



ORKUSTOFNUN
Jarðhitadeild

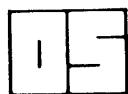
Hjalti Franzson

NESJAVELLIR

Borholujarðfræði
Vatnsgengd í jarðhitageymi

OS-88046/JHD-09
Reykjavík, október 1988

Unnið fyrir
Hitaveitu Reykjavíkur



ORKUSTOFNUN
Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Verknúmer : 611113

Hjalti Franzson

NESJAVELLIR

**Borholujarðfræði
Vatnsgengd í jarðhitageymi**

**OS-88046/JHD-09
Reykjavík, október 1988**

**Unnið fyrir
Hitaveitu Reykjavíkur**

ÁGRIP

Skýrslan er samantekt á jarðfræðigögnum sem aflað var við rannsóknir á borholum á Nesjavöllum með sérstöku tilliti til samspils lektar og jarðfræði berggrunnsins.

Upphleðslueiningar skiptast í móbergs- og hraunlagamyndanir. Móbergsmyndanir eru ráðandi í efstu 600-700 metrum jarðlagastaflans (niður á um 300 m u.s.), og eru neðri skilin talin marka upphaf Hengils-eldstöðvarinnar (ca. 300.000 ár). Hraunlög eru í meirihluta neðan þessa dýpis og er talið að þau séu a.m.k. að einhverju leyti runnin frá eldstöðvarkerfinu í Grensdal austan Hengils. Misgengjum er skipt í two meginhópa: Annars vegar misgengi yngri en 115.000 ára, sem mynda NA-SV sigdæld við Kýrdalshrygg austanverðan og áberandi N-S misgengi frá Nesjalaugagili norðanverðu yfir í Kýrdalshrygginn nærrí holu 4; og hins vegar eldri misgengi (115.000-300.000 ára), sem einnig sýna NA-SV og N-S stefnu.

Innskot eru fátið í efstu 800 metrunum, en fjölgar er neðar dregur og ná allt að 100 % þéttleika í neðsta hluta berglagastaflans. Innskotunum hefur verið skipt í þrjár gerðir: 1) Meginþorrinn eru ummynduð basaltinnskot. 2) Díorítinnskot finnast í öllum holum neðan 700 m dýpis. Þau eru talin einn innskotafasi og benda öll gögn til að þeim halli 14-24° til suðurs. 3) Ferskleg basaltinnskot mynda þriðja hópinn og eru talin meðal þeirra yngstu í berglagastaflum. Þau eru talin vera nær lárétt eða að þeim hallar lítillega inn undir Hengilinn.

Ummyndun gefur margvíslegar upplýsingar um jarðhitakerfið. Hún sýnir meðal annars að jarðhitakerfið flæðir út frá Hengli eftir tveimur rásum: Í fyrsta lagi meginrás sem fellur saman við NA-SV misgengi og gosganga í rótum Kýrdalshryggjar, og í öðru lagi rás(ír) með sömu stefnu undir Nesjalauga- og Köldulaugagili. N-S misgengi, sem skera þessar rásir, draga úr áframhaldandi rennsli til norðausturs. Mjög svipuð mynd kemur fram þegar dýptarlínur niður á efstu mörk ummyndunarsteinda eru skoðaðar. Samanburður á hitadreifingu á grundvelli ummyndunar og mælds hita sýnir að jarðhitakerfið hefur kólnað út við jaðrana; sérstaklega er kólnunin áberandi í Kýrdal (holur 17, 12 og 18), en einnig vottar fyrir kólnun í holum á norðaustur og austurjaðri svæðisins.

Vatnsæðar sem koma fram í holunum virðast stjórnast að miklum hluta af þemur þáttum. Æðar eftur lagskilum á milli upphleðslueininga virðast ráðandi efst í berglagastaflanum en þær dvína smám saman og eru að mestu horfnar í um 800 m dýpi í holunum. Þar fyrir neðan virðist lekt tengd innskotum ráðandi. Tvær gerðir innskota koma þar helst við sögu: annars vegar ferskleg basaltinnskot og hins vegar díorít, en hvorum tveggja er talið halla lítillega undir Hengilinn. Augljóst er út frá ummyndun á svæðinu að meginvatnsleiðararnir eru lóðréttar sprungur og gangar undir Kýrdalshrygg, í Köldulauga- og Nesjalaugagili, ásamt N-S misgengi sem áður er getið, og er líklegt að vökvinn sem rennur eftir áðurnefndum innskotum hafi a.m.k. að einhverju leyti komið frá þeim leiðurum.

Unnt er að greina ákveðna tímaþróun jarðhitakerfisins með athugun á röðun útfellinga í glufum; tengslum jarðfræðifyrirbæra í borholunum og jafnvél með því að tengja þau þróun atburða í gossögu Hengilsins á grundvelli yfirborðsathugana. Elztu glöggu merkin um háhitavirkni tengjast díorítinnskotunum, sem hugsanlega eru samtíma 70.000 ára ísúrum gosmyndunum í vesturhluta Hengils. Annað jarðhitaskeið tengist líklega upphleðslu Hengilsstapans og móbergsmydunar í Kýrdalshrygg fyrir um 60.000 árum. Í efri hluta kerfisins falla út zeðlitar en háhitir ríkir í neðri hlutanum. Þriðja og öflugasta jarðhitaskeiðið verður að loknu fyrra hraungosinu í Kýrdalshrygg fyrir tæpum 8.000 árum, og talið er að á svipuðum tíma ryðjist fersklegu basaltinnskotin inn í staflann. Síðara hraungosið í Kýrdal lokar fyrir rennsli eftir fersklegu basaltinnskotunum inn í Kýrdalinnum, en skerpir á kerfinu austanmegin Kýrdalshryggjrar.

Dags.
1988-11-11

Tilv. vor
HF/þþ

Dags.

Tilv. yðar

*Hr. Ámi Gunnarsson
Yfirverkfræðingur
Hitaveitu Reykjavíkur
Grensásvegi 1
108 REYKJAVÍK*

**VARÐAR: RANNSÓKN Á VATNSGENGD Í JARÐHITAKERFI NESJAVALLA Á
GRUNDVELLI BORHOLUJARÐFRÆÐI**

Hér með afhendist Hitaveitu Reykjavíkur handrit skýrslu, sem fjallar um þau jarðfræðifyrirbæri í berggrunni Nesjavalla, sem talin eru stjórna vatnsstreymi í jarðhitakerfinu.

Skýrslan er unnin samkvæmt verksamningum Nr. 611113-1987 milli HR og JHD dagsettum 24. apríl 1987.

Virðingarfyllst

Benedikt Steinþórsson
Benedikt Steingrímsson

EFNISYFIRLIT

Bls.

ÁGRIP	2
EFNISYFIRLIT	5
TÖFLUSKRÁ	6
MYNDASKRÁ	6
1 INNGANGUR	7
2 JARÐFRÆÐI	8
2.1 Upphleðslueiningar	8
2.2 Misgengi	12
2.3 Innskot	13
2.3.1 Basalt innskot	13
2.3.2 Ísúr innskot	14
3 UMMYNDUN	22
3.1 Þróun ummyndunar	22
3.2 Ummyndunarbelti	22
3.3 Efri mörk ummyndunarsteinda	23
4 VATNSÆÐAR	39
5 UMRÆÐA	45
5.1 Jarðfræðileg tengsl vatnsæða	45
5.2 Samanburður berghita og ummyndunarhita	45
5.3 Ummyndun við Kýrdalshrygg	46
5.4 N-S misgengi nærrí holu 12	46
5.5 Aldur og þróun jarðhita á Nesjavöllum	47
5.6 Tengsl efnafraði vökva og díoríts	49
5.7 Tengsl borholujarðfræði og viðnámsmælinga	49
5.8 Botnhiti í holu 11	49
6 HELZTU NIÐURSTÖÐUR	51
7 FREKARI RANNSÓKNIR	54
HEIMILDIR	55
ENGLISH SUMMARY	57

	Bls.
TÖFLUSKRÁ	
1 Tengsl vatnsæða og jarðfræði	41
MYNDASKRÁ	
1 Borholur á Nesjavöllum og staðsetning þversniða	9
2 Jarðlagapversnið A-B	10
3 Jarðlagapversnið C-D	11
4 Misgengi og sprungur á yfirborði frá nútíma	16
5 Misgengi yngri en síðasta hlýskeið (um 115.000 ár)	17
6 Misgengi yngri en næstsíðasta hlýskeið (um 200.000 ár)	18
7 Hlutfall innskota með dýpi	19
8 N-S þversnið sem sýnir hlutfall innskota í berggrunni	20
9 Ísúr innskot. Líkleg lega í berggrunni	21
10 Ummyndunarhiti á eldra (lághita-) og yngra (háhita-) jarðhitaskeiði	25
11 Staðsetning ummyndunarsniða	28
12 Ummyndunarsnið A-A'	29
13 Ummyndunarsnið B-B'	30
14 Ummyndunarsnið C-C'	31
15 Ummyndunarsnið D-D'	32
16 Dýpi á einstakar ummyndunardeindir í jarðhitakerfi Nesjavalla	33
17 Sprungurásir í jarðhitakerfinu á grundvelli ummyndunar	38
18 Meðalfjöldi vatnsæða og afstæð stærð þeirra	40
19 Ummyndunarhiti nærri og fjarri lóðréttir jarðhitarás	42
20 Fjöldi vatnsæða, sem koma fram við lagskil á 0-800 m dýpi	42
21 Vatnsæðar, sem koma fram við "fersk" basalt inniskot	43
22 Vatnsæðar, sem koma fram við "önnur" basalt inniskot	43
23 Vatnsæðar, sem koma fram við ísúr inniskot; tíðni og stærð	44
24 Samanburður ummyndunarhita og berghita	46
25 Líkleg lóðrétt N-S sprunga vestan við holur 8 og 12	47
26 Próun og mögulegur aldur jarðhitakerfisins	50
27 Lóðréttir vatnsleiðarar og rennslishindranir ofan 800-1000m dýpis	52
28 Megin vatnsleiðarar í jarðhitakerfi Nesjavalla	53

1. INNGANGUR

Jarðhitadeild Orkustofnunar hefur allt frá því boranir hófust á Nesjavöllum árið 1965 safnað og unnið úr borholugögnum. Niðurstöðum hefur verið skilað til Hitaveitu Reykjavíkur í formi áfangaskýrslna og lokaskýrslna um einstakar holur. Fjórum sinnum hefur hins vegar verið tekið saman yfirlit yfir stöðu rannsókna á grundvelli þeirra gagna, sem fyrir hafa legið á hverjum tíma (Jens Tómasson og Kristján Sæmundsson 1967; Jens Tómasson o.fl. 1971; Jens Tómasson o.fl. 1974; Valgarður Stefánsson o.fl. 1983). Nokkrar tímaritsgreinar, sem fraði-lega tengjast borholurannsóknum á Nesjavöllum hafa auk þess birst á prenti (Hrefna Kristmannsdóttir og Jens Tómasson 1974; Valgarður Stefánsson o.fl 1983; Valgarður Stefánsson 1985; Hjalti Franzson o.fl. 1986).

Skýrsla sú, sem hér er lögð fram, er byggð á jarðfræðirannsóknum úr sautján jarðhitaholum en úrvinnslu gagna úr einni holu, NJ-17, er ekki lokið. Í heimildalista er getið allra lokaskýrslna þar sem borholujarðfræðigögn eru tilunduð. Þar sem stuttur tími var ætlaður í verkið var í upphafi ljóst að ekki gæfist tóm til að taka saman og túlka öll jarðfræðigögn úr borholum frá Nesjavöllum. Var gagnaúrvinnslu og túlkun því beint inn á það svið, sem heiti skýrslunnar ber með sér, þ.e. að leita uppi þau jarðfræðigögn sem afmarkað gætu vatnsleiðara eða rennslishindranir í jarðhitakerfinu, og móta á þann hátt jarðfræðilegt streymislíkan fyrir Nesjavallasvæðið. Til að ná ofangreindu markmiði reyndist nauðsynlegt að samræma þau gögn sem aðgengilegust voru, svo sem skiptingu berglaga í myndanir og öll gögn um ummyndun. Þau eru þó ekki birt hér nema að litlu leyti, en áherzla fyrst og fremst lögð á niðurstöður, sem segja til um vatnsgengd í jarðhitakerfinu.

Meginefni skýrslunnar er skipt í fimm hluta: í þeim fyrsta (kafla 2) er gerð grein fyrir jarðfræði berggrunnsins, bæði er varðar upphleðslueiningar og staðsetningu misgengja út frá samanburði jarðlaga frá einni holu til annarrar. Innskot gegna mjög þýð-

ingarmiklu hlutverki sem vatnsleiðarar á Nesjavöllum, og er þeim því lýst nokkuð ítarlega. Ummyndun (kafla 3) er sett fram á þann hátt, að fyrst er gerð stutt grein fyrir þróun ummyndunar á Nesjavöllum, en síðan er litið á það hvernig helstu ummyndunarbeltin ligga í berggrunninum. Ef skoðuð er lega einstakra ummyndunarsteinda á svæðinu kemur fram mynd, sem endurspeglar innskota- og sprungukerfið í berggrunninum, og segir því til um útbreiðslu jarðhitakerfisins og bestu streymisleiðir jarðhitavökvars. Fjallað er um vatnsæðar í kafla 4 og gerð er grein fyrir hvar þær koma fram í jarðlagastaflanum. Í kafla 5 er sett fram streymislíkan byggt á helstu niðurstöðum, sem draga má af borholujarðfræðinni um vatnsgengd í Nesjavallakerfinu. Síðan er gerð stutt grein fyrir því hvernig líkanið fellur að örðrum athugunum á Nesjavöllum og þeim líkönum, sem sett hafa verið fram á grundvelli þeirra.

Könnun á jarðlögum og ummyndun þeirra hefur verið snar þáttur í borholurannsóknum á Nesjavöllum. Á þeim rúmum tuttugu árum, sem boranir á Nesjavöllum spanna, hafa fjölmargir jarðfræðingar sinnt slíkum rannsóknum. Þeir sem sinnt hafa þessum rannsóknum síðustu árin eru: Jens Tómasson, Ásgrímur Guðmundsson, Guðmundur Ómar Friðleifsson, Ómar Bjarki Smárason, Vigdís Harðardóttir og Guðrún Sverrisdóttir auk skýrsluhöfundar.

Benedikt Steingrímsson og Ásgrímur Guðmundsson lásu yfir handrit af skýrslunni og bentu á margt sem betur mátti fara. Er þeim þökkuð aðstoðin.

2. JARÐFRÆÐI

Þessum kafla er skipt í þrjá hluta. Fyrst er gerð grein fyrir helstu þáttum upphleðslusögu goseininganna. Í öðrum hluta er gerð grein fyrir misgengisbrotum, sem sjást þegar bornar eru saman bergeiningar einstakra hola. Í þeim þriðja er fjallað um innskot í berglagastaflanum.

2.1 Upphleðslueiningar

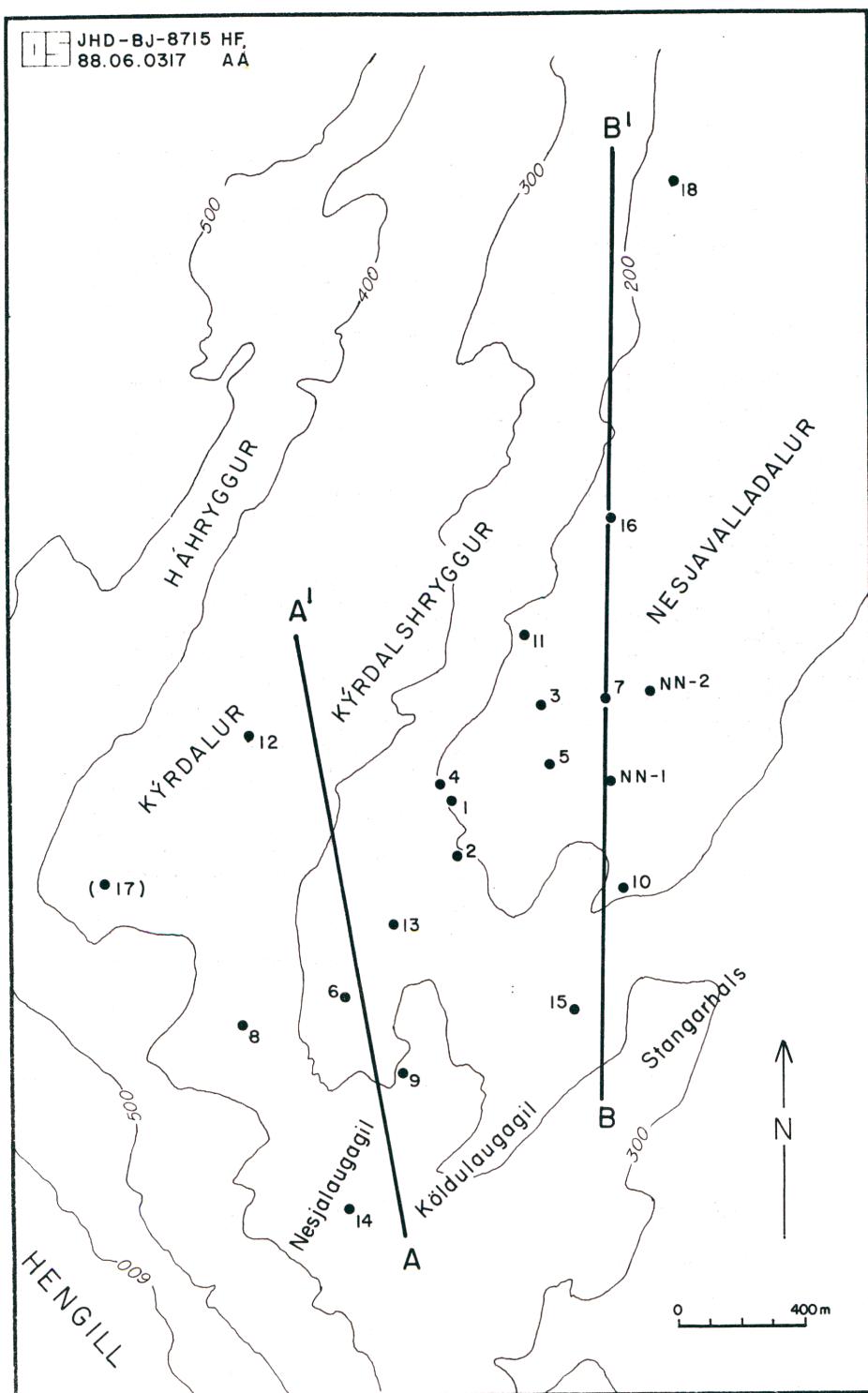
Við greiningu upphleðslueininga í borholum er í fyrsta lagi lögð áherzla á að greina hvort um hraunlög eða móberg er að ræða. Í öðru lagi er reynt að greina lögin til bergfræðilegra tegunda; dílótt basalt, ólivín-þóleit, þóleit eða millistig þessara tegunda. Lög með sterk bergfræðileg einkenni er oft auðvelt að rekja frá einni holu til annarrar. Móbergseiningar sem myndast hafa undir ísbreiðu jökulskeiða, er einnig unnt að greina í t.d. set, túff, breksíu og bólstraberg. Þessar upplýsingar eru grundvöllurinn að þeirri skiptingu upphleðslueininga sem sýnd er á tveimur þversniðum á myndum 2 og 3, en þversniðslínurnar eru sýndar á mynd 1.

Þess ber að geta að þegar leitað er að sambandi vatnsæða og jarðfræði er stuðst við mun nákvæmari jarðfræðikort af holuveggjum en þversniðin gefa til kynna.

Á báðum þversniðunum (myndir 2 og 3) kemur vel fram, að móberg er mun algengara en hraunlög í efstu 600-700 m berglagastaflans, en neðan þess dýpis verða hraunlög meira ráðandi. Þessi skipting er þó ekki alveg eins einhlýt í austara sniðinu sem nær allt norður að holu 18, þar sem a.m.k. tvær >100 metra þykkar hraunlagasyrpur koma fram í borholum 16 og 18. Þessar syrpur þynnast og hverfa til suðurs og sjást vart í holum 10 og 15.

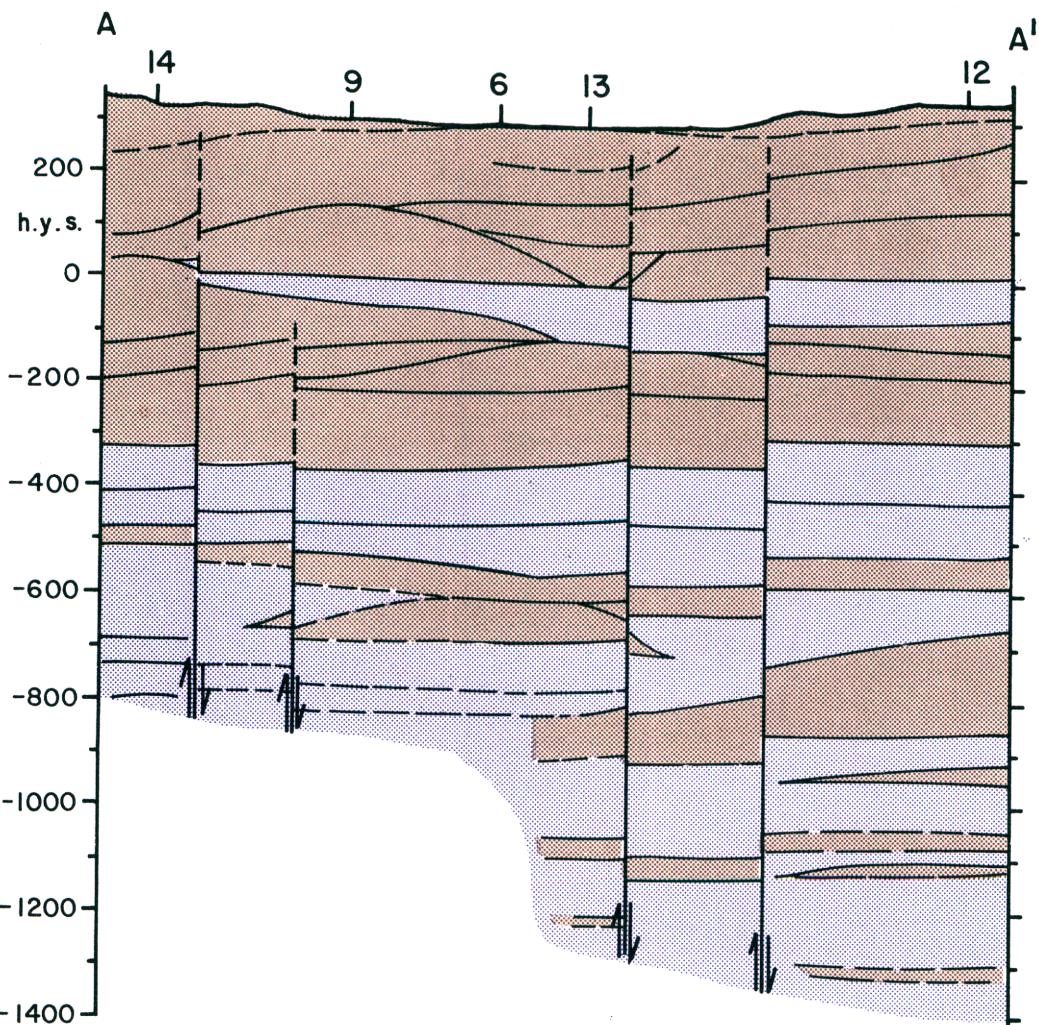
Nokkur eðlismunur er á upphleðslu móbergs og hraunlagu, þar sem móbergið myndar hæðir og fjöll á sjálfum gosstöðvum, en þykkt hraunlagabunkans stjórnast frekar af landslaginu í grennd við gosstöðvarnar, t.d. verður hraunlagabunkinn þykkur í dalverpum (líkt og verður í jarðfræðilegi

framtíð í Nesjavalladalnum) eða við jaðra móbergshálendis. Hengillinn er að mestu hálandi og hlaðinn upp af móbergseiningum. Það bendir til þess að á því svæði hafi verið mikil gosvirkni, enda er hún talin megineldstöð. Sú staðreynd að móbergseiningar einoka berglagastaflann allt niður á um 600 m dýpi bendir til að hálandið hafi verið til staðar síðustu þrjár ísaldirnar. Á hlýskeiðunum á milli þessara jökulskeiða hafa hraunin, sem mörg hver hafa eflaust átt upptök sín í Hengli, runnið til beggja hliða hálandisins, en það sést einmitt í borholum; hraunlagasyrpurnar eru þykkastar í norðurhluta svæðisins fjærst Hengli, en ná lítið að syðstu holunum á svæðinu, af því að þar hefur verið til staðar móbergshálendi undanfarandi jökulskeiðs. Þessi áberandi breyting á um 600 m dýpi frá ráðandi hraunlagupphleðslu í móbergsupphleðslu, markar mjög líklega þau tímamót þegar upphleðsla gosefna hófst í megineldstöðinni í Hengli. Þriðja jökulskeiðið, sem almennt er talið hafa hafist fyrir um 300.000 árum síðan, er því líklega nærrí upphafstíma eldstöðvarinnar, og þar sem háhitakerfi eru eingöngu innan slíkra svæða, þá marka þessi tímamót einnig mesta mögulega aldur á háhitavirkni á Hengilssvæðinu. Almennt er talið að jökulskeið ísaldar hafi náð yfir lengra tímabil heldur en hlýskeiðin. Hraunlagabunkinn sem er ráðandi neðan 600 m bendir því til að á þeim tíma hafi land verið fremur flatt hér og legið utan svæðis móbergsupphleðslu. Samkvæmt Knúti Árnasoni o.fl. (1986, 1987) var gosvirknin á svipuðum tíma mest í svonefnndri Grensdalseldstöð en miðja hennar er um 10 km suðaustan Hengilsins og þá væntanlega minni annars staðar innan gosbeltisins. Neðan 600 m dýpis er að finna vísbendingar um a.m.k. 6 jökulskeið, þannig að í heild eru um 9 jökulskeið í um 2 km þykum berglagastafla, en það bendir til að aldur upphleðslueininganna í botni holanna geti verið allt að 900.000 ár.



MYND 1. Borholur á Nesjavöllum, þversnið berglaga (myndir 2 og 3), og helstu örnefni.

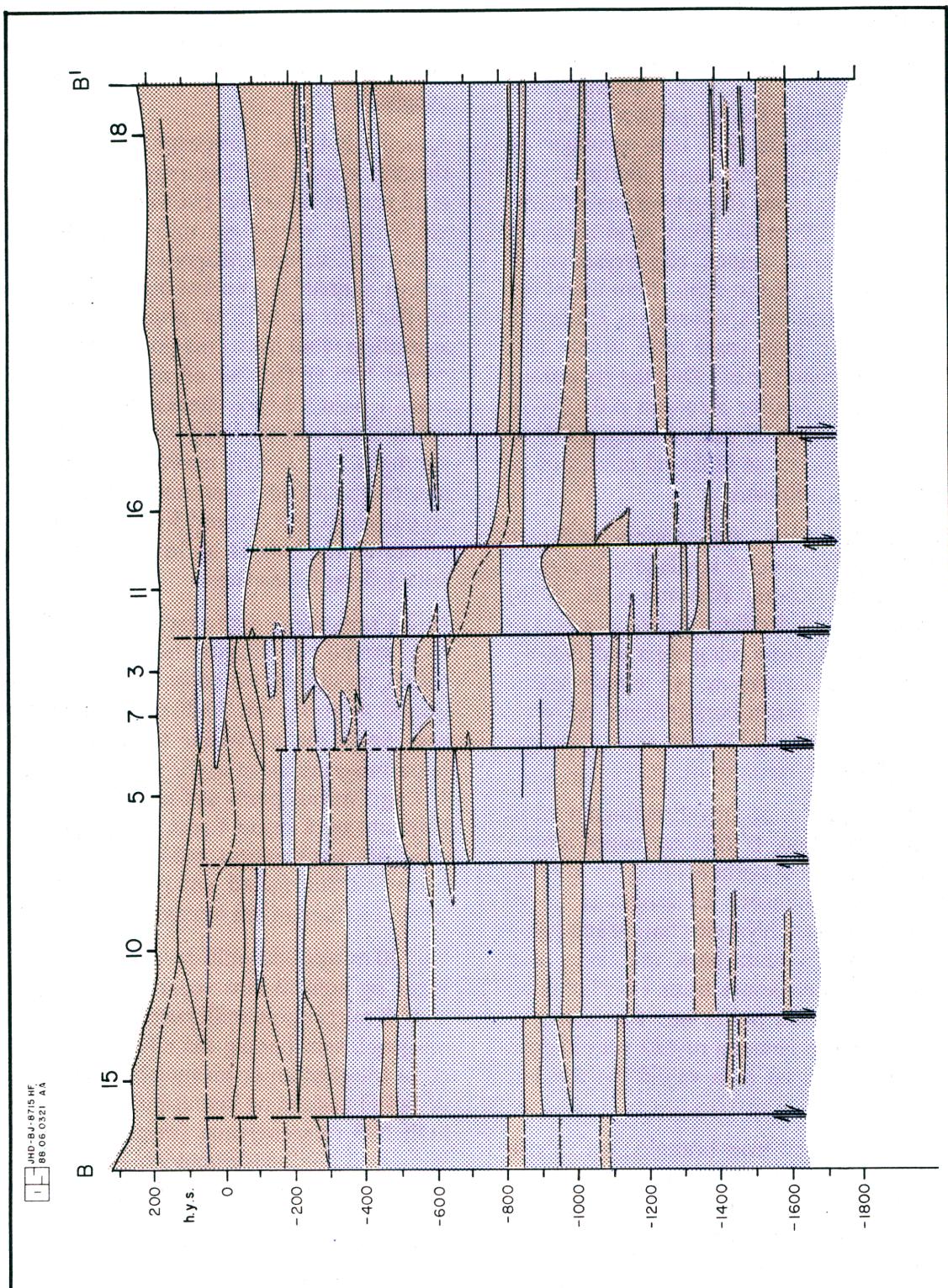
JHD-BJ-8715 HF
88.06.0321 AA



MYND 2. Jarðlagagþversnið A-A'. Staðsetning þversniðs sýnt á mynd 1.

Brúnn litur: móberg

Blár litur: hraunlög



MYND 3. Jarðlagapversnið B-B': Staðsetning þversniðs sýnt á mynd 1.

Brúnn litur: móberg

Blár litur: hraunlög

2.2 Misgengi

Nesjavallasvæðið er innan sprungusveimsins, sem gengur í norðaustur frá megineldstöðinni í Hengli. Kemur þetta skýrt fram í landslagi á svæðinu þar sem sprungur og misgengi eru mjög áberandi þættir á yfirborði. Virkni innan Hengilssprungusveimsins hefur að öllum líkendum verið breytileg frá einum tíma til annars, eftir þróystíðandi jarðskorunnar hverju sinni. Sem dæmi um þetta má nefna, að á síðastliðnu árþúsundi virðist virknin hafa verið mest vestan til í sprungusveimnum, þ.e. í Dyradal og norður um Þingvelli (Knútur Árnason o.fl., 1986). Það er því ekki gefið mál að höggun í dýpri og eldri jarðlögum sé í takt við núverandi ásýnd sprungusveimsins.

Misgengissprungur frá nútíma (síðustu 10.000 árin) hafa verið kortlagðar ítarlega á Nesjavöllum (Knútur Árnason o. fl., 1986) og sýnir mynd 4 dreifingu þeirra á borsvæðinu. Þar kemur fram mjög afgerandi NA-SV stefna sprungusveimsins, en einnig vottar fyrir óreglum sunnan borsvæðisins, og vestan við holur 10 og 15, þar sem sprungur með N-S stefnu koma fram.

En hvernig hefur sprunguhreyfingum verið háttar á svæðinu, ef litið er lengra aftur í tímum? Hér geta borholuathuganir gefið ákvæðnar vísbendingar. Ef gengið er út frá því, að í lok hvers hlýskeiðs hafi hraun þakið allt svæðið eða hluta þess, má finna hvar hlýskeiðshraunin koma fram í borholunum og athuga afstöðu þeirra nú. Þar sem yfirborð hraunmyndananna reynist vera haggð hljóta misgengi að hafa valdið því á síðari tímum.

Á mynd 5 er sýnt hvar hraunlög frá síðasta hlýskeiði finnast á borsvæðinu á Nesjavöllum. Á myndinni kemur fram hversu djúpt er á yfirborð myndunarinnar, og þykkt hennar í einstökum holum. Dýptartölurnar benda til þess að minnst þrjú til fjögur meiriháttar misgengi hafi hreyfst á svæðinu eftir lok þessa hlýskeiðs: Eftir Kýrdalshrygg kemur fram misgengi með falli um eða yfir 45 m til austurs. Þetta misgengi virðist minnka er norðar dregur, ef tekið er mið af

um 15 m hæðarmun milli hola 16 og 18. Ef til vill eru vesturhlíðar Nesjavalladals að einhverju leyti tilkomnar vegna þessa misgengis.

Annað NA-SV misgengi virðist vera skammt austan Kýrdalshryggjar. Fall á því er til vesturs og kemur því fram á milli þessara tveggja misgengja mjó sigspilda, sem mjókkar til suðurs. Misgengin skerast hugsanlega sunnan við borsvæðið nærrí holu 8, en þar sem sú hola er grunn er ekki nákvæmlega vitað hvoru megin við eystra misgengið hún er (þó ber að merkja að vatnsæðar í holu 8 benda sterkelega til þess, að holan skeri eða sé mjög nærrí, velleiðandi sprungu). Af holum norðar á svæðinu er nær öruggt að hola 4 er innan sigspildunnar og glögglega sést á mynd 5 um 50 m hæðarmunur á milli hola 11 og 16 annars vegar og hola 3, 5, og 7 hins vegar.

Priðja misgengið, sem sést á mynd 5, hefur N-S stefnu og liggar norðanmegin við holu 4, en sunnan við holar 3, 5 og 15. Misgengið sýnir sig um 20-40 m niður til vesturs. Segja má að veikar vísbendingar um þetta misgengi sjáist á yfirborði. Við holur 4, 1 og 2 má sjá þessa stefnu í yfirborðsjarðhitanum, og á mynd 4 sést, eins og áður er vikið að, sprungubrot með þessari stefnu. Nánar verður fjallað um þessa misgengisstefnu í kaflanum um ummyndun.

Um 10 m misfella milli hola 6 og 9 annars vegar og holu 13 hins vegar bendir til þess, að N-S misgengi sé milli þessara hola. Þetta misgengi, sem þannig má aðeins leiða líkur að út frá gögnum úr þremur borholum, hefur fall til austurs og kemur því fram sigdæld milli N-S misgengjanna (mynd 5). Athyglivert er að hlýskeiðshraunlög eru helmingi þykkari í holu 13 en holum 6 og 9 (mynd 5). Líklegt er að sigdældin á milli þessara tveggja N-S misgengja eigi einhvern þátt í því að hraunlagabunkinn varð þetta þykkur við holu 13.

Eins og sést á mynd 5, kemur síðasta hlýskeiðsmyndun ekki fram í holum 14, 15, 2, 4 og 10. Giskað er á að landslag hafi verið hærra við þessar holur, en annars staðar á

borsvæðinu, og hraunlögin því ekki náð að flæða þar yfir. Ekki er unnt af þeirri ástæðu að staðfesta hvort misgengi á þessum aldursflokki skeri berglagastaflann á austurhluta svæðisins.

Til að leita uppi misgengi, sem hreyfst hafa fyrir síðasta hlýskeið, var gengið út frá óhöggudum jarðlagastafla frá síðasta hlýskeiði, þ.e. þau misgengi jöfnuð út. Síðan var könnuð lega hraunlaga frá næstsíðasta hlýskeiði, en því lauk líklegast fyrir um 200.000 árum. Á mynd 6 er sýnt hversu djúpt er niður á þessa hlýskeiðsmyndun í borholunum. Þar er einnig sýnd lega þeirra misgengisbrota, sem gera verður ráð fyrir, að hafi hreyfst á næstsíðustu ísöld, ef hraunlagamundunin hefur verið lárétt í upphafi hennar. Það misgengiskort, sem þannig fæst, er athyglisvert að tvennu leyti: Í fyrsta lagi sést misgengið við Kýrdalshrygg ekki. Því verður að gera ráð fyrir, að sú sprunga hafi ekki verið virk á næstsíðasta jökluskeiði. Í öðru lagi hafa helstu misgengisbrotin N-S stefnu. Annað þeirra, hvort sem um er að ræða eitt stakt eða fleiri misgengi í þyrpingu, hefur um 80-90 m fall til austurs og sést það best á milli hola 3 og 5 annars vegar og hola 6 og 13 hins vegar. Líklega er annað N-S misgengi með um 40-60 m falli til austurs milli hola 3, 5 og 11 annars vegar og hola 7 og 16 hins vegar, en heldur er það byggt á óljósari rökum en það fyrrnefnda.

Austan og sunnan til á svæðinu eru merki um 3 NA-SV misgengi. Þar er fyrst að nefna misgengi á milli holu 14 og hola 9, 10 og 15 með um 40 m falli vestan megin. Annan að er mögulega á milli holu 10 og hola 7 og 5. Hugsanlegt er að það þríðja sé á milli holu 9 og hola 6 og 13 með falli til austurs. Vera kann að þessi þrjú síðastnefndu misgengi séu yngri en næstsíðasta hlýskeið þar sem ekki reyndist unnt að greina misgengi eftir síðasta hlýskeið á austurhluta svæðisins, vegna þess að engin hraun frá þeim tíma fundust í borholum þar.

Að síðustu er rétt að geta þess að lausleg athugun á jarðlöögum í holu 17 í Kýrdal bendir til þess að áberandi brot sé á milli hennar og holu 12. Fjallað verður frekar um þann

möguleika í kafla 5.

Eins og sést á þversniðunum á myndum 2 og 3 þá virðast sum misgengin verða stærri er neðar kemur í berglagastaflann. Hugsanlegt er að ástæðan sé sú að þau hafi verið virk í langan tíma eða þá að innskotin sem fleyga staflann neðan u.p.b. 700 m dýpis auki á misræmið í dýpi á upphleðslueiningarnar.

2.3 Innskot

Inniskot hafa verið flokkuð í öllum holum, sem boraðar hafa verið á Nesjavöllum eftir 1982, og hefur verið gerð grein fyrir tíðni þeirra og berggerð (þ.e. í lokaskýrslum um einstakar holur allt frá holu 6 til og með holu 18). Í skýrslu um holu 7 (Hjalti Franzson og Hilmar Sigvaldason, 1985b) var inniskotunum skipt í þrjá meginflokkka, þ.e. ferskleg basaltinnskot, ummynduð basaltinnskot og ísúr inniskot. Þessi flokkun inniskotanna hefur haldist að mestu óbreytt síðan og verður svo einnig í þessari skýrslu. Vegna þess að vatnsæðar hafa oft komið fram við inniskot í borholum á Nesjavöllum verða þeim gerð nokkur skil hér.

2.3.1 Basaltinnskot

Á mynd 7 er sýnt hlutfall innskota fyrir hvert 100 m dýptarbil í þeim holum, sem nái vel niður fyrir 1000 m dýpi, (að undanskilinni holu 5). Hægra megin á myndinni er svo heildarhlutfall innskota í öllum holunum sýnt. Ísúr inniskot eru skástrikuð. Samkvæmt því er unnt að skipta berggrunninum í a.m.k. þrjú dýptarbil.

- I. Ofan 700 m dýpis eru inniskot mjög fátið eða innan við 3% af berglagastaflanum. Engin inniskot finnast ofan 300 m dýpis í borholunum og fyrstu inniskotin sjást á 300-500 m dýpi syðst á svæðinu (holur 13 og 14).
- II. 700-1500 m. Inniskot á þessu dýptaribili eru að meðaltali um 20% af berglagastaflanum. Dreifing þeirra í einstökum borholum, er að vísu nokkuð breytileg, og koma fram í öllum borholunum (nema e.t.v. holu 15) staðir, þar

sem hlutfall innskota er tiltölulega hátt.

- III. 1500-2300 m. Þegar komið er niður á 1500-1600 m dýpi gætir innskotabergs miklu meira, og hækkar hlutur þess í um eða yfir 60% af berglagastaflanum. Neðan 2000 m dýpis eykst það síðan í yfir 80%. Hafa verður þó í huga, að aðeins þrjár borholanna á Nesjavöllum ná niður fyrir 2000 m dýpi og aðeins ein þeirra nær vel niður fyrir 2100 m dýpi (hola 11 er 2265 m djúp).

Ákveðnar breytingar verða á basaltinnskotum með dýpi og einnig með vaxandi fjarlægð frá Hengli. Basaltinnskotin í efri hluta berggrunnsins eru yfirleitt minna ummynduð en þau, sem dýpra liggja. Fín- til meðalkornótt basalt er ráðandi í innskotum efri hlutans, en neðan um 1400 m dýpis verða innskotin grófkornótt (dólerít). Meðalþykkt innskota ofan 1400 m dýpis er um 5,5 m. Þegar neðar kemur og innskotin verða fleiri taka þau að fleyga hvært annað og er því erfðara að meta þykkt einstakra innskota. Þó má ætla útfrá fyrirliggjandi gögnum að þykkt þeirra sé að meðaltali allt að helmingi meiri en innskotanna ofan 1400 m dýpis. Taka verður fram í þessu tilviki að þykkt innskots mælt í borholu er í flestum tilvikum meiri en raunveruleg þykkt þess, nema að holan liggi þvert í gegnum innskotið.

Á N-S þversniði á mynd 8, sem er sama þversnið og mynd 3, er sýnd dreifing basaltinnskota sem %-hlutfall af berglagastaflanum (yfir hvert 100 m dýptarbil) og tengt á milli holanna á sem einfaldastan máta. Sú mynd sem kemur fram við slíka tengingu bendir eindregið til þess að innskotin séu að hluta laggangasveimur(-ar) sem hallar um $20\text{--}30^\circ$ til suðurs undir Henglinn. Svo virðist sem neðri totunum halli ívið meira en þeim sem ofar liggja. Ef innskotin eru eldri en misgengin sem fleyga staflann myndi það leiða til þess að halli innskotanna til suðurs ykist um u.p.b. 10° .

Í þessu sambandi er fróðlegt að íhuga hvernig fersklegu basaltinnskotin liggja í berggrunninum, en stór hluti allra innskota ofan u.p.b. 1400 m dýpis tilheyra þeim

flokki. Mörg þeirra eru mjög einsleit að gerð, og eru líklega hluti af sama innskotafasa í sögu Hengilseldstöðvarinnar. Í þunnsneið eru þessi innskot auðþekkjanleg. Þau eru fínkorna, jafnkorna (equigranular), magnetít málmurinn jafndreifður og oft í tveimur stærðum, og síðan er töluvert af ólivíni í grunnmassanum. Innskotin hafa oft valdið erfðoleikum í borun vegna þess að molar úr þeim hafa fallið inn í borholurnar og fleygað borstrenginn fastan. Vatnsæðar, sumar hverjar mjög vatnsgæfar, eru tengdar þessum innskotum. Sú nær láréttta tota sem liggur á um 800-1000 m dýpi og sýnd er á mynd 8 er að langmestu leyti vegna þessara innskota og virðist næsta augljóst að þau séu fremur hallalitil. Þar sem þessi innskot gegna mjög þýðingarmiklu hlutverki í vatnsgengd í Nesjavallakerfinu er nauðsynlegt að gera nánari könnun á útbreiðslu þeirra í berglagastaflanum. Ef mögulegt reyndist að tengja þau einhverjum þekktum atburði í sögu eldstöðvakerfisins í Hengli, yrði það mikill þekkingarauki um eðli og uppruna háhitakerfisins. Talið er að þessi innkot séu jarðfræðilega mjög ung, og er það byggt á því hve vatnsæðar eru algengar við innskotin, hvað þau eru hrungjörn, og síðast en ekki síst hvað þau eru lítið ummynduð, þrátt fyrir svo augljós tengsl við háan hita og vatnslekt.

Það sem ef til vill styður enn frekar þá tilgátu, að a.m.k. umtalsverður hluti basaltinnskotanna séu laggangar er að ísúru innskotin sem nefnd eru hér fyrir neðan hafa líklega mjög svipaðan halla og þessi basaltinnskot sem bendir a.m.k. til að spennusvið skorpunnar í Hengilseldstöðinni sé eða hafi verið hliðholl slíkri gerð innskota.

2.3.2 Ísúr innskot

Hlutfall ísúrra innskota í borholum á Nesjavöllum er sýnd á mynd 7. Grynnst greinast ísúr innskot á 800-900 m dýpi og finnast síðan á öllum dýptarbilum þar fyrir neðan, eins djúpt og borholurnar ná, þótt í misjöfnum mæli sé. Ofan 2000 m dýpis er mest um ísúr innskot á 1400-1500 m dýpi, þar sem þau eru um 15% af berglögum. Hola 11 er

eina holan, sem nær vel niður fyrir 2000 m dýpi. Þar eru ísúr og súr innskot talin um fjórðungur berglaga á 2100-2200 m dýpi.

Ísúru innskotin eru misþykk. Mest er þykktin á 1400-1600 m dýpi í flestum borholunum, þar sem þau mælast allt að 40 m þykk. Meðalþykkt tæplega 40 ísúrra innskota er um 12 m. Algengt er að vatnsæðar komi fram í holum á Nesjavöllum við þessi innskot, og eru æðarnar einna gjöfulastar, þar sem innskotin eru þykkust.

Ljóst er að ísúrum innskotum fækkar til norðurs, t.d. eru þau mun færri í holu 18 en í borholum sunnar á borsvæðinu. Einnig eru innskotin fínkornóttari í efri hluta berglagastaflans en í þeim neðri.

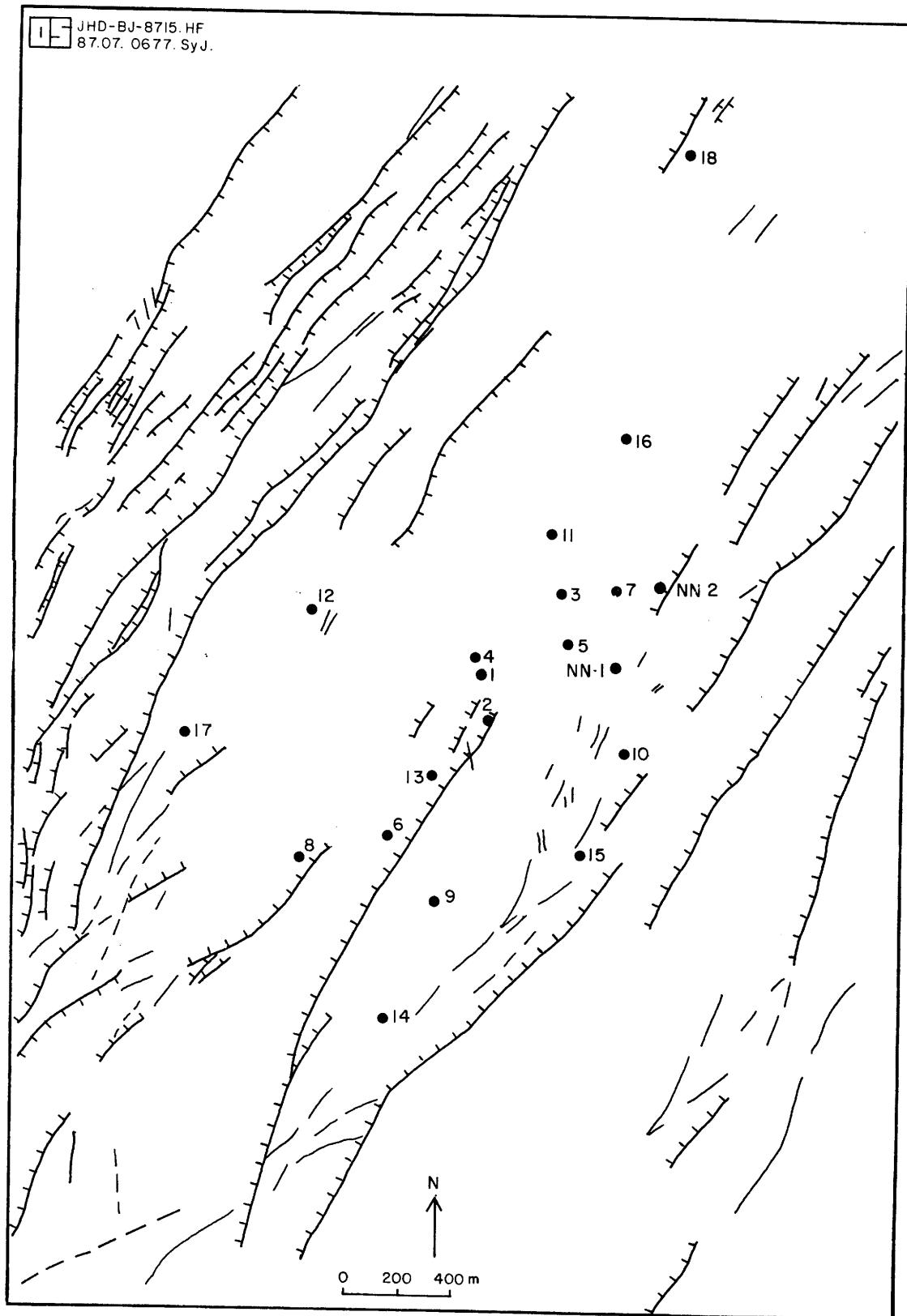
Gerðar hafa verið allmargar þunnsneiðar af borsvarfi úr þessum innskotum, auk þess sem moli af ísúru bergi náðist fyrir tilviljun í kjölfar borfestu í holu 15. Þá er hluti neðsta borkjarnans úr holu 17 úr ísúru innskoti. Næsta öruggt er að innskotin eru öll ættuð af sama meiði. Þau hafa mjög svipaða kristallagerð. Má þar nefna staka "kúbískíska" járnóxið kristalla, pyroxen, sem gjarnan hafa fremur ɻanga lögum, kvars og feldspat er algengt, og í sumum tilvikum er unnt að greina "perthitic" strúktúr. Mjög einkennandi er að finna apatít nálar í kvarsinu og feldspatnum, sem hluta af "prímera strúktúnum". Nokkuð er kristöllun bergsins breytileg, og fer það eftir þykkt innskotsins. Eins og lýst er í kafla 3 þá er jarðhitaummyndun ísúru innskotanna mjög sérstæð og er það í sjálfu sér sterkt vísbending um það að sama jarðhitavirkni hafi átt sér stað eftir að þau trúðust inn í berglagastaflann og á þann hátt óbein vísbending um að þau tilheyri sama innskotafasa í sögu svæðisins.

Díorítmoli, sem náðist eftir festu í holu 15 er mjög áberandi stuðlaður (< 10 cm í þvermál). Yfirborð stuðlanna virtist þó ekki sýna meiri ummyndun sem bendir til að enginn leki eigi sér stað eftir stuðlunarflötunum.

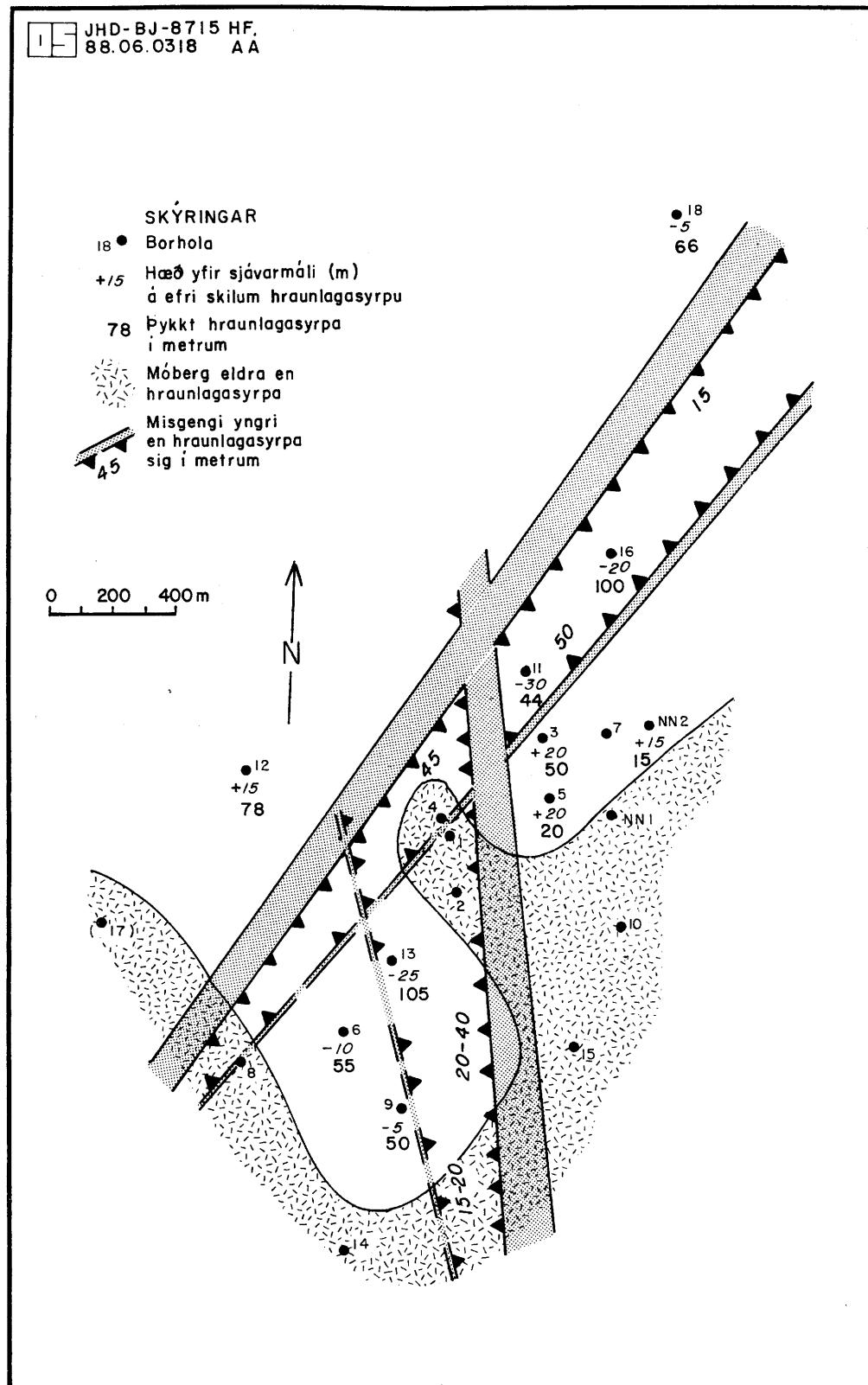
Reynt hefur verið að tengja vel afmarkaða ísúra innskotakfla á milli hola, til að sjá hvernig innskotin liggja í berggrunninum. Á

myndum 9 a og b er sýnd niðurstaða þessara athugana. Í efri hlutanum hallar innskotunum um 14° til suðurs. Dýpri innskotum hallar sömuleiðis til suðurs, en halli þeirra virðist heldur meiri, eða um 24° . Í þessum útreikningum var ekki tekið tillit til misgengja, sem hliðra upphleðslueiningum, enda er ámóta djúpt á innskotin austan og vestan til á svæðinu.

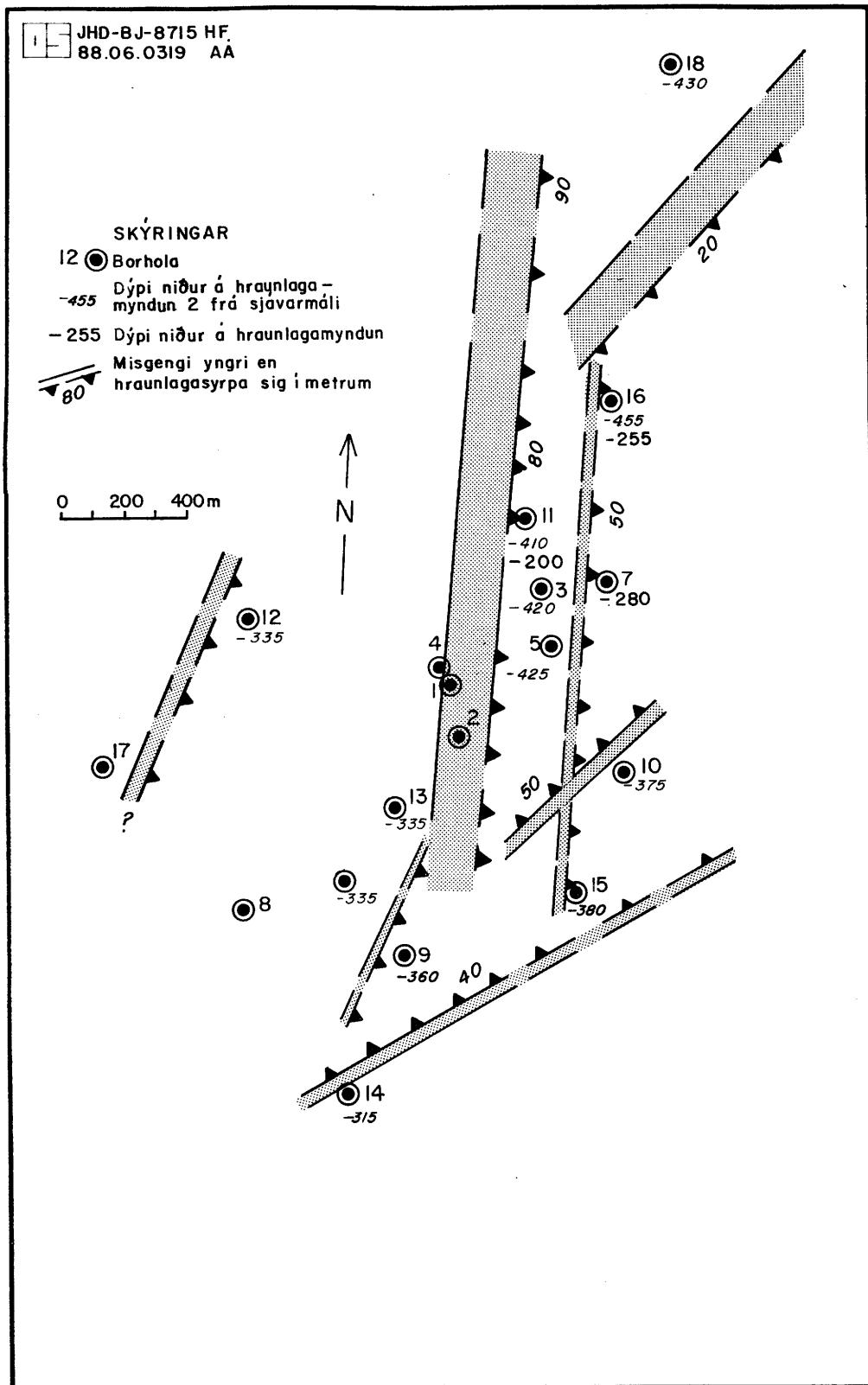
Mjög sennilegt er talið að fersku basaltinnskotin, sem fjallað var um hér að framan, séu enn yngri en ísúru innskotin. Er það byggt á því, að þar sem báðar þessar innskotagerðir finnast "samliggjandi" í borholunum sé ummyndun ísúru innskotanna miklu meiri. Einnig hefur basaltið fundist innan ísúra innskotsins, sem bendir til að það fyrرنfnda hafi skotist inn og klofið það ísúra.



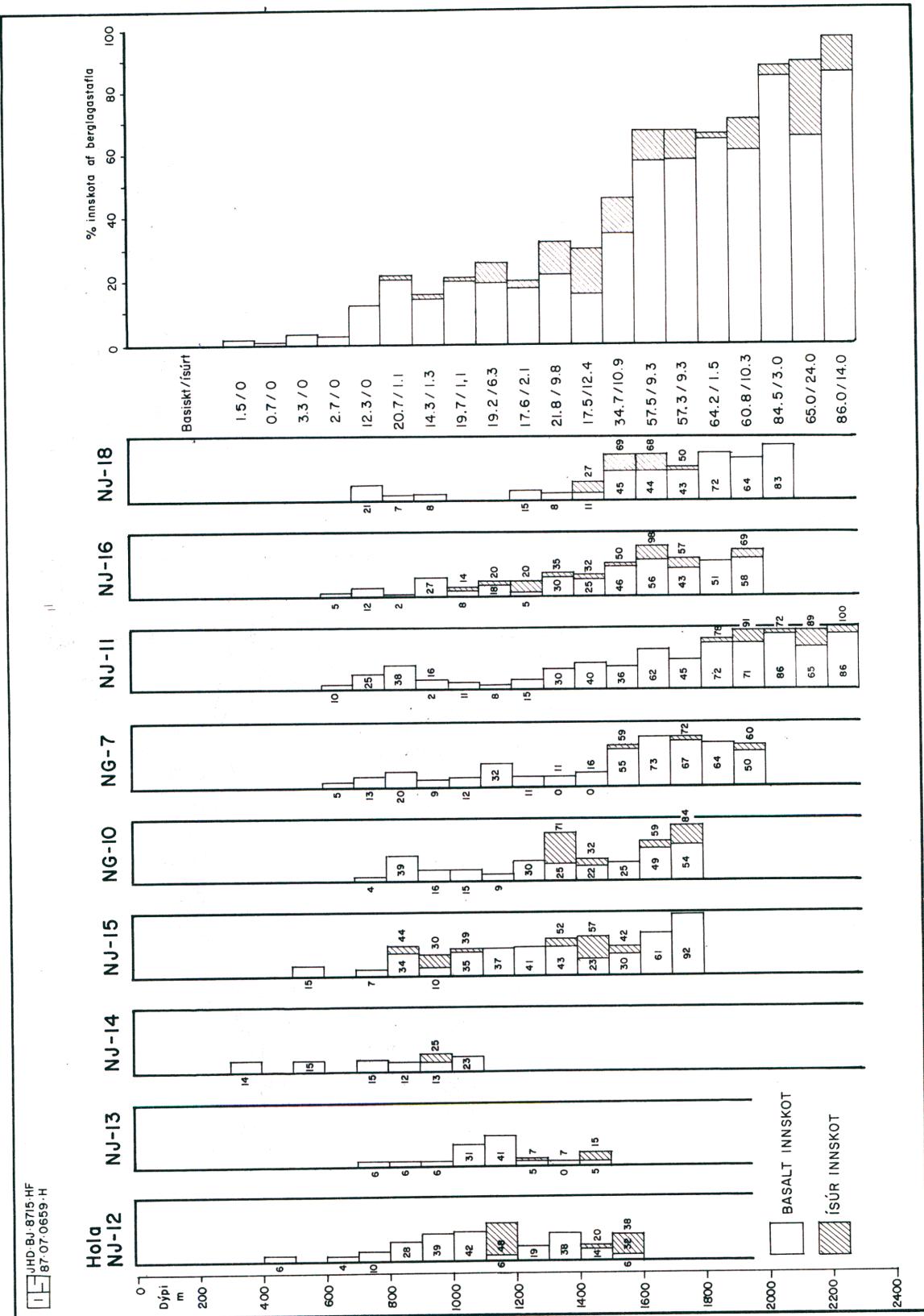
MYND 4. Misgengi og sprungur á yfirborði samkvæmt rannsóknum Knúts Árasonar o.fl. (1986).



MYND 5. Misgengi yngri en 115.000 ára á grundvelli borholugagna.

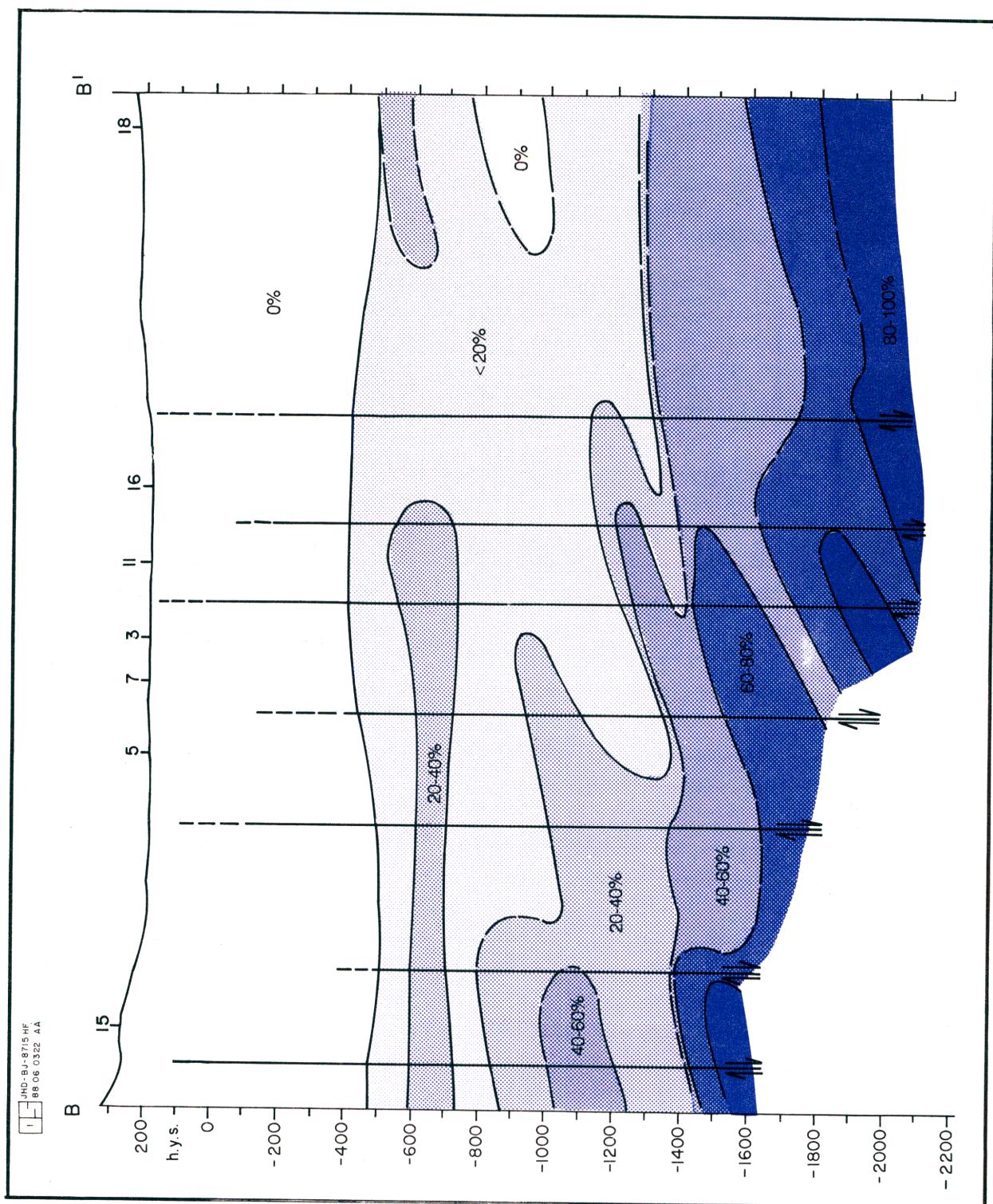


MYND 6. Misgengi yngri en 200.000 ára á grundvelli borholugagna.

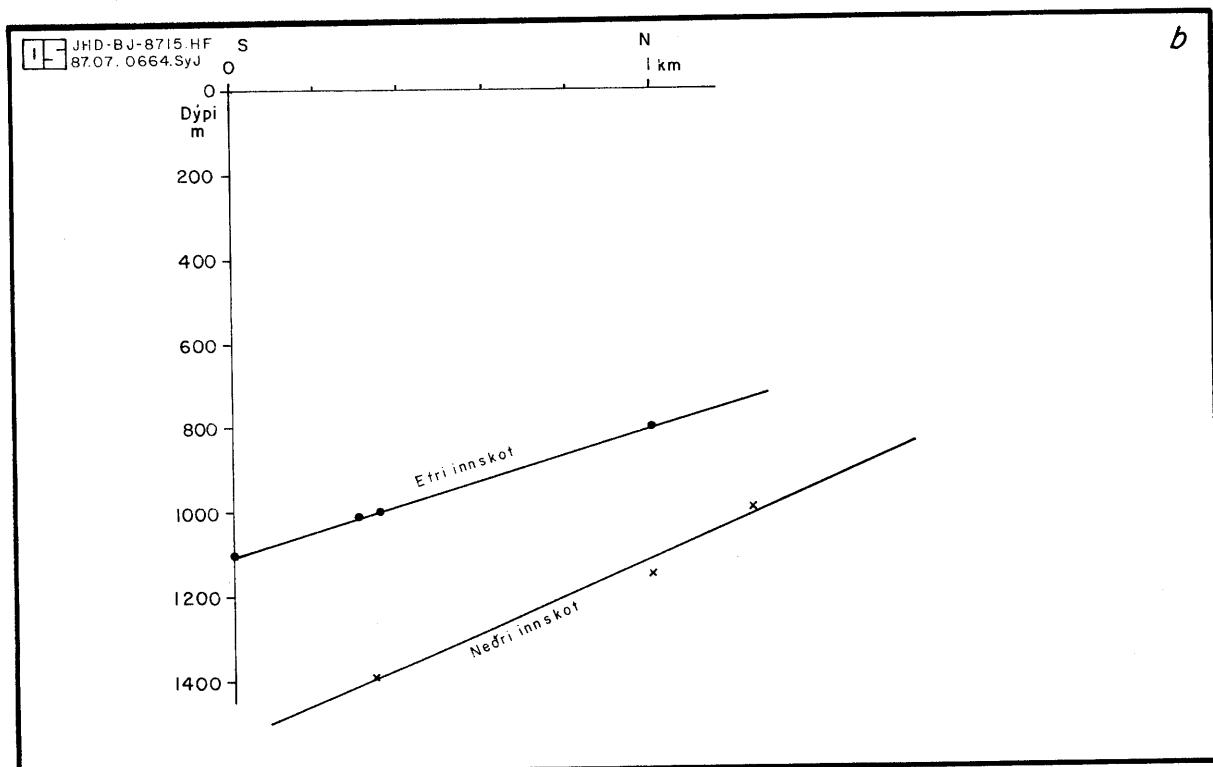
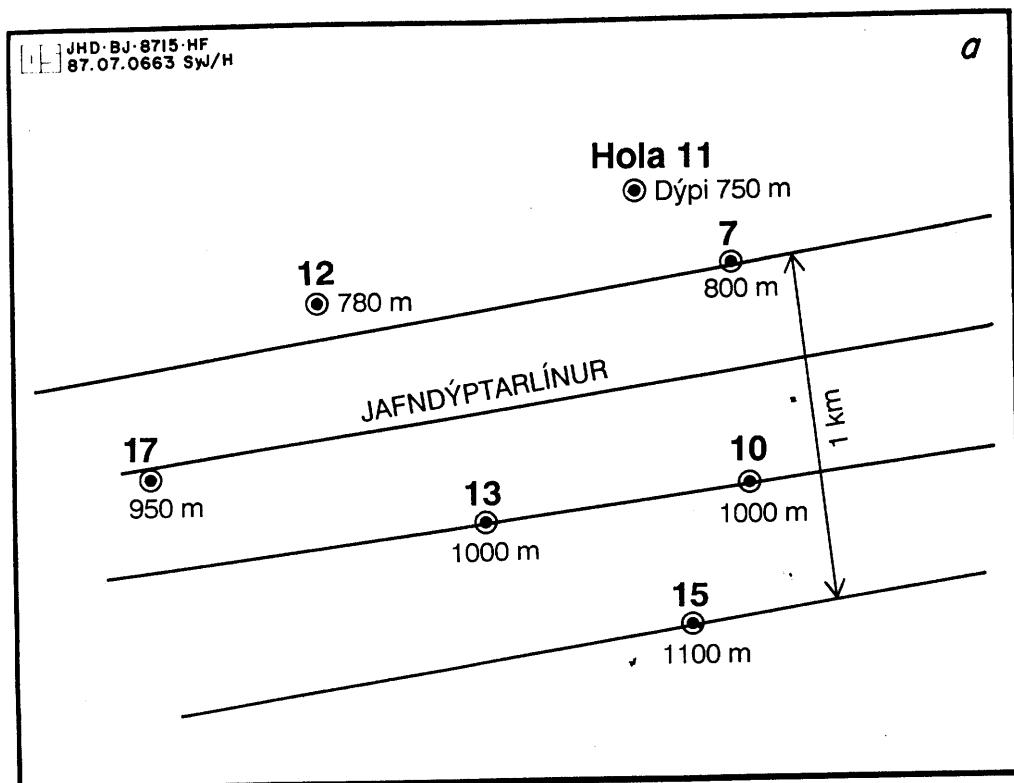


MYND 7. Hlutfall innskota í berglögum borhola á Nesjavöllum.

JHD-BJ-8715-HF
87-07-0659-H



MYND 8.N-S þversnið (sbr. B-B' á mynd 1) sem sýnir hlutfall inniskota í berglögum Nesjavalla.



MYND 9. a) Jafndýptarlínur niður á efri díorít innskotin. b) Þversnið sem sýnir dýpi niður á efri og neðri díorít innskot. Þversnið er tekið þvert á jafndýptarlínur á mynd a).

3. UMMYNDUN

Rannsókn á ummyndun bergs á Nesjavöllum hefur á undanfönum árum beinst að eftirfarandi þáttum:

- Mati á líklegri hitadreifingu í jarðhitageyminum út frá hitaháðum ummyndunardeindum.
- Mati á bergummyndun og útfellingum til að fá vitneskju um vatnsrásir í jarðhitakerfinu.
- Könnun á röðun útfellinga í tíma og rúmi til að greina breytingar í jarðhitakerfinu, og komast sem næst númerandi ummyndunarástandi kerfisins.

Um alla þessa þætti hefur að einhverju leyti verið fjallað í skýrslum um einstakar borholur á Nesjavöllum. Hér verður hins vegar reynt að draga saman meginniðurstöður rannsóknanna og draga fram heildarmynd af ummyndun svæðisins.

3.1 Próun ummyndunar

Rannsakað hefur verið nokkuð ítarlega hvernig ummyndunarsteindir raða sér í tíma og rúmi í blöðrum og sprungum í bergi á Nesjavöllum. Niðurstöður þeirra athugana hafa m.a. sýnt fram á tilveru tveggja ummyndunarskeiða í efri hluta jarðhitakerfisins. Fyrra skeiðið einkennist af zeólítum, en það síðara, sem yfirrentar það fyrra, einkennist af daemigerðum háhitasteindum. Mjög óvanalegt er að finna zeólíta við jafn háan hita og nú ríkir í Nesjavallakerfinu, þar sem þetta eru steindir, sem eru að jafnaði mjög viðkvæmar gagnvart hita um og yfir 200°C. Nærtækasta skýringin hvað Nesjavelli varðar, er sú, að líklega sé efri hluti jarðhitakerfisins enn það ungar, að zeólítnir hafa ekki enn náð að umbreytast. Til að sýna þann mismun í ummyndunarhita, sem ríkt hefur á þessum tveimur jarðhitaskeiðum, eru á mynd 10 teiknaðir "hitaferlar" fyrir nokkrar Nesjavallaholur. Hafa ber það í huga, að dýpst punkturinn, sem skilgreinir lághitaskeiðið (þ.e. dýpstu mörk lámontíts), gæti legið enn dýpra, þar sem

síðari tíma háhitavirknin í berggrunninum hefur vafalaust ummyndað steindina þar. Lághitakerfið hefur því hugsanlega náð enn dýpra en sést á mynd 10. Í holu NJ-18, sem er nyrst á borsvæðinu, finnst lámontíts allt niður á botn holunnar á um 2100 m dýpi. Þetta sýnir að hitastigull í lágitakerfinu þar hefur tæplega verið meiri en ~ 100°C á kílómetra.

Það sem er þó athyglisverðast við ferlana á mynd 10 er, að í mörgum tilfella eru lághita- og háhitakerlar einstakra hola mjög svipaðir í laginu, nema að háhitakerillinn hefur hnikast til haerri hita. Eins og fram kemur síðar í umfjölluninni um ummyndunarbelti, þá er ljóst að ummyndunin er mjög samstíga lektinni í berglögunum (sbr. mynd 24). Pessi samsvörun í lögun hitakerlanna er því unnt að túlka á þann veg að háhitakerfið hafi í öllum meginatriðum notað sömu rennslisrásir og eldra lághitakerfi.

Í neðri hluta jarðhitakerfisins er röðun útfellinga flóknari og nokkuð víst að þar hafa tvö eða fleiri háhitakerfi átt leið um. Rannsókn í holu 7 leiddi í ljós að elzta sjáanlega háhitakerfið varð virkt með tilkomu diórítinnskotanna. Frekar verður fjallað um aldursröð vatnsleiðara Nesjavallakerfisins í kafla 5.

3.2 Ummyndunarbelti

Á myndum 12, 13, 14 og 15 eru sýnd nokkur ummyndunarþversnið af Nesjavöllum, en lega þessara þversniða er sýnd á mynd 11. Byggt er á gögnum úr öllum borholunum nema holum 1, 2, 4 og 17.

Á þversniðunum er greint á milli alls sjö ummyndunarstiga eða belta. Það efsta einkennist af því að þar er engin jarðhitaummyndun, en síðan koma smektít-zeólítabeltið (<200°C), blandlagabeltið (200-230°C), klórítbeltið (230-250°C), klórít-epidótbeltið (250-280°C), epidót-amfibólítbeltið (280-330°C) og loks amfibólítbeltið (>330°C), sem finnst neðst í dýpstu holu Nesjavalla, NJ-11.

Pversniðin sýna, að mjög er breytilegt hversu djúpt er á ummyndunarbeltin og

virðist það stjórnast að nokkru af rennslisleiðum jarðhitavökvans í kerfinu. Þversnið C-C' (mynd 14), sem liggur þvert yfir suðurhluta Nesjavallasvæðisins (þ.e. frá holu 14 yfir til holu 8 og þaðan í holu 12), sýnir ráðandi uppstreymisrás jarðhitavökvans nálaegt holu 8 og aðra austan holu 14. Vestari ummyndunarrásin er næri holu 8 við Kýrdalshrygg, þar sem klórít finnst grunnt í kerfinu. Eystri jarðhitarásin virðist liggja næri holum 14 og 9 en fjær holu 6. Þetta má greina á grundvelli minnkandi ummyndunar í lekum berglagaskilum á milli móbergsmyndana í þessum holum. Líklega er eystri jarðhitarásin tengd yfirborðsjarðitanum í Köldu- og Nesjalaugargili. Í A-V þversniðum, sem tekin eru norðar á svæðinu (snið D-D' og B-B') er eystri jarðhitarásin horfin að mestu samkvæmt ummyndun, en vestari rásirnar koma áfram skýrt fram. Á því þversniði (B-B') kemur fram fleiri hundruð metra stallur í ummyndun milli hola 3 og 7; t.d. finnast blandlagasteindir ekki fyrr en á um 800 m dýpi í holu 7. Einnig snardýpkar á ummyndunarbeltin norðan við brekku-brúnina eins og sést í þversniðinu á milli hola 9 og 15 (mynd 12) þar sem blandlagabeltið lækkar um eina 600-700 m til norðurs.

Neðan um 2100 metra dýpis í holu 11 mældist yfir 380°C hiti, og kom(u) þar inní holuna vatnsæð(ar) með yfir 200 bar þrýsting. Ummyndunarrannsóknir sýndu að á þessu dýpi er líklegt að komið sé í amfibólítbelti. Nýjar rannsóknir (Halldóra Hreggvíðsdóttir, 1987) staðfesta þær niðurstöður.

Beltaskipting ummyndunar á Nesjavöllum gefur athyglisverða mynd af jarðhitum. Ummyndunarbeltunum ofan u.p.b. 1000 m dýpis virðist stjórnæð af vatnsleiðni eftir lóðréttum brotum, sem síðan leiða vatnið inn í "lárétt" lagskil upphleðslueininga. Neðan 1000 m er beltaskiptingin hins vegar nokkurn vegin lárétt. Það er mjög í samræmi við legu vatnsæðanna sem borholurnar skera í berggrunninum, en þær eru flestar tengdar nokkurn veginn láréttum innskotum.

3.3 Efri mörk ummyndunarsteinda

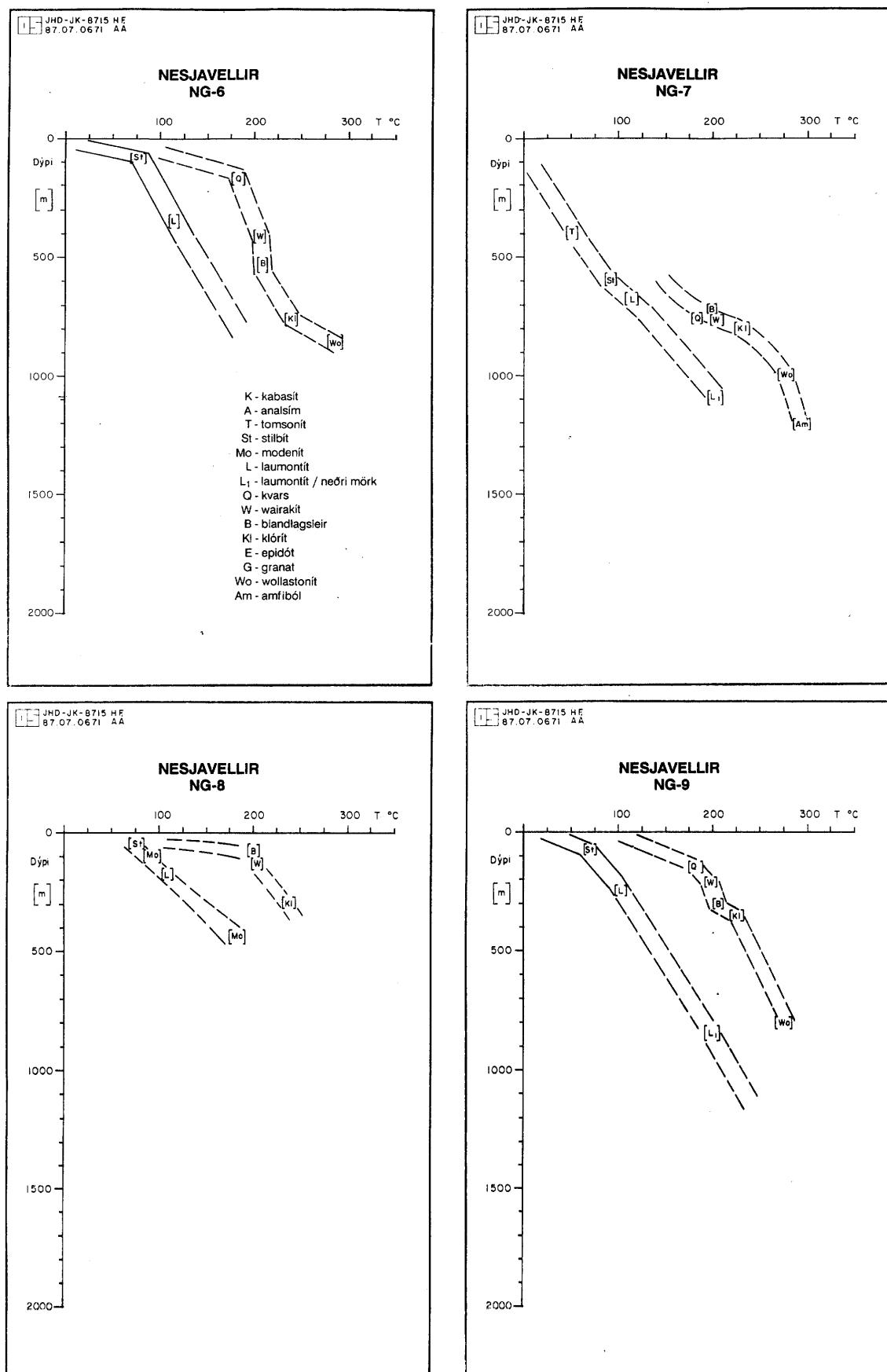
Á mynd 16 er sýnt dýpi á efri mörk margra þeirra ummyndunarsteinda sem finnast í jarðhitakerfi Nesjavalla. Dýptarlínurnar eru dregnar á grundvelli tölvuforrits, og eru gagnapunktarnir, sem línumnar eru dregnar eftir, fyrstu öruggu fundarstaðir viðkomandi steindar í einstökum holum. Tekið hefur verið tillit til hvar ummyndunarsteindir finnast í holum 1, 2 og 4 eftir lauslega endurskoðun á gögnum úr þeim holum. Þessar síðastnefndu holur voru ekki teknar með við gerð ummyndunarþversniðanna hér að framan og því ekki fullkomíð samræmi á milli dýptarkortanna og þversniðanna. Taka verður nokkurt mið af því í túlkun dýptarkortanna, að holurnar (gagnapunktarnir) eru ekki alveg jafnt dreifðar um svæðið, auk þess sem þær eru misdjúpar, sem einnig veldur fækkan gagnapunkta fyrir þær steindir, sem myndast tiltölulega neðarlega í jarðhitakerfinu.

Flest dýptarkortin á mynd 16 sýna greinilega, að tvær NA-SV jarðhitalínur eru á suðurhluta svæðisins; sú vestari eftir Kýrdalshrygg, en sú eystri við holar 9 og 14. Holur 6 og 13 liggja á milli þessara rás. Síðarnefnda rásin gæti verið tvískipt; annars vegar sú sem samsvarar yfirborðsjarðitanum í Nesjalaugagili, og hins vegar rás fyrir Köldulaugargili. Það kemur einnig fram á flestum kortanna, að eystri rásin (rásirnar) nær aðeins rétt fram að Brekkubrún. Hugsanlega má þó sjá merki um þessa rás skammt fram í Nesjavalladalinn í hæðarlínnum lámontíts, kvars, prenits og svellandi klóríts. Það er eftirtektarvert, að eystri rásin virðist enda á svipuðum slóðum og gert er ráð fyrir N-S misgengi á mynd 5 og fjallað er um í kafla 2.2 hér að framan. Má vera að þetta misgengi loki jarðhitarásinni til norðurs. Ef enn fremur er borin saman lega misgengja á mynd 5 og ummyndun og yfirborðsjarðiti á Nesjavöllum, sést að jarðhitinn við holu 4 sem glöggt kemur fram í ummyndunarkortunum er þar sem vestara N-S misgengið á mynd 5 liggur að Kýrdalsprungunni. Þar sem eystra misgengið sker

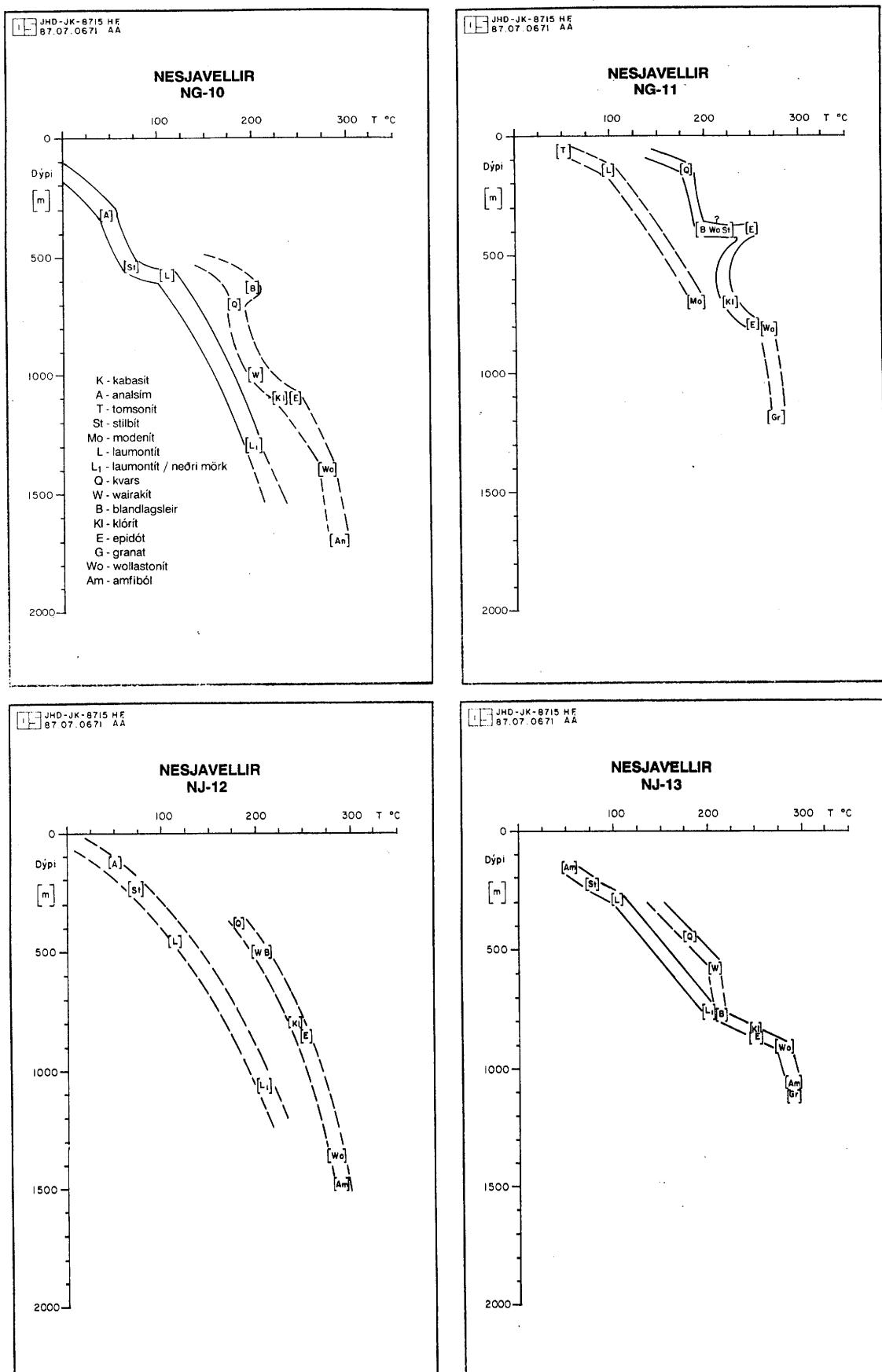
Kýrdalssprunguna er einnig grunnt á ummyndun, enda þótt ekki sjáist jarðhiti á yfirborði. Þar er hins vegar áberandi viðnámslægð (Knútur Árnason o.fl., 1986).

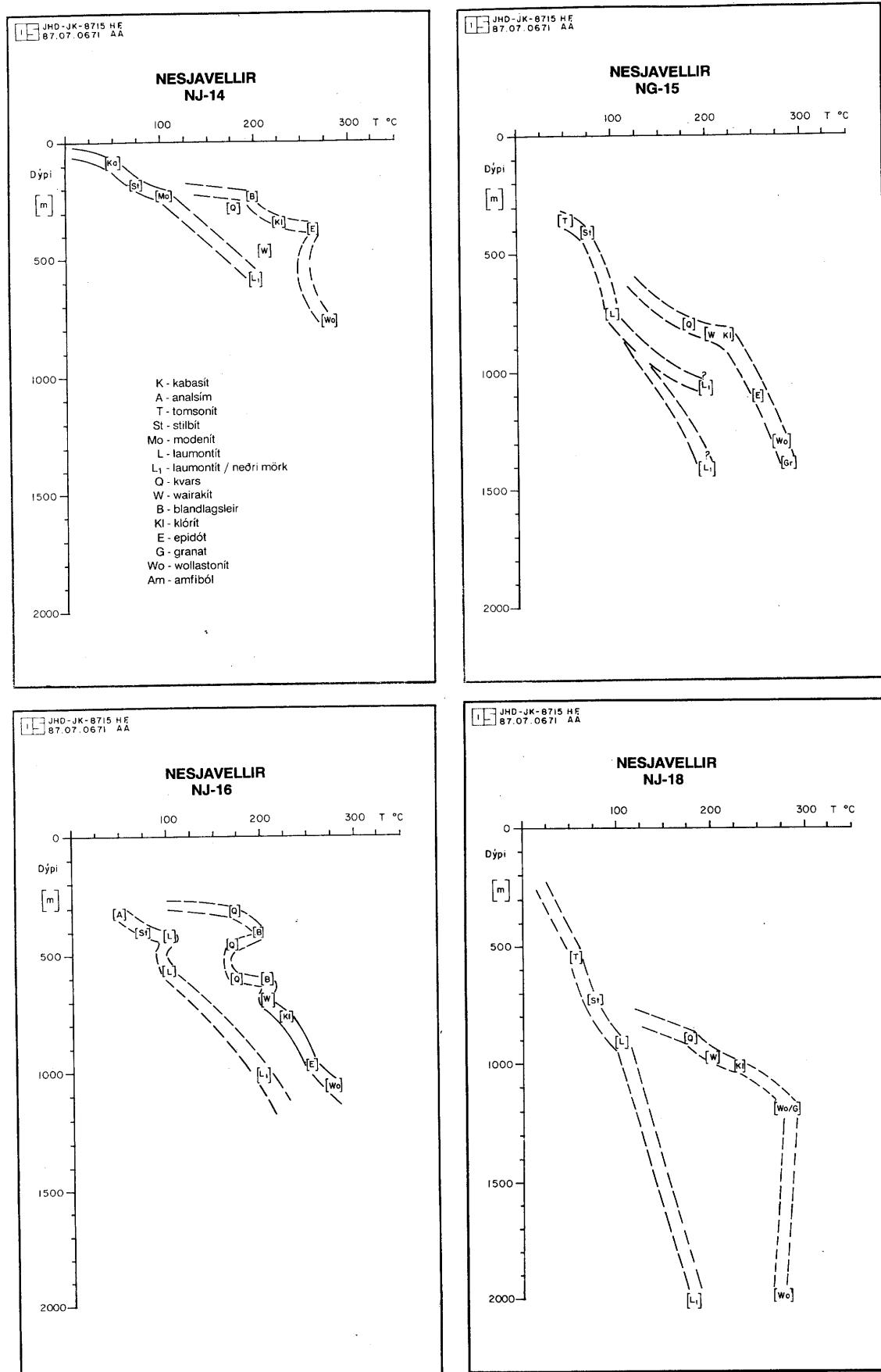
Á myndum 17a og b eru sýndir þeir "hryggir" sem koma fram í myndunum á mynd 16, og er myndin tvískipt, þar sem á mynd 17a getur að lita hryggi sem koma fram í zeólínum stilbíti og laumontíti, en þeir tilheyra eldra ummyndunarskeiðinu. Á síðari myndinni eru dregnir hryggir sem koma fram í steindunum kvarsi, wairakíti, albíti, prenítí, klóríti og blandlagsleir, en þær steindir tilheyra þeim hópi sem síðast hafa myndast í jarðhitakerfinu. Samanburður þessara tveggja mynda gefur sterklega til kynna að sömu rennslisstrúktúrar komi við sögu, og þar með er mjög líklegt að aldur eldra kerfisins sé samtíma eða yngra en misgengin frá síðasta jökluskeiði, eða < 115.000 ár (kafli 2). Það er einnig athyglisvert að sumar steindir benda til streymis jarðhitans í norður út frá Kýrdalssprungunni að einhverju leyti í beinu framhaldi af áðurnefndri N-S jarðhitarás.

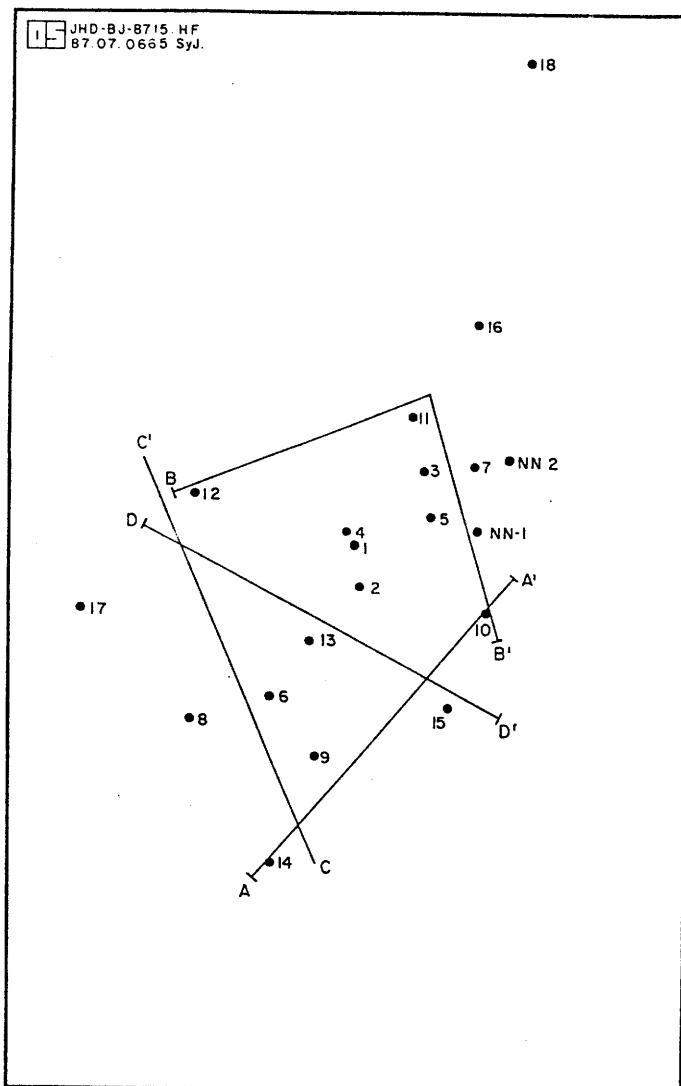
Þegar borinn er saman yfirborðsjarðhiti á borsvæðinu annars vegar og hins vegar lega misgengjanna, sem leiða jarðhitann, kemur fram nokkur skyldleiki. Mynd 17 bendir til, að þar sem jarðhitinn í Köldulaugargili og Nesjalaugargili kemur fram skerist N-S misgengi og sprungur (misgengi) með N-A-SV stefnu. Yfirborðsjarðhitinn nærri holum 1, 2 og 4 fellur saman við skurðflót N-S brotsins og Kýrdalshrygginn. Það er því unnt að álykta að þar sem N-S og NA-SV misgengi skerast opnist greið leið fyrir jarðhitavökvan upp í efri hluta berglagastaflans og jafnvel allt til yfirborðs. Fjallað verður betur um þessa hugmynd í kafla 5.



MYND 10. Ummyndunarhiti í borholum á eldra (zeólíta-) og yngrar (háhita-) jarðhitaskeiði

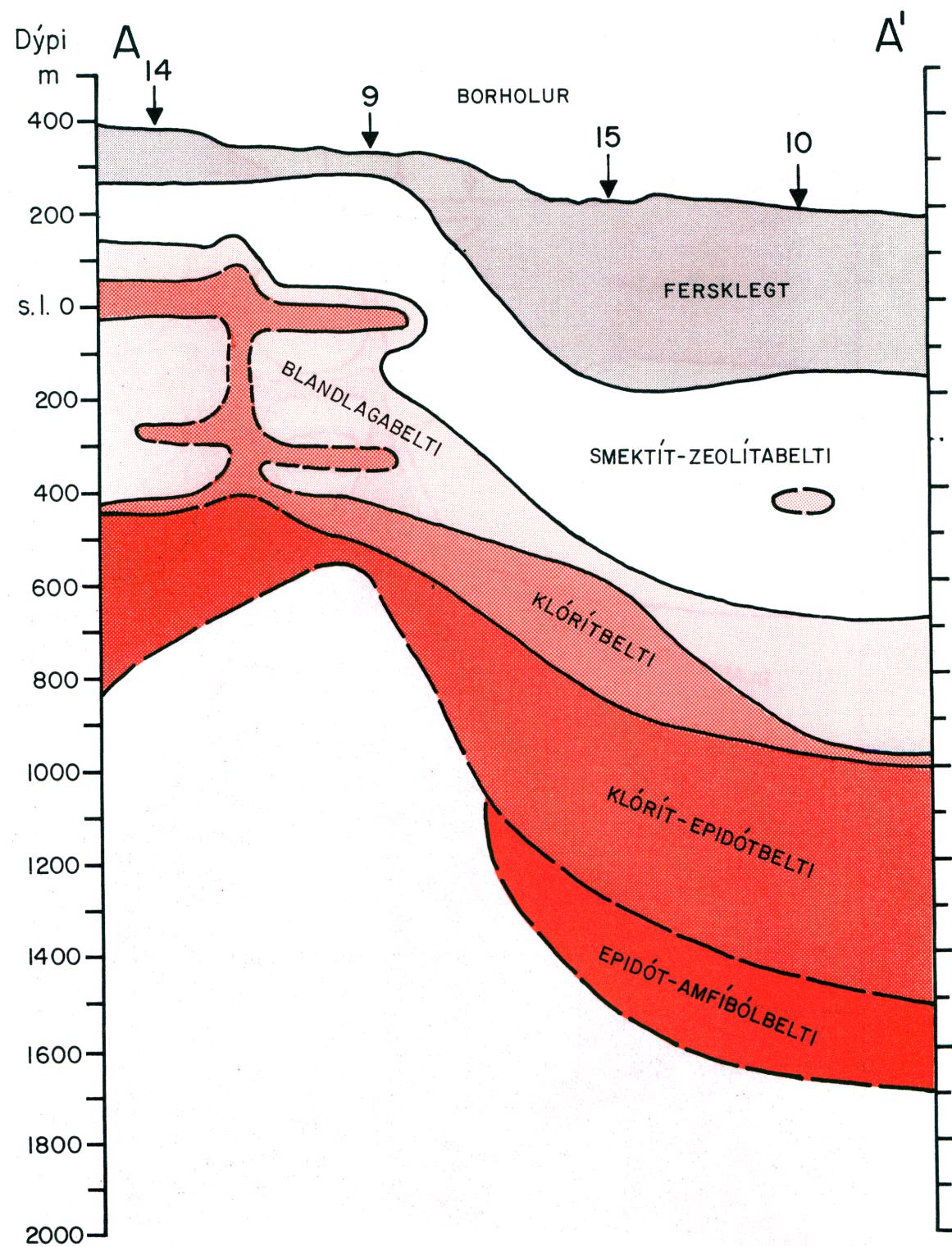




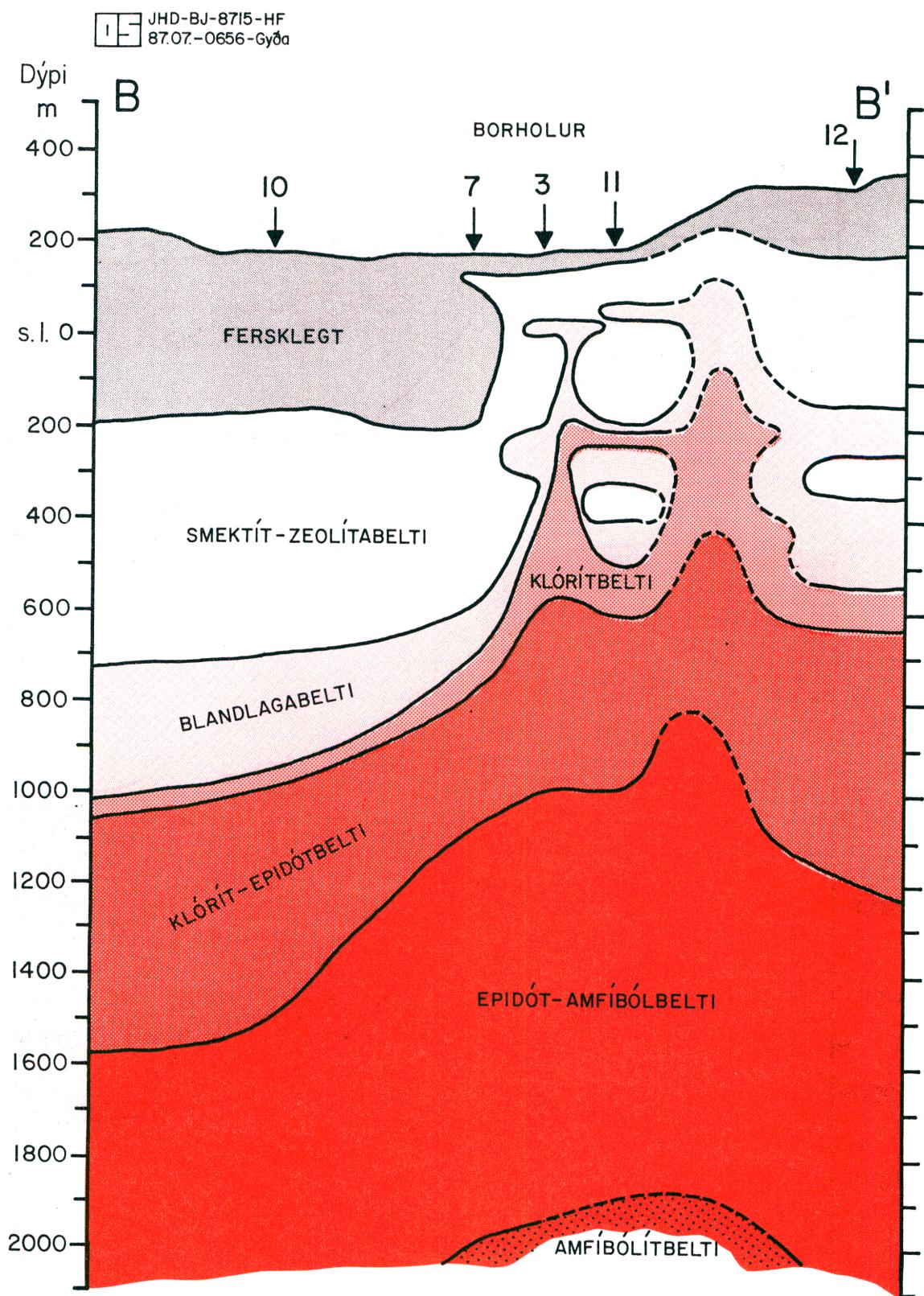


MYND 11. Borholur og staðsetning ummyndunarþversniða (myndir 12-15).

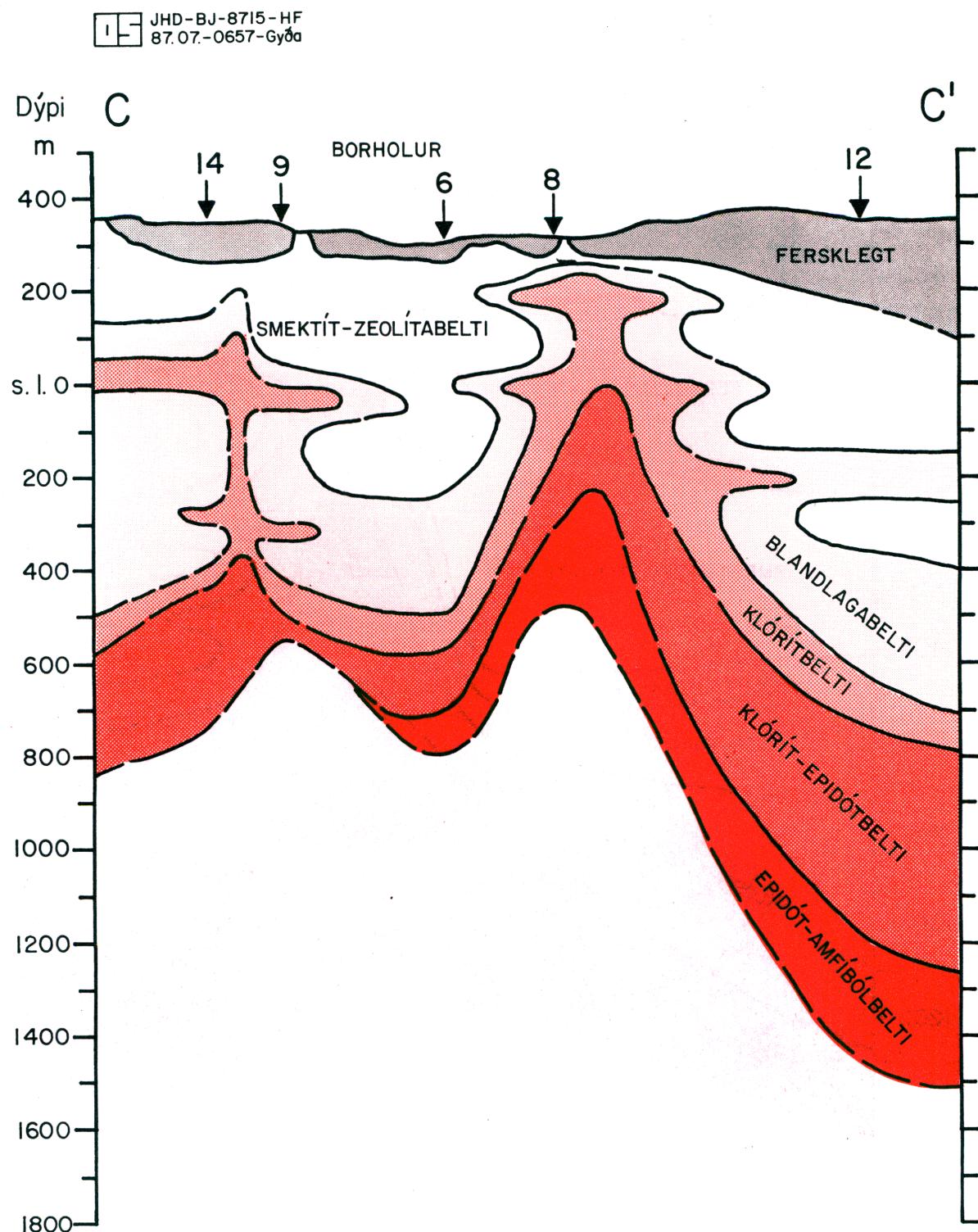
JHD-BJ-87I5-HF
87.07.-0655-Gyða



MYND 12. Ummyndunarsnið A-A' (sbr. mynd 11).

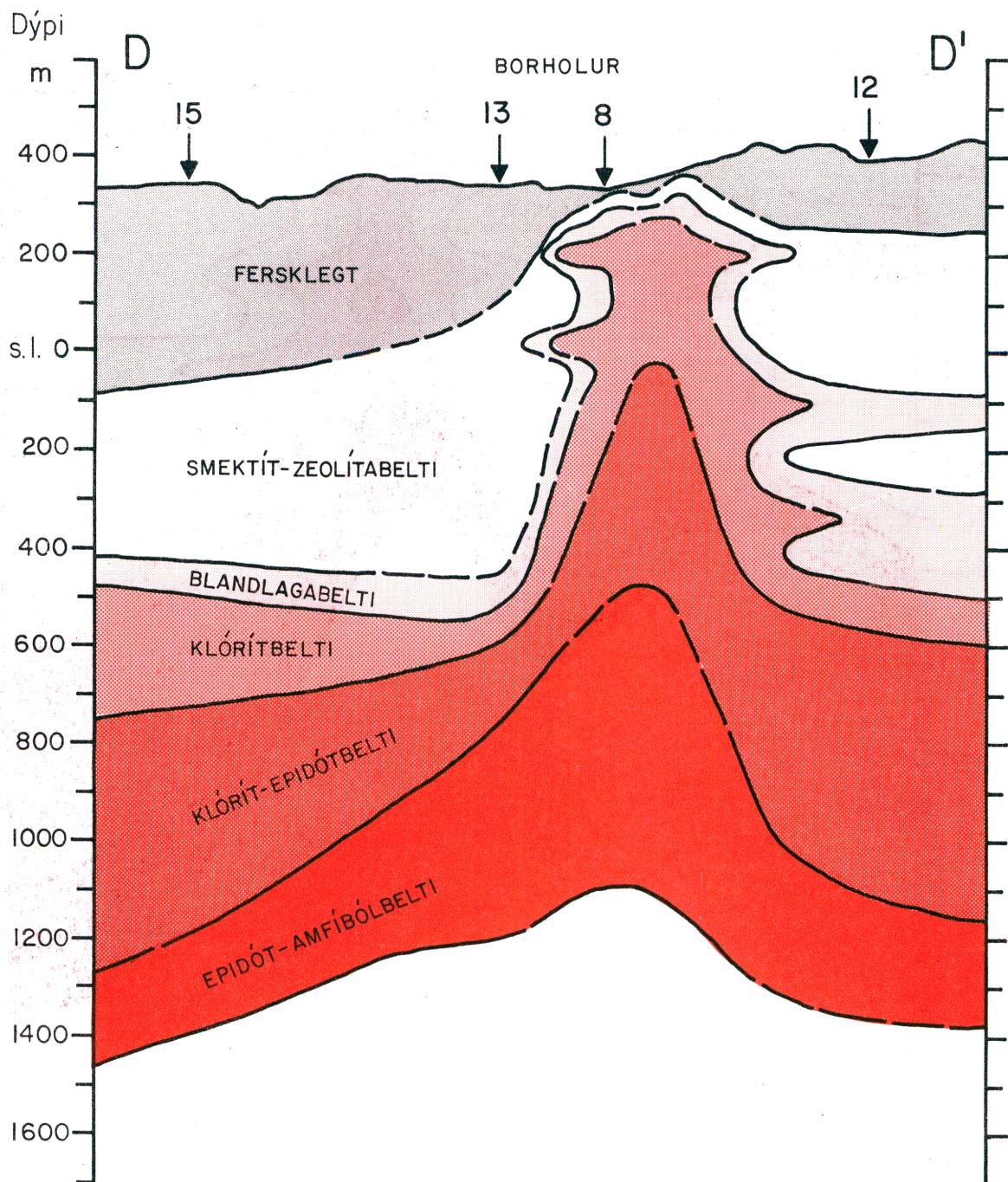


MYND 13. Ummyndunarsnið B-B' (sbr. mynd 11).

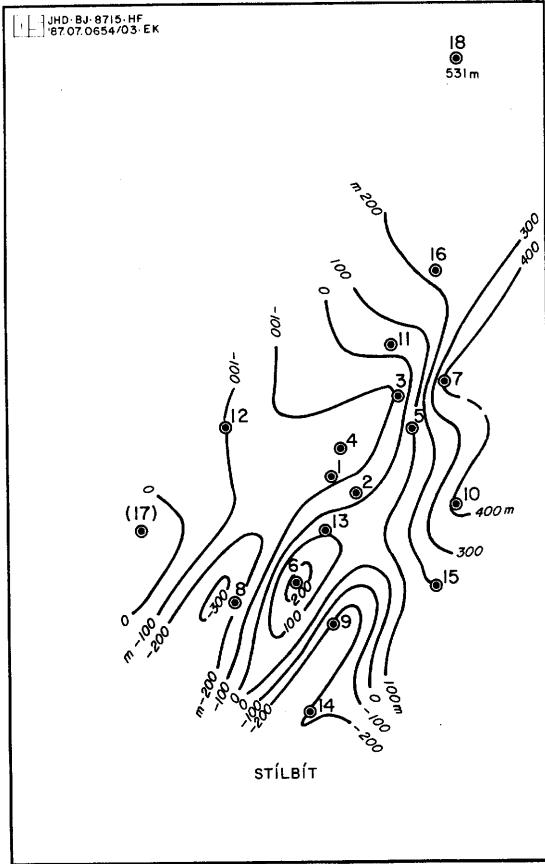
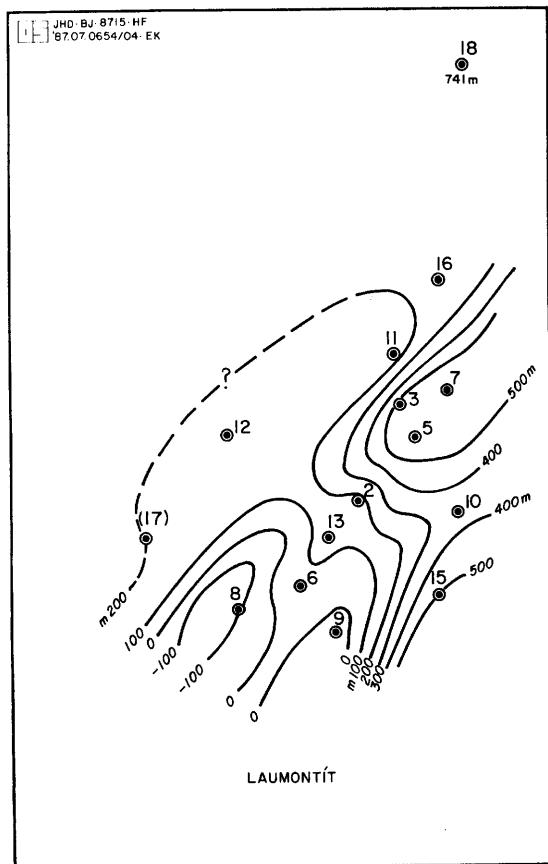
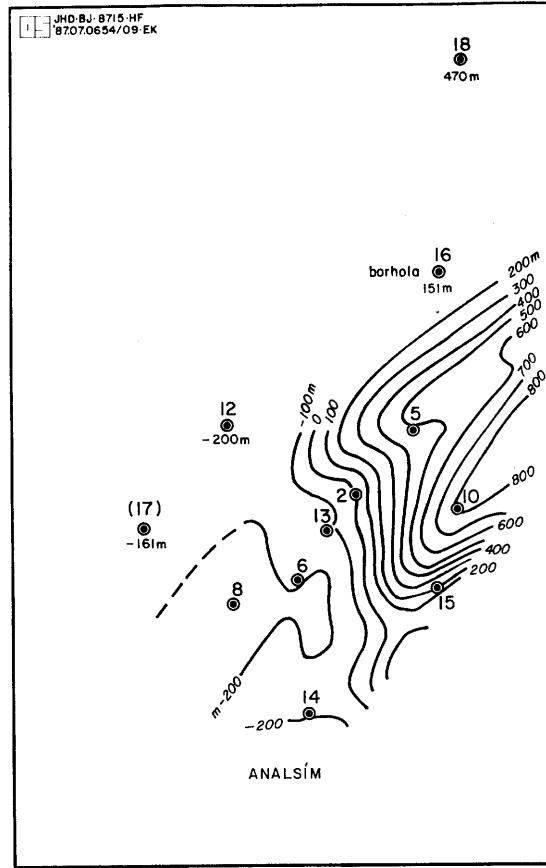
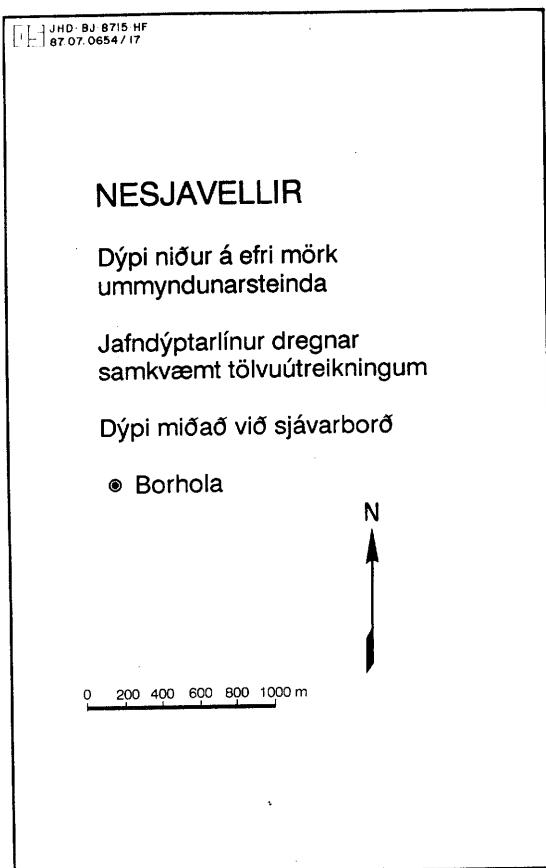


MYND 14. Ummyndunarsnið C-C' (sbr. mynd 11).

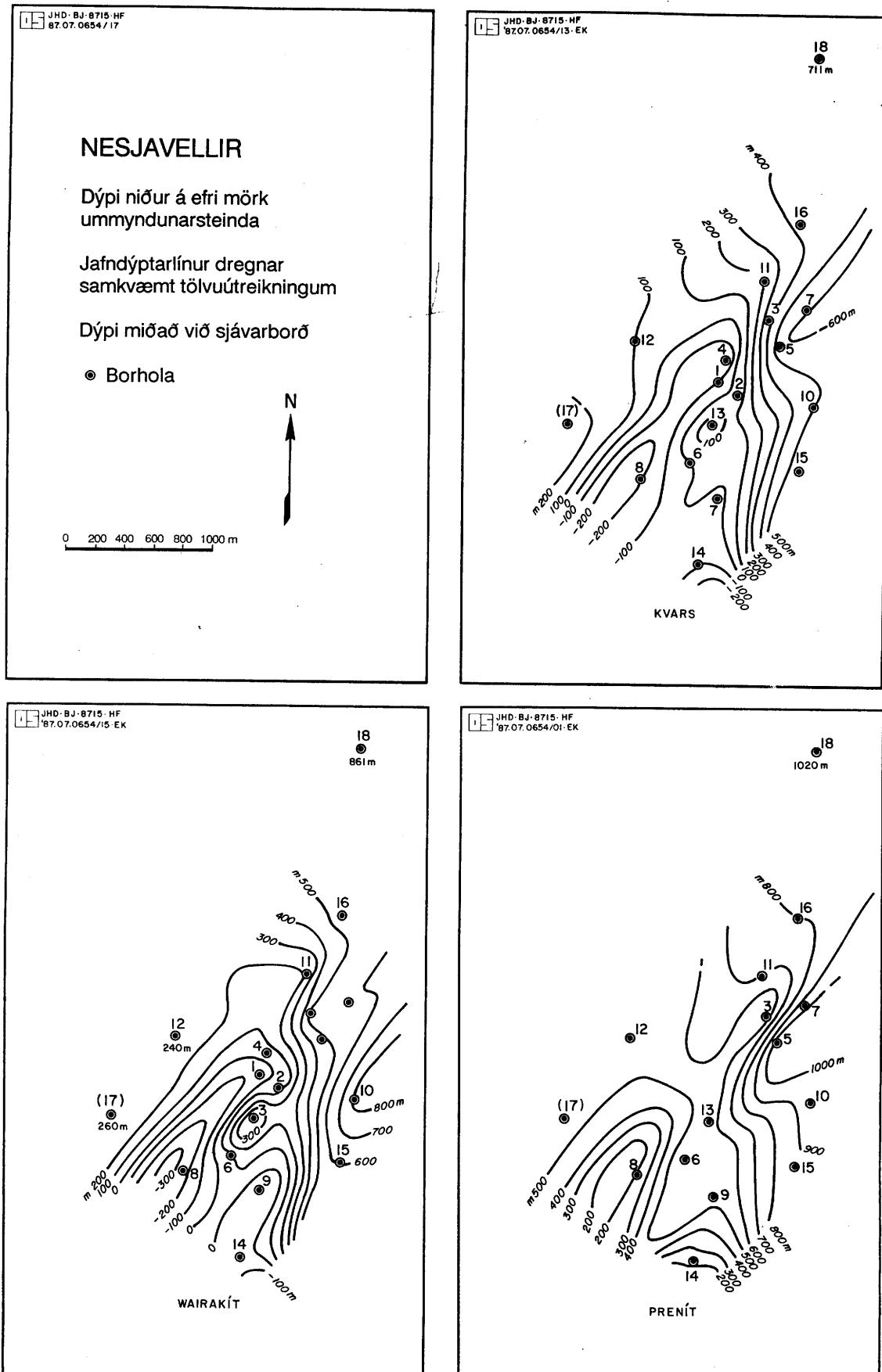
JHD-BJ-8715-HF
87.07.-0658-Gyða

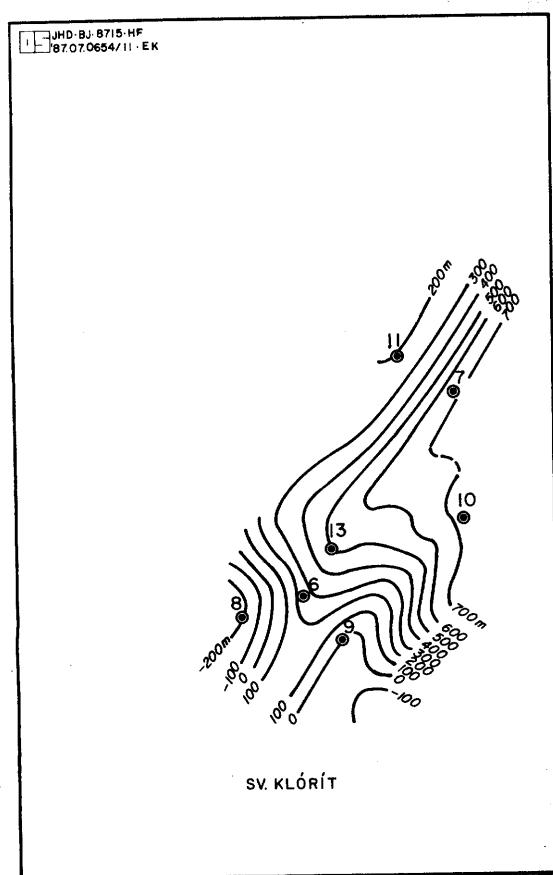
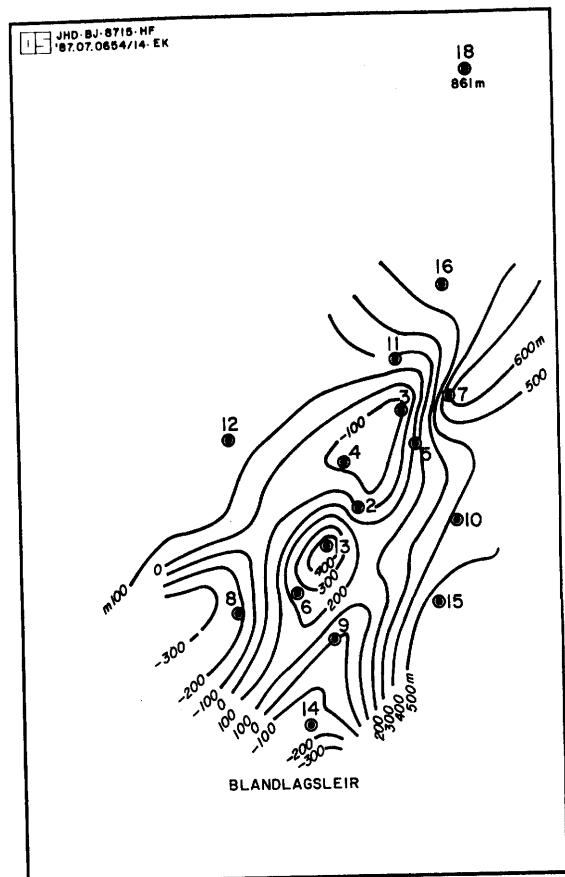
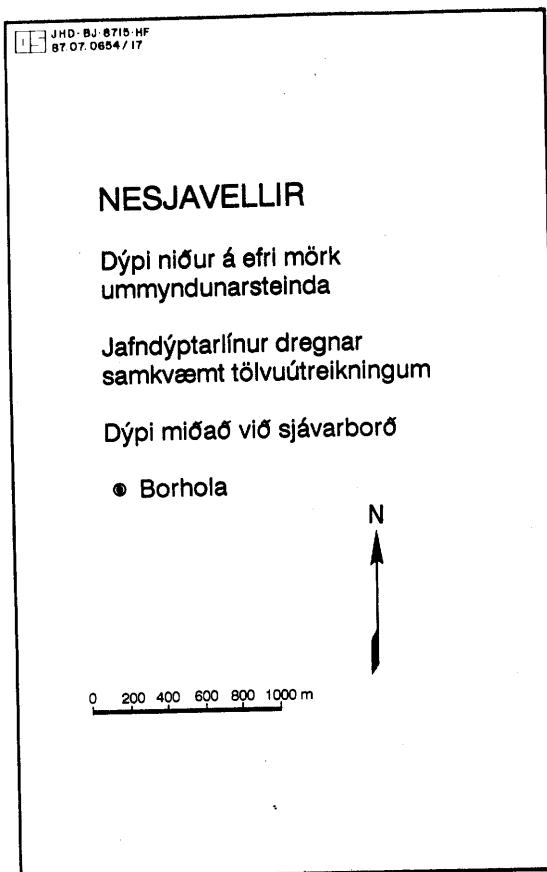


MYND 15. Ummyndunarsnið D-D' (sbr. mynd 11).

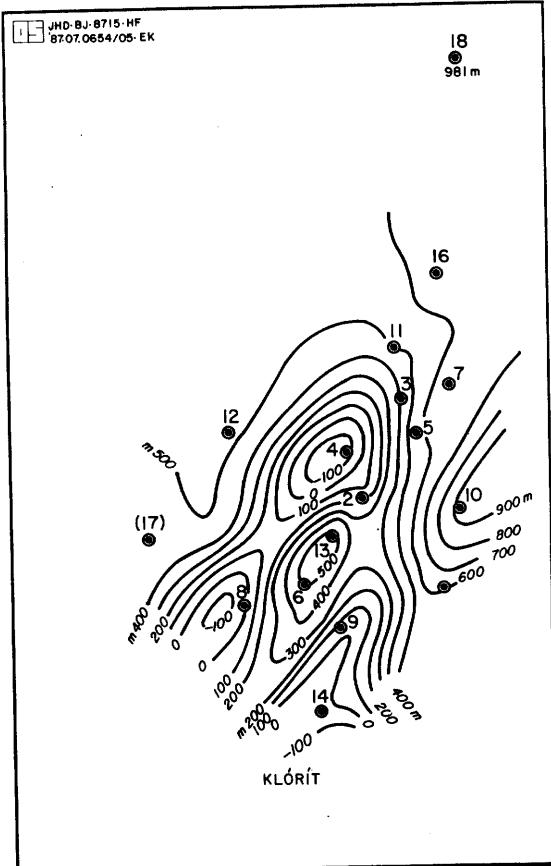


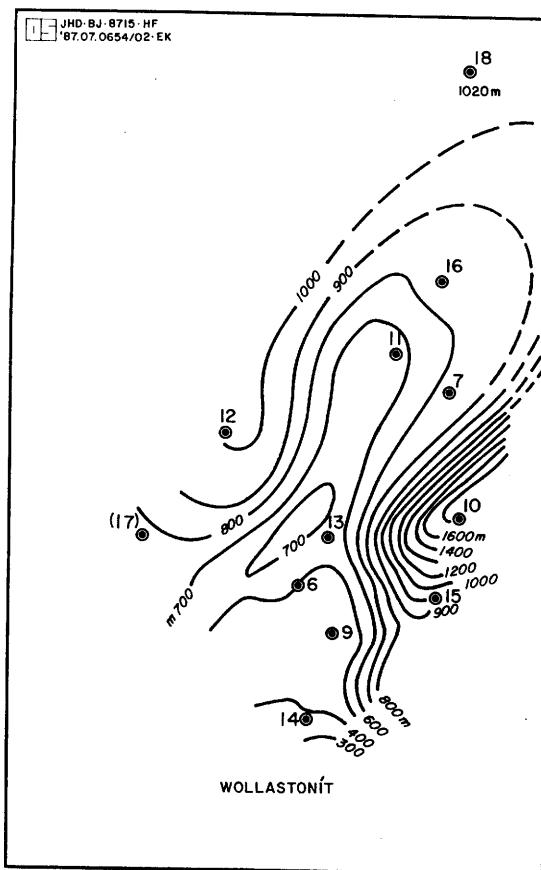
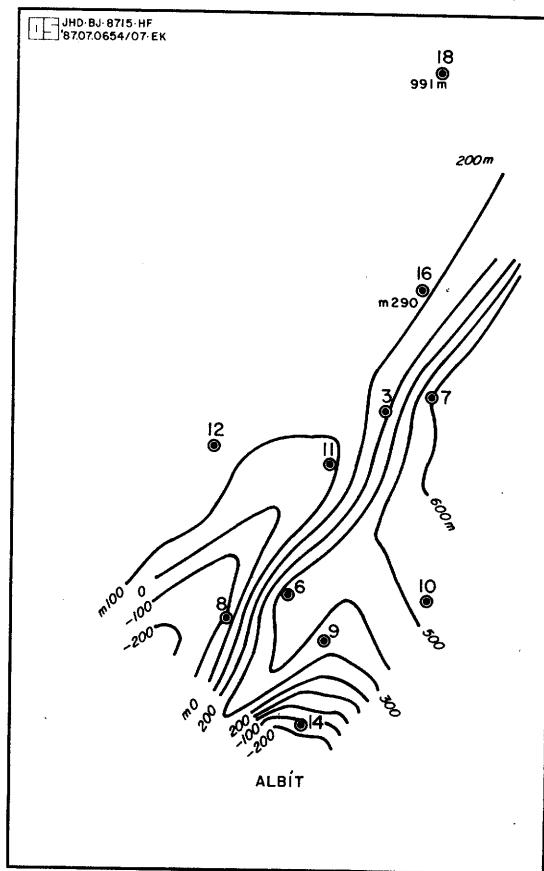
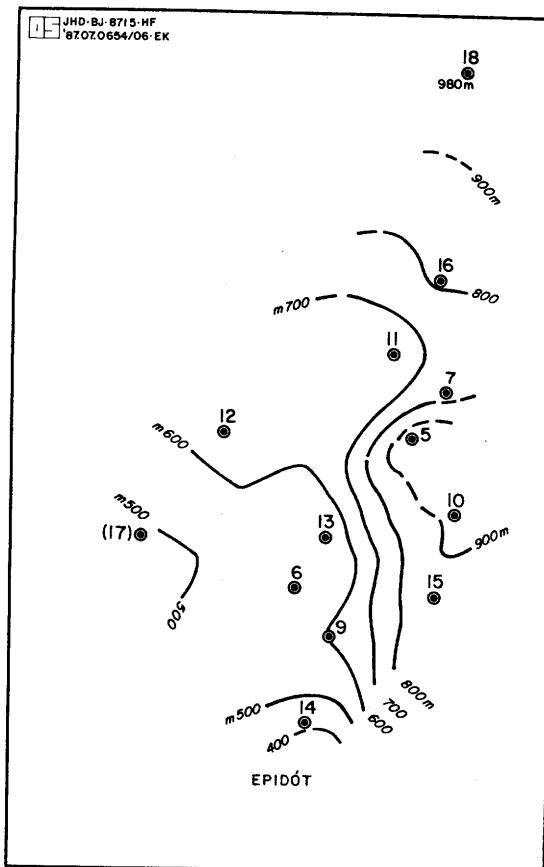
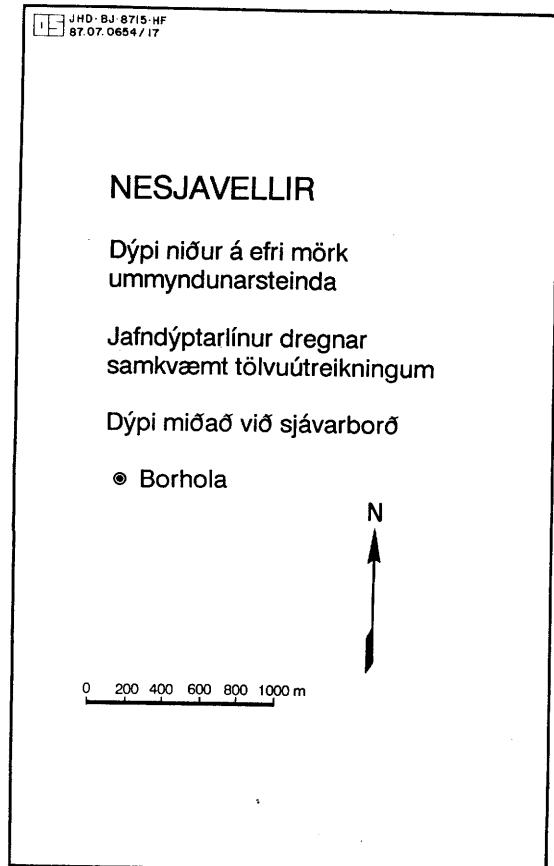
MYND 16. Dýpi niður á efri mörk ummyndunarsteinda.

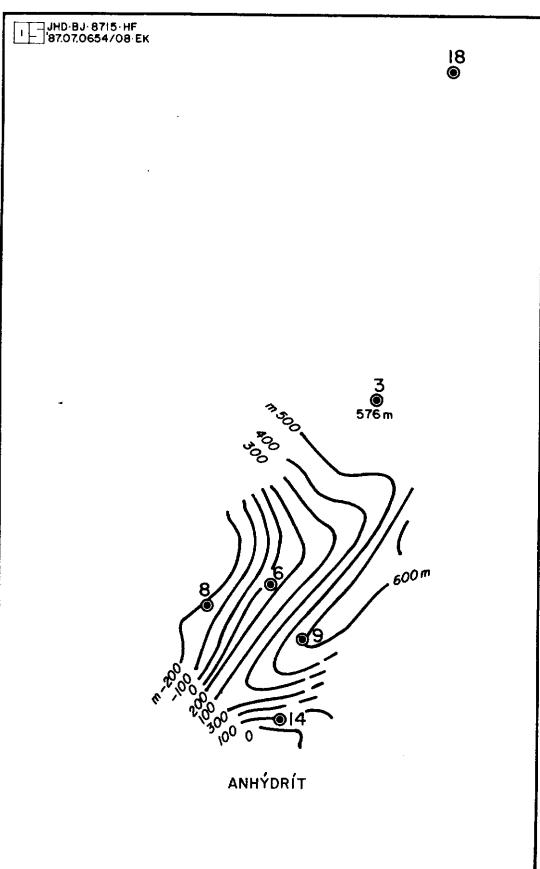
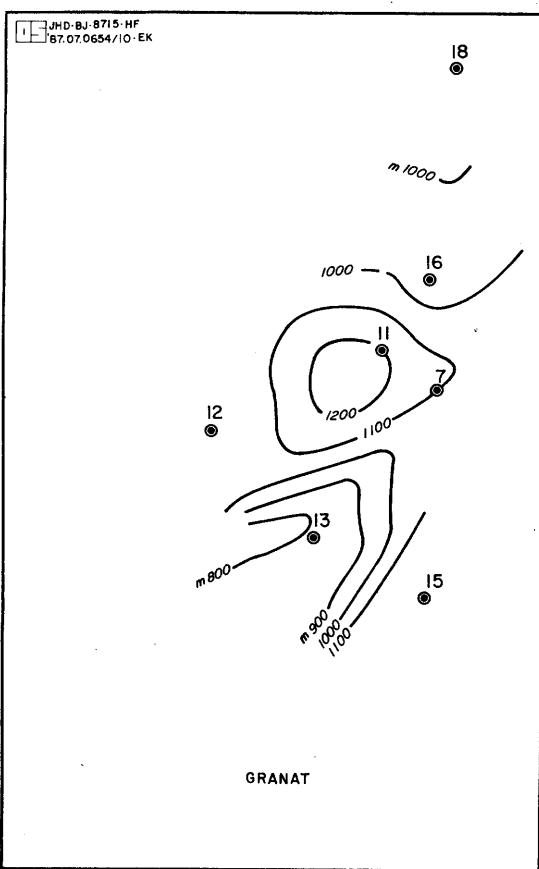
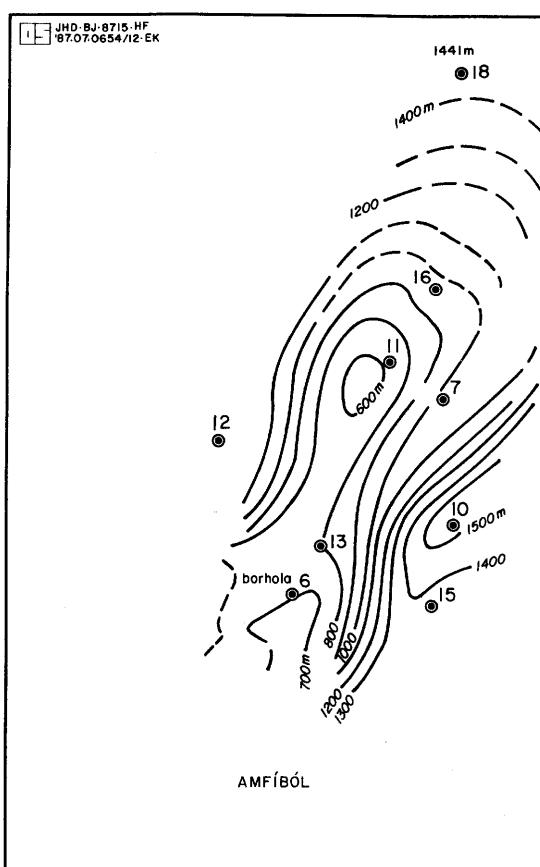
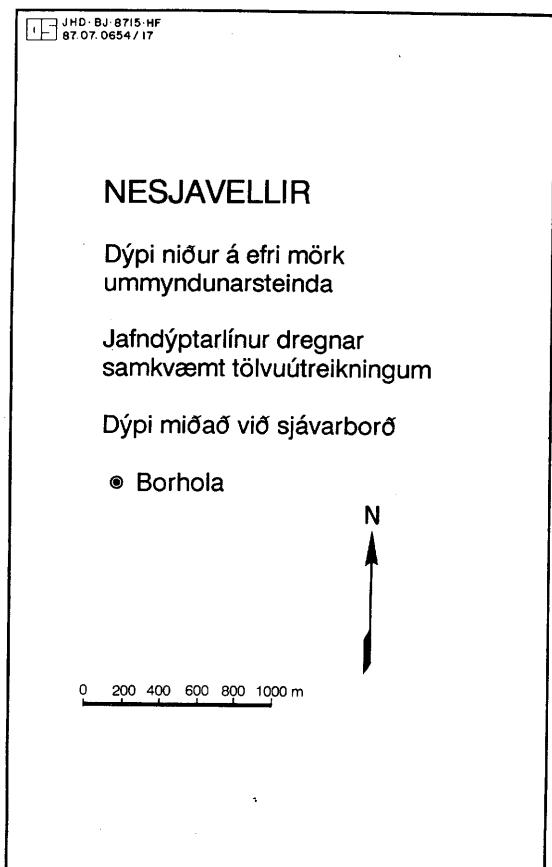


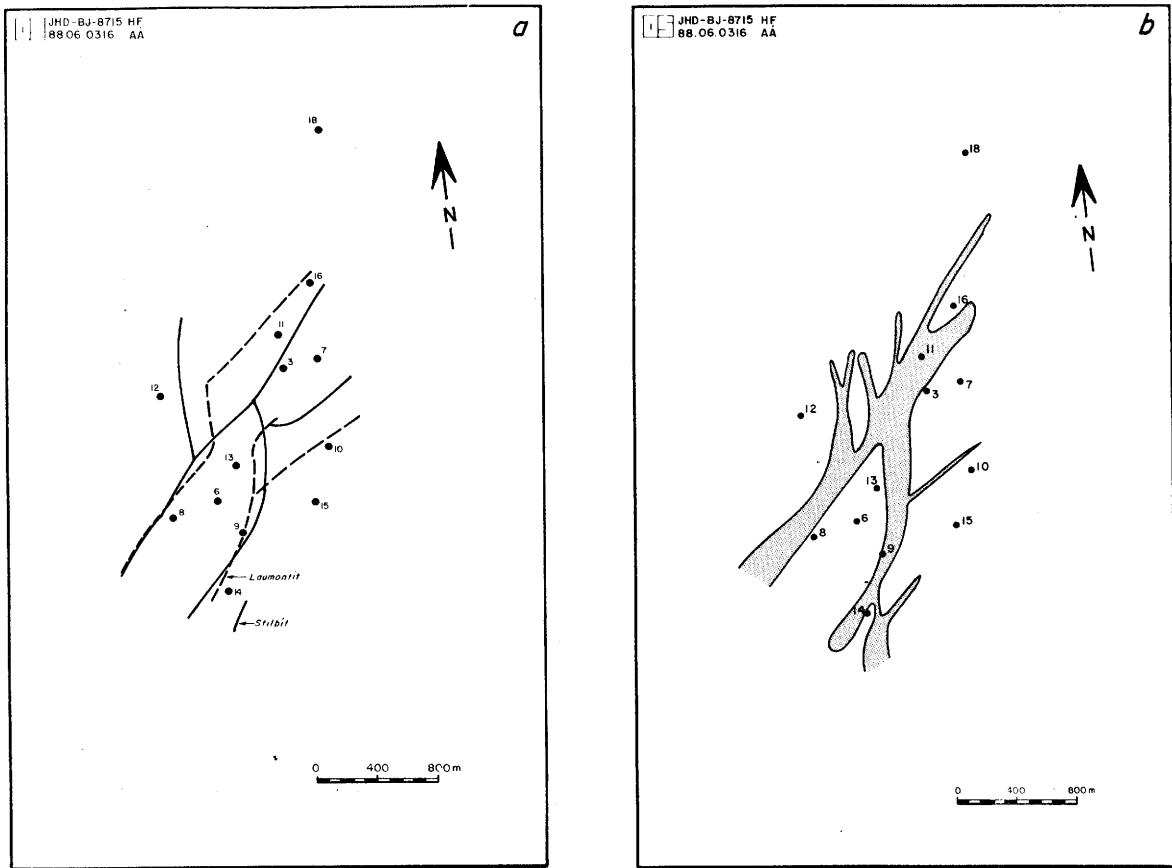


MYND 16. fth









MYND 17. a) Sprungurásir í jarðhitakerfinu á grundvelli steindanna; prenítis, kvars, wairakíts, albíts, blandlagaleirs og klóríts (sbr. mynd 16) b) sprungurásir í jarðhitakerfinu á grundvelli stilbíts og laumontíns (sbr. mynd 16).

4. VATNSÆÐAR

Við gagnaúrvinnslu var megináhersla lögð á að greina þá jarðfræðilegu þætti, sem hafa áhrif á vatnsgengd í jarðhitakerfinu. Safnað var saman jarðfræðiupplýsingum um allar vatnsæðar, stórar og smáar, sem vísbendingar eru um í borholunum.

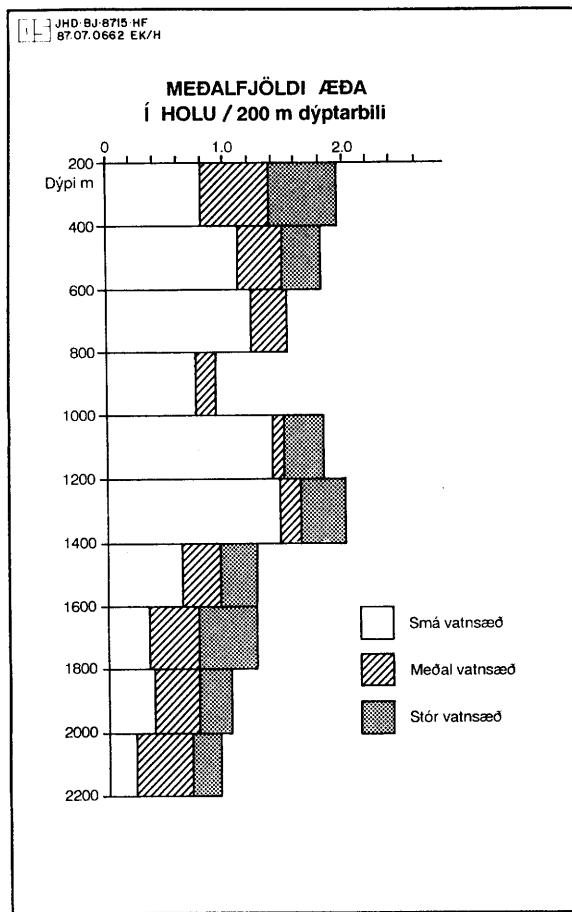
Mynd 18 gefur yfirlit um meðalfjölda og afstæða stærð æða í einni ímyndaðri borholu yfir hvert 200 m dýptarbil, og eru gögnin fengin úr alls 15 holum (þ.e. öllum nema holum 1, 2, og 4). Myndin sýnir að í megin-dráttum verða þrenns konar breytingar í fjölda vatnsæða með dýpi. Vatnsæðar eru algengar í efstu fjögur hundruð metrunum í borholunum, og er mikil um vel opnar æðar þar. Næstu 400 metrana er hins vegar nokkru minna um vatnsæðar og er engin þeirra stór. Milli 800 og 1200 metra kemur fram áberandi fjölgun vatnsæða, en á milli þess og niður undir 2000 m eru æðar fáséðari en hlutfall stærri æða þar hærra.

Tafla 1 í lok kaflans sýnir samband jarðfræði og vatnsæða. Þar kemur fram að vatnsæðarnar, sem holurnar skera, stjórnast einkum af þremur þáttum:

- 1) Efst í berggrunninum koma æðar einkum fram við lagkskil upphleðslueininga (lárétt lekt), og fer lektin þverrandi niður undir 800 m dýpi, eins og sést í töflu 1 og á mynd 20. Ef ummyndun jarðlagastaflans er skoðuð, er greinilegt að auknar útfellingar í glufum og öðru holrými bergsins valda minnkandi vatnsleiðni. Auk þess má ætla að samþjöppun berglaga vegna aukinnar fergingar leiði til minnkandi lektar.
- 2) Neðan við 800 m dýpi og allt niður á 1200 m verður áberandi fjölgun vatnsæða, sem auðsjánlega eru tengdar basaltinnskotum, sum hver ferskleg. Neðan um 1300 m dýpis fækkar þesslegum vatnsæðum, sérstaklega við fersklegu inniskotin.
- 3) Neðan 900 m dýpis og sérstaklega neðan 1300 m verður áberandi lekt við ísúr (díorít) inniskot.

Í aftasta dálki töflu 1 er getið þeirra vatnsæða sem ekki tókst að tengja við ákveðin jarðfræðifyribærí í berglagastaflanum, annað hvort vegna þess að ekki fengust nein svarfsýni af jarðlögum við æðina (algert skoltap), eða að gögnin voru svo óljós að ekki var hægt að tengja æðina við neitt sérstakt í berglagastaflanum. Rétt er þó að benda á að stærstu æðarnar (algert skoltap), sem holurnar syðst á svæðinu (6, 9 og 14) lento í, eru einmitt á því dýptarbili, þar sem fersku basaltinnskotin fleyga berglagastaflann.

Með hliðsjón af ummyndunum og jarðgerð er næsta augljóst að öflugt jarðhitaútstreymi er frá Hengli eftir lóðréttum flötum misgengja og gosrása, og að það flæði þaðan og inn í lárétt jarðlagaskil upphleðslueininganna. Ummyndun og útfellingar við þessar láréttu æðar minnka einnig er frá dregur þessum lóðréttu rásum. Á mynd 19 er á einfaldan hátt sýnt hvernig þetta er hugsað. Dæmi um holu með svipaðan hitaferil (skv. ummyndun) og fyrrí ferillinn á mynd 19 er t.d. hola 11, en hitaferill holu 18 líkist síðari gerðinni. Nú er það vitað að útfellingar, sem setjast til í holrými bergsins draga úr poruhluta og vatnsleiðni, og feringing poróttra berglaga leiðir til hins sama með samþjöppun. Hér á undan voru þessar tvær ástæður taldir til þegar sýnt var fram á minnkandi vatnslekt eftir jarðlagamótum með auknu dýpi. En hvernig breytist lektin á jarðlagaskilunum með aukinni fjarðlægð frá jarðhitasprungunum, þ.e. í átt að minnkandi útfellingum? Á mynd 20 er sýndur fjöldi slíkra æða í einstökum holum, og þar sést að æðar eftir lagksilum eru marktaekt algengari um miðvik svæðisins í grennd við lóðréttu rennslisstrúktúra jarðhitans, en þegar fjar dregur fækkar slíkum vatnsæðum. Sérstaklega er þetta sláandi í holum 10, 15 og 18 þar sem mjög takmarkaðra útfellinga gætir allt niður undir 800 m dýpi. Ljóst ætti að vera af jarðfræðikorti bergrunnsins (myndir 2 og 3) að jarðlagastaflinn er í öllum meginatriðum eins uppbyggður, og samkvæmt kortlagningu sprungna og misgengja á yfirborði (Knútur Árnason o.fl., 1986) virðist enginn munur vera í höggun innan



MYND 18. Meðalfjöldi æða í holu yfir hvert 200 m dýptarbil í berggrunninum.

svæðisins (mynd 4). Það er því ekki ljóst hvað í raun veldur þessum mismun; þó er ljóst að einhverjar aðstæður innan jarðhitakerfisins valda þessari auknu lekt eftir jarðlagaskilum.

Á mynd 21 er sýnt yfirlit yfir vatnsæðar, sem koma fram við ferskleg basaltinnskot í einstökum holum. Slíkar æðar finnast í þeim öllum sem ná niður í innskotin, nema í holu 10. Ekki virðist vera neinn marktækur munur í fjölda slíkra æða frá einum hluta svæðisins til annars.

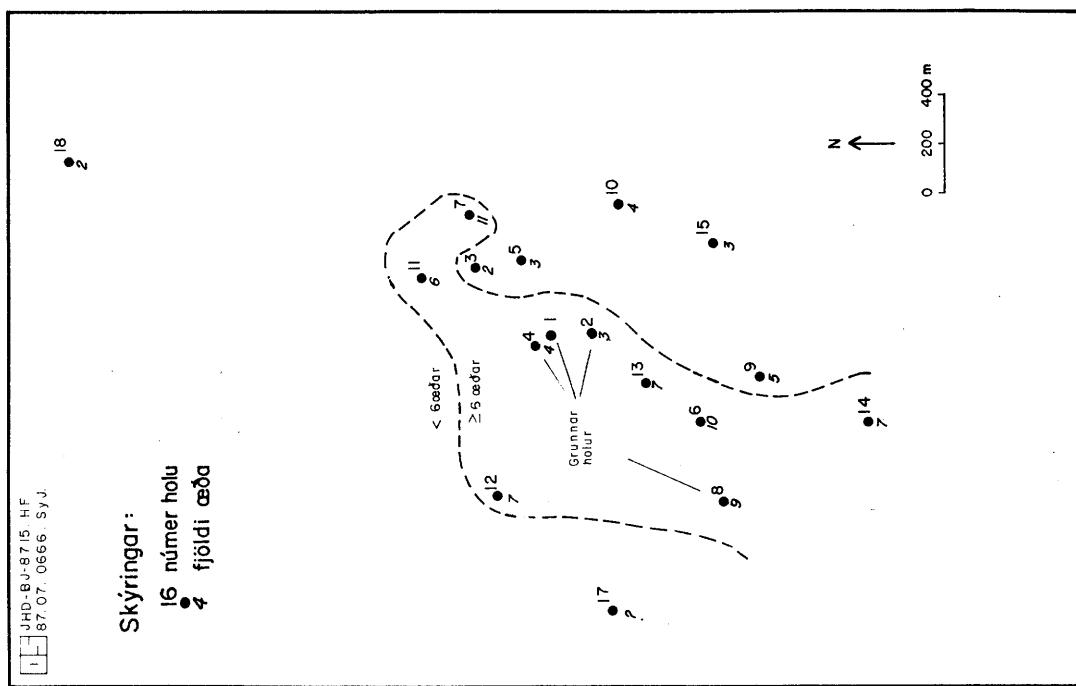
Ef litið er til vatnsæða, sem tengjast ummynduðum basaltinnskotum (mynd 22) virðast þær eitthvað algengari í holum 11 og 16 en öðrum djúpum borholum á svæðinu.

Á mynd 23 eru sýndar vatnsæðar sem tengjast ísúrum innskotum. Ljóst er, að vatnsæðarnar eru tiltölulega stórar og dreifast, eftir því sem best verður séð, yfir allt borsvæðið. Á súluritinu á þeirri mynd sést, að flestar þessar æðar eru á 1400-1600 m dýpi, en töluvert er einnig af æðum við ísúr innskot enn dýpra. Hola 10 tekur nær allt sitt vatn úr vatnsæðum tengdum þessum innskotum. Samkvæmt efnagreiningum er vökvinn úr þeirri holu mun flúorríkari en öðrum Nesjavallaholum (Einar Gunnlaugsson, munnlegar upplýsingar). Að þessu verður vikið nánar í næsta kafla.

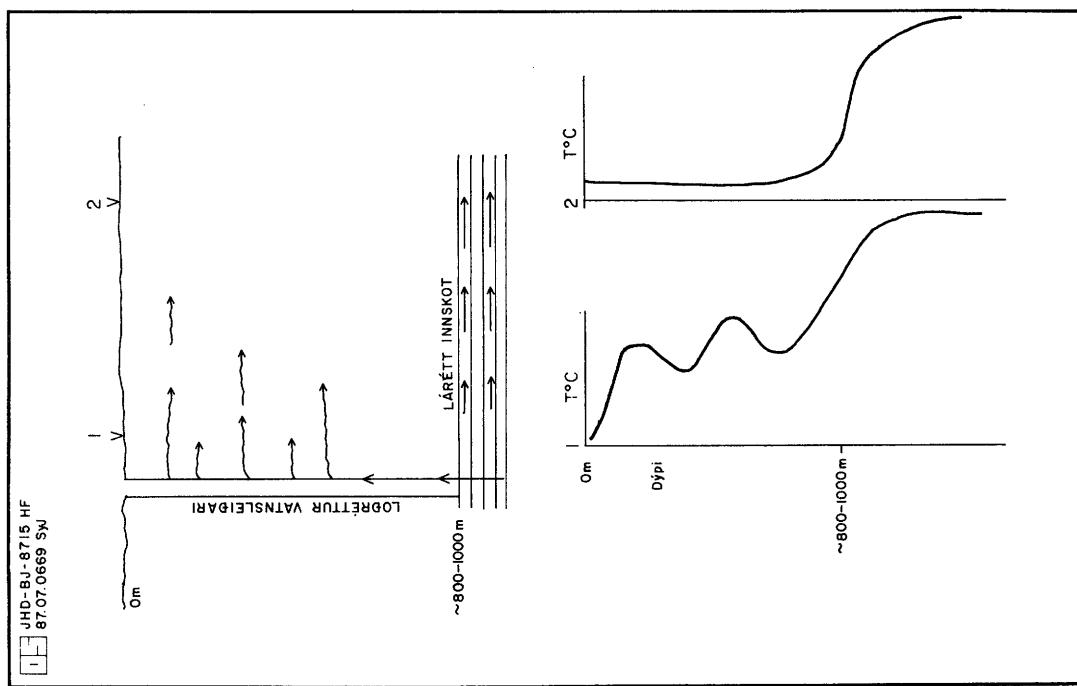
TAFLA 1 Tengsl vatnsæða og jarðlaga

DÝPTARBIL (m)	LAGSKIL	ÍSÚR INNSKOT	"FERSK" BAS. INNSKOT	ÖNNUR BAS. INNSKOT	ÓAKVEDIN TENGSL
50-100	8				
100-200	17				
200-300	13 +				1
300-400	14			(1)	
400-500	11 (3) *				
500-600	7 (1)				
600-700	5 (1)				
700-800	2 (2)			1	2
800-900	3 (1)				
900-1000	4 (1)	1	(3)	1 (1)	3
1000-1100	4 (1)		2 (2)	2 (2)	2
1100-1200	1	1	1 (1)	2 (1)	1
1200-1300	2 (1)			1	2
1300-1400	(1)	2		3 (1)	1
1400-1500		1			
1500-1600		6 (1)	2 (2)	2	
1600-1700	(1)			2	2
1700-1800	(1)	2 (1)		1	
1800-1900				2 (1)	
1900-2000				1	
2000-2100		1			
2100-2200		2			

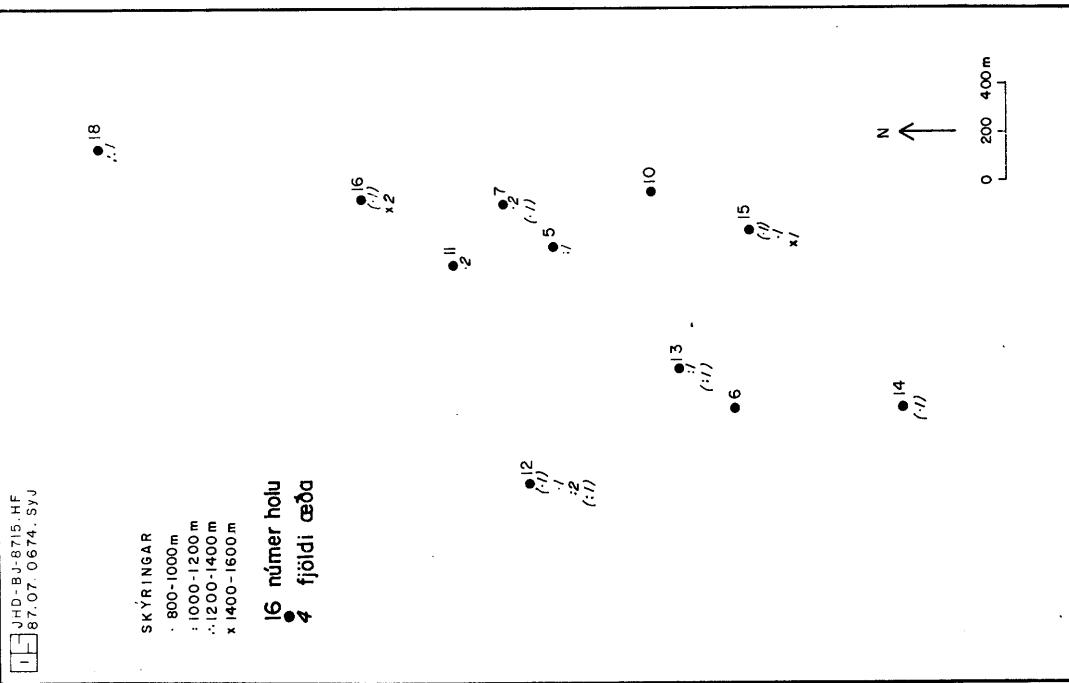
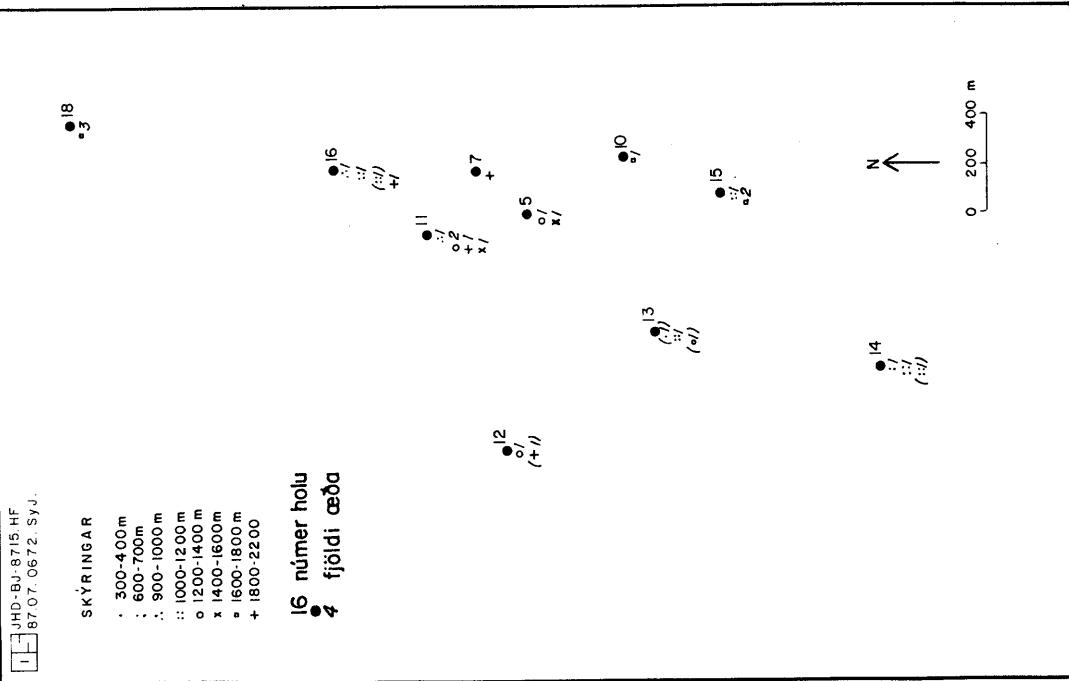
()Líkleg tengsl



MYND 20. Fjöldi vatnsæða, sem koma fram við lageskil upphæðshueininga á 0-800 m ðípi.



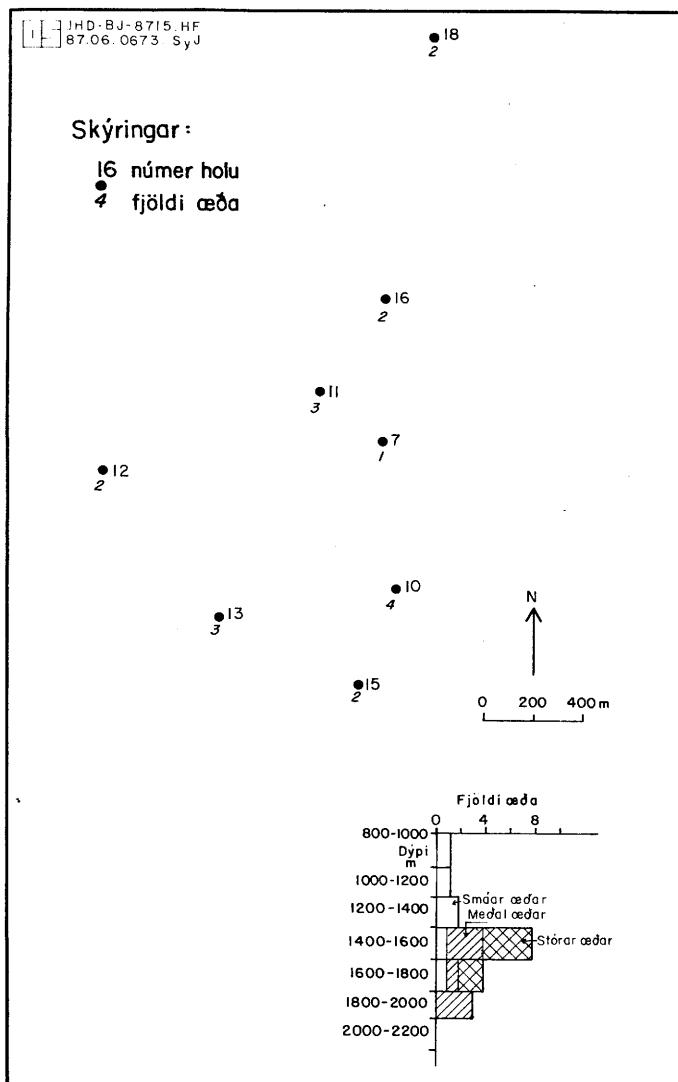
MYND 19. Einfaldar þversnið sem sýnir hvernig unnyrðun arhitafellar breystast m.t. fjarlaðar frá löðréttum vatnsleðara.



MYND 21. Vatnsæðar, sem koma fram við ferskleg basaltinn-skot.

MYND 22. Vatnsæðar, sem koma fram við ummynduð basaltinn-skot.

HF



MYND 23. Vatnsæðar, sem koma fram við díorítinnskot. Innféllda myndin sýnir fjölda þeirra og afstæða stærð yfir hvert 200 m dýptarbil.

5. UMRÆÐA

Par sem skýrslan tekur aðallega til gagna sem upplýsa um lektareiginleika jarðhitageymisins, þá verður umfjöllun hér á eftir að mestu leyti afmörkuð við þann þátt. Fyrst verða raktar helztu beinu niðurstöðurnar sem borholujarðfræðin gefur, en síðan verður beitt ögn frjálsari aðferðum, m.a. með tengingu við gagnasjóð annarra fagsviða, til að komast enn nær innri gerð kerfisins.

5.1 Jarðfræðileg tengsl vatnsæða

Borholujarðfræði bendir eindregið til að eftifarandi þættir stjórni rennsli í jarðhitakerfi Nesjavalla:

1. Ofan 800 m dýpis:

Tvö lóðrétt brotabelti með NA-SV stefnu eru ráðandi um rennslið. Bæði eru hugsanlega tvískipt, það eystra skiptist líklega í Koldulaugargil og Nesjalaugargil, en það vestara fellur saman við Kýrdalshrygginn austanverðan og misgengi samsíða honum um 50-100 m austar.

Eitt eða tvö misgengi með N-S stefnu ganga yfir Nesjavalladalinn. Þar sem þessi misgengi skera NA-SV misgengi er grynnst á jarðhitakerfið. Sést þetta m.a. í yfirborðsummerkjum og á ummyndun bergs við holur 1 og 4, og holur 3 og 11. (Mikil háhitaummyndun við holu 8 gæti bent til að á því svæði skeri N-S sprunga Kýrdalshrygginn.) Austanmegin við þessi N-S misgengi minnkar streymi jarðhitans eftir NA-SV brotunum og dýpkar á jarðhitann, líklegast vegna þess að þau fyrرنefndu hefta rennsli og/eða beina því í fleiri áttir. Þær jarðhitæðar, sem liggja eftir lagskilum upphleðslu einganna, og sem algengast er að borholurnar skeri á þessu dýptarbili, fá vökvann úr þessum brotflötum.

2. Neðan 800 m dýpis.

Gert er ráð fyrir að áðurnefndir brotfletir séu virkir vatnsleiðarar neðan 800 m dýpis. Á þessu dýpi eru lárétt lagskil ekki lengur lek. Lektin er þess í stað að mestu eftir jöðrum innskota sem fleyga staflann. Margar af gjöfulustu vatnsæðunum tengast lítt

hallandi ísúrum og fersklegum basaltinn-skotum.

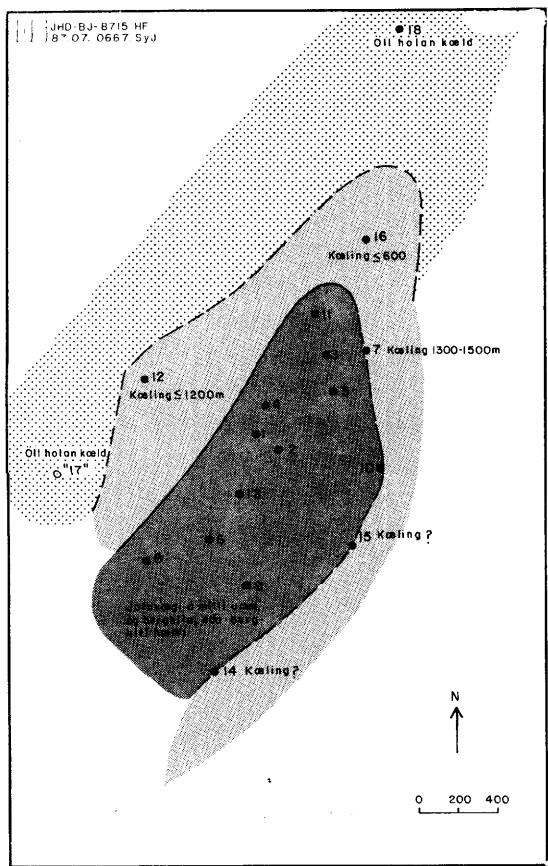
5.2 Samanburður berghita og ummyndunarhita

Í lokaskýrslum um einstakar holur hefur verið gerður samanburður á þeim hita, sem ummyndun bendir til að ríki í jarðhitakerfinu og líklegum berghita samkvæmt hitamælingum í borholunum. Berghitinn er mælikvarði á núverandi hitadreifingu í jarðhitakerfinu, og er ósamræmi á milli þessara tveggja hitaálkvartana túlkað á þann veg, að kerfið sé hitnandi eða kólnandi eftir því hvort ummyndunarhitinn er lægri eða hærri en berghitinn.

Á mynd 24 hefur borsvæðinu verið skipt upp í svæði á grundvelli þess hvort holur hafi kólnað eða hvort þær sýni jafnvægi eða jafnvel hærri hita en ummyndunin segir til um. Ljóst er að hola 18 sýnir kælingu frá því dýpi, sem háhitaummyndunin er greinanleg (um 1000 m) og allt niður í botn holunnar. Efri hluti holu 12 hefur orðið fyrir kólnun allt niður undir 1000-1200 m dýpi, en jafnvægi er talið ríkja þar fyrir neðan.

Ummyndun og hitamælingar sýna, að kæling hefur átt sér stað milli 300-600 m dýpis í holu 16. Gögn úr holum nær austurjaðri svæðisins eru ekki eins afgerandi, en þó benda ummyndunargögn úr holu 7 til, að kæling hafi orðið í jarðhitakerfinu þar á 1300-1800 m dýpi (Halldóra Hreggvíðsdóttir, 1987). Kæling er hins vegar óveruleg í holum 10, 14 og 15.

Þessi samanburður á berghita og ummyndun bendir til að jaðrar jarðhitavæðisins á Nesjavöllum fari kólnandi. Kælingin virðist vera mest vestan Kýrdalshryggjar, en hennar getur einnig verið byrjað að gæta norðan og í minna mæli austanmegin á svæðinu. Eins og getið er að ofan hefur borholujarðfræðin sýnt fram á tengsl vatnsgæfni og ákveðinna flata með nokkuð þekkta legu í berggrunninum. Samanburður á þessum vatnsleiðurum og kælingu í jarðhitakerfinu



Mynd 24. Samanburður á ummyndunarhita og mældum berghita í borholum.

ætti að gefa ákveðnar hugmyndir um hvernig hún á sér stað og á hvern hátt hún muni þróast í framtíðinni. Frekari úrvinnslu er þörf til að leiða slíkt í ljós.

5.3 Ummundun við Kýrdalshrygg

Eins og þegar hefur verið getið telst Kýrdalshryggurinn vera það sprungukerfi (misgengi, 3-4 gosgangar), sem mest áhrif hefur á streymi í jarðhitakerfi Nesjavalla. Í ljós hefur einnig komið að holar í Kýrdal eru mun kaldari en holar austan hryggjárins og enn fremur hefur verið staðfest, með samanburði ummyndunar og berghita, að kerfið í Kýrdal fari kólnandi. Mjög þýðingarmikið er að fá úr því skorið hvort flæði jarðhitans sé jafnt (symmetriskt) vestan sem austan í þessum flæðirásum, eða hvort flæðið sé ein-

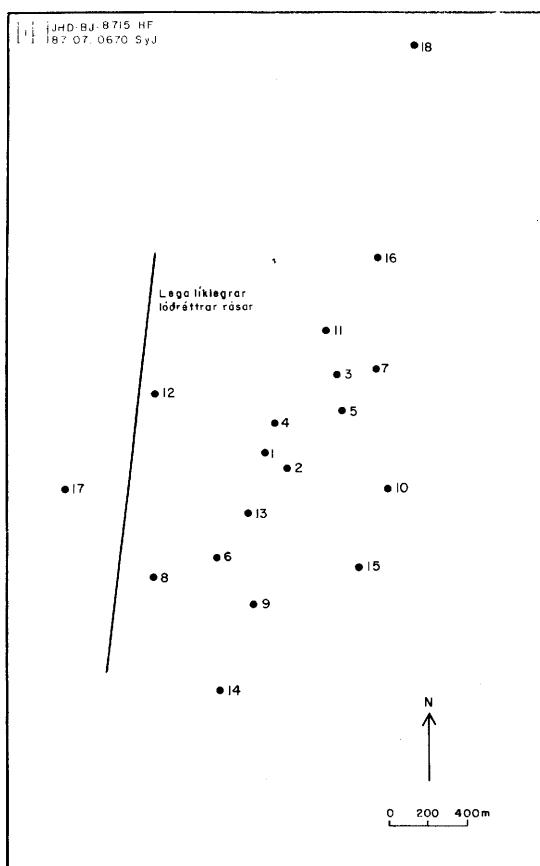
göngu austanmegin í hrygnum og að lóðréttu bergstrúktúrnir séu vatnspéttir veggir (aquicludes), sem hindri streymi jarðhitans til vesturs. Því er fróðlegt að bera saman háhitaummyndunina og eldri lághitaummyndun til að ganga úr skugga um hvort slíkt hafi verið til staðar allt frá upphafi jarðhitavirkni á svæðinu.

Á mynd 10 í kafla 3 eru sýndir ummyndunarferlar flestra borholanna. Þar hefur ummynduninni verið skipt á grundvelli eldra (zeólita) og yngra kerfis. Ef bornar eru saman holurnar austanmegin Kýrdalshryggjar kemur í ljós að ummyndunin (bæði há- og lághita) er langmest í suðri en minnkar til norðurs að holu 16. Sé ummyndun holu 8 borin saman við ófullkomin gögn úr holu 17, er ótvíraett að ummyndunin í þeiri síðarnefndu er mun lægri. Ef ummyndun í holu 17 er borin saman við ummyndunin í holu 12, þá virðist sem í þeiri síðarnefndu sé heldur meiri ummyndun í efstu 800 m holunnar. Líklegt er því að jarðhitaflæðið sé og hafi aldrei verið "symmetriskt" á þessu dýptarbili, heldur hafi lóðrétt sprungu- og gangakerfi Kýrdalshryggjar ætíð að einhverju leyti hindrað rennsli til vesturs. Þessar upplýsingar sýna því að jarðhitakerfið er upprunið innan Hengilsins og austanmegin við gangakerfið.

5.4 N-S misgengi nærri holu 12

Ef ummyndunarhitakúrfur í holum 17 og 12 gefa rétta mynd af hitaástandi jarðhitakerfisins, bendir hærri ummyndun ofar í holu 12 til að hún liggi nær lóðréttir jarðhitarás en hola 17 (sbr. mynd 10). Þar sem báðar holurnar liggja jafnlangt frá Kýrdalshryggnum verður e.t.v. að leita að annarri lóðréttirjarðhitarás. Hvaða vísbendingar höfum við um tilvist slíkrar rásar? Í kafla 2 er bent á að misræmi sé í berglögum milli hola 17 og 12, sem rekja má til líklegs misgengis á milli holanna. Í kafla 3 er bent á að þar sem misgengi og gosgangar með NA-SV stefnu eru skorin af sprungu með N-S stefnu er meira hitaflæði til yfirborðs. Áberandi mikil ummyndun er grunnt í holu 8 við Kýrdalshrygg. Bent hefur verið á að í þyngdarkorti af

svæðinu megi greina N-S strúktúr, sem sker Kýrdalshrygginn rúmum 100 m vestan við holu 8 og nokkrum tugum metra vestan við holu NJ-12 (Freyr Þórarinsson, pers. upplýsingar). Svo einkennilega vill til, að vestan í Háhrygg, á þeim slóðum, sem þetta þyngdarfrávik klýfur hrygginn, hafa fundist væg merki um yfirborðsjarðhita (Snorri P. Snorrason, pers. uppl.). Þótt hvert þessara ofangreindu atriða staðfesti ekki tilvist N-S misgengis á þessum slóðum, verður vart gengið framhjá því, að líkindin eru nokkuð mikil. Möguleg lega þessarar sprungu eða misgengis er sýnd á mynd 25.



MYND 25. Möguleg lega sprungu (misgengis) á grundvelli gagna úr borholujarðfræði, þindarmælingum og yfirborðsjarðfræði.

5.5 Aldur og þróun jarðhita á Nesjavöllum

Í jarðfræðigögnum borholanna er bæði að finna upplýsingar og vísbendingar um aldursmörk jarðhitavirkni og afstæða aldursröð atburða í jarðhitasögunni. Í yfirborðsrannsóknum hefur aldursröð einstakra jarðmyndana verið rannsokuð, og þær tímasettar með tilliti til geislakols-, öskulaga- eða aðferða sem taka mið af þykkt jöklíss (Knútur Árnason o.fl., 1986, 1987). Á mynd 26 a-f er á myndrænan hátt sýnd möguleg þróun jarðhitakerfis Nesjavalla, þess sem borað hefur verið í.

Á mynd 26 (a) eru sýndar aðstæður í frumbernsku eldstöðvarkerfis í Hengli fyrir um 300.000 árum síðan. Á þeim tíma er Grensaldalseldstöðin að ljúka æviskeiði sínu og berglögin sem finnast á Nesjavöllum líklegast að miklu leyti þaðan runnin, enda er mest um hraunlög að ræða. Það er ekki erfitt að ímynda sér að Nesjavallasvæðið hafi á þeim tíma verið lághitasvæði þar sem zeólitar mynduðust fyrst á 600-800 m dýpi frá þáverandi yfirborði, en það yfirborð var á 300-400 m undir núverandi sjávarmáli. Engin merki eru um þessa zeólíta í núverandi ummyndun, enda hafa þeir ugglaut horfið við síðari tíma háhitaummyndun.

Mynd 26 (b) sýnir ástand jarðhitakerfisins fyrir um 70.000 árum, en þá er hugsanlegt að díórít innskot hafi fleygað berglagastaflann. Ástæðan fyrir þeirri tímasetningu er sú að ísúrt gosberg finnst aðeins á einum stað á yfirborði, en þar er um að ræða móberg sem liggur ofan á móbergsmyndunum sem tilheyra Háhrygg og Sleggju en liggur undir Hengilsstapanum. Talið er að það bendi til áðurnefnds aldurs (Knútur Árnason o.fl., 1986). Um skyldleika þessara myndana skal að svo stöddu ekki slá neinu föstu en tiltölulega auðvelt ætti að vera að bera saman efnagreiningar á díórítinu og þessara yfirborðsmyndana. Á þessu tímabili, eða frá upphafi eldvirkninnar að þessum tímamótum hefur fjöldi goseininga hlaðist upp á yfirborði. Í dýpri hluta berggrunnsins hefur á sama tíma verið tóluverð innskotavirkni, sem samsvarar ummynduðu basaltinniskot-

unum. Þar sem lítið verður vart við að díórítin séu skorin af þessum innskotum er trúlegt að mikill hluti þeirra sé eldri en díórítin. Það verður vart hjá því komist að álycta að mikill fjöldi innskota auki mikið við varmaforðann í bergen og að hár hiti hafi ríkt í neðri hluta berglagastaflans þar sem innskotin eru hvað tíðust. Upphafs háhitakerfis verður þó einna fyrst vart við díórítinnskotin, eins og sýnt hefur verið fram á í holu 7 (Hjalti Franzson og Hilmar Sigvaldason, 1985), þar sem steindir eins og K-feldspat (adúlaría) hafa fallið út í glufum í bergen.

Mynd 26 (c) sýnir líklegt ástand eftir að Hengillinn og skyldar myndanir hafa hlaðist upp. Slíkt hefur gerst skv. yfirborðsjarðfræðinni fyrir um 60.000 árum. Við þennan atburð verður Kýrdalsmóbergshryggurinn til og þar með er kominn elsti berggangurinn á þeim slóðum. Misgengin í Köldulaugargili og í Kýrdalshrygg eru virk auk N-S misgengisins sem lýst er í kafla 2. Við þessar aðstæður er talið að zeólítabeltin, sem einkenna efri 1000 m berglagastaflans verði til, og að það streymi eftir áðurnefndum misgengjum og lekum lagmótum. Röðun zeólítanna í glufum í bergen bendir til að á því tímaseiði verði upphitun í jarðhitakerfinu. Á þessu dýptarbili verður ekki vart við steindir eins og kalsít eða pýrít sem bendir til að jarðhitavökvin hafi ekki einkennst af háhitavirkni. Neðar í kerfinu er líklegt að háhit hafi ríkt, en ekki er unnt á grundvelli núverandi gagna að greina hvaða steindir félle út í jarðhitakerfinu á þeim tíma.

Á mynd 27 (d) er staldrað við eftir fyrra hraungosið í Kýrdalshryggnum, en það varð fyrir um 7000 árum skv. aldursákvörðunum yfirborðsjarðfræðinnar. Einnig eru hér sett inn fersklegu basaltinnskotin eða laggangarnir. Ekki eru tiltæk nein einhlýt gögn um hvort þessi innskot megi tengja við gosmyndanir á yfirborði, en efnagreiningar á svarfsýnum af þessum innskotum og samanburður við efnagreiningar gosmyndana gætu leitt af sér slíka aldursákvörðun. Visbending um að innskotin séu yngri en áðurnefnt gos er að ummyndunin í berggrunninum vestan

Kýrdalshryggjar er mjög áberandi á því svæði sem innskotin fleyga staflann, en það bendir til aftur á móti að streymi vestur yfir gangvegg Kýrdalsgossins (7.000 ára) hefur átt greiða leið í þá átt. Á þessum tíma á sér stað hápunktur jarðhitavirkni á Nesjavöllum. Í efri hluta myndast kalsít og í neðri hluta jarðhitageymisins háhitasteindir. Fyrir utan gosganginn í Kýrdal og fersklegu basaltinnskotin er leiðnin áfram eftir ísúru innskotunum og misgengjunum sem áður er greint frá. Athyglisverðar fyrstu niðurstöður úr vökvabólurannsóknunum (Hjalti Franzson, óbirt gögn) sem gerðar voru á kalsítí í holu NG-9, sýna að kalsítíð fellur út og leggst ofan á zeólítana við um 180°C (á um 800 m dýpi) en síðan hækkar hitinn upp í um 240°C og við þær aðstæður leysast zeólítarnir upp en í stað þeirra koma vökvabólur. Kalsítíð sýnir því stöðuga upphitun í jarðhitakerfinu líkt og zeólítarnir á fyrra skeiðinu. Kalsítíð sýnir þó ekki merki þess að jarðhitakerfið nái suðumarki. Á þessu skeiði verður sem sagt vart við að zeólítarnir taka að hverfa alls staðar innan borsvæðisins, bæði austan og vestan Kýrdalshryggjar.

Á mynd 26 (e) eru sýndar líklegar aðstæður eftir síðara hraungosið í Kýrdalshrygg fyrir um 2000 árum síðan. Við það bætist gosgangur í Kýrdalshrygginum, sem hefur þau áhrif að hann klippir á leiðnina sem áður var eftir fersklegu basaltinnskotunum vestur og inn í Kýrdalshluta jarðhitakerfisins. Aukin jarðhitavirkni á sér stað eftir Kýrdalssprungunni sem bezt sést á yfirþrystingi austan undir hryggnum (t.d. holur 8 og 4), sem annað hvort er vegna aukinnar sprunguleiðni eftir ganginum og þar með flæðis út úr Hengli, eða að jarðhitastreymið sem áður breiddi úr sér inn í Kýrdalinn er beint eftir sprungufletinum, nema hvorutveggja sé gilt.

Mynd 26 (f) sýnir þær aðstæður sem talðar eru komast næst núverandi aðstæðum. Sprungumyndun virðist samkvæmt yfirborðsathugunum nú helst eiga sér stað norðan og vestan við Kýrdalinn, og samkvæmt viðnámsmælingum er það svæði líklegt að hýsa öflugt kalt grunnvatnskerfi eins langt og "viðnámsaugu" sjá. Aðgengileiki

kalds grunnvatnsstreymis við Kýrdalinn og líkleg lokun fyrir jarðhitastreymi vestur yfir Kýrdalshrygginn veldur því að kólnun jarðhitageymisins er þar langmest eins og merkja má sem best í holum 17 og 18. Hola 12 virðist þó aðeins hafa kólnað niður á um 800 m, en er í jafnvægi við ummyndunarhitann þar fyrir neðan. Pennan mun á holu 12 er unnt að skýra á þann hátt að nærri þeirri holu skeri N-S sprungan berglagastaflann og Kýrdalsgosgangana og á þann hátt hleypí jarðhitakerfinu inn í Kýrdalinn í leiðara sem síðan fæðir vatnsæðarnar sem holan tekur vökvann úr. Ef þessi atburðarás hefur átt sér stað sem hér er lýst má vænta hraðari kólnunar jarðhitakerfisins í Kýrdal en annars staðar á Nesjavöllum.

Veikustu hlekkirnir í þessari atburðarás eru aldursákværðanir á díoríti og fersklegu basaltinnskotunum. Mjög fróðlegt væri að flokka og efnagreina öll slík innskot og bera saman við efnasamsetningu gosmyndana á yfirborði. Slíkt myndi að líkindum festa skorður á atburðarásina.

5.6 Tengsl efnafræði vökva og díoríts

Tengsl efna í vatni við borholujarðfræðina er einkar athyglisverð að því er varðar flúorinnihald vökvans. Samkvæmt upplýsingum frá Einari Gunnlaugssyni er hæsta flúorgildið í holu 10, en þar eru vatnsæðar tengdar díorítinu ráðandi. Lægstu flúorgildin eru hins vegar í holum, sem ekki ná niður í díorítinnskotin eða liggja alveg við Kýrdalsprunguna (holur 8, 6, 11 og 16).

Ekki er í raun vitað hvað vökví þarf að vera lengi í snertingu við ísúrt berg til að taka til sín aukið flúor. Í því sambandi er unnt að benda á, að nákvæmar rannsóknir á díorítinu (Halldóra Hreggviðsdóttir, 1987) gefa til kynna að efnasamsetning bergsins hafi haft umtalsverð áhrif á efnasamsetningu vatnsins. Með hliðsjón af þróun jarðhitakerfisins, þar sem díorítin eru talin með elstu leiðunum, og að meginleiðarar kerfisins liggi nú eftir basalt-gosgöngum og -innskotum, sem síðan fæði díorítleiðarana, þá virðist sem flúor flyttist á mjög fljótvirkan hátt úr bergi

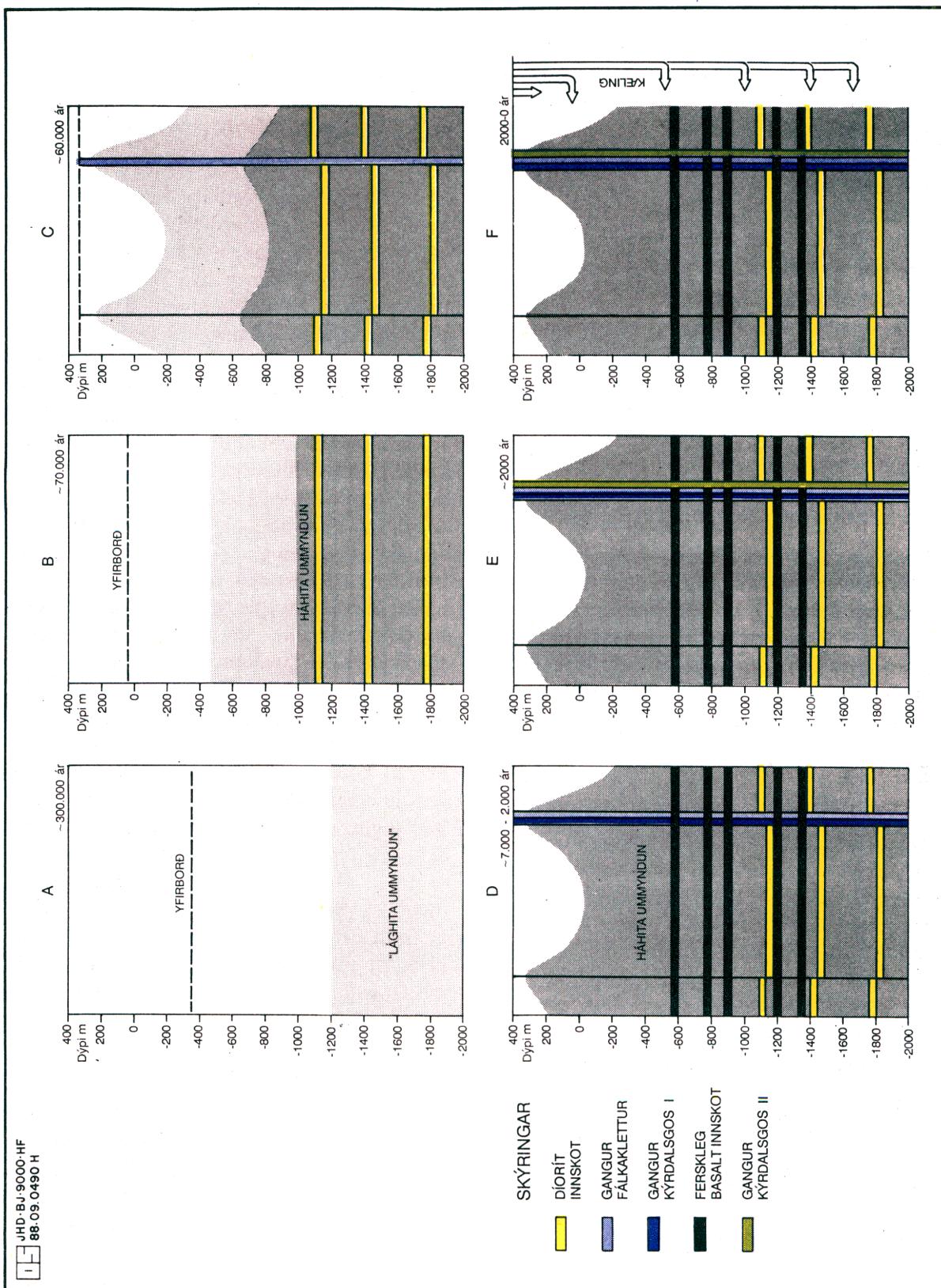
yfir í jarðhitavökvanum.

5.7 Tengsl borholujarðfræði og viðnámsmælinga

Viðnámsmælingar styðja á marga vegu þá mynd af sprungum í jarðlagastaflanum (ofan 700 m dýpis), sem hér hefur verið sett fram. N-S misgengin, sem ganga yfir Nesjavalladalinn skera Kýrdalshrygginn á svipuðum slóðum og lágviðnámssvæði kemur fram í mælingum (við holur 11 og 16). Vegna þess hve Kýrdalshryggurinn og þau brot sem þar skarast eru öflugir vatnsleiðarar, þá er uppstreymi vökvans mun öflugra þar en sunnanmegin. Ef jarðhitavökvinn leitar til norðurs og austurs í átt frá jarðhitageyminum þá er sennilegt að misgengið sé við vesturenda viðnámslægðarinnar, eins og gera verður ráð fyrir í borholujarðfræðinni. Lágviðnámstotan sem teygir sig í norðurátt og sker Kýrdalssprunguna er líklegt merki um sprunguleka í gegnum þetta vegginn, sem gosgangar og/eða misgengi Kýrdalshryggjárins mynda. Erfitt er að meta hve mikil það flæði er, sem sleppur í gegn, en ef gert er ráð fyrir að streymi þess vökva leiti til norðurs gætir hans lítt sem ekkert í holu 18. Það kemur á óvart þó, að misgengið hefur ekki hreyfst frá lokum síðasta hlýskeiðs, en er mjög áberandi í eldri berglögum (sbr. mynd 2). Snarpur lágviðnáms "toppur" kemur fram á milli hola 9 og 15, en sá toppur er líklegast merki um jarðhitaflæði eftir N-S misgenginu sem sker berglöginn nærri holum 2, 1 og 4.

5.8 Botnhiti í holu 11

Eins og þegar hefur verð rakið, virðast flest gögn benda til að jarðhitavökvinn flæði frá Hengli og inn í Nesjavallakerfið. Sá mikli hiti ($>380^{\circ}\text{C}$) og þrýstingur (>200 bar) sem vart var við neðan 2100 m í holu 11 gæti gefið til kynna að sú mynd sé ekki einhlyt hvað varðar dýpststa hluta Nesjavalla. Þar sem þetta háþrýstikerfi hefur aðeins fundist í einni holu er ekki ljóst hvernig í landi það liggur, en þó verður að telja líklegast að það tengist á einhvern hátt gosvirkninni í Kýrdalshrygg, hvort sem það er merki um nálaegð hitagjafa eða merki um lekt (nema hvorutveggja sé).



MYND 26 a-f. Einfölduð myndasaga sem sýnir hvernig jarðhitakerfið á Nesjavöllum hefur þróast frá upphafi til núverandi ástands. Sjá texta til skýringar.

einni holu er ekki ljóst hvernig í landi það liggar, en þó verður að telja líklegast að það tengist á einhvern hátt gosvirkninni í Kýrðalshrygg, hvort sem það er merki um ná-

lægð hitagjafa eða merki um lekt (nema hvorutveggja sé).

6. HELZTU NIÐURSTÖÐUR

Helztu niðurstöður rannsókna á jarðfræðigögnum úr borholum með tilliti til vatnsgengdar í jarðhitakerfi Nesjavalla eru eftirfarandi:

1. Láréttar jarðhitarásir:

- a) Vatnslekt eftir lagskilum á milli upphleðslueininga er greinileg í efstu 800 m berglagastaflans en lítt þar fyrir neðan. Slík lekt er öllu meiri nálægt uppstreymi jarðhitans.
- b) Vatnsæðar á 800-1400 m dýpi tengjast áberandi fersklegum basaltinnskotum. Innskotin eru talin liggja nær lárétt eða þeim halli lítillega inn undir Hengilinn.
- c) Vatnsleiðarar innan og við jaðra ísúrra (díórít) innskota eru áberandi neðan 1400 m dýpis. Sterkar líkur benda til að þessum innskotum halli um 14-24° til suðurs undir Hengilinn. Sérkennileg ummyndun er í ísúra berginu, og er talið að innskotin séu öll mynduð um líkt leyti í sögu kerfisins.

2. Lóðréttar jarðhitarásir:

Á yfirborði og í borholunum er unnt að greina a.m.k. fimm lóðréttar jarðhitarásir, tvær sem stefna NA-SV og mögulega þrjár með N-S stefnu.

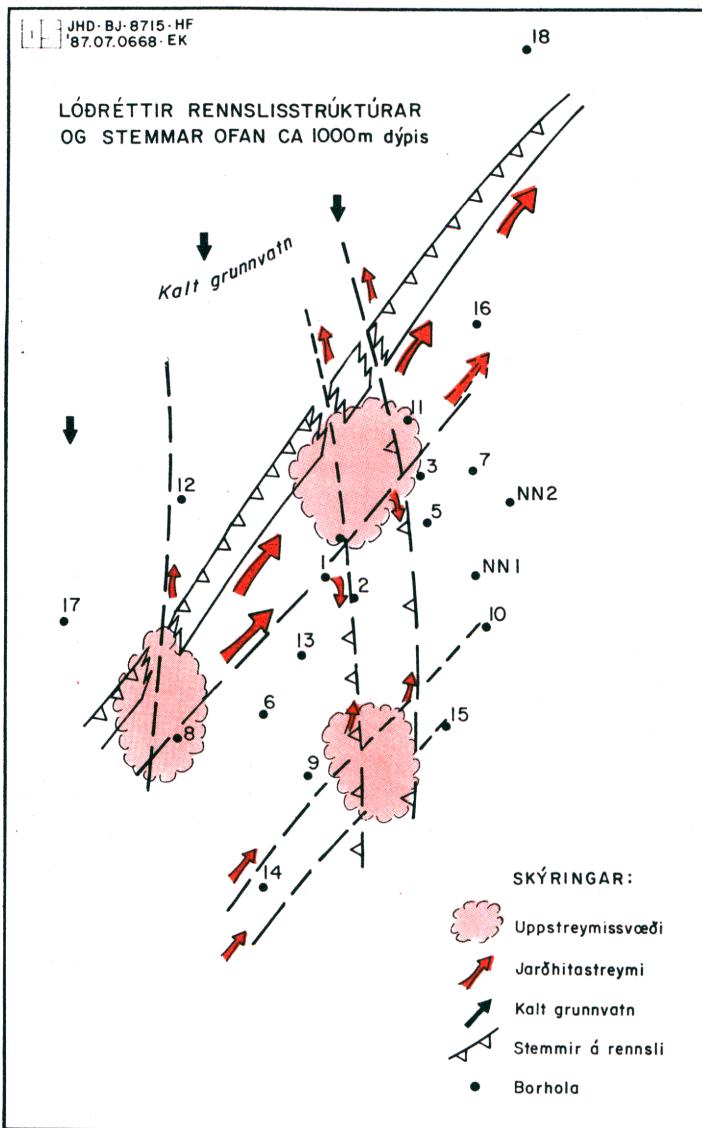
- a) Helsta framrás jarðhitans er undir austurhlíðum Kýrdalshryggjar, og dregur úr henni til norðurs. Jarðhitinn fylgir a.m.k. tveimur misgengjum og 2-3 fæðirásum goseininga (berggöngum).
- b) Ein (hugsanlega tvískipt) NA-SV jarðhitarás liggur næri holum 9 og 14 í suðausturhluta borsvæðisins.
- c) N-S brot, sem hugsanlega er misgengi, er talið liggja rétt vestan við holar 8 og 12.
- d) N-S misgengi með falli til vesturs liggur við holar 1, 2 og 4 og á milli hola 9 og 15.

- e) N-S misgengi með falli til austurs er talið liggja rétt vestan við holar 11, 3, 5 og 15.

Pessir sprungufletir virka bæði sem góðir stefnumarkandi jarðhitaleiðarar, en einnig sem rennslishindranir. Þeir leiðarar sem liggja eftir Kýrdalshrygg eru taldir hefta rennslíð til vesturs inn í Kýrdal. N-S "sprungur" hefta að öllu jöfnu rennsli eftir NA-SV leiðurunum. Þar sem N-S og NA-SV sprungur skerast finnst jarðhitinn grunnit í jörðu og jafnvel alveg uppi á yfirborði. N-S sprungurnar skera Kýrdalshrygginn á þremur stöðum, og er líklegt að þar hafi jarðhitavökvinn sloppið í gegn og inn í Kýrdalinn. Pessar sprungur í berggrunninum virðast ekki hafa heft "láréttu" innskotaleiðnina neðan 800 m dýpis í jarðhitageyminum.

Á mynd 27 er sýnd lega þessara lóðréttu sprungna í berggrunninum ofan u.p.b. 800-1000 metra, sem taldir eru stjórna og/eða hefta rennsli jarðhitavökvars um kerfið. Mynd 28 sýnir síðan á einfaldaðan þrívíðan hátt helstu jarðfræðilegu þætti sem stjórna streymi jarðhitans í berggrunni Nesjavalla. Á þeirri mynd er þó ekki sýnd lekt eftir lagskilum upphleðslueininga í efri 800 metrum jarðlagastaflans.

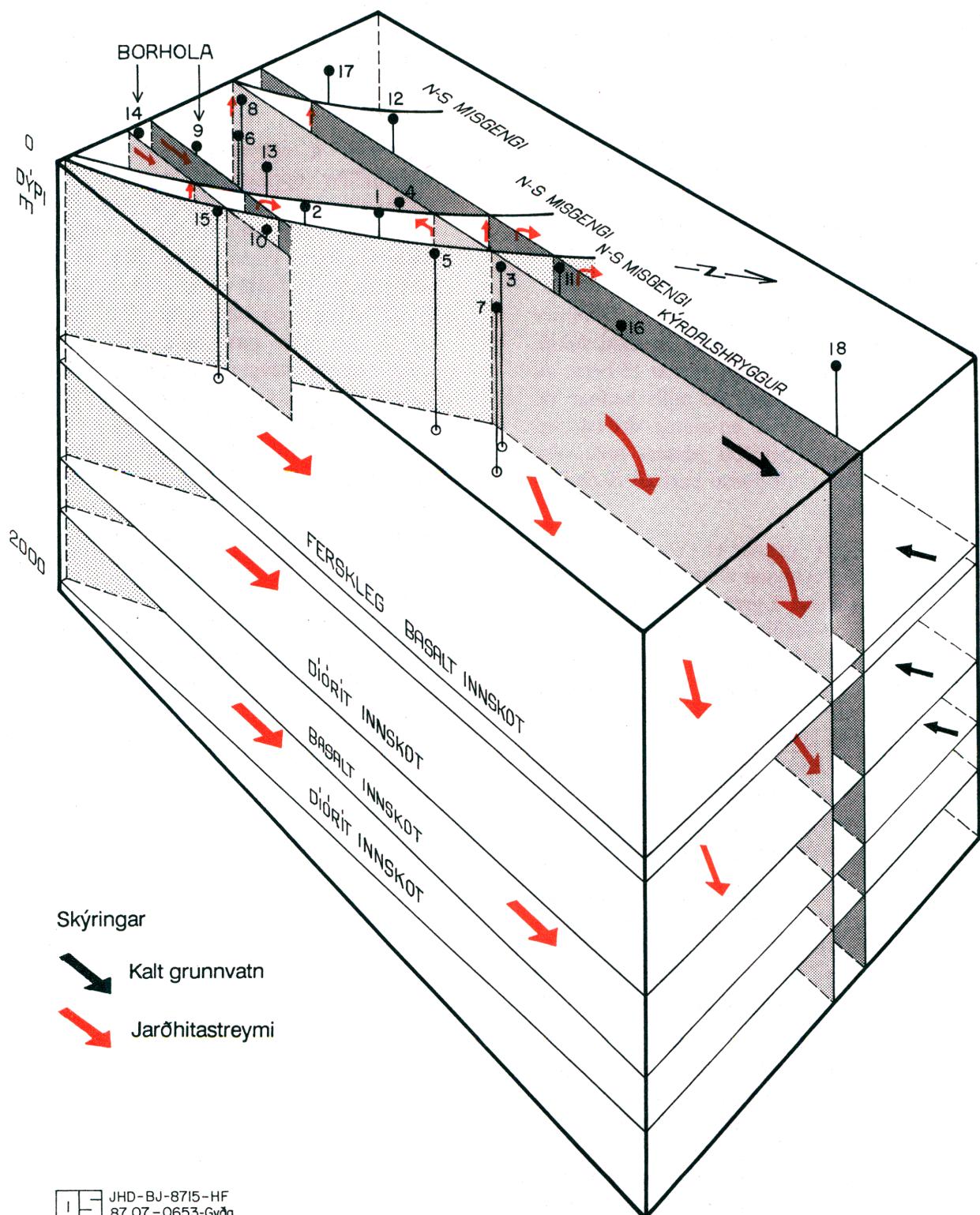
Rannsóknir á ummyndun og tengslum hennar við vatnsleiðarana gefa til kynna að jarðhitakerfið hafi þróast í nokkrum áföngum: Upphof eldvirkni í megineldstöðinni Hengli er talin hafa byrjað fyrir um 300.000 árum. Fyrstu glöggum merki um háhitavirkni í berggrunni Nesjavalla finnast við díorítinnskot, sem gætu verið samtíma 70.000 ára gosmyndunum sem liggja vestan í Hengli. Fyrir um 60.000 árum hleðst Hengilsstapinn upp ásamt móberginu í Kýrdalshrygg, og þá er líklegt að háhitakerfi hafi ríkt í neðri hluta núverandi Nesjavallakerfis og framrás jarðhita norður eftir Kýrdalshrygg, en ofan um 1000 m dýpis hafi zeólitar verið algengustu útfellingarnar. Við fyrra hraungosið í Kýrdalshrygg fyrir um 7.000 árum á sér stað öflug framrás háhitakerfis úr Hengli, og mögulegt að á svipuðum tíma hafi troðist inn fersk basaltinnskot. Kalsítútfellingar og



MYND 27. Áhrif lóðrétttra strúktúra ofan 1000 m á rennsli jarðhitakerfisins.

að hluta til eyðing zeólíta hefur átt sér stað eftir þennan atburð, og er talið að áður nefnd innskot hafi skorið lóðréttu leiðarana í Kýrdalshrygg og veitt jarðhitavökvanum inn í Kýrdalinn. Síðara Kýrdalsgosið fyrir um 2.000 árum bæði skerpir á jarðhitaflæðinu út úr Henglinum auk þess sem að gosgangurinn klippir á lektina eftir fersklegu basaltinnskotunum til vesturs inn í Kýrdalinn.

Samanburður á mældum hita og ummyndunarhitaferlum sýnir að mjög áberandi kæling hefur átt sér stað í Kýrdal sérstaklega, en einnig er mögulegt að kæling sé hafin í holum á norður- og jafnvel austurjaðri bor svæðisins.



MYND 28. Megin vatnsleiðarar í jarðhitakerfi Nesjavallavatns

7. FREKARI RANNSÓKNIR

Jarðfræðirannsóknir á grundvelli borholugagna eru langt á veg komnar á Nesjavöllum. Þó verður við samantekt sem þessa að undanskilja margt, sem vert væri að gera aðgengilegt í gagnasafni um Nesjavallavæðið. Einnig hafa komið fram við þessa samantekt nokkrar áleitnar spurningar, sem nauðsynlegt væri að svara. Hér á eftir eru raktar tillögur um jarðfræðirannsóknir, sem þarf að ljúka á Nesjavöllum fyrr en seinna.

- 1) Lokaskýrsla um holu NJ-17: Úrvinnslu gagna úr þessari holu er ekki lokið. Lauslegar athuganir benda til þess, að verulegt misgengi sé milli hennar og holu 12 í Kýrdal, en einnig virðast ummyndun og berghiti þessara hola vera frábrugðin. Úr þessu þarf að fá endanlega skorið.
- 2) Frágangur gagna er varða tengingu berglagamyndana á milli borholanna á Nesjavöllum. Í greiningu bergmyndana og samanburði þeirra á milli hola var oft stuðst við leiðarlög sem tiltölulega auðvelt var að rekja frá einni holu til annarrar. Ekki reyndist unnt við gerð þessarar skýrslu að ganga endanlega frá þessum gögnum. Hins vegar er nauðsynlegt að þau séu tekin saman og birt svo að þau verði öllum aðgengileg t.d. vegna borana í framtíðinni.
- 3) Nánari úttekt á dreifingu og skiptingu fersku basaltinnskotanna í efri hluta jarðhitakerfisins. Þunnsneiðar verði gerðar af sýnum alls staðar þar sem þessara innskota hefur orðið vart í borholunum.
- 4) Efnagreina mola sem til eru af díorítinu og ferskum basaltinnskotum svo og svarfsýnum af slíkum myndunum úr holunum og bera saman við efnasamsetningu á þekktum yfirborðsmyndum í Hengli. Ef unnt er að finna samsvörun þarna á milli er það stórt skref í þá átt að tengja Nesjavallasvæðið í tíma og rúmi við eldvirkni Hengilskerfisins.
- 5) Bera saman yfirborðsmyndanir á Nesjavallasvæðinu (með þunnsneiðum) og efstu 200 metrana í borholunum. Þunnsneiðaskoðunin er nauðsynleg til að samræma túlkun yfirborðs- og borholujarðfræði.
- 6) Mælingar á vökvabólum gefa mjög veigamiklar upplýsingar um hita og hitabreytingar í jarðhitakerfinu. Kanna þarf með vökvabólurannsókum útfellingarhita hinna ýmsu steinda. Höfundur hefur þegar hafið slíkar rannsóknir á kalsíti, kvarsi og wairakíti í holum 9 og 18, og sýna þær niðurstöður að miklar hitabreytingar hafa átt sér stað í jarðhitakerfinu, t.d. umtalsverð upphitun eftir að kalsítið féll út í berglögum við holu 9 en mikil hitalækkun í holu 18 síðan plötukalsítið féll út þar. Vænta má þess að slíkar rannsóknir muni skila mjög veigamiklum upplýsingum um jarðhitakerfið og breytingum sem orðið hafa á því.
- 7) Ljúka öllum þeim athugunum á kjarna úr holu NJ-17 sem til var stofnað. Þar á meðal efnagreiningum á bergi og steindum.

HEIMILDALISTI

Ásgrímur Guðmundsson og Hilmar Sigvaldason, 1986: *Nesjavellir, hola NG-10; jarðög, ummyndun, mælingar og vatnsæðar.* Orkustofnun, OS-86020/JHD-04, 50 s. Unnið fyrir HR.

Benedikt Steingrímsson, Ásgrímur Guðmundson, Hilmar Sigvaldason, Ómar Sigurðsson og Einar Gunnlaugsson, 1986a: *Nesjavellir, hola NJ-11. Borun, rannsóknir og vinnslueiginleikar.* Unnið fyrir HR. Orkustofnun, OS-86025/JHD-05, 164 s.

Benedikt Steingrímsson, Guðrún Sverrisdóttir, Hilmar Sigvaldason, Hjalti Franzson, Ómar Sigurðsson og Einar Gunnlaugsson, 1986b: *Nesjavellir, hola NJ-12. Borun, rannsóknir og vinnslueiginleikar.* Orkustofnun, OS-86026/JHD-06, 147 s. Unnið fyrir HR.

Benedikt Steingrímsson, Ásgrímur Guðmundsson, Guðrún Sverrisdóttir, Hilmar Sigvaldason, Ómar Sigurðsson og Einar Gunnlaugsson, 1986c: *Nesjavellir, hola NJ-13. Borun, rannsóknir og vinnslueiginleikar.* Orkustofnun, OS-86028/JHD-07, 146 s. Unnið fyrir HR.

Benedikt Steingrímsson, Guðmundur Ómar Friðleifsson, Guðrún Sverrisdóttir, Helga Tulinius, Ómar Sigurðsson og Einar Gunnlaugsson, 1986d: *Nesjavellir, hola NJ-14. Borun, rannsóknir og vinnslueiginleikar.* Orkustofnun, OS-86028/JHD-08, 133 s. Unnið fyrir HR.

Benedikt Steingrímsson, Guðmunndur Ómar Friðleifsson, Guðrún Sverrisdóttir, Helga Tulinius og Ómar Sigurðsson, 1986e: *Nesjavellir, hola NJ-15. Borun rannsóknir og vinnslueiginleikar.* Orkustofnun, OS-86029/JHD-09, 119 s. Unnið fyrir HR.

Benedikt Steingrímsson, Guðrún Sverrisdóttir, Helga Tulinius, Hjalti Franzson, Ómar Sigurðsson og Einar Gunnlaugsson, 1986f: *Nesjavellir, hola NJ-16. Borun, rannsóknir og vinnslueiginleikar.* Orkustofnun, OS-86030/JHD-10, 149 s. Unnið fyrir HR.

Halldóra Hreggviðsdóttir, 1987: *The Greenschist to Amphibolite facies Transition in the Nesjavellir Hydrothermal System, Southwest Iceland.* MSc. ritgerð við Stanford háskóla, 61 s.

Hjalti Franzson, Hilmar Sigvaldason, 1985a: *Nesjavellir, hola NG-8. Jarðög, ummyndun, mælingar og vatnsæðar.* Orkustofnun, OS-85120/JHD-16, 33 s. Unnið fyrir HR.

Hjalti Franzson, Hilmar Sigvaldason, 1985b: *Nesjavellir, hola NG-7. Jarðög, ummyndun, mælingar og vatnsæðar.* Orkustofnun OS-85124/JHD, 80 s. Unnið fyrir HR.

Hjalti Franzson og Hilmar Sigvaldason, 1985c: *Nesjavellir, hola NG-9. Jarðög ummyndun, mælingar og vatnsæðar.* Orkustofnun, OS-85123/JHD-17, 38 s. Unnið fyrir HR.

Hjalti Franzson, Ásgrímur Guðmundsson, Guðmundur Ó. Friðleifsson og Jens Tómasson, 1986: *Nesjavellir high-temperature field SW-Iceland. Reservoir Geology.* Proc. 5th International Symposium on Water-Rock Interaction, Reykjavík, Iceland pp 23-27.

Hrefna Kristmannsdóttir og Jens Tómasson, 1974: *Nesjavellir - hydrothermal Alteration in a high temperature area.* International Symposium on Water-Rock Interaction, Prague, September 1974.

Jens Tómasson og Kristján Sæmundsson 1967: *Borholur á Nesjavöllum.* Raforkumálastjóri, 25 s.

Jens Tómasson, Guðmundur Guðmundsson og Stefán Arnórsson 1971: *Jarðhitarannsóknir á Nesjavallavæðinu.* Orkustofnun, 31 s.

Jens Tómasson, Karl Grönvold, Hrefna Kristmannsdóttir og Þorsteinn Thorsteinsson, 1974: *Nesjavellir, hola 5.* Orkustofnun, OS-JHD-23, 50 s.

Knútur Árnason, Guðmundur Ingi Haraldsson, Gunnar V. Johnsen, Gunnar Þorbergsson, Gylfi Páll Hersir, Kristján Sæmundsson, Lúðvík S. Georgsson og Snorri Páll Snorrason, 1986a. *Nesjavellir.*

*Jarðfræði og jarðeðlisfræðileg könnun
1985. Orkustofnun, OS-86014/JHD-02,
125 s. Unnið fyrir HR.*

Knútur Árnason, Guðmundur Ingi Haraldsson, Gunnar V. Johnsen, Gunnar Þorbergsson, Gylfi Páll Hersir, Kristján Sæmundsson, Lúðvík S. Georgsson, Sigurður Th. Rögnvaldsson og Snorri Páll Snorrason, 1987: *Nesjavellir - Ölkelduháls. Yfirborðsrannsóknir 1986. Orkustofnun, OS-87018/JHD-02, 98 s. Unnið fyrir HR.*

Valgarður Stefánsson, Jens Tómasson, Einar Gunnlaugsson, Hilmar Sigvaldason, Hjalti Franzson og Ómar Sigurðsson, 1983: *Nesjavellir, hola NG-6. Borun, rannsóknir og vinnslueiginleikar. Orkustofnun OS-83023/JHD-04, 100 s. Unnið fyrir HR.*

Valgarður Stefánsson, 1985: The Nesjavellir high temperature geothermal field in Iceland, Proc. 10th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. *Stanford University, report SGP-TR-84*, pp 23-30.

ENGLISH SUMMARY

The report summarizes the interpretation of geological data from boreholes in the Nesjavellir high-temperature field in SW-Iceland with special emphasis on revealing the geological structures that control the fluid flow pattern in the reservoir.

The accumulative eruptive units dissected by the boreholes are divided into hyaloclastite and lava formations. The former are the more dominant type in the uppermost 700 m of the sequence (to approx. 300 m below s.l.), and that sequence is believed to represent the sequence belonging to the Hengill Central Volcano, thus rendering its maximum age as being about 300.000 years. Lava sequences are more dominant below that depth and it is possible that they are at least partly derived from the Grensdalur Central Volcano east of Hengill. Faults are on chronological grounds divided into two main groups: Faults cutting through lavas from the last interglacial (younger than 115.000 yrs) form a NE-SW graben structure adjacent to the Kýrdalshryggur, and a conspicuous N-S fault which dissects Koldlu- and Nesjalaugagil and also Kýrdalshrygg near well 4. Older faults (115.000-300.000 yrs) also trend NE-SW and N-S.

Intrusive rocks dissected by the boreholes are scarce above 700 m depth, but become more numerous below that depth and reach up to 100 % intensity near 2000 m depth. The majority of the intrusions are relatively altered basalts. Diorite intrusive rocks are found in most wells deeper than 800 m. These are inclined 14-24° towards south and are believed to represent a single intrusive phase. Relatively fresh basaltic intrusions belong to the third group and these are probably among the youngest intrusives at Nesjavellir. These are also believed to lie horizontally or dip slightly southwards into the Hengill central volcano.

Hydrothermal alteration is very informative on the geothermal system. The shape of the alteration zones shows that the main flow channels of the hydrothermal system

coincide with faults and dyke feeders of the Kýrdalshryggur ridge and also along the southern part of the Nesja- and Koldulaugagil fractures. The aforementioned N-S fault which cuts through both flow channels partially blocks further flow towards NE. Similar features are evident when mapping the upper boundaries of most alteration minerals. A comparison between temperature estimates from the alteration zonation and measured temperature in the wells show that the hydrothermal system has cooled down at the outer perimeter of the system; particularly conspicuous in the Kýrdalur wells (17, 18 and 12), but in wells at the northeastern and eastern boundaries cooling is probable but less visible.

The geological structures that largely control the aquifers which the wells dissect are of three types: Aquifers along horizontal stratification boundaries of accumulative units are dominant in the uppermost strata but these diminish in size and number at greater depth and are more or less absent below 800 m depth. Below that depth permeability appears to be mostly controlled by fractures created by three types of intrusives; diorites, relatively fresh basalts and thirdly altered basalt intrusions which though are found noticeably less permeable than the other intrusions.

The chronological deposition sequence of alteration minerals in veins and vugs makes assessment of distinct evolutionary stages of the hydrothermal system possible, especially as it enables the connection of the hydrothermal system with specific geological structures and even to particular episodes in the volcanic history of the volcano. The earliest clear indications of high-temperature activity are associated with the diorite intrusions, which may be the intrusive equivalent of the intermediate extrusives in the western part of the Hengill, and which have been dated to be around 70.000 years old. The second geothermal episode is probably associated with the extrusion of the Hengill "stapi" and the hyaloclastite formation in Kýrdalshryggur some 60.000

years ago. In the upper part of the system zeolites deposit while high-temperature condition and mineral deposition prevail in the lower part of the reservoir. The third and possibly the most vigorous hydrothermal episode is related to the ca. 7000 year old lava eruption along a fissure in the Kýrdalshrygg ridge, and the intrusion of the relatively fresh basalts. This episode is evidenced by extensive calcite deposition and a progressive destruction of the zeolite assemblage. The 2000 year old lava eruption along the same fracture in the Kýrdalshryggur ridge possibly blocks the hydrothermal flow along the fresh basalt intrusions west into Kýrdalur valley and redirects the main stream northeast along the eastern part of the Kýrdalshryggur ridge.

The most recent tectonic features are predominantly located north and west of Kýrdalur valley and are believed to be the main source of cold groundwater seeping through and cooling the western part of the Nesjavellir high-temperature system.