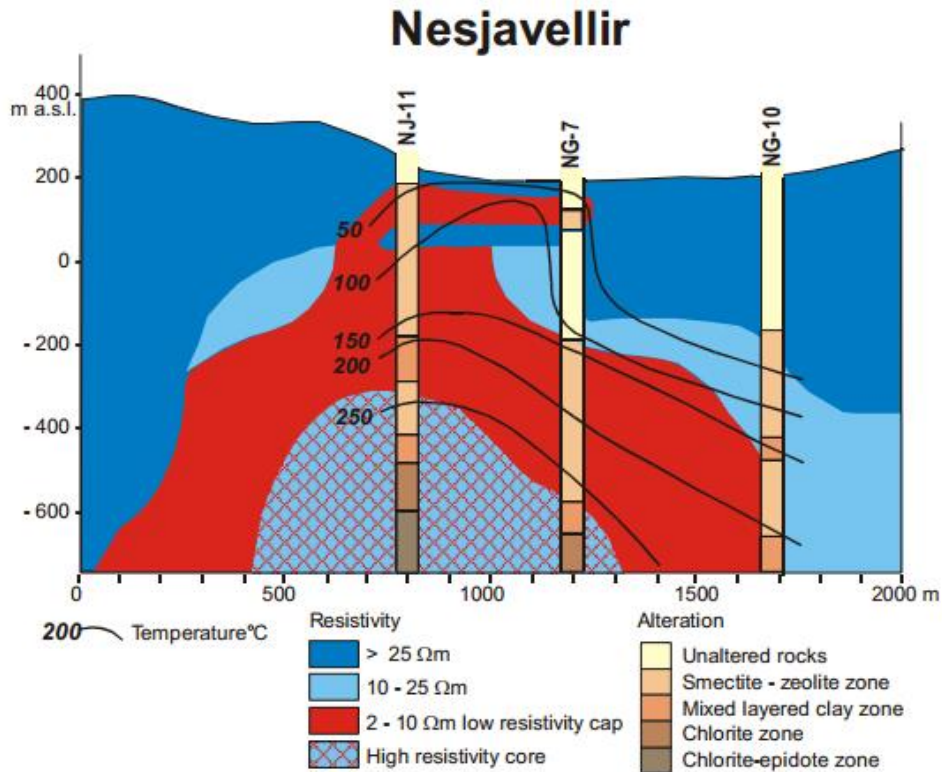
Niðurstöður rannsókna á jarðhitasvæðum eru grundvöllur fyrir gerð korta sem sýna eðliseiginleika berglagastaflans og hvar lekar bergsprungur megi finna á eins til tveggja kílómetra dýpi. Borun leiðir svo í ljós hvort sprungurnar séu í reynd nægilega gæfar og með afkastaprófun kemur í ljós hvort flæði í og að sprungu sé nægjanlegt til að standa undir vinnslu til lengri tíma. Allt þetta er ekki hægt að sjá fyrir hvar og hvernig verði háttáð á stigi áætlana. Ýmsum aðferðum er hægt að beita til að meta eðlisástand vökvans, þ.e.a.s. hitastig, þrýsting og vermi hans með því að rannsaka efnainnihald vökva í hverum og laugum á yfirborði. Einnig er hægt að kanna uppruna og rennislísiðir með efnafræðilegum athugunum. Þær rannsóknaraðferðir sem hafa gefið einna besta raun í könnun jarðhitasvæða eru mælingar á eðlisfræðilegum stærðum svo sem eðlisviðnámi, segulmögnun og hitastigi sem nánar er gerð grein fyrir í næstu undirköflum ásamt almennri jarðfræðikortlagningu.

10 YFIRBORÐSMÆLINGAR

10.1 VIÐNÁMSMÆLINGAR

Viðnámsmælingar mæla eðlisviðnám í berglögum, þ.e.a.s hversu vel þau leiða rafstraum. Vatnsinnihald berglaganna og selta vatnsins ræður miklu um eðlisviðnámið, en jarðvarmakerfi eru nokkuð frábrugðin. Jarðvarmi ummyndar ferskar steindir í bergi í svokallaðar ummyndunarsteindir, en hitastig ræður því í hvaða steind þær ummyndast. Rannsóknir hafa sýnt að eðlisviðnám á jarðhitasvæðum ráðist frekar af því hvaða ummyndunarsteindir sé að finna heldur en af vatnsinnihaldi bergsins.

Rannsóknir hafa sýnt að jarðvarmakerfi á Íslandi eru flest með svipaða uppbyggingu þegar kemur að eðlisviðnámi (Mynd 2-1). Efstu jarðlögin eru yfirleitt með hátt eðlisviðnám, en á nokkru dýpi kemur í ljós svokölluð lágviðnámskápa, þar sem eðlisviðnámið fellur mikið. Undir henni er svo háviðnámskjarni, en í honum er yfirleitt mesta hitastig jarðvarmakerfisins, yfirleitt yfir 250°C, og er hann því ákjósanlegasti staðurinn fyrir staðsetningu vinnsluholna. Samband hitastigs og ummyndunarsteinda, og þ.a.l. eðlisviðnáms, hefur verið kortlagt vel en þó ber að nefna að eðlisviðnám er ekki endilega ávísun á ákveðið hitastig, heldur vísbending um að einhvern tíma hafi hitastig verið það hátt að bergið ummyndaðist, svo þrátt fyrir að viðnámsmælingar séu ein besta aðferð til að kortleggja jarðhitakerfi án þess að bora, eru þær ekki ávísun á nothæfar vinnsluholur. Á Mynd 10.1-1 má sjá viðnámslíkan af jarðhitakerfinu á Nesjavöllum, en það var fyrsta jarðhitakerfið sem var kortlagt á þennan hátt á Íslandi. Hafa skal hugfast að reynt er með borun að skera í gæfar bergsprungur innan jarðhitageymisins. Þá er horft til jarðfræðikortlagningar á svæðinu ásamt öðrum mælingum. Bergsprungurnar geta teygst sig út fyrir miðju jarðhitakerfisins og alls óvíst hvort varmaburður eftir bergsprungu sé í nýtanlegu magni á vinnanlegu dýpi.



Mynd 10.1-1: Viðnámslíkan af Nesjavöllum.

10.2 SEGULMÆLINGAR

Segulmælingar mæla styrk og stefnu segulmagnunar í bergi. Á lághitasvæðum stígur heitt vatn upp til yfirborðs meðfram berggöngum sem hægt er að kortleggja með segulmælingum, og er jafnan borað eftir vatninu með tilliti til staðsetningar bergganga.

10.3 HITASTIG Í JARÐVEGI

Hitastig í jarðvegi má mæla á um það bil hálfis metra dýpi. Þessi gerð mælinga er fljótleg og einföld og gefur mikilvægar upplýsingar um megin uppstreymi jarðhitavatns upp úr berggrunninum.

10.4 ÞYNGDARMÆLINGAR

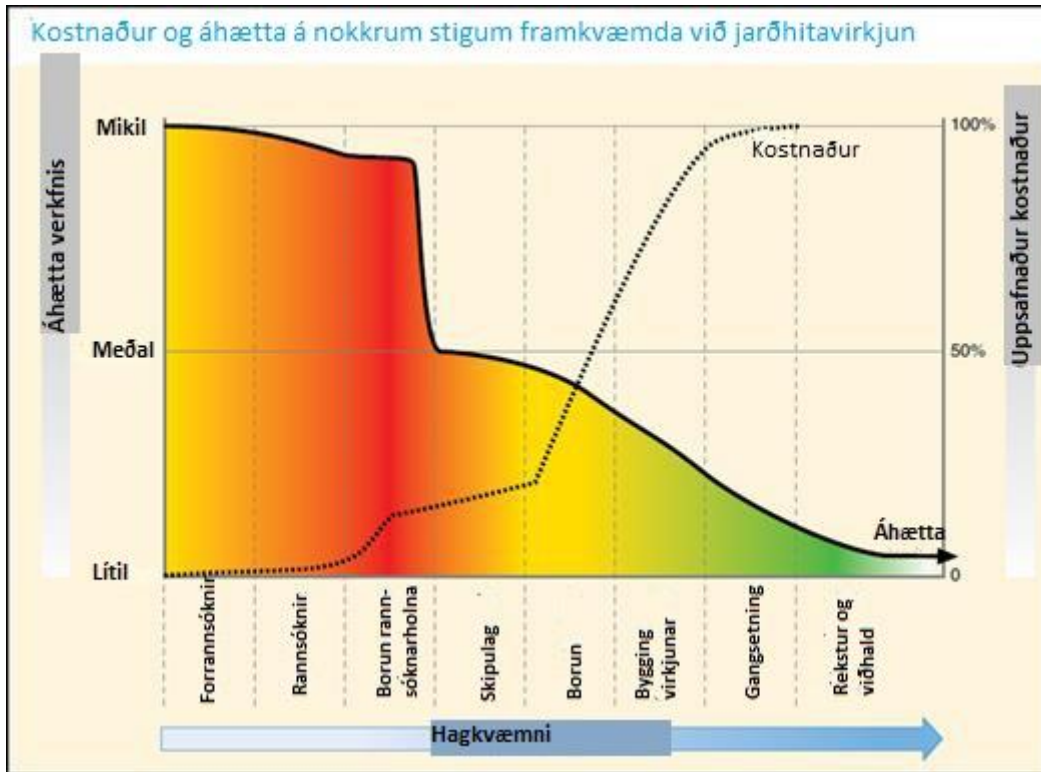
Þyngdarmælingar mæla frávik í þyngdarhröðun á yfirborði jarðar. Þær eru með nákvæmstu mælingum sem hægt er að gera og þegar þær eru endurteknar með landmælingum má greina hvernig massadreifing umhverfis mælistaðinn breytist. Þyngdarmælingar hafa verið notaðar til að fylgjast með hvaða áhrif massaupptaka vegna jarðvarmavinnslu hefur á jarðhitageyma.

11 FJÁRMÖGNUN

Fjármögnun jarðvarmavirkjana er áhættusöm og erfitt er að fjármagna þær á frjálsum markaði sökum þess hve erfitt er að sannreyna virkjunarmöguleika auðlindarinnar áður en framkvæmdir hefjast. Á Íslandi hefur nýting lághita verið fjármögnuð og styrkt að miklu leyti af ríki og sveitarfélögum, og með hagstæðum lánnum, og ekki hefur verið búist við arðsemi eigin fjár

umfram 7% með vísan til 32. gr. orkulaga. Oft er gert ráð fyrir að opinberir aðilar láni eða styrki fyrstu stig jarðvarmavirkjunar, en eftir því sem á líður og áhætta fjárfestingarinnar minnkar getur framkvæmdin færst til einkaaðila. Sömu leiðis getur burðugt einkafyrirtæki með þolinmótt fjármagn komið að nýjum háhitasvæðum.

Á Mynd 11-1 (Þýðing: Orkustofnun (Gehring & Loksha, (2012)) má sjá myndræna framsetningu á fjármögnun jarðvarmavirkjunar. Eins og sjá má þá er það langt ferli frá forrannsóknum þar til virkjun rís, jafnvel um tveir áratugir. Svera svarta línan sýnir áhættustig fjármögnunarinnar, það er hátt í byrjun en lækkar hratt eftir því sem fleiri vinnsluholur eru boraðar og gufuafli er tryggt fyrir virkjunina (Orkustofnun, 2014).



Mynd 11-1: Fjármögnun jarðvarmavirkjunar. Þýðing: Orkustofnun (Gehring & Loksha, 2012).

12 BORUN

Að loknum forrannsóknum og kortlagningu jarðhitageymisins er fundinn ákjósanlegur staður fyrir borholu. Holan er staðsett þar sem líkur á árangri eru mestar að teknu tilliti til verndarsjónarmiða. Reynt er að takmarka risk á yfirborði með því að afmarka svokallaða borteiga, þar sem borframkvæmdir fara fram. Bortækni hefur fleygt fram og nú er algengt að nota skáborun til að bora háhitaholur. Með skáborun er hægt að bora allt að 1200–1500 metra frá borteig, og áhrifasvæði vinnslunnar nær enn lengra, jafnvel í 5 km radíus frá borteig.

13 LOSUN

Mikilvægt er að losun á affallsvökva sé með þeim hætti að komið sé í veg fyrir skaðleg áhrif á umhverfi virkjunarinnar, s.s. myndun yfirborðslóna. Þegar vökvinn er losaður niður í jörðina er talað um grunnlosun annars vegar, og hins vegar djúplosun. Grunnlosun er skilgreind sem losun á vökva niður á 200 metra dýpi hið minnsta en skilyrði er að það fari niður fyrir nýtanlegt

grunnvatn. Samkvæmt auðlindalögum er grunnvatn skilgreint sem: „vatn sem er neðan jarðar í samfelldu lagi, kyrrstætt eða rennandi, og fyllir að jafnaði allt samtengt holrúm í viðkomandi jarðlagi og sem unnið er í öðrum tilgangi en að flytja varma til yfirborðs jarðar eða nýta staðarorku þess“. Djúplosun er skilgreind sem losun á vökva í jarðhitakerfi til þess að viðhalda vatnsbúskap þess. Fyrir orkukosti Orkustofnunar á háhitasvæðum er losun vökva á yfirborði háð niðurstöðum umhverfismats framkvæmda, og má gera ráð fyrir að hún yrði yfirleitt ekki heimil ef hún hefði skaðleg áhrif á grunnvatn, nema vegna annarrar leyfðrar atvinnustarfsemi en raforkuvinnslu svo sem heilsuþaða, vegna prófana á holum í skamman tíma eða í kjölfar stórfelldra bilana, og er þá talað um neyðarlosun. Neyðarlosun vökva á yfirborði er tilkynningaskyld til Orkustofnunar, með skýringu og viðbragðsáætlun og skal ekki vara lengur en í þrjú mánuði. Að öllu jöfnu er allur vökvi losaður grunnt, en krafa er um prófanir á djúplosun frá upphafi virkjanareksturs. Öll myndun lóna á yfirborði er óheimil ef ekki er um aðra atvinnustarfsemi að ræða eða skipulag heimili slíkt sérstaklega. Gerð er krafa um rannsóknir á áhrifum djúplosunar frá upphafi reksturs þannig að hægt sé að bregða á það ráð ef þrýstingslækkun og gufuryrnun er það mikil að langtímanýtingu auðlindar sé stefnt í voða. Þá gerir Orkustofnun þá kröfu að arðsemislíkörn virkjunarinnar geri ráð fyrir borun djúplosunarholna, rannsókna á áhrifum djúplosunar, borun uppbotarholna m.v. 3% gufuryrnun og að upplýsingar um auðlindina og áhrif vinnslunnar séu gerð opinber fyrir síðasta almanaksár með vísan til Árórsarsamningsins og laga um stjórn vatnamála.

Í sumum tilvikum er gripið til djúplosunar eftir að rekstur virkjunar hefur staðið í nokkurn tíma m.a. vegna þrýstingslækkunar, í öðrum tilfellum hefur djúplosun verið stunduð allt frá upphafi, og í sumum tilfellum er grunn- eða djúplosun ekki stunduð og vökvanum fargað á yfirborði eða beint til sjávar. Ljóst þykir að djúplosun viðheldur góðum vatnsbúskap í jarðhitageyminum. Hins vegar getur losun vökva einnig haft kælandi áhrif á jarðhitageyminn, en reynt er að koma í veg fyrir að það gerist með því að rannsaka flæði jarðhitavökva í kerfinu, t.d. með ferilefnaprófunum, og staðsetja losunarholur í samræmi við þær niðurstöður. Því gerir Orkustofnun þá kröfu að samhliða upphafi rekstrar séu gerðar ferilefnaprófanir á áhrifum djúplosunar jafnvel þó ekki standi til að djúplosa ef þrýstingsviðbrögð ganga eftir. Í sumum tilfellum getur losun einnig valdið jarðskjálftum, yfirleitt eru þeir smáir en dæmi eru um að vökvaþrýstingur hafi ollið stærri skjálftum. Engin dæmi eru um jarðskjálfta af völdum losunar utan virkra jarðskjálftasvæða. Orkustofnun hefur samið verklagsreglur um undirbúning og framkvæmdir djúplosunar sem skal fylgja en verklagsreglurnar eru nú í umsagnarferli.

14 GUFUVEITA

Helstu hlutar jarðvarmavirkjana eru gufuveita, rafstöð og rafbúnaður. Byggingartími jarðvarmavirkjana er tvö til þrjú ár. Rannsóknartíminn til undirbúnings jarðvarmavirkjana er mjög langur og getur spannað einn til tvo áratugi. Þess vegna er mikilvægt að ekki sé lagt í kostnað við slíkar rannsóknir nema vilji sé til þess að nýta virkjunarkostina, sem aftur leiðir til þess að ákvörðun um að setja jarðhitasvæði í nýtingarflokk verður að byggja á almennum upplýsingum án nákvæmrar staðsetningar á mannvirkjum. Slík ákvörðun jafngildir hins vegar á engan hátt lokaákvörðun um nýtingu viðkomandi svæðis.

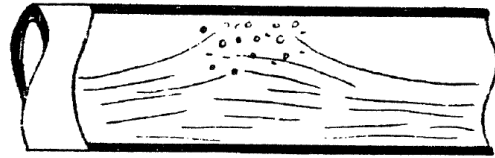
Þau mannvirki sem mynda gufuveituhluta jarðvarmavirkjana eru safnæðar, gufuskiljur, stjórnlokar, aðveita, frárennslis- og niðurrennslisveita. Gufuveitan tekur við vökvanum sem kemur upp úr jarðhitasvæðinu frá borholunum og skilar jarðgufunni af fullnægjandi gæðum áleiðis til stöðvarhúss til raforkuframléiðslu. Einnig heldur gufuveitan þrýstingi á jarðhitakerfinu stöðugum með því að blása umfram gufu út úr því. Að auki veitir gufuveitan skiljuvatni í niðurrennslislokar.

Safnæðar liggja frá borholunum, sem eru boraðar á borteigum að skiljustöð, þær eru síðan sameinaðar í stofnlagnir sem liggja að skiljustöð. Safnæðar og stofnlagnir eru gerðar úr stálörum. Í safnæðum getur verið um tvífasaflæði að ræða, þ.e.a.s. blöndu af vatni og gufu. Rennslis

tvífasavökva er margvíslegt eftir aðstæðum eins og sjá má á Mynd 14-1 (Þorbjörn Karlsson, 1979) og því þarf hönnun pípulagnarinnar að taka mið af því og þola það álag sem varma- og kraftspennur á lögnina geta valdið vegna mismunandi rennslis og eðlisástands. Til þess að draga úr líkindum á tapparennslis sem er hvað hættulegast vegna þess høggs sem getur komið á lögnina eru lagnirnar láttnar halla niður á við.



a. Bólurennslis



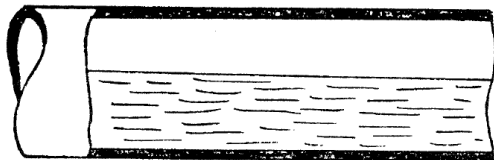
e. Höggrennslis



b. Tapparennslis



f. Kápurennslis



c. Lagskipt rennslis



g. Úðarennslis



d. Öldurennslis

Rennslis-
stefna →

Mynd 14-1: Rennslismyndir í láréttnu tvífasa rennslis (Þorbjörn Karlsson, 1979).



Mynd 14-2: Skiljustöð Kröfluvirkjunar og stofnæðar.

Í skiljustöð (sjá Mynd 14-2 (LV-2012-076)) sem gjarnan er stálgrindarhús er að finna skiljubúnað, mæla, stjórnúnað og skynjara. Þar er einnig rými fyrir stjórnúnað. Rýmið fyrir stjórnúnaðinn er þétt og loftið er hreinsað af brennisteinsvetni. Í skiljunni er mismunur á eðlisþyngd nýttur til að aðskilja gufu og vatn¹.

Röralögn sem liggur frá skiljustöð að rafstöð er kölluð aðveita, gufunni er veitt að rafstöðinni (sjá Mynd 15-1 (LV-2012-076)) um aðveituna. Aðveituæðarnar enda í rakaskiljum við stöðvar og frá rakaskiljunum liggja gufulagnir að hverflum. Frárennslisveita frá jarðvarmavirkjun er aðallega fólgin í skiljuvatni frá skiljustöð, þéttivatni frá virkjuninni og útskolun frá kæliturni. Vel er hægt að nýta frárennslis frá jarðvarmavirkjunum til hitaveitu (sjá Mynd 15-2 (LV-2012-076)).

Við rekstur jarðvarmavirkjana er auk þess þörf á köldu vatni fyrir neyslu og kælivatnskerfi. Í eimsvala er gufa sem streymir frá hverfli þétt með kælivatni sem streymir frá kæliturni. Eimsvalinn er varmaskiptir þar sem gufan streymir utan um rör með kælivatni. Útblástur óþéttanlegra lofttegunda þarf að dæla út jafnóðum. Útblásturinn er leiddur upp í kæliturninn, þar sem hann blandast loftblæstri upp úr kæliturninum og dreifist. Stöðvarhús jarðvarmavirkjana eru misjöfn að stærð og lögun. Yfirleitt er miðað við að hafa þau sem hagkvæmust en einnig er reynt að raska umhverfinu sem minnst. Við Þeistareykjavirkjun sem dæmi stendur til að hafa mön fyrir stöðvarhúsi til að draga úr sjónrænum áhrifum. Mönin er þakin með þeirri jarðþekju sem tekin var af fyrir grunn stöðvarhússins.



Mynd 14-3: Stöðvarhús Kröfluvirkjunar.

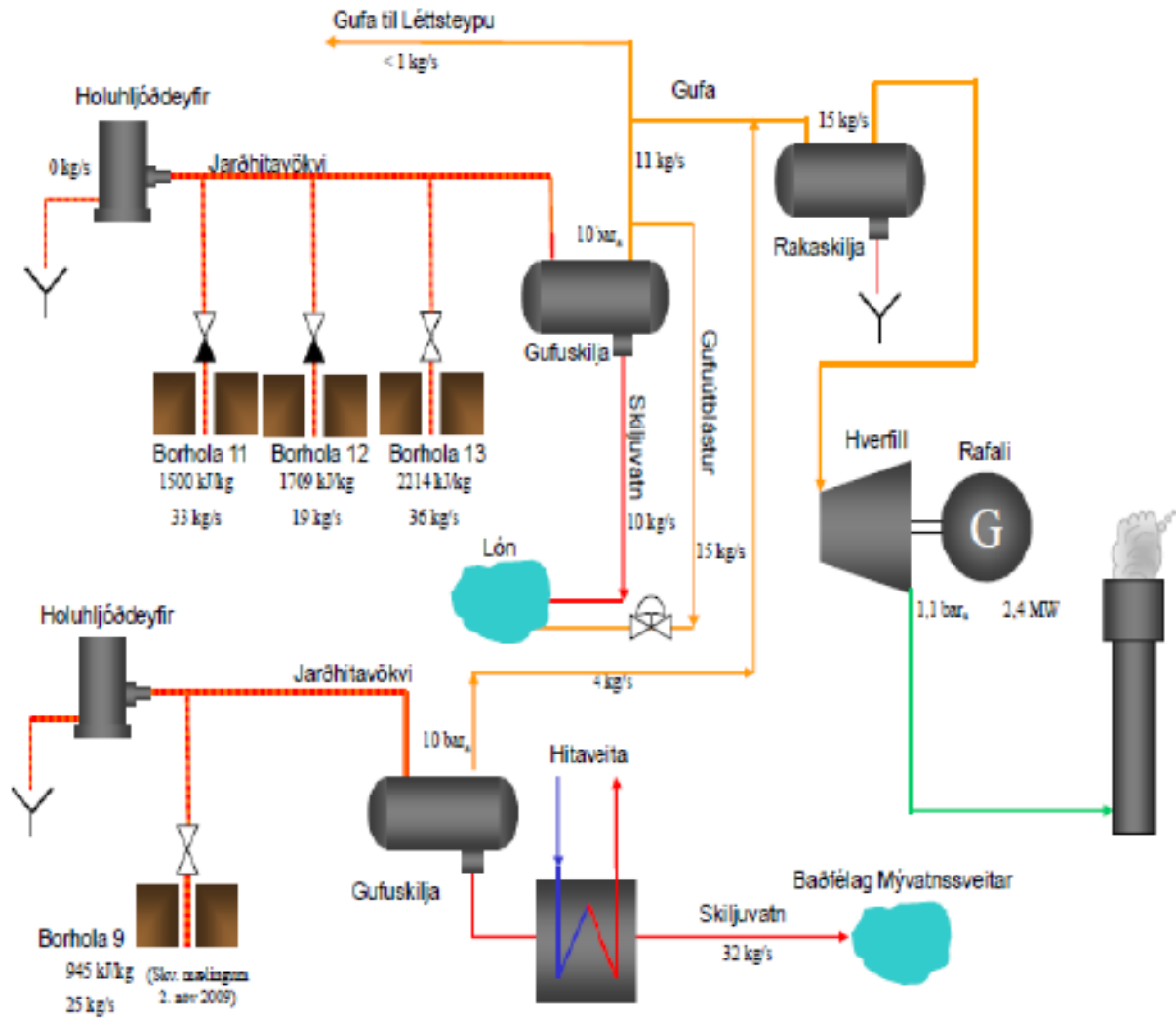
15 RAFSTÖÐ

Mikilvægustu hlutir jarðvarmavirkjana sem tilheyra rafstöðinni eru hverfill, eimsvali, kæliturn og kælikerfi. Hverflar jarðvarmavirkjana (sjá Mynd 15-1 (LV-2012-076)) eru sömu gerðar og hefðbundnir gufuhverflar. Þeir eru beintengdir rafala og er snúningshraðinn oft nálægt 3000 snúningum á mínútu. Hverflar geta haft fleiri en eitt inntak á mismunandi þrýstingi frá há- og lágþrýstri skiljustöð til að nýta frumorku vökvans betur. Hverfillinn er þyngsta einingin, 30 MW_e hverfill vegur um 80 tonn en 45 MW_e hverfill vegur 100 til 120 tonn. Vegna þyngdarinnar þarf leyfi Vegagerðarinnar til að flytja hverfileiningarnar. Rafali er tengdur beint við öxul hverfilsins.



Mynd 15-1: Tveir 30 MWe hverflar Kröfluvirkjunar.

Spennar jarðvarmavirkjana standa gjarnan fyrir utan stöðvarhúsið og hafa þeir það hlutverk að hækka spennuna áður en raforkan fer inn á flutningskerfið. Innan jarðvarmastöðvarinnar eru fernskonar rafkerfi, háspennukerfið, millispennukerfi, lágspennukerfi og jafnstraumskerfi. Til þess að hægt sé að gangsetja jarðvarmavirkjanir án þess að spennu frá landskerfinu njóti við, verða vararafstöðvar (díselstöðvar) að vera til staðar.



Mynd 15-2: Fyrirhuguð jarðvarmavirkjun í Bjarnarflagi.

Dæmigerður borholuteigur lítur út eins og Mynd 15-3



Mynd 15-3: Borholuteigur á Hellisheiði (Vísindavefur, 2014).

16 MUNURINN Á VIRKJUN LÁGHITA OG HÁHITA

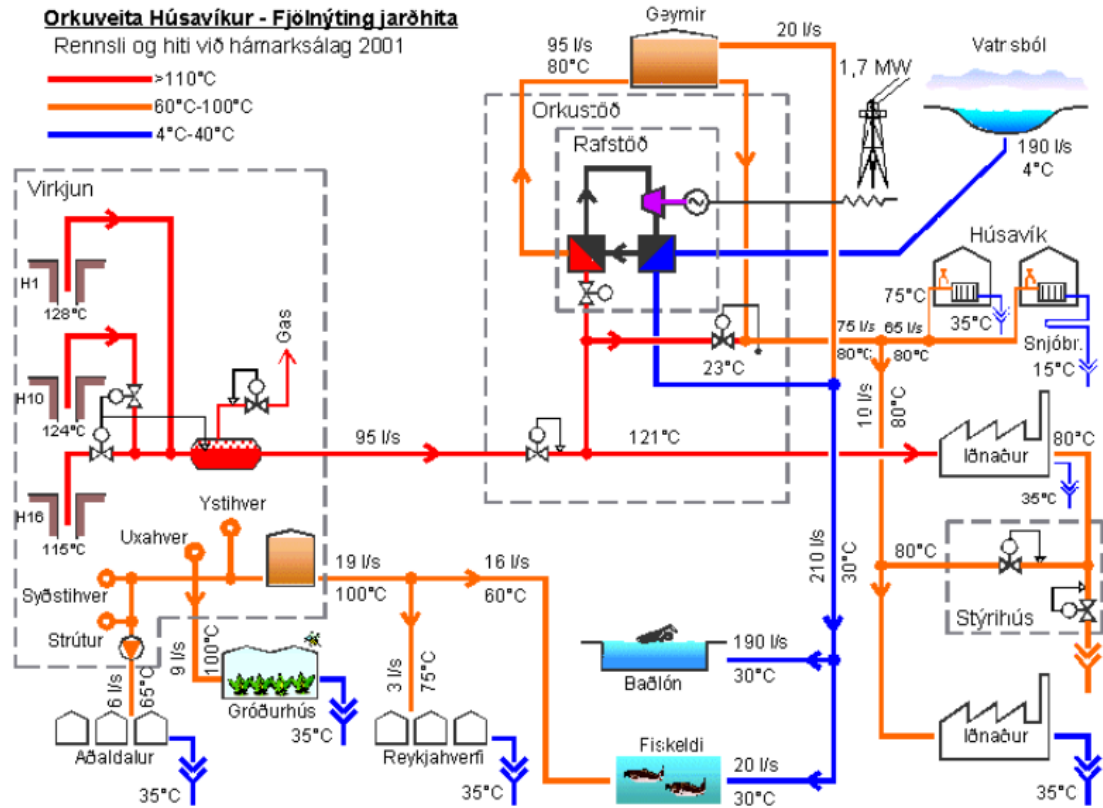
Einnig er hægt að framleiða rafmagn á lághitasvæðum, en það fer fram á annan hátt en á háhitasvæðum. Lághitasvæði eru almennt mun algengari í heiminum heldur en háhitasvæði, nýting jarðvarma beinist því sífellt meira að nýtingu á lægra hitastigi. Tvívökva jarðvarmavirkjanir í heiminum eru orðnar yfir 230 með uppsett afl 1200 MW og er meðal virkjunin u.þ.b. 5 MW (Turboden, 2012). Nýting lághitasvæða til raforkuframleiðslu er umtalsvert kostnaðarsamari heldur en nýting háhitasvæða og því fer best á því að nýtingin eigi sér stað samhliða nýtingu á varmaorkunni til annarra nota eins og fyrir gróðurhús, eldi í vatni eða aðra sambærilega nýtingu.

Háhitavirkjanir, eins og t.d. Hellisheiðarvirkjun nýta tvífasa vökva, sem er blanda af gufu og vatni, úr borholum, sem er svo safnað í skiljustöð þar sem fasarnir tveir eru aðskildir við lágan þrýsting til að auka gufuhlutfallið. Gufan knýr túrbínur og vatnið er nýtt í varmastöð til upphitunar á köldu vatni. Þegar hitastig jarðhitavökvans er svo hátt er hagnýtast að nota gufukerfi (t.d. „flash“ kerfi) til að framleiða rafmagn en einnig er hægt að nota tvívökvakerfi (e. *binary cycle*) þegar hitastig vökvans er lægra og er það m.a. gert í Svartsengi og á Húsavík. Munurinn á gufukerfum og tvívökvakerfum er helst sá að í gufukerfinu er jarðhitavökvinn nýttur beint í virkjuninni, en í tvívökvakerfum er jarðhitavökvinn notaður til að hita upp annan vökva sem er svo notaður í virkjuninni.

Dæmi um tvívökvavél má finna í Svartsengi en virkjunin notar ORC tvívökvavélar til að framleiða 8,4 MW_e (Verkís, 2014). ORC vélar geta framleitt rafmagn með 90-180°C heitum jarðhitavökva. Þetta kerfi er víða nýtt erlendis til að framleiða rafmagn.

Annað dæmi er Orkuveita Húsavíkur (sjá Mynd 15-1) sem notaði Kalina kerfi til að framleiða 1,7 MW_e og 20 MW_{th}, en þá er jarðhitavökvinn notaður til að hita upp annan vökva (yfirleitt blöndu af vatni og ammóníaki) sem er með lægra suðumark. Í stað yfirhitaðrar gufu þá var nýtt 120°C heitt vatn til að knýja vélina og framleiða rafmagn. Til þess að framleiða 1,7 MW_e þurfti 95 l/s flæði. Vatnið kólnaði við þetta niður í um 80°C sem hentar til afhendingar á hitaveitukerfi. Einnig var 4°C heitt grunnvatn leitt í virkjunina til kælingar á jarðhitavökvanum, sem gerði virkjuninni einnig kleift að afhenda vatn af ýmsum hitastigum, allt frá 4°C til 120°C (Orkuveita Húsavíkur, 2014).

Að lokum má nefna dæmi um virkjun í Alaska þar sem 400 kW_e eru framleidd með vökva sem er um 75°C, en það er svipað framrásarhitastigi margra hitaveitna á Íslandi (Holdmann, 2014).



Mynd 15-1: Framleiðslukerfi Orkuveitu Húsavíkur.

17 EIGINLEIKAR JARÐVARMVIRKJANA

Eiginleikar jarðvarmavirkjana eru ólíkir eiginleikum vatnsaflsvirkjana, ekki er jafn auðvelt að stýra streymi inn á hverflana eins og hjá vatnsaflsvirkjun, þar sem borholurnar þola ekki viðvarandi sveiflur í mótþrýstingi og gufustreymi. Jöfn og þétt framleiðsla jarðvarmavirkjana er hins vegar vel til þess fallin að mæta grunnálagi og þörfum fyrirtækja eins og stóriðju sem kallar eftir stöðugri raforkuframleiðslu allan sólarhringinn allan ársins hring.

18 DÆMI UM JARÐVARMVIRKJANIR

Umfang jarðvarmavirkjana er afar misjafnt en ef horft er til eldri (sjá Mynd 18.2-1) framkvæmda af mismunandi stærðargráðu má að nokkru leyti gera sér grein fyrir því út frá uppsettu afli um hversu umfangsmikil mannvirki er að ræða.

Til þess að hægt sé að glöggva sig á því eru meðfylgjandi nokkur dæmi um mismunandi jarðvarmavirkjanir.

18.1 BJARNARFLAG



Mynd 18.2-1: Núverandi jarðgufustöð í Bjarnarflagi (Landsvirkjun, 2014).

Uppsett afl Jarðgufustöðvarinnar í Bjarnarflagi sem er minnsta aflstöðin í eigu Landsvirkjunar er 3 MW og nýtir hún gufu jarðhitasvæðisins við Námafjall. Orkuvinnslugeta virkjunarinnar er 18 GWh á ári og var hún gangsett árið 1969.

18.2 KRÖFLUSTÖÐ



Mynd 18.2-1: Kröflustöð (Landsvirkjun, 2014).

Við Kröflustöð (sjá Mynd 18.2-) eru 18 vinnsluholur sem knýja tvo 30 MW hverfla, þannig að uppsett afl er 60 MW og árleg orkuvinnslugeta er 500 GWh á ári. Gangsetning virkjunar var árið 1977 (Landsvirkjun 2014).

18.3 REYKJANESVIRKJUN



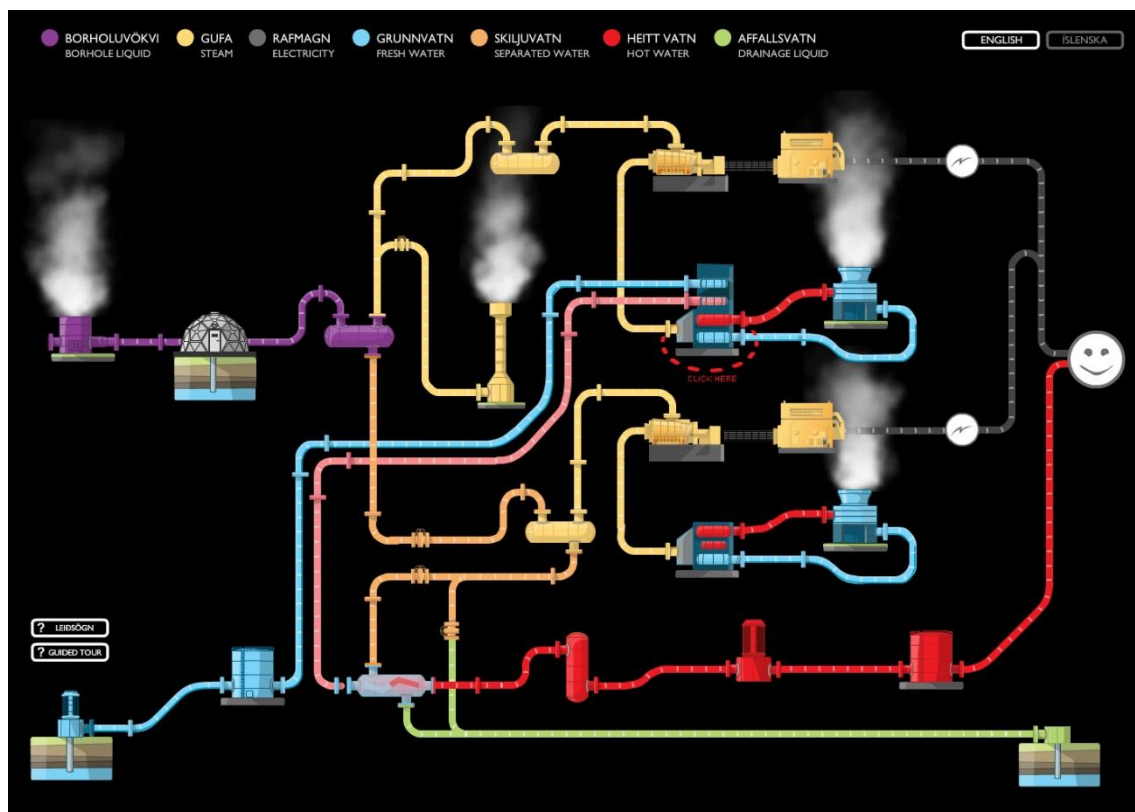
Mynd 18.2-1: Reykjanesvirkjun (HS Orka, 2014).

Uppsett afl í Reykjanesvirkjun (sjá Mynd 18.2-) er 100 MW sem unnin eru með tveimur 50 MW hverflum. Orkuvinnslugeta virkjunarinnar er 860 GWh á ári en virkjunin var gagnsett árið 2006. (HS Orka hr., 2014)

18.4 HELLISHEIÐARVIRKJUN



Mynd 18.2-1: Hellisheiðarvirkjun.



Mynd 18.2-2: Vinnslurás Hellisheiðarvirkjunar (Orka náttúrunnar, 2014).

Uppsett afl hellisheiðarvirkjunar (sjá Mynd 18.2-) er 303 MW í rafmagni og 133 MW í varmaafli, orkuvinnslugeta virkjunarinnar er 2500 GWh á ári og virkjunin var gangsett árið 2008. Mynd 18.2- sýnir vinnslurás virkjunarinnar (Orka náttúrunnar, 2014).

19 FORSENDUR UMFJÖLLUNAR Í 3. ÁFANGA RAMMAÁÆTLUNAR

Umfang jarðvarmavirkjana er afar misjafnt og á áætlanastigi eru ekki til staðar forsendur til þess að staðsetja borholur eða önnur mannvirki, en umfang mannvirkjana er í samræmi og samhengi við uppsett rafafli. Síðan er hægt að setja sér markmið um að fella mannvirkin sem best að umhverfi á svæðinu með staðarvali og útlitshönnun. Með því að nýta skáborunartækni er enn fremur hægt að staðsetja borholur og önnur mannvirki þannig að röskun á umhverfi sé sem minnst. Til þess að hægt sé að fjalla um jarðvarmavirkjanir sem valkost í rammaáætlun verða upplýsingar um uppsett afl, áætlaða nýtingu og orkugetu að liggja fyrir. Einnig verður að sýna á korti nýtingarsvæði virkjunar auk korts sem sýnir umfang jarðhitageymisins, samkvæmt forrannsóknnum, t.d. viðnámsmælingum. Gerð var krafa um að fyllt væri út í neðangreinda töflu:

Helstu kennistærðir	Eining
Uppsett rafafli	MW _e
Uppsett varmaafli	MW _{th}
Raforka	GWh/ári
Nýtingartími	klst./ári
Flatarmál lágviðnámskápu	km ²
Flatarmál háviðnámskjarna	km ²
Flatarmál nýtingarsvæðis	km ²
Kostnaðarflokkur	

Tafla 19-1: Helstu kennistærðir.

Nýtingartími jarðvarmavirkjana sem eru reknar í dag er um 90%, eða 7900 klst., og mun Orkustofnun nota það sem viðmið fyrir meðalnýtingartíma á líftíma virkjunar fyrir virkjanakosti.

Þar sem ekki er hægt að staðsetja borholur, pípulagnir og mannvirki fyrir jarðvarmavirkjanir fyrr en rannsóknnum á svæðinu er lokið er ekki hægt að gera grein fyrir staðsetningu og stærð helstu mannvirkja jarðvarmavirkjana á stigi umhverfismats áætlana. Staðsetning á borholuteigum, pípulögnum og stöðvarhúsi er ákveðin á hönnunarstigi að loknum framkvæmdum. Öll mannvirki verða felld eins vel að umhverfi sínu eins og nokkur kostur er, þó þannig að framkvæmdin verði arðbær. Þar sem ekki er hægt að ákvarða framkvæmdasvæðið þá er skilgreint nýtingarsvæði, en framkvæmda- og iðnaðarsvæði verður innan þess.

Staðsetning vega er útfærð í samvinnu við þau yfirvöld sem fara með umsjón þess málafllokks, ef til virkjunar kemur og sama gildir um efnistökuastaði og tippa. Ef fram hafa farið einhverjar rannsóknir á svæðunum, sem heimilar eru án þess að búið sé að setja virkjunarkostinn í nýtingarflokk er þeirra getið og einnig hugsanlegra leyfa sem eru fyrirbyggjandi.

Ekki er hægt að fjalla nákvæmlega um áhrif virkjunar á hljóðvist á stigi umhverfismats áætlana en þó er hægt að segja að gildandi lögum og reglugerðum verður fylgt. Sama gildir um brennisteinsmengun frá jarðvarmavirkjunum og að tryggja verður í hönnun virkjunarinnar að hljóðmengun standist lög og reglugerðir.

Miða verður við að hönnun jarðvarmavirkjana verði með þeim hætti að ná megi markmiðum um sjálfbæra vinnslu og er í því skyni skynsamlegt að byggja jarðvarmavirkjanir upp í aföngum og fylgjast með áhrifum þeirra á geyminn sem unnið er úr. Útfærslur á niðurdælingu og losun affallsvatns er ekki unnt að vinna fyrr en rannsóknnum er lokið og hönnun virkjunar er komin vel á veg, en gerð er krafa um

að rannsóknir á áhrifum djúplosunar séu gerðar frá upphafi, auk þess sem möguleg myndun yfirborðslóns er algjörlega háð niðurstöðum af umhverfismati framkvæmda. Öflun og förgun kælivatns er hluti af útfærslu á síðari stigum, ef virkjanakostinum er skipað í nýtingarflokk rammaáætlunar.

Á áætlanastigi liggur ekki fyrir hvort niðurdæling verður framkvæmd eða hvernig losun affallsvatns verður háttáð. Við endanlega hönnun virkjunar verður ákveðið hvernig öflun og förgun kælivatns verður háttáð en á áætlanastigi er ekki hægt að segja neitt meira um það en að öllum fyrirbyggjandi lögum og reglugerðum verður fylgt. Varðandi markmið um losun brennisteinsvetnis og staðbundinn hámarksstyrk þess í andrúmslofti er ljóst að öllum fyrirbyggjandi lögum og reglugerðum á hverjum tíma verður fylgt.

Efnistökuáætlingar og típpar eru ákvarðaðar á síðari stigum hönnunar í kjölfar umhverfismats framkvæmda og mögulega er verktökum ætlað að leysa þessi verkefni í samræmi við kröfur sem settar eru fram í útboðsgögnum þegar endanlegri hönnun er lokið.

Tengingar við flutningskerfi Landsnets eru á forræði Landsnets, sem gerir í sérstakri skýrslu grein fyrir því hvernig þessum tengingum kann að verða háttáð fyrir virkjunarkosti rammaáætlunar.

20 HEIMILDIR

- Axel Björnsson. (2005). Development of thought on the nature of geothermal fields in Iceland from Medieval times to the present. *World Geothermal Congress*. Antalya, Turkey, 24-29 April 2005.
- Axel Björnsson, Guðni Axelsson og Ólafur G. Flóvenz. (1990). Uppruni hvera og lauga á Íslandi. *Náttúrufræðingurinn*, 60, 15-38.
- Axel Björnsson, Hjálmar Eysteinnsson og Martin Beblo. (2005). Crustal formation and magma genesis beneath Iceland: Magnetotelluric constraints. *Geological Society of America, Special Paper*, 388, 665-686.
- Björn Már Sveinbjörnsson. (2014). *Success of High Temperature Wells in Iceland - skýrsla í vinnslu fyrir Orkustofnun*. ÍSOR.
- Bunsen, R. (1847). Über den inneren Zusammenhang der pseudovulkanischen Erscheinungen Islands. *Wöhler und Liebigs Annalen der Chemie und Pharmacie*, 62, 1-59.
- Gehring, M., & Loksha, V. (2012). *Geothermal Handbook: Planning and Financing Power Generation*. World Bank - ESMAP.
- Grímur Björnsson. (2007). *Endurskoðað hugmyndalíkan af jarðhitakerfum í Hengli og einfalt mat á vinnslugetu nýrra borsvæða*. Orkuveita Reykjavíkur.
- Guðmundur Pálmason. (2005). *Jarðhitabók - Eðli og nýting auðlindar*. Reykjavík: Hið íslenska bókmenntafélag.
- Guðmundur Pálmason og Kristján Sæmundsson. (1979). Summary of Conductive Heat Flow in Iceland. Í V. Cermak, & L. Rybach, *Terrestrial heat Flow in Europe* (bls. 218-220). Springer Verlag.
- Guðmundur Pálmason, Gunnar V. Johnsen, Helgi Torfason, Kristján Sæmundsson, Karl ragnars, Guðmundur I. Haraldsson og Gísli K. Halldórsson. (1985). *Mat á jarðvarma Íslands*. Orkustofnun (OS-85076/JHD-10).
- Gunnar Böðvarsson. (1950). Geofysiske metoder ved varmtvandsprospektering i Island. *Tímarit V.F.Í.*, 35, 48-59.
- Gunnar Böðvarsson. (1982a). Terrestrial energy currents and transfer in Iceland. *Continental and oceanic rifts, Geodynamic Series. 8. Am. Geophys. Union*, 271-282.
- Gunnar Böðvarsson. (1983). Temperature/flow statistics and thermomechanics of low-temperature geothermal systems in Iceland. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 19, 255-280.
- Holdmann, G. (10. Nóvember 2014). The Chena Hot Springs 400 kW Geothermal Power Plant: A Geothermal Case Study for Alaska. *Renewable Energy and Energy Efficiency for Tribal Community*.
- HS Orka hf. (6. Október 2014). *Reykjanesvirkjun*. Sótt frá HS Orka hf: <http://www.hsorka.is/HSProduction/HSProductionReykjanesvirkjun.aspx>
- Jónas Ketilsson, Axel Björnsson, Árný Erla Sveinbjörnsdóttir, Bjarni Pálsson, Grímur Björnsson, Guðni Axelsson og Kristján Sæmundsson. (2010). *Eðli jarðhitans og sjálfbær nýting hans. Álitsgerð faghóps um sjálfbæra nýtingu jarðhita (OS-2010/05)*. Orkustofnun. Sótt frá <http://www.os.is/gogn/Skyrslur/OS-2010/OS-2010-05.pdf>
- Jónas Ketilsson, Héðinn Björnsson, Sæunn Halldórsdóttir og Guðni Axelsson. (2009). *Mat á vinnslugetu háhitasvæða*. Orkustofnun OS-2009/09.
- Kristján Sæmundsson og Haukur Jóhannesson. (2003). *Jarðhitakort af Íslandi*. Orkustofnun.
- Landsvirkjun. (2012). *Jarðvarmi - Kynningarrit*. Landsvirkjun LV-2012-076.
- Landsvirkjun. (6. Október 2014). *Kröflustöð*. Sótt frá Landsvirkjun: <http://www.landsvirkjun.is/Fyrirtaekid/Aflstodvar/kroflustod>
- Lowrie, W. (2006). *Fundamentals of Geophysics*. Cambridge: Cambridge University press.
- Orka náttúrunnar. (6. Október 2014). *Hellisheiðarvirkjun*. Sótt frá Orka Náttúrunnar: <http://www.on.is/virkjanir>
- Orka náttúrunnar. (6. Október 2014). *Vinnslurás Hellisheiðarvirkjunar*. Sótt frá Orka náttúrunnar: <https://www.or.is/vinnsluras/>
- Orkustofnun. (2014). *Geothermal Development in Iceland - Lessons for the Andes region - Óbirt skýrsla unnin fyrir IRENA*. Orkustofnun.
- Orkuveita Húsavíkur. (6. Október 2014). *Framleiðsla*. Sótt frá Orkuveita Húsavíkur: <http://www.oh.is/page/framleidsla>

- Ólafur Flóvenz og Kristján Sæmundsson. (1993). Heat flow and geothermal processes in Iceland. *Tectonophysics*, 225, 123-128.
- Stefán Arnórsson. (1995). Geothermal systems in Iceland: Structure and conceptual models - II. Low-temperature areas. *Geothermics*, 24, 603-629.
- Stefán Arnórsson. (1995a). Geothermal systems in Iceland: Structure and conceptual models - I. High-temperature Areas. *Geothermics*, 24, 561-602.
- Stefán Arnórsson, Guðni Axelsson og Kristján Sæmundsson. (2008). Geothermal systems in Iceland. *Jökull*, 58, 211-228.
- Trausti Einarsson. (1937). Über eine Beziehung zwischen Heissen Quellen und Gängen in der isländischen Basaltformation. *Vísindafélag Íslendinga, Greinar* 2, 134-145.
- Trausti Einarsson. (1938). Nokkur almenn orð um jarðhita. *Tímarit V.F.Í.*, 23, 57-60.
- Trausti Einarsson. (1942). über das Wesen der heissen Quellen Islands min einer Übersicht über die Tektonik des mittleren Nord-Islands. *Vísindafélag Íslendinga*, 26.
- Trausti Einarsson. (1950). *Um orsakir jarðhitans. Skýrsla um rannsóknir á jarðhita í Hengli, Hveragerði og nágrenni árin 1947-1949, Fyrri hluti. Jarðborunardeild raforkumálastjórnar ríkisins.*
- Trausti Einarsson. (1966). Um orsakir jarðhitans. *Tímarit V.F.Í.*, 51, 23-32.
- Turboden. (8. Mars 2012). Exploitation of geothermal sources with the ORC technology: Case Study from the EU: the Sauerlach plant. *Workshop on EU-Iceland-Japan Cooperation in Geothermal issues.*
- Verkís. (10. Nóvember 2014). *POWER PLANT OV4 – Svartsengi, Iceland.* Sótt frá Verkís: <http://www.verkis.is/media/orka/KY0613-svartsengi-OV4-en.pdf>
- Þorbjörn Karlsson. (1979). *Nokkur atriði um tvífasa rennsli vatns og gufu.* Háskóli Íslands, Verkfræði- og raunvísindadeild.