



Rannsókná- og fræðasetur Háskóla Íslands í Hveragerði

**Mat á umhverfisáhrifum jarðvarmavirkjunar á Hellisheiði**

## **Athugun á lífríki hvera**

Unnið fyrir Orkuveitu Reykjavíkur

Tryggvi Þórðarson og Sólveig K. Pétursdóttir

Október 2002



## Efnisyfirlit

Myndalisti.....	5
Töflulisti .....	7
Inngangur.....	9
Gerðir hvera og lauga .....	9
Sérkenni hvera sem vistkerfa.....	9
Gufuhverir .....	10
Leirhverir .....	10
Vatnshverir .....	10
Verndargildi hvera og lauga .....	10
Áhrif jarðhitavinnslu á hveralífverur .....	11
Jarðhiti á Hellisheiði.....	12
Aðferðir .....	12
Framkvæmd athugunarinnar.....	12
Aðferðir við erfðagreiningu.....	12
Sýnatökustaður og sýnataka .....	12
Einangrun á frumum og DNA .....	13
Mögnun á 16S rRNA og hlutaraðgreining á geninu .....	13
Greining á tegundasamsetningu og samanburður við aðra hverir.....	13
Niðurstöður.....	13
Sleggjubeinsdalur .....	13
Hver í fremsta þvergilinu.....	14
Laugar í innra þvergilinu .....	15
Efsta hverasvæðið.....	17
Hverir utan í hól.....	20
Hveradalir .....	21
Merki um jarðhita .....	21
Heitur blettur með gróðurbreytingum.....	22
Hveraskellur næst Skíðaskálanum .....	22
Gróðurlaus moldarblettur .....	22
Stór hveraskella .....	23
Skellur vestanmegin lækjar .....	23
Vatnshverir .....	24
Þyrping vatnshvera við læk .....	26
Lækurinn .....	28
Sviðinn gróðurblettur upp með læknum .....	28
Hveraskellur austan lækjarins.....	29
Bakarabrekka.....	31
Niðurstöður erfðagreininga.....	32
Umræður og ályktanir.....	35
Heimildir .....	37



## Myndalisti

Mynd 1.	Austanverður Sleggjubeinsdalur. Hverir eru efst í fremsta þvergilinu utan við myndina (1), laugar eru neðst í næsta gili (2), ofan við gula flekkinn handan þess gils eru hverir (3) en öflugastu hverirnir eru í skriðunni ofan við hólinn (4). Ljósmynd 2002 TP.....	14
Mynd 2.	Hveraskellan í fremsta þvergilinu. Myndin er tekin í NA. Ljósmynd 2002 TP.....	14
Mynd 3.	Gufuaugu í fremsta þvergilinu norðanverðu. Ljósmynd 2002 TP. ....	15
Mynd 4.	Varmalindir sem koma fram í þvergili í Sleggjubeinsdal austanverðum. Örvar benda á stærstu lindirnar. Sýni til erfðagreininga var tekið úr lauginni sem miðörin bendir á (N64°03,074', V21°22,095'). Ljósmynd 2002 TP. ....	16
Mynd 5.	Smásjármynd. Þörungur úr laugum í þvergili í Sleggjubeinsdal. Á myndinni sést m.a. <i>Mastigogladus laminosus</i> . Sýnið var tekið 17. júlí úr ljósgrænum þörungagróðri sem óx við um 44°C og pH 6,2-6,9. 40 x stækkun. Ljósmynd 2002 SKP. ....	16
Mynd 6.	Þekja <i>Mastigocladus laminosus</i> í einni af laugunum í þvergili austantil í Sleggjubeinsdal. Ljósmynd 2002 TP. ....	17
Mynd 7.	Hverasvæði í skriðu innst í Sleggjubeinsdal austanverðum. Grá vatnsslóðin úr einum hvernnum sést greinilega. Myndin er tekin í norðaustur af hólnum. Ljósmynd 2002 TP.....	17
Mynd 8.	Skriðan ofan við innsta hverasvæðið í austanverðum Sleggjubeinsdal. Gufa sem líður víða upp úr skriðunni gefur til kynna jarðhita. Á hægri myndinni má sjá 30-40 cm djúpa holu sem myndaðist eftir göngustaf. Ljósmynd 2002 TP. ....	18
Mynd 9.	Við norðurmörk hverasvæðisins efst í Sleggjubeinsdal austanverðum. Hitamælirinn sýnir 52,9°C á 20-25 cm dýpi. Plantan á myndinni er stór. Ljósmynd 2002 TP. ....	18
Mynd 10.	Brennisteinsútfellingar umhverfis hveraauga á norðanverðu hverasvæðinu í skriðunni innst í Sleggjubeinsdal austanverðum. Ljósmynd 2002 TP.....	18
Mynd 11.	Aðalgufuuppstreymi hverasvæðisins í skriðunni efst í Sleggjubeinsdal austanverðum. Grjótið fremst á myndinni hefur oltið niður bratta skriðuna sem sést í efst og hafnað við neðri brún skálarinnar. Ljósmynd 2002 TP. ....	19
Mynd 12.	Tvö af aðalhveraopunum á hverasvæðinu efst í Sleggjubeinsdal austanverðum. Á myndinni til vinstri sjást þau bæði en það efra er sýnt betur á myndinni til hægri. Brennisteinsútfellingar á barmi efra opsins eru greinanlegar á myndinni til hægri. Ljósmynd 2002 TP. ....	19
Mynd 13.	Afrennsli hvera á hverasvæðinu í skriðunni efst í Sleggjubeinsdal austanverðum. Örin bendir á útstreymisopið. Ljósmynd 2002 TP.....	20
Mynd 14.	Hverasvæði framan í hólnum innarlega í Sleggjubeinsdal austanverðum. Ljósmynd 2002 TP. 20	
Mynd 15.	Hverasvæðið í Hveradölum. Ljósmynd 2002 TP. ....	21
Mynd 16.	Blettur við hveraskelluna næst Skíðaskálanum þar sem jarðhiti hefur áhrif á gróðursamfélag. Ljósmynd 2002 TP. ....	22
Mynd 17.	Heitur moldarblettur í Hveradölum. Ljósmynd 2002 TP.....	23
Mynd 18.	Gróður fast neðan við moldarblettinn á mynd 17. Ljósmynd 2002 TP.....	23
Mynd 19.	Smásjármynd af <i>Zygonium</i> úr sýni frá skellu við vatnshveri í Hveradal. Ljósmynd 2002 SKP.....	24
Mynd 20.	Vatns-, gufu- og leirhverasvæði í Hveradölum. Ljósmynd 2002 TP.....	24
Mynd 21.	Kröftugur vatnshver með lítið rennsli. Hverinn er staðsettur í þyrpingu fjölbreytilegra vatnshvera austast á hverasvæðinu í Hveradölum. Afrennsli þróarinnar sést lengst til hægri á myndinni en í það virðist hafa verið reynt að troða plastpoka. Ljósmynd 2002 TP. ....	25
Mynd 22.	Vatns- og leirhverir ofan vatnshversins í þrónni. Örvar benda á hverir sem sýndir eru á myndum 23-25. Ljósmynd 2002 TP. ....	25
Mynd 23.	Augu ofan við vatnshverinn í þrónni. Rauði liturinn er sennilega járnútfellingar. Ljósmynd 2002 TP. ....	25
Mynd 24.	Auga ofan vatnshversins í þrónni. Rauði liturinn er hugsanlega járnóxíð eða hýdroxíð. Ljósmynd 2002 TP. ....	25
Mynd 25.	<i>Cyanidium caldarium</i> í kantinum ofan við vatnshverina (grænn litur). Ljósmynd 2002 TP.26	

Mynd 26. Vatnshverir á lækjarbakkanum séð niður eftir afrennslinu. Dökk skán á ljósum bakkanum er <i>Zygonium</i> , rauð- og gulbrúnn litur er sennilega járnnoxíð eða hýdroxíð, svartur litur járn-súlfíð og hvítur litur brennisteinsútfellingar. Örin bendir á augað sem sýnt er á mynd 26. Ljósmynd 2002 TP. ....	26
Mynd 27. Sömu augu og sjást á mynd 26 (ör). Undir brúna litnum glittir sumstaðar í græna þörungapækju <i>Mastigocladus laminosus</i> . Ljósmynd 2002 TP. ....	27
Mynd 28. Vatnshverirnir á lækjarbakkanum séð upp eftir afrennslinu. Dökk þekja á bakkanum hægra megin er <i>Zygonium</i> og grænn blettur vinstra megin <i>Mastigocladus laminosus</i> (örvar). Fremst í læknum er sína en við þessar aðstæður gætu hugsanlega verið í henni bakteríur af gerðinni Aquificales (ljósgrár litur). Ljósmynd 2002 TP. ....	27
Mynd 29. Gufuauga á bakkanum hjá hveraþyrpingunni næst læknum. Ljósgræna sliktan á ljósu útfellingunum er tegundin <i>Cyanidium caldarium</i> en dökka röndin er <i>Zygonium</i> tegund. Ljósmynd 2002 TP. ....	27
Mynd 30. Lækurinn rétt ofan við vatnshverasvæðið í Hveradölum. Ljósmynd 2002 TP. ....	28
Mynd 31. Heitur gróðurblettur ofarlega við læk. Mælir sýnir 99,0°C í 25-30 cm dýpi. Aðeins mosi lifir því hann er rótaurlaus. Ljósmynd 2002 TP. ....	29
Mynd 32. Heitur gróðurblettur ofarlega við læk. Mælirinn sýnir 70,8 °C í 25-30 cm dýpi. Hér eru grös tekin að sölna þar sem rötarkerfið hitnar. Ljósmynd 2002 TP. ....	29
Mynd 33. Efstu hveraskellurnar austan lækjarins. Þarna er lækurinn þurr. Ljósmynd 2002 TP. ....	29
Mynd 34. Leirhver austan við lækinn í Hveradölum. Greina má grænþörnunginn <i>Cyanidium caldarium</i> á brún hversins efst til hægri (ör). Ljósmynd 2002 TP. ....	30
Mynd 35. Malarskella með 6-7 augum (N64°01,198, V21°23,623). Örin bendir á augað sem er á mynd 36. Ljósmynd 2002 TP. ....	30
Mynd 36. Gufuauga á malarskellunni sem sýnd er á mynd 35. Ljósmynd 2002 TP. ....	31
Mynd 37. Bakarabrekka. Ljósmynd 2002 TP. ....	31
Mynd 38. Vestari hluti Bakarabrekku. Tilraunaborhola sést blása skammt frá. Ljósmynd 2002 TP. ....	32
Mynd 39. Dæmigert gufuauga í Bakarabrekku. Ljósmynd 2002 TP. ....	32

## Töflulisti

Tafla 1	Nánustu ættingjar DNA raða úr lífmassasýni úr laug í Sleggjubeinsdal (56-62°C, pH 6,2-6,5). Fjöldi raða sem flokkast yfir 97% innbyrðis er sýndur svo og skyldleiki (%) við nánasta ættingja. Í athugasemdadálkinum er m.a. merkt við raðir sem finnast í fleiri hverum á Íslandi og talan í sviganum gefur til kynna fjölda hvera. ....	33
Tafla 2.	Samanburður á líffræðilegum fjölbreytileika í erfðagreindum sýnum. Taflan sýnir hita- og sýrustig í lauginni í Sleggjubeinsdal og í samanburðarhverunum. Megin niðurstöður erfðagreininga eru sýndar, þ.e. fjöldi DNA raða og fjöldi tegunda úr hverju sýni. Einnig er sýndur hlutfallslegur tegundafjöldi sem gefur til kynna líffræðilegan fjölbreytileika. ....	34
Tafla 3.	Samanburður á tegundasamsetningu sýnis úr lauginni í Sleggjubeinsdal, tveimur sýnum úr hver á Ölkelduhálsi og einu sýni úr hver við Kleifarvatn. Sýndur er fjöldi DNA raða í sýninu og skyldleikahlutfall DNA raðana við viðkomandi tegund.....	34
Tafla 4.	Samantekt nokkurra atriða sem athuguð voru. ....	36



## Inngangur

### ***Gerðir hvera og lauga***

Hverir á háhitasvæðum myndast flestir við að heit gufa djúpt úr jarðskorpunni leitar upp á yfirborðið. Þar sem kalt grunnvatn eða jarðvatn verður á leið gufunnar hitar hún vatnið og til verða vatnshverir. Þar sem ekki er grunnvatn eða jarðvatn í teljandi mæli verða til gufuaugu og leirhverir. Útfellingar á nánast hreinum brennisteini einkenna þurr gufuaugun en brennisteinn nær að leysast upp í votum gufuaugum þar sem að jafnaði er lítilsháttar vatn til staðar. Uppleystur brennisteinn við yfirborð myndar brennisteinssýru með ólífrænni og lífrænni oxun og hún ummyndar bergið og myndar leirinn sem einkennir leirhverina. Einkenni tveggja síðastnefndu gerðanna er súrt umhverfi en í vatnshverum háhitasvæða nær brennisteinssýran að skolast burt og við það nær vatnið oft pH á bilinu 6 – 7 sem er talsvert frábrugðið pH annarra hvera á háhitasvæðum. Vatnshverir háhitasvæða skera sig einnig oft úr fyrir það hve hátt súlfíðinnihald vatn þeirra hefur. Laugar og vatnshverir á lághitasvæðum eru hinsvegar oftast með tiltölulega hátt sýrustig og lágan súlfíðstyrk. Þar er yfirleitt um að ræða djúpt grunnvatn sem hitnar beint við snertingu við berg. Vegna lægri upphafshita er efnainnihald vatnshvera, lauga og volgra yfirleitt lægra á lághitasvæðum auk þess sem heita vatnið hefur oft blandast köldu grunnvatni og jarðvatni áður en það nær yfirborði.

### ***Sérkenni hvera sem vistkerfa***

Hverir eru tiltölulega fáir á yfirborði jarðar sé miðað við annað votlendi. Bæði af þeim sökum og vegna sérstæðra umhverfisskilyrða í hverum hafa þeir svipaða stöðu og eyjar í hafi varðandi dreifingu lífvera. Því er flutningur lífvera milli hvera mun meiri vandkvæðum bundinn en milli annarra vatnagerða. Hverir eru fyrst og fremst búsvæði örvera þótt æðri dýr og plöntur eigi einnig sín búsvæði í og við laugar og hverir. Hveraörverur greinast ekki með berum augum nema í örfáum tilvikum og er greiningum þeirra í smásjá takmörk sett þar sem margar tegundir þeirra eru nær eins í útliti auk þess sem sömu tegundir geta litið mismunandi út eftir gerð viðkomandi hvera og aðstæðum þar. Til þess að greina örverur hvera til tegunda þarf að rækta þær á rannsóknastofu. Jafnvel sú aðferð er þó aðeins talin geta gefið til kynna lítinn hluta þeirra örverutegunda sem í hverum leynast eða inna við 1% (R.I. Amann o.fl. 1995). Erfðafræðilegar greiningar, þar sem raðir gena eru bornar saman við raðir í genabönkum, ná til flestra hveraörverutegunda eða tegunda skyldra þeim. Aðferðirnar eru þó enn að nokkru á þróunarstigi og hefur aðeins hluti hvera verið kannaður á þann hátt enn sem komið er, aðallega basískir og súlfíðríkir vatnshverir. Greiningum örvera eru því takmörk sett. Þeir umhverfispættir sem vitað er að skipta miklu máli um það hvaða tegundir geta hafst við í hverum eru hitastig, sýrustig og uppleyst efni, sérstaklega súrefni og brennisteinssambönd en einnig m.a. járnsambönd og vetni. Samfélög örvera í hverum eru mjög einkennandi fyrir ákveðnar gerðir hvera

hvað þessa þætti varðar. Verður hér gerð stuttlega grein fyrir lífríki örvera í mismunandi gerðum hvera.

### Gufuhverir

Vegna vatnsskorts er jafnan lítið um örverur í gufuhverum en þó sést þörungurinn *Cyanidium caldarium* oft á börmum þar sem raki er nægur. *Cyanidium* þörungar eru kúlulaga grænþörungar sem þola allt að 55°C. Þörungarnir þola vel lágt sýrustig og geta vaxið allt niður í pH 0,5. Ef nægilega mikið af gufunni nær að þéttast út umhverfis hverinn eða ef nokkurt vatnsflæði er úr hvernum öðru hvoru (votur gufuhver) eru einnig sjáanlegir fjær opinu þörungar af ættkvíslinni *Zygonium*. Þessir þörungar þola mjög lágt sýrustig en þrífast best þar sem hitastigið fer ekki mikið yfir 20°C. Einnig þeir eru grænþörungar og mynda greinilega græn- eða brúnleita þræði í vatnsfarvegi slíkra hvera eða umhverfis þá. Út til jaðrana þar sem þurrara er mynda þeir brúnleita skán sem einna helst líkist mosa. Í votum gufuhverum er einnig að finna nokkrar tegundir af loftfælum, hitakærum, fornbakteríum (Archaea) í miklu magni á nokkurra cm dýpi í jarðveginum.

### Leirhverir

Leirhverir hafa nægilegt vatn til að þar geti þrífist ríkt örverulíf og er þéttleiki örvera í vatnsfasa hveranna oft mjög mikill eða allt að  $10^8$ /ml (K. O. Stetter & H. König 1983). Í þeim fer fram oxun  $H_2S$  yfir í brennisteinssýru sem að talsverðu leyti er af völdum örvera. Í leirhverum er aðalega að finna loftfælnar bakteríur. Flestar örverutegundirnar teljast til fornbaktería (Archaea) og eru þær einkennandi fyrir leirhveru. Af fornbakteríum eru þekktar fjölmargar ættkvíslir og tegundir (Jakob K. Kristjansson 1992). Þar eru einnig bakteríur sem nota brennisteinssvæði ( $H_2S$ ) og vetni ( $H_2$ ) til uppbyggingar lífræns kolefnis. Á því kolefni nærast síðan ófrumbjarga örverur. Meðal helstu einkennistegunda leirhvera eru *Sulfolobus* tegundir, en merki um þær er brák sem flýtur á hverunum og er sjáanleg með berum augum. Brákin er mynduð úr bakteríunum sjálfum og pýrítíkristöllum sem þær eiga þátt í að mynda. *Cyanidium* þörungar geta einnig verið áberandi í börmum leirhvera.

### Vatnshverir

Hverir á háhitasvæðum með sýrustig pH 6-7 eru ekki algengir en í þeim er hinsvegar afar sérstætt lífríki ef þeir eru ríkir af súlfíði. Súlfíðoxandi bakteríur vaxa í löngum þráðum og mynda mikinn sýnilegan, hlaupkenndan, massa sem kemur fyrir sem hvítar og gráar skellur í afrennslinu. Í litlu rennli þar sem súrefni kemst vel að verður oxunin til þess að massinn litast næstum gulur af brennisteinssútfellingum. Sé súlfíð hveravatnsins lítið svipar vistkerfi þessara hvera til vistkerfa vatnshvera á lághitasvæðum. Hverafluga (*Scatella tenuicosta forma thermarum*), vatnabobbi (*Lymnaea peregra*) og laugakónguló (*Pirata piraticus*) eru einkennandi fyrir slíka hveru.

### Verndargildi hvera og lauga

Þau atriði sem vega þyngst í mati á verndargildi varmalinda eru gerð, staðsetning, sögulegt gildi, lífríki, áhrif á útbreiðslu lífvera, áhrif á aðrar vatnagerðir, efnainnihald vatns og umfang röskunar (Tryggvi Þórðarson 1981). Sum þessara atriða eru tengd og á það sérstaklega við um lífríki annars vegar og gerð og efnainnihald hinsvegar. Eins og vikið var að eru vatnshverir háhitasvæða fremur fátíðir. Þá er helst að finna á svæðum þar sem grunnvatn stendur hátt eða þar sem gufan blandast jarðvatni sem

stöðugt streymir að. Dæmi um slíkt aðstreymi jarðvatns er Grensdalur ofan við Hveragerði og hverasvæðið við Hrafninnusker. Þessir hverir eru oft súlfíðríkir með pH á bilinu 6-7. Hverir í þessum hópi sem eru með hitastig á bilinu 75–85°C eru afar sjaldgæfir og nánast óþekktir erlendis. Tilvist þeirra á Íslandi má sennilega rekja til vætusamara veðurlags en víða annarstaðar. Í þeim er einnig sérstaklega áhugavert lífríki sem eru súlfíðoxandi bakteríur í miklu magni.

### **Áhrif jarðhitavinnslu á hveralífverur**

Samfélag hveralífvera er háð aðstæðum í hverunum. Tvær meginforsendur þess að hveralífverur geti þrífist er nægilegur hiti og vatn eða raki. Auk þessara þátta er það m.a. efnastyrkur vatns og gufu sem hefur áhrif á það hvaða lífverusamfélög geta setið hverina.

Hugsanleg áhrif vatnstöku jarðhitavatns á hveralífverur eru háð jarðfræðilegri gerð hverasvæðanna og ekki síður hveragerðum þar. Áhrifin á tegundasamsetningu og fjölbreytileika er auk þess háð umfangi hugsanlegra breytinga. Hér verður ekki fjallað sérstaklega um breytingar sem kunna að verða á Hellsheiðarsvæði vegna virkjunar heldur aðeins tæpt á atriðum sem gætu almennt haft áhrif á hveralífverur.

Virgni vatnshvera sem fá vatn sitt úr iðrum jarðar minnkar eða þeir hverfa við uppdælingu jarðhitavatns því að við dælinguna lækkar grunnvatnsborðið (sjá m.a. Gary T. Bolaños o.fl. 2000, Jón Steinar Guðmundsson 1980, Kristján Sæmundsson & Ingvar Birgir Friðleifsson 1980). Þetta er þekkt þar sem lágghitasvæði hafa verið virkjuð (Jón Steinar Guðmundsson 1980, Kristján Sæmundsson & Ingvar Birgir Friðleifsson 1980, Helgi Torfason 1997). Hághitasvæði með þannig vatnshverum eru ekki algeng þótt slík svæði þekktist (Hveragerðis- og Geysissvæðið) (Kristján Sæmundsson & Ingvar Birgir Friðleifsson 1980). Algengustu hverirnir á hághitasvæðum eru hinsvegar gufu- og leirhverir. Þeir eru stundum sagðir geta horfið eða minnkað við vinnslu (Jón Steinar Guðmundsson 1980, Trevor M. Hunt 2000). Grunnvatn á hághitasvæðum er oft 200-300°C heitt (Guðmundur Pálmason 1980) en vegna þrýstings sýður það ekki. Við vinnslu getur vatnstakan lækkað þrýsting í vatnstökukerfinu (Valgarður Stefánsson 1980) og suða breiðst út frá borholunni og orðið almenn í efsta hluta kerfisins (Sveinbjörn Björnsson 1980). Þetta getur hafist strax við langtímaprófun borhola (Valgarður Stefánsson 1980). Dæmi eru um að yfirborðsvirkni gufuauga aukist mjög samfara slíkri gufumyndun (Halldór Ármannsson o.fl. 1997). Ætla verður að aukin virkni auki líkurnar á fjölbreyttri tegundasamsetningu hveralífvera á viðkomandi svæði að því tilskildu að fjölbreytni hveragerða á svæðinu haldist, ekki síst er varðar hitastig.

Við hundruða ára sjálfbæra nýtingu jarðhitakerfis dregur úr vinnslugetu þess (Valgarður Stefánsson 2000). Ef hveravirkni minnkar að sama skapi mikið án þess að hverfa má búast við hægfara breytingum á tegundasamsetningu og fjölbreytileika hveralíftríkis á svæðinu.

Uppdæling jarðhitavatns getur einnig haft áhrif á efnasamsetningu hveravatnsins/gufunnar á svæðunum. Þetta getur t.d. orðið þegar niðurdrátt fer að gæta og vatn með annarskonar efnasamsetningu tekur að streyma að svæðinu (Axel Björnsson 1990). Slík breyting gæti leitt til breytinga á tegundasamsetningu í lífríki hversins.

Heitt affallsvatn virkjana kann hinsvegar að skapa nýjar aðstæður fyrir hveralífverur og auka líkurnar á fjölbreyttri tegundasamsetningu á viðkomandi svæði.

## Jarðhiti á Hellisheiði

Hveravirkni á Hellisheiði og nágrenni er að finna á fjölmörgum stöðum en rannsóknin er takmörkuð við þá staði sem eru innan skilgreinds áhrifasvæðis virkjunnarinnar. Um er að ræða hverir á þremur afmörkuðum stöðum, í Sleggjubeinsdal, í Hveradölum og í Bakarabrekku undir hlíðum Skarðsmýrarfjalls. Á öllum þessum stöðum eru merki um gamla jarðhitavirkni (ummyndanir) sem benda til að hverir hafi verið þar lengi.

## Aðferðir

### *Framkvæmd athugunarinnar*

Hverir á rannsóknasvæðinu voru skoðaðir og greindir til megingerða m.t.t. lífríkis. Teknar voru myndir af helstu hverunum, staðsetning þeirra ákveðin með WGS 84 viðmiðun með 3 m nákvæmni þar sem annað er ekki tekið fram og hitastig þeirra mælt, svo og sýrustig þar sem vatn var fyrir hendi. Leitað var eftir ákveðnum sýnilegum einkennistegundum og voru sýni úr sumum hveranna tekin til smjásjárskoðunar. Vatnssýni til ræktunar og erfðagreininga var auk þess tekið úr lindum í þvergili í austanverðum Sleggjubeinsdal og úr afrennsli hvers í skriðu ofarlega í Sleggjubeinsdal austanverðum. Lindirnar voru valdar til sýnatöku þar sem eðliseiginleikar þeirra og útlit bentu til að þar væri að vænta mesta líffræðilega fjölbreytileikans í hverum á rannsóknasvæðinu. Smásjárskoðun, ræktun og erfðagreining fór fram hjá Prokaria ehf.

Hér á eftir fer lýsing á hverunum á rannsóknasvæðinu og umhverfi þeirra. Svæðinu er skipt í þrjá hluta, Sleggjubeinsdal, Hveradali og Bakarabrekku en hver hluti er landfræðilega vel aðgreindur. Vettvangsferðir voru farnar 2. júlí, 17. júlí og 22. ágúst 2002. Lýsingar á hverunum voru að mestu gerðar 2. júlí en sýnatökur og nánari skoðun hina dagana. Fyrsta daginn var bjart og þurr og hafði verið svo um hríð en síðari dagana var úrkoma með köflum en þá hafði vætutíð einnig verið dagana á undan. Útlit hverana og í sumum tilvikum vatnshitinn var ekki í öllum tilvikum sá sami þessa daga, m.a. vegna meira vatnsaga síðari dagana.

### *Aðferðir við erfðagreiningu*

#### Sýnatökustaður og sýnataka

Sýni var tekið úr einni af þremur stærstu laugunum (N64°03,074' V21°,22,095') í þvergili í austanverðum Sleggjubeinsdal (sjá mynd 4). Rúmmál þess var einn lítri og því safnað með 50 ml sprautu og skeið á kafla frá uppsprettunni og 40 cm niður eftir afrennslinu, við hitastig sem næst 60°C. Reynt var að veiða hulu ofan af. Hulan var víða í lögum, græn efst (*Mastigocladus laminosus*) en 2 mm neðar var svart lag og stundum hvítt (brennisteinsbakteríur). Sandi við uppsprettuopið var einnig mokað í sýnið en ekki farið dýpra en um 1 cm. Hitastigsbilið frá uppsprettunni og 40 cm frá henni var 56-62°C og pH á bilinu 6,2-6,5.

## Einangrun á frumum og DNA

Lífmassi var veiddur úr sýninu og frumuþekja skoluð af mól og sandi. Frumuveggir og frumuhimnur voru rofnar með ensímlausn og sápu. Proteasi K var notaður til að brjóta niður ensím í lausninni. Fenól og klóróform meðhöndlun var beitt til að fella út próteinin og DNA síðan fellt út í vatnsfasanum með etanóli. DNA var spunnið niður og að lokum leyst upp í mildum buffer. Styrkur og hreinleiki DNA í sýninu var metinn með ljósgleypnimælingu við 260 og 280 nm.

## Mögnun á 16S rRNA og hlutaraðgreining á geninu

Sérhæfðir 16S rRNA vísar fyrir Eubacteria (F9 og R1544) voru notaðir við að magna 16S rRNA gen upp úr DNA sýninu með PCR. Afurðirnar voru rafdrengar á agarosageli og böndin klippt út og hreinsuð á GFX súlum (Amersham Biosciences) skv. leiðbeiningum frá framleiðanda. 16S genin voru síðan klónuð inn í TopoTa ferjur sem síðan voru fluttar inn í Topo10 competent frumur (Invitrogen) skv. aðferð frá framleiðanda. Athugað var hvort innskot væri í klónunum með því að magna genið upp með M13 F og M13 R vísun. Raðgreiningarhvörf voru síðan gerð á innskotsröðum með F805 raðgreiningarvísi sem gefur u.þ.b. 5-600 bp langar raðir og síðan raðgreindar í tæki (3700 frá ABI) hjá Íslenskri erfðagreiningu.

## Greining á tegundasamsetningu og samanburður við aðra hver

Raðirnar sem fengust við erfðagreiningu á sýni úr Sleggjubeinsdal voru flokkaðar með Sequencher tölvuforritinu (útg. 4.05 fyrir Windows) frá Gene Codes Corporation og voru raðir sem sýndu 98% eða meiri skyldleika flokkaðar saman sem tegund. Raðirnar voru síðan greindar til tegundar eða ættkvíslar með samanburði við raðir í genabanka NCBI. Tilraun var gerð til að bera saman niðurstöðurnar við niðurstöður erfðagreiningar örvera úr öðrum hverum með svipað hita- og sýrustig.

## Niðurstöður

### *Sleggjubeinsdalur*

Sleggjubeinsdalur liggur milli Skarðsmýrarfjalls að austan og Húsmúla að vestan. Fjöll þessi eru mynduð í gosum á síðasta jökulskeiði, Húsmúlinn úr grágrýti og móbergi en Skarðsmýrarfjall úr móbergi (Kristján Sæmundsson 1995). Í brúnum Skarðsmýrarfjalls er bólstraberg og skriður fjallsins eru úr því. Fremst í dalnum myndar árframburður nokkurt undirlendi en er innar dregur eru brött gil og skriður einkennandi. Að austanverðu hefur orðið framlaup úr Skarðsmýrarfjalli efst í dalnum. Famhlaupið hefur skilið eftir sig brattar fjallshlíðar í sárinu en myndað hól í dalnum neðan við. Berggangar liggja út dalinn, sérstaklega í hlíðunum austanverðum. Hveravirknin er öll í austanverðum dalnum og virðist tengjast berggöngum eða misgengjum. Talsverð ummyndun bergs er í dalnum sem bendir til langvarandi hitavirkni.

Hveravirkni er á fjórum stöðum í dalnum (mynd 1), efst í fyrsta þvergilinu er gufuhver, í lækjarfarvegi í næsta gili eru nokkrar litlar, rúmlega 60 °C heitar laugar, vestan í hólnum innst í dalnum eru brennisteinshverir og í skriðunni austan og ofan við hólinn eru gufu- og brennisteinshverir, þeir öflugustu sem eru að finna í dalnum. Einkennandi fyrir jarðhitann í Sleggjubeinsdal er hár styrkur koltvöldis (CO<sub>2</sub>) og brennisteinsvetnis (H<sub>2</sub>S) í gufunni (Helgi Torfason o.fl. 1983).



**Mynd 1. Austanverður Sleggjubeinsdalur. Hverir eru efst í fremsta þvergilinu utan við myndina (1), laugar eru neðst í næsta gili (2), ofan við gula flekkinn handan þess gils eru hverir (3) en öflugastu hverirnir eru í skriðunni ofan við hólinn (4). Ljósmynd 2002 TP.**

### Hver í fremsta þvergilinu

Ofarlega í fremsta þvergilinu, strax ofan við skíðaskálann, eru hveraskellur (sjá mynd 2). Virkir hverir eru aðeins í nyrstu og efstu skellunni (sjá mynd 2) og mældist hitinn í hveraleirnum þar víða um  $70^{\circ}\text{C}$  á um 20 cm dýpi. Skellan myndaði lágan hrygg nokkurn veginn samsíða gilinu í  $23^{\circ}$  halla en vatnsrofin ummyndunarleir var sunnan hryggjarins. Í skellunni mátti sjá lítilsháttar brennisteinsútfellingar en mest áberandi var rauðbrúnt og sumstaðar hvítt hverahrúður. Gufa kom fram í tveimur augum utan í hryggnum norðanverðum og var það neðra um 5 cm í þvermál og  $98,7^{\circ}\text{C}$  heitt en það efra innan við cm og  $98,6^{\circ}\text{C}$  heitt. Staðsetning var tekin um 1 m ofan við brún hverahryggsins, miðja veginni milli augnanna (N64°03,000, V21°22,063').



**Mynd 2. Hveraskellan í fremsta þvergilinu. Myndin er tekin í NA. Ljósmynd 2002 TP.**



Mynd 3. Gufuaugu í fremsta þvergilinu norðanverðu. Ljósmynd 2002 TP.

Grænþörungurinn *Cyanidium caldarium* var sjánlegur við bæði augun, við efra augað þar sem hitinn í efsta sentrimetranum var 35-57°C en við það neðra 42-47°C. Þegar sýni var tekið þann 22. ágúst var hitinn á þessu dýpi undir þörungunum við neðra augað 55-57°C. Greiningin var staðfest með smásjárskoðun.

### Laugar í innra þvergilinu

Í næsta þvergili fyrir innan rennur lækjarspræna í mikið ummynduðu bergi. Lækurinn hefur grafið sig niður í gilið og er bratt niður að honum beggja vegna. Neðarlega í gilinu norðanverðu, í 340-344 m.y.s., koma nokkrar litlar varmalindir fram rétt ofan við lækjarfarveginn (sjá mynd 4). Laugar þessar eru í sömu línu og hverirnir í hólnum norðan við.

Rennsli í laugunum er lítið og þeim minnstu varla merkjanlegt. Styrkur súlfíðs ( $H_2S$ ) er líklega ekki hár í lindarvatninu, pH vatnsins var 6,2-8,2 og hitastig 60,5-63,1°C. pH hækkar eftir því sem fjær dregur uppsprettunum. Í þeim vatnsminni, sem eru næst læknum, var hitastigið nokkru lægra eða allt niður í um 20°C. Lindir þessar náðu að velgja lækinn (um 3-5 l/s) úr 10,1°C við upptök hans skömmu ofar í gilinu upp í 14,3°C þar sem hann sameinaðist köldum læk (10°C) úr aðalgilinu nokkru neðar. Lindir þessar voru mjög keimlíkar og er þeim því lýst í einu lagi. Landgróður óx alveg að lindunum og afrennsli þeirra. Þrjár þær stærstu koma upp í 1-2 m fjarlægð frá læknum og var farvegur þeirra vaxinn móleiturum, grænum og blágrænum þörungum.

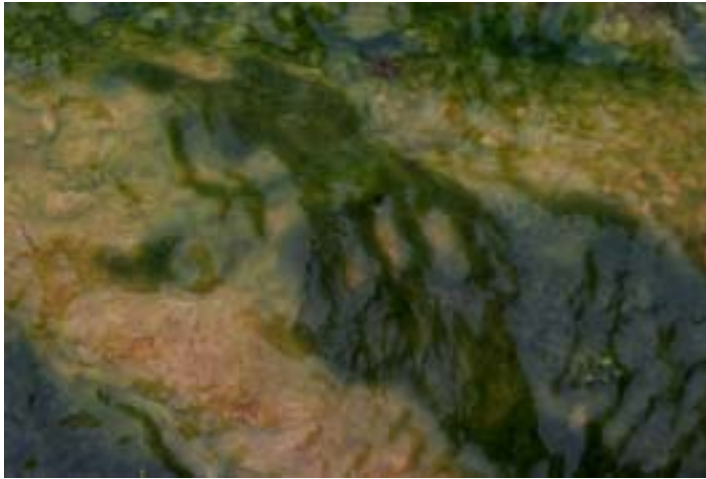


**Mynd 4.** Varmalindir sem koma fram í þvergili í Sleggjubeinsdal austanverðum. Örvar benda á stærstu lindirnar. Sýni til erfðagreininga var tekið úr lauginni sem miðörin bendir á (N64°03,074', V21°22,095'). Ljósmynd 2002 TP.

Enginn örveruvöxtur var sjáanlegur í mesta straumnum við opin en gulbrúnar og dökkrauðbrúnar útfellingar lituðu brúnir þörungakekjunnar á báðar hliðar hans og þar sem þær byrjuðu stuttu neðan við opin. Í kring um 40 -45°C myndaði *Mastigocladus laminosus* þunna, stinna og hlaupkennda skán í afrennsli lindanna. Við smásjárskoðun og erfðagreiningu var þessi greining staðfest. Við ræktun úr vatnssýni sem tekið var úr einni lindinni fannst auk þess bæði *Bacillustegund* og tegundin *Thermus ruber*. Sýni til erfðagreiningar var tekið úr einni af þremur stærstu lindunum. Enn fleiri tegundir komu fram við erfðagreiningu og er niðurstöðum hennar gerð skil aftar. Þar sem vatnið var um 30°C voru mjög dökkblágrænir þörungar. Þekja þeirra var laus í sér og greinilega úr stuttum, stífum þráðum. Smásjárskoðun leiddi í ljós að þarna var ekki um að ræða hitakæra tegund. Hverafluga (*Scatella tenuicosta f. thermarum*) var algeng á þörungakekjunni auk ránflugur (Diptera) sem sat um hveraflugurnar. Laugakónguló (*Pirata piraticus*) sást einnig. Vatnabobbi (*Lymnea peregra*) var ekki sjáanlegur.



**Mynd 5.** Smásjármynd. Þörungar úr laugum í þvergili í Sleggjubeinsdal. Á myndinni sést m.a. *Mastigocladus laminosus*. Sýnið var tekið 17. júlí úr ljósgrænum þörungagróðri sem óx við um 44°C og pH 6,2-6,9. 40 x stækkun. Ljósmynd 2002 SKP.



**Mynd 6. Þekja *Mastigocladus laminosus* í einni af laugunum í þvergili austantil í Sleggjubeinsdal. Ljósmynd 2002 TP.**

### Efsta hverasvæðið

Öflugasta hverasvæðið í Sleggjubeinsdal er í brattri skriðu nyrst í dalnum (sjá mynd 7). Skriðan snýr í NV ( $310^\circ$ ) og er halli hennar  $34^\circ$  þar sem hverasvæðið er. Ofan skriðunnar er brött hvilft efst í fjallsbrúninni og framan við hana er móbergsveggur og bólstrabergsgangur með miklu skarði í. Bólstrabergið sem fallið hefur úr hvilftinni niður í gegnum skarðið myndar skriðuna sem hverirnir eru í og er skriðan af þessum sökum dálítið kúpt og keilulaga.



**Mynd 7. Hverasvæði í skriðu innst í Sleggjubeinsdal austanverðum. Grá vatnsslóðin úr einum hvernum sést greinilega. Myndin er tekin í norðaustur af hólnum. Ljósmynd 2002 TP.**

Þarna hefur einnig einhverntíma fallið framhlaup sem m.a. hefur myndað hólinn rétt neðan við hverasvæðið. Áberandi skýr slóði er í stefnu niður skriðuna upp undir efstu brún hólsins, líklega eftir snjóflóð. Er hann jafnbreiður hverasvæðinu og þakin jarðvegsstykkjum úr hverunum, m.a. brennisteinsmolum. Hveravirkni er ekki sýnileg í slóðanum og jarðvegurinn undir virðist ekki ummyndaður.

Sýnilegt hverasvæði er um 30-40 m breitt og um 20-30 m langt. Er jarðvegur þar allur ummyndaður með útfellingum, m.a. brennisteini. Að ofanverðu leitar skriðan inn á svæðið og hefur sennilega kaffært a.m.k. helming þess því sumsstaðar ofan við ummyndaða skelluna rýkur úr skriðunni þótt engra litabrigða gæti í urðinni (mynd 8). Á einum stað í skriðunni ofan við sjáanlegu hverina lét jarðvegurinn undan göngustaf og í 30-40 cm djúpri holunni sem myndaðist mældust 59,9°C (mynd 8).



**Mynd 8.** Skriðan ofan við innsta hverasvæðið í austanverðum Sleggjubeinsdal. Gufa sem líður víða upp úr skriðunni gefur til kynna jarðhita. Á hægri myndinni má sjá 30-40 cm djúpa holu sem myndaðist eftir göngustaf. Ljósmynd 2002 TP.

Sjáanlegi hluti hverasvæðisins skiptist í nokkrar hveraskellur aðskildar af nýlegum jarðvegi úr skriðunni. Ætla verður þó að í raun sé þetta ein skella. Við norðurjaðarinn (N64°03,097', V21°21,834') liggur afmörkuð skella eilítið neðar í landslaginu vegna lögunar skriðukeilunnar. Þar vex gróður 1-3 m inn á hveraskelluna og er sumsstaðar talsverður hiti undir gróðrinum á 25-30 cm dýpi (mynd 9). Ekki er þó að sjá á gróðrinum annað en að jafnvægi ríki og því ekki líklegt að nýhitnað sé undir honum. Brennisteinsútfellingar voru áberandi við norðurjaðarinn (mynd 10). Grænþörungurinn *Cyanidium caldarium* sást víða innan um útfellingarnar og var tilvist hans staðfest með smásjárskoðun.



**Mynd 9.** Við norðurmörk hverasvæðisins efst í Sleggjubeinsdal austanverðum. Hitamælirinn sýnir 52,9°C á 20-25 cm dýpi. Plantan á myndinni er stór. Ljósmynd 2002 TP.



**Mynd 10.** Brennisteinsútfellingar umhverfis hveraauga á norðanverðu hverasvæðinu í skriðunni innst í Sleggjubeinsdal austanverðum. Ljósmynd 2002 TP.

Við suðurjaðarinn (N64°03,062', V21°21,837') nær hveravirknin út í nær gróðurlausa urð skriðunnar. Þar mældist hitinn í ysta auganu 86,5°C.

Mikið er af smágufuopum á víð og dreif í hveraskellunni en efst eru þau sýnu stærst. Þar er mest áberandi stór skál sem er um 5 m í þvermál en hálf full af grjóti (mynd 11). Aðalgufan frá svæðinu kemur upp um grjótið neðantil í skálinni (N64°03,076', V21°21,843'). Hiti gufunnar þar sem hún kom upp mældist 98,4°C.



**Mynd 11.** Aðalgufuuppstreymi hverasvæðisins í skriðunni efst í Sleggjubeinsdal austanverðum. Grjótið fremst á myndinni hefur oltið niður bratta skriðuna sem sést í efst og hafnað við neðri brún skálarinnar. Ljósmynd 2002 TP.

Fast norðan við skálina eru tvær holur upp af hvor annarri (sjá mynd 12). Sú neðri er um ½ m í þvermál en sú efri ½ x 1 m. Holurnar eru báðar um ½ m á dýpt, þverhníptar, með hliðar og botn úr mól og grjóti. Það bullsýður í þeim enda þótt aðeins örfárra cm vatn sé í botni þeirra. Áberandi brennisteinsútfellingar eru á börmum þeirrar efri.



**Mynd 12.** Tvö af aðalhveraopunum á hverasvæðinu efst í Sleggjubeinsdal austanverðum. Á myndinni til vinstri sjást þau bæði en það efra er sýnt betur á myndinni til hægri. Brennisteinsútfellingar á barmi efra opsins eru greinanlegar á myndinni til hægri. Ljósmynd 2002 TP

Um 1½ m neðar virðist lítið eitt leirblandað vatn vætla úr litlu hveraauga (98,1°C) (mynd 13). Vatnið seytlar nokkra metra og smáhverfur í skriðuna. Magn þess er greinilega háð úrkomu hverju sinni. Þar sem vatnið kom fram var hitastig þess 88,9°C (98,1°C þann 20. ágúst 2002) og pH 2,8. Við þessar aðstæður lifa líklega einhverjar tegundir fornbaktería. Aðeins neðar þar sem hitastig vatnsins er á bilinu 70-80°C var greinileg rauðbrún útfelling í syrunni (sjá mynd 13) og við 30°C til rúmlega 40°C brá aftur fyrir rauðbrúnum útfellingum. Þörungur af ættkvíslinni *Zygonium* óx þar sem vatnið hafði kólnað niður í 10-15°C. Greining hans var staðfest með smásjárskoðun.



**Mynd 13.** Afrennsli hvera á hverasvæðinu í skriðunni efst í Sleggjubeinsdal austanverðum. Örin bendir á útstreymisopið. Ljósmynd 2002 ТР.

#### Hverir utan í hól

Fjórða svæðið með hveravirkni í Sleggjubeinsdal er norðvestan í fyrrnefndum hól neðan við hverina í skriðunni (mynd 14). Ofarlega í hólnum í 385-387 m y.s. er röð af samhangandi hveraskellum þvert í hlíð hólsins sem hefur um 20° halla. Efsta og norðaustasta skellan hefur staðsetninguna N64°03,106, V21°21,967 en sú suðvestasta N64°03,095', V21°21,995'. Hitastig í augum þeirrar nyrstu var 98,3°C. Skella sem var aðeins neðan við línuna milli þessara tveggja var köld. Engar örverur voru sýnilegar á þessu svæði en gróður óx sumsstaðar inn á milli hveraskellanna.



**Mynd 14.** Hverasvæði framan í hólnum innarlega í Sleggjubeinsdal austanverðum. Ljósmynd 2002 ТР.

### **Hveradalir**

Hveradalir eru vestan í Hellsheiði, norðan við Þjóðveginn. Hverirnir í Hveradölum eru í sjónfæri við Þjóðveginn og skammt austan við Skíðaskálann sem þar er. Þeir liggja meðfram suðurhlíðum Stóra-Reykjarfells og tilheyrir jarðhitinn þarna vesturjaðri Hengilssprungureinarinnar (Knútur Árnason & Ingvar Þór Magnússon 2001). Um hverasvæðið gengur misgengi sem er að sjá í framhaldi af misgengjum á hverasvæðunum í Sleggjubeinsdal. Hér verður gerð grein fyrir hverunum í þeirri röð að byrjað verður á þeim vestustu og haldið áfram í austur. Á mynd 15 er yfirlit yfir svæðið með hverunum í Hveradölum.



**Mynd 15. Hverasvæðið í Hveradölum. Ljósmynd 2002 TP**

### **Merki um jarðhita**

Snemma dags þann 28. september sást leggja gufu upp úr hrauninu sunnan Þjóðvegarins. Logn var, hrímuð jörð og rakastig greinilega undir daggarmarki. Gufuna lagði upp um margar glufur á þremur stöðum á afmörkuðu svæði. Þar sem gufan kom upp var aðeins lítilsháttar velgja merkjanleg ofan í glufunum og ekki neinar augljósar breytingar á gróðurfari í kring. Fyrsti staðurinn myndaði þríhyrning (1.  $N64^{\circ}01,070'$ ,  $V21^{\circ}23,828'$  2.  $N64^{\circ}01,070'$ ,  $V21^{\circ}23,838'$  3.  $N64^{\circ}01,076'$ ,  $V21^{\circ}23,840'$ ) með aðaluppstreymið milli 1. og 3. staðsetningar. Þrjár til fjórar glufur voru utan þríhyrningsins ( $N64^{\circ}01,065'$ ,  $V21^{\circ}23,851'$ ). Á öðrum stað lítið eitt sunnar var röð gufuglufna frá  $64^{\circ}01,045'$ ,  $V21^{\circ}23,879'$  til  $N64^{\circ}01,043'$ ,  $V21^{\circ}23,873'$ . Þriðji staðurinn var nær Þjóðveginum þar sem voru tvær oparaðir, önnur byrjar sunnan í vörðu fast við blíslóðann að húsinu sem þarna er og hefur staðsetninguna frá  $N64^{\circ}01,086'$ ,  $V21^{\circ}23,648'$  til  $N64^{\circ}01,087'$ ,  $V21^{\circ}23,651'$  og sú þriðja liggur eftir hraunkanti sem endar inni í vegarkanti Þjóðvegarins ( $N64^{\circ}01,107'$ ,  $V21^{\circ}632'$  til  $N64^{\circ}23,622'$ ,  $V21^{\circ}23,622'$ ). Við staðarákvarðanir sunnan Þjóðvegar var leiðréttingabúnaður ekki notaður við staðsetningartækið. Skekkjan er því meiri en 3 m.

### Heitur blettur með gróðurbreytingum

Heitur blettur er merkjanlegur á grónu sléttlendi milli gamla þjóðvegarins og þess nýja (N64°01,179', V21°23,849'). Hugsanlega hefur hiti þarna hækkað frá því sumarið áður því sölnuð grös eru þarna víða. Stærð blettsins gæti verið um 5x5 m en jaðrar hans eru ekki skýrir. Hiti á 25-30 cm dýpi mældist 56,0°C.

### Hveraskellur næst Skíðaskálanum

Um 100 m austan við Skíðaskálanum eru tvær samliggjandi hveraskellur í um 324 m yfir sjávarmáli. Sú efri er um 10x10 m og er neðst í hlíðinni í 25° halla (N64°01,214', V21°23,832') og snýr nokkurnvegin á móti vestri. Mörg hveraaugu eru í skellunni og umhverfis þau er hvítt hverhrúður. Aðeins vottar fyrir brennisteini á víð og dreif. Í skellunni voru nokkur gufuaugu (97,6-97,7°C) og nokkur samtengd leiraugu (94,4°C), 3-15 cm í þvermál. Leirugur farvegur bendir til að í vætutíð renni frá hveraaugunum. Brennisteinsútfellingar voru á börmunum og leirinn í hvernum var svartur. Ryðgað rör með krana stendur upp úr skellunni, líklega borhola. Við leirauga þar sem hitastig í efstu 2 cm var 20,0°C óx grænþörungur af ættkvíslinni *Zygonium* sem grænleit slikja. Greining hans var var staðfest með smásjárskoðun. Neðri skellan er á sléttlendi (64°01,203', V21°23,829'). Yfirborð hennar er leirkennt án áberandi gufu frá augum sem þarna eru en hitinn í tveimur þeirra mældist 99,3°C. Við eitt augað lagði smá gufu upp og þar virtist grænþörungurinn *Cyanidium caldarium* vera til staðar þann 2. júlí. Hitastigið 2 cm undir þörungnum mældist þá 69,6°C. Dagana 17. júlí og 22. ágúst sat vatn á skellunni, seinni daginn um 15 cm á dýpt og allir hugsanlegir þörungar á kafi. Hitastig vatnsins var aðeins um 15°C. Rétt við skelluna er borhola og skúrskrifli, hálfþakið jarðvegshaug. Um 5 m austan við skelluna ofanverða er blettur þar sem gróður bendir til viðvarandi hita undir, aðeins er þar mosi en ekki gras (mynd 16). Hitastig á 25-30 cm dýpi mældist um 39°C.



**Mynd 16. Blettur við hveraskelluna næst Skíðaskálanum þar sem jarðhiti hefur áhrif á gróðursamfélag. Ljósmynd 2002 TP.**

### Gróðurlaus moldarblettur

Stuttu austar er lítill gróðurlaus moldarblettur, um 2x2 m að stærð og með um ½x½ m hverahrúður í miðjunni (N64°01,193, V21°23,744) (mynd 17). Bletturinn er umkringdur af gróðurbörðum en að neðanverðu er að sjá eins og stuttan, þurrar farveg út úr blettinum. Bletturinn er í 20° halla og snýr í nokkurn veginn í vestur. Hitastig á um 20 cm dýpi í hverahrúðursskellunni mældist 97,9°C. Neðst í moldarblettinum og umhverfis farveginn var mosi (sjá mynd 18) og fyrir endann á farveginum stararblettur. Hitastig á 25-30 cm dýpi undir mosanum var um 40°C.



Mynd 17. Heitur moldarblettur í Hveradölum. Ljósmynd 2002 TP.



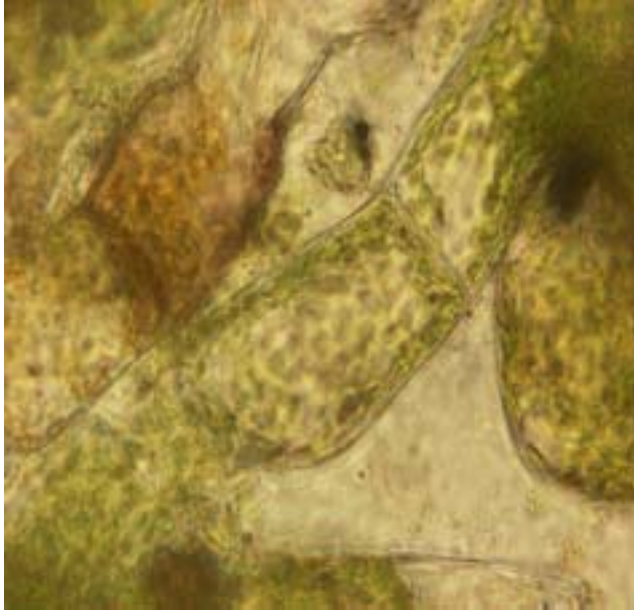
Mynd 18. Gróður fast neðan við moldarblettinn á mynd 17. Ljósmynd 2002 TP.

### Stór hveraskella

Aðeins ofar og austar er tiltölulega stór hveraskella (N64°01,199', V21°23,733, ) í 333 m.y.s. Skellan er á að giska 12x12 m, í 17° halla og snýr í suðvestur. Í henni eru 4-5 greinileg augu, flest með brennisteinsútfellingum. Umhverfis sum augun ofan og austan til í skellunni var hvítt hverahrúður, um ½-1 m í þvermál, blandað brennisteinsútfellingum inn á milli. Neðarlega voru þrjú augu (N64°01,194', V21°23,735'; N64°01,195', V21°23,726'; N64°01,195', V21°23,722'). Hitinn í þessum augum var um 100°C á 10-20 cm dýpi. Vestasta augað var nýlegt að sjá og án þörunga en við hin tvö virtist *Cyanidium caldarium* vera til staðar þar sem hitinn einn sentimetra undir yfirborðinu var um 67°C. Þetta er í hærra lagi fyrir þessa þörungategnund sem þrífst best við 40-50°C (Jakob K. Kristjánsson & Guðni Á. Alfreðsson 1986). Hún hættir að vaxa við um 55 °C en getur þolað einhverjar sveiflur upp fyrir þau mörk. Líklega er sterkur hitastigull í efstu sentimetrinum og hitastig á yfirborði því sennilega nærri kjörhita þörungsins. Ofarlega í skellunni voru tvö augu (N64°01,200', V21°23,733'; N64°01,199', V21°23,729') með um 99,5°C hita á 10-20 cm dýpi. Umhverfis þær voru brennisteinsútfellingar, sérstaklega þá austari. Við þá vestari voru auk þess gulbrúnar útfellingar.

### Skellur vestanmegin lækjar

Tvær hveraskellur eru stuttu austar og er sú vestari aðskilin frá skellunni sem áður var fjallað um með mjórri gróðurtungu, frekar gisinni. Skellurnar tvær eru vestan megin í gili með smálækjarsytru og snúa í austur. Stuttu fyrir neðan þær eru vatnshverir (sjá síðar). Á mynd 20 má sjá skellurnar ásamt hverunum. Í suðvestari skellunni er auga umkringgt hvítum útfellingum og brennisteinsútfellingum. Hiti í því mældist 99,0°C. Í minni skellunni (N64°0,1,207', V21°23,693') var ekkert afgerandi auga 2. júlí. Skellurnar voru báðar staðsettar í hveraleirsflagi og umhverfis það var moldarflag og gróður utar. *Zygonium* var sjánlegt á þeirri minni og var það staðfest með smásjárskoðun (Mynd 19). Þega sýnið var tekið 22. ágúst hafði ásýnd minni skellunar breyst frá því 2. júlí og voru nú 3-4 kraumandi op með leirkenndu afrennsli í skellunni. Jarðvegur hafði hrúnið ofan í þau þannig að dýpi og þvermál þess stærsta var um 20-30 cm.



**Mynd 19.** Smásjármynd af *Zygogonium* úr sýni frá skellu við vatnshveri í Hveradal. Ljósmynd 2002 SKP.



**Mynd 20.** Vatns-, gufu- og leirhverasvæði í Hveradölum. Ljósmynd 2002 TP.

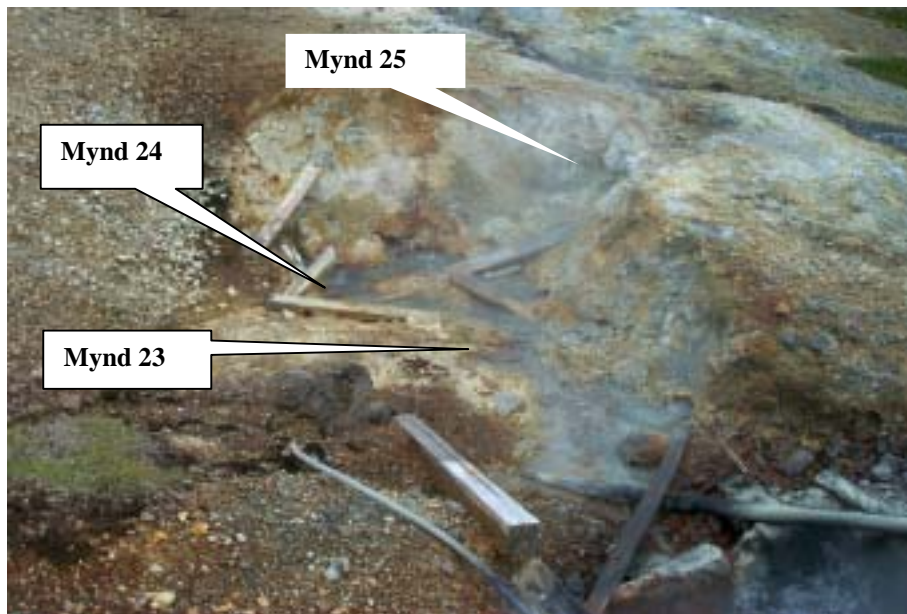
### Vatnshverir

Neðan við síðastnefndu skellurnar, fremst á hverasvæðinu í gílinu, var kröftugur vatnshver í þró (sjá mynd 21). Upp undir metra háar skvettur komu útundan norðausturhorni þróarinnar (N64°01,200, V21°23,704) en einnig bullaði í suðurvesturhorninu. Hæsti hitinn í þrónni mældist 96,6°C en kann að hafa verið hærra þar sem erfitt var að komast að til mælinganna vegna vatnsgangs. Gat var neðarlega á þróarveggnum en ekki var samfellt rennsli þar heldur kom vatnið þar út í gusum. Rennsli er sennilega innan við ½ l/s og pH var um 5. Vatnið sem frá hvernum rann var svartleitt, hugsanlega af járnsúlfíði. Nokkrum metrum neðar í afrennslinu var botn þess þakinn svörtu, fíngerðu, lausu útfellingarefni. Skúrgrind var framan við þróna og voru spýtur og annað efni úr skúrnum dreift um allt svæðið, m.a. ofan í hverum.



**Mynd 21.** Kröftugur vatnshver með lítið rennsli. Hverinn er staðsettur í þyrpingu fjölbreytilegra vatnshvera austast á hverasvæðinu í Hveradölum. Afrennsli þróarinnar sést lengst til hægri á myndinni en í það virðist hafa verið reynt að troða plastpoka. Ljósmynd 2002 TP.

Í þróna rann frá mörgum leirblönduðum vatnshverum fyrir ofan hana. Lágu þeir í um 5 m röð til norðurs, nokkurn veginn í línu sem sveigði til vesturs fjærst þrónni, vestan- og sunnan undir lágum kanti. Fyrir ofan kantinn voru nokkur gufuaugu (sjá mynd 22). Hverir þessir voru greinilega brennisteinsríkir og voru sums staðar áberandi brennisteinsútfellingar umhverfis gufuaugun.



**Mynd 22.** Vatns- og leirhverir ofan vatnshversins í þrónni. Örvar benda á hverir sem sýndir eru á myndum 23-25. Ljósmynd 2002 TP.



**Mynd 23.** Augu ofan við vatnshverinn í þrónni. Rauði liturinn er sennilega járnútfellingar. Ljósmynd 2002 TP.



**Mynd 24.** Auga ofan vatnshversins í þrónni. Rauði liturinn er hugsanlega járnoxíð eða hýdroxíð. Ljósmynd 2002 TP.



Mynd 25. *Cyanidium caldarium* í kantinum ofan við vatnshverina (grænn litur). Ljósmynd 2002 TP.

### Þyrping vatnshvera við læk

Lítill þyrping vatnshvera er á milli lækjarins og þeirra sem voru ofan hversins í þrónni (sjá myndir 26 og 27). Frá þeim rennur lítill spræna yfir í lækinn austan við. Rennslí hveranna var lítið, hitastig þeirra var 99-100°C og pH í þeim var á 5-6. Vatnið sem rennur frá þeim virtist svart eða dökkgrátt, sennilega vegna útfellinga á járnsúlfíði. Við sum vatnshveraaugun voru rauðbrúnar og gulleitar járnútfellingar en hvítar bennisteinsútfellingar við önnur. Gulbrúnu útfellingarnar lituðu grænar þekjur þörungsins *Mastigocladus laminosus* sem var að finna við augun með járnútfellingnum (staðfest með smásjárskoðun). Á bakkanum voru sumsstaðar *Zygonium* þörungar en einnig tegundin *Cyanidium caldarium* (myndir 28 og 29).



Mynd 26. Vatnshverir á lækjarbakkanum séð niður eftir afrennslinu. Dökk skán á ljósum bakkanum er *Zygonium*, rauð- og gulbrúnn litur er sennilega járnnoxíð eða hýdroxíð, svartur litur járnsúlfíð og hvítur litur brennisteinsútfellingar. Örin bendir á augað sem sýnt er á mynd 26. Ljósmynd 2002 TP.



Mynd 27. Sömu augu og sjást á mynd 26 (ör). Undir brúna litnum glittir sumstaðar í græna þörungapekju *Mastigocladus laminosus*. Ljósmynd 2002 TP.



Mynd 28. Vatnshveririr á lækjarbakkanum séð upp eftir afrennslinu. Dökk þekja á bakkanum hægra megin er *Zygonium* og grænn blettur vinstra megin *Mastigocladus laminosus* (örvar). Fremst í læknum er sína en við þessar aðstæður gætu hugsanlega verið í henni bakteríur af gerðinni Aquificales (ljósgrár litur).



Mynd 29. Gufuauga á bakkanum hjá hveraþyrpingunni næst læknum. Ljósgræna slikjan á ljósu útfellingunum er tegundin *Cyanidium caldarium* en dökka röndin er *Zygonium* tegund. Ljósmynd 2002 TP.

### Lækurinn

Rennsli lækjarins sem tekur við afrennsli vatnshveranna sem fjallað var um að framan gæti verið um 1 l/s (2. júlí). Efst var farvegurinn vatnslaus og fyrst eftir að vatn kom fram var það án hveraáhrifa. Lækurinn rennur austan megin við hverina en á móts við þá og stuttu ofar eru í lækjarfarveginum fjöldi hveraaugna sem virðast flest eða öll vera brennisteinsrík með hvíta sliktu brennisteinsútfellinga umhverfis opið. Þarna var lækurinn um 42°C heitur með pH um 7 (mynd 30). Hann var vaxinn gróskumikilli, móleitri og grænni örveruþekju sem sennilega er aðallega tegundir af ættkvíslinni *Chloroflexus* og tegundin *Mastigogladus laminosus*. Þarna var mikið af hveraflugu (*Scatella tenuicosta f. thermarum*), ógreindri ránflugu (Diptera) sem lifir m.a. á hveraflugum auk vatnabobba. Neðar í læknum þar sem hitastigið hafði minnkað niður í um 20°C voru auk þess rykmýslirfur (*Chironomidae*) og vatnaklukkur (Coleoptera). Þar sem vatnið úr hverunum rennur saman við lækinn litaðist hann svartur, sérstaklega af vatninu sem rann úr þrónni. Þörungagróður var ekki sjánlegur í þeim hluta. Lækurinn var enn svartur þegar rykmýslirfanna og vatnarklukkanna varð fyrst vart og hafði lítið hreinsast þegar hann rann út í skurð meðfram gamla þjóðveginum. Seinni skoðunardagana var hann þó öllu tærari neðst enda vatnsmeiri. Þá hafði auk þess þörungapekjan sem var ofar (mynd 30) að mestu skolast burt.



**Mynd 30.** Lækurinn rétt ofan við vatnshverasvæðið í Hveradölum. Ljósmynd 2002 TP.

### Sviðinn gróðurblettur upp með læknum

Í 332 m.y.s. upp með læknum að vestanverðu var gróðurblettur sem sýndi merki um aukna hitavirkni (N64°01,208', V21°23,681'). Grös voru sölnuð en óvíst hversu langt var síðan. Myndir 31 og 32 eru teknar þar. Á mynd 31 virðist eingöngu mosi vera lifandi og en hitastig á 25-30 cm dýpi er þar 99,0°C. Á mynd 32 eru grös enn að hluta lifandi enda hitastig í jarðvegsins á þessu dýpi aðeins 70,8°C.



**Mynd 31.** Heitur gróðurblettur ofarlega við læk. Mælir sýnir 99,0°C í 25-30 cm dýpi. Aðeins mosi lifir því hann er rótarlaus. Ljósmynd 2002 TP.



**Mynd 32.** Heitur gróðurblettur ofarlega við læk. Mælirinn sýnir 70,8 °C í 25-30 cm dýpi. Hér eru grös tekin að sölna þar sem rótarkerfið hitnar. Ljósmynd 2002 TP.

### Hveraskellur austan lækjarins

Nokkrar hveraskellur eru í hlíðinni handan lækjarins þar sem hún snýr á móti suðri. Skellurnar sjást á mynd 33. Efst er leirskella (N64°01,206', V21°23,657') í 341 m.y.s. Þarna mældist hitastig í 10 cm dýpi 99,4°C. *Cyanidium caldarium* var sjánlegur á skellunni. Önnur ofar í hlíðinni (347 m.y.s.) er með hvítar útfellingar auk smávegis brennisteinsútfellinga næst miðju (N64°01,215, V21°23,642). Engin augu sáust. Þar var að finna bæði *Cyanidium* og *Zygonium* þörunga. Sú þriðja hefur staðsetninguna N64°01,217' og V21°23,640' og var einnig í 347 m.y.s. Hitastig í henni mældist 98,7°C og útfellingar voru hvítar og rauðbrúnar auk brennisteinsútfellinga. Þarna mátti einnig greina *Cyanidium* og *Zygonium* þörunga.



**Mynd 33.** Efstu hveraskellurnar austan lækjarins. Þarna er lækurinn þurr. Ljósmynd 2002 TP.

Aðeins sunnar er skella með leirhver í 341 m.y.s. (N64°01,206', V21°23,657'). Leirhverinn samanstendur af 5-6 augum í storknuðum leir (mynd 34) og voru gufuhljóð í honum. Hitastigið mældist 100,0°C. *Cyanidium* var sýnilegur á barmi

hversins og *Zygonium* sumstaðar á skellunni í kring. Neðst á skellunni er lítill blettur án augna en með hvítum útfellingum ( $64^{\circ}01,204$ ,  $V21^{\circ}23,667$ ). Hitastig mældist þar  $99,1^{\circ}\text{C}$  í jarðveginum. Um  $40 \times 50$  cm smáskella án augna er skammt frá í 341 m.y.s. ( $N64^{\circ}01,204$ ,  $V21^{\circ}23,670$ ). Hitastig jarðvegsins þar mældist  $98,9^{\circ}\text{C}$ . Engir þörungar voru sjáanlegir. Ekki langt frá er augna- og gróðurlaus malarskella í 341 m.y.s., um  $3 \times 1\frac{1}{2}$  m að stærð ( $N64^{\circ}01,194$ ,  $V21^{\circ}23,637$ ). Hiti á 25-30 cm dýpi í henni var  $100,0^{\circ}\text{C}$ . Rétt hjá er smáauga með hvítum útfellingum og brennisteinsútfellingum, fast við smálæk ( $N64^{\circ}01,192$ ,  $V21^{\circ}23,633$ ). Augað tilheyrir sennilega síðastnefndu skellunni. Grænþörungurinn *Zygonium* var þar til staðar. Önnur skella úr mól með hvítum útfellingum, um  $5 \times 5$  m á stærð og 343 m.y.s., var afmörkuð af moldarbörðum og gróðri ( $N64^{\circ}01,198$ ,  $V21^{\circ}23,623$ ). Í henni voru 6-7 gufuaugu (mynd 35) auk hvítra og gulra (brennisteins) útfellinga, m.a. á börmum augnanna. Hitastig í augunum mældist  $97,7$ - $99,3^{\circ}\text{C}$ . Sjá mátti *Cyanidium caldarium* þar sem hitastig í 1-2 cm dýpi var um  $58^{\circ}\text{C}$ .



**Mynd 34.** Leirhver austan við lækinn í Hveradölum. Greina má grænþörunginn *Cyanidium caldarium* á brún hversins efst til hægri (ör). Ljósmynd 2002 TP.



**Mynd 35.** Malarskella með 6-7 augum ( $N64^{\circ}01,198$ ,  $V21^{\circ}23,623$ ). Örin bendir á augað sem er á mynd 36. Ljósmynd 2002 TP.



Mynd 36. Gufuauga á malarskellunni sem sýnd er á mynd 35. Ljósmynd 2002 TP.

Í 341 m.y.s. austan við lækinn er auk þess blettur með fátæglegum sölnuðum gróðri (N64°01,202', V21°23,674'). Hitastig í jarðveginum á 25-30 cm dýpi mældist 63,6°C.

### **Bakarabrekka**

Bakarabrekkan er stutt en brött brekka neðst í hlíðum Skarðsmýrarfjalls nokkur hundruð metrum austan við tilraunaborholuna (myndir 37 og 38). Brekkan er talsvert ummynduð, sérstaklega þar sem hverirnir eru. Hún er um 40 m há og um 20 m breið og snýr nokkurn vegin á móti suðri. Aðallitur brekkunnar er rauður en þar sem hverirnir eru eru hvítar útfellingar og stundum rauðbrúnar inn á milli. Virðist efni hennar vera malarkennt en þó nokkuð fast er undir mölinni.



Mynd 37. Bakarabrekka. Ljósmynd 2002 TP.

Í brekkunni eru nokkur greinileg augu. Neðan við austasta augað (N64°02,505', V21°19,652') er hrúga af gömlu rusli, m.a. glerflöskum. Hitastig augans var 99,2°C og er það í 391 m.y.s. Þetta er leirhver en þegar athuginin fór fram var leirinn þurr en augað blés rakti gufu. Nálægt auga í 395 m.y.s. er án gufu (N64°02,503', V21°19,660'). Rauðbrúnt hverahrúður og hvítar útfellingar eru umhverfis það og hitastig þess er 99,2°C. Engin merki um örverur voru við þetta auga. Annað nálægt auga er í sömu hæð yfir sjávarmáli með um 2x2 m útfellingasvæði með hvítum,

rauðgulum og rauðum útfellingum (N64°02,505', V21°19,663'). Hitastig þess var 82,7°C. Heitur blettur er einnig þarna í 393 m.y.s. með einu aðalanga sem var 99,1°C heitt (N64°02,501', V21°19,658'). Einn til einn og háfan metra neðan við hverinn voru niðurgrafnar leifar potts. Þarna var líka grá hörð skella (N64°02,497', V21°19,663') sem svipaði helst til storknaðs leirs úr leirhver. Útfellingar mynduðu hring í kring um gráu skelluna. Ofan við hana er rauð mölin heit með gulbrúnum útfellingum. Skellan er 394 m.y.s. og er í yfirborði 99,1°C heit. Engar örverur voru merkjanlegar. Neðarlega í brekkunni í 393 m.y.s. var lítil ½x½ m skella, 99,0°C heit, án augna, með hvítum útfellingum. Engar örverur sáust við hana. Neðst í brekkunni (392 m.y.s.) var örlítill skella, um 20x20 cm, hvít með rauðbrúnu hverahrúðri (N64°02,496', V21°19,654'). Hitastig nálægt yfirborði hennar var 99,0°C og engar örverur voru merkjanlegar. Dæmigert gufuauga fyrir Bakarabrekkuna er sýnt á mynd 39.



**Mynd 38.** Vestari hluti Bakarabrekku. Tilraunaborhola sést blása skammt frá. Ljósmynd 2002 TP.



**Mynd 39.** Dæmigert gufuauga í Bakarabrekkunni. Ljósmynd 2002 TP.

## Niðurstöður erfðagreininga

Alls fengust 64 marktækar DNA raðgreiningar úr sýninu sem var tekið úr laugunum í Sleggjubeinsdal (sjá töflu 1). Þegar raðirnar eru bornar saman við raðir í genabönkum kom í ljós að 42 þeirra greinast til þekktra tegunda (98% eða meiri skyldleiki), þar af 39 til sömu tegundar en aðrar raðir (22) eru úr tegundum sem sýna minni skyldleika við þekktar tegundir eða raðir. Minnsti skyldleiki við þekktar tegund var 86% en eftir því sem skyldleikinn minnkar aukast líkurnar á að um sé að ræða áður óþekktar tegund.

Alls fundust 22 tegundir í sýninu, þar af ein ríkjandi þ.e. *Chlorogloeopsis sp.* sem er annað nafn á *Mastigocladus laminosus*. Þetta kemur alls ekki á óvart þar sem hverinn einkenndist af grænni þörungapekju sem var dæmigerð fyrir *M. laminosus* og smásjárskoðun hafði staðfest tilvist þörungunsins.

Stundum reyndist nánasti ættingi sá sami fyrir tvær eða fleiri raðir þrátt fyrir að þær flokkist ekki saman en slíkt er ekki óalgengt. Þá getur verið um að ræða tegundir sem eru báðar jafnskyldar viðkomandi ættingja, en fjarskyldari hver annarri.

Í mörgum tilvikum hafa skyldar raðir fundist í sýnum úr öðrum hverum á Íslandi (sjá athugasemdadálk í töflu 1) en þó eru nokkrar (~10) sem virðast ekki eiga fulltrúa í sýnum úr öðrum hverum sem greind hafa verið á þennan hátt. Þeir hverir sem sýni

hefur verið erfðagreint úr eru aðeins u.þ.b. 200 talsins og allflestir frábrugðnir hvernum í Sleggjubeinsdal hvað varðar hitastig og sýrustig.

**Tafla 1** Nánustu ættingjar DNA raða úr lífmassasýni úr laug í Sleggjubeinsdal (56-62°C, pH 6,2-6,5). Fjöldi raða sem flokkast yfir 97% innbyrðis er sýndur svo og skyldleiki (%) við nánasta ættingja. Í athugasemdadálkinum er m.a. merkt við raðir sem finnast í fleiri hverum á Íslandi og talan í sviganum gefur til kynna fjölda hvera.

Skyldasta tegund	Fjöldi raða í sýni	Skyldleiki	Athugasemdir
Chlorogloeopsis sp. (=M. laminosus)	36	99%	Finnst víða. Ríkjandi í laugunum.
Chlorogloeopsis sp. (=M. laminosus)	2	99%	
Chlorogloeopsis sp. (=M. laminosus)	1	96%	
Uncultured bacterium clone SHD-14	4	94%	
Metal-contaminated soil clone K20-78	2	92%	
Uncultured bacterium clone G01	2	98%	
Chloroflexus aurantiacus, strain DSM 637	1	99%	Finnst víðar (2).
Uncultured eubacterium env.OPS 16	1	99%	Finnst víðar (2).
Anaerobic filamentous bacterium UNI-1,	1	99%	
Uncultured bacterium clone B16	1	97%	
Uncultured eubacterium env.OPS 3	1	96%	Finnst víðar (12).
Uncultured bacterium UASB_TL84	1	95%	Finnst víðar (1).
Uncultured bacterium UASB_TL84	1	94%	Finnst víðar (1).
Uncultured bacterium clone SHA-8	1	94%	
Uncultured bacterium, clone GR-296.II.11	1	94%	Finnst víðar (1).
Uncultured bacterium clone SHD-6	1	93%	
Acidothermus cellulolyticus	1	91%	Í stofnasöfnum.
Acidimicrobium ferrooxidans	1	90%	Finnst víðar (2).
Uncultured bacterium clone Ebpr8	1	90%	
Oscillatoria sp.	1	90%	Finnst víðar (1).
Uncultured div. TM6 bacterium cl. NMW3.210WL	1	90%	
Uncultured div. TM6 bacterium cl. NMW3.210WL	1	89%	
Uncultured thermal soil bacterium cl YNPFFP86	1	86%	Finnst víðar (4).
Raðir alls	64		

Erfðagreining nær ekki öllum þeim tegundum lífvera sem kunna að vera í sýni frá tilteknum hver. DNA raðir lífveranna þurfa að vera til staðar í lágmarksmagni auk þess sem fleira kemur til, s.s. að breytilegt er eftir tegundum hversu vel DNA röðin einangrast við úrvinnslu sýnisins. Það getur verið mjög mismunandi frá einum tíma til annars hvort tiltekin tegund er algeng í viðkomandi hver eða í lágmarki. Tvær tegundir, sem ræktuðust úr sýni úr laugunum í Sleggjubeinsdal sem tekið var nokkrum vikum fyrr, fundust t.d. ekki með erfðagreiningaraðferðinni (*Thermus ruber* og *Bacillus teg.*). Skýringin getur bæði falist í mismunandi greiningaraðferðunum og mismunandi tímasetningu sýnatökunnar. Erfðaáðferðin er þó tvímælalaust mun áráðanlegri en greining á ræktunum.

Samanburður var gerður á tegundasamsetningu í sýninu úr lauginni í Sleggjubeinsdal og sýnum úr öðrum hverum með svipaða eðliseiginleika sem greind höfðu verið hjá Prokaria ehf. á sama hátt af öðrum tilefnum (sjá töflu 2). Fjöldi raða og þekktra tegunda<sup>1</sup> í hverju sýni er sýndur ásamt hlutfalli tegundafjölda af fjölda greindra DNA raða en það má nota sem grófan mælikvarða á líffræðilegan fjölbreytileika í sýninu. Margar DNA raðir af sömu tegund gefa til kynna að viðkomandi tegund sé ríkjandi. Þar sem nokkrar tegundir eru ríkjandi er líffræðilegur fjölbreytileiki lítill en þar sem aðeins fáar raðir greinast fyrir hverja af tegundunum sem finnast er engin yfirgnæfandi og lífmassinn getur verið samsettur úr mörgum tegundum. Samanburður þessara hlutfalla í sýnunum úr laugunum í Sleggjubeinsdal og þeim hverum sem eru

<sup>1</sup> Með þekktri tegund er hér átt við þegar DNA röð hefur 98% eða meiri skyldleika 16S rDNA við sömu DNA röð þekktrar (skráðrar) tegundar.



Uncultured bacterium clone B16						1	97%
Uncultured eubacterium env.OPS 3						1	96%
Uncultured bacterium UASB_TL84						1	95%
Uncultured bacterium UASB_TL84						1	94%
Uncultured bacterium clone SHA-8						1	94%
Uncultured bacterium, clone GR-296.II.11						1	94%
Uncultured bacterium clone SHD-6						1	93%
Acidothermus cellulolyticus						1	91%
Acidimicrobium ferrooxidans						1	90%
Uncultured bacterium clone Ebpr8						1	90%
Oscillatoria sp.						1	90%
Uncultured div. TM6 bacterium cl. NMW3.210WL						1	90%
Uncultured div. TM6 bacterium cl. NMW3.210WL						1	89%
Uncultured thermal soil bacterium cl YNPFFP86						1	86%
Raðir alls	41		51		61		64

Í ofangreindri töflu sést að önnur tegund er ríkjandi í samanburðarhverunum en í lauginni í Sleggjubeinsdal, þ.e. *Aquificales* str. SRI-240 sem finnst reyndar ekki í sýninu úr Sleggjubeinsdal. Ríkjandi tegund úr sýninu úr Sleggjubeinsdal, *Chlorogloeopsis* teg. (*Mastigogladus laminosus*), fannst þó í töluverðum mæli í sýnum úr hvernum á Ölkelduhálsi en ekki í sýni úr hvernum við Kleifarvatn. Þessi tegund er ríkjandi í ýmsum hverum, sérstaklega basískum hverum þar sem hitastig er tiltölulega lágt. Hverirnir sem hér eru notaðir til samanburðar virðast eiga meira sameiginlegt innbyrðis, en við hverinn í Sleggjubeinsdal. Án efa eru eiginleikar hveranna mismunandi. Vera má að vatnsmagn skipti þarna máli, en það er umtalsvert meira í hvernum á Ölkelduhálsi og við Kleifarvatn. Sömuleiðis kann hugsanlegur mismunur í efnastyrk hveravatnsins að hafa áhrif, e.t.v. sérstaklega styrkur brennisteinssambanda ( $\text{SH}_2$ ,  $\text{SO}_4$ , S), vetnis ( $\text{H}_2$ ), metans ( $\text{CH}_4$ ) og kolsýru ( $\text{CO}_2$ ).

## Umræður og ályktanir

Jarðhitasvæðin sem hér eru til umfjöllunar einkennast af gufuaugum og víðast tiltölulega litlu vatni. Hiti er hár og sýrustig oftast lágt. Þessi umhverfisskilyrði samanlögð mega því teljast jaðaraðstæður lífs sem afar fáar lífverur þola. Við þessi skilyrði er helst að finna einkennistegundir þörunga sem vaxa á yfirborði nálægt gufuaugum. Þar sem vatn er að finna á svæðinu er það í flestum tilvikum tiltölulega kalt sé miðað við kjöraðstæður hitakærra örvera ( $>60^\circ\text{C}$ ). Örfáar undantekningar finnast þó, í laugum sem koma fram í þvergili í Sleggjubeinsdal austanverðum, en þar er hitastig  $60,5\text{--}63^\circ\text{C}$  og sýrustig 6,2-8,2, í vatnsrennsli hvers á aðalhverasvæðinu efst í Sleggjubeinsdal austanverðum en þar er hitastigið  $88,9\text{--}98,1^\circ\text{C}$  og pH 2,8 og í vatnshverum í Hveradölum en þar er vatn sumsstaðar nálægt  $99^\circ\text{C}$  og pH oft á milli 5 og 6.

Athuginin hefur varpað ljósi á vistkerfi hvera á rannsóknasvæðinu og með hliðsjón af öðrum hverasvæðum er hægt að draga nokkrar almennar ályktanir. Þótt athuginin sem gerð er grein fyrir hér sé ekki tæmandi varðandi lífríki hveranna á rannsóknarsvæðinu er þó ljóst að lífríki flestra hveranna er fábreytt.

Laugarnar í þvergili í austanverðum Sleggjubeinsdal voru skoðaðar nánar en aðrir hverir á rannsóknasvæðinu. Ástæðan var sú að á grundvelli eðliseiginleika og útlits lauganna var búist við lífríkið þar væri fjölbreytilegast. Tegundasamsetning lauganna var því könnuð sérstaklega bæði með ræktun og erfðagreiningu og sérstakt mat lagt á fjölbreytileika lífríkisins í laugunum. Erfðagreining hefur frem að þessu aðeins verið

gerð á tveimur íslenskum hverum með svipaða eðliseiginleika ( $^{\circ}\text{C}$ , pH), á Ölkelduhálsi og við Kleifarvatn. Samanburður við greindar tegundir í þeim bendir til að fjölbreytileikinn í laugunum í Sleggjubeinsdal sé meiri. Tegundasamsetningin var talsvert ólík milli hveranna svo líklega eru umræddir hverir ólíkir í efnasamsetningu og öðrum eðlisþáttum. Miklar ályktanir verða ekki dregnar af þeirri staðreynd að fjölbreyntin er mest í laugunum í Sleggjubeinsdal. Til þess eru samanburðarsýnin of fá.

Í töflu 4 eru dregin saman helstu atriði sem athugunin leiddi í ljós um hveraörverur og nokkrar athugasemdir gerðar viðvíkjandi vistkerfi hveranna.

**Tafla 4. Samantekt nokkurra atriða sem athuguð voru.**

Svæði	Fjöldi hvera	Sýrustig (pH)	Líklegur styrkur $\text{H}_2\text{S}$	Fjölbreytileiki örvera	Örverutegundir
<b>Sleggjubeinsdalur</b>					
Gufuaugu	Allnokkur	Súrt	Hár	Líklega mjög lítill	<i>Cyanidium teg.</i> <i>Zygonium teg.</i>
Heitir blettir	Allnokkrir	Súrt	Hár	Líklega mjög lítill	<i>Cyanidium teg.</i> <i>Zygonium teg.</i>
Vatnshverir	Fáir	Súrt	Hár	Líklega lítill	<i>Zygonium teg.</i>
Laugar	Fáar	Hlutlaust	Lágur	Talsverður	<i>Mastigocladus laminosus</i> <i>Bacillus teg.</i> <i>Thermus ruber</i> Uncultured bacterium clone SHD-14 Metal-contaminated soil clone K20-78 Uncultured bacterium clone G01 Chloroflexus aurantiacus, strain DSM 637 Uncultured eubacterium env.OPS 16 Anaerobic filamentous bacterium UNI-1, Uncultured bacterium clone B16 Uncultured eubacterium env.OPS 3 Uncultured bacterium UASB_TL84 Uncultured bacterium UASB_TL84 Uncultured bacterium clone SHA-8 Uncultured bacterium, clone GR-296.II.11 Uncultured bacterium clone SHD-6 Acidothermus cellulolyticus Acidimicrobium ferrooxidans Uncultured bacterium clone Ebpr8 Oscillatoria sp. Uncultured div. TM6 bacterium cl. NMW3.210WL Uncultured div. TM6 bacterium cl. NMW3.210WL Uncultured thermal soil bacterium cl YNPFFP86
Volgur lækur		Hlutlaust - basískt	Lágur	líklega nokkur	Ógreindar tegundi, ekki hitakærar
<b>Hveradalir</b>					
Gufuaugu	Allnokkur	Súrt	Hár	Líklega lítill	<i>Cyanidium teg.</i> <i>Zygonium teg.</i>
Leirhverir	Fáir	Súrt	Hár	Líklega nokkur	<i>Cyanidium teg.</i> <i>Zygonium teg.</i>
Heitir blettir	Allnokkrir	Súrt	Hár	Líklega mjög lítill	<i>Cyanidium teg.</i> <i>Zygonium teg.</i>
Vatnshverir	Allnokkrir	Súrt - hlutlaust	Hár eða frekar lágur	Líklega lítill	<i>Mastigocladus laminosus</i>
Heitur lækir		Hlutlaust	Frekar hár	Líklega nokkur	<i>Chloroflexus teg.</i> <i>Mastigocladus laminosus</i>
<b>Bakarabrekka</b>					
Gufuaugu	Nokkur	Súrt	Hár	Líklega lítill	<i>Engar</i>
Heitir blettir	Nokkrir	Súrt	Frekar hár	Líklega mjög lítill	<i>Engar</i>

Ljóst er að tegundafjöldi annarra hvera en lauganna í Sleggjubeinsdal er stundum meiri en tilgreint er í töflunni þar sem erfðagreiningu þarf oftast að beita til að leiða í ljós þær tegundir sem ekki eru sjáanlegar með berum augum eða í smásjá. Engu að síður er talið að fjölbreytileiki lífríkis í öðrum hveragerðum á rannsóknasvæðinu sé minni en það sem leitt var í ljós í laugunum.

Hverirnir sem rannsakaðir voru á Hellsheiðarsvæðinu eru flestir gufuhverir en því til viðbótar er að finna í Sleggjubeinsdal laugar, leirkennda vatnshverir og volgan læk og í Hveradölum vatnshverir, leirhverir og heitan læk. Gufuaugun bera víðast einkenni súrrar, brennisteinsríkrar gufu. Uppsöfnun brennisteins og lítil lífmassi þörungagróðurs við augun benda til að gufan sé nægilega þurr eða í það litlu magni að þéttivatn örvi yfirleitt ekki þörungavöxt og skoli ekki burt brennisteinsútfellingum. Örverulífríki umhverfis súru gufuaugun er því ekki fjölbreytt að tegundum eða með áberandi lífmassa. Eitthvað meiri fjölbreytileika má vænta í leirhverunum og í afrennsli leirkennds vatnshvers í Sleggjubeinsdal. Í laugum í Sleggjubeinsdal og í læknum við vatnshverina í Hveradölum var að finna vistkerfi sem einkenna hlutlausu og jafnvel basíska vatnshverir og laugar, m.a. dæmigerða tegund þörunga (*Mastigocladus laminosus*) og þrjú einkennisdýr slíkra hvera. Þar er talið að fjölbreytileiki tegunda sé mestur. Talsverður fjölbreytileiki er hugsanlega einnig á aðalhverasvæðinu í Hveradölum. Þar eru súr gufuaugu, súrir vatnshverir og súlfíðríkir vatnshverir á litlu svæði auk þess sem afrennsli hveranna hitar nálægan læk þar sem sýrustig er nálægt hlutlausu. Í Hveradölum er einnig dýralífið mest, aðallega vegna lækjarins. Þar er að finna fjölbreytta lífvist á frekar afmörkuðu svæði sem ætla má að geti leitt til fjölbreytileika í hverategundum á svæðinu. Í Bakarabrekku reyndust engar hveraörverur merkjanlegar, sennilega vegna þurrks en hár hiti og lítil gufuvirkni einkenndu svæðið.

Athugun þessi gefur ekki tilefni til að ætla að um sérstök eða sjaldgæf samfélög örvera sé að ræða á rannsóknasvæðinu. Á Hengilsvæðinu og austur af því eru víða hverir svo hveravirknin á rannsóknasvæðinu er heldur ekki sérstök fyrir þetta landssvæði.

## Heimildir

- Axel Björnsson 1990. Jarðhitarannsóknir. Yfirlit yfir eðli jarðhitaasvæða, jarðhitaleit og vinnslu jarðvarma. Reykjavík. Orkustofnun og Samband íslenskra hitaveitna. OS-90020/JHD-04, 50 bls.
- Gary T. Bolaños, V. Egmedio & Jr. Parrilla 2000. Response of Bao-Banati thermal area to development of the Tongonan geothermal field, Philippines. *Geothermics* 29:499-508.
- Guðmundur Pálmason 1980. Jarðhitinn sem orkulind. *Náttúrufræingurinn* 50:147-56.
- Halldór Ármannsson, Helgi Torfason, Magnús Ólafsson, Kristján H. Sigurðsson & Hrefna Kristmannsdóttir 1997. Rannsóknir á breytingum í virkni á óvirkjuðum jarðhitasvæðum. Í: *Hrefna Kristmannsdóttir 1997. Umhverfisáhrif jarðhitanýtingar. Útdráttir frá kynningarfundum um niðurstöður rannsóknarverkefnisins Umhverfisáhrif jarðhitanýtingar haldinn í Rúgbrauðsgerðinni þann 2. október 1997.* OS-97074. Reykjavík: Orkustofnun
- Helgi Torfason 1997. Jarðhiti í Reykjavík og nágrenni. Reykjavík. Orkustofnun, Rannsóknasvið. OS-97026, 94 bls.

- Helgi Torfason, Gylfi Páll Hersir, Kristján Sæmundsson, Gunnar V. Johnsen & Einar Gunnlaugsson 1983. Vestur-Hengill. Yfirborðsrannsókn jarðhitasvæðisins. Reykjavík. Orkustofnun, Jarðhitadeild. 113 bls.
- Jakob K. Kristjánsson (ritstj.) 1992. Thermophilic Bacteria. Boca Raton, CRC Press. 228 bls.
- Jakob K. Kristjánsson & Guðni Á. Alfreðsson 1986. Lífríki Hveranna. Náttúrufræðingurinn 56:49-68.
- Jón Steinar Guðmundsson 1980. Umhverfisáhrif jarðhitanytingar. Náttúrufræðingurinn 50:294-308.
- K. O. Stetter & H. König 1983. Leben am Siedepunkt. Spectrum der wissenschaft:26-40.
- Knútur Árnason & Ingvar Þór Magnússon 2001. Jarðhiti við Hengil og á Hellisheiði, niðurstöður viðnámsmælinga. Unnið fyrir Orkuveitu Reykjavíkur. Reykjavík. Orkustofnun, rannsóknasvið. OS-2001/091, 250 bls.
- Kristján Sæmundsson & Ingvar Birgir Friðleifsson 1980. Jarðhiti og jarðfræðirannsóknir. Náttúrufræðingurinn 50:157-88.
- Kristján Sæmundsson 1995. Hengill, jarðfræðikort (berggrunnur) 1:50.000. Reykjavík. Orkustofnun, Hitaveita Reykjavíkur og Landmælingar Íslands.
- R.I. Amann, W. Ludwig & K-H. Schleifer 1995. Phylogenetic identification and in situ detection of individual microbial cells without cultivation. Microbiological Reviews 59:143-69.
- Sveinbjörn Björnsson 1980. Jarðhiti, grunnvatn og varmi. Náttúrufræðingurinn 50:271-93.
- Trevor M. Hunt 2000. Geothermal and the environment. Fyrirlestur í fyrirlestrarröð um umhverfisáhrif jarðhitavinnslu. Reykjavík: Jarðhitaskóli Sameinuðu þjóðanna
- Tryggvi Þórðarson 1981. Varmalindir: Hvítársíða, Hálsasveit og innanverður Reykholtisdalur: Náttúruverndarkönnun. Reykjavík. Náttúruverndarráð. Fjölrit nr. 10., 77 bls.
- Valgarður Stefánsson 1980. Borun eftir jarðhita og rannsóknir á borholum. Náttúrufræðingurinn 50:250-70.
- Valgarður Stefánsson 2000. Endurnýjanleiki jarðhita og sjálfbær nýting. Í: *Staða jarðhita á Íslandi - Ráðstefna Jarðhitafélags Íslands 8. nóvember 2000*. Reykjavík: Jarðhitafélag Íslands 30-2 bls.