

Auðlindir & afurðir
Resources & Products

Öryggi, umhverfi & erfðir
Food Safety, Environment
& Genetics

Viðskiptaþróun
Business Development

Líftækni & lífefni
Biotechnology & Biomolecules

Mælingar & miðlun
Analysis & Consulting



Rannsóknir á hitakærum örverum á háhitasvæðum á Reykjanesi, Hengilssvæði og Fremrinámum

Edda Olgudóttir
Sólveig K. Pétursdóttir

Líftækni og lífefni

Skýrsla Matís 06-16
Maí 2016

ISSN 1670-7192

Titill / Title	Rannsóknir á hitakærum örverum á háhitasvæðum á Reykjanesi, Hengilssvæði og Fremrinámum. Unnið fyrir Faghóp 1 í Rammaáætlun 3. / Thermophilic microorganisms from geothermal areas at Reykjanes, Hengill and Fremrinámar.		
Höfundar / Authors	Edda Olgudóttir og Sólveig K. Pétursdóttir		
Skýrsla / Report no.	06-16	Útgáfudagur / Date:	30. maí 2016
Verknr. / Project no.	40052378		
Styrktaraðilar /Funding:	Rammaáætlun 3 (RÁ3)		
Ágríp á íslensku:	<p>Yfirstandandi rannsókn var unnin á vegum Rammaáætlunar 3 og tók til háhitasvæða sem höfnuðu í biðflokki í RÁ2. Svæðin voru Trölladyngja og Austurengjahver á Reykjanesi, Fremrinámar og Þverárdalur og Innstidalur á Hengilssvæði. Markmið rannsóknarinnar var að meta fjölbreytileika og fágæti hitakærra örvera á ofangreindum svæðum. Aðferðafræðin byggðist á DNA greiningum óháð ræktun. DNA var einangrað úr sýnum og tegundagreiningandi gen mögnuð upp og raðgreind og raðirnar bornar saman við raðir í genabönkum og úr fyrri rannsóknum.</p> <p>Alls var 118 sýnum safnað 2015 og tókst að raðgreina u.þ.b. 59% þeirra. Alls fengust um 10 milljónir 16S genaáða úr raðgreiningum sem lækkaði niður í tæplega sex milljónir eftir að öllum skilyrðum um gæði og lengd hafði verið fullnægt. Flestar raðir fengust úr Innstidal, eða 2.176.174, en færstar 286.039 úr Trölladyngju.</p> <p>Fjölbreytileiki örvera á hverju svæði var metinn út frá samanburði á fjölda fylkinga, fjölda tegunda, söfnunarkúrfum og fjölbreytileikastuðli Shannons. Heildarfjöldi sýna og raða af hverju svæði var afar mismunandi og endurspeglar fjölbreytileika þess. Þegar raðirnar voru flokkaðar til tegunda við 97% samsvörun kom í ljós að flestar tegundir komu úr Þverárdal, eða um 42 þúsund, en færstar úr Trölladyngju, eða um 9 þúsund. Rúmlega 12 þúsund tegundir fundust í sýnum úr Fremrinámum, sem kom á óvart þar sem svæðið og sýnin virtust einsleit og ekki búist við slíkum fjölbreytileika. Allar helstu hverabakteríur fundust í sýnunum, bæði Fornbakteríur og Bakteríur. Sérstakir hópar fundust sérstaklega innan <i>Thaumarchaeota</i> fylkingarinnar. Mat á fjölbreytileika á einstökum svæðum með söfnunarkúrfum og fjölbreytileikastuðli miðaðist við minnstan fjölda raða eða 286.039 úr Trölladyngju. Mestur tegundafjölbreytileiki var í Þverárdal og Innstidal og minnstur við Trölladyngju og Austurengjahver, en Fremrinámar voru mitt á milli. Söfnunarkúrfur gáfu sömu niðurstöðu. Líffræðilegur fjölbreytileiki (H) gaf aðra röðun. Þar voru Þverárdalur og Fremrinámar með mestan fjölbreytileika (H= 8 og 7,7), þá Innstidalur en Trölladyngja og Austurengjahver (H=6) ráku lestina.</p> <p>Fágæti var metið út frá fjölda og hlutfalli óþekktra tegunda með samanburði við Silva gagnagrunninn. Fjöldi óþekktra tegunda var mestur í Þverárdal og Innstidal, báðir með rúmlega 1000, Fremrinámar með 756 og Trölladyngja og Austurengjahver með á fjórða hundrað óþekktar tegundir. Fágæti á landsvísu var metið með samanburði gagna af einstökum svæðum við fyrri rannsóknir og athugað hvort samsvörun ætti sér stað. Í ljós kom að jarðhitasvæðið í Fremrinámum hefur að geyma mikinn fjölda tegunda sem eiga sér ekki samsvörun á öðrum hverasvæðum.</p>		
Lykilorð á íslensku:	<i>Hitakærar örverur; DNA raðgreiningar; Bakteríur og Fornbakteríur; fjölbreytileiki; fágæti</i>		

Report summary

<p><i>Summary in English:</i></p>	<p>The current project was requested by the Master Plan for Nature Protection and Energy Utilization and aimed at geothermal areas which had not been classified for preservation or utilization during Masterplan 2. The geothermal areas investigated were Trölladyngja and Austurengjahver at Reykjanes, Fremrinámar and Þverárdalur and Innstidalur at Hengill. The goal of the project was to estimate biodiversity and rarity of thermophiles inhabiting the areas mentioned. The methods used were DNA based and were performed on DNA extracted from primary samples (culture independent). Microbial species identification was performed by amplification and sequencing of 16S rRNA genes and comparison with sequence databases and previous research.</p> <p>A total of 118 samples were collected in 2015 of which 59% were sequenced. The total sequencing yield was 10 million reads, of which 6 million passed quality assessment and were used for downstream analyses. The largest proportion of the reads were obtained from Innstidalur samples, 2.176.174 reads, and the lowest proportion from Trölladyngja, 286.036 reads.</p> <p>The biodiversity of microorganisms within each area was estimated using the number of phyla and species, rarefaction curves and Shannons' biodiversity index. The total number of species identified varied between sites and reflected the diversity of the geothermal area and the total amount of sequences obtained. Using a cut-off value of 97% similarity, the sequences were classified to the species level. The highest number of species, approximately 42.000, were identified in samples from Þverárdalur and the lowest number, approximately 9.000, in samples from Trölladyngja. Roughly 12.000 species were found in samples from Fremrinámar, which was surprising as the area and the samples appeared rather homogenous and such diversity was therefore not expected. All the main thermophilic taxa of the Bacteria and Archaea domains were identified in the samples. Unknown groups were found especially within the phylum of <i>Thaumarchaeota</i>. For the rarefaction and biodiversity index estimates the lowest number of sequence reads, Trölladyngja, was used as reference. The species diversity was found to be highest in Þverárdalur and Innstidalur, the lowest in Trölladyngja and Austurengjahver, and intermediate in Fremrinámar. Rarefaction curves showed the same results. The calculated biodiversity index (H) gave different results, indicating highest diversity in Þverárdalur and Fremrinámar (H=8 and 7,7 respectively), intermediate in Innstidalur (H=7.0) and lowest in Trölladyngja and Austurengjahver (H=6).</p> <p>Rarity was estimated as the number of species which could not be identified by comparison to the Silva database. The highest number of unidentified species was roughly 1000 in Þverárdalur and Innstidalur, 756 in Fremrinámar and between 300-400 in Trölladyngja and Austurengjahver. The rarity was also estimated by comparing data obtained in the current project with data from previous projects. The analysis revealed a particularly high number of unique species in Fremrinámar that have not been identified in other geothermal areas in Iceland.</p>
<p><i>English keywords:</i></p>	<p><i>Thermophiles; DNA sequencing; Bacteria and Archaea; biodiversity; rarity</i></p>

Efnisyfirlit

Inngangur	1
1. Efni og aðferðir	6
1.1 Sýnataka	6
1.2 Einangrun á DNA	6
1.3 Mögnun á 16S rRNA geni.....	7
1.4 Raðgreiningar og úrvinnsla raðgreininga	7
2. Niðurstöður	8
2.1 Sýnataka	8
2.1.1 Reykjanes.....	8
2.1.2 Fremrinámar - sýnataka	20
2.1.3 Hengilssvæði.....	33
2.1.3.1 Þverárdalur - sýnataka.....	34
2.1.3.2 Innstidalur - sýnataka	47
2.4 Erfðagreiningar	55
2.4.1 Trölladyngja - erfðagreiningar	57
2.4.2 Austurengjahver - erfðagreiningar	59
2.4.3 Fremrinámar - erfðagreiningar.....	60
2.4.4 Þverárdalur - erfðagreiningar	63
2.4.5 Innstidalur - erfðagreiningar	65
2.4.6 Heildarniðurstöður erfðagreininga – fjölbreytileiki.....	68
2.4.7 Heildarniðurstöður erfðagreininga – fágæti	72
3. Samantekt.....	77
Heimildir:	82

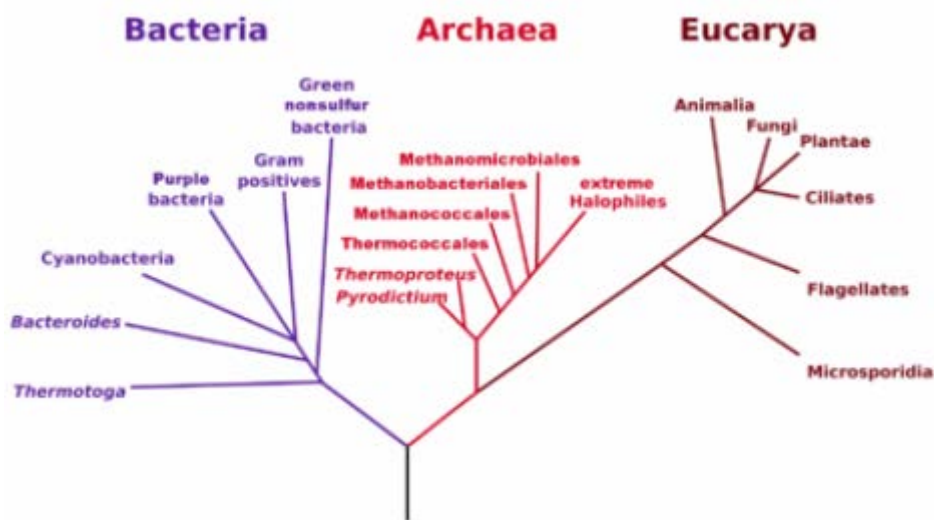
Inngangur

Markmið rannsóknarinnar er að bæta stöðu þekkingar á fjölbreytileika og fágæti hitakærra örvera á Íslandi með áherslu á lítt könnuð, eða ókönnuð svæði sem röðuðust í biðflokk í Rammaáætlun 2 (RÁ2). Þessi svæði eru Trölladyngja og Austurengjahver á Reykjanesi; Fremrinámar; og Þverárdalur og Innstidalur á Hengilssvæði. Niðurstöðurnar munu auðvelda röðun jarðhitasvæðanna m.t.t. fjölbreytileika og fágætis örveranna.

Örverulíf háhitasvæðanna er verðmætt hvort sem mælistikan er efnahagsleg eða náttúrufarsleg. Líffræðilegur fjölbreytileiki í hverum á háhitasvæðum endurspeglar almennan fjölbreytileika yfirborðsfyrirbæra, sem eru afsprengi jarðhita og geta orðið fyrir áhrifum af vinnslu hans. Vinnsla á orku á jarðhitasvæði getur haft það í för með sér að ýmis ummerki á svæðinu breytast eða hverfa. Erfitt getur verið að greina breytingar af völdum vinnslu út frá náttúrulegum breytileika, en það hefur hins vegar sýnt sig að tímabundnar breytingar hafa ekki úrslitaáhrif á tilveru örvera. Þær þola tímabundna þornun og þær flytjast innan svæðisins í takt við breytingar svo lengi sem eðlis- og efnaeiginleikar á yfirborði svæðisins breytast ekki umtalsvert.

Hitastig og sýrustig ráða miklu um það hvaða tegundir geti lifað á hverjum stað. Fleiri þættir eins og styrkur efna og efnasambanda hafa þó einnig talsverð áhrif á tegundasamsetningu í hverum. Aukin vitneskja um efni og efnasambönd í nánasta umhverfi hveraörveranna eykur líkur á að hægt verði að einangra og rækta fleiri tegundir á kerfisbundin hátt.

Í bók sinni um Uppruna tegundanna 1859 líkti Charles Darwin þróun við greinótt tré sem hann kallaði lífsins tré. Síðan þá hafa líffræðingar reynt að kortleggja lífheiminn í ýmsum útgáfum af lífsins tré. Þegar DNA raðgreiningar komu til sögunnar á seinni hluta síðustu aldar olli það straumhvörfum, þar sem nú reyndist unnt að greina skyldleika tegunda út frá DNA röðum í genum þeirra (Olsen og Woese 1993). Við upphaf níunda áratugarins birtu Carl Woese og félagar fyrsta tréð sem byggðist á 16S rRNA genaröðum (Woese o.fl. 1990). Tréð sýndi þrjár megingreinar eða ríki: Bakteríur, Fornbakteríur og Heilkjörnunga (mynd 1). Nýjungin fólst í því að ríkin voru nú aðeins þrjú í stað fimm áður og einnig að eitt þeirra, Fornbakteríur, var “nýtt” ríki sem innihélt áður óþekktar örverur úr jaðarumhverfi eins og hverum og súrefnissnauðu votlendi. Ýmsir véfengdu niðurstöður Woese framan af, en smám saman hlaut þriggja ríkja kerfið almenna viðurkenningu.



Mynd 1. Lífsins tré Woese og félaga byggðist á raðgreiningum á rRNA genum og samanburði raða. Þrjú ríki komu í ljós: Bakteríur, Fornbakteríur (Archaea) og Heilkjörnungar (Eucarya).

Dreifkjarna örverur eru einu lífverurnar sem geta lifað í heitum hverum. Hámarksvaxtarhitastig heilkjarna örvera er talið vera um 57°C (*Cyanidium caldarium*), en dreifkjarna örvera 113°C. Dreifkjarna örverur flokkast til tveggja ríkja lífheimsins þ.e. til Baktería og Fornbaktería (*Archaea*). Þær síðarnefndu eru almennt séð hita- og sýruþolnari en þær fyrrnefndu. Innan beggja hópa er fjöldi tegunda sem gegna mismunandi hlutverki í vistkerfum hvera. Frumbjarga tegundir leggja grunninn að öðru lífi sem finnst í vistkerfinu. Þessar tegundir eru ýmist ljóstillífandi blágrænar bakteríur sem nýta sólarorku til að binda kolefni úr koldíoxíði eða efnatillífandi bakteríur sem fá orku úr oxun á vetni eða brennisteinsvetni og geta bundið ólífrænt kolefni. Aðrar tegundir vistkerfisins eru ófrumbjarga og þurfa því lífrænt kolefni sem frumbjarga tegundir sjá þeim fyrir.

Notkun sameindalíffræðilegra aðferða við greiningar á tegundasamsetningu í mismunandi vistkerfum hefur fleygt fram á síðustu árum og áratugum og er hægt að greina tegundasamsetningu í blönduðum sýnum án þess að undangengin ræktun sé skilyrði. Sífelld þróaðri tækjakostur gerir kleift að greina tegundasamsetningu í sýni á tiltölulega skömmum tíma. Tækjabúnaður til raðgreininga á DNA hefur þróast mjög hratt s.l. 10-15 ár með svokölluðum NGS (Next Generation Sequencing) raðgreiningum. Nýr tækjabúnaður sem Matís hefur yfir að ráða, MiSeq frá Illumina (Caporaso o.fl. 2012) gerir kleift að raðgreina fleiri sýni samtímis en áður og jafnframt að fá mun meiri upplýsingar (fleiri 16S rRNA raðir) úr hverju sýni. Sem dæmi má nefna að í fyrri rannsóknum var hægt að greina 50-100 16S rRNA genaraðir úr hverju sýni, en í þeirri rannsókn sem hér er lýst fengust á bilinu 60.000 – 115.000 raðir úr hverju sýni sem eykur áreiðanleika til muna. Vísindamenn víða um heim hafa með tímanum

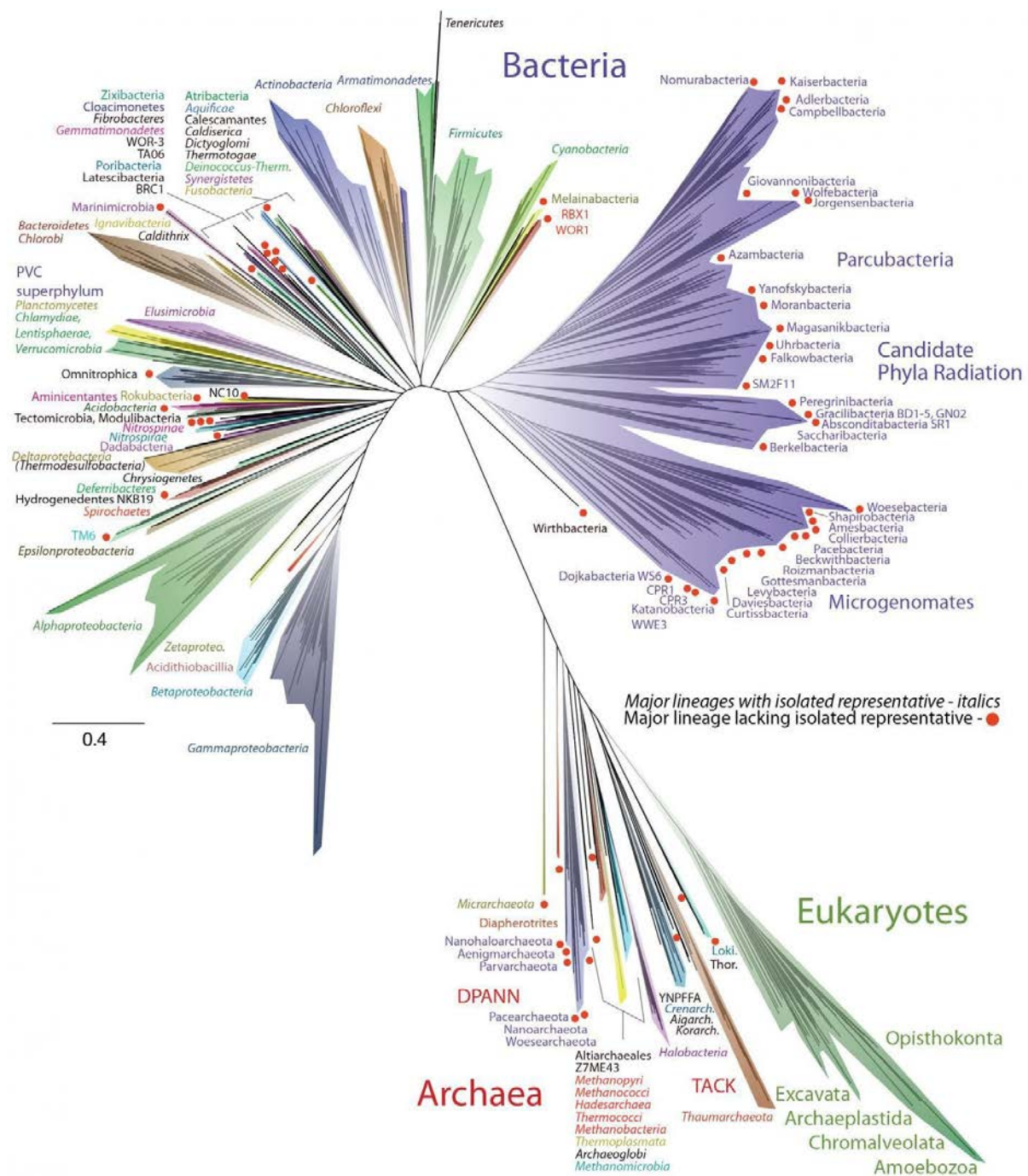
myndað gríðarlega stóra gagnagrunna sem hýsa 16S rRNA genaraðir víðsvegar að. Þessir grunnar nýtast sérlega vel til samanburðar þegar greina á bakteríu til tegundar, eða tegundasamsetningu baktería í sýni.

Gríðarlegt gagnamagn hefur einnig haft í för með sér breyttar áherslur í rannsóknum á hópasamsetningu örveruvistkerfa. Þannig hefur dregið úr áherslu á að greina tegundir, en sjónum beint að heildarmyndinni þ.e. hópum sem eru ofar í flokkunarkerfinu, s.s. fylkingum, fjölskyldum, ættbálkum og ættkvíslum. Jafnframt er flokkað í svokölluð OTU (Operational Taxonomic Units) við $\geq 97\%$ samsvörun 16S rRNA genaraða, sem hefur reyndar verið notað sem tegundaviðmið síðustu tvo áratugina. Menn hafa þó í vaxandi mæli forðast að nota OTU til að afmarka tegundir og er nú frekar talað um undirættkvíslir (subgenus). Til einföldunar er þó hugtakið „tegund“ notað í þessari rannsókn og miðað við 97% flokkunarmörk.

Tölulegar grunnupplýsingar fást nú tiltölulega auðveldlega um gæði og fjölda raðgreininga og hlutföll helstu hópa á mismunandi flokkunarstigum (t.d. fylkingar eða ættkvíslir) úr forritinu 16S metagenomics í BaseSpace, sem hýsir gögn úr MiSeq. Hugbúnaður til að ná dýpri greiningum er í stöðugri þróun og má þar nefna Mothur (Kozich o.fl. 2013) og Qiime (Caporaso o.fl. 2010) sem hér var notað.

Með tímanum hefur komið í ljós að lífheimur örveranna er miklum mun fjölbreyttari en talið var. Urmull af áður óþekktum tegundum hefur komið í ljós, en jafnframt hefur fengist staðfesting á því að einungis hefur tekist að rækta örlítið brot af þeim örverutegundum sem raunverulega finnast í lífheiminum. Þróun nýrra ræktunaraðferða og vaxandi þekking á mismunandi lífsferlum auka þó líkurnar á því að með tímanum takist að einangra og greina fleiri tegundir.

Mikið vatn er runnið til sjávar síðan Woese og félagar birtu sitt þriggja ríkja lífsins tré, með örri þróun á tækjabúnaði til raðgreininga og vaxandi gagnamagni. Nýjasta útgáfan af lífsins tré, sem birtist í Nature Microbiology í apríl 2016 (Hug o.fl. 2016) byggir samröðun 16 ríbósóm próteingena (mynd 2). Tréð staðfestir enn og aftur þriggja ríkja kerfið. Það sem kemur þó einkum á óvart er stærð og fjölbreytileiki ríkis Baktería og hve margir hópar eiga sér engan ræktaðan fulltrúa, sem staðfestir aftur hvað ræktunaraðferðin er takmörkuð þegar greina á tegundasamsetningu í sýnum.



Mynd 2. Lífsins tré frá 2016. Hópar í lífsins tré sem byggir á samröðun nokkurra ríbósóm prótein gena úr Bakteríum, Fornbakteríum (Archaea) og heilkjörnungum (Eukaryotes). Tréð inniheldur 92 fylkingar Baktería, 26 fylkingar Fornbaktería og alla fimm yfirhópa innan heilkjörnunga. Rauðir punktar á myndinni tákna hópa sem eiga sér engan ræktaðan fulltrúa. (Hug o.fl. 2016).

Aðferðafræðin sem beitt var í þessari rannsókn fól í sér sýnatöku, einangrun á heildar DNA úr sýnum, mögnun og raðgreiningu á tegundagreinandi 16S rRNA genum og samanburði raða við þekktar raðir í genabönkum. Aðferðin er því óháð ræktun, en sýnt hefur verið fram á að með ræktun náist einungis að greina örlítið brot, eða um og innan við 1% af raunverulegum fjölda

í sýnum (Hugenholz o.fl. 1998). Þetta er svo rækilega staðfest af Hug og félögum 2016 (mynd 2).

16S rRNA genið sem er bæði í Bakteríum og Fornbakteríum er 1500 - 1600 basapör og inniheldur bæði varðveitt svæði og breytileg (variable) svæði (mynd 3). Breytilegu svæðin eru mögnuð upp og DNA raðirnar nýtast til frekari greininga á örveruhópum.



Mynd 3. Varðveitt (græn) og breytileg (grá) svæði innan 16S rRNA gensins.

Sýnataka skiptir verulegu máli í rannsókn sem þessari og er markmiðið að ná sem fjölbreyttustum sýnum af hverjum stað. Skiptir þá máli hitastig og pH og útlit hveranna. Mismunandi litir geta gefið vísbendingar um mismunandi efnasamsetningu. Margar litlar opnur með mismunandi eiginleika geta verið í hnapp á litlu svæði. Í slíkum tilvikum voru sýni tekin úr flestum opnum. Í rannsókninni voru bæði tekin sýni úr uppsprettu hveranna og úr afrennslum frá þeim ef slíkt var til staðar. Þess má geta að hlutfall jarðvegssýna var óvenju hátt í þessari rannsókn.

Rannsóknaraðferðirnar voru áþekkar í RÁ2 og RÁ3. Í báðum tilvikum var tegundasamsetning örvera í sýnunum greind án ræktunar, og heildar DNA í sýnunum notað sem efniviður fyrir tegundagreiningar. Það sem var ólíkt var einkum gríðarlegur munur á umfangi gagnanna og einnig úrvinnslan.

Samanburður á heimsvísu fékkst einkum með samanburði við þar til gerða gagnagrunna. Á landsvísu var samanburður einkum við gögn sem fengust úr sýnum af háhitasvæðum sem voru rannsökuð í RÁ2. Þessi svæði voru í Henglinum (Viggó Þór Marteinson o.fl. 2004), Torfajökulssvæði (Sólveig K. Pétursdóttir o.fl. 2006), Vonarskarði (Sólveig K. Pétursdóttir 2009), Krýsuvík (Seltún) og Gunnhver á Reykjanesi (Sólveig K. Pétursdóttir o.fl. 2007) og Kröflusvæði (Sólveig K. Pétursdóttir o.fl. 2007). Ennfremur var heildarsamantekt úr RÁ2 örverurannsóknum höfð til hliðsjónar (Sólveig K. Pétursdóttir o.fl. 2010). Önnur jarðhitasvæði með samanburðarhæfum niðurstöðum voru einnig skoðuð, en þetta voru Þeistareykir og Gjástykki (Sólveig K. Pétursdóttir o.fl. 2008), Ölkelduháls (Sigríður Hjörleifsdóttir o.fl. 2001; Sólveig K.

Pétursdóttir o.fl. 2006; Sólveig K. Pétursdóttir o.fl. 2008) og stök sýni frá gamalli tíð, mest þó innan ofangreindra jarðhitasvæða.

Til að meta fjölbreytileika voru einkum fjórir þættir hafðir til hliðsjónar: Fjöldi fylkinga, fjöldi tegunda, útreiknaður fjölbreytileiki (Shannon) og söfnunarkúrfur. Til að meta fágæti var horft til hlutfalls hópa sem ekki tókst að greina með samanburði við Silva gagnagrunninn (Quast o.fl. 2013) eða NCBI gagnagrunninn (Altschul o.fl. 1990). Einnig voru gögn sem fengust af einstökum svæðum borin saman við fyrri rannsóknir og athugað hvort samsvörun ætti sér stað.

1. Efni og aðferðir

1.1 Sýnataka

Sýni voru tekin úr hverum og afrennslum þeirra við Trölladyngju og Austurengjahver á Reykjanesi, í Innstadal og Þverárdal á Hengilssvæðinu og einnig á hverasvæðinu í Fremrinámum, en þessi svæði röðuðust öll í biðflokk í RÁ2. Sýnin voru ýmist tekin af jarðvegi, vökva eða lífmassa úr hverunum sjálfum eða afrennslum frá þeim. Stundum voru tekin sýni úr mörgum opnum á litlu svæði. Þá gáfu mismunandi hitastig eða litir á útfellingum vísbendingar um mismunandi örveruvistkerfi í mismunandi opnum. Hitastig á sýnatökustöðunum var afar breytilegt og snarpur hitastigsfallandi með fjarlægð frá uppsprettu. Reynt var að taka fulltrúasýni úr sem flestum gerðum hvera á hverju svæði fyrir sig. Hitastig var mælt á öllum sýnatökustöðum og sýrustig á allflestum. Sýrustigið var ýmist mælt með pH strimlum á sýnatökustað þar sem því var viðkomið, eða með pH elektróðumæli á rannsóknastofunni. Hnit voru skráð í allflestum tilvikum, nema við Austurengjar.

1.2 Einangrun á DNA

Sýnin voru geymd í kæli, en reynt að meðhöndla þau eins fljótt og hægt var. DNA var einangrað úr sýnum með þar til gerðum „kittum“ frá Epicentre (Epicentre MasterPure Gram positive DNA purification kits (MGP04100) og Meta-G-Nome DNA Isolation (MGN0910) skv. upplýsingum frá framleiðanda. Gæði og magn DNA voru metin jafnóðum með Qubit quant-it high sensitivity frá Qubit og endurtekið þar til efniviðurinn var talinn nægilegur samkvæmt aðferðalýsingu frá Illumina. DNA einangrun var endurtekin eins oft og þurfa þótti og/eða sýnið dugði til.

1.3 Mögnun á 16S rRNA geni

16S rRNA gen Baktería og Fornbaktería í sýnunum voru mögnuð (PCR) með viðeigandi vísapörum fyrir Bakteríur og Fornbakteríur (Archaea) en svæðið á milli þeirra nær yfir ca 500 bp sem inniheldur breytilegt svæði V3 og V4 innan 16S rRNA gensins (Klindworth o.fl. 2012).

1.4 Raðgreiningar og úrvinnsla raðgreininga

Afurðirnar úr mögnuninni voru merktar með sérstöku merkjakerfi (index) frá Illumina: FC-131-2001 (Nextera XT v2 Index Kit set A) og FC-131-2002 (Nextera XT v2 Index Kit set B). Styrkur DNA var mældur með Picogreen (Quant-iT™ PicoGreen® dsDNA Assay Kit) frá ThermoFischer Scientific og stilltur af.

Raðgreiningarhvarfið sjálft var framkvæmt í MiSeq raðgreini frá Illumina með kitti frá sama aðila (MiSeq Reagent Kit v3 600 hringir) samkvæmt upplýsingum frá framleiðanda.

Hrágögnin úr raðgreiningunni voru keyrð með 16S metagenomics forritinu á BaseSpace (Illumina) (Wang et al. 2015). Þannig fengust grunnupplýsingar um nýtilegar raðir úr hverju sýni, árangur greininga á mismunandi flokkunarstigum og hlutföll helstu hópa á mismunandi flokkunarstigum. Ennfremur fjölbreytileikastuðull (Shannon) fyrir hvert sýni. Í framhaldinu var svo hugbúnaðarforritið Qiime (Caporaso o.fl. 2012) notað til að greina gögnin, en þar eru raðir bornar saman við þekktar raðir í Silva 16S rRNA gagnagrunninum (Quast o.fl. 2013), sem er uppfærður reglulega. Qiime forritið býður upp á mun meiri aðgang að eiginlegum röðum og meiri sveigjanleika og nákvæmni en 16S metagenomics í BaseSpace. Qiime býður einnig upp á beintengingu við R tölfraeðiforritið.

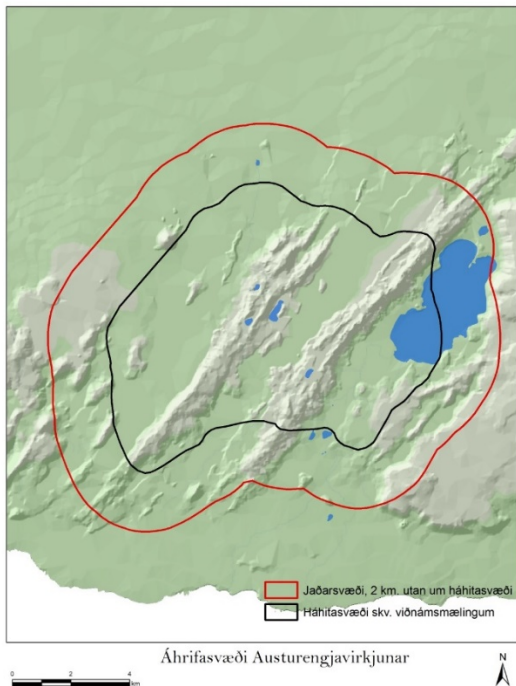
Í þessari skýrslu um rannsóknir á hitakærum örverum á háhitasvæðum er gerð grein fyrir sýnatökum í myndum, máli og töflum. Kort sem sýna svæðin og merkingar sýnatökustaða voru gerð af Adam Hoffritz. Ennfremur er gerð grein fyrir niðurstöðum úr DNA raðgreiningum á 16S rRNA genum úr Bakteríum og Fornbakteríum úr sýnunum. Hlutföll fylkinga eru skoðuð og einnig er kafað dýpra í ættfræðina – farið á fínni flokkunarstig - þegar ástæða þykir. Samanburður við önnur svæði úr fyrri rannsóknum með sambærilegum aðferðum er gerður og ennfremur samanburður DNA raða við sambærilegar raðir í Silva 16S rRNA gena gagnagrunni (Quast o.fl. 2013) og NCBI gagnagrunni (Altschul of.fl. 1990).

2. Niðurstöður

2.1 Sýnataka.

Sýnataka fór fram sumarið og fram á haustið 2015. Háhitasvæðin voru Trölladyngja og Austurengjahver á Reykjanesi, Þverárdalur og Innstidalur í Henglinum og Fremrinámar. Hér á eftir er einstökum svæðum og sýnatökustöðum lýst í myndum og máli. Þess skal getið að hér er öllum sýnum lýst, en ekki tókst að greina öll sýnin.

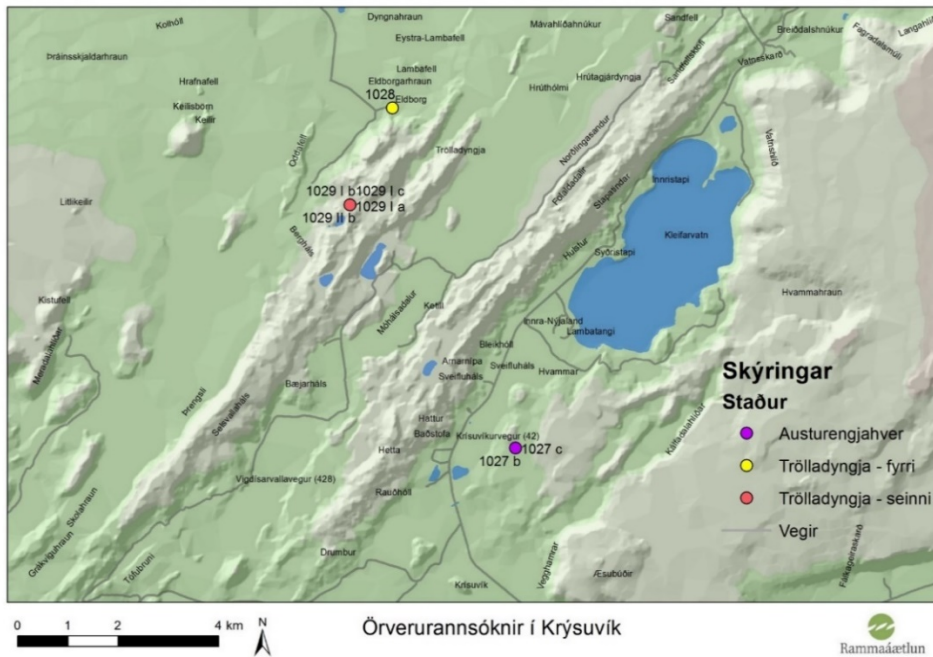
2.1.1 Reykjanes



Mynd 4. Áhrifsvæði Austurengjavirkjunar. Afmörkun háhitavæðis og jaðarsvæðis (Þorleifur Eiríksson og Sigmundur Einarsson 2016).

Í RÁ2 voru gerðar örverurannsóknir á jarðhitasvæðinu í Seltúni í Krýsuvík og við Gunnuhver (Sólveig K. Pétursdóttir o.fl. 2007). Í núverandi rannsókn, RÁ3, voru jarðhitasvæðin við Trölladyngju og Austurengjahver sem lentu í biðflokki í RÁ2 tekin fyrir. Áformað var að greina einnig sýni úr Eldvörpum, en það reyndist ekki unnt í þetta sinn. Mynd 4 sýnir afmörkun háhitavæðis Austur-engjavirkjunar og jaðarsvæðis (Þorleifur Eiríksson og Sigmundur Einarsson, 2016).

Sýni voru tekin af jarðhitasvæðum við Trölladyngju og Austurengjahver 18. júní og 6. september 2015. Átta sýni voru tekin við Trölladyngju og 18 sýni við Austurengjahver (mynd 5).



Mynd 5. Kortið sýnir sýnatökustaði við Trölladyngju og Austurengjahver (Adam Hoffritz. 2016).

2.1.1.1 Trölladyngja - sýnataka

Tvö svæði voru einkum tekin til skoðunar við Trölladyngju: Eldborg og Sog (mynd 5). Tafla 1 gefur yfirlit um sýnatökustaði við Trölladyngju ásamt upplýsingum um hitastig, sýrustig og gerð hvera og gerð sýna. Hitastig sýna spannaði bil á milli 27,4 – 97°C. Sýrustig var pH 5 í öllum tilvikum. Myndir 6-17 eru af sýnatökustöðunum við Trölladyngju.

Tafla 1. Sýnatökustaðir við Trölladyngju.

Sýni	GPS N	GPS W	T°C	pH	Gerð hvers	Gerð sýnis
1028	63°56,934'	022°05,353'	56,2	-	Gufuop í hrauni.	Jarðvegssýni úr gufuopi.
1029-Ia	63°55,876	022°06,270	87,8	5	Opnur í polli.	Vatn og leðja við opnu.
1029-Ib	63°55,876	022°06,270	93,5	5	Opnur í polli.	Vatn og leðja við opnu.
1029-Ic	63°55,876	022°06,270	27,4	5	Hitaskella við poll.	Jarðvegur. Rauðar og gular útfellingar.
1029-IIa	63°55,876	022°06,270	96,0	5	Rauðgrár leirhver. Litlar opnur.	Grár leir úr opnu.
1029-IIb	63°55,876	022°06,270	96,0	5	Rauðgrár leirhver. Litlar opnur.	Rauðleitur leir úr opnu.
1030-a	Nálægt 1029	-	97,0	-	Hitaskella í hlíð.	Jarðvegur. Hitaskella.
1030-b	Nálægt 1029	-	45,0	-	Hitaskella í hlíð.	Jarðvegur. Hitaskella.

Skýringar: - = upplýsingar vantar

Sýnatökustaður 1028 var við Eldborg. Hann einkenndist af gufu sem leið upp af hraunkambi og var sýnið tekið af jarðvegi við gufuopið (myndir 6 og 7). Fleiri sýni voru ekki tekin við Eldborg.



Mynd 6. Sýnatökustaður 1028. Hraunkambur í eldborg. Yfirlitsmynd.



Mynd 7. Staður 1028 nær. Sýnið var tekið af jarðvegi kringum gufuop við 56,2°C.

Sýnatökustaðir 1029 og 1030 voru í Sogum og voru sjö sýni tekin hér. Sýnatökustaður 1029 skiptist í tvö lítil svæði I og II, 3-4 m² að stærð hvort um sig (myndir 8 og 9).



Mynd 8. Sýnatökustaður 1029 - I. Mikið yfirborðsvatn. Bullar úr litlum opnum.



Mynd 9. Sýnatökustaður 1029- II. Rauðleitur og gráleitur leir. Litlar opnur. Tvö sýni voru tekin hér.

Nokkrar mismunandi opnur voru innan svæða 1029-I og 1029-II. Þrjú sýni (a, b og c) voru tekin á 1029-I : Ia og Ib úr opnum í pollinum og Ic úr hitaskellu við pollinn. (myndir 10, 11 og 12). Tvö sýni (a og b) voru tekin á 1029-II: IIa af gráleitum leir við opnu og IIb af rauðleitum leir við opnu (myndir 13 og 14).



Mynd 10. Sýni 1029 Ia var tekið af vatni og leðju við litla opnu. Hitastigið var 87,8°C og pH 5.



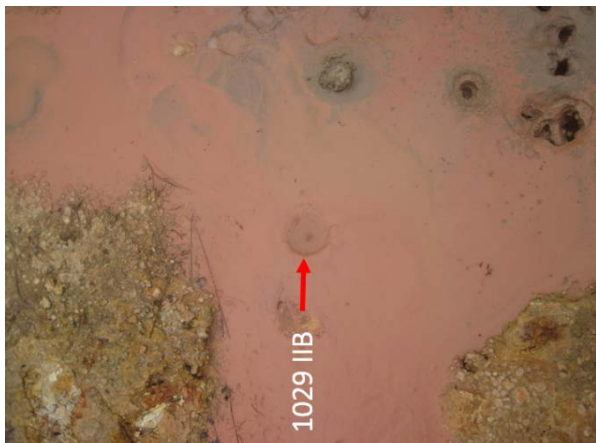
Mynd 11. Sýni 1029 Ib var tekið af leðju og vökva í opnu. Hitastigið var 93,5°C og pH 5.



Mynd 12. Sýni 1029 Ic var tekið af jarðvegi úr hitaskellu. Hitastigið var 27,4°C og pH5.



Mynd 13. Sýni 1029 IIA var tekið af gráum leir úr lítilli opnu. Hitastigið var 96°C og pH 5.



Mynd 14. Sýni 1029 IIB fyrir og eftir sýnatöku. Sýnið var tekið af rauðleitum leir úr opnu. Hitastigið var 96°C og pH 5.

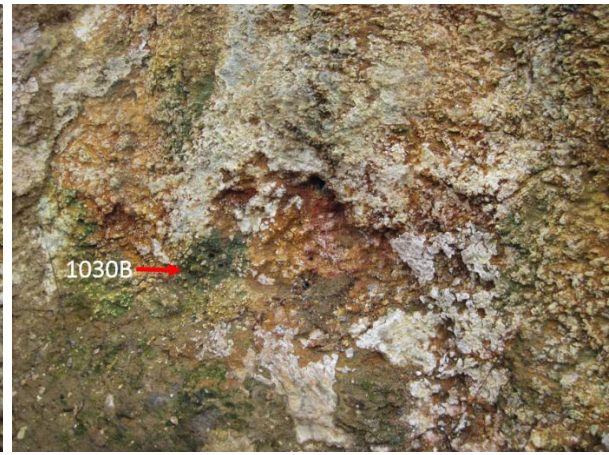
Sýnatökustaður 1030 var í hitaskellu í brattri hlíð skammt frá 1029 (mynd 15). Tvö sýni 1030a og 1030b voru tekin á mismunandi stöðum og við mismunandi hitastig úr skellunni (myndir 16 og 17).



Mynd 15. Sýnatökustaður 1030 við Trölladyngju var hitaskella skammt frá sýnatökustað 1029. Tvö sýni voru tekin úr skellunni.



Mynd 16. Sýni 1030a var tekið af rauðleitum útfellingum í hitaskellunni. Hitastigið var 97°C.



Mynd 17. Sýni 1030b var tekið af grænum gróðri á yfirborði hitaskellunnar. Hitastigið var 45°C.

2.1.1.2 Austurengjahver - sýnataka

Svæðið við Austurengjahver einkennist af þremur stórum, misheitum tjörnum og var sýrustigið á bilinu pH 4-5. Tjarnirnar (hér nefndar Nyrstatjörn, Miðtjörn og Syðstatjörn) liggja nokkurn veginn í línu frá suðri til norðurs og eru hverir og ummyndanir misdreifð um svæðin milli tjarna. Átján sýni voru tekin úr hverum og afrenslum þeirra á svæðinu 18. júní og 6. september 2015. Í fyrri ferð voru tekin sýni úr augum við Syðstutjörn en í seinni ferð voru tekin sýni úr hverum og afrenslum af öllu svæðinu. Tafla 2 gefur yfirlit um sýnatökustaðina ásamt upplýsingum um hitastig, pH og gerð sýnis. Einstakir sýnatökustaðir og hveragerðir við Austurengjahver sjást á myndum 18 - 43.

Tafla 2. Sýnatökustaðir við Austurengjahver.

Sýni	GPS N	GPS W	T°C	pH	Gerð hvers	Gerð sýnis
1027a	63°53.356	022°01.957	90,0	4 - 4,5	Lítill opna í sandi.	Leðja og rotið hey.
1027b	63°53.356	022°01.957	73,6	4 - 4,5	Lítill opna í sandi.	Vatn og grófur sandur v. opnu.
1027c	63°53.356	022°01.957	59,6	4 - 4,5	Lítill opna í sandi.	Hvítar útfellingar úr opnu.
1038	-	-	79,0	5	Leirhver.	Vatn, leir og froða.
1039	-	-	62,0	4,7	Leirhver.	Leirleðja.
1040	-	-	56,0	2,9	Vatnsríkur leirhver.	Leirleðja.
1041	-	-	74,0	3,7	Lítill hvít opna.	Vatn og útfellingar.
1042	-	-	71,8	4,4	Lítið gufuauga.	Jarðvegssýni.
1043	-	-	80,0	4	Lítið gufuauga.	Jarðvegssýni.
1044	-	-	90,0	4	Lítið gufuauga.	Jarðvegssýni.
1045	-	-	86,0	4	Leirhver.	Vatnssýni.
1046	-	-	80,0	4,1	Bullandi soðpanna.	Vatns- og leirsýni.
1047	-	-	88,0	3,2	Soðpanna.	Soðpanna. Vatn og mól.
1048	-	-	74,7	3,1	Leirhver.	Vatns- og leirsýni.
1049	-	-	71,0	3,6	Brennisteinsstrýta gufuauga.	Brennisteinsstrýta – jarðvegur.
1050	63°53.356	022°01.957	31,0	2,5	Leirhver.	Brák við tjörn.
1051	63°53.356	022°01.957	61,3	2,6	Tjörn.	Vatnsýni.
1052	63°53.356	022°01.957	93,4	3,6	Gufuauga.	Jarðvegur. Járn – brennisteinn.

GPS punkta vantar fyrir sýnatökustaði 1038-1049. Almenn er fjallað um þessa sýnatökustaði í texta og myndatexta.

Mynd 18 sýnir Syðstutjörn og er horft til norðurs þar sem Nyrstatjörn sést í fjarska. Mynd 19 sýnir Nyrstutjörn og er enn horft til norðurs. Hitastig í Syðstutjörn mældist 60,2°C og sýrustig pH 4-4,5.



Mynd 18. Horft yfir Syðstutjörn í norður. Nyrstatjörn sést í fjarska.



Mynd 19. Nyrstatjörn sést hér ofarlega á myndinni.

Þrjú sýni (1027a, b og c) voru tekin úr litlum opnum við Syðstutjörn (myndir 20-23).



Mynd 20. Sýnatökustaðir 1027a, b og c. Litlar (\varnothing 3-4cm) opnur við Syðstutjörn. Hitastigið var mismunandi í opnunum eða á bilinu ca 60-90°C. Sýrustigið var pH 4-4,5.



Mynd 21. Sýni 1027a var leðja úr þessu bullandi leirauga. Hitastigið var 90°C og pH 4-4,5.



Mynd 22. Sýni 1027b var tekið af möl og vatni úr lítilli opnu. Hitastigið var 73,6°C og pH 4-4,5.



Mynd 23. Sýni 1027c var af jarðvegi og hvítum útfellingum úr lítilli opnu. Hitinn var 59,6°C og pH 4-4,5.

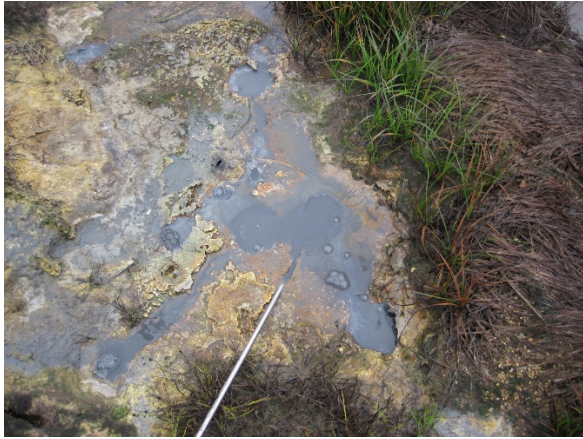
Sýni 1038 og 1039 voru tekin úr vatnskenndum leirhverum við Nyrstutjörn í september 2015 (myndir 24-26).



Mynd 24. Yfirlitsmynd af hverum og afrennsli við Nyrstutjörn.



Mynd 25. Sýni 1038 var tekið af vatni, leir og froðu úr þessum litla leirhver við Nyrstutjörn. Hitastigið var 79°C og sýrustigið pH 5.



Mynd 26. Sýni 1039 var tekið af leirleðju úr þessum hver við Nyrstutjörn. Loftbólur í auga. Hitastigið var 62°C og sýrustigið pH 4,7.

Umhverfis Miðtjörn voru tekin sýni af margvíslegum hverum s.s. leirhverum, gufuaugum, hvera-afrennsli og hverum sem minntu á soðpönnuhver. Sýni 1040-1049 voru tekin á þessu svæði (myndir 27 – 38).



Mynd 27. Afstöðumynd af sýnatökustað 1040 við Miðtjörn. Sýni 1040 var tekið úr leirhvernum nær tjörninni.



Mynd 28. Sýnatökustaður 1040 við Miðtjörn. Sýnið var tekið úr þessum vatnsríka leirhver við 56,2°C og pH 2,9.



Mynd 29. Sýni 1041 var tekið úr hveraafrennsli sem rennur í Miðtjörn. Hvítar útfellingar og grænn lífmassi áberandi.



Mynd 30. Sýnatökustaður 1041 nær. Sýni var tekið af vatni og útfellingum við uppsprettuna. Hitastigið var 68,9°C-74°C. pH 3,7.



Mynd 31. Staður 1042 við Miðtjörn. Lítið gufuauga.



Mynd 32. Staður 1042 nærmynd. Jarðvegssýni. Hitastigið var 70,6-71,8°C og sýrustig pH 4,4.



Mynd 33. Sýni 1043 var úr gufuauga við Miðtjörn. Jarðvegssýni 80°C pH 4.



Mynd 34. Sýni 1044 var tekið úr gufuauga við Miðtjörn. Jarðvegssýni 90°C pH 4.



Mynd 35. Sýni 1045. Leirhver við Miðtjörn. Bullar í auga. Sýni af vatni og leir við 86°C og pH 4.



Mynd 36. Sýni 1046 var tekið úr bullandi soðpönnu við Miðtjörn. Sýni af vatni og mól við 80°C og pH 4.1.



Mynd 37. Sýnatökustaður 1047 sunnan við Miðtjörn.



Mynd 38. Staður 1047 nær. Soðpanna, lítil vatnsaugu. Sýni var tekið af vatni og mól við 88°C og pH 3,2.



Mynd 39. Sýni 1048 var tekið úr leirhver ca. 60 cm í þvermál, sunnan við Miðtjörn. Sýnið var af leir og vatni. Hitastigið var 74,7-83°C og pH 3,1.

Sýni 1048 var tekið á svæðinu milli Miðtjarnar og Syðstutjarnar

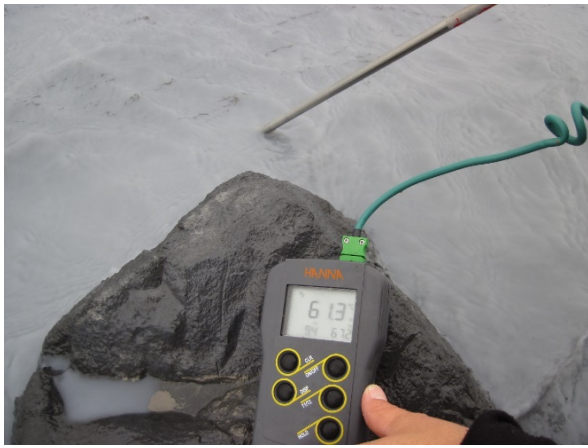


Mynd 40. Sýni 1049 var úr brennisteinsstrýtu – gufuauga - sunnan við Miðtjörn. Þvermál var ca 3-4 cm. Jarðvegssýni af strýtutoppi sem skorinn var af. Hitastigið var 71°C og pH 3,6.



Sýni 1050-1052 voru tekin úr og umhverfis Syðstutjörn (myndir 41-43).

Mynd 41. Sýni 1050 var tekið af yfirborðsbrák í polli við Syðstutjörn við 31°C og pH 2,5.



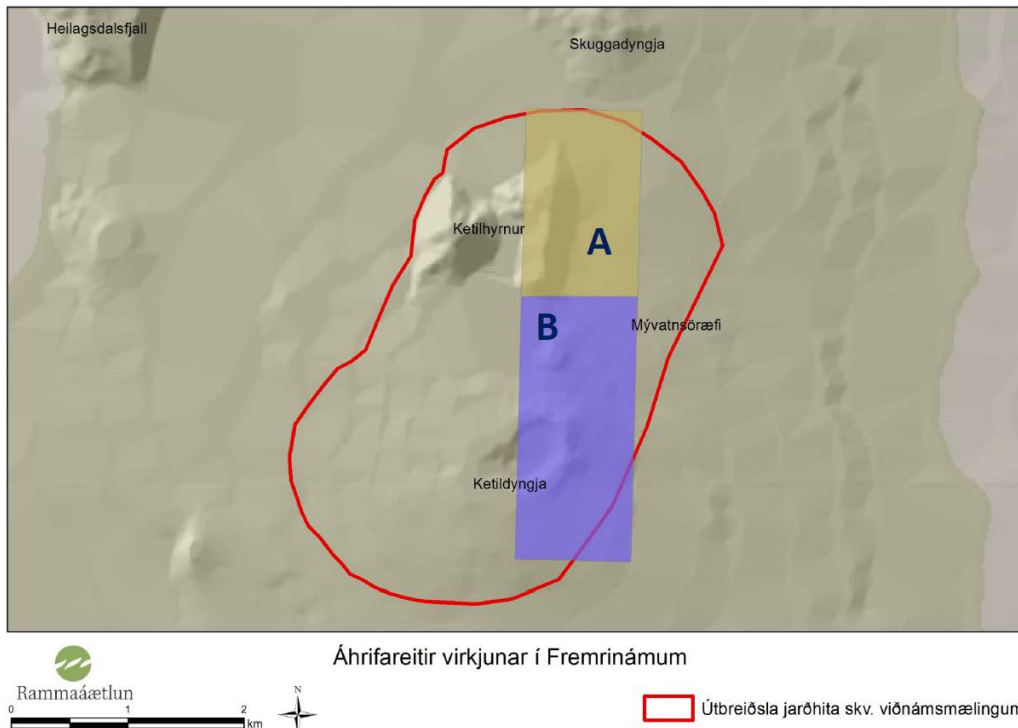
Mynd 42. Sýni 1051 var vatnssýni tekið úr Syðstutjörn við 61,3°C og pH 2,6.



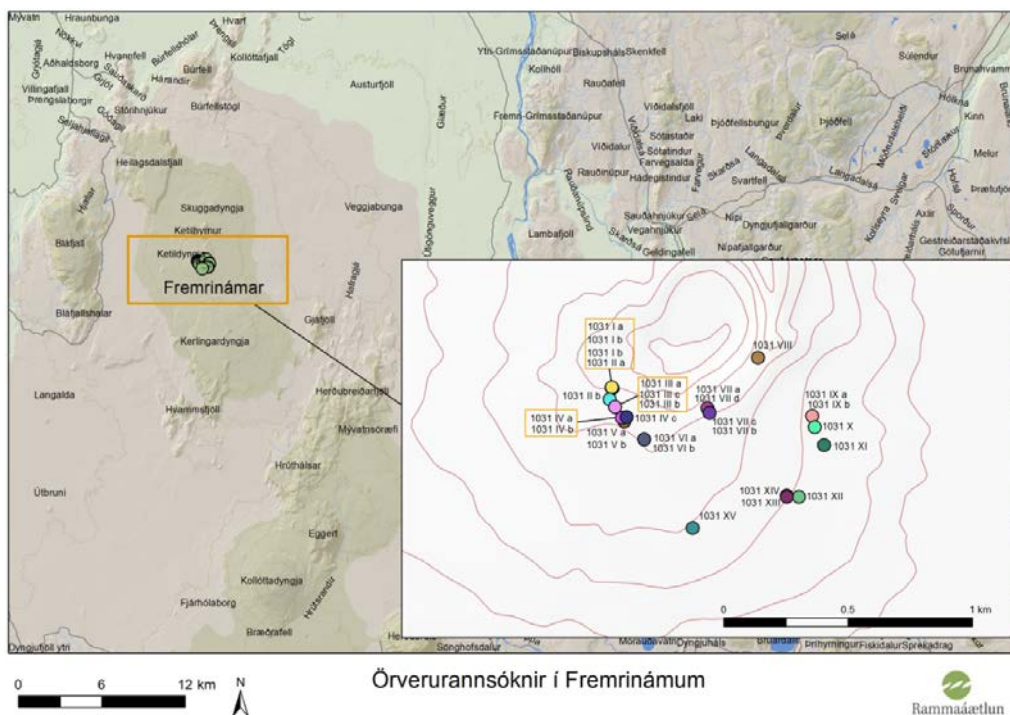
Mynd 43. Sýni 1052 var tekið af járn- og brennisteinsútfellingum úr gufuauga (3-4cm) við Syðstutjörn. Hitastigið var 93,4°C og pH 3,6.

2.1.2 Fremrinámar - sýnataka

Fremrinámar er háhitasvæði suðaustur af Mývatni og norðvestur af Herðubreið. Mynd 44 sýnir útbreiðslu jarðhita og áætlaða áhrifareiti virkjunar í Fremrinámum. Mynd 45 sýnir sýnatökustaði í Fremrinámum, en sýnum til örverurannsókna var safnað á svæðinu við Ketilyngju 4. júlí 2015. Upplýsingar um einstök sýni og sýnatökustaði má finna í töflu 3 og á myndum 46-93.



Mynd 44. Útbreiðsla jarðhita og áhrifareitir virkjunar í Fremrinámum (Þorleifur Eiríksson og Sigmundur Einarsson 2016).



Mynd 45. Sýnatökustaðir í Fremrinámum (Kort: Adam Hoffritz).

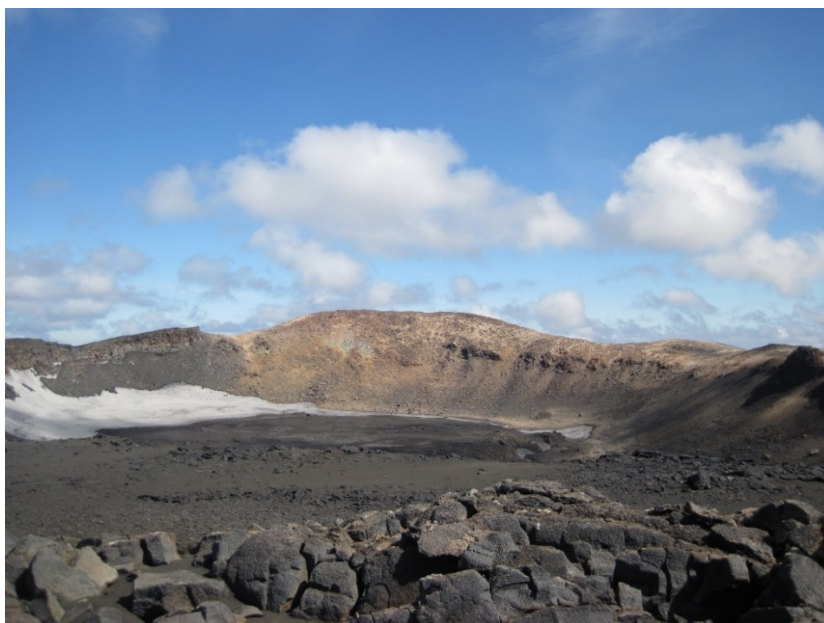
Tafla 3. Fremrinámur sýnatökustaðir.

Sýni	Staður	GPS N	GPS W	T °C	pH	Gerð sýnis
1031-Ia	Rauðir hólar.	65°25.830'	016°39.258'	92,0	7,1	Jarðvegssýni. Sandur - rautt undir.
1031-Ib	Rauðir hólar.	65°25.831'	016°39.263'	33,0	6,3	Jarðvegssýni. Rautt svæði - hvítt og hart á ca 5 cm dýpi.
1031-Ic	Rauðir hólar.	65°25.832'	016°39.262'	76,2	7,7	Jarðvegssýni Gráar útfellingar í sandi.
1031-IIa	Rauðir hólar.	65°25.832	016°39.262'	50,3	6,6	Gráar útfellingar á rauðum fleti - við auga.
1031-IIb	Rauðir hólar	65°25.806'	016°39.275'	41,2	5,2	Rauður flötur. Jarðvegssýni.
1031-IIIa	Rauðir hólar.	65°25.789'	016°39.248'	86,3	7	Svart auga. Jarðvegssýni.
1031-IIIb	Rauðir hólar.	65°25.789'	016°39.248'	76,4	7	Brúnleitur ljós jarðvegur.
1031-IIIc	Rauðir hólar.	65°25.789'	016°39.248'	56,8	7	Þurr, brúnn og grár jarðvegur.
1031-IVa	Rauðir hólar.	65°25.757'	016°39.203'	81,1	7	Jarðvegssýni tekið úr auga.
1031-IVb	Rauðir hólar.	65°25.757'	016°39.203'	73,6	7	Rautt um 1m frá a-sýni. Jarðvegssýni
1031-IVc	Rauðir hólar.	65°25.761'	016°39.204'	31,0	7	Bleikt jarðvegssýni - ljósara en b sýni.
1031-Va	Rauðir hólar.	65°25.760'	016°39.205'	66,2	7	Jarðvegssýni úr auga - efst á hólnum.
1031-Vb	Rauðir hólar.	65°25.760'	016°39.205'	60,4	7	Rautt og svart jarðvegssýni tekið úr hliðinni

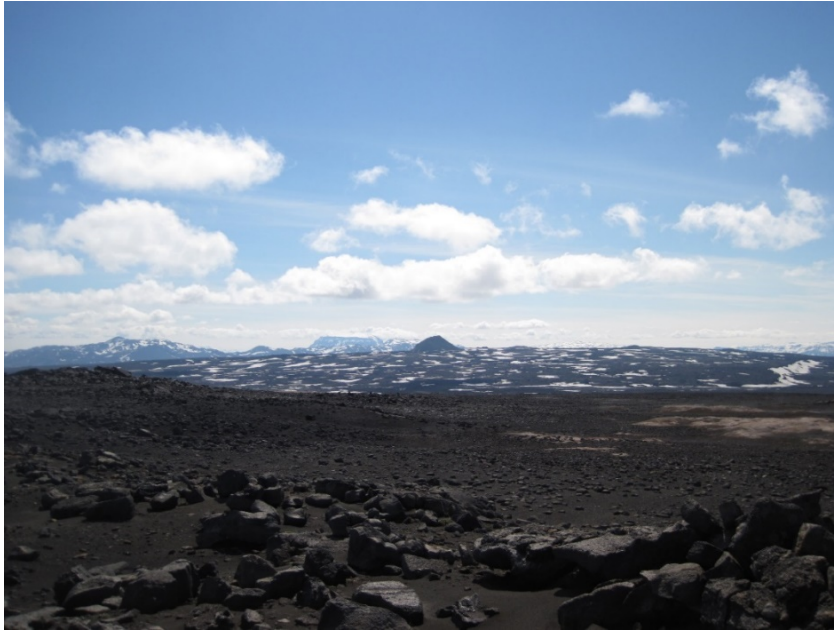
1031-VIa	Rauðir hólur.	65°25.717'	016°39.104'	86,2	7	Rautt jarðvegssýni, um 1m frá auga.
1031-VIb	Rauðir hólur.	65°25.717'	016°39.104'	80,2	7	Svart auga. Jarðvegssýni.
1031-VIIa	Hvítt líparít svæði	65°25.779'	016°38.768'	59,1	4	Brennisteinshóll -, ljósgult og grátt. Jarðvegssýni
1031-VIIb	Hvítt líparít svæði	65°25.779'	016°38.768'	36,3	6	Gular skellur í sandi neðan við VIIa. Þurrt jarðvegssýni.
1031-VIIc	Hvítt líparít svæði	65°25.769'	016°38.759'	30,7	5	Hóll - neðar. Appelsínugult, brúnt og rautt jarðvegssýni.
1031-VIId	Hvítt líparít svæði	65°25.769'	016°38.759'	40,9	5	1 metra frá c - gular skellur. Jarðvegssýni.
1031-VIII	Hvítt líparít svæði	65°25.884'	016°38.496'	41,0	5	Brennisteins svæði - sandur mjög þurrt jarðvegssýni.
1031-IXa	Rauðbrúnir hólur austan dyngju.	65°25.754'	016°38.224'	77,1	7	Svart og grátt jarðvegssýni.
1031-IXb	Rauðbrúnir hólur austan dyngju.	65°25.754'	016°38.224'	66,8	7	Rauður leir – jarðvegssýni tekið úr auga.
1031-X	Rauðbrúnir hólur austan dyngju.	65°25.729'	016°38.213'	68,7	7	Gufuauga - rakt. Jarðvegssýni.
1031-XI	Rauðbrúnir hólur austan dyngju.	65°25.690'	016°38.168'	53,9	7	Jarðvegssýni tekið rétt neðan við gufuauga. Raki.
1031-XII	Rauðbrúnir hólur austan dyngju.	65°25.580'	016°38.310'	76,2	7	Stórt, þurrt auga, mikill sandur. Jarðvegssýni.
1031-XIII	Rauðbrúnir hólur austan dyngju.	65°25.583'	016°38.372'	44,3	7	Jarðvegssýni tekið rétt hjá auga
1031-XIV	Á AV-sprungu	65°25.581'	016°38.373'	73,9	7	Grænleitt og brúnt. Rakt. Jarðvegssýni.
1031-XV	Á AV-sprungu	65°25.521'	016°38.869'	78,3	7	Brennisteinshóll. Gufuauga. Jarðvegssýni.

Skýringar: Sýnatökusvæðið í Fremrinámum fékk númerið 1031. Sýnatökustaðir eða undirsvæði fengu hlaupandi númer í rómverskum tölum I-XV. Sýni fengu númer í bókstöfum. Dæmi: 1031-IIc.

Yfirlitsmyndir 46-51 gefa nokkra hugmynd um svæðið í Fremrinámum í heild sinni.



Mynd 46. Yfirlitsmynd. Skálin í Ketildyngju. Sýnatökusvæðin voru austan við skálina (aftan við), vestan við skálina og sunnan hennar (til hægri á mynd).



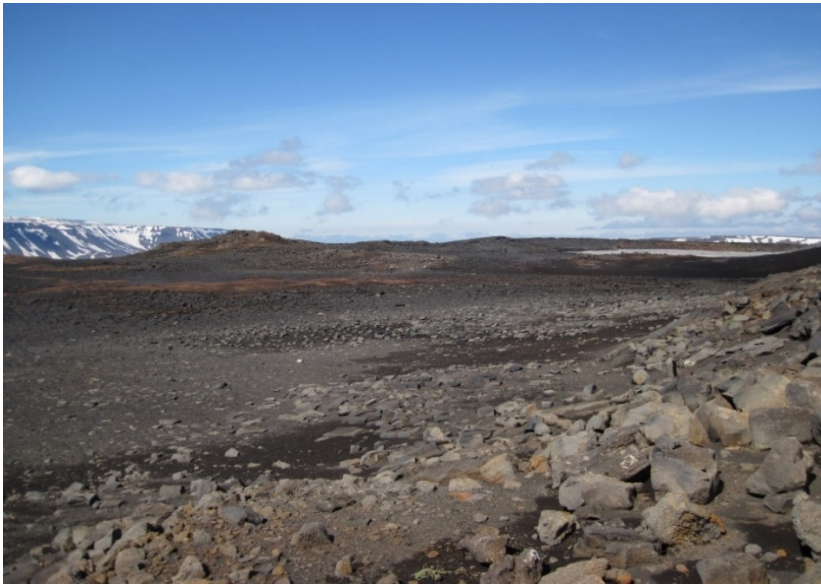
Mynd 47. Yfirlitsmynd til suðurs. Til hægri á myndinni sjást rauðir hólar (virðast ljósari vegna glampa frá sólinni). Skálin er austan við (til vinstri). Í suðri sést Herðubreið og Kerlingardyngja framan við hana.



Mynd 48. Yfirlitsmynd til suðvesturs. Rauðir hólar af fyrri mynd sjást vinstra megin. Steinninn sem stendur upp úr grjóthrúgunni stendur á vestari barmi gígsins í Ketildyngju.

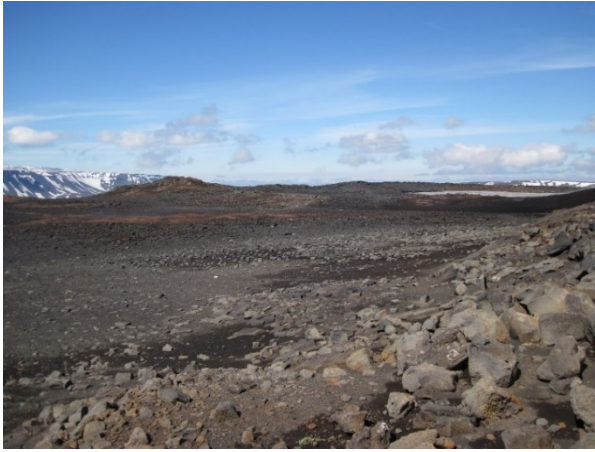


Mynd 49. Yfirlitsmynd til vesturs. Fyrir miðri mynd sjást rauðir hólar sem rýkur úr. Í baksýn er Bláfjall sem endar í Bláfjallshöllum.



Mynd 50. Yfirlitsmynd til norð-vesturs. Rauðir hólar og mikill hiti. Þarna voru fyrstu sýnin tekin. Í baksýn sést glitta í nyrsta hluta Bláfjalls.

Sýni 1031- I – 1031-VI voru öll tekin í rauðu hólunum sem liggja vestan og suðvestan við skálina í Ketildyngju. Sýni 1031-VI var tekið á mörkum hólanna og líparít svæðis sem er hvítt eða ljósgult. Sýni voru tekin á þremur stöðum 1031-Ia,b og c (myndir 51-54).



Mynd 51. Staður 1031-I. Yfirlitsmynd. Sýnatöku-
staðurinn er efst til hægri.



Mynd 52. Sýni 1031-Ia var jarðvegssýni tekið við 92°C
og pH 7,1.



Mynd 53. Sýni 1031-Ib var jarðvegssýni tekið við 33°C
og pH 6,3.



Mynd 54. Sýni 1031-Ic var jarðvegssýni af gráum
útfellingum tekið við 76,2°C og pH 7,7.

Sýni voru tekin á tveimur stöðum (a og b) á svæði 1031-II (myndir 55-57) sem var stórt en einsleitt.



Mynd 55. Svæði 1031-II yfirlitsmynd.

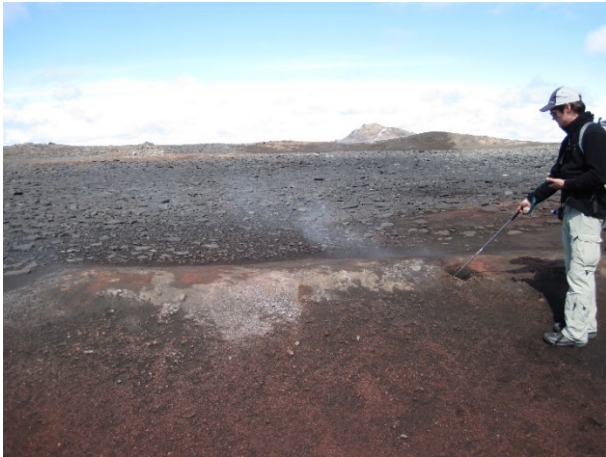


Mynd 56. Sýni 1031-IIa var jarðvegssýni af gráum
útfellingum tekið við 50,3°C og pH 6,6.



Mynd 57. Sýni 1031-IIb var af rauðleitum jarðvegi tekið við 41,2°C og pH 5,2.

Sýni voru tekin á þremur stöðum (a, b og c) á sýnatökustað 1031-III (myndir 58-61).



Mynd 58. Sýnatökustaður 1031-III Yfirlitsmynd.



Mynd 59. Sýni 1031-IIIa var jarðvegssýni úr svörtu auga tekið við 86,3°C og pH 7.



Mynd 60. Sýni 1031-IIIb var tekið af ljósum jarðvegi við 76,4°C og pH 7.



Mynd 61. Sýni 1031-IIIc var tekið af brúngráleitum jarðvegi við 56,8°C og pH 7.

Sýni voru tekin á þremur stöðum (a, b og c) á sýnatökustað 1031-IV (myndir 62-65).



Mynd 62. Sýnatökustaður 1031-IV yfirlitsmynd



Mynd 63. Sýni 1031-IVa var jarðvegssýni úr auga tekið við 81,1°C og pH 7.



Mynd 64. Sýni 1031-IVb var rauðleitt tekið við 73,6°C og pH 7. Sýnið var tekið u.þ.b. 1m frá sýni 1031-IVa.



Mynd 65. Sýni 1031-IVc var af jarðvegi tekið enn lengra frá sýni 1031-IVa. Hitastigið var 31,0 og pH 7.

Sýni voru tekin á tveimur stöðum (a og b) á sýnatökustað 1031-V (myndir 66-68).



Mynd 66. Sýnatökustaður 1031-V. Yfirlitsmynd.

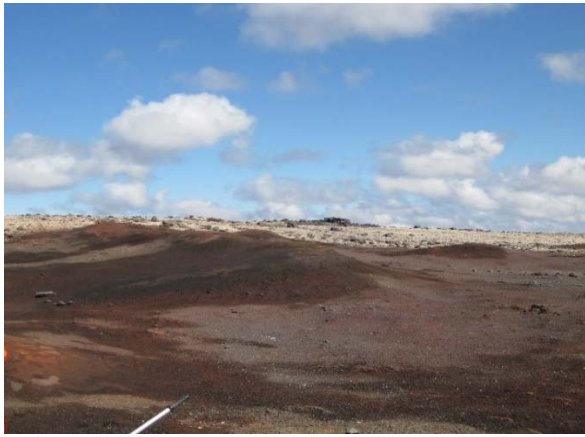


Mynd 67. Sýni 1031-Va var tekið af rauðleitum jarðvegi úr auga við 66,2°C og pH 7.



Mynd 68. Sýni 1031-Vb var tekið af rauðum og svörtum jarðvegi við 60,4°C og pH 7.

Tvö sýni (a og b) voru tekin á sýnatökustað 1031-VI (myndir 69-71).



Mynd 69. Sýnatökustaður 1031-VI. Yfirlitsmynd.



Mynd 70. Sýni 1031-VIa var tekið af rauðum jarðvegi í u.þ.b. 1m fjarlægð frá auga. Hitastigið var 86,2 og pH 7.



Mynd 71. Sýni 1031-VIb var tekið af svörtum jarðvegi úr auga við 80,2 og pH 7.

Sýni 1031-VII-VIII voru tekin innan hvíta líparít svæðisins. Þar voru nokkrar gul- og grænleitar dyngjur. Sýrustigið á þessu svæði var ívið lægra en á fyrrgreindum stöðum (1031-1-VI). Þar sem svæðið var mjög þurrt voru einungis tekin sýni úr tveimur dyngjum.

Svæði 1031-VII einkenndist af þurrki en var mjög litríkt. Þetta var tiltölulega stórt svæði sem virtist hluti af sama beltinu. Fjögur sýni (a,b,c og d) voru tekin á þessu svæði (myndir 72-76).



Mynd 72. Staður 1031-VII yfirlitsmynd.



Mynd 73. Sýni 1031-VIIa var tekið af þessum litríku útfellingum við 59,1°C og pH 4.



Mynd 74. Sýni 1031-VIIb var þurrt jarðvegssýni, tekið af gulum útfellingum í sandi rétt neðan við 1031-VIIb. Hitastigið var 36,3 og pH 6.

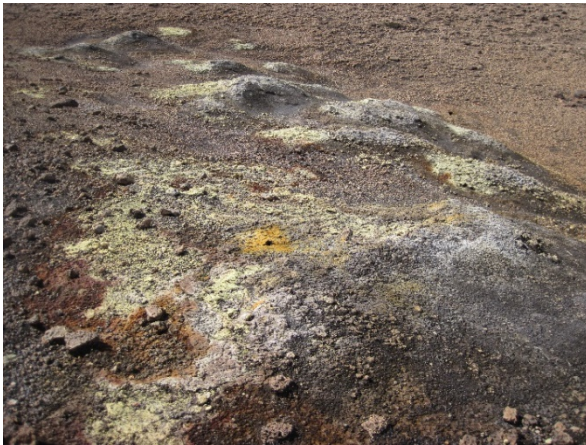


Mynd 75. Sýni 1031-VIIc var tekið af litríkum útfellingum enn neðar við 30,7°C og pH 5.

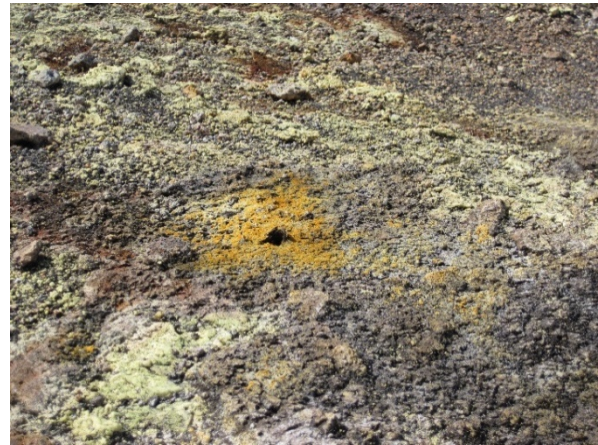


Mynd 76. Sýni 1031-VIId var jarðvegssýni tekið af gulleitum útfellingum neðan við sýni VIIa. Hitastigið var 40,9 og pH 5.

Sýnatökustaður 1031-VIII virtist áþekkur sýnatökustað 1031-VII, en minni og var því aðeins eitt sýni tekið þar (myndir 77 og 78).

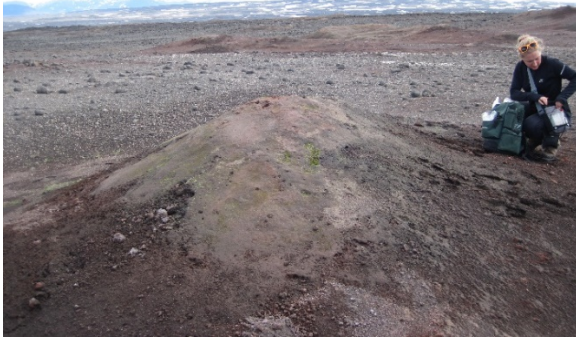


Mynd 77. Sýnatökustaður 1031-VIII einkenndist af gulleitum útfellingum og miklum þurrki.



Mynd 78. Sýni 1031-VIII var tekið af gulleitum útfellingum við 41°C og pH 5.

Sýni 1031-IX – XIII voru tekin í rauðum hólum neðan og austan við dyngjuna. Þar virtist vera sprunga sem liggur norður/suður og rýkur úr öðru hvoru á mörgum stöðum. Yfirborðshitinn var oftast á rauðbrúnum hólum á sprungunni, sem voru ekki eins skærrauðir og hólarnir á fyrsta svæðinu (1031-I-VI). Tvö sýni (a og b) voru tekin á sýnatökustað 1031-IX (myndir 79-81).



Mynd 79. Sýnatökustaður 1031-IX var á þessum hól.



Mynd 80. Sýni 1031-IXa var af svörtum og gráum jarðvegi við 77,1°C og pH 7.



Mynd 81. Sýni 1031-IXb var jarðvegssýni af rauðleitum leir sem tekið var úr auganu við 66,8°C og pH 7.

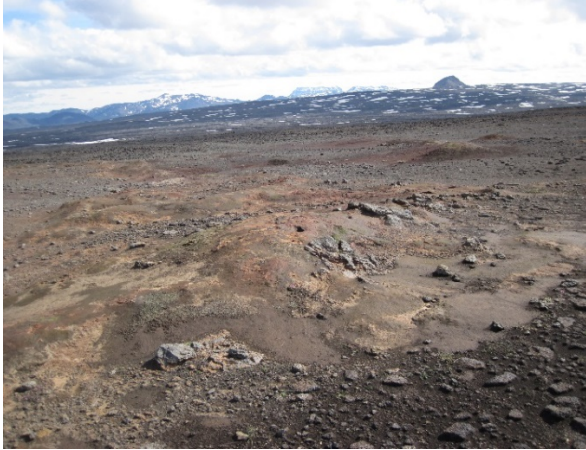
Á sýnatökustöðum 1031-X - XV var aðeins eitt sýni tekið á hverjum stað (myndir 82 –93).



Mynd 82. Sýnatökustaður 1031-X. Yfirlitsmynd.



Mynd 83. Sýni 1031-X var tekið úr röku gufuauga við 68,7 og pH 7.



Mynd 84.. Sýnatökustaður 1031-XI. Yfirlitsmynd.



Mynd 85. Sýni 1031-XI var tekið af rökum jarðvegi rétt neðan við gufuauga. Hitastigið var 53,9 og pH 7.



Mynd 86. Sýnatökustaður 1031-XII. Yfirlitsmynd.



Mynd 87. Sýni 1031-XII var tekið af sandi úr stóru, þurru gufuauga við 76,2°C og pH 7.

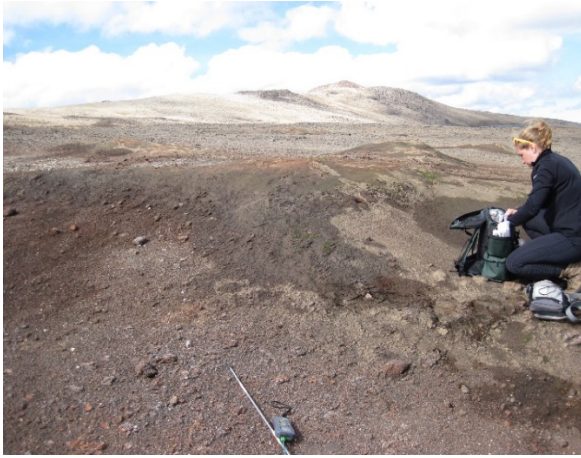


Mynd 88. Sýnatökustaður 1031-XIII Yfirlitsmynd.



Mynd 89. Sýni 1031-XIII var tekið af jarðvegi við augað við 44,3 og pH 7.

Sýnatökustaðir 1031-XIV og 1031-XV lágu á austur/vestur sprungu sem liggur út frá suður/norður sprungunni (myndir 90-93).



Mynd 90. Sýnatökustaður 1031-XIV. Yfirlitsmynd.



Mynd 91. Sýni 1031-XIV var tekið af brún-grænleitum jarðvegi við 73,9 og pH 7.



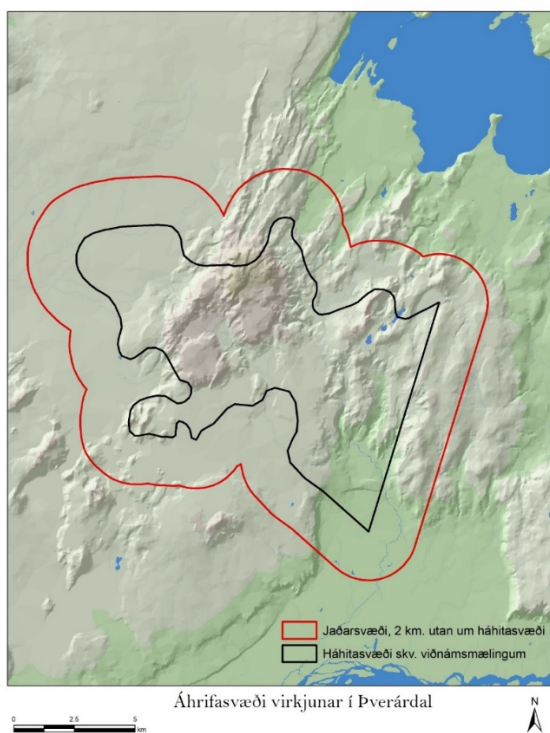
Mynd 92. Sýnatökustaður 1031-XV. Yfirlitsmynd.



Mynd 93. Sýni 1031-XV var úr þessu gufuauga við 78,3°C og pH 7.

2.1.3 Hengilssvæði

Mynd 94 sýnir afmörkun háhitasvæðis í Þverárdal og Innstadal skv. viðnámsmælingum (Þorleifur Eiríksson og Sigmundur Einarsson 2016).



Mynd 94. Áhrifasvæði virkjunar í Þverárdal og Innstadal. Svarta línan afmarkar háhitasvæðið skv. viðnámsmælingum og rauða línan gefur 2km jaðarsvæði (Þorleifur Eiríksson og Sigmundur Einarsson 2016).

2.1.3.1 Þverárdalur - sýnataka

Hverasvæðin í Þverárdal eru afar fjölbreytileg. Sýni til örverurannsókna voru tekin 15. sept. 2015 og voru tekin 37 sýni alls. Fjölbreytileg sýni voru tekin af jarðvegi, vökva og lífmassa úr gufuaugum, útfellingum, leirhverum, afrenslum og soðpönnum. Tafla 4 gefur yfirlit um sýnatökur og mynd 95 sýnir kortlagningu sýnatökustaða (Þorleifur Eiríksson og Sigmundur Einarsson 2016).

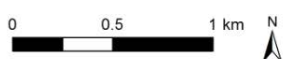
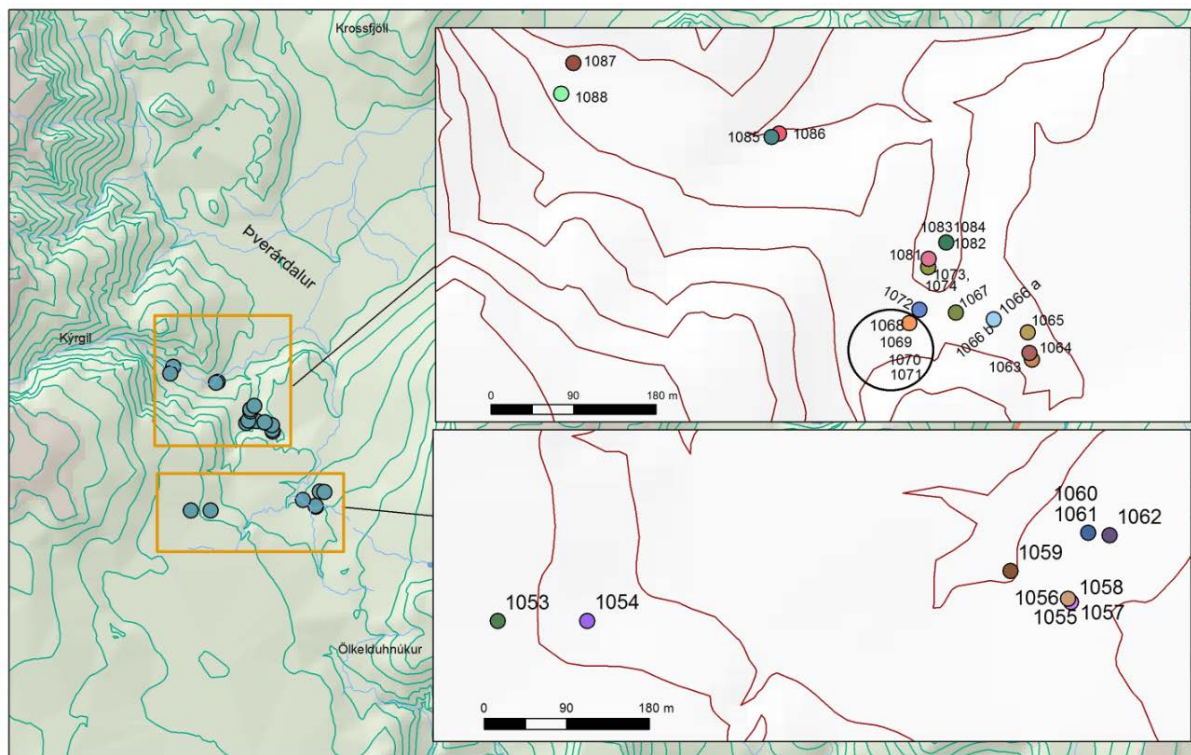
Tafla 4. Sýnatökustaðir í Þverárdal.

Sýni	GPS N	GPS W	T°C	pH	Gerð hvers	Lýsing á sýni
1053	64°03,592'	021°15,240'	74,0	6	Soðpanna.	Leðja og vatn.
1054	64°03,594'	021°15,120'	47,8	6	Afrennsli frá 1053. Tært vatn og leirhverir.	Vatn, leðja og froða.
1055	64°03,617'	021°14,478'	96,0	2,5	Brennisteinsþúfa.	Jarðvegssýni, grátt, gult, þurr.
1056	64°03,615'	021°14,474'	94,8	5	Í sama gili og 1055.	Vatn, mól og leðja.
1057	64°03,617'	021°14,478'	70,6	2,3	Brennisteinsþúfa.	Jarðvegssýni. Þurr.
1058	64°03,617'	021°14,478'	92,0	2,9	Rauðar, hvítar, bleikar útfellingar.	Jarðvegssýni.
1059	64°03,632'	021°14,556'	24,3	7	Gular útfellingar og þörungagróður.	Jarðvegur og lífmassi.
1060	64°03,656'	021°14,454'	97,0	3,2	Stór hvít skella. Þurr.	Jarðvegssýni grátt.
1061	64°03,656'	021°14,454'	95,0	3,5	Gul brennisteinshola.	Jarðvegssýni, brennisteinn.

1062	64°03,655'	021°14,425'	96,0	4	Stór hvítgrá skella.	Jarðvegssýni. Grár leir v. gufuauga.
1063	64°03,813'	021°14,755'	55,0	7	Lækur frá Hávaða-helli. Þörungagróður.	Lífmassi. Græn motta.
1064	64°03,817'	021°14,759'	69,8	6,7	Ljósar útfellingar í hlíð.	Jarðvegssýni. Útfellingar.
1065	64°03,829'	021°14,762'	53,2	7	Þörungamottur, grænar og gulbrúnar.	Lífmassi og Jarðvegur.
1066 a	64°03,836'	021°14,808'	43,5	6,5	Þörungabeikja.	Þörungabeikja.
1066 b	64°03,836'	021°14,808'	43,5	6,5	Áberandi þörungabeikja.	Skærgæn þörungabeikja.
1067	64°03,839'	021°14,859'	30,0	3,9	Hvítgrá skella við læk.	Hvítgrá og græn slikja.
Sýni 1068-1071 Margar opnur ofarlega í hlíð						
1068	64°03,832'	021°14,921'	73,6	3,7	Grábrún opna.	Vatn og leðja.
1069	64°03,832'	021°14,921'	73,0	4,1	Grá bullandi opna.	Vatn og leðja.
1070	64°03,832'	021°14,921'	84,1	3,2	Hvít bullandi opna 10cm í þvermál.	Vatn og hvít leðja.
1071	64°03,832'	021°14,921'	88,4	3,9	Brún bullandi opna.	Vatn og leðja.
1072	64°03,840'	021°14,908'	93,0	4	Neðar í sömu hlíð. Brúnleitur hver.	Vatn og leðja.
1073	64°03,865'	021°14,898'	93,2	-	Grár bullandi hver við læk.	Gruggugt vatn.
1074	64°03,865'	021°14,898'	42,2	-	Veggur ofan goshvers m. þykkum gróðri.	Lífmassasýni. Grátt, grænt, rautt.
1075	64°03,870'	021°14,898'	68,7	6,8	Leirhver bullar.	Vatn og leðja.
1076	64°03,870'	021°14,898'	84,2	7	Leirhver sami og 1075.	Grá drulla og vatn.
Sýni 1077-1084 Pollur með mörgum mismunandi opnum						
1077	64°03,880'	021°14,875'	84,7	7	Rauður „hellir“.	Vatn og möl.
1078	64°03,880'	021°14,875'	59,8	7	Opna í polli.	Lífmassi. Þræðir.
1079	64°03,880'	021°14,875'	56,7	7	Bullandi auga.	Leðja og vatn.
1080	64°03,880'	021°14,875'	53,7	6,5	Leirhver, bullandi auga, gráhvítt í kring.	Leðja og vatn.
1081	64°03,880'	021°14,875'	75,1	6	Hvítt loftbólugauga.	Leðja og vatn.
1082	64°03,880'	021°14,875'	75,1	6	Hvítgrá uppspretta.	Jarðvegssýni
1083	64°03,880'	021°14,875'	54,1	7	Grænt í miðju.	Græn motta.
1084	64°03,880'	021°14,875'	66,1	7	Gulbrún motta.	Brún motta.
1085	64°03,940'	021°15,104'	92,3	-	Bullandi leirhver.	Leðja og vatn.

1086	64°03,938'	021°15,114'	91,7	7 - 8	Við 1085. Tært vatn, grænt í kring.	Vatn og grænn massi.
1087	64°03,977'	021°15,382'	98,9	4	Járn- brennisteins- útfellingar. Leir.	Jarðvegssýni, þurrt.
1088	64°03,959'	021°15,397'	94,1	3,8	Ofan við á. Rautt, grátt, gult og hvítt.	Þurr jarðvegur.

Skýringar: - = upplýsingar vantar



Örverurannsóknir í Þverárdal



Mynd 95. Kort af sýnatökustöðum í Þverárdal (Kort: Adam Hoffritz).

Myndir 96- 137 hér á eftir eru af sýnatökustöðum í Þverárdal.



Mynd 96. Sýni 1053 og 1054 voru tekin á þessum stað. Yfirlitsmynd.



Mynd 97. Sýni 1053 var tekið af leirju og vatni úr soðpönnu við 74°C og pH 6.



Mynd 98. Sýni 1054 var tekið af vatni, leðju og froðu úr afrennsli frá 1053 við 47,8°C og pH 6.



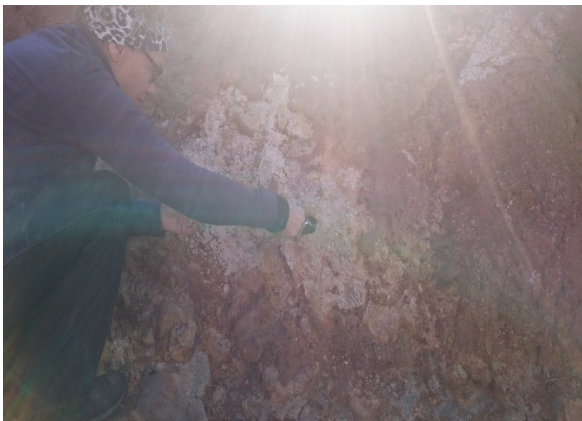
Mynd 99. Sýni 1055 var jarðvegssýni – grátt, gult og þurrt - úr brennisteinsþúfu við 96°C pH 2,5.



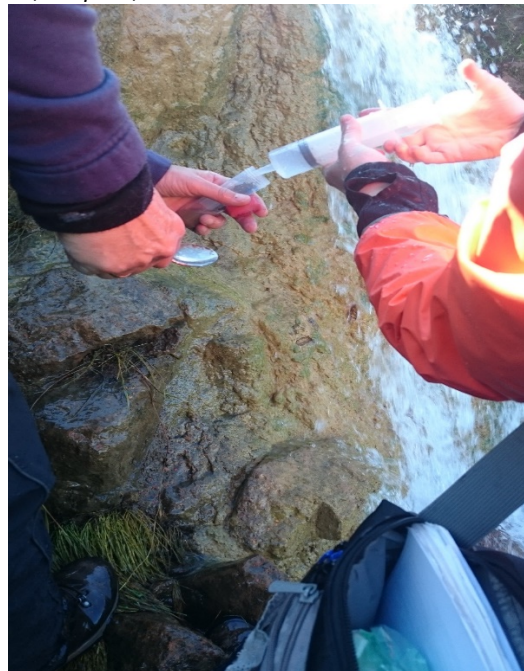
Mynd 100. Sýni 1056 af vatni möl og leðju, úr bullandi hver milli steina, var tekið í sama gili og 1055. Sýnið var tekið við 94,8°C og pH 5.



Mynd 101. Sýni 1057 var jarðvegssýni tekið úr brennisteinsþúfu 2m neðar en 1055. Hitastigið var 70,6°C pH 2,5.



Mynd 102. Sýni 1058 var jarðvegssýni af rauðum, hvítum og bleikum útfellingum í hlíð, hinum megin lækjar – gps sami og 1055. Hitastigið var 92°C pH 2,9.



Mynd 103. Sýni 1059 var tekið af gulum útfellingum og þörungagróðri í afrennsli úr gili 1055-1058 við 24,3°C og pH 7.

Sýni 1060-1062 voru tekin úr stórrí ljósri skellu (N 64°03,656'V 021°14,454') (myndir 104-107).



Mynd 104. Yfirlitsmynd af sýnatökustöðum 1060, 1061 og 1062.



Mynd 105. Sýni 1060 var tekið af gráum og gulum jarðvegi úr ljósu skellunni við 97°C og pH 3,2.



Mynd 106. Sýni 1061 var jarðvegssýni tekið úr brennisteinsholu við 95°C og pH 3,5.



Mynd 107. Sýni 1062 var jarðvegssýni af fínkornóttum, rökum, hvítleitum leir við gufuauga. Hitastigið var 96°C og pH 4.

Staðsetning sýnatökustaða 1063-1088 er sýnd á mynd 108.



Mynd 108. Staðsetning sýnatökustaða 1063-1088 í Þverárdal.

Sýni 1063-1066 voru tekin úr afrennislæk neðan „Hávaðahellis“ (nafngift höfunda) (myndir 109- 113).



Mynd 109. Hávaðahellir. Afrennislækurinn sést til hægri á myndinni.



Mynd 110. Sýni 1063 var tekið af grænni þörungapekju úr læk neðan Hávaðahellis. Hitastigið var 55°C og pH 7.



Mynd 111. Sýni 1064 var tekið af jarðvegi – ljósum útfellingum og mold við uppsprettu í hlíð nálægt Hávaðahelli. Hitastigið var 69,8 og pH 6,7.



Mynd 112. Sýni 1065 var tekið af grængulum þörungapekjum neðar í afrennislæknum við 53,2°C og pH 7.

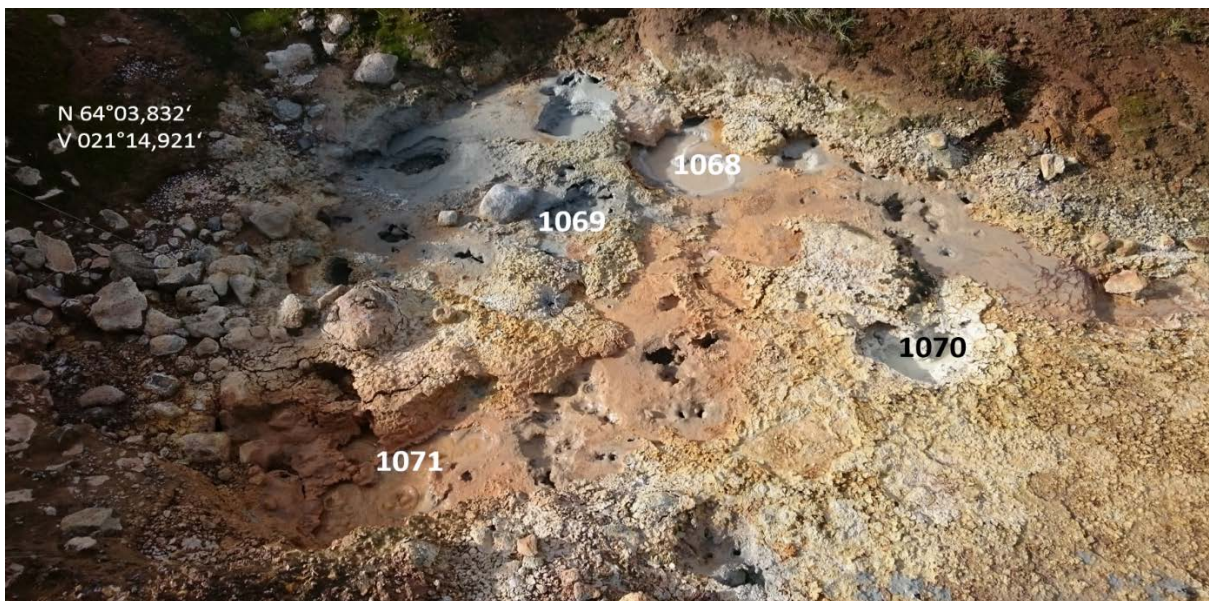


Mynd 113. Sýni 1066 var tekið af skærgrænni þörungapækju á steini fimm metrum neðar í sama læk. Hitastigið var 43,5°C og pH 6,5.



Mynd 114. Sýni 1067 var af grænleitri sliktu yfir gráleitum jarðvegi við 30 T°C og pH 3,9.

Sýni 1068-1071 voru tekin úr nokkrum litlum (10-20cm), mislitum opnum á litlu (2 x 1,5m ca) svæði (myndir 115 - 119). Sýrustigið var fremur lágt (pH 3,2 -4,1), en hitastigið á bilinu 73-88°C.



Mynd 115. Yfirlitsmynd sem sýnir sýnatökustaði 1068-1071.



Mynd 116. Sýni 1068 var tekið af vatni og leðju úr þessari grábrúnu opnu við 73,6°C og pH 3,7.



Mynd 117. Sýni 1069 var tekið af leðju úr þessari gráu bullandi opnu við 73°C og pH 4,1.



Mynd 118. Sýni 1070 var tekið af vatni og hvítri leðju úr þessari bullandi opnu við 84,1°C og pH 3,2.



Mynd 119. Sýni 1071 var tekið af leðju úr þessari brúnu bullandi opnu við 88,4°C og pH 3,9.

Sýni 1072 – 1076 (myndir 120-124) voru tekin í sama lækjargili (mynd 108) og sýni 1063 – 1071.



Mynd 120. Sýni 1072 var tekið af leðju úr brúnleitum hver neðan við sýnatökustað 1071. Hitastigið var 93°C og pH 4.



Mynd 121. Sýni 1073 var tekið af gruggugu vatni úr bullandi hver við læk. Hitastigið var 93,2°C.



Mynd 122. Sýni 1074 var jarðvegssýni grátt á yfirborði en dökkgrænt og rauðgult undir. Hitastigið var 42,2°C en heitt vatn, 96,6°C skvettist yfir sýnatökustaðinn.



Mynd 123. Sýni 1075 var tekið við 68,7°C og pH 7 af vatni og leðju úr þessum bullandi hver.



Mynd 124. Sýni 1076 var tekið af leir og vatni úr þessum leirhver við 84,2°C og pH 7.

Mynd 125 er yfirlitsmynd af polli með misdreifðum, mislitum opnum - sýnatökustöðum 1077 – 1084 fremst í gílinu. Einstakar opnur eru svo sýndar á myndum 126 – 133. Sýrustig í opnunum var á bilinu pH 6-7. Hitastigið var breytilegra eða á bilinu 53 - 85°C.

Yfirlitsmynd 1077-1084

N 64°03,880'
V 021°14,875'



Mynd 125. Sýnatökustaðir 1077-1084. Litlar, mismunandi opnur í polli á afmörkuðu svæði (ca 1,5 x 2,5m).



Mynd 126. Sýni 1077 var tekið við 84,7°C og pH 7 af vatni og mól innan úr „hellisopinu“ á myndinni.



Mynd 127. Sýni 1078 var lífmassasýni, tekið af brúnum þráðum og vatni við 59,8°C og pH 7.



Mynd 128. Sýni 1079 var tekið af sandi og vatni úr þessu dökkgráa bullandi auga við 56,7°C og pH 7.



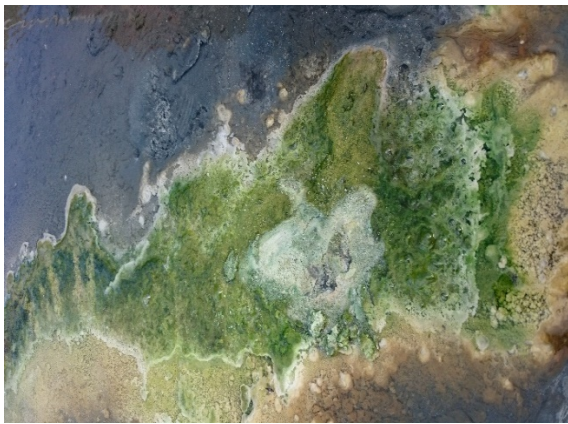
Mynd 129. Sýni 1080 var tekið af hvítum útfellingum og vatni við grátt bullandi auga. Hitastigið var 53,7°C og pH 6,5.



Mynd 130. Sýni 1081 var tekið af jarðvegi og vatni úr þessum hvítleita loftbólshver við 1081 75,1°C og pH 6.



Mynd 131. Sýni 1082 var tekið af hvítgráum jarðvegi við þessa uppsprettu sem var 75,1°C og pH 6.



Mynd 132. Sýni 1083 var tekið við 54,1°C og pH 7 af grænni mottu í miðjum polli.



Mynd 133. Sýni 1084 var tekið við 66,1°C og pH 7 af brúnleitum lífmassa.

Sýni 1085 og 1086 voru tekin við lækinn í mynni Kýrgils, en sýni 1087 var tekið innar í gilinu við lækinn og 1088 fyrir ofan gilið. Sýnatökustaðina má sjá á myndum 134 – 137.



Mynd 134. Sýni 1085 var tekið af leðju við 92,3°C úr þessum bullandi leirhver.



Mynd 135. Sýni 1086 var tekið af vatni og grænum lífmassa við 91,7°C og pH 7-8.

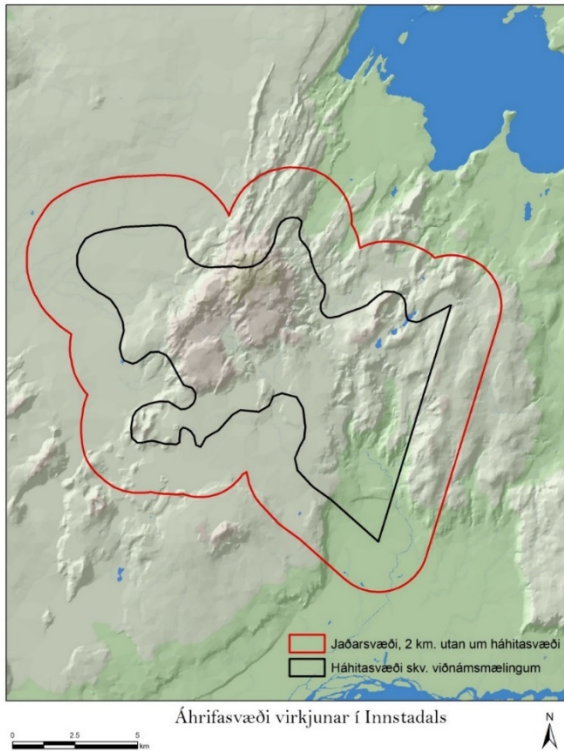


Mynd 136. Sýni 1087 var jarðvegssýni af gráum og þurrum leir við 98,9°C og pH 4. Járn- og brennisteins-útfellingar voru áberandi.



Mynd 137. Sýni 1088 var tekið af þurrum jarðvegi úr litríkri hitaskellu ofan við ána. Hitastigið var 94,1°C og pH 3,8.

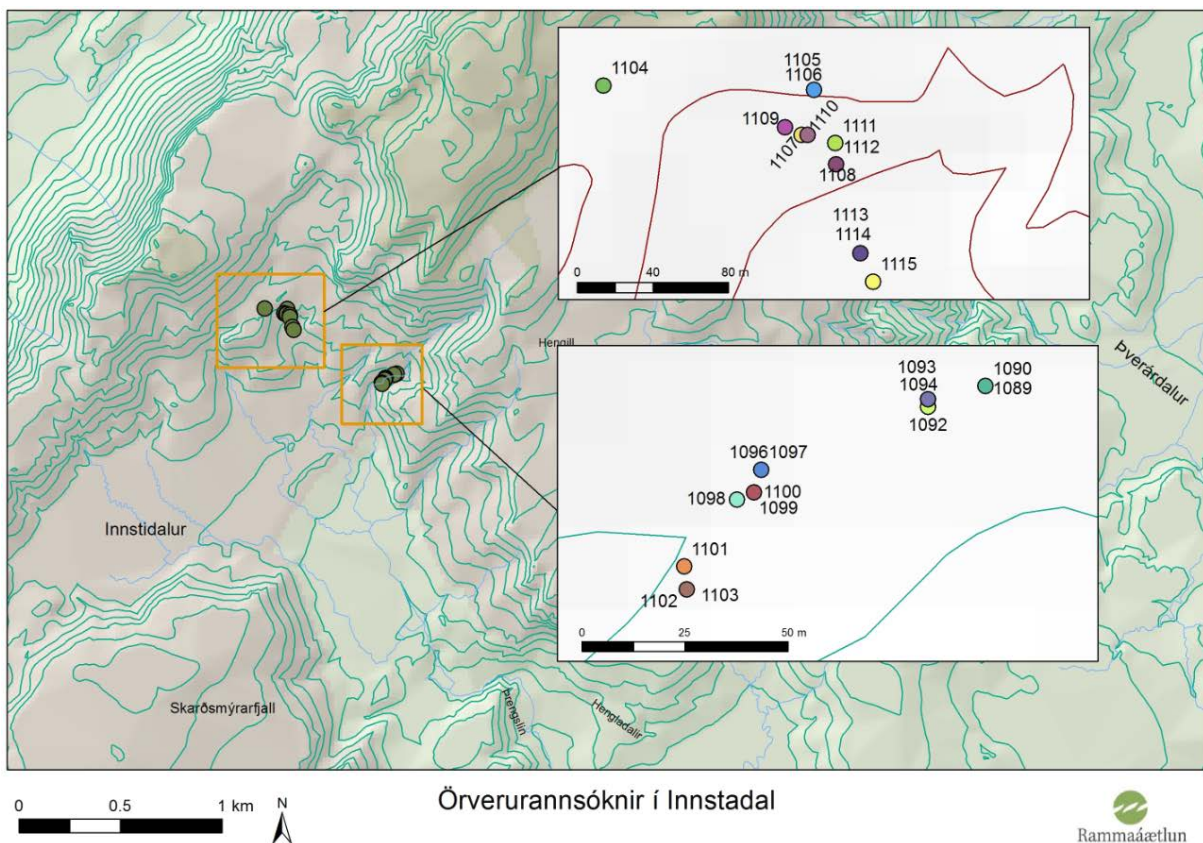
2.1.3.2 Innstidalur - sýnataka



Mynd 138. Áhrifasvæði virkjunar í Innstadal, afmörkun háhitasvæðis og jaðarsvæðis (Þorleifur Eiríksson og Sigmundur Einarsson 2016).

Yfirborðsjarðhiti finnst á nokkrum stöðum í Innstadal, en sá virkasti er í gili skammt frá litlum skála á svæðinu. Mynd 138 sýnir áhrifasvæði virkjunar í Innstadal, afmörkun háhitasvæðis og jaðarsvæðis. Mynd 139 gefur upplýsingar um staðsetningu sýnatökustaða en 27 sýni voru tekin úr fjölbreyttum hverum og afrennslum frá þeim 16. september 2015. Tafla 5 gefur upplýsingar um einstök sýni.

Sýni 1089 – 1103 voru tekin í gili nu skammt frá skálanum, en sýni 1104 -1114 úr vestara gili þar sem ölkeldur voru nokkuð áberandi. Sýni voru tekin þar þrátt fyrir að hitastigið væri fremur lágt. Sýni 1115 var tekið neðst í gili nu.



Mynd 139. Sýnatökustaðir fyrir örverurannsóknir í Innstadal sýndir á korti (Adam Hoffritz).

Tafla 5. Innstidalur. Sýnatökutafla.

Sýni	GPS N	GPS W	T°C	pH	Lýsing á hver	Lýsing á sýni
1089	64°04,207'	021°19,326'	70,9	4	Uppsprettur. Svört sandaugu, grátt í kring.	Vatn, sandur og leir
1090	64°04,207'	021°19,326'	87,4	3	Bullandi hver, minnir á soðpönnu.	Vatn, sandur og leir
1091	-	-	97,0	2,5	Gular og gráar útfellingar, þurrt og hart.	Jarðvegssýni
1092	64°04,204'	021°19,343'	96,0	7	Bullandi hver.	Vatn sandur og leir
1093	64°04,205'	021°19,343'	88,0	3,1	Gult brennisteinsauga.	Jarðvegssýni
1094	64°04,205'	021°19,343'	96,0	3,4	Brúnt og gult – rýkur úr. Þurr jarðvegur.	jarðvegssýni
1095	64°04,195'	021°19,392'	54,0	6,5	Ljós – hvít motta, bullar.	Sandur vatn og hvít gul motta
1096	64°04,195'	021°19,392'	65-70	8	Dökkgrátt bullandi auga.	Leðja og vatn
1097	64°04,195'	021°19,392'	37,0	7	Græn þörungaslikja.	Lífmassasýni
1098	64°04,192'	021°19,394'	20,0	7	Græn slikja og olíubræk á polli.	Lífmassasýni
1099	64°04,192'	021°19,394'	35,0	7	Gráir þræðir.	Lífmassi
1100	64°04,191'	021°19,399'	65,0	5,6	Gufuauga við læk. Þurr sandur, mól og brennisteinn.	Jarðvegssýni
1101	64°04,182'	021°19,414'	88,5	3	Efst í stórri hvítri skellu. Vatns-leir hver – bullar.	Leir og vatn
1102	64°04,179'	021°19,413'	86,0	2	Soðpanna. Goshver með grófri mól.	Mól og vatn
1103	64°04,179'	021°19,413'	77,0	2	Sama soðpanna. Grátt bullandi auga.	Leðja og vatn
1104	64°04,367'	021°20,014'	36,0	-	Ölkelda – bullandi uppspretta.	Jarðvegur – járnrikur og vatn
1105	64°04,368'	021°20,003'	37,0	6	Ölkelda uppspretta 1m neðar.	Rauðleitir jarðvegur og vatn
1106	64°04,368'	021°20,003'	36,0	6	Grænar þörungamottur og bræk ofan á vatninu.	Lífmassi og bræk
1107	64°04,357'	021°20,021'	16,0	6	Kulnandi hver. Hvítur gróður, minnir á súlfíðbakteríur.	Lífmassi og jarðvegur
1108	64°04,355'	021°20,010'	22,0	7	Hvítur gróður og þörungar. (Svipað Hærulangi Vonarskarði).	Lífmassi, bæði grænt og hvítt í sýninu.
1109	64°04,355'	021°20,010'	22,0	6,5	Grænn og hvítur gróður.	Lífmassi
1110	64°04,355'	021°20,006'	15,0	6	Svart bullandi auga, sandur og brúnt í kring.	Jarðvegur og vatn
1111	64°04,353'	021°19,988'	23,2	6	Hvítur pollur. Uppsprettur. Svört augu.	Svart og hvítt
1112	64°04,347'	021°19,987'	16,0	7	Hvítur gróður eða útfellingar í afrennsli.	Grængult sýni
1113	64°04,322'	021°19,969'	15,0	6	Uppspretta, svart auga bullar.	Sandur / leðja og vatn
1114	64°04,322'	021°19,969'	18,0	6,5	Uppspretta grátt / hvítt í sama polli og 1113.	Jarðvegur og lífmassi
1115	64°04,314'	021°19,960'	96,0	2,8	Brennisteinsauga. Þurr sandur, svartur grár og gulur.	Jarðvegssýni.

Skýringar: - = upplýsingar vantar

Sýni 1089 – 1103 voru tekin úr hverum, gufuaugum og afrennslum þar sem jarðhitavirknin var hvað mest (myndir 140-154).



Mynd 140 a og b (fjær og nær). Sýni 1089 var tekið af vatni, leir og sandi úr bullandi uppsprettu við 70,9°C og pH 4.



Mynd 141. Sýni 1090 var tekið úr bullandi hver af leir og vatni við 87,4°C og pH 3.



Mynd 142. Sýni 1091 var jarðvegssýni tekið af þurrum, gulum og gráum útfellingum við 97°C.



Mynd 143. Sýni 1092 var tekið af vatni, sandi og leir úr þessum bullandi hver við 96°C og pH 7.



Mynd 144. Sýni 1093 var jarðvegssýni tekið úr brennisteinsauga við 88°C pH 3,1.



Mynd 145. Sýni 1094 var tekið rétt við 1093, en nú af ljósbrúnum útfellingum við 96°C og pH 4.



Mynd 146. Sýni 1095 var tekið af sandi, vatni og hvítum gróðri eða útfellingum úr bullandi hver við 54°C og pH 6,5.



Mynd 147. Sýni 1096 var tekið af dökkgrárri leðju úr bullandi auga rétt við 1095 við 65-70°C og pH 8.



Mynd 148. Sýni 1097 var tekið nánast á sama stað og 1095 en við lægra hitastig og pH eða 37°C pH 7. Sýnið var lífmassasýni af grænni þörungaslíkja.



Mynd 149. Sýni 1098 var lífmassasýni tekið af brúngrænni sliktu sem sést neðst í vinstra horni myndarinnar. Hitastigið var 20°C og pH 7.



Mynd 150. Sýni 1099 var lífmassasýni af gráum þráðum tekið rétt hjá 1098. Hitastigið var 35°C og pH 7.



Mynd 151. Sýni 1100 var þurr jarðvegssýni tekið af sandi, mól og gulleitum útfellunum úr þessu gufuauga. Hitastigið var 65°C og pH 5,6.



Mynd 152. Sýni 1101 var tekið af leir og vatni úr þessum bullandi leirhver. Hitastigið var 88,5°C og pH 3.



Mynd 153. Sýni 1102 var tekið af mól og vatni úr þessum litla goshver við 85-87°C og pH 2.



Mynd 154. Sýni 1103 var tekið af leðju úr gráu bullandi auga rétt hjá 1102. Hitastigið var 75-80°C og pH 2.

Í næsta gili – hér nefnt „Ölkeldugil“ voru ölkeldur mjög áberandi og var ákveðið að taka sýni úr þeim líka, þrátt fyrir að hitastigið væri mun lægra eða allt niður í 16°C. Þar voru líka kulnaðir hverir þar sem leifar af súlfíðbakteríuþekjum voru sýnilegar (myndir 155-165).



Mynd 155. Sýni 1104 var tekið af rauðleitum (járnríkum) jarðvegi og vatni við 36°C.



Mynd 156. Sýni 1105 var tekið af rauðleitum jarðvegi og vatni úr þessari uppsprettu við 37°C og pH 6.



Mynd 157. Sýni 1106 var tekið við 36°C og pH 6 rétt neðan við 1105. Sýnið var lífmassasýni tekið af þörungakekjum og brák á vatninu.



Mynd 158. Sýni 1107 var hvítt lífmassasýni tekið úr þessum kulnaða hver þar sem hitastig mældist aðeins 16°C og pH 6. Hvítur gróður í hvernnum minnir á súlfíðbakteríur.



Mynd 159. Tvö sýni voru tekin hér.

Sýni 1108 (ofar á mynd) var tekið af hvítum lífmassa við 22°C og pH 7.

Sýni 1109 (neðar á mynd) var tekið af hvítum og grænum lífmassa við 22°C pH 6,5.



Mynd 160. Sýni 1110 var tekið af jarðvegi og vatni úr svartri, bullandi uppsprettu við 15°C og pH 6.



Mynd 161. Sýni 1111 var tekið úr þessum hvíta og svarta polli við 23,2°C og pH 6.



Mynd 162. Sýni 1112 var tekið úr afrennsli. Sýnið var af grængulum lífmassa við 16°C og pH 7.



Mynd 163. Sýni 1113 var tekið úr þessari svörtu, bullandi uppsprettu við 15°C og pH 6. Sýnið samanstóð af sandi, leðju og vatni.



Mynd 164. Sýni 1114 var jarðvegs - lífmassasýni tekið úr þessari gráhvítu uppsprettu við 18°C og pH 6,5.



Mynd 165. Sýni 1115 var þurrt jarðvegssýni tekið af sandi og gráum og gulum útfellingum úr þessu auga neðst í Ölkeldugili. Hitastigið var 96°C og pH 2,8.

2.4 Erfðagreiningar

Upplýsingar um hitakærar örverur á jarðhitasvæðunum sem könnuð voru í þessari rannsókn voru af skornum skammti. Á Reykjanesvæðinu voru til upplýsingar um örverur í Seltúni í Krýsuvík og Gunnhver vegna RÁ2 (Sólveig K. Pétursdóttir o.fl. 2007). Ennfremur voru til upplýsingar úr Seltúni um Fornbakteríur (Mirete o.fl. 2011) og *Korarchaeota* (Reigstad o.fl. 2010). Ekkert lá hins vegar fyrir um örverur í hverasvæðunum við Trölladyngju og Austurengjahver á Reykjanesvæðinu, né heldur um örverur í Fremrinámum. Nokkrar upplýsingar lágu fyrir um hverasvæði í Henglinum og þá sérstaklega úr rannsókn sem gerð var á vegum RÁ2 á Ölkelduhálsi 2004 (Viggó Þ. Marteinsson o.fl. 2004) og ennfremur úr rannsókn um kalkríka hveru á Ölkelduhálsi (Sólveig K. Pétursdóttir o.fl. 2008).

Aðferðafræði erfðagreininga sem hér var beitt skilar mun meira gagnamagni en sú sem áður var notuð hjá Matís í RÁ2. Nokkuð sannfærandi heildarmynd fékkst af fylkingum sem fundust á hverju svæði, hlutföllum þeirra og fjölda tegunda (OTU). Niðurstöðurnar bjóða upp á samanburð á ýmsum flokkunarstigum, en hér er aðallega fjallað um fylkingar, en farið á fínni stig flokkunar þegar við á. Með hugbúnaði eins og Qiime (Caporaso o.fl. 2010) sem hér var notaður má svo kafa dýpra og skoða nánar ættfræði einstakra hópa eins og gert er í umfjölluninni í köflunum hér á eftir um erfðagreiningar af einstökum svæðum.

Til þess að árangur náist við erfðagreiningar þarf ákveðnum skilyrðum að vera fullnægt: (i) Nægilegt magn af DNA þarf að nást úr sýninu, (ii) mögnun (PCR) verður að takast og (iii) raðgreining verður að takast. Misvel tókst að einangra DNA úr sýnunum og í sumum tilvikum náðist ekki að einangra nægilegt DNA þrátt fyrir endurtekningar. Stundum tókst að magna og raðgreina bæði Fornbakteríu- og Bakteríu 16S rRNA genið úr sýninu, en stundum aðeins úr öðrum hópnum. Tafla 6 gefur upplýsingar um hvernig til tókst með raðgreiningar á sýnum á einstök svæðum.

Í heildina náðust raðgreiningar upp úr 69 sýnum af 118 eða 59% (tafla 6). Sé litið á einstök sýnatökusvæði sést að almennt er árangurinn um og yfir 60%, nema í Fremrinámum þar sem hann var 46% (tafla 6). Skýringin á þessu er væntanlega sú að sýnin úr Fremrinámum voru öll jarðvegssýni, af tiltölulega þurrum jarðvegi í mörgum tilvikum, þar sem lífs var vart að vænta. Þar strandaði oftast á því að ekki náðist að einangra DNA fyrir frekari skref. Önnur sýnatökusvæði voru vatnsríkari og fjölbreyttari hvað varðar gerð hvera og þar með gerðir sýna.

Tafla 6. Tölulegar upplýsingar um úrvinnslu sýna og raðgreiningar á þeim.

Svæði	Fj. sýna alls	Fj. sýna raðgr.	% sýna raðgr.	Fj. raða úr MiSeq*	Fj. 16S raða Qiime	Fj. teg. (OTU)	Fj. fylkinga
Austurengjahver	18	11	61%	3.450.796	789.462	11.019	28
Trölladyngja	8	5	63%	1.205.871	286.039	8.791	20
Fremrinámar	28	13	46%	2.338.989	968.699	12.222	29
Þverárdalur	37	22	60%	5.483.337	1.528.873	42.167	51
Innstidalur	27	18	67%	6.975.743	2.176.174	39.861	49
Alls	118	69	59%	19.454.736	5.749.247		

*Í MiSeq raðgreiningum er hver DNA bútur raðgreindur í báðar áttir, þar af leiðandi verður fjöldi 16S raða sem fást úr slíkri raðgreiningu u.þ.b. helmingur þess sem gefið er upp hér.

Fjöldi raða sem fengust úr MiSeq voru tæplega 20 milljónir alls sem skiptust mismunandi á milli jarðhitasvæða (tafla 6). Þannig fengust fæstar raðir úr Trölladyngju, eða ca 1,2 milljónir en flestar eða tæplega 7 milljónir úr Innstadal. Þessar raðir voru svo hreinsaðar áfram í Qiime forritinu og fækkaði þá umtalsvert og urðu tæplega 6 milljónir 16S rRNA genaraða alls, fæstar í Trölladyngju, eða 286.039 og flestar í Innstadal, eða rúmlega 2 milljónir (tafla 6). Hver röð sem fæst úr MiSeq má segja að tákni helminginn af 16S rRNA genaröðinni þar sem tækið raðgreinir í báðar áttir

Fjöldi tegunda, eða OTUs (Operational Taxonomic Units) miðaðist við flokkun 16S rRNA genaraða við $\geq 97\%$ samsvörun, sem er sú viðmiðun sem löngum hefur verið notuð fyrir afmörkun tegunda. Þverárdalssýnin innihéldu flestar tegundir, sem kom ekki verulega á óvart, í ljósi þess hve fjölbreytileiki hveragerða í dalnum er mikill. Fjöldi tegunda í sýnum úr Fremrinámum kom nokkuð á óvart, þar sem svæðið virtist mjög einsleitt yfir að líta og því ekki búist við slíkri fjölbreytni sem raun ber vitni (tafla 6).

Með samanburði við Silva gagnagrunninn <http://www.arb-silva.de/> (Quast o.fl. 2013) sem hýsir gríðarlegt magn 16S rRNA genaraða víðsvegar að úr heiminum og er uppfærður reglulega og einnig við NCBI gagnagrunninn <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/> (Altschul o.fl 1990) tókst að greina og flokka raðirnar úr sýnunum.

Fjöldi fylkinga sem náðist að greina af hverju svæði sést í töflu 6. Flestar fylkingar fundust í sýnum úr Þverárdal en fæstar í Trölladyngju, sem kom ekki á óvart þar sem um gjörólík svæði er að ræða varðandi fjölbreytni jarðhita á yfirborði og fjölda sýna sem tekin voru.

Hér á eftir er fjallað um árangur raðgreininga af einstökum svæðum og úr einstökum sýnum. Ennfremur er gerð grein fyrir hlutföllum helstu fylkinga og í sumum tilvikum hópum innan þeirra. Gagnamagnið úr Qiime er of mikið til að hægt sé að koma því fyrir í skýrslu sem þessari og eru því einkum upplýsingar sem sýna fylkingar sýndar hér en aðrar upplýsingar settar fram í texta þegar þurfa þykir. Hafa ber í huga að tegundafjöldi innan fylkinga getur verið afar mismunandi. Sem dæmi má nefna *Proteobakteríur* sem er stór fylking sem telur nokkrar undirfylkingar (α -, β -, γ -, δ - og ϵ) og fjölmargar ættkvíslir innan þeirra og enn fleiri tegundir.

2.4.1 Trölladyngja - erfðagreiningar

Tafla 7. Trölladyngja: 5 sýni raðgreind af 8 sýnum alls (62,5%).

Sýni	T°C	pH	Gerð sýnis	Raðgreint*	
1028	56,2	-	Jarðvegur við gufuop.	A	B
1029-Ia	87,8	5	Vatn og leðja við opnu.		
1029-Ib	93,5	5	Vatn og leðja við opnu.	A	B
1029-Ic	27,4	5	Jarðvegur. Rauðar og gular útfellingar.		B
1029-IIa	96,0	5	Grár leir úr opnu.		
1029-IIb	96,0	5	Rauðleitur leir úr opnu.	A	B
1030-a	97,0	-	Jarðvegur úr hitaskellu.		
1030-b	45,0	-	Jarðvegur úr hitaskellu.	A	B
ALLS 8				4	5

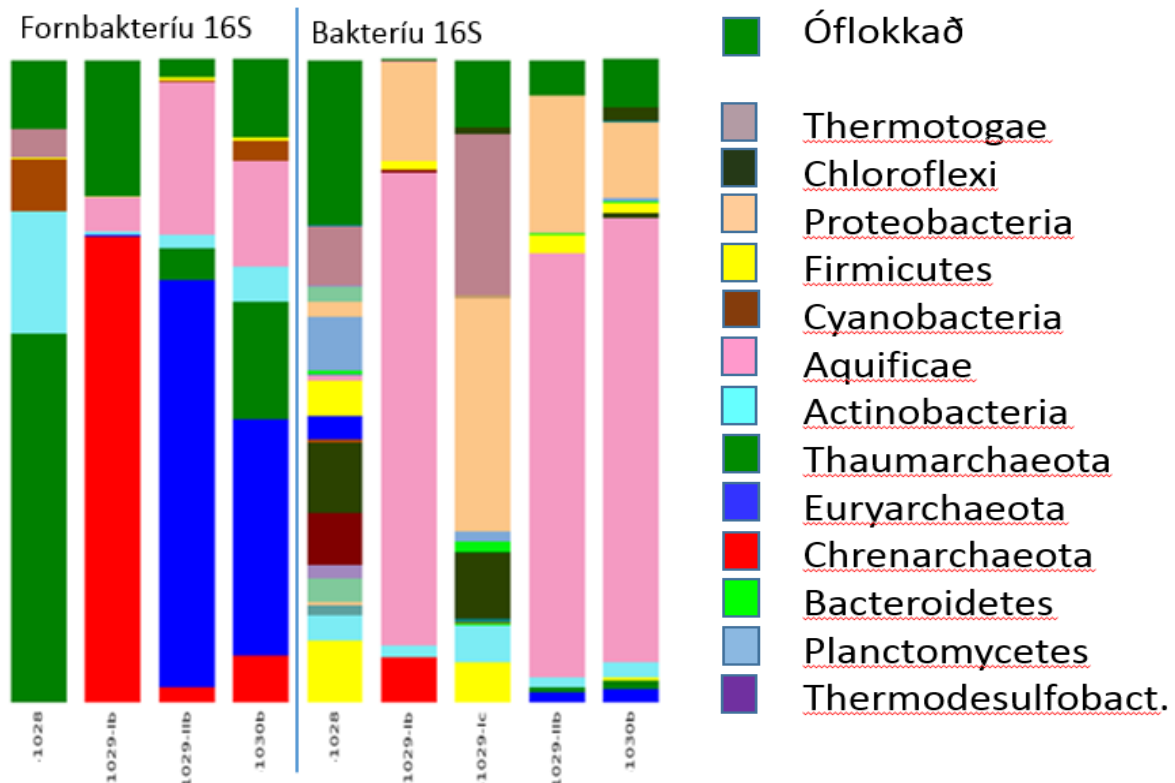
*A=Archaea=Fornbakteríur, B=Bakteríur. - = upplýsingar vantar.

Úr átta sýnum af Trölladyngjusvæðum tókst að raðgreina fimm, þar af fjögur með báðum vísapörum þ.e. Fornbakteríu- og Bakteríuvísunum (A og B) og eitt með Bakteríuvísunum eingöngu (tafla 7).

Mynd 166 sýnir hlutföll fylkinga úr einstökum sýnum úr Trölladyngju. Efsti hluti hvernar súlu sýnir hlutfall óflokkaðra raða, þ.e. raða sem ekki fannst samsvörun fyrir í Silva gagnagrunninum og gefur því nokkra vísbendingu um fágæti.

Eins og sjá má á mynd 166 voru *Crenarchaeota*, *Euryarchaeota* og *Thaumarchaeota* fylkingar Fornbaktería fyrirferðarmiklar í mismunandi sýnum. *Crenarchaeota* fornbakteríur eru afar algengar í hverum, enda frumbjarga. Helstu ættkvíslir innan *Crenarchaeota* voru *Sulfolobus* og *Stygiolobus* sem eru algengar á hverasvæðum bæði innan lands og utan. *Euryarchaeota*, einnig frumbjarga, voru í talsverðu magni en þær finnast almennt fremur við lægri hitastig en *Crenarchaeota* og oft í tengslum við metan efnaskipti. *Euryarchaeota* ættkvíslir sem fundust í

sýnunum voru *Halobacteria* og *Thermoplasma*. *Thaumarchaeota* fylkingin inniheldur einnig frumbjarga tegundir sem margar hverjar oxa ammonium. Þær eru taldar gegna veigamiklu hlutverki í efnahringrásum köfnunarefnis og kolefnis. Ekki tókst að finna samsvörun við hópa innan *Thaumarchaeota* í Silva gagnagrunninum, einungis upplýsingar um hvort samsvörunin væri við hópa sem höfðu fundist í sjó eða í landhverum, eða við hópinn „ýmislegt“ („miscellaneous“). *Thaumarchaeota* fylkingin er því fremur illa skilgreind innbyrðis.



Mynd 166. Súlurit sem sýnir hlutföll helstu fylkinga í sýnum úr Trölladyngju sem fengust úr raðgreiningum úr DNA mögnun á Fornbakteríu- og Bakteríu 16S rRNA genum. Fleiri fylkingar fundust í sýnunum (sjá töflu 12). Efsti hluti súlunnar sýnir hlutfall raða sem ekki tókst að flokka til fylkingar.

Helstu fylkingar innan Baktería voru *Aquificae* og *Proteobacteria* (mynd 166). *Aquificae* tegundir eru mjög útbreiddar í hverum almennt og eins og súluritið ber með sér fundust þær í allflestum sýnum úr Trölladyngju. Mismunandi hópar innan *Aquificae* finnast í hverum og ræðst dreifing einstakra hópa fyrst og fremst af sýrustigi. Þær eru allar efnatillifandi og nýta sér einkum vetni og sulfíð til orkuöflunar og CO₂ sem kolefnisgjafa og eru því frumbjarga og mynda undirstöðu fyrir aðrar ófrumbjarga tegundir. Í sýnum úr Trölladyngju fundust einkum miðlungssýrukærar *Hydrogenobaculum* tegundir innan *Aquificae* fylkingarinnar.

Proteobakteríur eru fjölbreyttur hópur Baktería, ýmist frumbjarga eða ófrumbjarga og telur nokkra undirhópa (α -, β -, γ -, δ -, og ϵ -*Proteobakteríur*). Þessi hópur finnst við fjölbreyttar aðstæður. Í Trölladyngjusýnum voru tegundir innan α -*Proteo-baktería* algengastar og þá helst af ættkvíslum *Acidicaldus* og *Rhizobium*.

2.4.2 Austurengjahver - erfðagreiningar

Af 18 sýnum úr Austurengjahver tókst að raðgreina 11, þar af sjö með báðum vísapörum (Fornbakteríu- og Bakteríuvísam). Í fjórum sýnum fundust eingöngu Fornbakteríur (tafla 8).

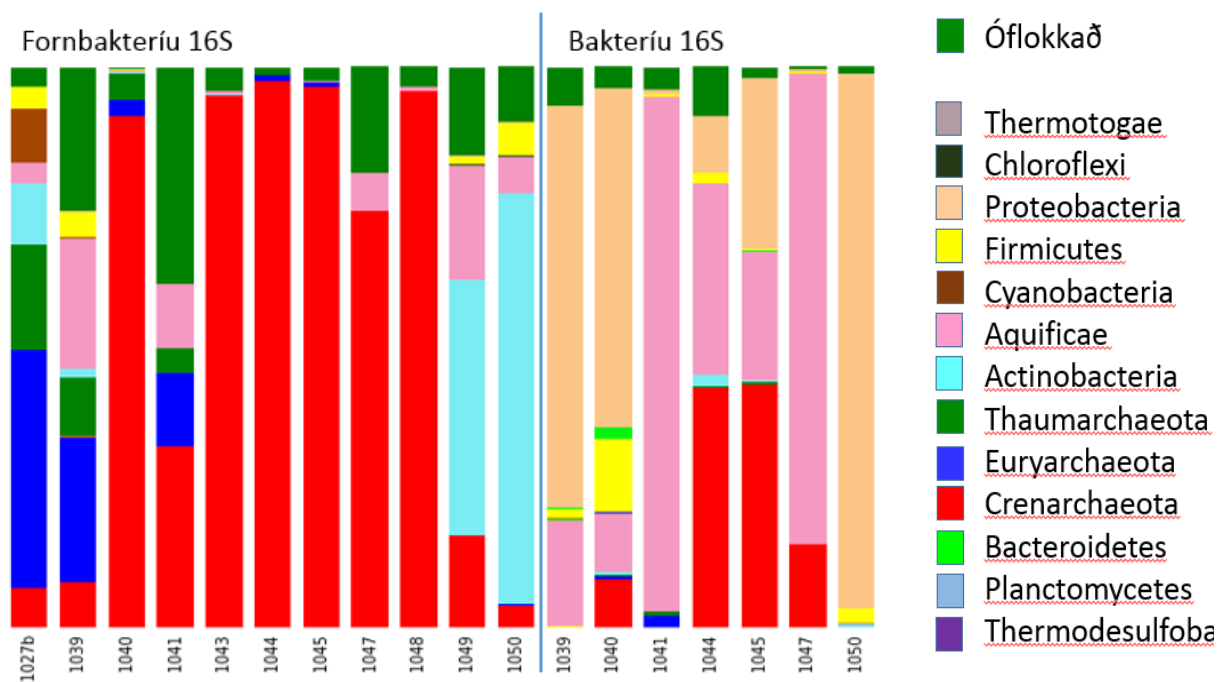
Tafla 8. Austurengjahver: 11 sýni raðgreind af 18 sýnum alls (61,1%).

Sýni	T°C	pH	Gerð sýnis	Raðgreint*	
1027a	90,0	4 - 4,5	Leðjusýni úr opnu.		
1027b	73,6	4 - 4,5	Vatn og grófur sandur við opnu.	A	
1027c	59,6	4 - 4,5	Hvítar útfellingar úr opnu.		
1038	79,0	5	Vatn, leir og froða.		
1039	62,0	4,7	Leirleðja.	A	B
1040	56,0	2,9	Vatnskenndur leirhver.	A	B
1041	74,0	3,7	Vatnssýni.	A	B
1042	71,8	4,4	Jarðvegssýni.		
1043	80,0	4	Jarðvegssýni.	A	
1044	90,0	4	Jarðvegssýni.	A	B
1045	86,0	4	Vatnssýni.	A	B
1046	80,0	4,1	Vatns- og leirsýni.		
1047	88,0	3,2	Soðpanna. Vatn og möl.	A	B
1048	74,7	3,1	Vatns- og leirsýni.	A	
1049	71,0	3,6	Brennisteinsstrýta – jarðvegur.	A	
1050	31,0	2,5	Brák á polli við tjörn.	A	B
1051	61,3	2,6	Vatnsýni.		
1052	93,4	3,6	Jarðvegur. Járn – brennisteinn.		
Alls: 18				11	7

*A=Archaea=Fornbakteríur, B=Bakteríur. - = upplýsingar vantar.

Frumbjarga Fornbakteríur af fylkingu *Crenarchaeota* fundust í öllum sýnum og voru ríkjandi í nokkrum þeirra (mynd 167) og voru *Sulfolobus* og *Thermoproteus* tegundir þeirra algengastar. *Euryarchaeota* fundust í nokkrum mæli í 3 sýnum, einkum af óræktuðum tegundum innan *Thermoplasma* og *Halobacteria*. Hópar sem flokkuðust til *Thaumarchaeota* fundust einnig, en afar fjarskyldir þekktum ættkvíslum.

Innan Baktería voru *Aquificae*, *Proteobakteriur*, og *Actinobacteria* helstar (mynd 167). Sýrukærar frumbjarga *Hydrogenobaculum* tegundir voru fulltrúar innan *Aquificae* fylkingarinnar og frumbjarga β -*Proteobakteriur* sem geta nýtt sér járn- og brennisteinssambönd s.s. *Ferritrophicum* og *Thiobacillus* tegundir innan *Proteobaktería*. Tegundir innan *Actinobacteria* fylkingarinnar teljast eftirsóknarverðir framleiðendur sýklalyfja. Hópar sem nýta sér járn- og járnsambönd fundust í nokkrum sýnum og svo sýrukær hópur *Acidimicrobiales* í einu sýni (1050).



Mynd 167. Súlurit sem sýnir hlutföll helstu fylkinga í sýnum úr Austurengjahver sem fengust úr raðgreiningum úr DNA mögnun með Fornbakteríu- og Bakteríu 16S rRNA vísam. Fleiri fylkingar fundust í sýnunum (sjá töflu 12). Efsti hluti súlunnar sýnir hlutfall raða sem ekki tókst að flokka til fylkingar.

2.4.3 Fremrinámar - erfðagreiningar

Sýnin úr Fremrinámum voru öll jarðvegssýni og þó nokkur þeirra voru tekin þar sem raki var nánast enginn og því lítil von um líf. Af 28 sýnum sem tekin voru tókst að fá raðgreiningar upp úr 13, þar af sex með báðum vísapörum Fornbaktería (A) og Baktería (B), fjögur með Fornbakteríuvísam eingöngu og þrjú með Bakteríuvísam eingöngu (tafla 9).

Tafla 9. Fremrinámar: 13 sýni raðgreind af 28 sýnum alls (46,4%).

Sýni	T°C	pH	Gerð sýnis	Raðgreint*	
1031-Ia	92,0	7,1	Jarðvegssýni. Sandur - rautt undir.		
1031-Ib	33,0	6,3	Jarðvegssýni. Rautt svæði - hvítt og hart á 5cm dýpi.		
1031-Ic	76,2	7,7	Jarðvegssýni. Gráar útfellingar í sandi.	A	B
1031-IIa	50,3	6,6	Jarðvegssýni Gráar útfellingar.		
1031-IIb	41,2	5,2	Jarðvegssýni Rautt.	A	
1031-IIIa	86,3	7	Jarðvegssýni Svart auga.		
1031-IIIb	76,4	7	Jarðvegssýni Brúnleitt ljóst.		
1031-IIIc	56,8	7	Jarðvegssýni Þurr brúnt og grátt.		
1031-IVa	81,1	7	Jarðvegssýni tekið úr auga.		
1031-IVb	73,6	7	Jarðvegssýni Rautt u.þ.b. 1m frá a-sýni.	A	B
1031-IVc	31,0	7	Jarðvegssýni Bleikt.	A	
1031-Va	66,2	7	Jarðvegssýni úr auga.		
1031-Vb	60,4	7	Jarðvegssýni Rautt og svart.	A	B
1031-VIa	86,2	7	Jarðvegssýni Rautt.		
1031-VIb	80,2	7	Jarðvegssýni úr svörtu auga.		
1031-VIIa	59,1	4	Jarðvegssýni, ljósgult og grátt.		
1031-VIIb	36,3	6	Jarðvegssýni úr gulleitt, þurr.	A	B
1031-VIIc	30,7	5	Jarðvegssýni. gulleitt, brúnt og rautt.		
1031-VIIId	40,9	5	Jarðvegssýni úr gulum skellum.	A	
1031-VIII	41,0	5	Jarðvegssýni gulleitt, þurr sandur.		B
1031-IXa	77,1	7	Jarðvegssýni svart og grátt.		
1031-IXb	66,8	7	Jarðvegssýni af rauðum leir.		B
1031-X	68,7	7	Jarðvegssýni úr auga – rakt.	A	B
1031-XI	53,9	7	Jarðvegssýni neðan auga, rakt.	A	B
1031-XII	76,2	7	Jarðvegssýni sandur þurr.		
1031-XIII	44,3	7	Jarðvegssýni við auga.		B
1031-XIV	73,9	7	Jarðvegssýni grænleitt, brúnt, rakt.	A	
1031-XV	78,3	7	Jarðvegssýni úr auga.		
Alls 28				10	9

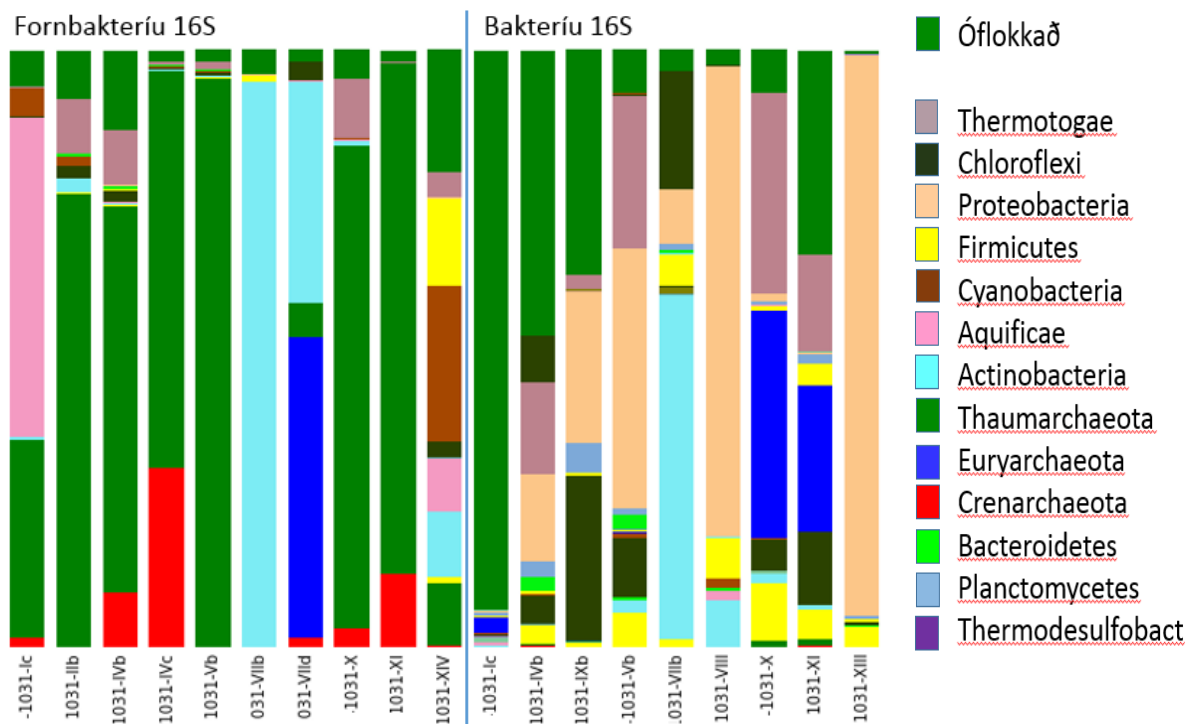
*A=Archaea=Fornbakteríur, B=Bakteríur. - = upplýsingar vantar.

Súluritið á mynd 168 sýnir hlutföll fylkinga sem fengust úr raðgreiningum úr sýnunum. Þar sést óvenju hátt hlutfall raða sem ekki tókst að flokka (efsti hluti súlunnar), sem þýðir að lítil sem engin samsvörun er við þekktar raðir í gagnagrunnum og óþekktir hópar því fyrirferðamiklir.

Ennfremur fannst óvenju hátt hlutfall *Thaumarchaeota* tegunda í sýnum úr Fremrinámum. Þegar náðar var rýnt í hópa á finni flokkunarstigum innan fylkingarinnar virtist sem um óþekktá hópa væri að ræða. Upplýsingarnar sem fengust úr Silva gagnagrunninum voru á þá lund að þarna væru á ferðinni illa skilgreindur, óþekktur hópur innan *Thaumarchaeota* „terrestrial group“, þ.e. *Thaumarchaeota* sem lifa í landhverum.

Proteobakteríur var önnur algeng fylking í sýnunum úr Fremrinámum. Þegar náðar var að gáð var einkum um *Halomonas* tegundir innan γ -*Proteobaktería*, sem hafa m.a. fundist víða í örveruþekjum, en flestar tegundir *Halomonas* ættkvíslarinnar er þó að finna í sjó eða öðru söltu umhverfi.

Innan *Aquificae* fylkingarinnar, sem er mjög algeng á jarðhitasvæðum, var *Thermocrinis* ættkvíslin áberandi, einkum þó í sýni 1031-Ic, en tegundir innan hennar lifa einkum við hátt sýrustig (pH \geq 7). Tegundir innan *Thermotoga* fylkingarinnar virðast hafa þó nokkra útbreiðslu og *Acidimicrobiales* innan *Actinobacteria* fylkingarinnar er talsvert algeng.



Mynd 168. Súlurit sem sýnir hlutföll helstu fylkinga í sýnum úr Fremrinámum sem fengust úr raðgreiningum úr DNA mögnun með Fornbakteríu- og Bakteríu 16S rRNA vísunum. Fleiri fylkingar fundust í sýnunum (sjá töflu 12). Efsti hluti súlunnar sýnir hlutfall raða sem ekki tókst að flokka til fylkingar.

2.4.4 Þverárdalur - erfðagreiningar

Eins og fram kemur í sýnatökukaflanum hér að framan, eru hverir í Þverárdal afar fjölbreyttir. Þar eru leirhverir, gufuaugu, vatnshverir, soðpönnur, lækir og afrennsli frá hverum. Hitastig á sýnatökustöðum var á bilinu 24-98,9°C og sýrustig á bilinu pH 2,3 – 7. Alls voru tekin 37 sýni á mismunandi stöðum og tókst að magna og raðgreina upp úr 22 þeirra, þar af 11 með báðum vísunum (A og B), 4 með A vísun einvörðungu og 7 með B vísun einvörðungu (tafla 10).

Tafla 10. Þverárdalur: 22 sýni raðgreind af 37 sýnum alls (59,5%).

Sýni	T°C	pH	Lýsing á sýni	Raðgreint	
1053	74,0	6	Leðja og vatn úr soðpönnu.		
1054	47,8	6	Vatn, leðja og froða úr afrennsli.		B
1055	96,0	2,5	Jarðvegssýni, grátt, gult, þurrt.		
1056	94,8	5	Vatn, mól og leðja.	A	B
1057	70,6	2,3	Jarðvegssýni. Þurrt.		B
1058	92,0	2,9	Jarðvegssýni.		
1059	24,3	7	Jarðvegssýni.		B
1060	97,0	3,2	Jarðvegssýni grátt.	A	
1061	95,0	3,5	Jarðvegssýni brennisteinn.		B
1062	96,0	4	Jarðvegssýni. Grár leir v. gufuauga.		
1063	55,0	7	Lífmassi. Græn motta.	A	B
1064	69,8	6,7	Jarðvegssýni. Útfellingar.	A	B
1065	53,2	7	Lífmassi og Jarðvegur.	A	B
1066 a	43,5	6,5	Þörungabekja – skaf.	A	B
1066 b	43,5	6,5	Skærgræn þörungabekja.	A	B
1067	30,0	3,9	Hvítgrá og græn slikja.		
1068	73,6	3,7	Vatn og leðja.	A	B
1069	73,0	4,1	Vatn og leðja.	A	B
1070	84,1	3,2	Vatn og hvít leðja.		B
1071	88,4	3,9	Vatn og leðja.		
1072	93,0	4	Vatn og leðja.	A	
1073	93,2	-	Gruggugt vatn.		
1074	42,2	-	Lífmassasýni. Grátt, grænt, rautt.	A	B
1075	68,7	6,8	Vatn og leðja.		
1076	84,2	7	Grá drulla og vatn.		

1077	84,7	7	Vatn og möl.	A	
1078	59,8	7	Lífmassi. Þræðir.		
1079	56,7	7	Leðja og vatn.		
1080	53,7	6,5	Jarðvegur og vatn.		
1081	75,1	6	Jarðvegur og vatn.		B
1082	75,1	6	Jarðvegssýn.	A	B
1083	54,1	7	Græn motta. Lífmassi.	A	B
1084	66,1	7	Brún motta. Lífmassi.		
1085	92,3	-	Leðja og vatn.		B
1086	91,7	7 - 8	Lífmassi.		
1087	98,9	4	Jarðvegssýni. Þurrt.		
1088	94,1	3,8	Þurr jarðvegur.	A	
Alls 37				15	18

*A=Archaea=Fornbakteríur, B=Bakteríur. - = upplýsingar vantar.

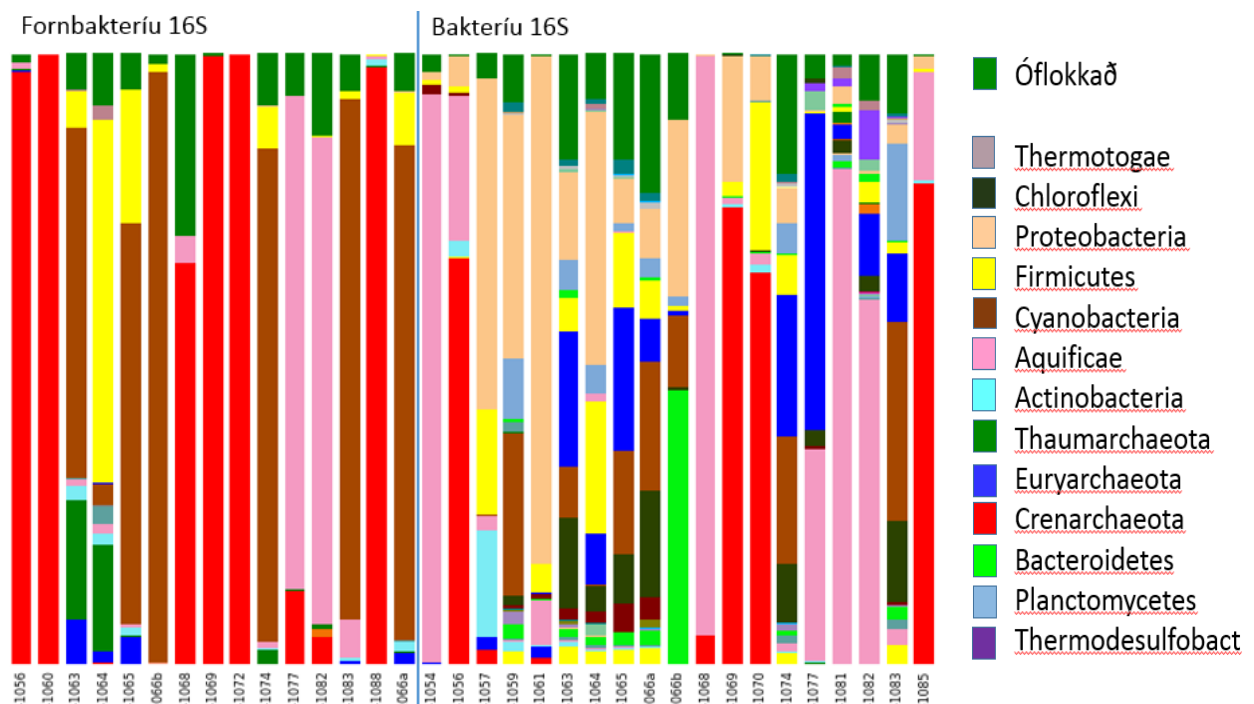
Fjölbreytileiki hveranna í Þverárdal endurspeglast í fjölbreyttri Fornbakteríu – og Bakteríuflóru eins og súluritið yfir hlutföll helstu fylkinga á mynd 169 ber með sér. Fyrirferðamestu fylkingarnar innan Fornbaktería eru *Crenarchaeota*, en *Euryarchaeota* og *Thaumarchaeota* tegundir finnast þar einnig en ekki í miklum mæli. Innan *Crenarchaeota* finnast nokkrar ættkvíslir s.s. *Thermoproteus*, *Sulfolobus*, *Stygiolobus* og *Acidianus*, allar frumbjarga og einkennandi fyrir örveruvistkerfi á hverasvæðum, einkum við hátt hitastig og lágt pH, sem kemur heim og saman við sýnatökustaðina þar sem *Crenarchaeota* var ríkjandi fylking.

Innan Baktería voru ljóstillífandi *Cyanobacteria* (blágrænar bakteríur) ríkjandi fylking í þó nokkrum sýnum og þá einkum hitakærir hópar sem eru algengir á hverasvæðum þ.e. *Fischerella* og *Chloro-gloeopsis* en einnig *Leptolyngbya*.

Aquificae fylkingin var einnig fyrirferðamikil og dreifðist á hópa sem lifa við mismunandi sýrustig, en eru ekki eins valkræfir hvað hitastigið varðar. *Aquificae* nýta sér einkum vetni og súlfíð til orkuöflunar og eru hverir því kjörið búsvæði fyrir *Aquificae* tegundir. Flestar ættkvíslir *Aquificae* fundust í Þverárdal þ.e. *Hydrogenobacter*, *Hydrogenobaculum*, *Thermocrinis* og *Sulfurihydrogenibium*.

Thermus og *Meiothermus* tegundir voru algengar í sýnum 1074 og 1078, sá fyrrnefndi hitakær, en sá síðarnefndi miðlungshitakær, báðir algengir á hverasvæðum, auðveldir í ræktun og vel

þekktir til margra ára, eða allt frá því Thomas Brock hóf rannsóknir á lífríki hveranna um miðja 19.öld.



Mynd 169. Súlurit sem sýnir hlutföll helstu fylkinga í sýnum úr Þverárdal sem fengust úr raðgreiningum úr DNA mögnun með Fornbakteríu- og Bakteríu 16S rRNA vísun. Blái liturinn hægra megin í súluritinu táknar *Thermus* tegundir. Fleiri fylkingar fundust í sýnunum (sjá töflu 12). Efsti hluti súlunnar sýnir hlutfall raða sem ekki tókst að flokka til fylkingar.

Proteobakteríur sem fundust í Þverárdalssýnum voru af öllum gerðum undirfylkinga og af margvíslegum tegundum og var sýni 1059 sérlega fjölbreytt hvað þetta varðar. Ekki verður gerð nánari grein fyrir því hér.

Firmicutes og *Chloroflexus* tegundir fundust einnig í sýnunum, þær fyrrnefndu einkum loftfirrðar *Clostridia* - og *Bacillus* tegundir, en hinar síðarnefndu sumar hverjar færar um að ljóstillífa við tilteknar aðstæður og mynda þykkan, áberandi gróðurmassa oft í afrennsli vatnshvera við allt að 72°C.

2.4.5 Innstidalur - erfðagreiningar

Eins og fram kemur í sýnatökukaflanum voru sýni einkum tekin á tveimur stöðum í Innstadal, þ.e. úr gili við skálann, en það einkenndist af leirhverum og gufuaugum og svo úr ölkeldugili aðeins vestar. Hitastig á sýnatökustöðum var á bilinu 15-97°C og sýrustig á bilinu pH 2 – 8.

Tafla 11. Innstidalur: 18 sýni raðgreind af 27 sýnum alls (66,6%).

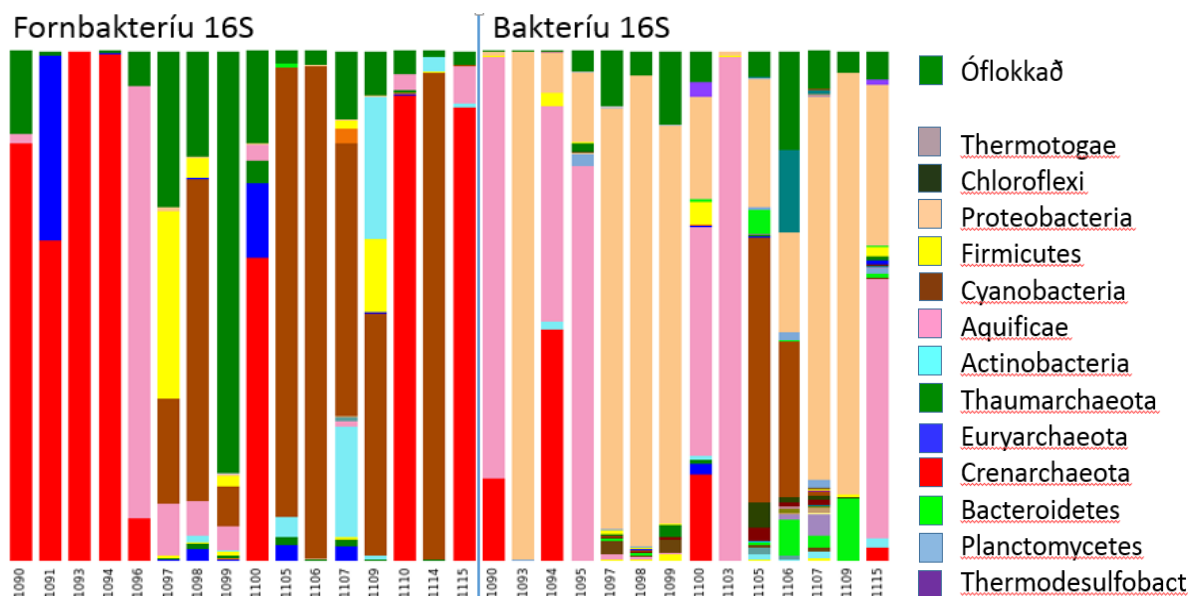
Sýni	T°C	pH	Lýsing á sýni	Raðgreint	
1089	70,9	4	Vatn, sandur og leir úr svörtum sandaugum.		
1090	87,4	3	Vatn, sandur og leir.	A	B
1091	97,0	2,5	Jarðvegssýni gular og gráar útfellingar.	A	
1092	96,0	7	Vatn, sandur og leir.		
1093	88,0	3,1	Jarðvegssýni.	A	B
1094	96,0	3,4	Jarðvegssýni.	A	B
1095	54,0	6,5	Jarðvegssýni. Sandur vatn og hvítgul motta.		B
1096	65-70	8	Leðja og vatn.	A	
1097	37,0	7	Lífmassasýni. Græn slikja.	A	B
1098	20,0	7	Lífmassasýni. Græn slikja.	A	B
1099	35,0	7	Lífmassi. Gráir þræðir.	A	B
1100	65,0	5,6	Jarðvegssýni.	A	B
1101	88,5	3	Leir og vatn.		
1102	86,0	2	Möl og vatn.		
1103	77,0	2	Leðja og vatn.		B
1104	36,0	-	Jarðvegur – járnríkur og vatn.		
1105	37,0	6	Rauðleitur jarðvegur og vatn.	A	B
1106	36,0	6	Lífmassi og brák.	A	B
1107	16,0	6	Lífmassi og jarðvegur.	A	B
1108	22,0	7	Lífmassi. Grænn og hvítur.		
1109	22,0	6,5	Lífmassi.	A	B
1110	15,0	6	Jarðvegur og vatn.	A	
1111	23,2	6	Svart og hvítt.		
1112	16,0	7	Jarðvegur og lífmassi. Grængult.		
1113	15,0	6	Sandur / leðja og vatn.		
1114	18,0	6,5	Jarðvegur og lífmassi.	A	
1115	96,0	2,8	Jarðvegssýni.	A	B
ALLS 27				16	14

*A=Archaea=Fornbakteríur, B=Bakteríur. - = upplýsingar vantar.

Alls voru tekin 27 sýni á mismunandi stöðum og tókst að magna og raðgreina upp úr 18 þeirra, þar af 12 með báðum vísnum (A og B), 4 með A vísnum einvörðungu og 2 með B vísnum einvörðungu (tafla 11).

Helstu Fornbakteríufylkingar sem greindust í sýnum úr Innstadal voru frumbjarga, efnatillifandi *Crenarchaeota* og *Euryarchaeota* (mynd 170). Ríkjandi hópar innan *Crenarchaeota* voru *Stygiolobus*, *Acidianus*, *Metalosphaera* og *Thermoproteus*. Ríkjandi hópur innan *Euryarchaeota* var *Acidiplasma*.

Helstu Bakteríufylkingar voru *Aquificae*, *Proteobakteríur* og *Cyanobacteria* (blágrænar bakteríur) (mynd 170). Innan *Aquificae* fundust fulltrúar flestra undirhópa þ.e. *Thermocrinis*, *Sulfuri-hydrogenibium* og *Hydrogenobaculum*, allar efnatillifandi og frumbjarga sem fyrr segir.



Mynd 170. Súlurit sem sýnir hlutföll helstu fylkinga í sýnum úr Innstadal sem fengust úr raðgreiningum úr DNA mögnun með Fornbakteríu- og Bakteríu 16S rRNA vísnum. Fleiri fylkingar fundust í sýnunum (sjá töflu 12). Efsti hluti súlunnar sýnir hlutfall raða sem ekki tókst að flokka til fylkingar.

Helstu Bakteríufylkingar voru *Aquificae*, *Proteobakteríur* og *Cyanobacteria* (blágrænar bakteríur) (mynd 170). Innan *Aquificae* fundust fulltrúar flestra undirhópa þ.e. *Thermocrinis*, *Sulfurihydrogenibium* og *Hydrogenobaculum*, allar efnatillifandi og frumbjarga sem fyrr segir.

Innan *Proteobaktería* fundust einkum γ - og ϵ -*Proteobakteríu* tegundir, *Thiothrix* af hinni fyrrnefndu og *Sulfuricurvum* af hinni síðarnefndu. Innan *Cyanobacteria* fundust *Planktothrix* og *Nostoc* tegundir og einnig hópur sem ekki var skilgreindur nánar í Silva gagnagrunni, þ.e.

óþekkt tegund. Ákveðnir hópar innan *Proteobaktería* og *Cyanobaktería* fundust einkum við lægri hitastigin í vestara gilinu í Innstadal (Silva gagnagrunnur).

2.4.6 Heildarniðurstöður erfðagreininga – fjölbreytileiki

Einn mælikvarði á fjölbreytileika er fjöldi fylkinga í sýni eða á svæði. Alls fundust 55 fylkingar Fornbaktería og Baktería í sýnunum sem tekin voru í rannsókninni, þar af áberandi flestar í Þverárdal (51) og Innstadal (49), en nokkru færri í Fremrinámum (29) og við Austurengjahver (27) en fæstar við Trölladyngju (20). Yfirlit um dreifingu fylkinga á mismunandi jarðhitasvæðum sést í töflu 12. Fornbakteríufylkingarnar *Crenarchaeota*, *Euryarchaeota* og *Thaumarchaeota* eiga sér allar fulltrúa á öllum jarðhitasvæðunum, *Korarchaeota* á sér hins vegar bara fulltrúa í Innstadal svo vitað sé.

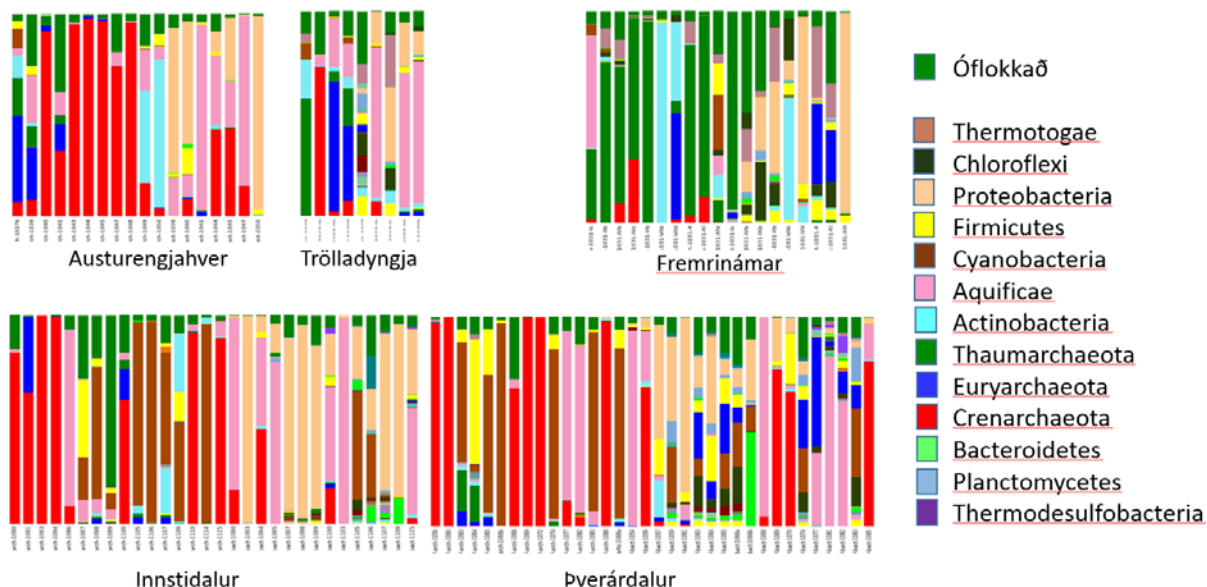
Tafla 12: Dreifing fylkinga á mismunandi jarðhitasvæðum.

	Fylking	Austur- engja- hver	Trölla- dyngja	Fremri- námur	Innsti- dalur	Þverár- dalur
1	Crenarchaeota	1	1	1	1	1
2	Euryarchaeota	1	1	1	1	1
3	Korarchaeota	0	0	0	1	0
4	Thaumarchaeota	1	1	1	1	1
6	Acidobacteria	1	0	0	1	1
7	Actinobacteria	1	1	1	1	1
8	Aquificae	1	1	1	1	1
9	Armatimonadetes	1	0	1	1	1
10	Bacteria BD1-5	0	0	0	1	1
11	Bacteroidetes	1	1	1	1	1
12	Caldiserica	1	0	0	1	1
13	Candidate division BRC1	0	0	1	1	1
14	Candidate division OD1	1	0	1	1	1
15	Candidate division OP11	0	0	1	1	1
16	Candidate division OP3	0	1	0	1	1
17	Candidate division OP8	1	0	0	1	1
18	Candidate division SR1	0	0	0	1	1
19	Candidate division TM7	1	0	1	1	1
20	Candidate division WS3	0	0	0	1	1
21	Candidate division WS6	0	0	0	1	1
22	Chlamydiae	1	0	0	1	1

23	Chlorobi	1	1	1	1	1
24	Chloroflexi	1	1	1	1	1
25	Cyanobacteria	1	1	1	1	1
26	Deinococcus-Thermus	1	1	0	1	1
27	Elusimicrobia	0	0	1	1	1
28	Fibrobacteres	0	0	0	1	1
29	Firmicutes	1	1	1	1	1
30	Fusobacteria	0	1	1	1	1
31	Gemmatimonadetes	0	0	0	1	1
32	Lentisphaerae	0	0	0	1	1
33	Bacteria NPL-UPA2	0	1	1	1	0
34	Nitrospirae	1	0	1	1	1
35	Planctomycetes	1	1	1	1	1
36	Proteobacteria	1	1	1	1	1
37	Bacteria S2R-29	0	0	0	1	1
38	Bacteria SHA-109	0	0	1	1	1
39	Bacteria SM2F11	0	0	0	1	1
40	Spirochaetae	0	0	0	1	0
41	Synergistetes	0	0	0	1	1
42	Bacteria TA06	0	0	0	1	1
43	Bacteria TM6	1	1	0	1	1
44	Bacteria Tenericutes	0	0	0	1	1
45	Thermodesulfobacteria	1	1	0	1	1
46	Thermotogae	1	0	1	1	1
47	Verrucomicrobia	1	0	1	1	1
48	Bacteria WCHB1-60	0	1	1	1	1
49	Bacteria WD272	1	0	1	1	1
50	Bacteria CKC4	0	0	0	0	1
51	Candidate division KB1	0	0	1	0	1
52	Candidate division OP9	0	0	0	0	1
53	Deferribacteres	0	0	0	0	1
54	Bacteria GAL08	0	0	1	0	1
55	Dictyoglomi	1	0	0	0	0
	ALLS	27	20	29	49	55

Græni liturinn táknar að viðkomandi fylking er til staðar.

Mynd 171 sýnir hlutföll helstu fylkinga á öllum svæðunum fimm sem rannsökuð voru. Þar sést ákveðið mynstur, tiltölulega líkt milli svæða, nema hvað Fremrinámar skera sig úr með áberandi hátt hlutfall af 16S rRNA genaröðum sem ekki tókst að flokka og áberandi hátt hlutfall af Thaumarchaeota .



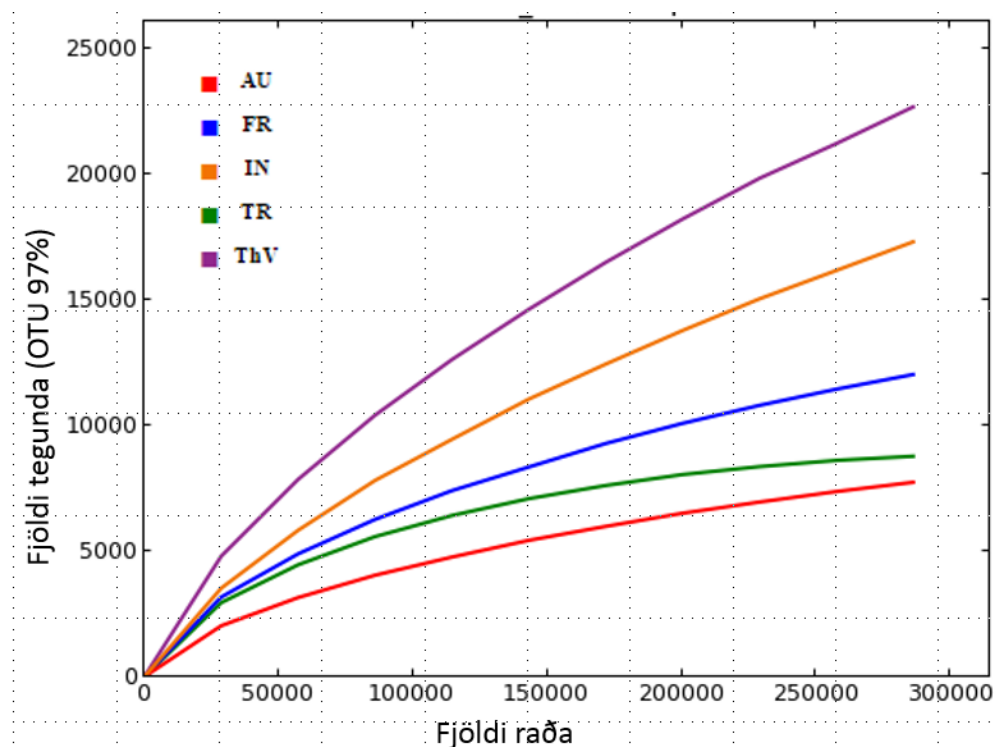
Mynd 171. Yfirlitsmynd sem sýnir hlutföll helstu fylkinga í sýnum af öllum svæðum.

Annar mælikvarði á líffræðilega fjölbreytni er fjöldi tegunda í sýni eða af svæði. Tafla 13 sýnir fjölda tegunda af hverju svæði fyrir sig. Þar kemur fram að tegundafjölbreytileiki er mestur í Þverárdal (42.167 tegundir) og minnstur í Trölladyngju (8.791 tegund). Þessar tölur endurspeglar sýnilegan fjölbreytileika og stærð svæðanna og einnig mismunandi fjölda sýna sem var tekin.

Tafla 13. Tegundafjölbreytileiki á mismunandi svæðum.

Svæði	Sýni alls	Sýni raðgr.	Fj. 16S raða alls	Fj. teg. (OTU) (97%)	Fj. fylkinga
Austurengjahver	18	11	789.462	11.019	28
Trölladyngja	8	5	286.039	8.791	20
Fremrinámar	28	13	968.699	12.222	29
Þverárdalur	37	22	1.528.873	42.167	51
Innstidalur	27	18	2.176.174	39.861	49
Alls	118	69	5.749.247		

Þriðji mælikvarðiinn á líffræðilega fjölbreytni fæst með söfnunarkúrfum (Rarefaction curves). Söfnunarkúrfur má nýta til að meta og bera saman fjölbreytileika milli sýna eða milli svæða eins og hér er gert. Þá er sami fjöldi raða borinn saman sem hér var 286.039 raðir úr Trölladyngju. Þegar söfnunarkúrfan verður lárétt má ætla að sýnið sé nánast fullgreint, fleiri tegundir (OTU) finnast ekki þrátt fyrir greiningar á fleiri röðum.



Mynd 172. Miðað er við Trölladyngju sem hafði fæstar raðir 286.039 raðir. Eftir því sem fleiri raðir eru greindar aukast líkur á að finna sömu tegund. Trölladyngja – kúrfan orðin nánast lárétt enda búið að keyra allar raðir.

Mynd 172 sýnir söfnunarkúrfur fyrir öll sýnatökusvæðin. Miðað er við Trölladyngju sem hafði fæstar raðir, eða 286.039 raðir og jafnmargar raðir greindar af hinum svæðunum. Eins og sést á myndinni er Trölladyngjukúrfan að nálgast það að verða lárétt. Hins vegar er Þverárdalskúrfan enn á hraðri uppleið sem þýðir að fjöldi tegunda á enn eftir að koma í ljós ef fleiri raðir yrðu greindar (sem kemur heim og saman við raunverulegan heildarfjölda tegunda í Þverárdal þegar allar 16S rRNA genaþirnar eru flokkaðar). Sama á við um kúrfur af hinum svæðunum og helst nokkuð í hendur við eiginlegan fjölda raða sem fékkst af hverju svæði.

Tafla 14. Shannon fjölbreytileiki á mismunandi svæðum.

Svæði	Fj. sýna alls	Fj. sýna raðgr	Fj. tegunda # OTU* v. Shannon (286.039 raðir)	H Shannon
Austurengjahver	18	11	7.752	6,3
Trölladyngja	8	5	8.791	6,7
Fremrinámar	27	15	12.045	7,7
Þverárdalur	37	22	22.702	8
Innstidalur	27	19	17.328	7

*Fjöldi tegunda (OTU 97%) var metinn út frá 286.039 röðum af hverju svæði sem var heildarfjöldi raða úr Trölladyngju.

Fjórði mælikvarðinn á líffræðilegan fjölbreytileika er Shannon fjölbreytileikastuðull (H) sem metur fjölbreytileika út frá tegundafjölbreytileika og hlutföllum tegunda (evenness) í sýninu eða af svæðinu. Eftir því sem gildið er hærra, því meiri fjölbreytileiki. Í töflu 14 sjást fjölbreytileikastuðlar (H) fyrir öll svæðin og eru þeir á bilinu 6,3 fyrir Austurengjahver upp í 8 fyrir Þverárdal. Tegundafjöldinn (# OTU 97%) var metinn út frá jafnmörgum röðum og áður, þ.e. út frá fæstum röðum sem fengust fyrir Trölladyngju (286.039 raðir) og var Shannon stuðullinn reiknaður út frá því. Eins og sjá má er Þverárdalur með hæstan Shannon fjölbreytileika (H), en Fremrinámar fylgja fast á eftir og síðan Innstidalur. Þetta kemur nokkuð á óvart, þar sem jarðhitasvæðið í Fremrinámum virtist afar einsleitt.

2.4.7 Heildarniðurstöður erfðagreininga – fágæti

Fágæti örvera af hverasvæðunum fimm var metið út frá hlutfalli tegunda sem ekki tókst að flokka til hópa (óþekkra tegunda) í Silva gagnagrunninum og með samanburði við niðurstöður fyrri rannsókna. Hér er ekki farið út í nákvæma greiningu á einstökum tegundum, enda gögnin það viðamikil að þau bjóða ekki upp á slíkt. Nálgunin hér er því sú að reyna að meta samsvörun milli svæða sem rannsökuð voru við niðurstöður úr fyrri rannsóknum.

Tafla 15 sýnir m.a. fjölda og hlutföll óþekkra tegunda sem fundust í rannsókninni sem fékkst með samanburði við Silva gagnagrunninn sem inniheldur þekktar raðir víðs vegar að úr heiminum. Fjöldi óþekkra tegunda er langmestur í Innstadal og í Þverárdal. Á báðum þessum stöðum fundust yfir 1000 óþekktar tegundir og fágæti því umtalsvert. Í Trölladyngju og við Austurengjahver eru óþekktar tegundir yfir 300 og í Fremrinámum 756 óþekktar tegundir. Sé

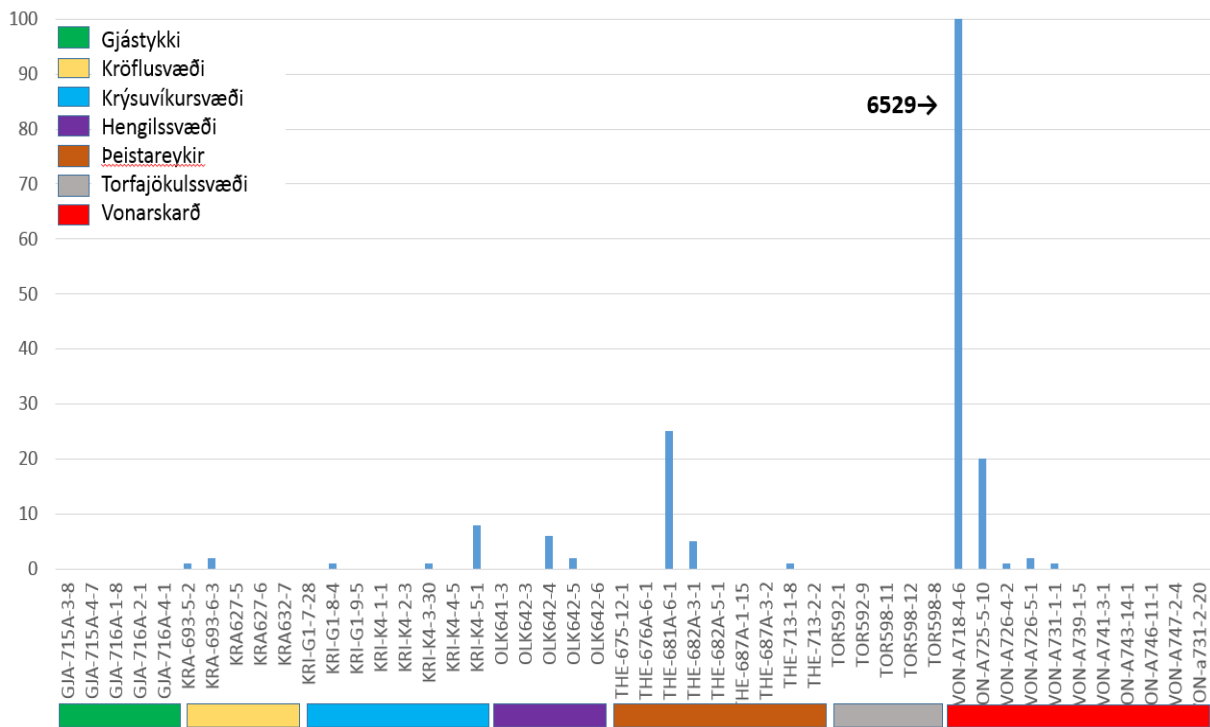
hins vegar litið á hlutfall óþekktra tegunda sést að það er langhæst í Fremrinámum eða 6,1%, meðan það er á bilinu 3-3,5% á hinum svæðunum. Örveruflóran í Fremrinámum telst því afar sérstök.

Tafla 15. Fágæti. Fjöldi og hlutföll óþekktra tegunda.

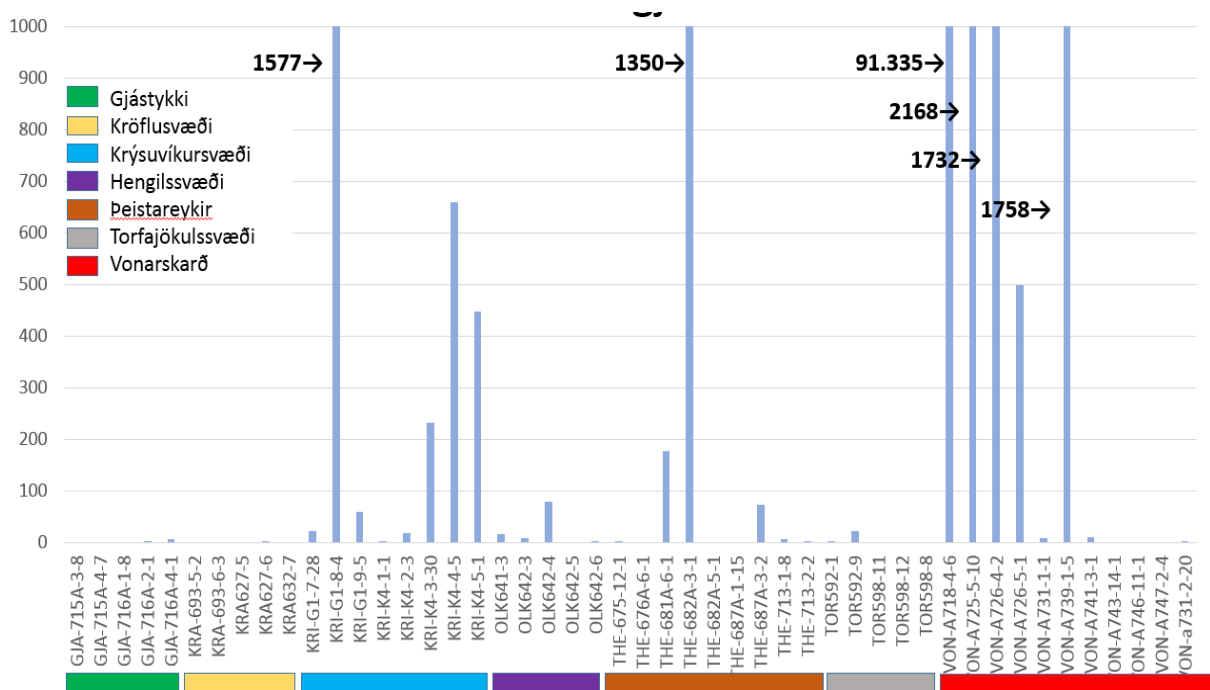
	Trölladyngja	Austurengjahver	Fremrinámar	Innstidalur	Þverárdalur
Fjöldi sýna raðgreind	5	11	13	18	22
Fjöldi tegunda (OTU 97%)	8.791	11.019	12.222	39.861	42.167
Þar af fjöldi óþekktra tegunda	309	383	756	1.379	1.269
% óþekktra tegunda	3,5%	3%	6,1%	3,5%	3%

Súluritín á myndum 173 – 177 hér á eftir sýna samanburð raða af einstökum svæðum sem fengust í yfirstandandi rannsókn (RÁ3) við raðir úr fyrri rannsóknum (RÁ2 o.fl.). Eins og súluritín bera með sér er talsverð samsvörun milli tegunda í yfirstandandi rannsókn og þeirra sem áður hafa greinst á öðrum svæðum. Fremrinámar skera sig nokkuð úr, þar sem samsvörun virðist afar lítil og ef einhver, þá bundin við fá svæði. Annað sem vekur athygli er að í flestum tilvikum er mest samsvörun við gögn úr Vonarskarði, en þar finnast einmitt afar fjölbreytt hverasvæði og þar með fjölbreytt örveruflóra.

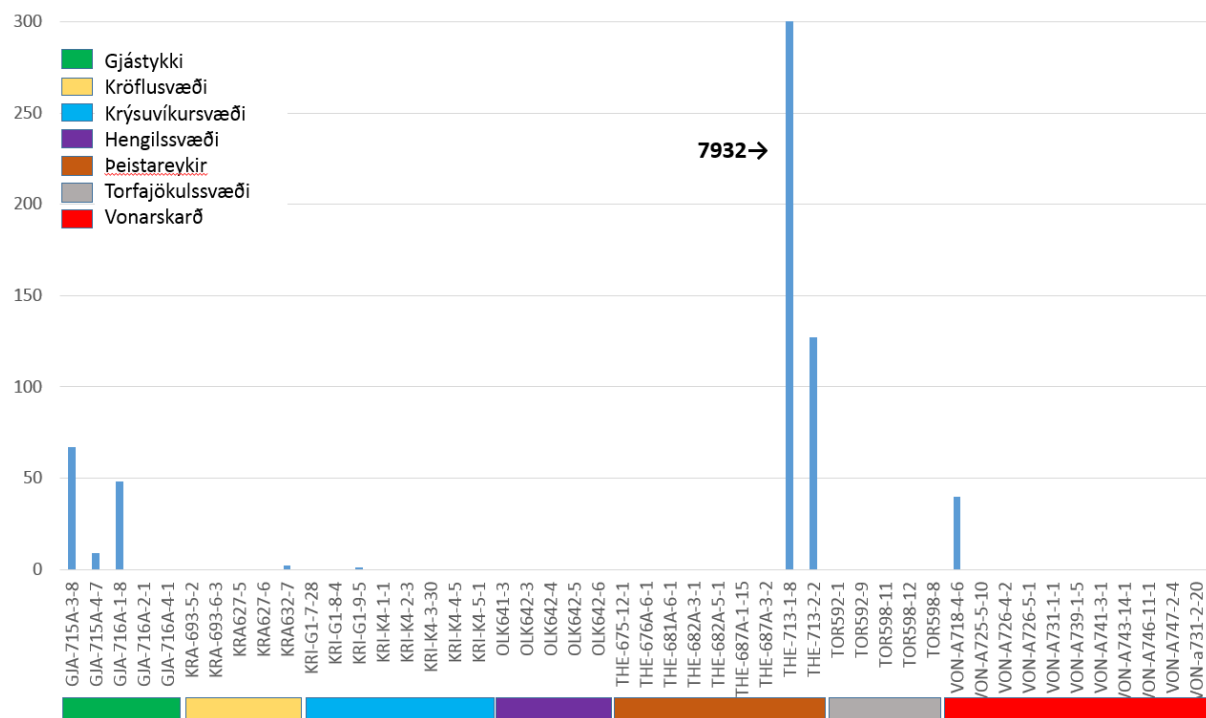
Niðurstöðurnar úr súluritunum á myndum 173-177 eru dregnar saman í töflu 16. Minnst skörun sést í Trölladyngju og Fremrinámum, sem má túlka sem vísbendingu um fágæti á landsvísu. Hins vegar voru tiltölulega fá sýni og lítil gögn úr Trölladyngju þannig að varast ber að draga of víðtækar ályktanir af þessu.



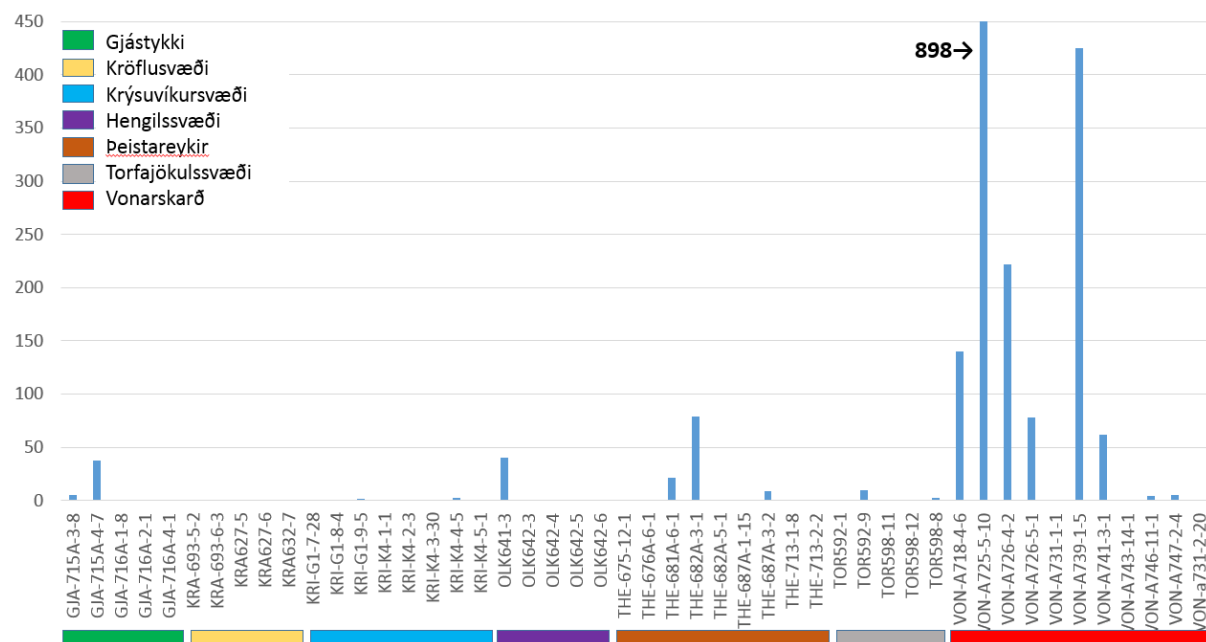
Mynd 173. Samanburður 16S rRNA genaða úr Trölladyngju við raðir úr fyrri rannsóknum. Samsvörunin er langmest við raðir úr Vonarskarði, og nokkur við Þeistareyki, Ölkelduháls, Kröflu og Krýsuvík.



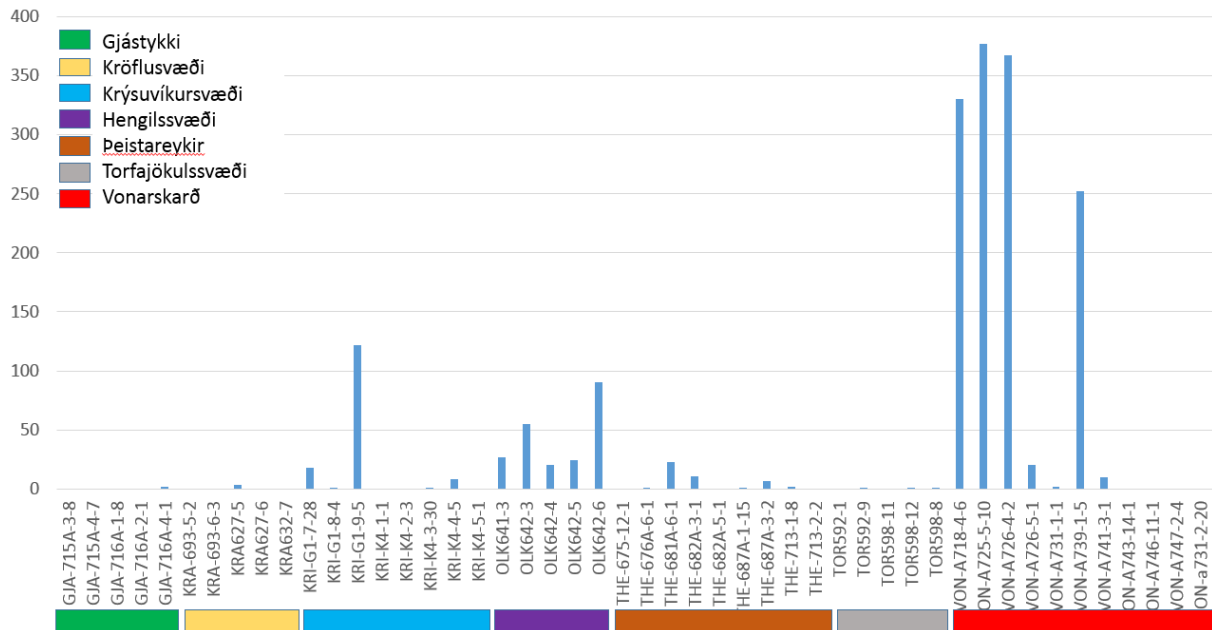
Mynd 174. Samanburður 16S rRNA genaða úr Austurengjahver við gögn úr fyrri rannsóknum. Samsvörunin er langmest við raðir sem fundust í sýnum frá Þeistareykjum, þannig að klippt var ofan af súlunni. Nokkur samsvörun var einnig við raðir úr Gjástykki og Vonarskarði.



Mynd 175. Samanburður 16S rRNA genaða úr Fremrinámum við gögn úr fyrri rannsóknum. Samsvörunin er langmest við raðir sem fundust í sýnum frá Þeistareykjum. Talsverð samsvörun var einnig við raðir úr Gjástykki og Vonarskarði og nokkur við Kröflu og Krýsuvík.



Mynd 176. Samanburður 16S rRNA genaða úr Þverárdal við raðir úr fyrri rannsóknum. Samsvörunin er mest við raðir sem fundust í sýnum úr Vonarskarði. Ennfremur sést nokkur samsvörun við raðir úr Gjástykki, af Ölkelduhálsi og Þeistareykjum. Örlítill samsvörun er við raðir af Torfajökulssvæði.



Mynd 177. Samanburður 16SrRNA genaða úr Innstadal við raðir úr fyrri rannsóknum. Samsvörunin er langmest við gögn úr Vonarskarði og þó nokkur við Krýsuvík og Ölkelduháls, en eitthvað minni við Þeistareyki, Gjástykki og Kröflu.

Tafla 16. Fágæti miðað við fyrri rannsóknir.

	Trölladyngja	Austurengjahver	Fremri-námar	Innstidalur	Þverárdalur
Fjöldi svæða sem skarast við RÁ2	5	6	5	7	6

3. Samantekt

Í rannsókninni voru fimm jarðhitasvæði sem lent höfðu í biðflokki í Rammaáætlun 2 rannsókuð. Þessi svæði voru Trölladyngja og Austurengjahver á Reykjanesi, Fremrinámar og Þverárdalur og Innstidalur í Henglinum.

Í rannsókninni var leitast við að taka sýni af sem flestum gerðum hvera á hverju sýnatökusvæði. Sum svæðin voru afar fjölbreytt eins og t.d. Þverárdalur, þar sem flestar gerðir hvera s.s. leirhverir, gufuaugu, soðpönnur og vatnshverir og afrennsli frá þeim mynda litríka heild þar sem sýrustig og hitastig spanna breitt bil. Hverasvæðin í Innstadal voru líka fjölbreytt að gerð með heitum leirhverum, gufuaugum og soðpönnum annars vegar og ölkeldum og kulnandi hverum hins vegar. Yfirborðsjarðhiti við Trölladyngju er hvorki mikill né fjölbreyttur og þar voru því ekki tekin mörg sýni. Við tjarnirnar við Austurengjahver var fjölbreytnin talsvert meiri. Hverasvæðið í Fremrinámum virtist fremur fábreytt yfir að líta og einkenndist af heitum og þurrum jarðvegi, líparíti og brennisteinsþúfum.

Eins og sjá má í töflu 17 voru sýnin tekin við breitt hitastigsbil, oftast úr uppsprettu eða auga hversins, en stundum úr afrennsli vatnshvera. Sýrustigsbilið var mismunandi milli svæða og endurspeglaði að nokkru leyti fjölbreytni í gerðum hvera á viðkomandi svæði. Fjöldi sýna var mismunandi og réðst af stærð og fjölbreytni innan svæðisins. Alls voru tekin 118 sýni, eða á bilinu 8 – 37. Langflest sýnin voru jarðvegssýni eða 82%, vatnssýni voru 3% og lífmassasýni 15%.

Tafla 17. Gerðir sýna.

Svæði	Hitastig	Sýrustig pH	Sýni alls	Jarðvegs-sýni	Vatns-sýni	Lífmassa-sýni
Trölladyngja	27-97°C	5	8	8		
Austurengjahver	31-90°C	2,5-5	18	14	3	1
Fremrinámar	31-92°C	5-7,7	28	28		
Þverárdalur	24-99°C	2,3-7	37	27	1	9
Innstidalur gil við skála	20-97°C	2-7	15	12		3
Innstidalur ölkeldugil	15-37°C	6-7	12	8		4
Alls			118	97 (82%)	4 (3%)	17 (15%)

Aðferðafræði rannsóknarinnar fól í sér að hún var óháð ræktun á örverum, en slík nálgun hefur átt vaxandi fylgi að fagna allt frá því í lok níunda áratugar síðustu aldar þegar menn áttuðu sig á því að einungis var hægt að rækta brot af raunverulegum tegundafjölda örvera.

Aðferðafræðin byggir á því að einangra DNA úr sýninu, magna upp 16S rRNA genin með til þess gerðum vísnum fyrir Bakteríur og Fornbakteríur og raðgreina svo DNA. Á þennan hátt fæst fjöldi DNA raða sem hægt er að flokka og bera svo saman raðir í þekktum gagnaböndum og sambærilegt DNA úr öðrum rannsóknum.

Í þessari rannsókn reyndist einangrun á DNA vera flöskuháls, einkum úr jarðvegssýnum, sem þykja almennt erfið viðureignar. Ekki reyndist unnt að einangra DNA úr öllum sýnum og var magnið sem einangrað var oft í minna lagi og því erfitt að magna upp og raðgreina í framhaldinu. Í heildina náðist þó að raðgreina 69 sýni af 118 sýnum alls eða tæplega 60%. Í töflu 18 sést að almennt tókst að raðgreina ríflega 60% af sýnum af hverju svæði, nema úr Fremrinámum þar sem einungis tókst að ná röðum upp úr 46% sýnanna, sem öll voru tiltölulega þurr jarðvegssýni. Í heildina fengust tæplega 20 milljónir 16S rRNA genaraða upp úr sýnunum og voru flestar eða tæplega sjö milljónir úr Innstidal en færstar úr Trölladyngju, eða rúm milljón (tafla 18). Þessar tölur eru þó ekki endanlegar, þar sem hreinsa þurfti raðir sem voru of stuttar eða lélegar.

Tafla 18. Árangur raðgreininga.

Svæði	Fj. sýna alls	Fj. sýna raðgr.	% sýna raðgr.	Fj. raða, hrágögn
Austurengjahver	18	11	61%	3.450.796
Trölladyngja	8	5	63%	1.205.871
Fremrinámar	28	13	46%	2.338.989
Þverárdalur	37	22	60%	5.483.337
Innstidalur	27	18	67%	6.975.743
Alls	118	69	59%	19.454.736

Hrágögnin voru keyrð í Qiime og stuttar og lélegar raðir hreinsaðar út. Að því loknu hafði röðum fækkað verulega og voru nú alls tæplega 6 milljónir (tafla 19). Þær voru flokkað við 97% flokkunarmörk í OTU (Operational Taxonomy Units) eða tegundir og einnig í fylkingar með samanburði við Silva gagnagrunninn (tafla 19).

Tafla 19. Úrvinnsla raðgreininga – Qiime.

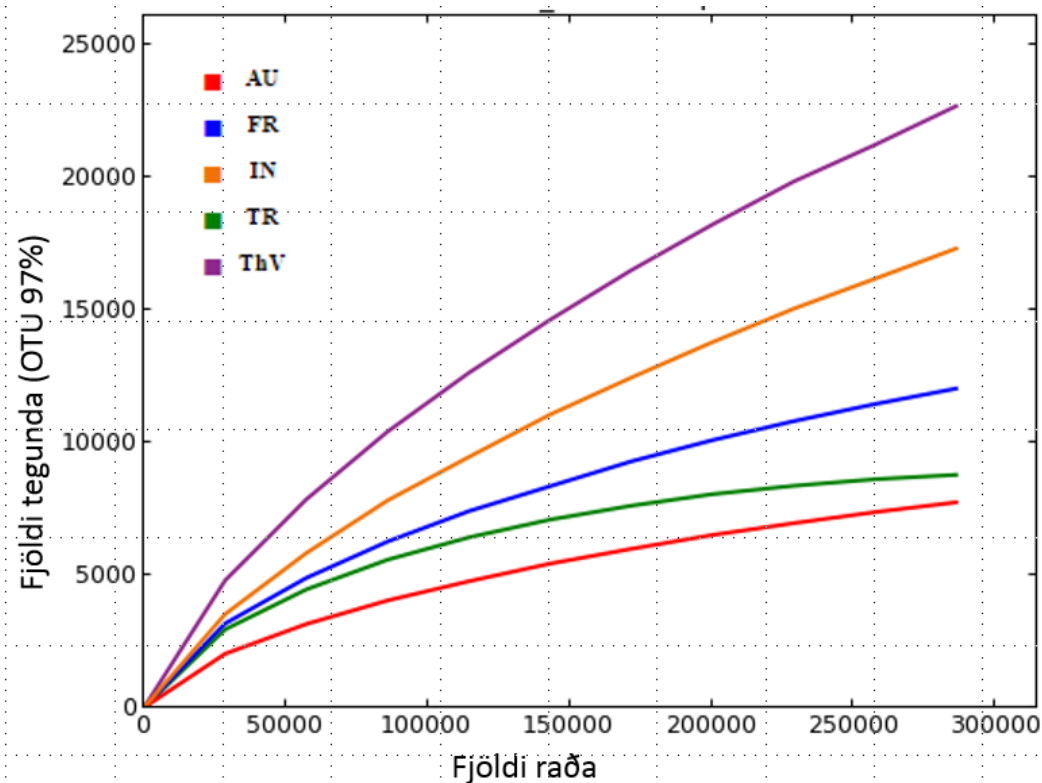
Svæði	Fj. 16S raða Qiime	Fj. teg. (OTU)	Fj. fylkinga
Austurengjahver	789.462	11.019	28
Trölladyngja	286.039	8.791	20
Fremrinámar	968.699	12.222	29
Þverárdalur	1.528.873	42.167	51
Innstidalur	2.176.174	39.861	49
Alls	5.749.247		

Ýmsir hópar sem eru algengir á hverasvæðum fundust í sýnunum, s.s. *Sulfolobus*, *Stygiolobus*, *Acidianus* og *Thermoproteus* sem allir eru efnatillífandi og þar af leiðandi frumbjarga og flokkast til *Crenarcheota* fylkingar innan Fornbaktería. *Euryarchaeota* tegundir fundust einnig og áhugaverðir hópar innan Thaumarchaeota, einkum í Fremrinámum.

Algengar hverabakteríur innan Baktería voru einnig til staðar s.s. innan *Aquificae* fylkingarinnar þar sem *Hydrogenobaculum* tegundir voru algengastar á Reykjanesi, *Thermocrinis* í Fremrinámum og báðar fyrrgreindar ásamt *Sulfurihydrogenibium* og *Hydrogenobacter* í Þverárdal og Innstadal. Allt frumbjarga tegundir sem nýta sér vetni og súlfíð til orkuöflunar. Ljóstillífandi *Cyanobacteria* (blágrænar bakteríur) fundust einkum í Þverárdal og Innstadal, en þær vaxa við lægri hitastigin eða allt að 65°C sem eru efri mörk ljóstillífunar.

Fjölbreytileiki í sýnunum var metinn út frá fjölda fylkinga, fjölda tegunda, söfnunarkúrfum og Shannon fjölbreytileikastuðli. Fjöldi fylkinga gefur til kynna ákveðna breidd í fjölbreytileika sem tegundafjöldinn gefur ekki endilega, þar sem fjölmargar tegundir geta verið innan sömu fylkingar. Langflestar tegundir og fylkingar fundust í Þverárdal og Innstadal, fæstar í Trölladyngju en á móta við Austurengjahver og í Fremrinámum (tafla 19). Heildarfjöldi fylkinga sem fundust í sýnunum voru 55, þar af fundust fulltrúar 51 þeirra í sýnum úr Þverárdal og 49 úr sýnum úr Innstadal.

Söfnunarkúrfur (Rarefaction curves), sem einnig nýtast til að meta fjölbreytileika, gáfu sömu niðurstöður. Þverárdalur og Innstadalur sýndu mestan fjölbreytileika, en Austurengjahver og Trölladyngja minnstan, en Fremrinámar voru mitt á milli (mynd 178).



Mynd 178. Söfnunarkúrfur fyrir öll svæðin (nánari upplýsingar við mynd 172).

Útreiknaður Shannon stuðull (H) fyrir líffræðilegan fjölbreytileika fyrir svæðin sýndi mestan fjölbreytileika í Þverárdal ($H=8$), þá í Fremrinámum ($H=7,7$), í Innstadal ($H=7$), í Trölladyngju ($H=6,7$) og minnstan í Austurengjahver ($H=6,3$). Enn og aftur skorar Hengilssvæðið hátt varðandi fjölbreytileika, en Fremrinámar komu þó verulega á óvart þar sem sýnin virtust einsleit, en innihéldu greinilega mikinn fjölbreytileika.

Fágæti örvera á svæðunum sem voru til skoðunar var metið út frá fjölda óþekkra tegunda í sýnunum sem fékkst með samanburði við Silva gagnagrunninn. Hlutfall óþekkra tegunda var einnig skoðað. Ennfremur var fágæti á landsvísu metið með samanburði raða af hverju svæði við gögn úr fyrri rannsóknum RÁ2 o.fl. Niðurstöðurnar voru þær að flestar óþekktar tegundir voru í Innstadal og Þverárdal, rúmlega 1000 óþekktar tegundir á hvoru svæði. Töluvert færri, eða milli 300-400 óþekktar tegundir fundust í Trölladyngju og Austurengjahver. Í Fremrinámum fundust svo 756 óþekktar tegundir og var það hæsta hlutfallið (6,1%) sem fékkst.

Gögnin sem aflað var í rannsókninni bjóða upp á frekari úrvinnslu og vistfræðilegar vangaveltur og eru áform uppi um að fara út í greinaskrif þar að lútandi síðar meir. Markmiðið með þessari rannsókn var þó fyrst og fremst að svara spurningum um fjölbreytileika og fágæti hitakærra

örvera á nokkrum háhitasvæðum á Íslandi. Segja má að tekist hafi að svara þeim spurningum með þó nokkrum rökstuðningi og vissu.

Heimildir:

Altschul SF, Gish W, Miller W, Myers EW & Lipman DJ. 1990. "Basic local alignment search tool." *J. Mol. Biol.* 215:403-410.

Caporaso JG, Lauber CL, Walters WA, Berg-Lyons D, Huntley J, Fierer N, Owens SM, Betley J, Fraser L, Bauer M, Gormley N, Gilbert JA, Smith G, Knight R. 2012. Ultra-high-throughput microbial community analysis on the Illumina HiSeq and MiSeq platforms. *The ISME Journal* (2012) 6, 1621–1624; doi:10.1038/ismej.2012.8

Caporaso JG, Kuczynski J, Stombaugh J, Bittinger K, Bushman FD, Costello EK, Fierer N, Gonzalez Pena A, Goodrich JK, Gordon JI, Huttley GA, Kelley ST, Knights D, Koenig JE, Ley RE, Lozupone CA, McDonald D, Muegge BD, Pirrung M, Reeder J, Sevinsky JR, Turnbaugh PJ, Walters WA, Widmann J, Yatsunencko T, Zaneveld J, Knight R. **2010**. QIIME allows analysis of high-throughput community sequencing data. *Nature Methods* 7(5): 335-336.

Hug LA, Baker BJ, Anantharaman K, Brown CT, Probst AJ, Castelle CJ, Butterfield CN, HERNSDORF AW, Amano Y, Ise K, Suzuki Y, Dudek N, Relman DA, Finstad KM, Amundson R, Thomas BC and Banfield JF. 2016. A new view of the tree of life. *Nature Microbiology* 1, 16048. doi:10.1038/nmicrobiol.2016.48. Published online:11 April 2016.

Hugenholtz P, Goebel BM, Pace NR. 1998. "Impact of Culture-Independent Studies on the Emerging Phylogenetic View of Bacterial Diversity". *J. Bacteriol* **180** (18): 4765–74.

Klindworth A, Pruesse E, Schweer T, Peplies J, Quast C, Horn M and Glöckner FO. 2012. Evaluation of general 16S ribosomal RNA gene PCR primers for classical and next-generation sequencing-based diversity studies. *Nucleic Acids Research*, 2013, Vol. 41, No. 1

Kozich JJ, Westcott SL, Baxter NT, Highlander SK, Schloss PD. 2013. Development of a dual-index sequencing strategy and curation pipeline for analyzing amplicon sequence data on the MiSeq Illumina sequencing platform. *Applied and Environmental Microbiology*. 79(17):5112-20.

Mirete S, de Figueras CG, Gonzales-Pastor JE. 2011. Diversity of *Archaea* in Icelandic hot springs based on 16S rRNA and chaperonin genes. *FEMS Microbiol Ecol*, 77:165-175.

Olsen GJ, Woese CR. 1993. Ribosomal RNA: a key to phylogeny. *FASEB J* 7:113-23.

Quast C, Pruesse E, Yilmaz P, Gerken J, Schweer T, Yarza P, Peplies J, Glöckner FO. 2013. The SILVA ribosomal RNA gene database project: improved data processing and web-based tools. [Opens external link in new window.](#) *Nucl. Acids Res.* 41 (D1): D590-D596.

Reigstad LJ, Jorgensen SL, Schleper C. 2010. Diversity and abundance of *Korarchaeota* in terrestrial hot springs of Iceland and Kamchatka. *ISME J*, 4:346-356.

Sigríður Hjörleifsdóttir, Skírnisdóttir S, Hreggviðsson GÓ, Holst O, Kristjánsson JK. 2001. Species composition of cultivated and noncultivated bacteria from short filaments in an Icelandic hot spring at 88°C. *Microb. Ecol.* 42: 117-125.

Sólveig K. Pétursdóttir, Snædís H. Björnsdóttir, Guðmundur Óli Hreggviðsson, Sólveig Ólafsdóttir. 2010. Lífríki í hverum á háhitasvæðum á Íslandi. Heildarsamantekt unnin vegna Rammaáætlunar. RÁ2. Lokaskýrsla. Skýrsla Matís 42-10. Desember 2010. ISSN 1670-7192.

Sólveig K. Pétursdóttir, Snædís H. Björnsdóttir, Alexandra Klonowski, Sólveig Ólafsdóttir, Guðmundur Óli Hreggviðsson. 2008. Lífríki í kalkríkum hverum á Ölkelduhálsi. Skýrsla Matís 30-08 Október 2008. ISSN 1670-7192.

Sólveig K. Pétursdóttir, Tryggvi Þórðarson, Steinunn Magnúsdóttir, Guðmundur Óli Hreggviðsson. 2006. Mat á umhverfisáhrifum jarðvarmavirkjana í Hverahlíð og við Ölkelduháls. Athugun á lífríki hvera. Unnið fyrir Orkuveitu Reykjavíkur. Prokaria og Háskólasetrið í Hveragerði.

Sólveig K. Pétursdóttir, Sólveig Ólafsdóttir, Steinunn Magnúsdóttir, Guðmundur Óli Hreggviðsson. 2007. Lífríki í hverum í Krýsuvík og Gunnhver á Reykjanesi. Skýrsla unnin fyrir Orkustofnun v. RÁ2. ISSN 1670-7192

Sólveig K. Pétursdóttir, Steinunn Magnúsdóttir, Viggó Þ. Marteinsson, Guðmundur Óli Hreggviðsson, Jakob K. Kristjánsson. 2006. Lífríki í hverum á Torfajökulssvæðinu. Skýrsla unnin fyrir Orkustofnun vegna RÁ2.

Sólveig K. Pétursdóttir, Snædís Huld Björnsdóttir, Sólveig Ólafsdóttir, Guðmundur Óli Hreggviðsson. 2008. Líffræðilegur fjölbreytileiki í hverum að Þeistareykjum og í Gjástykki. Skýrsla Matís 39-08. Desember 2008. ISSN 1670-7192. Unnið fyrir Þeistareyki ehf.

Sólveig K. Pétursdóttir, Snædís Huld Björnsdóttir, Sólveig Ólafsdóttir, Guðmundur Óli Hreggviðsson. 2009. Lífríki í hverum í Vonarskarði. Skýrsla Matís 09-09. Mars 2009. ISSN 1670-7192. Unnið fyrir Orkustofnun vegna RÁ2.

Sólveig K. Pétursdóttir, Snædís H. Björnsdóttir, Sólveig Ólafsdóttir, Guðmundur Óli Hreggviðsson. 2007. Lífríki í hverum við Kröflu og Námafjall. Unnið fyrir Orkustofnun vegna Rammaáætlunar. Skýrsla Matís 02-08 Febrúar 2007. ISSN 1670-7192.

Viggó Þór Marteinsson, Sólveig K. Pétursdóttir, Steinunn Magnúsdóttir. 2004. Líffræðileg fjölbreytni í hverum og laugum á Hengilssvæðinu. Skýrsla unnin fyrir Orkustofnun (vegna RÁ2).

Wang Q, Garrity GM, Tiedje JM and Cole JR. 2015. Naïve Bayesian Classifier for Rapid Assignment of rRNA Sequences into the New Bacterial Taxonomy. Applied and Environmental Microbiology. 81:2

Woese, Carl R.; Kandler, O; Wheelis, M (1990). *"Towards a natural system of organisms: proposal for the domains Archaea, Bacteria, and Eucarya"*. Proc Natl Acad Sci USA **87** (12): 4576–9.

Þorleifur Eiríksson og Sigmundur Einarsson 2016. Sampætt mat á fjölbreytni náttúru og menningarmínja. Unnið fyrir Faghóp 1 í Rammaáætlun 3. Náttúruminjasafn Íslands.