



# Vaðlaheiðargöng

**Skýrsla um rannsóknarboranir haustið 2010  
og samantekin niðurstaða jarðfræðirannsókna**



**Unnið fyrir Vegagerðina**

Ágúst Guðmundsson  
Maí 2011



# Efnisyfirlit

<b>Ágrip</b> .....	<b>5</b>
<b>1 Jarðfræði</b> .....	<b>7</b>
1.1 Berggrunnur við innanverðan Eyjafjörð.....	7
1.2 Berggrunnur í Vaðlaheiði .....	7
1.3 Berglagahalli .....	9
1.4 Brotalamir.....	9
1.5 Ummyndun bergs .....	11
1.6 Jarðvatn og lekt berglaga.....	11
1.7 Jarðhiti.....	11
<b>2. Rannsóknaboranir</b> .....	<b>13</b>
2.1 Borholur í vestanverðri Vaðlaheiði .....	14
2.2 Borholur að austanverðu í Vaðlaheiði.....	16
2.3 Yfirlit yfir jarðlagasnið borhola. ....	19
<b>3 Frekari rannsóknir fyrir jarðgangagerð</b> .....	<b>23</b>
3.1 Tæknilegir eiginleikar bergs.....	23
3.2 Hitamælingar og hitastig í borholum.....	31
3.3 Segulmælingar til sprunguleitar .....	33
<b>4 Túlkun á aðstæðum til jarðgangagerðar undir Vaðlaheiði</b> .....	<b>35</b>
4.1 Vesturhluti jarðgangaleiðar .....	35
4.2 Miðhluti jarðgangaleiðar .....	37
4.3 Austurhluti jarðgangaleiðar .....	38
4.4 Brotalínur, gangar og misgengi á jarðgangaleið .....	41
4.5 Jarðvatn og lekt á jarðgangaleið .....	42
4.6 Hiti í berginu á jarðgangaleið .....	44
<b>5 Heimildaskrá</b> .....	<b>47</b>

## Teikningar / Drawings

- 1 Yfirlitskort. Staðsetningar og jarðfræði.
- 2 Vestuhluti Vaðlaheiðar, Staðsetningar og brotavirkni.
- 3 Austurhluti Vaðlaheiðar. Staðsetningar og brotavirkni.
- 4 Svalbarðsströnd - Fnjóskadalur. Langsnið gangaleiðar - Yfirlit.
- 5 Svalbarðsströnd - Fnjóskadalur. Langsnið gangaleiðar. Brotalínur.
- 6 Svalbarðsströnd - Fnjóskadalur. Langsnið gangaleiðar. Túlkun segulmælinga.
- 7 Djúpar kjarnaborholur í Vaðlaheiði. Yfirlit yfir berglög I
- 8 Djúpar kjarnaborholur í Vaðlaheiði. Yfirlit yfir berglög II
- 9 Langsnið um borholur VK-04 og VK-07. Jarðlög og hitastig
- 10 Langsnið um borholur VK-04 og VK-07. Brot, brestir og berggangar
- 11 Langsnið um borholur VK-03 og VK-07. Jarðlög og tengingar milli berglaga
- 12 Langsnið um borholur VK-03 og VK-07. Jarðlög og hitastig
- 13 Langsnið um borholur VK-03 og VK-07. Brot, brestir og berggangar

## Viðaukar (aftan við teikningar)

### Viðauki 1

Kjarnaborholur. Borholulýsingar. VK-01 til VK-07 (38 bls.)

### Viðauki 2

Kjarnaborholur. Ljósmyndir af borkjarna. VK-01 til VK-07

## Ágrip

Jarðgöng undir Vaðlaheiði eiga að leysa af hólmi fjallveg um Víkurskarð jafnframt því að stytta umtalsvert leiðina frá Akureyri til eystri hluta Norðurlands. Val á staðsetningu ganganna hafði nokkurn aðdraganda og var ýmsum leiðum velt upp.

Skýrslan er viðbót við fyrri skýrslu Jarðfræðistofunnar frá 2007, sem lýsir jarðfræðilegum aðstæðum til gangagerðar undir Vaðlaheiði. Haustið 2010 voru boraðar tvær langar hallandi kjarnaholur í Vaðlaheiði. Hóla að vestanverðu styður túlkanir í fyrri skýrslu en hola á austanverðri heiðinni breytir talsverðu um túlkun á legu jarðlaga á austurhluta heiðarinnar, miðað við þau snið sem birt voru í eldri skýrslu.

Eftirfarandi þættir hafa verið unnir til undirbúnings gangagerðar síðasta áratug:

1 Um síðustu aldamót var aukið við jarðfræðikort sem áður höfðu verið unnin af nágrenni Akureyrar og við innanverðan Eyjafjörð og samin stutt skýrsla um jarðlagastaflann í Vaðlaheiði (Árni Hjartarson 2001)

2 Á árunum 2004-2005 fóru fram athuganir á þykkt lausra jarðlaga í lághlíðum Fnjóskadals með tilliti til staðsetningar gangamunna. Borað var í laus jarðlög nærri mögulegum munnum í Fnjóskadal. Unnið var jarðfræðilegt forval á mögulegum gangaleiðum.

3 Haustið 2005 var kjarnaborað nærri fyrirhugaðri jarðgangaleið, samtals 915 bormetrar í fimm hallandi kjarnaholum.

4 Um 350-500m breitt belti yfir stórum hluta gangaleiðarinnar var skannað með segulmælingum (segulstyrksmælingar) og VLF sprunguleitartæki árin 2006-2007.

Helstu niðurstöður voru að miða við um 7,5 km löng jarðgöng frá munna í liðlega 60m hæð y.s. hjá Þjóðvegi 1 ofan við Halllandsnes í Eyjafirði að munna í liðlega 160m hæð y.s. hjá Skógum í Fnjóskadal.

Að vestanverðu ofan við Halllandsnes eru aðeins nokkrir tugir metra frá núverandi þjóðvegi að munna ganganna. Stuttur gangaskáli mun liggja skáhallt inn í klapparstall þar sem göngin fara inn í bergið. Víða sér þarna í klöpp á yfirborði og takmarkaðar athuganir sem hafa verið gerðar við gangamunna benda til að dýpi á fast sé hvergi meira en 2-4 metrar.

Að austanverðu er aðkoma að göngum gegnum þykka sand- og malarbakka ofantil í túninu í Skógum í Fnjóskadal. Gangaskáli verður hátt á annað hundrað metrar og þaðan er stutt út á núverandi veg um Fnjóskadal.

Upplýsingar um berg og aðstæður á jarðgangaleið byggja á kortlagningu bergs á yfirborði, ásamt greiningu og túlkun borkjarna og prófana í borholum. Einnig er stuðst við segulstyrksmælingar yfir hluta jarðgangaleiðar til að reyna að greina stefnur brota og misgengja er skera gangaleiðina.

Berglögum í Vaðlaheiði hallar 5-10° til suðurs á Svalbarðsströnd en undir miðri heiðinni fer berglögum að halla meira til suðausturs og austurs samfara brotabelti sem gengur suður um austanverða Vaðlaheiði og botn Fnjóskadals. Í neðri hlíðum Fnjóskadals er berglagahallinn 8-12° til aust- suðausturs og sumsstaðar næst Fnjóská mælist hallastefnan til austurs.

Jarðgöngin munu líklega skera í gegnum 400-600m þykkar jarðlagastafla sem að mestu er gerður úr basaltlögum sem aðskilin eru með misþykkum millilögum. Sum millilaganna eru margra metra þykk, gerð úr fornri gjósku, leirkennd og með mjög lágan brotstyrk. Líkur eru á að slík setbergslög séu í berginu á austurhluta jarðgangaleiðarinnar. Gangaleiðin fer dýpst í jarðlagastaflann (gegnum elstu berglögina) að vestanverðu og vestanundir miðju fjallinu en fer í heldur yngri jarðlög austantil.

Ummyndunarstig bergsins tilheyrir efri hluta skólesít ummyndunarbeltisins og er ummyndunin í meðallagi fyrir íslenskar jarðgangaleiðir. Við þetta ummyndunarstig er frumlekt (“prímer” lekt) bergsins orðin mjög lítil og fylgir jarðvatnsrennsli þá aðallega brotalínum, sprungum og stundum berggöngum.

Berggrunnur í Vaðlaheiði er mikið brotinn (miðað við berg á jarðgangaleiðum héraendis) og hefur að geyma fjölda bergganga. Höfuðstefnur brotalína eru tvær, N-S og ANA-VSV en VNV-ASA og A-V stefnur brotalína er einnig algengar. Aðalstefna bergganga (sem sést hafa) er nálægt N-S en fleiri gangastefnur eru til staðar. Segulmælingar og VLF mælingar yfir gangaleið benda til mikils fjölda bergganga (og e.t.v. misgengja) með N-S stefnu.

Rannsóknarboranir sýna að jarðvatnsborð stendur hátt í fjallinu (er á um 80 m lóðréttu dýpi í efstu borholunum) en grynna er á jarðvatn í borholum neðar í hlíðum. Lektarprófanir í borholum sýna að frumlekt bergsins er lág en mikið vatnsrennsli getur átt sér stað við sum brotin, misgengi og bergganga.

# 1 Jarðfræði

## 1.1 Berggrunnur við innanverðan Eyjafjörð

Berggrunnur umhverfis Eyjafjörð hlóðst að mestu leyti upp á tímabilinu frá um 12 til 4 milljónum ára. Jarðlagastaflinn er víðast reglulegur, með undantekningum (varðandi halla og breytilega berggerð) í grennd við fornar megineldstöðvar. Hraunlögin eru yfirleitt 5-15m þykk. Í grennd við megineldstöðvarnar í tertíera blágrýtisstaflanum eru þykk, súr gjóskulög og mikil staðbundin óregla í jarðlagaskipan. Á stöku stað eru setbergslög úr vatnsfluttu seti, svo sem sandsteinn og völuberg. Setberg í Vaðlaheiði ber líklega mikið mark af megineldstöð sem virk var í fjöllum og dölum vestan Akureyrar (Öxnadal) þegar jarðlagastaflinn í Vaðlaheiði hlóðst upp. Setbergið er gjóskuríkt, leirkennt, með mjög lágan brotstyrk og sýnir þenslubreytingar við breytilegt rakastig.

Víða í innanverðum Eyjafirði er halli berglaga neðst í hlíðum og við sjávarmál 6-9° til suðurs. Jarðlagahallinn minnkar jafnan upp á við á hverjum stað og gjarnan nemur hallabreytingin 0,5-0,8° fyrir hverja 100m hækkun. Meiri og staðbundinn halli til suðausturs er á þröngu snörunarbelti er liggur um Flateyjardalsheiði og suður um austurhlíðar Vaðlaheiðar og botn Fnjóskadals. Þar er að finna allt að 15-20° halla til suðausturs í afmörkuðum snöruðum spildum.

Auk snörunarbeltisins í vesturhlíðum Fnjóskadal er berg í Vaðlaheiði mikið brotið. Bæði eru þar gömul brot með traustu endursamlímdu bergi og einnig yngri brot með lausri bergmyslu (og e.t.v. meira vatnsleiðandi). Austan Fnjóskadals leggst yngra berg (fimm milljón ára og yngra) með lítinn berglagahalla yfir mölbrotið og snarað berg í brotabeltinu.

Landmótun við Eyjafjörð hefur jafnan verið í gangi samhliða upphleðslu. Dalir með núverandi horf hafa verið orðnir þroskaðir í Fnjóskadal og Eyjafirði fyrir um einni milljón ára. Aldursákvarðanir á leifum af hraunlögum sem liggja sem ræmur neðarlega í hlíðum í utanverðum Fnjóskadal og í Helguhóli (framundan Dalsmynni) utan við Laufás sýna að botn Fnjóskadals er kominn niður fyrir 250m y.s. fyrir 500-600 þúsund árum og aldursgreiningar á Helguhóli sýna að þar er land komið í núverandi hæð y.s. fyrir tæplega 200 þúsund árum.

## 1.2 Berggrunnur í Vaðlaheiði

Jarðlög í Vaðlaheiði hafa líklega byggst upp fyrir um 10 til 7,5 milljónum ára. Aldur bergsins að vestanverðu hefur verið metinn með segulmælingum og samanburði við segulkvarða Cande og Kent 1995. Miðað er við að þykkur berglagabunki frá Laufási inn að botni Eyjafjarðar (við Vaðla) tilheyri svokallaðri Anomaliu 5 sem er frá tímasteiði með “réttu” segulstefnu fyrir 10,8-9,8 milljónum ára. Ekki er ljóst hvort skilgreina skuli yfirborð “Anomaliu 5” við öfugt segulmögnuð berglög undir túnunum ofan við bæinn á Halllanda (þar sem er um 50m þykkur bunki af “öfugt” segulmögnuðum berglögum) eða hvort yfirborð syrþunnar verði skilgreint við svokölluð Vatnsbólaset sem liggja í liðlega 400m hæð yfir jarðgangaleiðinni í vestanverðri Vaðlaheiði. Aldursákvarðanir á bergi skammt ofan við þjóðveg 1 í Fnjóskadal, nokkru sunnan Víkurskarðs sýndi aldur 8,6 milljón ár (og annað sýni skammt frá Krókagerði) sýndi 8,9 milljón ár. Aldursákvarðanirnar á bergi í Fnjóskadal eru yngri og í nokkru ósamræmi við aldur bergs sem túlkaður er með

segulmælingum að vestanverðu við Vaðlaheiði. (Ekki verður reynt að kryfja þetta ósamræmi hér og aldur bergs í heiðinni gróflega metinn 10-7,5 milljón ár).

### 1.2.1 Svalbarðsstrandarsyrpa

Berglög frá sjávarmáli innan Svalbarðseyrar og upp í um 400-500m hæð í vestanverðri Vaðlaheiði (efri mörkin lækka til suðurs) eru nær eingöngu basalhraunlög með óverulegum millilögum. Einstök stakdílótt lög finnast í bland við þóleiítbasaltið. Neðan Vaðlaheiðarvegarins, sem liggur ofan byggðar út og upp Svalbarðsströnd, er algengt að sjá 5-12m þykk þóleiít basaltlög, oft aðskilin með þunnum rauðum millilögum. Þetta er í samræmi við uppbyggingu berglaganna í borholum vestan í Vaðlaheiði. Setbergslög eru samtals aðeins tæp 4% bergsins í borholunum þremur í landi Halllands.

Í fyrri jarðfræðiskrifum um Eyjafjörð (t.d. Árni Hjartarson 2001) hefur berginu í segulstefnusviði “Anomaliu 5” verið skipt upp eftir breytileika í berginu og hlotið nokkur undirnöfn en hér fer e.t.v. best á að kalla syrpu Svalbarðsstrandarþóleiít og skilgreina efri mörk syrpunnar við neðra borð þykkra setbergslaga sem nefnd hafa verið Vatnsbólaset og síðar verður vikið að. Mögulegt er að efri mörk “Anomaliu 5” liggja innan Svalbarðsstrandarþóleiíts um túnin á Halllanda en hér verður ekki skorið úr um það. Berg samaldra Svalbarðsstrandarþóleiíti er í berggrunni innanbæjar á Akureyri og áberandi í klettaborgum norðan Glerár. Næsta víst er að Svalbarðsstrandarsyrpa sé eldri en eldvirkni í megineldstöðinni sem liggur grafin í jarðlagastaflanum í innanverðum Glerárdal og teygir sig gegnum fjallgarðinn yfir í Öxnadal þangað sem háir hólar, hálfan dalinn fylla.

Nálægt ströndinni (þar sem sér í berg) er algengt að rekast á bergganga og segulstyrksmælingar ásamt borholum í brekkunum benda til að berggangar geti verið fyllilega fjórðungur bergsins.

### 1.2.2 Vatnsbólasyrpa

Nokkuð áberandi hjalli liggur skáhallt suður og niður brekkur Vaðlaheiðar. Elsti ruddi Vaðlaheiðarvegurinn (sem notaður var á árunum fyrir “seinna stríð”) liggur að hluta til um hjallann. Ofan hans er áberandi 40-80m þykkt klettabelti (sem nefnist Vothamrar) með fáeinum þykkum basaltlögum. Þessari berglagaseríu (þar sem setbergslög og dílabasaltlög eru mest áberandi) hefur verið lýst ofan Akureyrar og er þar nefnd Vatnsbólasyrpa og ekki ástæða til að nota annað nafn á syrpu í Vaðlaheiði (sjá Árna Hjartarson 2001). Þegar Vatnsbólasyrpa hleðst upp virðist virkni í eldstöðinni á Glerárdal vera komin í gang. Líklegt er að setbergslögin í Vatnsbólasyrpu og herra í Vaðlaheiði megi rekja til mikilla gjóskugosa úr þeirri eldstöð. Þau eru að uppruna súr ljós gjóska sem hefur ummyndast í leirkennt setberg með afar lágan brotstyrk.

Herra í Vaðlaheiði er algengt að finna ólivínbasalt og fremur stakdílótt dílabasalt. Þar eru einnig mörg (og sum þykk) millilög úr setbergi sem að uppruna er súr gjóska. Bergið er víða með “öfuga” en þó oftast óljósa segulstefnu eins og almennt er með þykkum berglagastafla ofan við “Anomaliu 5”. Segulmælingar í borholum og nærri jarðgangaleið í austanverðri Vaðlaheiði benda til að eystri hluti gangaleiðarinnar verði innan Vatnsbólasyrpu. Lega helstu bergsyrpa er sýnd á langsníði eftir jarðgangaleið á teikningu 4.



### 1.3 Berglagahalli

Jarðlagahalli milli Eyjafjarðar og Fnjóskadals hefur verið mældur víða nærri fyrirhugaðri jarðgangaleið og eru helstu niðurstöður sýndar á teikningu 1. Berglögum hallar í stórum dráttum 5-8° til suðurs nærri strönd Eyjafjarðar en til ASA nærri botni Fnjóskadals. Í hlíðum Fnjóskadals er víða óhægt að mæla hallastefnuna í þröngum giljum og getur hallastefnan því verið fremur ónákvæm. Einnig verður að hafa í huga að mælingarnar eru gerðar á yfirborði (víða 100-400m hærra en lega gangaleiðar) en alla jafnan vex jarðlagahalli niður í bergstaflann.

Í neðstu 200m ofan sjávarmáls á Svalbarðsströnd er hallinn 6-10° til suðurs en minnkar hratt með vaxandi hæð. Þegar neðsta hluta Vatnsbólasyrpu (undir Votuhömrum) er fylgt suður eftir endilangri hlíðinni mælist meðalhalla vera 4-5°. Efst í hrygg Vaðlaheiðar mælist hallinn um 2-3° til SSA (hallastefnan ekki nákvæm og mælistaðurinn um 500m hærra en gangaleiðin). Austantil í heiðinni (ofan við 500m hæð y.s.) mælist hallinn um 4-7° til SA og ASA. Neðar í brekkum Fnjóskadals vex hallinn í 8-10° til ASA (og hallastefnan mælist jafnvel til A). Þessi stefnu- og hallabreyting frá strönd Eyjafjarðar yfir í Fnjóskadal veldur því að jarðgöng skera jarðlagaskil með mismunandi hætti gegnum fjallið.

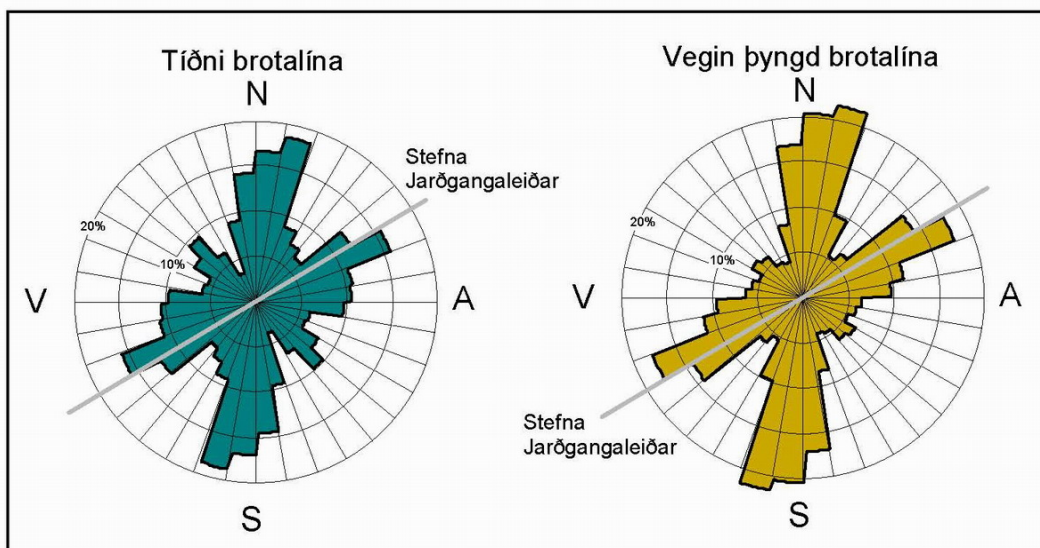
### 1.4 Brotalamir

Tíðni og stefnur brotalína á Vaðlaheiði voru metnar út frá loftmyndum og segulmælingum auk beinna mælinga á bergöngum og misgöngum þar sem slík fyrirbæri er að finna.

#### 1.4.1 Stefnur á sprungum og berggöngum byggðar á loftmyndum

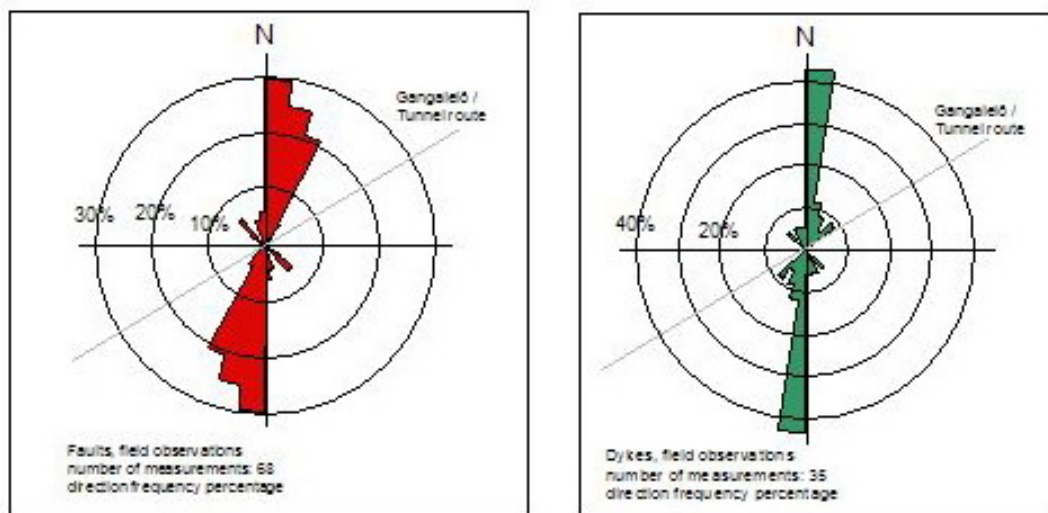
Við fyrstu sýn virðist berg í Vaðlaheiði vera tiltölulega heilt og vel samlímt. Vesturhlíðin er veit að Eyjafirði er með tiltölulega þunna jarðvegshulu þar sem víða sér í berg. Í efsta hluta Vaðlaheiðar og í austurhlíðum er þykkari og samfelldari jarðvegshula (að mestu leyti úr jökulruðningi) og sést aðeins í berg í giljum og einstaka bríkum. Eftir því sem rýnt er fastar í loftmyndir sjást fleiri línulegar misfellur sem taldar eru fela sprungur, misgengi eða bergganga. Tíðnirós fyrir stefnur allra brotalína sem eru sýnilegar við Vaðlaheiði milli Svalbarðsstrandar og Fnjóskár auk stefna þekktra misgengja og bergganga er á mynd 1.1.

Þegar horft er frá Akureyri til Vaðlaheiðar sýnist hallandi berglagastaflinn vera óbrotinn. Örfá ummerki um misgengi sjást þegar rýnt er í berg í vesturhlíðum Vaðlaheiðar. Stefna þeirra liggur nokkuð dreift, helst til norðurs og til NV. Brotabelti sem ætla má að séu fylgifiskar misgengja sjást í flestum giljum í austurhlíð Vaðlaheiðar. Stefna þeirra er að mestu mjög samhliða N-S. Sjaldgæft er að sjá eða greina hversu mikið sig verður á bergi um línuleg misgengi en þykkt á misgengisbreksíu sem sést á einstaka stað umhverfis brotfleti bendir til að sig geti verið margir metrar eða jafnvel tugir metra.



Mynd 1.1. Stefnudreifing brotalína er sjást á loftmyndum við Vaðlaheiði auk stefna misgengja og bergganga (allt samanlagt). Til vinstri er tíðnirós er sýnir eingöngu stefnudreifingu brotalínanna. Til hægri er stefnudreifing brotalína með hliðsjón af lengdum einstakra lína og sýnir því e.t.v. betur stefnu og “styrk” einstakra brotalínustefna.

Við ströndina gegnt Akureyri eru nokkrir áberandi berggangar sem stefna N-S. Sumir þeirra eru samsettir úr mörgum samhliða gangaæðum sem geta myndað nokkurra tuga metra breið gangaknippi sem ganga til norðurs upp í hlíðarnar. Í austanverðri Vaðlaheiði sáust aðeins 5-7 gangar (misgreinilega) á yfirborði og mældist stefna þeirra nálægt N-S en þó með nokkrum frávikum.



Mynd 1.2. Stefnudreifing sýnilegra misgengja og bergganga við Vaðlaheiði (ekki meðtaldar brotalínur sem sjást á loftmyndum). Til vinstri er tíðnirós fyrir 68 misgengi (eða línuleg brotabelti) sem fundist hafa á Svalbarðsströnd og í austanverðri Vaðlaheiði. Til hægri er stefnudreifing 35 bergganga sem fundist hafa á sama svæði, flestir á Svalbarðsströnd.

Ef tíðni bergganga er aðeins metin með kortlagningu á yfirborði mætti ætla að vestantil í Vaðlaheiði sé hlutfall bergganga a.m.k. 6-10% af berginu og í austanverðri heiðinni sé hlutfallið 3-6%. Í borholum VK-04 og VK-07 í vestanverðri Vaðlaheiði eru berggangar liðlega fjórðungur af berginu í holunum.

Þykkt einstakra ganga hefur mælst frá 1-14m og meginstefna ganga er litlu austan við norður (á bilinu 5-15°). Halli bergganga er yfirleitt um 85° með bratta niður til vesturs og virðist vera að meginþorri þeirra hafi snarast til suðausturs með halla jarðlagastafans. Stefnudreifing þekktra bergganga og misgengja er sýnd á mynd 1.2.

## 1.5 Ummyndun bergs

Efst í Vaðlaheiði má víða finna í glufum og blöðrum í berginu smáa geislasteina úr kabasíti. Slíkar útfellingar eru algengar í borholum VK-03 og VK-06 sem eru í 500m hæð á austanverðri heiðinni. Neðar finnast analsímkrystallar og svo skólesít. Í þóleiítbasalti djúpt í holum VK-03 og VK-06 eru holrými stundum fyllt kísilsteindum. Bergið á jarðgangaleið tilheyrir mesólít- skólesít- ummyndunarbeltinu (samkvæmt skilgreiningum G.P.L Walker). Ólivínbasalt og dílabasalt er almennt mjög mikið holufyllt og sprungur víða samlímdar. Sums staðar er þóleiítbasalt einnig mikið holufyllt en þóleiítbasalt er almennt mun sparara á útfellingakristall samanborið við ólivín- og dílabasalt). Ummyndun og holufyllingar stýra að miklu leyti vatnsstreymi í óbrotnum bergmassa.

## 1.6 Jarðvatn og lekt berglaga

Almennt má segja að berggrunnurinn í Vaðlaheiði sé mettaður vatni, nema efst í hryggnum þar sem lóðrétt dýpi á vatnsborð er líklega 80-100m. Lektarprófanir í borholum sýndu að almennt er bergið þétt (frumlekt mjög lág) en einstaka sprungur sem borholurnar skáru gegnum láku mjög mikið og eru afar vel vatnsleiðandi.

Bergið í Vaðlaheiði er yfirleitt vel holufyllt, þétt (með lága “prímera” lekt) og jarðvatnsborð því oftast nærri yfirborði í hlíðum fjallsins (sjá langsníð á teikningu 4). Setbergslög úr súrri gjósku og sandsteini sem liggja að miklu leyti í yfir 350m til 450m hæð y.s í vesturhluta heiðarinnar eru mjög vatnspétt og hindra verulega lóðrétt vatnsstreymi. Helst getur jarðvatn hreyfst um sjálfan berggrunninn þar sem minna holufylltar þóleiítstyrpur eru á vesturhluta jarðgangaleiðarinnar og svo er mesti vatnslekinn líklega bundinn við “opin” misgengjabrot og bergganga í berginu.

Í austanverðri Vaðlaheiði stóð jarðvatn á 40m dýpi (lóðrétt) í borholu VK-02. Hærra í austanverðri heiðinni í borholum VK-03 og VK-06 stóð jarðvatn á 70-80m lóðréttu dýpi við lok borunar. Er talið að vatnið hafi leitað leiða út um sprungur í berginu í mið- og neðri hluta holanna. Að vestanverðu við heiðina er jarðvatn við yfirborð í holu VK-04 en í holu VK-07 seig vatnið niður á um 20m lóðrétt dýpi við lok borunar. Auk þess sem að framan er sagt er vatn við yfirborð í vatnsbólum ofan og innan við Hallland.

## 1.7 Jarðhiti.

Hitamælingar í borholu VK-06 benda til að mögulegt sé að jarðhiti verði á gangaleiðinni gegnum Vaðlaheiði. Talsverður aukinn jarðhitastigull er í lárétta stefnu til vesturs frá borholu VK-03 að holu VK-06. Ekki varð vart við “óeðlilegan” hita í borholum að vestanverðu við heiðina.

Við Laugaland í Eyjafirði, um 13-15 km suður frá jarðgangaleiðinni er mikill hiti í jörðu, miklu meiri en ráða hefði mátt af volgrum sem frá fornu voru þar kunnar á yfirborði. Við Svalbarðseyri sem er 5-6 km norðan gangaleiðar er þekktur 54 °C hiti í

borholu og 33 °C hiti á yfirborði. Að auki er mikið sjóðandi vatn í hverastrýtum á botni Eyjafjarðar um 13-15 km norðan gangaleiðar.

Austan Vaðlaheiðar er mikill og sjóðandi jarðhiti á Reykjum í Fnjóskadal um 15 km suður frá gangaleiðinni. Minni jarðhiti er norður frá Vaðlaheiði, á Draflastöðum og nærri Grenivík. Draflastaðir eru um 15 km norðan gangaleiðar og þar er þekktur 60 °C jarðhiti í grunnri borholu. Loks má geta þess að um 70 °C er í borholum í Ljósavatnsskarði um 10 km austan gangaleiðarinnar.

Fjórar dýpstu borholurnar við Vaðlaheiðargöng hafa verið hitamældar og eru hitaferlar holanna sýndir á myndum 3.7 og 3.8.

## 2. Rannsóknaboranir

Rannsóknaboranir vegna Vaðlaheiðarganga hafa farið fram í tveimur lotum. Fyrri lotan var frá júlí til loka nóvember 2005 og síðari lotan í september til nóvember 2010. Ræktunarsamband Flóa og Skeiða annaðist boranir bæði tímabilin. Árið 2005 unnu að jafnaði þrír við borunina á einni vakt og var Magnús Gíslason borstjóri. Árið 2010 var unnið á vöktum og borstjórar voru Johnny Símonarson og Svanlaugur Halldórsson.

Holur VK-01 til VK-05, voru boraðar 2005, samtals 915 metrar (þar af borkjarni 870m). Holur VK-06 og VK-07 samtals 800 metrar (788m borkjarni) voru boraðar 2010. Öll kjarnaborun var unnin með NQ triple tube kjarnabúnaði sem gefur 45mm sveran kjarna úr 75,5mm víðri borholu. Lektarprófanir í borholum voru gerðar með gasfylltum pakkara sem þróaður var af Johnny Símonarsyni og flytur lektarbúnaðurinn allt að 350 lítra á mínútu en við meira rennsli fer þrýstifall í búnaði hratt vaxandi.

Hnit holanna hafa verið verið mæld með GPS-handtæki og hæð þeirra er studd með staðsetningu þeirra í 2m hæðarlínugrunni. Yfirlit yfir staðsetningu, dýpt og halla kjarnaborhola er í töflu 2.1.

Tafla 2.1. Staðsetningar, halli og dýpi kjarnaborhola.

Nafn holu	Bortími ár / vika	Austurhnit m	Norðurhnit m	Hæð m y.s.	Halli °	Stefna °	Fóður rör m	Dýpi m	Kjarnab. m
	Borað 2005								
VK-01	05 / 32-	549545	581435	192	0	0	6,3	33,4	27,1
VK-02	05 / 33-34	549221	581198	280	45	252	15	201,3	186,3
VK-03	05 / 35-42	547771	580513	484	57	135	12	434	422
VK-04	05 / 45-47	544341	578243	231	58	79	9	204	195
VK-05	05 / 48-	543530	577723	90,5	30		3,2	42	38,8
	Borað 2010								
VK-06	10 / 39-42-	547732	580502	479,5	45	255	9	550,3	541,3
VK-07	10 / 43-	544104	578256	209	45	247	3,3	252,1	248,8
						Samtals	57,8	1717,1	1659,3

Í töflu 2.2 er sýnd kjarnaheimta úr holunum og RQD heilleikastuðull fyrir mismunandi langa kjarnabúta. Einnig er talinn upp fjöldi punktálagsprófana (Point Load Test) og fjöldi hörkuprófana (Schmidt Hammer Test). Dýpi á jarðvatn er ónákvæmt og gæti sveiflast til eftir árstíðum og tíðarfari.

Tafla 2.2. Yfirlit yfir kjarnaheimtu og RQD mælingar í borholum.

Hola	Kjarni % af holulengd	Kjarni % af bergborun	RQD -10	RQD -30	RQD -50	RQD -100	PLT fjöldi	SHT fjöldi	Lektarpr. fjöldi	Lóðr. dýpi á jarðvatn
VK-01	82,3	101,5	28,6	2,5	0	0	3	2	0	3
VK-02	94,2	101,8	68,4	31	15	1	26	24	4,5	~40
VK-03	98,1	100,9	67,3	40	26	9	31	9	6	~80
VK-04	95,5	99,9	46,6	16	4	0	13	0	6	1
VK-05	92,6	100,3	30,4	4	1	0	0	0	0	1,8
VK-06	98,0	99,7	67,8	45	32	18	36	0	12	~80
VK-07	98,7	100,0	59,9	34	18	5	18	0	7	~20

Í töflu 2.3 er sýnt hvernig berg í borholunum er flokkað í mismunandi berggerðir. Sýnd er samanlögð þykkt hvernar gerðar ásamt fjölda samhangandi bergeininga. Í flestum holum er afar lítið kjarnatap en bergið er smásprungið eins og kemur fram á RQD mælingum og síðar verður vikið að. Megnið af kjarnatapi er talið verða í setlögum. Einnig er á fáeinum stöðum kjarnatap í misgengisbreksíu og í brotnu bergi á

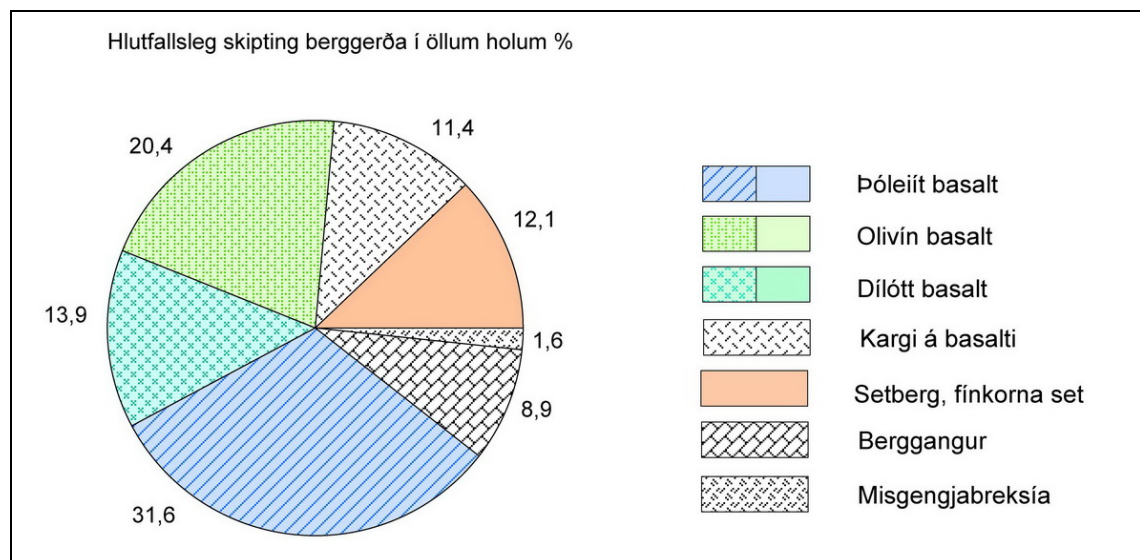
jöðrum bergganga. Ekki er nákvæmt hvernig skilgreina skal mörkin milli smábrotins bergs og misgengisbreksíu.

Samanlagt dýpi eða lengd kjarnaborhola er 1717m og þar af voru stálfóðringar gegnum laus jarðlög í efsta hluta hola samtals um 57,8m.

Athuga skal að mæld lengd samanlagðs borkjarna úr öllum borholunum (1665m) er um 6m meiri en samanlögð lengd borhola í bergi (1659m). Ástæðan er sú að borkjarninn gliðnar aðeins sundur þegar hann er settur í kjarnakassana og vill því mælast um 1-1,5% lengri en hann raunverulega er, þannig að 100% mæld kjarnalengd þýðir líklega í raun 98,5-99,5% kjarnaheimta.

Tafla 2.3. Yfirlit yfir samanlagða þykkt mismunandi berggerða í borholum.

Borhola	Setberg m	Kargi m	Ól-bas m	Dílabas m	Þóleiít m	Berggangar m	Misg.breks m	Samt .þykkt m
VK-01	2,8	3,8	1,9	19,0	0,0	0,0		27,5
VK-02	9,5	24,2	142,4	0,0	7,2	0,0	6,5	189,7
VK-03	53,3	22,9	119,1	130,3	90,4	6,0	3,7	425,7
VK-04	5,2	5,5	0,0	0,0	138,4	40,7	5,0	194,8
VK-05	1,1	0,0	0,0	0,0	11,3	26,5		38,9
VK-06	118,8	76,3	72,9	70,6	172,4	20,7	8,0	539,6
VK-07	11,7	57,6	2,8	11,6	107,2	54,3	3,9	248,9
Samanl. þykkt m	202,3	190,3	339,1	231,5	526,8	148,1	27,1	1665,0
% af bergi í holu	12,1	11,4	20,4	13,9	31,6	8,9	1,6	100,0
Fjöldi lageininga	71	61	35	20	52	20	12	271,0
Meðalþykkt m	2,8	3,1	9,7	11,6	10,1	7,4	2,3	6,1
Lóðr.meðalþykkt	2,1	2,2	7,3	8,4	7,9			



Mynd 2.1. Yfirlit yfir hlutfall mismunandi berggerða í öllum borholunum.

## 2.1 Borholur í vestanverðri Vaðlaheiði

Þrjár kjarnaborholur voru boraðar í vestanverðri Vaðlaheiði. Tvær holanna, VK-4 og VK-5 voru boraðar 2005. Báðar holurnar voru hafðar með liðlega 30° halla til þess að skera bergganga og misgengi sem vísbendingar sáust um á loftmyndum.

Landsvæði yfir gangaleiðinni var segulmælt árið 2006 eftir samhliða mælingum í austur-vesturstefnu. Markmið segulmælinga var að sjá hvort línuleg segulfrávik kæmu fram og þá að sjá stefnudreifingu slíkra segulfrávik. Kort var gert 2007 yfir segulfrávik mælda svæðisins. Haustið 2010 var kjarnaborhola VK-07 staðsett og boruð með hliðsjón af segulkortinu. Tilgangur með borun holunnar var að kanna betur hvað mætti lesa úr sterkum samsíða N-S segulfrávikum á segulkortinu. Fjallað er um holurnar í landfræðilegri röð austur eftir jarðgangaleiðinni.

### 2.1.1 Hola VK-05

Hola VK-05 var boruð 2005 á klapparbrún ofan við veginn um Svalbarðsströnd, ofan við áformaðan vesturmunna ganganna. Hún er 42m djúp og hallandi um 30° til strandar. Yfirlit yfir berglög í holunni er sýnt í töflu 2.4. Ekki var prófuð lekt bergsins í þessari holu.

Tafla 2.4. Samanlögð þykkt og hlutfall mismunandi berggerða í holu VK-05.

Hola VK-05	Setberg	Kargi	Ól-bas	Dílabas	Þól	Bergg.	Misg.breks	Alls
Samanl. þykkt m	1,1	0,0	0,0	0,0	11,3	26,5	0,0	38,9
% af bergi í holu	2,8	0,0	0,0	0,0	29,0	68,1	0,0	100,0
Fjöldi lageininga	1,0	0,0	0,0	0,0	2,0	3,0	0,0	
Meðalþykkt m	1,1				5,7	8,8		

### 2.1.2 Hola VK-07

Hola VK-07 var boruð í landi Halllands haustið 2010. Hún er á klapparbrún, nærri raflínu sem er tæplega 180m vestan við gamla Vaðlaheiðarvegin og í tæplega 240m fjarlægð frá holu VK-04. Holan er 252m djúp og hallar um 45° í átt til strandar. Borstaður og stefna voru valin með hliðsjón af niðurstöðum úr segulmælingum sem gerðar voru yfir gangaleiðinni á þessu svæði 2006. Hlutfall og þykktir berglaga í holunni eru sýnd í töflu 2.5. Sjö sinnum var pakkað og lektarprófað í holunni. Hverfandi lekt mældist í berginu þar til holan skar sprungur á 235m og 247m dýpi, þar mældist mikil staðbundin lekt.

Tafla 2.5. Samanlögð þykkt og hlutfall mismunandi berggerða í holu VK-07.

Hola VK-07	Setberg	Kargi	Ól-bas	Dílabas	Þól	Bergg.	Misg.breks	Alls
Samanl. þykkt m	11,7	57,6	2,8	11,6	107,2	54,3	3,9	248,9
% af bergi í holu	4,7	23,1	1,1	4,7	43,1	21,8	1,5	100,0
Fjöldi lageininga	8,0	15,0	1,0	1,0	16,0	7,0	5,0	
Meðalþykkt m	1,5	3,8	2,8	11,6	6,7	7,8	0,8	

### 2.1.3 Hola VK-04

Hola VK-04 boruð 2005 er einnig í landi Halllands, staðsett skammt ofan við bílvegin um Vaðlaheiði. Fóðurrör var borað gegnum laus yfirborðslög niður á 9m dýpi. Holan er 204m djúp og hallar henni líðlega 32° til austurs inn undir hlíðina í þeim tilgangi að skera gegnum áberandi brotalínu (sem sést á loftmynd). Fjórar lektarprófanir voru gerðar í holunni auk tilraunar til tveggja prófana í viðbót (sem ekki tókust fyllilega). Ofan 100m dýpis virtist bergið vera næsta vatnspétt. Neðan 100m dýpis lak bergið afskaplega mikið, líklega flæddi vatnið þar um bergganga og misgengi. Dælt var um 10 lítrum /sek beint á holutoppinn án pakkara án þess að tækist að fylla 75mm víða holuna. Hlutfall og samanlögð þykkt berglaga í holunni eru sýnd í töflu 2.6.

Tafla 2.6. Yfirlit yfir samanlagða þykkt mismunandi berggerða í borholu VK-04.

Hola VK-04	Setberg	Kargi	Ólivín-bas	Dílabas	Þóleíft	Berggangar	Misg.breks	Alls
Samanl. þykkt m	5,2	5,5	0,0	0,0	138,4	40,7	5,0	194,8
% af bergi í holu	2,7	2,8	0,0	0,0	71,1	20,9	2,6	100,0
Fjöldi lageininga	9,0	1,0	0,0	0,0	9,0	6,0	1,0	
Meðalþykkt m	0,6	5,5			15,4	6,8	5,0	

Þar sem borholur VK-05, VK-07 og VK-04 eru allar að vestanverðu í Vaðlaheiði á tæplega 1km löngum kafla við vesturenda ganganna er e.t.v. heppilegt að skoða þær sameiginlega. Samantekið yfirlit yfir berglög í holunum þremur er sýnt í töflu 7 og skífurit yfir hlutfallslega skiptingu berggerðanna er sýnd á mynd 2.2 í samanburði við hlutfall berggerða að austanverðu í Vaðlaheiði.

Tafla 2.7. Yfirlit yfir samanlagða þykkt mismunandi berggerða í borholum VK-05, VK-04 og VK-07.

Borhola	Setberg	Kargi	Ól-bas	Dílabas	Þól	Bergg	Misg.breks	Samt þykkt
VK-04	5,2	5,5	0,0	0,0	138,4	40,7	5,0	194,8
VK-05	1,1	0,0	0,0	0,0	11,3	26,5	0,0	38,9
VK-07	11,7	57,6	2,8	11,6	107,2	54,3	3,9	248,9
Samanl. þykkt m	18,0	63,1	2,8	11,6	256,9	121,4	8,9	482,5
% af bergi í holum	3,7	13,1	0,6	2,4	53,2	25,2	1,8	100,0
Fjöldi lageininga	18	16	1	1	26	10	6	78,0
Meðalþykkt m	1,0	3,9	2,8	11,6	9,9	12,1	1,5	6,2

Basalt ásamt lagmótakarga er liðlega 69% af berginu, basaltið nær eingöngu þóleíft. Berggangar eru liðlega 25% af berginu. Setberg er aðeins 3,7% og meðalþykkt setbergslaga 1m. Misgengisbreksía er metin vera tæplega 2% en að auki eru mjög smásprungin svæði víða í borkjarnanum sem túlka mætti sem misgengisbreksíu.

## 2.2 Borholur að austanverðu í Vaðlaheiði

Þrjár borholur (VK-01, VK-02 og VK-03) voru boraðar í austanverðri Vaðlaheiði haustið 2005 og þá var ljóst að bergið var víða mikið brotið. Mjög takmarkað sér í berg á yfirborði nærri jarðgangaleiðinni. Berg sést aðeins í grunnum giljum sem skerast niður í tiltölulega samfellda jökulruðningskápu sem smurð er yfir alla mið- og austanverða heiðina. Árin 2006 og 2007 var því segulmælt um 350-400m breitt belti yfir áformaðri jarðgangaleið til að kortleggja stefnur og segulstyrkleika línulegra segulfrávika í berginu. Þótt mælda beltið sé “óheppilega” mjótt, sýnir segulstyrkskortíð sem byggir á mælingunum nokkuð vel stefnur, tíðni og styrkleika línulegra segulfrávika.

### 2.2.1 Hola VK-06

Hola VK-06 er 550m löng og boruð með 45° halla til vesturs. Holan var staðsett haustið 2010 og áformað að bora skáhallt niður til vesturs í gegnum sterk línuleg segulfrávik sem komu fram í segulmælingum. Borstaðurinn er nær 4km austan við holu VK-04 sem lýst er að framan en aðeins um 40m vestan við borstað holu VK-03 (sem boruð var 2005). Tafla 2.8 sýnir hvernig berg í holunni skiptist milli berggerða ásamt fjölda og meðalþykkt einstakra berggerða.



Tafla 2.8. Yfirlit yfir samanlagða þykkt og skiptingu mismunandi berggerða í borholu VK-06.

Hola VK-06	Setberg	Kargi	Ól-bas	Dílabas	Þól	Bergg	Misg.breks	Alls
Samanl. þykkt m	118,8	76,3	72,9	70,6	172,4	20,7	8,0	539,6
% af bergi í holu	22,0	14,1	13,5	13,1	31,9	3,8	1,5	100,0
Fjöldi lageininga	26,0	26,0	6,0	8,0	17,0	3,0	3,0	
Meðalþykkt m	4,6	2,9	12,2	8,8	10,1	6,9	2,7	

Tólf lektarprófanir voru gerðar í holunni og lengd prófanabila jafnað sem mest niður eftir allri lengd holunnar. Almennt reyndist bergið vera mjög þétt, en á liðlega 282m dýpi var borað gegnum mjög leka æð, þar sem dró mjög úr bakflæði skolvatns úr holunni. Við lektarprófun á 248-285m dýpi var dælt niður um 360 l/mín við lítinn (og tiltölulega óvissan) mótþrýsting. (Þrýstimælir sýndi 1 bar í þrýsting og ekki víst hversu há “virk” vatnssúla hefur verið í holunni). Líklega hefði sprungan getað tekið við meira vatni en afköst dælnnar og pakkarabúnaðar réðu við.

Við áframhaldandi borun kom aftur fram lek æð á um 500m dýpi. Neðsta prófunarbilið var frá 435m dýpi niður undir endanlegan holubotn (leктаð yfir 109m lengdarbil). Þarna var dælt niður allt að 280 l/mín við um 12 bara sýnilegan mótþrýsting. Eftir að dælingu á holuna var hætt, kom í ljós mikið “bakflæði”, þrýstingur lækkaði rólega (er lokað var fyrir) og mikið vatn flæddi upp í gegnum rennismælinn eftir að opnað var fyrir vatnið upp. Alls fóru um 10 rúmmetrar af vatni niður í holuna í prófuninni en eftir að 2 rúmmetrar höfðu flætt til baka upp úr holunni var hætt að fylgjast með því og borun haldið áfram (neðstu tvær stangirnar).

## 2.2.2 Hola VK-03

Undir lok ágúst 2005 var byrjað að bora holu VK-03 í tæplega 480m hæð y.s. í austanverðri Vaðlaheiði. Holan er 434m djúp með 57° halla til suðausturs. Hallinn og stefnan voru valin til að skera berg undir tiltölulega beinum grunnum giljum sem talin voru geta haft tengsl við brotalínur í berggrunninum. Afar seinlegt reyndist að bora holuna og verkinu hætt á 434m dýpi þótt áformað hefði verið að fara dýpra. Ekki flýtti fyrir þrálát ótíð með snjóþyngslum og ófærð, enda farið á borstað um ógreiðfæra vegslóð.

Sex lektarprófanir voru gerðar í holunni og reyndist bergið almennt vera mjög þétt. Vart varð við leka sprungu á 340m dýpi og var dælt niður í hana um 230 l/mín við 10 bara þrýsting. Við hitamælingar kemur fram hitalægð við 300m dýpi og þar eru sýnilegar sprungur sem benda til talsverðs leka. Ekki varð vart við lektarbreytingar þar við borunina og ekki lektarprófað. Í töflu 2.9 er sýnt hvernig berg í holunni skiptist milli berggerða ásamt fjölda og meðalþykkt einstakra berggerða.

Tafla 2.9. Yfirlit yfir samanlagða þykkt og skiptingu mismunandi berggerða í borholu VK-03.

Hola VK-03	Setberg	Kargi	Ól-bas	Dílabas	Þól	Bergg	Misg.breks	Alls
Samanl. þykkt m	53,3	22,9	119,1	130,3	90,4	6,0	3,7	425,7
% af bergi í holu	12,5	5,4	28,0	30,6	21,2	1,4	0,9	100,0
Fjöldi lageininga	20,0	9,0	16,0	10,0	5,0	1,0	2,0	
Meðalþykkt m	2,7	2,5	7,4	13,0	18,1	6,0	1,9	

### 2.2.3 Hola VK-02

Hola VK-02 var boruð í um 280m hæð y.s. nærri gangaleiðinni í brekkunum ofan við Skóga. Holunni hallar 45° til vesturs og er hún liðlega 200m löng. Staðarval og stefna beindist að því að bora gegnum áberandi brotalínu með N-S stefnu. Þrjú setbergslög, hvert um 3m að þykkt eru neðan við miðhluta holu VK-02. Þau eru með afar lágan bergstyrk og í þeim öllum varð 20-30% kjarnatap. Að öðru leyti er meginhluti bergsins sterklegt basalt. Fimm lektarprófanir voru gerðar í holunni og reyndist bergið almennt vera mjög þétt, aðeins varð vart við staðbundna lekt bergs á um 125m dýpi (líklega lak út um sprungur í berginu). Yfirlit yfir skiptingu bergsins í holu VK-02 er sýnt í töflu 2.10.

Tafla 2.10. Yfirlit yfir samanlagða þykkt og skiptingu mismunandi berggerða í borholu VK-02.

Hola VK-02	Setberg	Kargi	Ól-bas	Dílabas	Þól	Bergg	Misg.breks	Alls
Samanl. þykkt m	9,7	24,2	142,4	0,0	7,2	0,0	6,5	183,4
% af bergi í holu	5,3	13,2	77,6	0,0	3,9		3,5	100,0
Fjöldi lageininga	7,0	8,0	11,0	0,0	2,0	0,0	3,0	
Meðalþykkt m	1,4	3,0	12,9		3,6		2,2	

### 2.2.4 Hola VK-01

Kjarnahola VK-01 var boruð í um 190m hæð y.s. ofan við mögulegan gangamunna ofan við gömul úthús í Skógum. Hún er liðlega 33m djúp, kjarnaheimtan úr berginu var 92% og sýnir hún smásprungið basalt (RQD undir 30% og kjarnatap um 1m) sem bendir til að talsvert þurfi að styrkja bergið næst gangamunnum. Ofar í holunni er 3m þykkt setbergslag með mjög lágan bergstyrk og þar varð liðlega 0,7m kjarnatap. Engin lektarprófun á berginu var gerð í holunni. Yfirlit yfir skiptingu bergsins í holu VK-01 er sýnt í töflu 2.11.

Tafla 2.11. Yfirlit yfir samanlagða þykkt mismunandi berggerða í borholu VK-01.

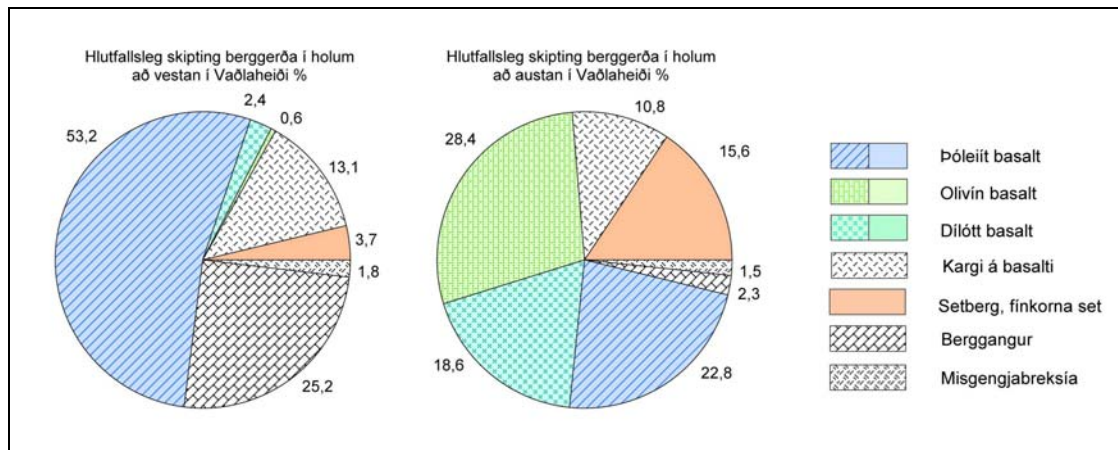
Hola VK-01	Setberg	Kargi	Ól-bas	Dílabas	Þól	Bergg	Misg.breks	
Samanl. þykkt m	2,8	3,8	1,9	19,0	0,0	0,0	0,0	27,5
% af bergi í holu	10,2	13,8	6,9	69,1	0,0	0,0	0,0	100,0
Fjöldi lageininga	1,0	2,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	
Meðalþykkt m	2,8	1,9	1,9	19,0				

Samantekið yfirlit yfir berggerðir í borholum í austanverðri Vaðlaheiði er sýnt í töflu 2.12

Tafla 2.12. Yfirlit yfir samanlagða þykkt mismunandi berggerða í borholum VK-01, VK-02, VK-03 og VK-06.

Borhola	Setberg	Kargi	Ól-bas	Dílabas	Þól	Bergg	Misg.breks	Samt þykkt
VK-01	2,8	3,8	1,9	19,0	0,0	0,0		27,5
VK-02	9,5	24,2	142,4	0,0	7,2	0,0	6,5	189,7
VK-03	53,3	22,9	119,1	130,3	90,4	6,0	3,7	425,7
VK-06	118,8	76,3	72,9	70,6	172,4	20,7	8,0	539,6
Samanl. Þykkt m	184,3	127,2	336,3	219,9	269,9	26,7	18,2	1182,5
% af bergi í holum	15,6	10,8	28,4	18,6	22,8	2,3	1,5	100,0
Fjöldi lageininga	54	45	34	19	24	4	8	188,0
Meðalþykkt m	3,4	2,8	9,9	11,6	11,2	6,7	2,3	6,3

Mikill munur er á í hvaða hlutfalli mismunandi berggerðir koma fram í borholum í vestanverðri eða austanverðri Vaðlaheiði. Skipting berggerða milli borsvæða er sýnd á mynd 2.2.



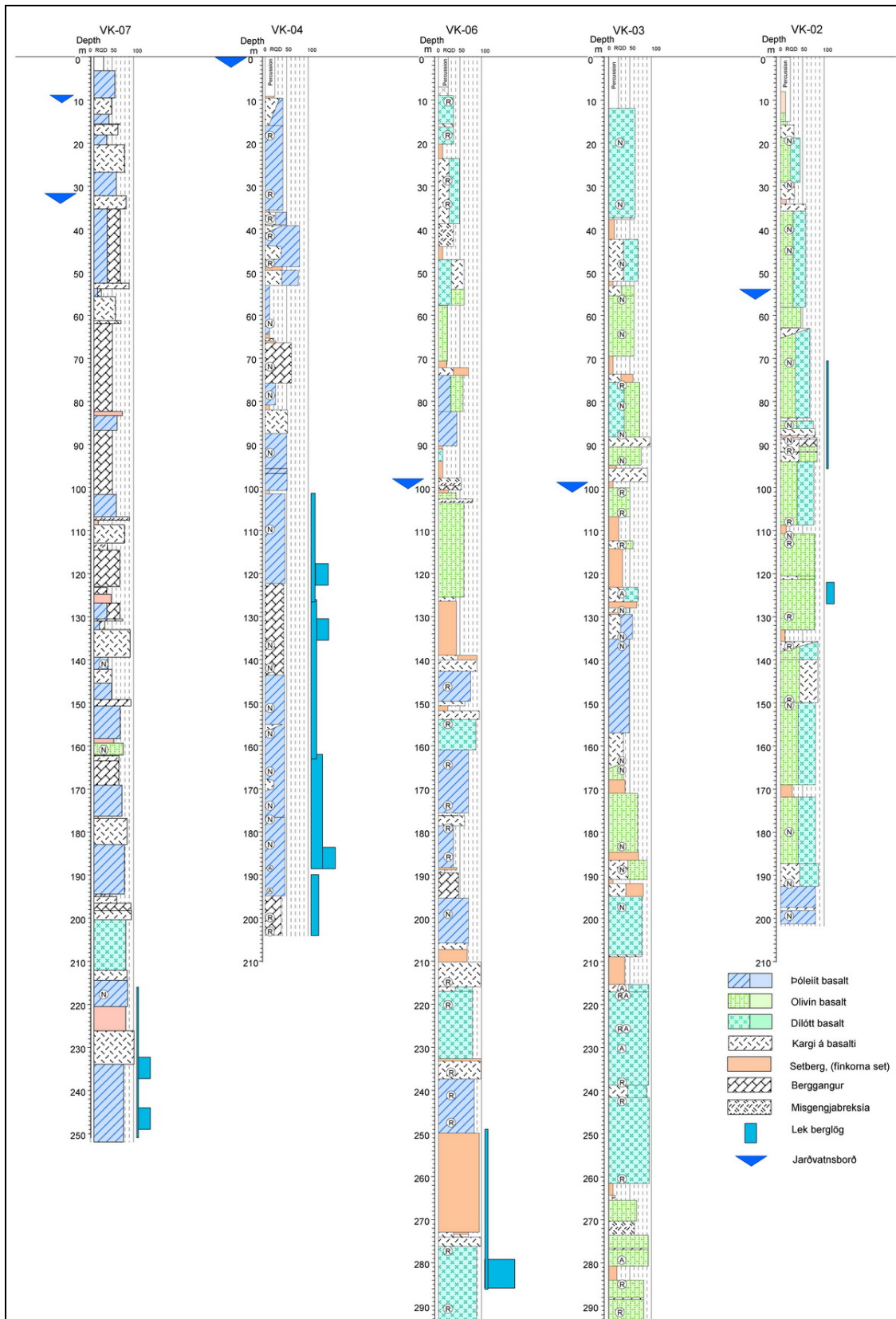
Mynd 2.2. Samanburður á hlutfalli mismunandi berggerða í borholum í vestanverðri og austanverðri Vaðlaheiði.

### 2.3 Yfirlit yfir jarðlagasnið borhola.

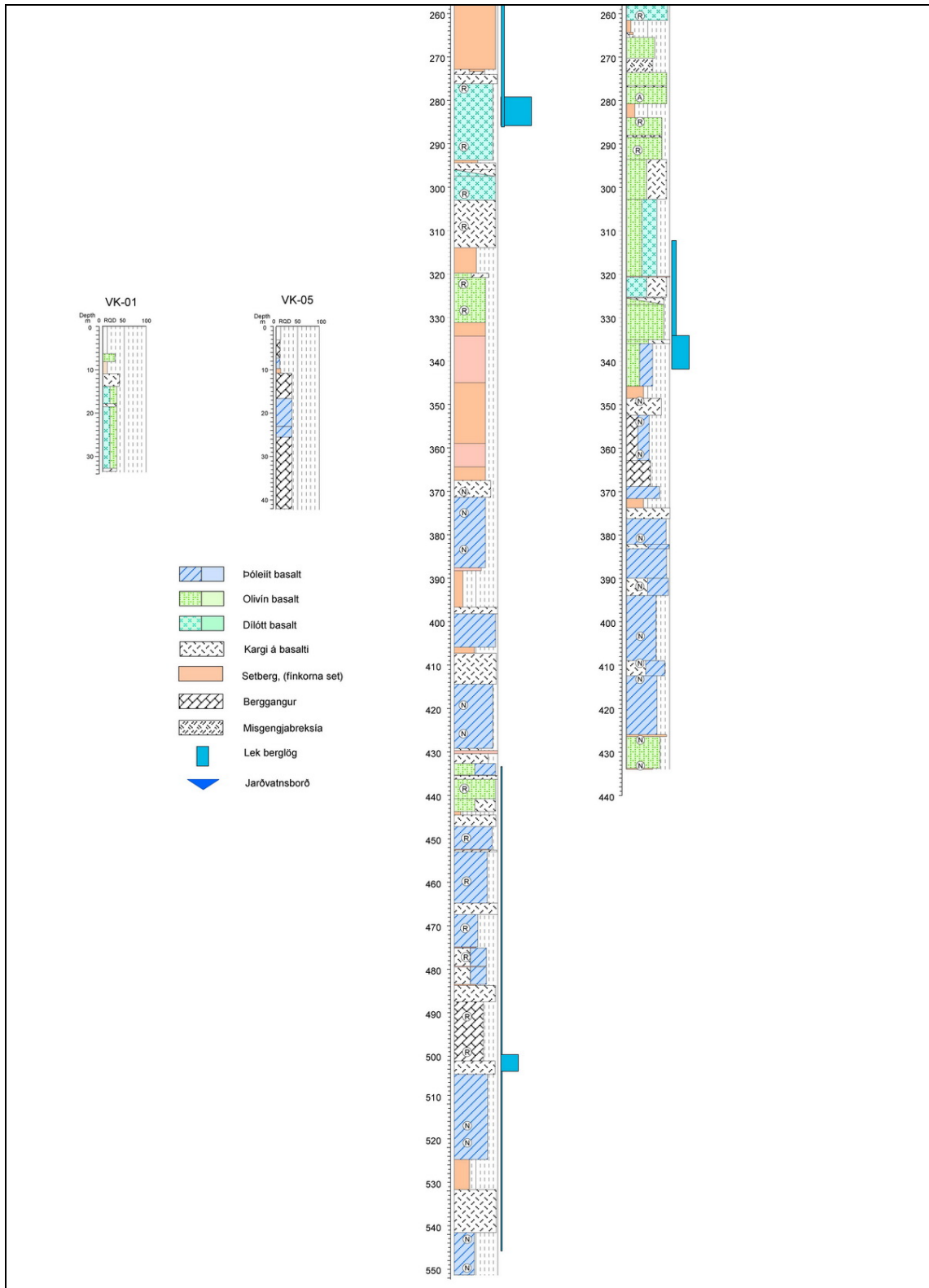
Borkjarnanum var lýst eftir aðferðum sem notaðar hafa verið til undirbúnings jarðganga á Íslandi í yfir þrjá áratugi (og á ættir að rekja í British Standard og AMST, sjá t.d. Geotechnical Engineering Investigation Manual eftir Roy E. Hunt og Engineering Geology and Rock Engineering eftir Nilsen og Palmström). Berginu er skipt upp í mismunandi berggerðir þar sem fylgt er sem mest flokkunarkerfi sem G. P. L. Walker innleiddi við jarðfræðirannsóknir á Austurlandi á sjötta áratug tuttugustu aldar. Ummyndun í berginu er einnig flokkuð eftir sömu aðferðum og G.P.L. Walker beitti á Austfjarðabasaltið.

Á teikningum 7 og 8 eru sýnd súlurit með RQD-10 berggæðamati af borholunum ásamt niðurstöðum fyrir Q-mat einstakra berglaga og byggir matið eingöngu á athugunum á borkjörnum ( $Q_{core}$  eða  $Q_c$ ). Einnig eru sýndir lekastaðir í holunum og staða vatnsborð eins og það var mælt við lok borunar hverrar holu. (Einfaldari súlurit yfir borholurnar eru sýnd á myndum 2.3 og 2.4). Nákvæmari upplýsingar um borholurnar eru í borholulýsingum í viðauka.

Kjarnaheimta borholanna er almennt mjög góð en á stöku stað kurlaðist eða eyddist borkjarninn. Borkjarninn er sprungumældur þannig að hlutfall búta lengra en 10cm – 30cm – 50cm – og 100cm er skráð. RQD-10 (fyrir samanlagða lengd 10cm eða lengri kjarnabúta á tilteknu lengdarbili) er sýnt grafískt á myndum 2.3 og 2.4 og á teikningum 7 og 8 en frekari upplýsingar um sprunguþéttleika er á borloggum. Setbergið er sums staðar kurlað en á grafisku kjarnasúlunum er það lægst sýnt sem 10% RQD.



Mynd 2.3. Yfirlit yfir berglög í borholum frá vestri til austurs. VK-07, VK-04, VK-03 og VK-02. RQD10 er sýnt á grafskan hátt sem breidd súlu sem breikkar til hægri við meiri berggæði (eða gisnara sprungunet). Netkvarði er að baki súlanna með 100% RQD í hægri jaðri. Borholusniðin eru með frekari upplýsingum á teikningum 7 og 8.



Mynd 2.4. Yfirlit yfir berglög í dýpri hluta borhola VK-06 og VK-03 ásamt yfirliti yfir grunnar borholur VK-01 og VK-05. RQD10 er sýnt á grafískan hátt sem breidd súlu sem breikkar til hægri við meiri berggæði (eða gisnara sprungunet). Netkvarði er að baki súlanna með 100% RQD í hægri jaðri. Borholusniðin eru með frekari upplýsingum á teikningum 7 og 8.

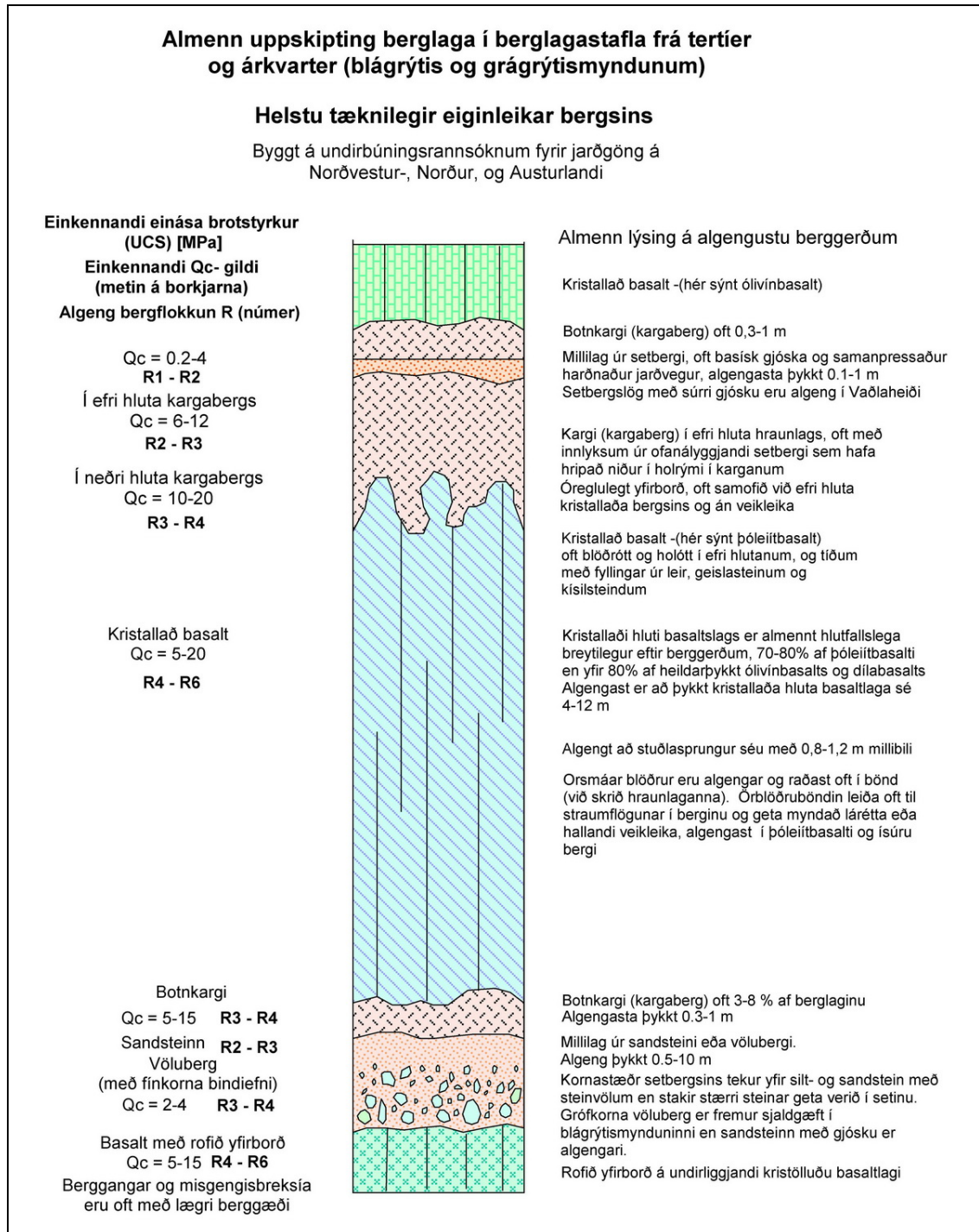


### 3 Frekari rannsóknir fyrir jarðgangagerð

Auk jarðfræðikortlagningar og kjarnaborana voru gerðar rannsóknir á nokkrum þáttum er veita upplýsingar um mögulegar aðstæður til jarðgangagerðar í Vaðlaheiði. Þar má nefna ýmsar prófanir á styrkleika bergs, hitastigsmælingar í borholum og segulmælingar og VLF mælingar til leitar að sprungum og berggöngum.

#### 3.1 Tæknilegir eiginleikar bergs

Á mynd 3.1 er sýnt á skematískan hátt hvernig basaltstaflinn er byggður upp úr mismunandi lögum og eru sýnd helstu tölugildi sem vænta má innan einstakra laga.



Mynd 3.1. Einfölduð skýringarmynd sem sýnir helstu berggerðir í Tertíera jarðlagastaflanum og tæknilega eiginleika berglaga.

Teikning 3.1 verður að skoðast sem lýsing almenns eðlis og frávik geta verið frá því sem þar er sýnt, bæði varðandi samsetningu einstakra lag og einnig varðandi mælda eiginleika þeirra.

### 3.1.1 Brotstyrkur bergs og harka

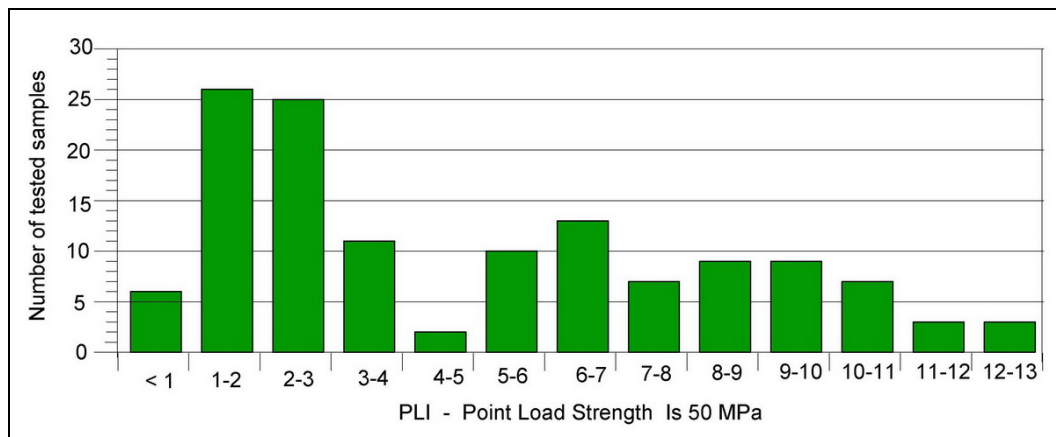
Punktálagsstyrkur eða sýndarstyrkur (apparent uniaxial breaking strength) mismunandi berggerða var mældur með ELE punktálagstæki (Point Load Test). Einnig var fjaðurstuðull bergs úr holum sem boraðar voru árið 2005 mældur með Schmidt hamri (Schmidt Hammer Test). Flokkun bergs eftir einása brotstyrk er sýnd á mynd 3.2.

Table 2.7 Simple field identification of compressive strength of rocks and clays (from ISRM, 1978).

Grade and Term		Field identification	Approx. $\sigma_c$ (MPa)
S1	Very soft clay	- Easily penetrated several inches by fist.	< 0.025
S2	Soft clay	- Easily penetrated several inches by thumb.	0.025-0.05
S3	Firm clay	- Can be penetrated several inches by thumb with moderate effort.	0.05 -0.10
S4	Stiff clay	- Readily indented by thumb, but penetrated only with great effort.	0.10 -0.25
S5	Very stiff clay	- Readily indented by thumbnail.	0.25 -0.50
S6	Hard clay	- Indented with difficulty by thumbnail.	> 0.50
The clays in grade S1 - S6 can be silty clays and combinations of silts and clays with sands, generally slow draining.			
R0	Extremely weak rock	- Indented by thumbnail.	0.25 - 1
R1	Very weak rock	- Crumbles under firm blows with point of geological hammer; can be peeled by a pocket knife.	1 - 5
R2	Weak rock	- Can be peeled by a pocket knife with difficulty, shallow identifications made by firm blow with point of geological hammer	5 - 25
R3	Medium strong rock	- Cannot be scraped or peeled with a pocket knife; specimen can be fractured with single firm blow of geological hammer.	25 - 50
R4	Strong rock	- Specimen requires more than one blow of geological hammer to fracture it.	50 - 100
R5	Very strong rock	- Specimen requires many blows of geological hammer to fracture it	100 - 250
R6	Extremely strong rock	- Specimen can only be chipped with geological hammer	> 250

Mynd 3.2. Flokkun bergs eftir einása brotstyrk samkvæmt ISRM 1978.

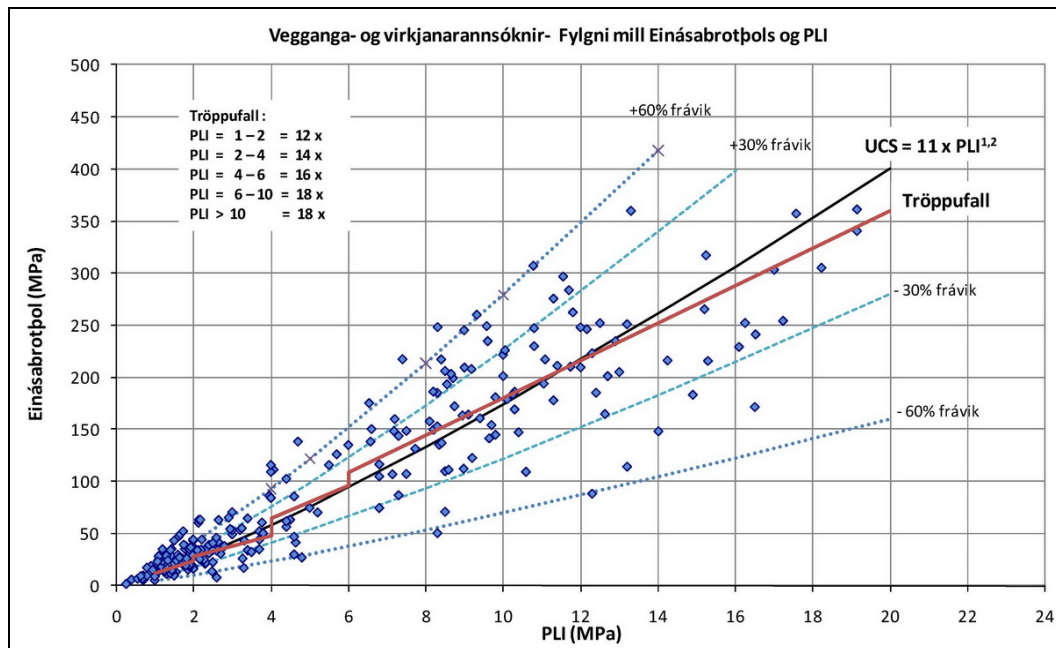
Borkjarni frá 130 stöðum í kjarnaholunum í Vaðlaheiði var brotinn í “Point Load” punktálagstæki til að fá fram punktálagsstyrk á berginu. Á hverjum stað voru 8-15 brot kraftmæld. Þar sem brottækið er einfalt er rætt um niðurstöðurnar sem brotgildi umreiknuð í  $Is_{50}$ , nefnt PLI eða Point Load Index, þar sem 50 stendur fyrir brotgildi umreiknað fyrir 50 mm borkjarna. Dreifing brotgilda  $Is_{50}$ er sýnd á mynd 3.3.



Mynd 3.3. Dreifing PLI punktálagsstyrks ( $Is_{50}$ ) 130 sýnishorna úr borholum í Vaðlaheiði.

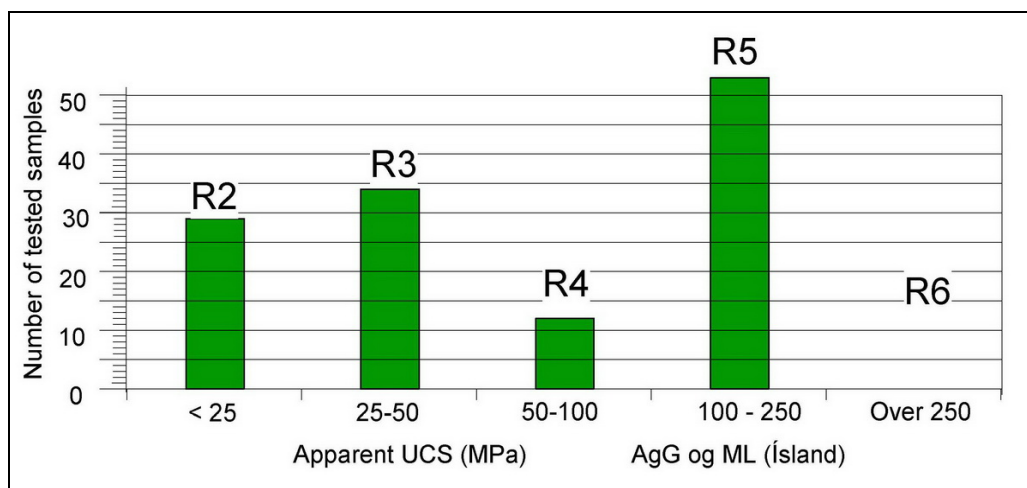


Punktálagsgildi úr Point Load prófunum eru umreiknuð í einásabrotstyrk, sýndarbrotsstyrk (Apparent UCS MPa), eftir mismunandi aðferðum. Samanburðarathuganir á íslensku bergi gefa til kynna að fylgnistuðull sé háður berggerð og styrk bergs (ML, ÁG og BÓSt 2009). Dreifing UCS sýndarbrotsstyrks (samkvæmt íslenskum rannsóknum á fylgni PLI og UCS) er sýnd á mynd 3.4.



Mynd 3.4. Samband PLI punktálagsstyrks ( $I_{s50}$ ) og einásabrotþols fyrir bergsýni frá Íslandi þar sem báðum mæliaðferðum hefur verið beitt á sömu bergsýni.

Samfara boruninum í Vaðlaheiði var ávallt var reynt að brjóta sýnishorn úr setbergi (sem oft reynist erfitt til jarðgangagerðar) en aðeins þrjú setbergssýni reyndust nægilega sterk til að hægt væri að brjóta þau í PLT tækinu. (Eitt sýnanna lenti í flokk R2 en tvö í flokk R3). Þess vegna er í raun ekkert af veikasta berginu prófað með Point Load tæki og hlutfall veikra berglaga því meira en ráða mætti af súluritinu á mynd 3.5.



Mynd 3.5. Yfirlit yfir dreifingu sýndarbrotsstyrks (apparent uniaxial strength) borkjarna í mismunandi styrkleikaflokka (eftir margföldunarstuðlum fyrir íslenskt berg).

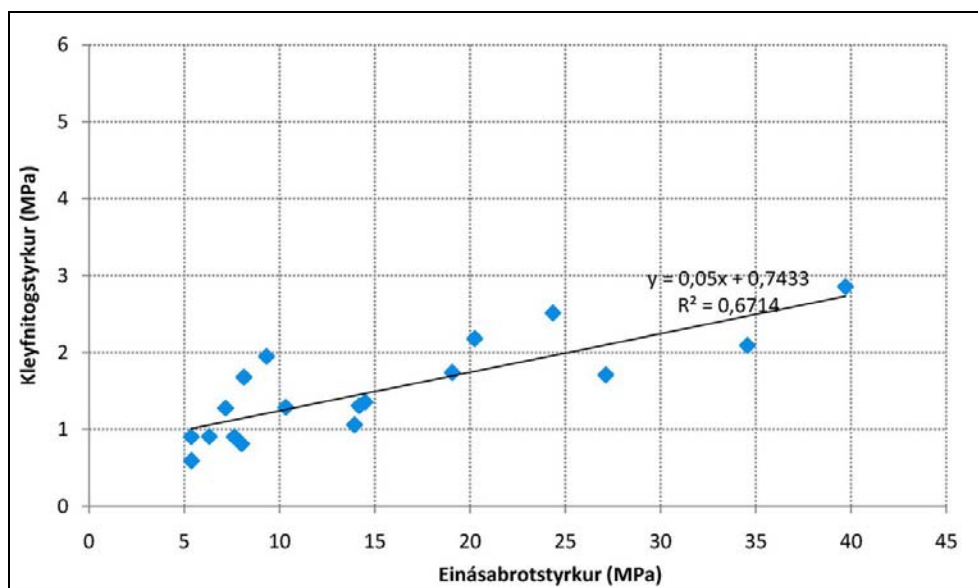
Öll sýnin sem samkvæmt uppreiknuðum PLI gildum lenda í flokki R2 eru kargabasalt ásamt einu setbergssýni. Í flokki R3 eru kargaberg og blöðrótt eða breyskjukennt basalt ásamt tveim sýnishornum úr sandsteini. Í flokki R4 eru þéttara kargaberg og blöðrótt basalt. Í flokki R4-R5 er basalt af öllum undirgerðum. Samkvæmt íslenska margfeldisstuðlinum fyrir PLI gildi lendir ekkert sýnishorn í flokki R6 en eins og sjá má á mynd 3.4 er sambandið milli PLI og mælds UCS mjög breytilegt og því mögulegt að nokkur sterkustu bergsýnanna (úr þóleiútbasalti ásamt ólivínbasalti og dílabasalti) eigi allt eins heima í bergflokki R6. Niðurstöður allra punktálagsprófana eru sýndar í kafla 3.1.3.

### 3.1.2 Rannsóknir á setbergi

Erfitt er að mæla brotþol á veiku bergi (eins og setbergi) með point load tæki og að auki er erfitt að meta hvaða stuðul skuli nota til að reikna PLI gildi yfir í “sýndarbrotsstyrk” eins og sést greinilega á dreifingu punktanna á mynd 3.4.

Sýnishorn af setbergi (úr borkjörnunum) voru valin og þau rannsökuð á ýmsa vegu á rannsóknastofu verkfræðistofunnar Mannvit. Mælingar á einásabrotstyrk valdra sýna gáfu meðalstyrk UCS 15 MPa, með lægstu mæld mörk 5,4 MPa (fjögur sýni undir 7,5 MPa) og hæsta mælda gildi tæplega 40 MPa. Kleyfnitogstyrkur var mældur frá 0,4 til 5,3 MPa. Niðurstöður yfir samband einásabrotstyrks og kleyfnitogstyrks eru sýndar á mynd 3.6.

Þrjú hæstu brotgildin á mynd 3.6 (í flokki R3) eru úr sama sandsteins-siltsteins laginu (sem er á 524 m dýpi í holu VK-06). Það er efst í þykku leirsteinssetlagi en neðar (og í meginhluta setlagins) er bergstyrkurinn svo lágur að ekki reyndist unnt að brotþolsprófa þann hluta setbergsins. Á 530 m dýpi náðist þó að mæla kleyfnitogstyrk upp á 1 MPa og bendir það til um 5 MPa einásabrotstyrks (samanber mynd 3.6). Hliðstætt er með prófun á setbergi á 388 m dýpi í sömu holu (UCS 19,5 MPa), að þar náðist aðeins að prófa einásabrotstyrk í sterkasta hluta setbergslagsins (< 1m þykkt sandsteinslag efst í flokki R2) en það setberg liggur ofaná yfir 8m þykku leirsteins-setbergi. Þar náðist að mæla kleyfnitogstyrk á 391 m dýpi og benda niðurstöður til að einásabrotstyrkur setlagins þar sé milli 5 og 10 MPa sem tilheyrir neðsta hluta flokks R2 eða er ofantil í flokki R1.



Mynd 3.6. Yfirlit yfir dreifingu einásabrotstyrks og kleyfnitogstyrks setbergslaga.

Á ljósmyndum af borkjarna sést að verulegur hluti setbergslaganna er svo mikið molnaður að erfitt (eða ómögulegt) er að koma við prófunum á brotstyrk slíks bergs og ætla má að styrkleiki flestra þeirra setbergslaga sé lægri (en það sem prófað var) og tilheyri flokki R1. Enn ber að hafa í huga að á nokkrum stöðum hafa setbergslögin molnað og eyðst við boranirnar og þarf að skoða niðurstöður brotpolsprófana í því ljósi að sum setbergslög sem ekki tókst að mæla geti jafnvel tilheyrt flokki R0.

### 3.1.3 Mælingar á punktálagsstyrk bergs í borkjarna

Eftirfarandi töflur (3.1 til 3.4) sýna hvar sýnishorn af borkjarna voru prófuð (holur og dýpi í holunum). Rakinn er fjöldi brota á hverjum stað, aflestur af Point Load tæki,  $p$  (kN). Einnig eru reiknuð upp brotpölgildi PLI fyrir 50mm borkjarna. Loks er sýndur uppreiknaður sýndarbrotsstyrkur út frá jöfnunni  $11 \times PLI^{1,2}$ , en samkvæmt samanburðarrannsóknnum virðist það henta sæmilega fyrir íslenskt berg. Dálkurinn aftast í töflunum er hér nefndur “sýndarstyrkur MPa Iceland”

Tafla 3.1. Sýndarbrotsstyrkur borkjarna í holum VK-01 og VK-02 (Point Load Tests) og uppreiknaður sýndarstyrkur (UCS).

Borehole	depth (m) from	depth (m) to	Point Load Tests Rocktype	Nº of tests	Pointl. readout $p$ (kN)	PLI Is (50) (Mpa)	Sýndarstyrkur MPa Iceland
VK-01	6,9	7,45	Olivine basalt	11	11,5	5,4	86
VK-01	12,35	12,95	Scoria	8	4,9	2,3	32
VK-01	27,68	28,2	Olivine basalt	8	20,0	9,5	171
VK-02	18,18	18,55	Scoria	8	4,1	1,9	23
VK-02	20,3	21	Porphyritic basalt	11	14,1	6,7	120
VK-02	34,5	35,2	Scoria	9	3,9	1,8	22
VK-02	43,5	44,1	Porph. olivine basalt	10	9,9	4,7	75
VK-02	50,6	51,1	Porph. olivine basalt	8	14,6	6,9	124
VK-02	64,6	65,2	Scoria	6	4,0	1,9	23
VK-02	68,5	69	Porph. olivine basalt	10	5,8	2,7	38
VK-02	79,3	79,95	Porph. olivine basalt	11	6,5	3,1	43
VK-02	84,6	85,1	Porph. olivine basalt	6	22,1	10,5	188
VK-02	87,05	87,6	Scoria	7	3,9	1,8	22
VK-02	92,15	92,75	Scoriaceous basalt	7	6,0	2,8	40
VK-02	99,87	100,3	Porph. olivine basalt	7	13,4	6,3	114
VK-02	104,05	104,68	Porph. olivine basalt	11	15,1	7,2	129
VK-02	113,4	113,9	Olivine basalt vesic	8	4,9	2,3	32
VK-02	118,25	118,75	Olivine basalt vesic	9	5,2	2,5	35
VK-02	131,58	131,95	Olivine basalt tectonized	7	9,9	4,7	75
VK-02	143,18	143,63	Scoriaceous basalt	8	5,3	2,5	35
VK-02	146,33	146,75	Scoriaceous basalt	7	3,7	1,8	21
VK-02	148,34	148,78	Scoriaceous basalt	7	5,4	2,6	36
VK-02	152,95	153,4	Porph. olivine basalt	5	17,2	8,1	130
VK-02	162,6	162,98	Porph. olivine basalt	2	5,5	2,6	36
VK-02	164,92	165,33	Porph. olivine basalt	6	5,0	2,4	34
VK-02	172,44	172,8	Porph. olivine basalt ves	6	3,0	1,4	17
VK-02	179,15	179,65	Porph. olivine basalt	5	17,1	8,1	146
VK-02	188,72	189,1	Scoriaceous basalt	7	4,0	1,9	23
VK-02	194,32	194,76	Tholeiite, fault breccia	8	4,3	2,0	25
VK-02	200,27	200,63	Tholeiite, fault breccia	4	7,2	3,4	48

Tafla 3.2. Sýndarbrotstyrkur borkjarna í holu VK-03 (Point Load Tests) og uppreiknaður sýndarstyrkur (UCS).

Borehole	depth (m) from	depth (m) to	Point Load Tests Rocktype	N° of tests	Pointl. readout p (kN)	PLI Is (50) (Mpa)	Sýndarstyrkur MPa Iceland
VK-03	26,45	26,9	Porphyritic basalt	8	10,5	5,0	80
VK-03	48,6	49,03	Scoria	8	5,1	2,4	34
VK-03	57,6	58,05	Olivine basalt	6	14,1	6,7	120
VK-03	66,45	66,75	Olivine basalt	5	18,0	8,5	153
VK-03	75,76	76,2	Scoria	7	6,7	3,2	45
VK-03	83,9	84,25	Olivine basalt	9	13,6	6,4	115
VK-03	89,58	90	Scoria	5	6,3	3,0	42
VK-03	93,14	93,48	Olivine basalt	4	13,9	6,6	119
VK-03	96,15	96,6	Scoria	8	3,0	1,4	17
VK-03	102,94	103,23	Olivine basalt	6	12,8	6,1	110
VK-03	224,2	224,8	Porphyritic basalt	12	19,7	9,3	168
VK-03	235	235,4	Porphyritic basalt	11	13,6	6,4	116
VK-03	240,4	240,8	Scoria	12	2,8	1,3	16
VK-03	252,1	252,6	Porphyritic basalt	8	15,8	7,5	135
VK-03	257,8	258,2	Porphyritic basalt	6	22,7	10,7	193
VK-03	274,9	275,4	Olivine basalt	6	11,1	5,2	83
VK-03	277,2	277,7	Olivine basalt vesivular	9	4,9	2,3	32
VK-03	284,4	289	Olivine basalt vesicular	12	4,8	2,3	32
VK-03	291	291,5	Olivine basalt vesicular	11	4,6	2,2	31
VK-03	302,5	302,1	Olivine basalt scoriac.	11	6,4	3,0	42
VK-03	306,8	307,4	Olivine basalt	11	15,2	7,2	130
VK-03	317,1	317,8	Olivine basalt	9	17,8	8,4	151
VK-03	324,7	325,2	Porphyritic basalt	12	6,7	3,2	45
VK-03	331	331,5	Olivine basalt	10	14,2	6,7	121
VK-03	335,3	335,9	Scoriaceous basalt	12	6,7	3,2	44
VK-03	367,3	344,77	Tholeiite tectonized	12	4,8	2,3	32
VK-03	371	371,5	Tholeiite	9	19,3	9,1	164
VK-03	382,2	382,6	Tholeiite vesicular	11	3,8	1,8	21
VK-03	386	386,3	Tholeiite	6	14,2	6,7	121
VK-03	390	390,6	Tholeiite scoriaceous	11	4,5	2,1	29
VK-03	405,3	405,9	Tholeiite	8	20,9	9,9	178
VK-03	417,5	418,1	Tholeiite	10	18,7	8,8	158
Borehole	depth (m) from	depth (m) to	Point Load Tests Rocktype	N° of tests	Pointl. readout p (kN)	PLI Is (50) (Mpa)	Sýndarstyrkur MPa Iceland
VK-04	10,2	10,7	Scoriac. tholeiitic basalt	10	5,8	2,8	39
VK-04	32,3	32,8	Tholeiite	7	12,0	5,7	91
VK-04	40,3	40,8	Scoriac. Thol. basalt	9	7,1	3,4	48
VK-04	45,9	46,4	Scoriac. Thol. basalt	10	8,0	3,8	53
VK-04	52,6	53	Scoriac. Thol. basalt	7	6,2	2,9	41
VK-04	56,6	57	Tholeiite	4	12,3	5,8	93
VK-04	70	70,4	Dyke	6	13,0	6,2	112
VK-04	85,9	86,4	Scoriac. Thol. basalt	9	5,0	2,4	34
VK-04	125,8	126,1	Dyke	3	16,7	7,9	142
VK-04	123,1	123,5	Dyke	8	12,8	6,0	108
VK-04	127,2	127,7	Dyke	2	12,0	5,7	91
VK-04	175,3	175,8	Tholeiite	8	12,5	5,9	95
VK-04	190,3	190,7	Tholeiite	8	16,0	7,6	137
VK-04	196,5	197	Dyke	7	16,3	7,7	139

Tafla 3.3. Sýndarbrotstyrkur borkjarna í holu VK-06 (Point Load Tests) og uppreiknaður sýndarstyrkur (UCS).

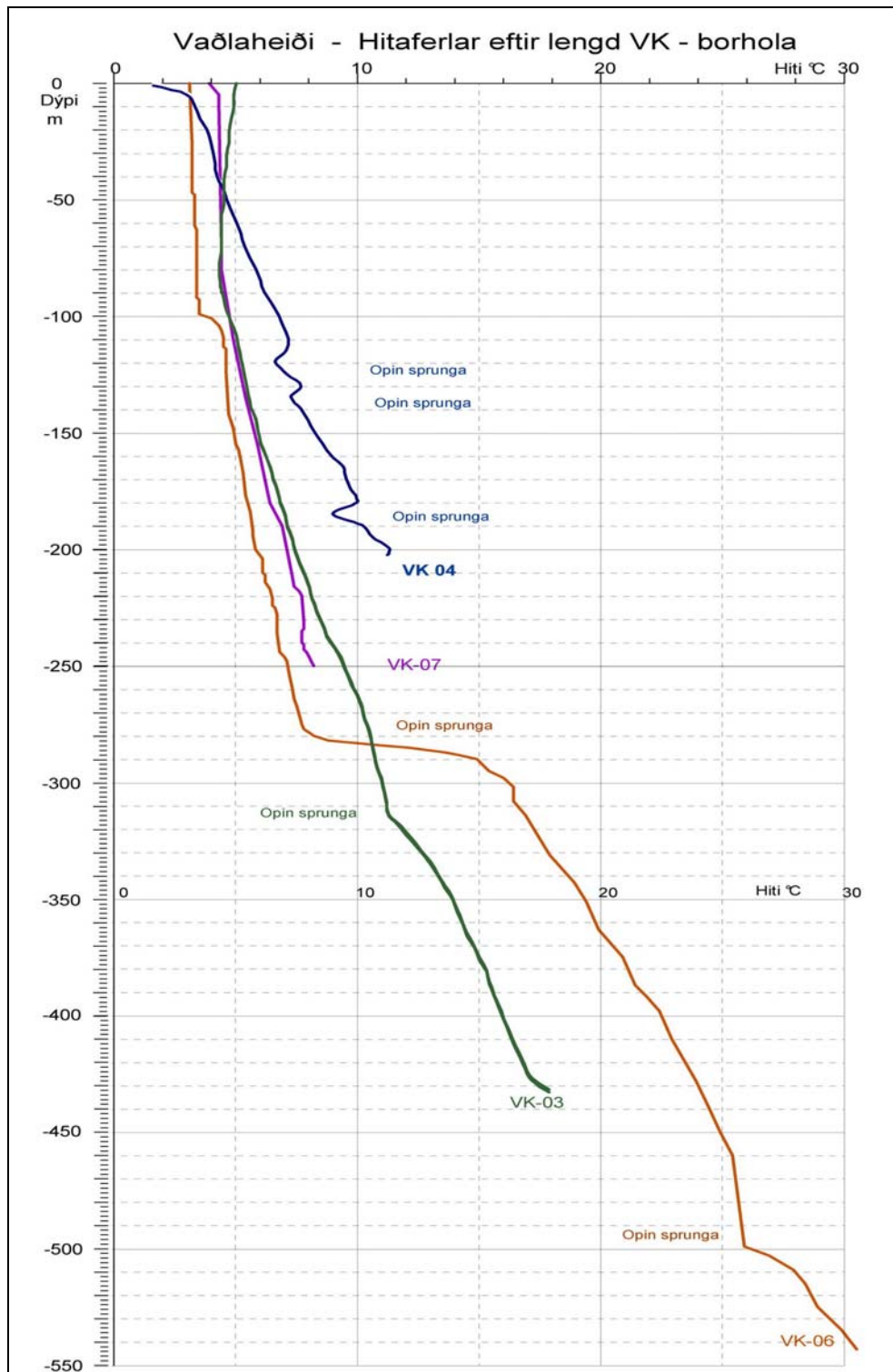
Borehole	depth (m) from	depth (m) to	Point Load Tests Rocktype	N° of tests	Pointl. readout (kN)	PLI Is (50) (Mpa)	Sýndarstyrkur MPa Iceland
VK-06	152,2	152,6	Scoriaceous basalt	11	2,5	1,2	14
VK-06	159,7	160,2	Olivine basalt	10	22,6	10,7	193
VK-06	173,5	174,1	Olivine basalt	12	28,1	13,3	240
VK-06	182,5	182,9	Tholeiite basalt	6	21,5	10,2	184
VK-06	202,6	203	Tholeiite basalt	9	25,2	11,9	214
VK-06	213,7	214,1	Scoriaceous basalt	11	2,8	1,3	16
VK-06	222,2	222,7	Porphyritic basalt	11	25,3	12,0	216
VK-06	236,4	233,9	Scoriaceous basalt	11	5,1	2,4	34
VK-06	243,3	243,7	Tholeiite basalt	7	19,4	9,2	166
VK-06	262	262,5	Sediment	10	5,6	2,6	36
VK-06	270,7	271	Sediment	8	5,3	2,5	35
VK-06	290	290,4	Porphyritic basalt	11	21,4	10,1	182
VK-06	294,8	295,2	Scoriaceous basalt	11	7,7	3,6	50
VK-06	305	305,7	Scoriaceous basalt	11	4,7	2,2	31
VK-06	312,1	312,6	Scoriaceous basalt	10	5,0	2,4	34
VK-06	328,9	329,3	Olivine basalt	9	12,4	5,9	94
VK-06	337,8	338,2	Sediment	9	7	1,6	19
VK-06	369,2	369,7	Scoriaceous basalt	10	3,6	1,7	20
VK-06	385	385,5	Tholeiite basalt	11	27,8	13,2	238
VK-06	403,2	403,8	Tholeiite basalt	11	18,5	8,7	157
VK-06	408,7	409,1	Scoriaceous basalt	11	2,2	1,0	12
VK-06	427,9	428,4	Tholeiite basalt	9	20,6	9,7	175
VK-06	435,7	436,1	Scoriaceous basalt	10	3,2	1,5	18
VK-06	438,3	438,7	Olivine basalt	7	16,7	7,9	142
VK-06	446,1	461,6	Scoriaceous basalt	10	1,6	0,7	8
VK-06	461,4	461,6	Tholeiite basalt	8	23,3	11,0	198
VK-06	465	465,4	Scoriaceous basalt	9	3,7	1,7	20
VK-06	473,3	473,6	Tholeiite basalt	6	12,0	5,7	91
VK-06	478,4	479	Scoriaceous basalt	7	6,4	3,0	42
VK-06	495,2	495,6	Dyke	9	19,2	9,1	164
VK-06	503,4	503,8	Scoriaceous basalt	7	3,2	1,5	18
VK-06	509	509,4	Tholeiite basalt	6	23,5	11,1	200
VK-06	518	518,4	Tholeiite basalt	9	22,4	10,6	191
VK-06	531,4	531,7	Scoriaceous basalt	8	2,4	1,1	13
VK-06	538,2	538,7	Scoriaceous basalt	11	4,0	1,9	23
VK-06	547,6	548,1	Tholeiite basalt	9	25,3	12,0	216

Tafla 3.4. Sýndarbrotstyrkur borkjarna í holu VK-07 (Point Load Tests) og uppreiknaður sýndarstyrkur (UCS).

	depth (m) from	depth (m) to	Point Load Tests Rocktype	N° of tests	Pointl. readout (kN)	PLI Is (50) (Mpa)	Sýndarstyrkur MPa Iceland
<b>VK-07</b>	136,4	137,1	Scoriaceous basalt	10	3,0	1,4	<b>17</b>
<b>VK-07</b>	141	141,5	Tholeiite basalt	5	18,8	8,9	<b>160</b>
<b>VK-07</b>	145	145,5	Scoriaceous basalt	9	5,2	2,5	<b>34</b>
<b>VK-07</b>	153,4	153,8	Tholeiite basalt	8	17,4	8,2	<b>148</b>
<b>VK-07</b>	161,4	161,8	Olivine basalt vesicular	9	2,7	1,3	<b>15</b>
<b>VK-07</b>	166,3	166,8	Dyke	12	3,4	1,6	<b>19</b>
<b>VK-07</b>	170,7	171,2	Tholeiite basalt	9	22,8	10,8	<b>194</b>
<b>VK-07</b>	182,5	183	Scoriaceous basalt	10	3,6	1,7	<b>21</b>
<b>VK-07</b>	185	185,4	Tholeiite basalt	9	19,2	9,1	<b>164</b>
<b>VK-07</b>	196,7	197,1	Scoriaceous basalt	10	11,6	5,5	<b>88</b>
<b>VK-07</b>	199,2	199,8	Scoriaceous basalt	11	4,0	1,9	<b>23</b>
<b>VK-07</b>	208,2	208,6	Porphyritic basalt	9	18,4	8,7	<b>157</b>
<b>VK-07</b>	212,2	212,8	Scoriaceous basalt	7	3,8	1,8	<b>21</b>
<b>VK-07</b>	217,6	218,1	Tholeiite basalt	11	20,9	9,9	<b>178</b>
<b>VK-07</b>	225,6	226	Scoriaceous basalt	9	3,7	1,8	<b>21</b>
<b>VK-07</b>	228,2	228,6	Scoriaceous basalt	9	1,9	0,9	<b>11</b>
<b>VK-07</b>	236	236,4	Tholeiite basalt	8	13,9	6,6	<b>118</b>
<b>VK-07</b>	248	248,7	Tholeiite basalt	10	25,8	12,2	<b>220</b>

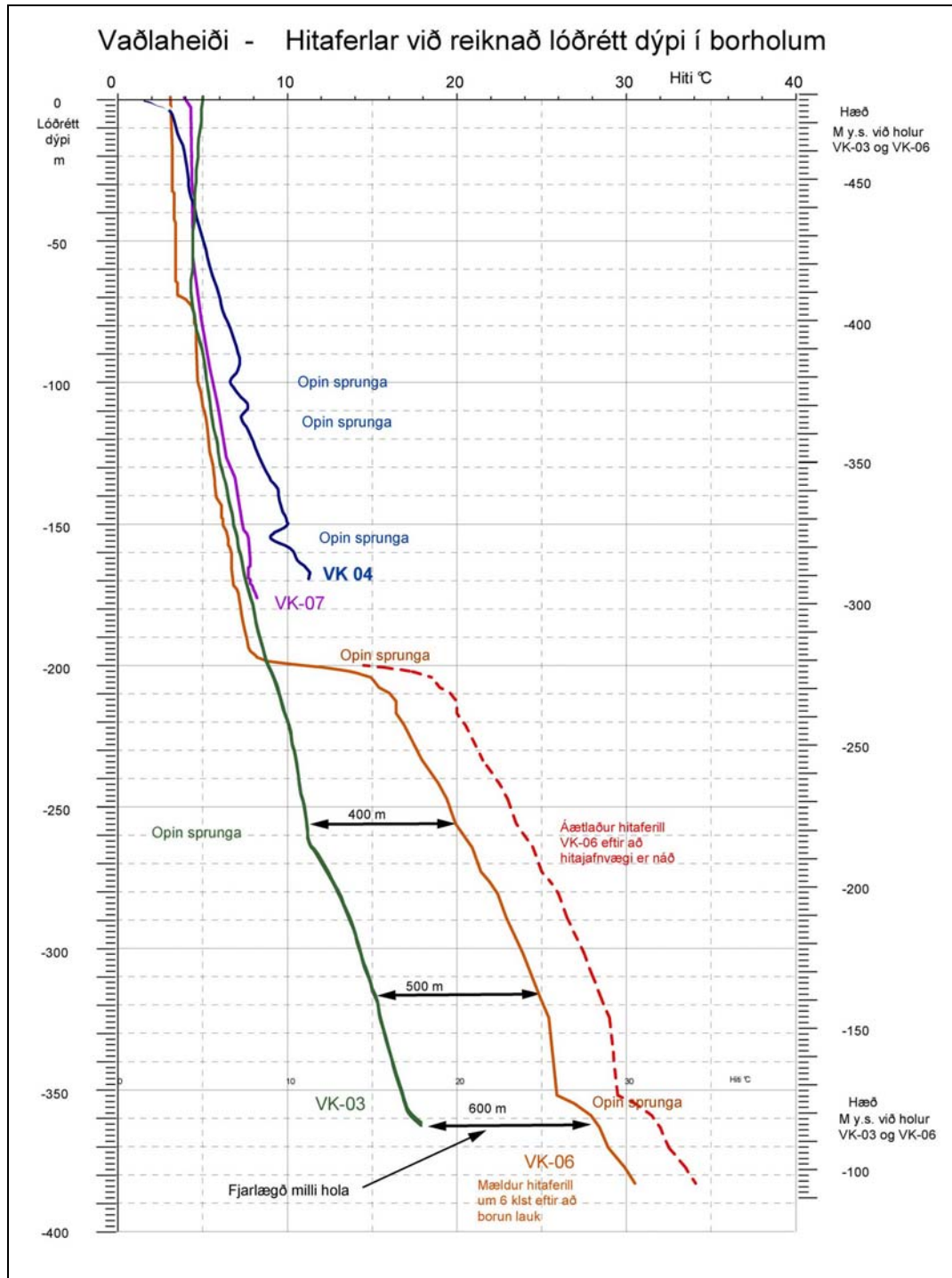
### 3.2 Hitamælingar og hitastig í borholum

Fjórar dýpstu borholurnar við gangaleiðina hafa verið hitamældar og eru hitaferlar holanna sýndir á myndum 3.7 og 3.8. Borholur VK-04 og VK-07 við Hallland sýna að hitastig bergs í göngunum verður líklega 7-10 °C á vestustu 1,5-2km gangaleiðarinnar. Hóla VK-04 stefnir með 58° halla inn í hlíðina meðan hóla VK-07 stefnir með 45° halla til strandar. Hitaaukningu holu VK-04 umfram hitaaukningu holu VK-07 má að miklu leyti skýra með auknu lóðréttu dýpi undir yfirborði (í holu VK-04) en þarna virðist auk þess vera vottur að láréttri hitaaukningu inn í fjallið.



Mynd 3.7. Hitaferlar fjögurra borhola í Vaðlaheiði.

Í austanverðri Vaðlaheiði eru holur VK-03 og VK-06 og eru holutopparnir með um 40m millibili í um 480m hæð y.s. Hóla VK-03 stefnir með 57°halla til SA en hóla VK-06 stefnir með 45°halla til vesturs. Fjallað er um hitaferla borholanna og velt upp túlkun á hitastigi í fjallinu í kafla 4.6.1.



Mynd 3.8. Hitaferlar fjögurra borhola í Vaðlaheiði umreiknaðir í lóðrétt dýpi, (reiknað frá toppi borholunnar). Athuga skal að brotalínan lengst til hægri er áætlaður hitaferill eftir að holan hefði náð fullkomnu hitajafnvægi við bergið. Slík hitnun tekur a.m.k. nokkra daga frá því að borun og dælingu skolvatns í holuna lýkur, (miðað við upphitun bergsins við borun eftir jarðhita á Draflastöðum í Fnjóskadal sama haust).



### 3.3 Segulmælingar til sprunguleitar

Ráðist var í segulstyrksmælingar (og tilraun til VLF mælinga) til að sjá hvort brotavirkni kæmi fram við þær mælingar og þá hvort skilgreina mætti einhver tiltekin “aðgæslusvæði” við gangagerðina. Mælt var á um 350-500m breiðu beltí ósamfellt yfir gangaleiðinni og sleppt úr brattasta hlutanum að vestanverðu. Áformað hafði verið að mæla breiðara beltí og einnig að mæla lengra niður í vesturhlíðar Vaðlaheiðar en byrjunarörðugleikar og bilanir í tækjabúnaði drógu verulega úr áformuðu umfangi. Við verkið voru notaðir segulstyrksmælar (með sambyggðu VLF mælitæki) sem framleiddir eru af GEM-System í Kanada (sjá upplýsingar um mælitæki á vef; [www.gemsys.ca](http://www.gemsys.ca)).

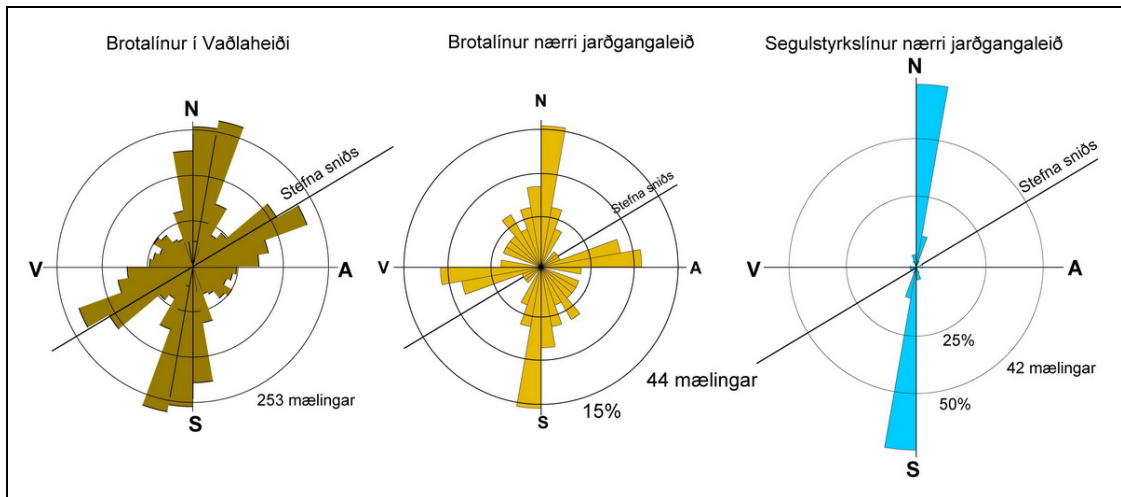
#### 3.3.1 Stefnur á sprungum og berggöngum byggðar á segulmælingum

Niðurstöður segulmælinganna eru sýndar á segulstyrkskortum á teikningum í skýrslu Jarðfræðistofunnar frá 2007. Á langsniði á teikningu 6 eru sýndar lóðréttar línur (túlkaðar sem einhverskonar berggangar eða brot) og þar er einnig tíðnirós fyrir stefnur segulmisfella (42 mælingar). Á langsniði á teikningu 6 eru fjórtán númeraðir staðir og svæði, þar sem lýst er einfaldaðri túlkun á niðurstöðum segulmælinga.

Á mynd 3.9 er raðað saman þremur myndum af stefnutíðni brotalína og segulmisfella í Vaðlaheiði. Fyrst er þar tíðnirós yfir allar sýnilegar línulegar misfellur á allstóru svæði í Vaðlaheiði frá strönd Eyjafjarðar að Fnjóská og alllangt norður og suður yfir gangaleiðina. Stefnurósin byggir á samanlagðri lengd allra línulegra misfella innan tiltekins 10° víðs geira (36 stefnuhópar). (Ef tíðnirósin byggir á samanlagðri lengd lína fá skýrar langar línur meira vægi). Tveir áberandi tíðnitoppar koma fram og stefna N-S og ANA-VSV.

Næst er tekin saman hliðstæð stefnutíðni 44 línulegra misfella (brotalína) sem (á loftmyndum) sjást skera áformaða jarðgangaleið. Einnig tekur tíðnirósin með nærliggjandi brotalínur sem stefna að gangaleiðinni og sjást næst gangaleiðinni í minna en 200m fjarlægð. Flestar stefnurnar liggja sem næst N-S en nokkrar stefna ANA-VSV. Að auki eru fáeinar með stefnu NV-SV.

Loks er stefnutíðni 42 túlkaðra línulegra segulmisfella. Taka má fram að það getur verið einstaklingsbundið hvaða skilning menn lesa úr segulgögnum og túlkun gagnanna því mögulega umdeilanlega. Til dæmis má deila um hvort 3-4 segulmisfellur hefðu átt að vera með því þær misfellur geta allt eins verið raktar til mælinga yfir giljum þar sem bergið er við yfirborð jarðar og er því nær segulskynjaraanum en annarsstaðar þar sem að mestu er mælt í gegnum 2-4 m þykkann jökulruðning.



Mynd 3.9. Vegin stefnutíðni 253 “brotalína” í Vaðlaheiði, stefnutíðni 44 “brotalína” sem eru nærri jarðgangaleið og stefnutíðni 42 segulstyrksmisfella yfir jarðgangaleið. Rósin til vinstri er byggð á samanlagðri lengd brotalína innan tiltekins stefnugeira.

Við samanburð á stefnutíðninni sést fyrst að allar hafa tíðnirósirnar sterkar N-S stefnutíðni. Þá er eftirtektarvert að brotalínurósirnar fyrir stórt svæði í Vaðlaheiði sýnir NNA-SSV stefnur en þær stefnur koma ekki eins fram á brotalínugögnunum næst gangaleiðinni þar sem stefnurnar safnast nær austri. Segulmisfellurnar hafa langflestar N-S stefnur en hvorki sjást þar NA-SV (eða austlægari) stefnur né NV-SA sem sjást í brotalínurósunum.

## 4 Túlkun á aðstæðum til jarðgangagerðar undir Vaðlaheiði

Þrátt fyrir að umtalsverðar jarðfræðirannsóknir hafi verið gerðar vegna Vaðlaheiðarganga er ekki auðvelt að lesa úr gögnunum og engir tveir aðilar myndu túlka gögnin nákvæmlega á sama hátt. Það sem hér er ritað er aðeins túlkun höfundar þessarar skýrslu á rannsóknargögnum og viðbótargögn geta hæglega breytt þeirri sýn.

Umtalsverðar upplýsingar um bergið má lesa úr landinu vestur frá vesturbrún Vaðlaheiðar (liðlega fjórðung gangaleiðarinnar) en stopult og takmarkað verður lesið í bergið á miðri og austanverðri heiðinni. Allgóð samsvörun er milli bergs í borholum í vestanverðri heiðinni en að austanverðu er erfitt að finna samsvörun milli berglaga í borholunum og bergið greinilega mikið misgengið.

Jarðlögnum hallar til suðurs (og lítið eitt austan við suður) um 5-9° á Svalbarðsströnd og neðantil í vesturhlíðum Vaðlaheiðar. Hærra í heiðinni minnkar hallinn jafnframt því sem hallastefnan beinist meira til SSA (hallastefnan er ekki nákvæm). Austar í heiðinni snýst hallinn til SA og ASA þegar kemur neðarlega í hlíðar Fnjóskadals þar sem farið er inn í brotabelti með auknum austlægum halla. Það brotabelti gengur langsum eftir austanverðri Vaðlaheiði og botni Fnjóskadals. Mælingar á halla og hallastefnu jarðlaga eru sýndar á teikningu 1 (en hafa verður í huga að hallinn vex með auknu dýpi). Sýnt er með bogafærlum hvernig strikstefna jarðlaganna (stefna þvert á mesta halla þeirra) breytist milli Eyjafjarðar og Fnjóskadals. Þessi breytilega hallastefna veldur breytilegum halla berglaga á gangaleiðinni.

Þótt jarðlög á langsniði jarðlaga eftir gangaleiðinni (sjá teikn 4) séu teiknuð eins og hallastefnan snúist jafnt og þétt frá suðri til austurs þegar farið er austur í gegnum gangaleiðina, er líklegra að hallabreytingarnar verði um fáein þrep sem tengjast brotabeltum. Langsniðið fylgir beinni línu ANA-VSV (um 60°) en bogar eru á jarðgangaleiðinni og víkja þeir frá sniðstefnunni. Þótt talsverðar upplýsingar megi lesa um bergið á vestasta hluta gangaleiðarinnar er langt á milli borhola (um 3,5 km) gegnum miðja heiðina og verður að skoða umfjöllun um áætlaða jarðlagaskipan þar með fyrirvara um aukna ónákvæmni.

### 4.1 Vesturhluti jarðgangaleiðar

Hér er vesturhluti Vaðlaheiðar skilgreindur sem vesturhluti ganganna austur að vesturbrún Vaðlaheiðar (nálægt stöð 2800 í gangalengd) vegna þess að á þessum kafla sést talsvert í berg á yfirborði. Í vesturhlíðum Vaðlaheiðar (upp að 400m hæð y.s. nærri jarðgangaleiðinni) tilheyrir bergið Svalbarðsstrandarsyrpu, sem er þóleítbasalt með tiltölulega þunnum millilögum. Á Svalbarðsströnd hallar jarðlögnum sem næst 6-7° til suðurs næst munnanum og er líklegt að svipaður halli og hallastefna haldist a.m.k næstu 1-2km inn í göngin. Þar sem gangamunninn stefnir fyrst í NNA og gangaleiðin sveigir síðan til ANA verður berglagahallinn líklega um 7-9% á móti gangagreftrinum en færast yfir í álíka mikinn hliðarhalla á gangastefnuna er innar kemur.

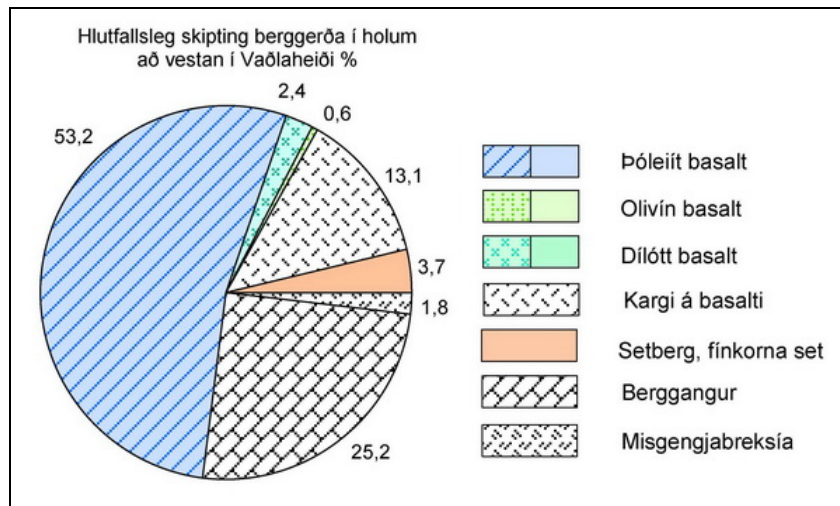
Auk þess sem sést í berggrunn á klöppum og í lækjum á innanverðri Svalbarðsströnd, eru ýtarlegastar upplýsingar um bergið að finna í borkjörnum hola VK-04, VK-05 og VK-07. Eins og tengingar berglaga eru túlkaðar (sjá langsnið á teikningu 4) er neðsti hluti borhola VK-03 og VK-06 (sem eru austan við miðju

Vaðlaheiðar) einnig í Svalbarðsstrandarsyrpu, þannig að bergsyrpan er talin taka yfir liðlega tvo þriðju hluta gangaleiðarinnar.

Stuttu innan við vesturmunna ganganna sker kjarnahola VK-05 bergið. Hún er 42m löng, boruð með 60° halla (frá láréttu) til vesturs. Holan sker að miklu leyti bergganga og gefur því takmarkaðar upplýsingar um berglagastaflann. Ekki var prófuð lekt bergs í holunni en við borun virtist bergið vera tiltölulega þétt og það er mikið holufyllt miðað við þóleiít basalt.

Liðlega hálfum km austan við áformaðan gangamunna er borhola VK-07. Hún er 250m djúp og boruð með 45° halla til vesturs. Tæplega 240m austar er kjarnaborhola VK-04 liðlega 200m djúp og með 57° halla (frá láréttu) til austurs. Á teikningum 9 og 10 er sýnt einfaldað yfirlitssnið gegnum borholur VK-04 og VK-07 með áherslu á mismunandi þætti. Á sniðinu á teikningu 10 er fjöldi kurlsvæða og smábrotinna svæða sem sjást í borkjarnanum, túlkuð (og sýnd) sem lóðrétt brot í berginu á leið borholanna. Í borkjörnunum eru einnig svæði með mjög kurlað (en oftast vel samlímt) berg túlkuð sem misgengi. Slík samlímd kurlsvæði (og smásprungin svæði) fylgja stundum berggöngum.

Skipting bergsins í borholunum þremur að vestanverðu í Vaðlaheiði er sýnd á mynd 4.1. Kristallað basalt (að mestu þóleiít) er yfir 55% og kargaberg rúm 13%. Bergganga eru liðlega fjórðungur bergsins í borholunum og niðurstöður segulstyrksmælinga eru túlkaðar á þann veg að bergganga séu í svipuðu hlutfalli allt frá gangamunna og a.m.k svo langt sem mælt var til austurs upp í brattar brekkurnar (austur að stöð 2000 í gangalengd). Hér er um að ræða gangarein, hliðstæða þeim er finnast í grennd við flestar megineldstöðvar á Austurlandi. Mögulegt er að austurjaðar gangareinarinnar sé einhversstaðar undir vesturbrún Vaðlaheiðar, milli þeirra svæða sem segulmæld voru.



Mynd 4.1. *Hlutfallsleg skipting berggerða í Svalbarðsstrandarsyrpu að vestanverðu í Vaðlaheiði.*

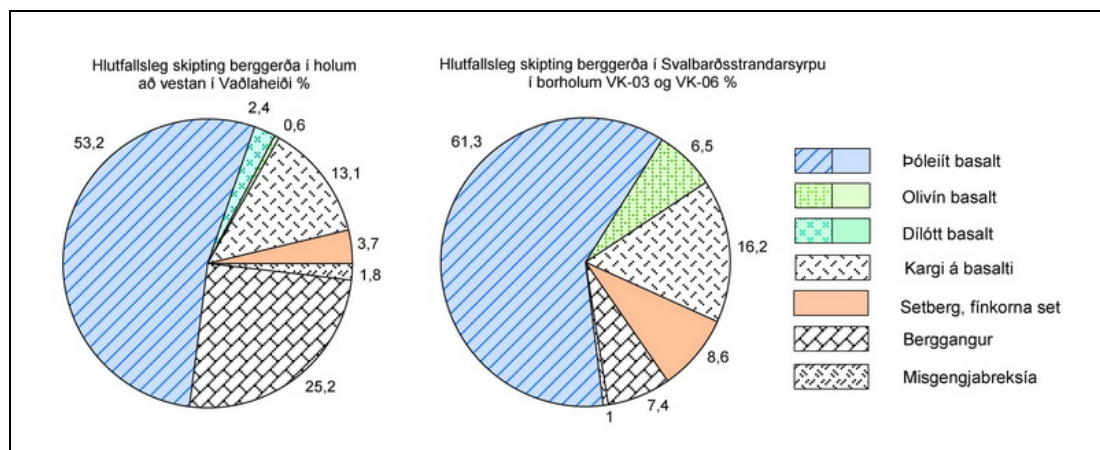
Í framangreindum borholunum er hlutfall setbergs aðeins tæplega 4%, þykkasta lagið mælist um 4m og lóðrétt meðalþykkt 18 mældra laga er um 0,8m. Meðalþykkt basaltlaganna er liðlega 9m og meðalþykkt kargabergslaga er 2,8m. Brotstyrkur setbergsins er lágur, flest lög tilheyra líklega flokki R2 (samkvæmt ISRM flokkuninni á mynd 3.2).

Holufyllingar sem tilheyra skólesít-mesólítbeltinu eru algengar í þóleiítbasalti (og berggöngum) Svalbarðsstrandarsyrpunnar og valda fyllingarnar talsverðri samlímingu og þéttingu í berginu. Tvær brota- eða misgengjasprungur sem leiða mikið vatn liggja gegnum neðsta hluta borholu VK-07. Þrjú misgengisbrot með mjög mikla vatnsleiðni skera holu VK-04. Framangreindar borholur spanna samtals liðlega 300m lárétta lengd í stefnu jarðganganna (sjá teikningar 9 og 10) með hliðsjón af fjölda lekastaða í borholunum má áætla að vatnsleiðandi brot séu e.t.v. 5-15 á hvern km eftir vesturhluta gangaleiðarinnar. Því má búast við að göngin leiði til talsverðs niðurdráttar í berginu og dragi til sín vatn sem annars kæmi fram í lindum í vestanverðri Vaðlaheiði. Áhrifasvæði niðurdráttar í berginu mun líklega teygja sig mörg hundruð metra (jafnvel einhverja km) til hliðanna út frá gangaleiðinni.

## 4.2 Miðhluti jarðgangaleiðar

Miðhluti gangaleiðar er skilgreindur sem um þriggja km langur kafli frá vesturbrúnum Vaðlaheiðar austur að borholu VK-06 sem er á austanverðri heiðinni. Engin borhola er á þessum kafla og mjög takmarkað sést í berggrunn nema í heiðarbrúninni að vestanverðu og svo slitrótt í grunnum giljum uppi á heiðinni. Óvissa um tengsl berglaga (og mögulega brotavirkni) er meiri en vestar og því er fjallað um þennan hluta jarðgangaleiðarinnar sérstaklega.

Í skýrslu Jarðfræðistofunnar frá árinu 2007 var talið erfitt að tengja berglög frá vesturhlíð Vaðlaheiðar inn á berg í borholu VK-03. Í borholu VK-06 eru þykk setbergslög úr sandsteini sem talin eru tilheyra Vatnsbólasetlögum og í neðsta hluta holunnar eru mörg lög úr þóleiítbasalti sem talin eru geta tilheyrt Svalbarðsstrandarsyrpu. Að öðru leyti eru tengingar gegnum fjallið ekki skýrar. Samkvæmt þessum hugmyndum um tengingar berglaga er talið að miðhluti jarðgangaleiðarinnar sé innan Svalbarðsstrandarsyrpu og hafi bergtæknilegar aðstæður sem væru einhver blanda af því sem kemur fram í Svalbarðsstrandarsyrpu vestan Vaðlaheiðar og í bergi neðst í holum VK-06 og VK-03 sem talið er tilheyra Svalbarðsstrandarsyrpu. Yfirlit yfir skiptingu bergsins í berggerðir er sýnt á mynd 4.2.



Mynd 4.2. Hlutfallsleg skipting berggerða innan Svalbarðsstrandarsyrpu eins og sýrpan er skilgreind í Vaðlaheiði.

Það sem fyrst vekur athygli þegar horft er á skiptingu bergs í Svalbarðsstrandarsyrpu er að hlutfall bergganga lækkar til austurs (en hlutfall kristallaðra basaltlaga og setbergs vex). Fækkun bergganga milli svæða bendir e.t.v. til að austurjaðar gangareinarinnar á Svalbarðsströnd sé einhversstaðar nærri

vesturbrúnum Vaðlaheiðar. Meðalþykkt basaltlaganna fer hækkandi til austurs úr liðlega 9m meðalþykkt í yfir 11m meðalþykkt. Meðalþykkt kargabergslaga er hliðstæð beggja vegna eða um 3m.

Hlutfall setbergslaga í Svalbarðsstrandarsyrpu fer verulega hækkandi til austurs (og herra í syrpu), er tæp 4% bergsins vestan heiðar en er 8,6% bergsins í holum VK-06 og VK-03. Meðalþykkt setbergslaganna fer líka hækkandi til austurs, er 0,8m í holunum á Svalbarðsströnd en meðalþykkt 13 mældra setbergslaga í Svalbarðsstrandarsyrpu í holum VK-06 og VK-03 er 1,3m. Brotstyrkur setbergisins er lágur, hliðstæður því sem er að vestanverðu.

Bergið á gangaleið hefur líklega hliðstæða eiginleika og fram koma í holunum á Svalbarðsströnd og einnig hliðstæða þeim sem mælast neðst í holum VK-06 og VK-03, þ.d. smásprungið þóleítbasalt með þunnum millilögum úr setbergi.

Einhversstaðar á miðhluta gangaleiðarinnar má gera ráð fyrir að mjög mikil brotabelti með N-S stefnu skeri gangaleiðina og að austlægur jarðlagahalli aukist mjög austan við brotabeltin. Miklar sveiflur í segulstyrk í grennd við stöð 3500 og óreglu í segulstyrk nærri stöð 5000 mætti e.t.v. túlka sem vísbendingar um brotabelti í berginu með N-S stefnu. Berglög eru með suðlægan halla vestan við meint brotabelti en hallinn snýst líklega til suðausturs austan við brotabeltið og lagamót fara að ganga (með suðaustlægan hliðarhalla) til austurs niður í gangaleiðina. Mynd 4.3. sýnir stór misgengi og snaraðar bergspildur í norðanveru Dalsmynni um 20km norðan við gangaleiðina. Slík misgengi geta verið á leið Vaðlaheiðarganga.



*Mynd 4.3. Horft til norðurs yfir brotabelti og hallabreytingu berglaga í Austurfjalli í Dalsmynni, um 20km norðan við gangaleið undir Vaðlaheiði. Hallabreytingar inni í Vaðlaheiði gætu verið hliðstæðar því sem þarna sést.*

### 4.3 Austurhluti jarðgangaleiðar

Austurhluti gangaleiðarinnar er hér skilgreindur frá vesturmörkum holu VK-06 (nærri stöð 5000) og austur að gangamunna og spannar yfir liðlega 2,5 km leiðarinnar. Fjórar kjarnaborholur eru á þessum hluta leiðarinnar, þrjár djúpar hallandi holur og ein grunn lóðrétt hola nærri munna hjá Skógum. Hér verður austurhluta gangaleiðar skipt upp í tvo mjög mislanga hluta, fyrst kaflann undir borholum VK-06 og VK-03 og síðan langan kafla frá VK-03 austur að gangamunna.

Borholur VK-06 og VK-03 eru um 3,5km austan við holu VK-04. Langsnið eftir holunum (þar sem dregin eru fram mismunandi atriði) eru á teikningum 11 til 13 og langsnið með mögulegum tengslum berglaga gegnum Vaðlaheiði er á teikningu 4. Stefna holu VK-03 (frá 2005) er tiltölulega þvert til SA út frá gangaleiðinni og halli hennar 58° (33° frá lóðréttu). Markmið með boruninni var að skera bergstaflann undir giljum sem eru tiltölulega bein og liggja tiltölulega samsíða stefnu ganganna. Misgengi og berggangar með brotabergi sem liggja samsíða stefnu (eða langásu) neðanjarðarmannvirkja eru alla jafnan frek á styrkingar og geta verið kostnaðarsöm við jarðgangagerð. Segulstyrksmælingar voru síðar gerðar yfir stórum hluta gangaleiðarinnar til að reyna að ráða í stefnur bergganga og stórra misgengja.

Eftir rannsóknirnar 2005 var ekki skýrt hvernig tengja ætti berglög úr vesturhlíðum Vaðlaheiðar austur í holu VK-03. Helst var horft til þess að þykk setbergslög sem finnast slitrótt í hlíð Vaðlaheiðar í grennd við Votukletta (Vatnsbólaset) ættu samsvörun í þykkustu setbergslögunum í holu VK-03 þar sem þau eru á 110-130m dýpi. Líklegt þótti að misgengi ruglaði eitthvað uppröðun setsins í borholunni og hefði e.t.v. klippt út hluta Vatnsbólasettsins sem inniheldur sandstein sem talinn er geta verið myndaður í grunnum vötnum. Sandsteinninn er greinilega sterkasti hluti setbergslaganna.

Haustið 2010 var hola VK-06 boruð, aðeins um 40m vestan við topp holu VK-03 og stefna holunnar með 45° halla til vesturs, nær samsíða gangaleiðinni. Þegar hola var staðsett var búið að gera segulstyrkskort eftir gangaleiðinni og túlka sterkar línulegar segulsviðsbreytingar vestan við borstaðinn sem vísbendingar um bergganga og mögulega misgengi. Á teikningum 11 til 13 eru langsnið eftir holunum þar sem mismunandi atriði eru dregin fram. (Á teikningunum er einnig ofanvarp af afstöðu sniðanna til gangaleiðarinnar).

Borun holu VK-06 gekk vel þrátt fyrir nokkra erfiðleika við að komast í gegnum setbergslög með mjög lágan bergstyrk á 90-100m dýpi. Líklegt er talið að það séu sömu setbergslög og eru á 110-120m dýpi í eldri holunni VK-03 og mjög illa gekk að bora gegnum. Þótt aðeins séu um 150m fjarlægð milli setlaganna (í þessum tveimur holum) eru þau talsvert frábrugðin í þykkt og virðist misgengi klippa talsvert af setbergslögunum í holu VK-06.

Þegar borkjarnar hola VK-03 og VK-06, eru bornir saman sést fljótt að erfitt getur verið að tengja saman berglög holanna. Á teikningu 11 er sýnd möguleg tenging berglaga en tengslin gætu allt eins verið að hluta til (eða hugsanlega öllu leyti) með öðrum hætti.

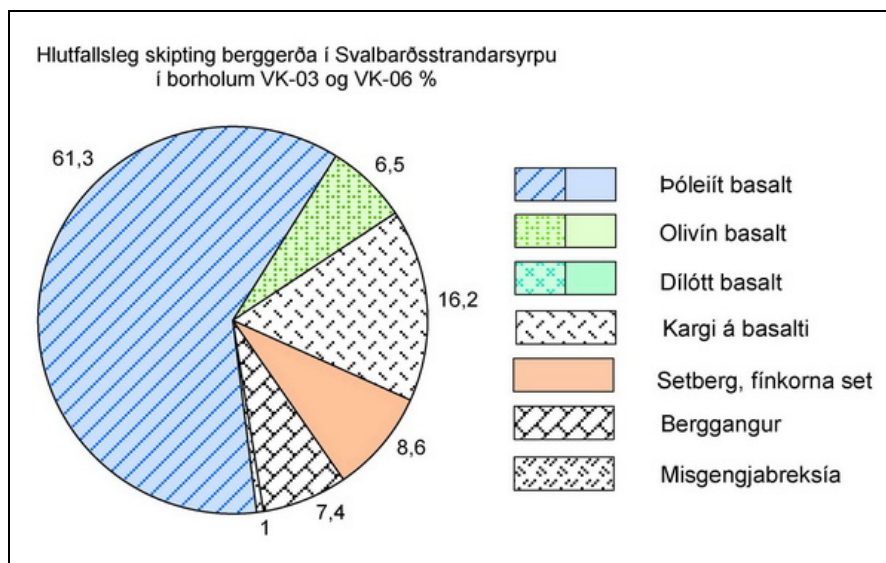
Ef jarðlagasnið borhola VK-03 og VK-06 eru borin saman við berg sem kortlagt hefur verið í vesturhlíðum Vaðlaheiðar virðist vera marktækt samræmi milli berglaga í hlíðinni og laga í holu VK-06 en ekki eru ljós tengsl bergs í hlíðinni við lög í holu VK-03. Sterkar líkur eru taldar á að þykku setbergslögin á 250-275m dýpi og 330-370m dýpi í holu VK-06 eigi samsvörun í Vatnsbólasetbergslögum í vesturhlíðum Vaðlaheiðar. Ef setbergslög Vatnsbólasyrpu eru tengd með þessum hætti við berglög í VK-06 er það um 150m lægra en tengt var í skýrslu Jarðfræðistofunnar frá 2007 þegar Vatnsbólaset var tengt inn á borholu VK-03.

### 4.3.1 Austurhluti jarðgangaleiðar við holur VK-06 og VK-03

Ef miðað er við að tengsl Vatnsbólasetbergslaga liggi inn í neðri hluta borholu VK-06, þá ætti Svalbarðsstrandarsyrpa að ríkja á gangaleiðinni frá vesturmunna ganga og austur fyrir borholu VK-06 og líklega einnig austur fyrir holu VK-03. Borholurnar eru taldar gefa tiltölulega glögga mynd af aðstæðum á liðlega hálfum kílómetra af lengd gangaleiðarinnar.

Á teikningu 11 eru sýnd möguleg tengsl berglaga milli holanna og á teikningu 12 er sýnt hvar brotaberg í borkjarnanum bendir til “lóðréttra” brota, misgengja og bergganga. Lega jarðgangaleiðar milli borholanna er að mestu leyti um þóleiítbasalt (sjá teikningum 11). Enn skal samt áréttað að jarðlagastaflinn í borholum VK-06 og VK-03 er verulega frábrugðinn milli hola og túlkuð tengsl milli berglaga geta verið umdeilanleg.

Hlutfall berggerða á þessum kafla er dregið fram á mynd 4.4, basalt um 68% (meðalþykkt laga um 11,5m) og kargaberg 16% (meðalþykkt laga 3,1m). Setbergslög eru þarna 8,6% og meðalþykkt þeirra 1,3m, þykkasta lagið 6,4m og það næst þykkasta tæpir 5m og það þriðja þykkasta 1,8m. Öll önnur setbergslög mældust innan við 1m að þykkt. Tveir bergganga skera holurnar með vissu (9,8 og 3,2m breiðir) en gangar gætu verið fleiri því stundum getur verið næsta ómögulegt að greina milli berggangs og basaltlags. Á þessu svæði í göngunum er jarðlagahallinn með suð-austlæga stefnu þannig að lagamót lækka til austurs niður í göngin (með suðaustlægan hliðarhalla). Bergið í borholunum er víða mikið brotið og misgengið og mögulegt er að stór misgengi geti fært spildur úr Vatnsbólasyrpu niður í gangaleiðina.

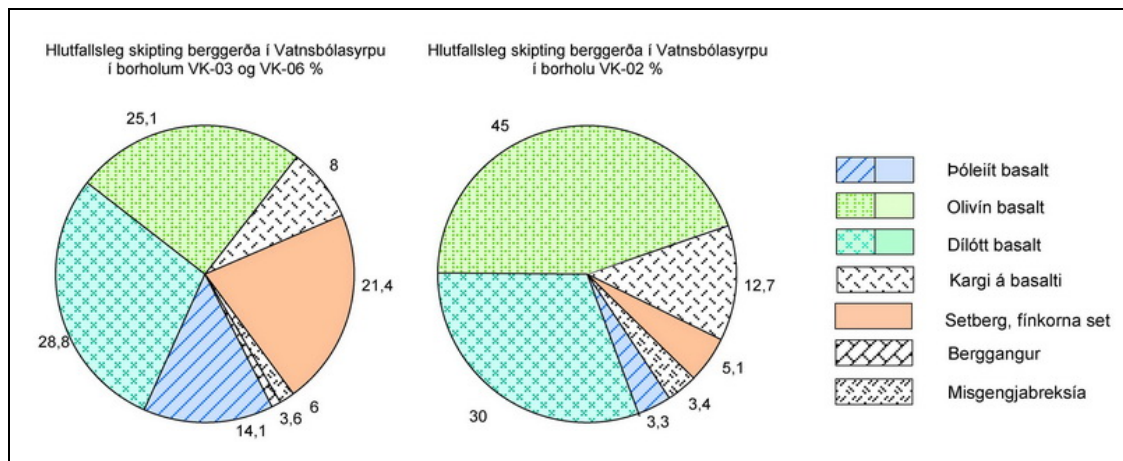


Mynd 4.4. *Hlutfallsleg skipting berggerða innan Svalbarðsstrandarsyrpu eins og syrpan er skilgreind í holum VK-06 og VK-03 í Vaðlaheiði.*

### 4.3.2 Austurhluti jarðgangaleiðar austan borholu VK-03

Valið er að fjalla í einu lagi um austasta hluta jarðgangaleiðarinnar, frá austurmörkum holu VK-03 austur að gangamunna. Þarna er talið að Vatnsbólasyrpa gangi með vaxandi austlægum halla (og e.t.v. einnig með misgengjum) niður í gangaleiðina. Á mynd 4.5 er sýnd hlutfallsleg skipting berglaga í “Vatnsbólasyrpunni” í holum VK-06 og VK-03 og í holu VK-02





Mynd 4.5. Hlutfallsleg skipting berggerða innan “Vatnsbólasyrpu” í holum VK-06 og VK-03 og í borholu VK-02 í austanverðri Vaðlaheiði.

Vegna ósamræmis í jarðlagasúlum VK-06 og VK-03 er talið að meðaltal aðstæðna í báðum holunum komist næst því að lýsa uppbyggingu jarðlaga þar sem þau ganga niður í jarðgangaleiðina austan holanna. Borhola VK-02 er í austurbrekkum heiðarinnar um 1,5 km frá hinum holunum.

Setbergslög í borholum VK-06 og VK-03 eru breytileg að þykkt og gerð. Meginhluti setlaganna er byggður upp úr ljósum súrum vikri og súrri fínkorna gjósku með afar lágan brotstyrk og eru slík lög næm fyrir þenslubreytingum ef þau þorna eða blotna. Meðalþykkt 33 setbergslaga er 3,4m. Þessi hópur setbergslaga svarar til lýsinga á flokki R1 til R2 samkvæmt styrkleikaflokkun í ISRM 1978, sjá mynd 3.2. Með samanburði við veikasta setbergið sem tókst að mæla má áætla að fáein setbergslög séu svo veik að brotstyrkur þeirra sé undir 1 MPa eða í flokki R0. Tvö þykkustu setbergslögin, 25,7m og 16,3m eru blönduð sandsteini og e.t.v. er helmingur af þykkt þessara laga með nokkru hærri brotstyrk en flest önnur setlög í holunum (eru í styrkleikaflokki R3). Ef þessi tvö þykkustu lög eru tekin til hliðar lækkar meðalþykkt annarra (og almennt mun veikari) laga niður í 2,3m.

Í holu VK-02 er basaltið einnig talið vera í Vatnsbólasyrpu en setbergslögin eru miklu fyrirferðarminni eða aðeins liðlega 5% (samanlagt 6,8m í 140m lóðréttum stafla). Þrjú laganna eru 1,5-2m þykk en önnur undir 1m. Líklegt er að misgengi skeri af þykkt eins eða jafnvel tveggja laga. Setbergið er með afar lágan brotstyrk og er næmt fyrir rakabreytingum hvað varðar samdrátt við þornun.

Jarðlagahalli hefur verið mældur í mörgum giljum í austurbrekkum heiðarinnar nærri gangaleiðinni. Hallinn mælist sem næst 10° til ASA en á fáeinum stöðum virðist hallinn vera heldur minni og þá beint í austur. Oftast er þó sjónsviðið takmarkað og nákvæmni hallastefnu mælinganna líklega með nokkurra tuga gráðu óvissu. (Enn skal áréttað að jarðlagahallinn vex almennt með auknu dýpi í jarðlagastaflanum).

#### 4.4 Brotalínur, gangar og misgengi á jarðgangaleið

Misgengi og brot eru algeng í Vaðlaheiði. Sjaldnast sést á yfirborði hve mikið jarðlögin hafa gengið til í misgengjunum. Flest misgengin eru með 1-3m þykka vel samlímda misgengisbreksíu. Önnur misgengi eru með mjög kurluðu bergi og misgengisbreksíu þar sem jarðvatn flæðir um bergið. Algengt er að bergið sé smásprungið næst misgengjum (og stundum einnig næst berggöngum) en staðbundin

aukin sprunguáhrif hafa oftast fjarð út 3-6m frá misgengjunum. Almennt hefur bergið í Vaðlaheiði sprungið mikið (miðað við tertíert plötubasalt) vegna mikilla átaka við forn misgengi og bergganga. Oftast hefur heitt vatn leikið um bergið í misgengjunum og stundum hefur ummyndunin lækkað verulega brotstyrk bergsins. Þar sem svartar eða gráar leirsteindir líma saman bergmylsnu er styrkur bergmassans lítill.

Á langsníði á teikningu 5 er sýnt hvar búist er við að bergganga og misgengi skeri jarðgangaleiðina. Að auki eru hægra megin með langsníðinu tíðnirósir fyrir stefnur sömu línulegra misfella (túlkaðar sem möguleg brot, misgengi og bergganga). Til viðbótar er vinstra megin með langsníðinu tíðnirós fyrir stefnur allra línulegra misfella sem séðar verða á loftmyndum af Vaðlaheiði og túlkaðar eru sem einhverskonar sprungur, misgengi eða bergganga í berggrunninum. Þar stefnir hámarkstíðnin mjög eindregið N-S eða tiltölulega þvert á gangaleiðina, sem telst hagstætt. Önnur heldur minna áberandi stefna er ANA-VSV og sprungur í því kerfi skáskera gangaleiðina með 10-20° frávikum en gætu í einhverjum tilfellum fylgt göngunum nokkurn spól.

Segulmælingar benda einnig til þess að flest og öflugustu brotin og berggangarnir hafi N-S stefnur sem er tiltölulega þvert á meginstefnu jarðganganna. Þetta eru líklega elstu brotin frá þeim tíma er bergganga tróðust upp í veikleikasprungur meðan eldvirkni ríkti á svæðinu eða að bráðin kvika var til staðar grunnt undir yfirborði. Líklega eru allmargar sprungur með ANA-VSV stefnur í Vaðlaheiði en þær eru minna áberandi og bergganga virðast sjaldan eða ekki fylgja þeirri stefnu (byggt á segulstyrksmælingum). ANA-VSV stefnur brota eru líklega yngri en N-S sprungumynstrið. Loks eru strjálí brotalínur með NV-SA stefnu sem gætu mögulega verið tiltölulega ungar og e.t.v. vatnsleiðandi. (Þær koma ekki fram við segulmælingar).

Fullvíst má telja að brot og bergganga verði mun fleiri á leiðinni en sýnt er á langsníðinu. Ætla má að stefnur ganga og brotalína sem síðar finnast, verði flestar samsíða þeim stefnum sem þekktar eru og sýndar eru á tíðnirósum brotalína og bergganga.

#### 4.5 Jarðvatn og lekt á jarðgangaleið

Við fyrstu sýn er að sjá sem berggrunnur í Vaðlaheiði sé mjög þéttur. Lækir renna víða á yfirborði og vaxa snöggt í rigningu. Við boranir stóð vatn oftast í fyrstu nærri yfirborði í holunum en þegar dýpra var borað féll jarðvatnsborð yfirleitt niður. Í holum VK-03 og VK-06 féll vatnsborð niður á um 80m lóðrétt dýpi litlu áður en borun holanna lauk. Í holu VK-02 í austurhlíðinni lækkaði vatnsborðið í þrepum samhliða dýpkun holunnar og mældist vatnsborðið niðri á tæplega 40m lóðréttu dýpi skömmu eftir að borun lauk. Í efri hluta Vaðlaheiðar og skáhallt niður til austurs er ólívínbasalt og dílabasalt sem álitnið er að tilheyri Vatnsbólasyrpu. Það er með miklum holufyllingum, með mjög litla frumlekt (primary permeability) og fremur litla vatnsrýmd. Helst er að vatn standi í sprungum og glufum í berginu. Að auki eru þarna allmörg mjög tregleiðandi setbergslög, hallandi til suðurs og suðausturs og veita þau gjarnan vatni sem ofar liggur út til yfirborðs.

Að vestanverðu er þóleíftbasalt Svalbarðsstrandarsyrpu í neðri hluta heiðarinnar og gengur það eins og þykkur fleygur inn undir Vaðlaheiði til austurs, minna holufyllt en lögin hærra í heiðinni en samt með tiltölulega lága frumlekt á mælikvarða lektar í

íslensku basalti. Í holu VK-04 sem er í brekkurótunum skammt ofan Vaðlaheiðarvegur stendur jarðvatn nærri yfirborði en í holu VK-07 féll vatnsborðið niður á liðlega 20m lóðrétt dýpi eftir borun.

Berggangar og misgengjabrot ganga lóðrétt eða mjög bratt í gegnum berglagastaflann. Brot og gangar eru stundum vel vatnsleiðandi og geta þá hleypt vatninu í gegnum annars þétt setbergslög þannig að bergið verði mjög lekt eftir afmörkuðum beltum. Við boranir (þar sem flestar holur eru hallandi um 30 til 45°) kom fram, að þótt bergmassinn væri tiltölulega vatnspéttur eru í berginu sprungur sem eru mjög vel vatnsleiðandi. Yfirlit yfir lektarprófanir í borholum er sýnt á teikningum 7 og 8 og nánar á borholulýsingum í viðauka.

Löngum hefur reynst erfitt að áætla jarðvatnsaðstæður fyrir jarðgangagerð en mögulegt er að aðstæður geti til dæmis orðið með eftirfarandi hætti:

Frá gangamunna á Svalbarðsströnd að meginbratta Vaðlaheiðar (við VK-04) er farið gegnum þóleiðbasalt Svalbarðsstrandarsyrpu og fjölda bergganga. Lektarprófanir í borholum VK-04 og VK-07 sýna þéttan berggrunn með mjög lekum æðum sem fylgja sumum berggöngum og misgengjum. Við gangagröft má búast við snöggum gusum öðru hvoru þegar sprengt verður inn í vatnsleiðandi brot og ganga. Þar sem megin bergganga- og brotastefnan virðist vera N-S munu göngin draga til sín vatn tiltölulega stefnuháð úr þessum áttum og þar sem bergþekjan yfir göngunum er ekki mikil má búast við að vatnsgusurnar hjaðni tiltölulega hratt eða á fáum dögum eða jafnvel fáum vikum.

Þegar farið er austur undir bratta heiðarinnar hækkar landið og ofan Svalbarðsstrandarsyrpunnar er svokallað Vatnsbólaset og í framhaldi af því Vatnsbólasyrpa. Víða kemur jarðvatn fram úr bergi ofan Vatnsbólasetins. Gera má ráð fyrir að Vatnsbólaset myndi tiltölulega hallandi vatnspéttan flöt skáhallt suður um hlíðar Eyjafjarðar og veiti víða jarðvatni út til yfirborðs.

Þar sem berggangar og stundum misgengi skera nær lóðrétt gegnum Vatnsbólaset má búast við að vatn geti leitað niður milli annars þéttra jarðlaga og bæst við vatnið í Svalbarðsstrandarsyrpu. Við gangagröft gegnum vatnsleiðandi sprungur getur því innflæði í göngin vaxið þegar kemur austur undir hærri hluta heiðarinnar (í samanburði við það sem búast má við undir þynnri bergþekju vestast á gangaleiðinni). Samhliða þykkari bergþekju vex vatnsrýmdin í berginu ofan við göngin í miðhluta heiðarinnar. Því má álykta að innrennsli í göngin hjaðni mun hægur í þykkri bergþekju, þar sem niðurdráttur getur teygt sig langar leiðir norður og suður í Vaðlaheiði. Minni líkur eru taldar á að vatnsleiðandi brot liggi þvert á heiðina eða samsíða gangastefnunni en um það verður ekkert fullyrt frekar.

Austan við miðja heiði dregur úr hlutfalli bergganga en fjöldi stórra bergbrota og misgengja sýnist hafa aukist (miðað við það sem sést í giljum í Vaðlaheiði og í fjöllum norður í Dalsmynni). Í austurhluta heiðarinnar er hækandi hlutfall setbergslaga í staflanum og ummyndunin í berginu er meiri en vestantil þannig að frumlekt bergsins er minni (en vestantil). Næst austurmunna ganganna fara minnkandi líkur á miklu innrennsli þar sem bergþekjan yfir göngunum minnkar.

Tíðni vel vatnsleiðandi sprungna er ekki ljós en að vestanverðu má áætla að milli 5 og 10 vatnsleiðandi sprungur geti, að meðaltali, verið á hvern km í göngunum og að á mið- og austurhluta gangaleiðarinnar geti slíkar sprungur verið í kringum 5 á hvern

km, en innrennslið á hverjum stað e.t.v. meira og langvinnara en að vestanverðu (þar sem hæð bergstaflans yfir göngunum er meiri).

Þegar göngin verða grafin gegnum vatnsleiðandi sprungur er talið mögulegt að innrennsli úr einstaka sprungum gæti e.t.v. tímabundið numið allt að hundruðum lítra á sek. Þótt oftar verði rennslið líklega nokkrir til fáeinir tugir lítra á sek. Líklegast er talið að rennsli úr slíkum sprungum (með miklu innrennsli) hjaðni fljótt niður í einhverja lítra á mínútu og stundum þorna þær alveg.

Gera verður ráð fyrir að á meðan framkvæmdartíma við gröft ganganna stendur, geti heildarinnrennsli inn í göngin numið mörgum tugum l/sek. eða jafnvel tímabundið fáum hundruðum l/sek. Eftir að greftri verður lokið og jafnvægi komið á jarðvatnið má búast við að langtímarennsli úr öllum göngunum verði fáir tugir l/sek.

#### **4.6 Hiti í berginu á jarðgangaleið**

Mögulegt er að jarðhiti leynist undir Vaðlaheiði og til þess liggja eftirfarandi vísbendingar. Jarðhiti finnst á nokkrum stöðum í 5-15 km fjarlægð frá gangaleiðinni undir Vaðlaheiði. Nefna má Laugaland í Eyjafirði, um 13-15 km í suðurátt, Svalbardseyri sem er 5-6 km til norðurs, Reyki í Fnjóskadal um 15 km til suðurs og Draflastaðir álíka langt til norðurs í Fnjóskadal. Því er mögulegt að jarðhiti geti leynst í berginu undir heiðinni. Fjórar dýpstu borholurnar voru hitamældar og eru hitaferlarnir sýndir á myndum 3.7 og 3.8.

Að vestanverðu við Vaðlaheiði eru holur VK-07 og VK-04. Snið með jafnhitalínum milli holanna er sýnt á teikningu 9. Borhola VK-04 var hitamæld degi eftir að hún var boruð og þótt “kaldar” vatnsæðar fyndust í holunni var ekki um neinn “óeðlilegan” jarðhitastigul að ræða og hitastigull tæplega 50°C/km. Hóla VK-07 var hitamæld degi eftir að borun lauk og þar virtist hitastigull einnig vera “eðlilegur eða um 36°C/km en líklega ruglar niðurrennsli í holunni mælinguna. Á langsniði gegnum holurnar á teikningu 9 má sjá að búast má við að berghitinn hækki úr 5-6°C nærri munnanum í 8-12 stiga hita á gangaleiðinni þar sem hún fer framhjá borholum VK-07 og VK-04. Þaðan má búast við að hitastigið hækki hraðar inn í fjallið þar sem bergþekjan vex hratt er farið er til austurs.

##### **4.6.1 Möguleiki á jarðhitavatni á jarðgangaleið**

Að austanverðu voru holur VK-03 og VK-04 hitamældar. Hóla VK-03 var hitamæld liðlega sólarhring eftir að borun hafði verið hætt vegna bilana í bortækjum. Opin vatnsæð virðist vera í holunni á um 310m holudýpi en að öðru leyti er lóðréttur hitastigull neðan 200m holudýpis um 50°C/km.

Þegar borun holu VK-06 var lokið var hún hitamæld liðlega 6 klst. eftir að skolvatni var síðast dælt niður í holuna. Ljóst er að hitastig í holunni var ekki komið í jafnvægi við umhverfishita bergsins. Með samanburði við hitastigshækkun í borholu (með sama þvermáli) við Draflastaði sem boruð var sama haust, má ætla að hitaferillinn í VK-06 sé um 3-5°C lægri en hann hefði að líkindum orðið eftir að hitajafnvægi væri náð. Því er annar áætlaður hærri hitaferill einnig sýndur á mynd 3.8. Hitastigull neðan 200m dýpis í holu VK-06 er um 80°C/km sem er umtalsvert hærra en stigullinn í holu VK-03. Hitaferlar á myndum 3.7 og 3.8 sýna að ofan 100 m hallandi dýpis í holunum er niðurrennsli vatns að kæla holurnar.

Ef farið er milli borholanna í þeirri hæð y.s. sem áformað er að göngin verði, hækkar hitinn frá 15°C við holu VK-07 í 30°C við holu VK-06. (Mögulega er hitinn í holu VK-06 mældur lægri en hann hefði mælt við hitajafnvægi við bergið). Vegna misvísandi halla borhola VK-06 og VK-03, gleikkar bilið milli þeirra með vaxandi dýpi (sjá teikningu 12). Jarðgöngin fara framhjá borholunum í um 150 m y.s. Þar er hitinn í holu VK-03 um 15°C, en í holu VK-06 um 30°C. Fjarlægð milli borholanna á þessu dýpi er sem næst 550m en hitamunur er um um 15°C, hækkandi til vesturs. Þarna mælist því um 30°C/km hitastigull í lárétta stefnu til vesturs. Hafa verður í huga að hitastigullinn vex jafnan hraðast næst hitagjafanum ef um vatnsæðar í bergi er að ræða.

Hitamuninn má túlka á þann veg að “jarðhitasvæði” með óskilgreindum hámarkshita geti verið vestan við holu VK-06. Einnig mætti túlka hitamuninn á þann veg að hæsti hiti liggi einhversstaðar milli holanna en þá er líkleggra að meiri staðbundinn hiti hefði mælt hærra í hallandi borholunum. Ekki er að sjá vísbendingar um aukinn hita í bergi austan við borholu VK-03, austur að gangamunna. Þar má ætla að hitinn verði 5-15 °C.

#### **4.6.2 Möguleiki á köldu innrennsli í göngin**

Ekki er hægt að útiloka að ískalt vatn renni inn í göngin. Meðalárshiti á Akureyri yfir síðustu hálfu öld er nálægt 3,5 °C. Hitastig hérlendis lækkar almennt um 0,65 °C á hverja 100m hækkun. Samkvæmt framangreindu er meðalárshitinn á efsta hluta Vaðlaheiðar um eða undir frostmarki. Engar vísbendingar hafa sést þar um virkan sífrera, andstætt því sem algengt er að sjá hærra í fjöllum umhverfis Eyjafjörð (svo sem yfir Héðinsfjarðargöngum og Ólafsfjarðarmúlagöngum).

Þar sem sumir berggangar og misgengi eru vel vatnsleiðandi geta þau flutt jarðvatn hratt frá efsta hluta fjallsins niður í göngin ef grafið er inn í slíkar lekaleiðir og vatnið kemst á umtalsverða hreyfingu. Því má ekki útiloka þann möguleika að jarðvatn með undir 4°C hita geti streymt um nokkurn tíma inn í göngin á hverjum lekastað. Þetta á þó aðallega við um þann hluta gangaleiðarinnar sem er undir hæsta hluta fjallsins.



## 5 Heimildaskrá

- Axel Björnsson, Kristján Sæmundsson, Sigmundur Einarsson, Freyr Þórarinsson, Stefán Arnórsson, Hrefna Kristmannsdóttir, Ásgrímur Guðmundsson, Benedikt Steingrímsson og Þorsteinn Thorsteinsson 1979: Hitaveita Akureyrar. Rannsóknir jarðhita í Eyjafirði. Áfangaskýrsla 1978. OS-JHD 7827, 91s + myndir og kort.,
- Ágúst Guðmundsson og Genia Winkler Giuliani 2007. Vaðlaheiðargöng. Veggöng milli Svalbarðsstrandar og Fnjóskadals. Jarðfræðiskýrsla 2007. Unnið fyrir Greiða leið ehf. Júní 2007.
- Ágúst Guðmundsson 2000: Frerafjöll og urðarbingir á Tröllaskaga. Óbirt Meistaraprófsritgerð við Háskóla Íslands Reykjavík.
- Árni Hjartarson 2001: Vaðlaheiði. Jarðfræðikort og þversnið á jarðgangaleið. Orkustofnun Rannsóknasvið, OS-2001/077
- Barton, N., Lien, R. og Lunde, J. 1974: Analysis of rock mass quality and support practice in tunneling and guide for estimating support requirements. NGI, Rep. 54206, 74 p.
- Björn Nilsen and Arild Palmström 2000: Engineering Geology and Rock Engineering. Handbook No. 2. Norwegian Group for Rock Mechanics. (NBG) Oslo.
- Cande og Kent 1995: Revised calibration of the geomagnetic polarity timescale for the late Cretaceous and Cenozoic. Journal of geophysical research 100, 6093-6095.
- Haukur Jóhannesson 1991: Yfirlit um jarðfræði Tröllaskaga (Miðskaga). Árbók Ferðafélags Íslands 1991, bls. 39-56.
- Hunt, Roy E. 1984: *Geotechnical engineering investigation manual*. McGraw - Hill Book Company.
- Kristján Sæmundsson 1979: Outline of the Geology of Iceland. *Jökull* 29: bls, 7-28.
- Kristján Sæmundsson, Leó Kristjánsson, I. McDougall og N.D. Watkins, 1980: K-Ar dating, geological and paleomagnetic study of a 5 km lava succession in northern Iceland. *J. Geophys. Res.*, 85, bls. 3628-3646.
- Kristján Sæmundsson 2004. Lághesti í Þingeyjarsýslum. Erindi og glærur á ársfundi ÍSOR 2004.
- Langbacka, B.O. og Ágúst Guðmundsson, 1995. Extensional tectonics in the vicinity of a transform fault in North Iceland. *Tectonics*, 14, bls. 294-306.
- Verkfræðistofan HNIT, 2005: Landlíkan með 2m hæðarlínubili.
- Mannvit og Jarðfræðistofan. „Samanburður á einásabrotstyrk og punktalagsstyrk borkjarna frá virkjana- og veggangasvæðum“. Rannsóknarskýrsla unnin fyrir Vegagerðina og Landsvirkjun, september 2009.
- Mannvit. Rannsóknir á eiginleikum setbergs í Vaðlaheiði. Rannsóknarskýrsla unnin fyrir Vegagerðina apríl 2011.
- Mannvit. Rannsóknir á eiginleikum setbergs í Norðfjarðargöngum og Óshlíðargöngum. Rannsóknarskýrsla unnin fyrir Vegagerðina, júlí 2010.

