



ORKUSTOFNUN
Vatnsorkudeild

BLÖNDUVIRKJUN

Mæling á dynamískum
fjaðureiginleikum berggrunnsins

Magnús T. Guðmundsson
Birgir Jónsson

Unnið fyrir Landsvirkjun

OS-88065/VOD-13 B

Desember 1988



ORKUSTOFNUN
Vatnsorkudeild

Verknúmer: 630.100

BLÖNDUVIRKJUN
Mæling á dynamískum
fjaðureiginleikum berggrunnnsins

Magnús T. Guðmundsson
Birgir Jónsson

Unnið fyrir Landsvirkjun

OS-88065/VOD-13 B

Desember 1988

MÓTTEDIÐ
6 7 JUN 1989
LANDSVIRKJUN

EFNISYFIRLIT

1. INNGANGUR	3
2. JARÐFRÆÐILEGAR AÐSTÆÐUR	3
3. EFNISSTUÐLAR OG SKJÁLFTABYLGJUR	4
4. EÐLISMASSI	6
5. FRAMKVÆMD	6
6. NIÐURSTÖÐUR	7
7. UMRÆÐA	8
8. HEIMILDIR	9

MYNDASKRÁ

1. Aðkomugöng. Langsnið jarðlaga
2. P- og S-bylgjur
3. Afstöðumynd neðanjarðarmannvirkja. Mælistaðir P- og S-bylgjuhraða
4. Stöðvarhúshellir og nágrenni. Staðsetning prófíla BG-1 og BG-2
5. Frágangur á skjálftanema (geofón) í bergi
6. Veggir í stöðvarhúsi, jarðfræðisnið
7. Prófill BG-1 í sveifflugöngum, staðsetningar nema í bergvegg
8. Prófill BG-2 í sveifflugöngum, staðsetningar nema í bergvegg
9. BG-2, bylgjulínurit
10. BG-1, fartímalínurit
11. BG-2, fartímalínurit

1. INNGANGUR

Skýrsla þessi greinir frá niðurstöðum bylgjubrotsmælinga í jarðgöngum Blönduvirkjunar í nágenni við stöðvarhellinn. Tilgangur mælinganna var að ákvarða hraða P- og S-bylgna í berginu og fá þannig mat á efnisstuðlum bergsins, dynamíska fjaðurstuðlinum E_{dyn} og Poissonshlutfalli ν .

Þegar holrúm er myndað neðanjarðar sígur bergið umhverfis saman, inn í holrúmið. Einn þáttur í bergtæknilegu eftirliti Landsvirkjunar með jarðgangagerðinni var að mæla slíkar færslur í bergmassanum eftir því sem verkinu miðaði, sérstaklega færslur umhverfis stöðvarhellinn. Greinilegar færslur komu fram, sérstaklega við hverja sprengingu sem losaði um ákveðið rúmmál af bergi. Út frá þessum færslum var reiknaður statískur fjaðurstuðull E_{stat} bergmassans (VST 1986).

Til þess að fá mæligildi á fjaðurstuðli bergmassans með annari óskyldri aðferð var talið æskilegt að reyna að ákvarða dynamíska fjaðurstuðul E_{dyn} bergmassans. Mælingar á P- og S-bylgjuhraða á vettvangi (in situ) hafa ekki verið gerðar áður hér á landi í þessum tilgangi og því í fyrsta skipti sem efnisstuðlar íslensks bergs eru metnir á þennan hátt.

2. JARÐFRÆÐILEGAR AÐSTÆÐUR

Berggrunnur Blöndusvæðisins skiptist í stórum dráttum í tvær myndanir. Sú eldri er tertíer að aldri, nær samfelldur stafli basalthrauna, sem sennilega runnu fyrir um 6 milljónum ára (Ágúst Guðmundsson o. fl. 1982).

Yngri myndunin er kvarter að aldri, gerð úr basalhraunlögum, oft með völubergs- og jökulbergslögum á milli hraunlaganna. Þessi yngri myndun er frá ísöld, hálf til tveggja milljón ára að aldri.

Svo til öll yfirborðsmannvirki Blönduvirkjunar (stíflur, skurðir o.fl.) eru á eða í yngri mynduninni (nema frárennslisskurðurinn niðri í Blöndudal), en öll neðanjarðarmannvirki eru í eldri mynduninni.

Tertíera myndunin skiptist í 4 syrpur á virkjunarsvæðinu. Tvær þeirra eru nær eingöngu úr frekar þunnum þóleiðhraunlögum, þóleiðsyrpur I (neðri) og II (efri). Hvert þóleiðhraunlag skiptist í miðhluta úr storkubergi og samlímdan gjallkarga (kargaberg) efst og neðst. Hinar tvær myndanirnar, Blandsyrpur I (neðri) og II (efri) eru sitt hvoru megin við efri þóleiðsyrpuna (sjá mynd 1). Í blandsyrpunum eru auk þóleiðs einnig dílabasalt og ýmis konar setberg (Ágúst Guðmundsson o.fl. 1982).

Stærstur hluti neðanjarðarmannvirka Blönduvirkjunar er í efri þóleiðsyrpunni (Þól. II), þ.e. stöðvarhúsið með sveiflugöngum, aðkomugöngin, nær helmingur frárennslisganganna og neðsti fjórðungur hinna tveggja lóðréttu strengja- og fallganga (sjá mynd 1). Bylgjubrotsmælingarnar sem lýst er í þessari skýrslu voru gerðar á tveimur stöðum í þessari syrpu (sjá myndir 3 og 4). Þessi efri þóleiðsyrpa myndar vegg Gilsár-gils þar sem það er hvað dýpst og sést þar greinilega uppbygging þóleiðbasaltsins með kargaberg á lagamótum. Aðeins eitt þunnt setlag er í allri syrpunni, nálægt miðju hennar. Basaltið er mikið sprungið og leirfyllt en lítið er um sprungufyllingar úr geislasteinum. Heildarþykkt syrpunnar er tæplega 140 m. Fjöldi hraunlaga er um 20. Meðalþykkt hraunlaga er um 7 m. Segulmögnun bergsins er að mestu öfug við núverandi segulsvið.

Við kjarnaborunina meðan á undirbúningi Blönduvirkjunar stóð og við athuganir meðan verið var að vinna jarðgöngin, kom greinilega í ljós að þóleiðbasaltið er mun meira sprungið heldur en dílabasaltið. Hefur það þar með lægri heilleikastuðul (RQD, sjá töflu 1). Báðar bergtegundirnar hafa þó orðið fyrir sama spennuálagi. Erfitt er að segja til um ástæður þessa mismunar. Mögulegra skýringa gæti þó verið að leita í eftirtöldum mismunandi eiginleikum bergtegundanna:

- þóleiðið virðist stökkara auk þess sem það hefur hærri fjaðurstuðul (E_{stat}) en dílabasaltið (sjá töflu 1). Hugsanlegt er að þetta valdi því að dílabasaltið eigi

auðveldara með að svara álagi með fjöðrun án brots.

- b) Þóleið er yfirleitt fínkornóttara en dílabasaltið. E.t.v. er þetta orsök þess að þóleið er stökkara.
- c) Innri gerð dílabasaltsins er oftast "ófitisk", þ.e. óreglulegir pýroxen (ágít) kristallar eru vaxnir utan um minni plagioklas feldspatkristalla.
- d) Straumflögun eða tilhneiging til hennar gæti átt sök á aukinni kleyfni og lægra RQD í þóleiðinu, a.m.k. hvað varðar láréttar sprungur.

Tilgátur þessar hafa komið fram í viðræðum við ýmsa starfsmenn Orkustofnunar og Landsvirkjunar.

ast hydrostatískt ástand. Við stöðvarhelli sem er á 220-250 m dýpi er lóðrétt spennan komin í 6-7 MPa og sennilega orðin hærri en sú lárétt (Ág.Guðm. o.fl. 1982, viðauki E., Birgir Jónsson 1984).

3. EFNISSTUÐLAR OG SKJÁLFTABYLGJUR

Útbreiðsluhraði jarðskjálftabylgna í bergi er háður efnisstuðlum þess, fjaðurstuðlinum E_{dyn} (dynamískum Youngs-stuðli), Poissonshlutfalli ν og eðlismassanum (rúmþyngdinni) ρ . Jarðskjálftabylgjum má skipta í tvo flokka eftir eiginleikum þeirra. Annars vegar innri bylgjur sem dreifast um allt efnid og hinsvegar yfirborðsbylgjur sem fylgja yfirborði jarðar eða þeim fleti þar sem mæling fer fram. Við hagnýtingu skjálftamælinga

TAFLA 1.

Blönduvirkjun; ýmsar bergtæknilegar stærðir.

	ÞÓLEIÐSYRPA II (EFRI)			BLANDSYRPA I
	Þétt þóleiðbasalt	kargaberg	Misgengisbreksía	Þétt dílabasalt
1) Rúmmálshlutföll %	um 67	um 30	um 3	
2) Eðlismassi (rúmþyngd) $g/cm^3 \rho$	2,8-2,9	2,2-2,3	2,2-2,3	2,8
2) Brotþol σ_{max} MPa	60-270 meðalt. 240	10-60 meðalt. 35		meðalt. 170
2) Fjaðurstuðull E_{stat} GPa	30-40	3-5		20-30
3) Heilleikastuðull RQD %	20-80 meðalt. 45	50-90 meðalt. 70	10-30 meðalt. 12	50-90 meðalt. 70
3) Berggæðamat Q	1,1-7,7 meðalt. 2,9	3,3-8,3 meðalt. 5,1	0,06-0,5 meðalt. 0,1	8,3-30

- 1) Mælt í stöðvarhelli
- 2) Mælt á litlum sýnum í rannsóknarstofu
- 3) Mælt á vettvangi í bergopnu

Unnið úr gögnum Orkustofnunar og Landsvirkjunar

Spenna var mæld í bergstaflanum við Blönduvirkjun með vökvabrotsaðferðinni (hydraulic fracturing) af B.C. Haimson frá University of Wisconsin, Madison, 1979. Mælt var í holu BV-12 sem er á frárennslisgangaleiðinni um 1 km frá stöðvarhelli. Náðu mælingarnar niður á um 170 m dýpi, eða rétt niður fyrir göngin. Á þessu dýpi virðist lárétt og lóðrétt spennan í berginu vera svipuð að stærð (um 4 MPa), þ.e. nán-

inga til könnunar jarðlaga (bylgjubrotsmælinga, endurkastsmælinga) eru eingöngu notaðar innri bylgjur og þá langmest P-bylgjur (þrýstibylgjur). Skerbylgjan eða S-bylgjan, hefur lítið verið notuð nema þá til að ákvarða efnisstuðla bergs (sjá mynd 2).

Sambandi P-bylgjuhraða, V_p , og efnisstuðlanna E_{dyn} , ν og ρ er lýst með jöfnunni:

$$V_p = \left[\frac{E_{dyn}}{\rho} \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \right]^{1/2} \quad (1)$$

Tilsvarendi jafna fyrir S-bylgjuhraða, V_s er:

$$V_s = \left[\frac{E_{dyn}}{\rho} \frac{1}{2(1+\nu)} \right]^{1/2} \quad (2)$$

Þar sem hlutfall Poissons er ætíð stærra en 0 þá er hraði þrýstibylgju hærri en hraði skerbylgju fyrir öll efni. Jöfnur (1) og (2) má leysa saman fyrir E_{dyn} og ν og fæst þá:

$$E_{dyn} = V_s^2 \rho \frac{3 \left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 4}{\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1} \quad (3)$$

og

$$\nu = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 2}{2 \left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 2} \quad (4)$$

Ef eðlismassinn ρ og hraðarnir V_p og V_s eru þekktir, má því reikna E_{dyn} og ν fyrir efnið.

Fjaðurstuðullinn E_{dyn} sem reiknaður er út skv. (3) hefur ekki sama tölulega gildi og statíski fjaðurstuðullinn E_{stat} . Fyrir allflestar tegundir bergs og flestar aðstæður er E_{dyn} hærri en E_{stat} (Jaeger og Cook 1979, Jaeger 1979, Darracott og Orr 1976). Hlutfallið E_{dyn}/E_{stat} er ekki vel ákvarðað en Jaeger og Cook (1979) sýna hlutfallið 1.5 og 2.5 fyrir þær tvær tegundir storkubergs sem þeir nefna. Rýmisfjöðrun efnis, K (bulk modulus), er tengd fjaðurstuðlinum E með jöfnunni

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (5)$$

Á því hlutfallið K_{dyn}/K_{stat} að vera jafnt E_{dyn}/E_{stat} . Nýlegar mælingar í tilraunastofu á K_{dyn}/K_{stat} nokkurra bergtegunda, benda til þess að sprungubéttleiki bergsins ráði miklu um hvert hlutfallið sé (Cheng og Johnston 1981). Þá benda sömu mælingar til þess að við þann þrýsting sem ríkir kring-

um stöðvarhelli Blönduvirkjunar (6-7 MPa) liggi E_{dyn}/E_{stat} á bilinu 2 til 4. Á lægri talan við um tiltölulega sterkt berg með nokkurn sprungubéttleika (granít, sandsteinn), en hærri talan á við veikara berg (túff). Verður að telja líklegt að hlutfall E_{dyn} og E_{stat} liggi á ofangreindu bili. Rétt er að benda á, að nokkur eðlismunur er á mælingu efnisstuðla á vettvangi með skjálftabylgjum og mælingu sem gerð er á bergsýni á tilraunastofu. Bergsýnið er oftast heilt og ósprungið og segja niðurstöður til um eiginleika bergefnsins. Við mælingu á vettvangi eru mældir eiginleikar svæðis sem er 20 - 40 m í þvermál og fást þá eiginleikar bergmassans í heild með sprungum og öðrum veikleikum. Ætti því vettvangsmæling að segja betur til um raunverulega eiginleika bergsins með tilliti til mannvirkjagerðar.

Mælingar á hraða P- og S-bylgna á vettvangi til ákvörðunar á efnisstuðlum hafa verið gerðar erlendis nú um nokkurt árabil (Mooney 1977). Þær eru talsvert vandasamari en mæling á P-bylgjunni einni eins og vanalegt er við bylgjubrotsmælingar. Ástæðan er sú að S-bylgjan hefur lægri hraða og lengri ferðatíma og kemur því fram seinna á bylgjulínuriti. Getur þá oft verið erfiðleikum háð að þekkja hana úr þeim bylgjulestum sem oft fylgja P-bylgjunni, sérstaklega þegar notað er sprengiefni til að framkalla bylgjur eins og vanalegast er hér á landi. Mæling S-bylgju kallar því á sérstakar aðferðir.

Orkustofnun festi fyrir nokkrum árum kaup á 12 rása skjálftamælitæki af gerðinni Bison Geopro 8012 og með tilkomu þess hafa opnast nýir möguleikar á mælingu bæði P- og S-bylgju á vettvangi. Þetta tæki getur lagt saman merki frá endurteknum mælingum og er því hægt að notast við afflittinn stefnuháðan orkugjafa eins og sleggju og byggja upp merkið með endurteknum höggum.

Venjulegir skjálftanemar eru aðeins næmir fyrir færslum í eina stefnu og þarf því sérstaka nema fyrir hreyfingar í láréttum fleti og aðra fyrir lóðréttar hreyfingar. Bylgjuhreyfing P-bylgju er fram og aftur í útbreiðslustefnu bylgjunnar en bylgjuhreyfing

S-bylgjunnar er skerhreyfing þvert á útbreiðslustefnuna. Til að ná sem bestum árangri þarf því tvær gerðir nema ef mæla á bæði P- og S-bylgjur (mynd 2).

4. EÐLISMASSI

Eðlismassi efnisins gengur inn í jöfnur (3) og (4). Samkvæmt mælingum Landsvirkjunar á flatarmáli mismunandi berggerða í veggjum stöðvarhellis, eru um 2/3 hlutar bergs þar basalt, en 1/3 kargaberg ásamt örlitlu af misgengisbreksíu og setbergi (sbr. töflu 1, og mynd 6) og eru niðurstöður svipaðar fyrir aðkomu- og frárennslisgöng (Björn A. Harðarson 1989).

Niðurstöður mælinga á bergsýnum úr borholum BV13 og BV14 gefa eðlismassa þóleiðs um 2900 kg/m^3 og karga um 2300 kg/m^3 (Ágúst Guðmundsson og fl. 1982). Vegið meðaltal er 2700 kg/m^3 . Þetta er líklega í hærra lagi fyrir jarðlagastaflann í heild þar sem sýnin eru væntanlega úr heillegri hluta hans. Hér verður notað gildið 2800 kg/m^3 fyrir þetta basaltið og 2600 kg/m^3 fyrir bergmassann í heild.

5. FRAMKVÆMD

Mælingarnar voru gerðar dagana 23. og 24. ágúst 1988 af Magnúsi T. Guðmundssyni og Birgi Jónssyni. Mældir voru tveir viðsnúnir prófilar og var sá fyrri staðsettur í sveifflugöngum Blönduvirkjunar en sá seinni í frárennslisgöngunum.

Til að fá sem besta mynd af bylgjuhraða í hraunlagastafla eins og við Blöndu hefði verið gott að mæla bæði lárétta prófíla eins og gert var, þ.e. í stefnu laganna en einnig þvert á lögin, þ.e. nær lóðrétt, til að sjá hvort munur er á hraða í þessar tvær stefnur. Vegna erfiðra aðstæðna í lóðréttu göngunum var hins vegar ekki talið ráðlegt að reyna þar mælingu. Mælistaðurinn í frárennslisgöngunum var hins vegar valinn með það fyrir augum að prófíllinn skæri tvö hraunlög og kargalag. Var vonast til að þar fengjust nokkuð dæmigerð hraðagildi fyrir þóleiústaflann.

Skjálftanemarnir voru festir í bergvegginn á eftirfarandi hátt: Útbúnir höfðu verið um 20 cm langir járnteinar með ró soðinni á endann. Þessum teinum var síðan komið fyrir í holum sem boraðar voru í bergvegginn í 130 cm hæð og róin höfð 4 - 5 cm frá vegg ganganna. Teinarnir voru festir með fljótharðnandi Thorogrip steypu. Loks voru nemarnir skrúfaðir á teinana (sjá mynd 5).

Eins til fjögurra cm þykkt sprautusteypulag, þakti bergveggina á báðum mælistöðum. Teinarnir gengu því 10 - 15 cm inn í bergið og voru að mestu leyti festir í það en ekki sprautusteypulagið. Skiptir það líklega talsverðu máli því eiginleikar steypunnar eru aðrir en bergsins og best mæling fæst ef nemarnir eru festir tryggilega í það efni sem mæla skal. Sprautusteypulagið er hins vegar of þunnt til að bera bylgjur af þeirri tíðni sem ráðandi er í mælingunum (200 - 500 Hz). Truflun vegna beinnar bylgju sem berst eftir sprautusteypulaginu ætti því ekki að vera til að dreifa.

Til að mæla S-bylgjur voru nemar fyrir lóðréttu hreyfingu festir á teinana. S-bylgjur voru síðan framkallaðar með því að slá með sleggjunni niður á lárétta bergsyllu við enda prófílsins. Þegar vel tekst til berast nær eingöngu S-bylgjur í stefnu prófíls. Til að framkalla P-bylgju í prófílstefnuna voru notaðir láréttir nemar og hreyfingarás þeirra snúið samsíða henni. Síðan var slegið í lóðréttu bergbrún og höggum beint í stefnu prófílsins. Var þetta gert við báða enda prófíls. Notuð voru 5 - 25 högg við hverja mælingu.

Á fyrri mælistaðnum var mældur prófíll BG-1 (sjá staðsetningu á myndum 3 og 4). Var hann um 20 m langur og staðsettur í norðurvegg sveiffluganga (endi BG-1A í lengd 50 m og BG-1B í 70 m frá aðkomugöngum). Prófíllinn er í næstefsta basaltlaginu í efri þóleiútsyrpunni (þól.II). Á myndum 1 og 6 sést að í austurenda stöðvarhellis og innsta hluta aðkomuganga er spilda sem hefur sigið um 30-40 m og þar með fært setlagið sem er neðst í efri blandstyrpunni niður í þakhvelfingu stöðvarhellisins. Komið var fyrir 10 teinum í berginu og bil milli þeirra

haft 2 m. Voru allir nemarnir staðsettir í sama þóleiútlaginu (sjá mynd 7). Var 1. neminn í lengd 50 m en sá 10. í lengd 68 m.

Seinni mælistaðurinn (BG-2) var í frárennslisgöngunum, tæplega 300 m frá stöðvarhellinum (sjá myndir 3 og 4). Bergið þar er í neðri hluta áður nefndrar efri þóleiútsyrpu. Staðurinn er á mótis við borholu BV-13, en þar skera nokkrar brotalínur göngin (mynd 1). Bergið er því fremur brotið á þessum stað og nær prófillinn yfir 2 basalhraunlög og eitt kargalag (mynd 8). Mælt var í austurvegg ganganna og var bil milli nema haft 4 m en 11 teinum var komið fyrir í bergveggnum. Var 1. nemi í lengd 290 m sá 11. í 330 m. Þrjú misgengi skera göngin í lengd 310 - 320 m (mynd 8).

6. NIÐURSTÖÐUR

Í báðum prófílum náðust mælingar á hröðum P- og S-bylgna. S-bylgjan kemur greinilega fram allsstaðar og við suma nemana er hún eina bylgjan með verulegt útslag. Styrkur P-bylgju er allsstaðar minni og að öllum líkindum tapast fyrsti fasi hennar í fjarlægari nemum í BG-2 (mynd 11). Hraðakvörðun P-bylgju byggist þá á 2. fasa hennar. Við ákvörðun komutíma P-bylgju er notað fyrsta brot á línuriti en við ákvörðun S-bylgjunnar er notaður fyrsti bylgjutoppur sem henni tilheyrir (mynd 9). Aðferð minnstu kvaðrata var notuð til að leggja bestu línu gegnum mælipunktana á fartímalínuritunum og ákvarða þannig bylgjuhraða. Óvissur í hallatölu bestu línu gefa síðan óvissur í bylgjuhröðum.

Á báðum mælistöðum kemur fram yfirborðslag með lægri hraða en bergið í kring ($V_p = 1500-2000$ m/s) eins og sést á myndum 10 og 11. Virðist það vera um 2 m þykkt á báðum mælistöðum, þ.e.a.s. ef gengið er út frá því að fyrsti fasi P-bylgju tapist í BG-2. Líkleg skýring á tilvist þessa lags er að þetta sé brotið eða a.m.k. raskað berg eftir sjálfa jarðgangagerðina. Við ákvörðum E_{dyn} og ν eru eingöngu notaðir komutímar bylgna sem koma úr berginu innan þessa lags, og þeir hraðar sem upp eru gefnir í töflu 2 eiga við óspjallaða bergið.

Óvissa er talsverð í niðurstöðum eins og tafla 2 sýnir. Stafar hún að langmestu leyti af óvissu í ákvörðun bylgjuhraða sem rekja má til óreglu og óvissu í komutíma bylgna í einstaka nema. Ástæður óreglunnar eru þessar helstar:

- Festing teinanna við bergið getur verið misgóð frá einum stað til annars. Næmnin getur því verið mismunandi, og fyrsti fasinn tapast ef hann er veikur.
- Tíðni bylgna er að mestu ofan við það tíðnisvið þar sem næmni nemanna er mest (10-200 Hz). Bylgjulínurit sýna þó tíðni allt upp í 700 Hz en verið getur að útslag hátíðninnar (>200 Hz) sé deyft. Æskilegt væri að nota nema með hærri eigintíðni og meiri næmni á hárrí tíðni, en þeir eru ekki til hér á landi.
- P-bylgjan hefur víða mjög lítið útslag og því stundum erfitt að ákvarða fyrsta brot á línuritunum. Að hluta til gæti þetta lága útslag stafað af b).
- Veggir jarðganganna eru ekki alveg sléttir. Á þeim eru ójöfnur og getur munur á skvompu og brík verið um 1 m.
- Dálítill óvissa er í tímasetningu hvers höggs, þ.e.a.s. í gangsetningu skráningartækisins. Þessi þáttur jafnast þó líklegast út að mestu þar sem hvert línurit er byggt upp með 15-25 höggum.
- Þykkt raskaða lagsins getur verið mismunandi frá einum stað til annars.

Af ofangreindum þáttum vega a), c) og d) líklega þyngra en hinir.

Eins og myndir 10 og 11 og tafla 2 sýna þá er nokkur munur á hraða frá A og B í báðum prófílum. Ólíklegt er að hann stafi af þykktarbreytingu raskaða lagsins því þykkt þess virðist svipuð við báða enda beggja prófíla. Að einhverju leyti gæti hraðamunurinn stafað af halla jarðlaga miðað við prófíla. En þar sem óvissa í ákvörðun hraða er talsverð (tafla 2) er ekki hægt að fullyrða að kerfisbundinn munur sé á mælingunum. Hér er því notað meðaltal A og B mælinga.

TAFLA 2.

Niðurstöður mælinga á P- og S-bylgjuhraða, ν og E_{dyn} .

mæling	ρ (kg/m ³)	V_p (m/s)	V_s (m/s)	V_p/V_s	ν	E_{dyn} (GPa)
BG-1A		4500±300	2500±250	1.80	0.28	
BG-1B		3400±500	2000±100	1.70	0.24	
BG-1 _{av}	2800	3950±900	2250±400	1.76	0.26	36±14
BG-2A		4100±300	1900±100	2.16	0.36	
BG-2B		3700±300	2100±100	1.76	0.26	
BG-2 _{av}	2600	3900±500	2000±200	1.95	0.32	27±6

BG-1_{av} gefur nokkru hærri S-bylgjuhraða og dynamískan fjaðurstuðul en BG-2_{av}. Þó óvissa í E_{dyn} sé talsverð og tölulegur munur sé á mörkum þess að vera marktækur þá er hann hins vegar nokkuð sennilegur. BG-1 liggur allur í einu þóleiðhraunlagi (myndir 6 og 7) og má því reikna með því að þær tölur sem þar fást séu frekar lýsandi fyrir hvert einstakt hraunlag heldur en syrpu í heild með kargalögum. Prófill BG-2 nær hins vegar yfir tvö hraunlög og kargalag auk þess sem 3 misgengi skera prófillinn (mynd 8). Nota má upplýsingar í gögnunum um ráðandi bylgjulengdir til að meta hvaða jarðlög ráða mestu um þá bylgjuhraða sem mældir eru.

Til að bylgja geti borist eftir jarðlagi án þess að eiginleikar aðliggjandi laga hafi áhrif á út breiðsluhraðann, þarf þykkt þess að vera a.m.k. jöfn bylgjulengdinni. Bylgjulengdin er hlutfall hraða og tíðni en tíðnina má reikna út frá bylgjulínuritunum.

Þóleiðhraunlagið sem BG-1 er staðsettur í er 6-8 m þykkt. Þar er tíðni P-bylgjunnar 500-700 Hz en S-bylgjunnar 300-400 Hz. Bylgjulengdir bæði fyrir P- og S-bylgjur eru því svipaðar eða 6 - 7 m og bylgjan sem mæld er verður fyrst og fremst fyrir áhrifum frá þessu eina hraunlagi. Hraunlögin í BG-2 eru 4 - 6 m þykk en kargalagið er 2 - 3 m. Þar eru tilsvareandi tölur fyrir tíðnina $f_p = 300-400$ Hz og $f_s = 200-250$ Hz og bylgjulengd beggja bylgna nálægt 10 m. Þar sem ráðandi bylgjulengdir eru um tvöföld lagþykktin, má gera ráð fyrir að bæði þetta basaltið og kargabergið hafi áhrif á útbreiðsluhraða P- og S-bylggnanna. Aðstæður

í BG-2 eru því dæmigerðari fyrir staflann í heild sinni.

Niðurstöður mælinganna eru því þær, að líklegasta gildi dynamíska fjaðurstuðulsins fyrir þóleiðsyrpuna sem stöðvarhellirinn er staðsettur í, sé $E_{dyn} = 27$ GPa. Fyrir hraunlögin sjálf er hann hins vegar nokkru hærri, eða $E_{dyn} = 36$ GPa. Rétt er að áréttta að óvissa er talsverð í báðum mælingum eins og tafla 2 sýnir.

7. UMRÆÐA

Talið er að lega stöðvarhellis Blönduvirkjunar svari til um 0.5-0.7 km dýpis í órofnum stafla (Ágúst Guðmundsson 1989, munnl. uppl). Ólafur Flóvenz (1980) birti línurit sem sýnir fylgni P- og S-bylgjuhraða við dýpi í órofnum stafla. Niðurstöður sínar byggði hann á endurtúlkun mjög umfangsmikilla gagna Guðmundar Pálmasonar (1971) um P- og S-bylgjuhraða íslenska berggrunnins. Er þar talið að 0.6 km dýpi í stafla samsvari $V_p = 3800$ m/s og $V_s = 2000$ m/s. Ef reiknaður er út fjaðurstuðull samkvæmt þessum tölum fæst $E_{dyn} = 27$ GPa eða sama og í BG-2. Virðist fjaðurstuðull þóleiðstaflans við Blöndu því vera svipaður meðaltali fyrir íslenska basaltstaflann.

Poissonshlutfall mælist 0.26 í BG-1 og 0.32 í BG-2. Þessi munur er ekki marktækur því óvissa í báðum tölum er mun meiri en nemur mismuninum. Meðaltal allra mælinganna er 0.29. Til að ákvarða ν sæmilega vel verður óvissa í V_p og V_s að vera mjög lítil. Hins vegar eru þessi gildi í góðu samræmi við það sem vitað er um ν í íslensku bergi

(Guðmundur Pálmason 1971, Ólafur Flóvenz 1980, Christensen og Wilkens 1982).

Eins og sagt var hér að framan má telja líklegt með hliðsjón af mælingum á bergsýnum, að hlutfallið E_{dyn}/E_{stat} liggi á bilinu 2 til 4. Sé þetta tekið trúanlegt, ætti E_{stat} þóleiðsyrpunnar að vera 7-14 GPa. Eins og nefnt var í inngangi, mat Verkfræðistofa Sigurðar Thoroddsen h.f. statíska fjaðurstuðulinn í bergstaflanum kringum stöðvarhelli og var niðurstaða þeirra að sennilegast gildi væri $E_{stat} = 9.8$ GPa (VST 1986). Séu niðurstöður VST bornar saman við niðurstöður þær sem hér er settar fram um dynamíska fjaðurstuðulinn, fæst $E_{dyn}/E_{stat} = 2 - 3$. Samræmi milli þessara tveggja mælinga virðist því vera allgott.

8. HEIMILDIR

Ágúst Guðmundsson, Birgir Jónsson og Björn Harðarson 1982: *Blönduvirkjun. Jarðfræðirannsóknir I: Almenn jarðfræði og mannvirkjajarðfræði*. OS82090/VOD14. 249 bls.

Birgir Jónsson 1984: *Undirbúningsrannsóknir vegna jarðganga við vatnsaflsvirkjanir á Íslandi*. Tímarit VFÍ, 69. árg., 2-4 tbl: 21-43.

Björn A. Harðarson 1989: *Blönduvirkjun. Berggæðamat*. Skýrsla Orkustofnunar í handriti. 35 bls.

Cheng, C.H. og D. Johnston 1981: *Dynamic and static moduli*. Geophysical Research letters, Vol. 8: 39-42.

Christensen, N.I. og R.H. Wilkens 1982: *Seismic properties, density and composition of the Icelandic Crust near Reydarfjörður*. J. Geoph. Res. 87: 6389-6395.

Darracott, B.W. og C.M. Orr 1976: *Geophysics and rock engineering*. Í Bieniawsky, Z.T. (ritstj.): Exploration for rock engineering, Vol. 1. A.A. Balkema, Rotterdam: 159-164.

Guðmundur Pálmason 1971: *Crustal structure of Iceland from explosion seismology*. Vis.fél. Íslendinga, rit 40. 187 bls.

Jaeger, Charles 1979: *Rock mechanics and engineering*. Second edition. Cambridge University Press, Cambridge. 523 bls.

Jaeger, C. og N.G.W. Cook 1979: *Fundamentals of rock mechanics*. Third edition. Chapman and Hall, London. 593 bls.

Mooney, Harold M. 1977: *Handbook of engineering geophysics*. Bison Instruments, Minneapolis. Óreglulegt blaðsíðutal.

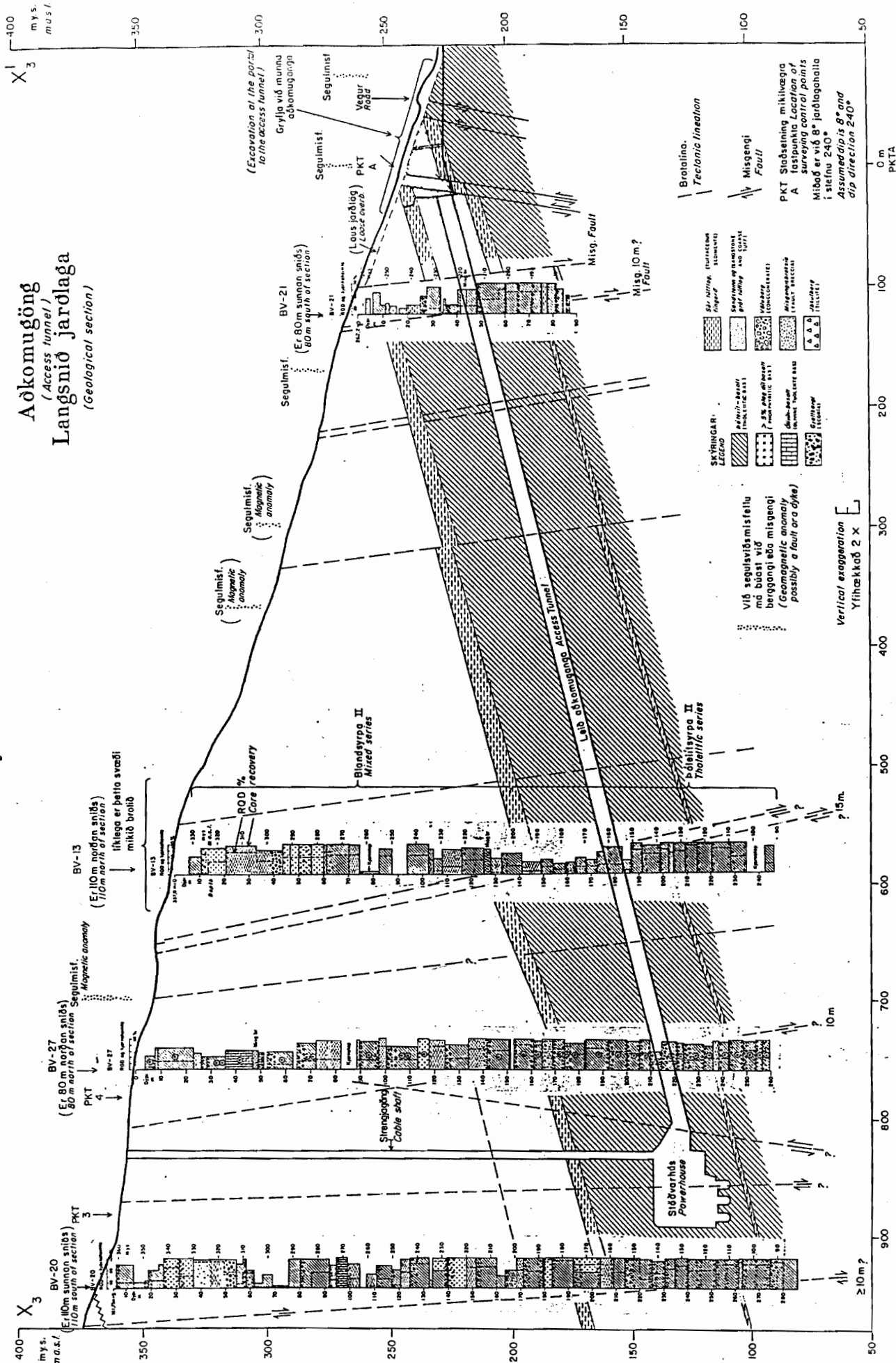
Ólafur Flóvenz 1980: *Seismic structure of the Icelandic crust above layer three and the relation between body wave velocity and the alteration of the basaltic crust*. Journal of Geophysics 47: 211-220.

Verkfræðistofa Sigurðar Thoroddsen h.f. 1986: *Blönduvirkjun. Færslur í bergi umhverfis stöðvarhelli*. 17 bls.

BLÖNDUVIRKJUN

Aðkomugöng (Access tunnel) Langsnið jarðlaga (Geological section)

Mynd 1



Stjórnvæðing
Approximate location of powerhouse and cable shaft

Stjórnvæðing
Approximate location of powerhouse and cable shaft

Stjórnvæðing
Approximate location of powerhouse and cable shaft

Stjórnvæðing
Approximate location of powerhouse and cable shaft

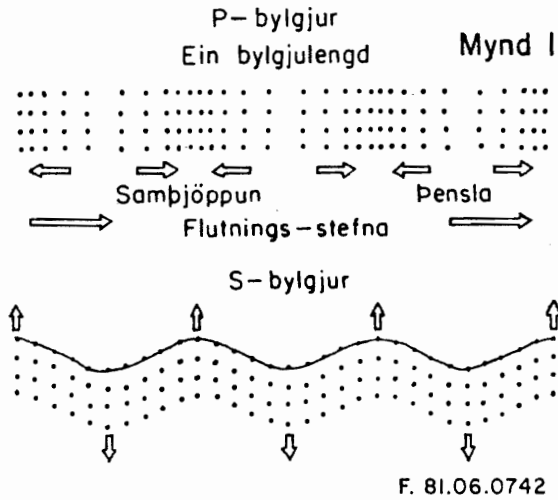
Stjórnvæðing
Approximate location of powerhouse and cable shaft

Stjórnvæðing
Approximate location of powerhouse and cable shaft

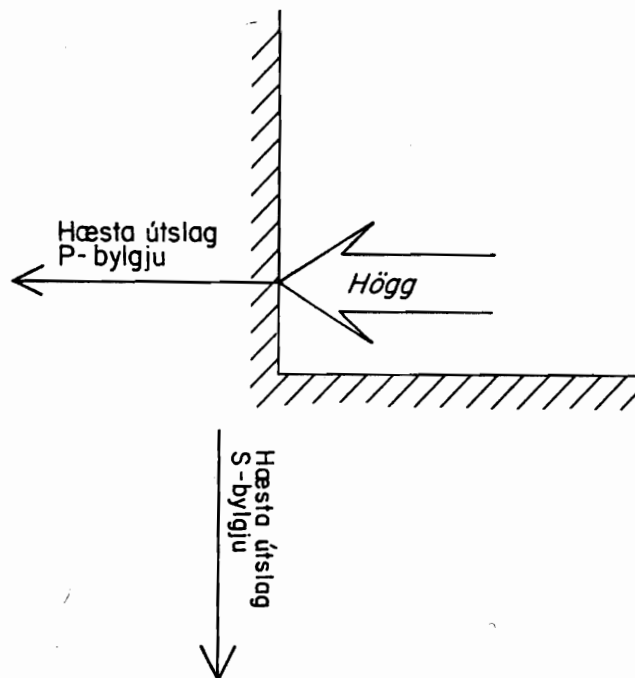
Stjórnvæðing
Approximate location of powerhouse and cable shaft



Blönduvirkjun Mynd 2 P og S bylgjur

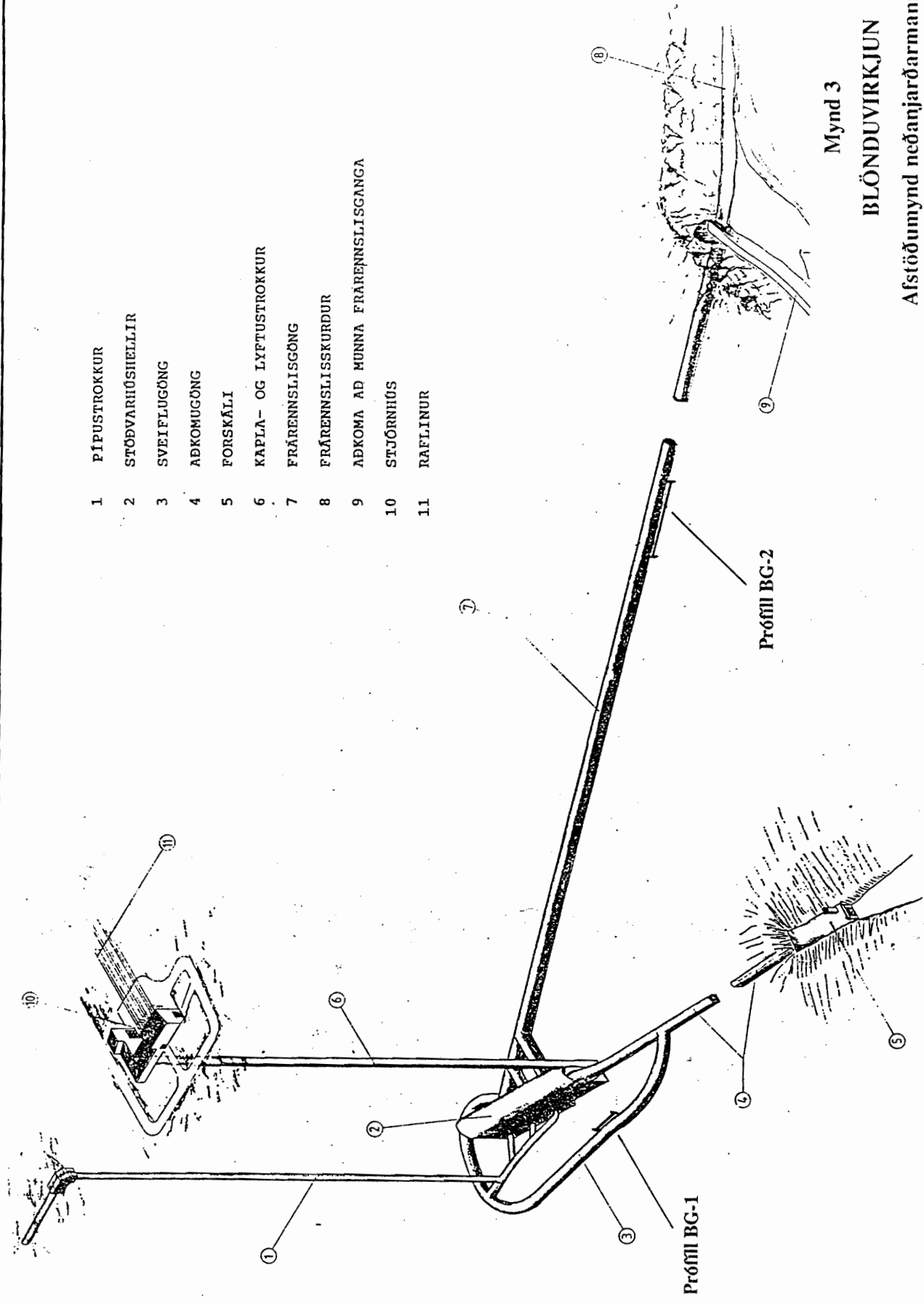


a) Hreyfingar efnis sem P- og S-bylgjur berast gegnum



b) Tengsl milli stefnu höggs og útbreiðslustefnu
P- og S-bylgja

- 1 PÍPUSTRÖKKUR
- 2 STÖÐVARHÚSHELLIR
- 3 SVEIFLUGÖNG
- 4 AÐKOMUGÖNG
- 5 FORSKÁLI
- 6 KAPLA- OG LYFTUSTRÖKKUR
- 7 FRÆRENNSLISGÖNG
- 8 FRÆRENNSLISSKURDUR
- 9 AÐKOMA AÐ MUNNA FRÆRENNSLISGANGA
- 10 STJÓRNHÚS
- 11 RAFLINUR



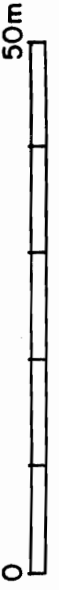
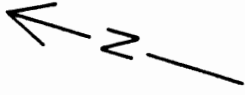
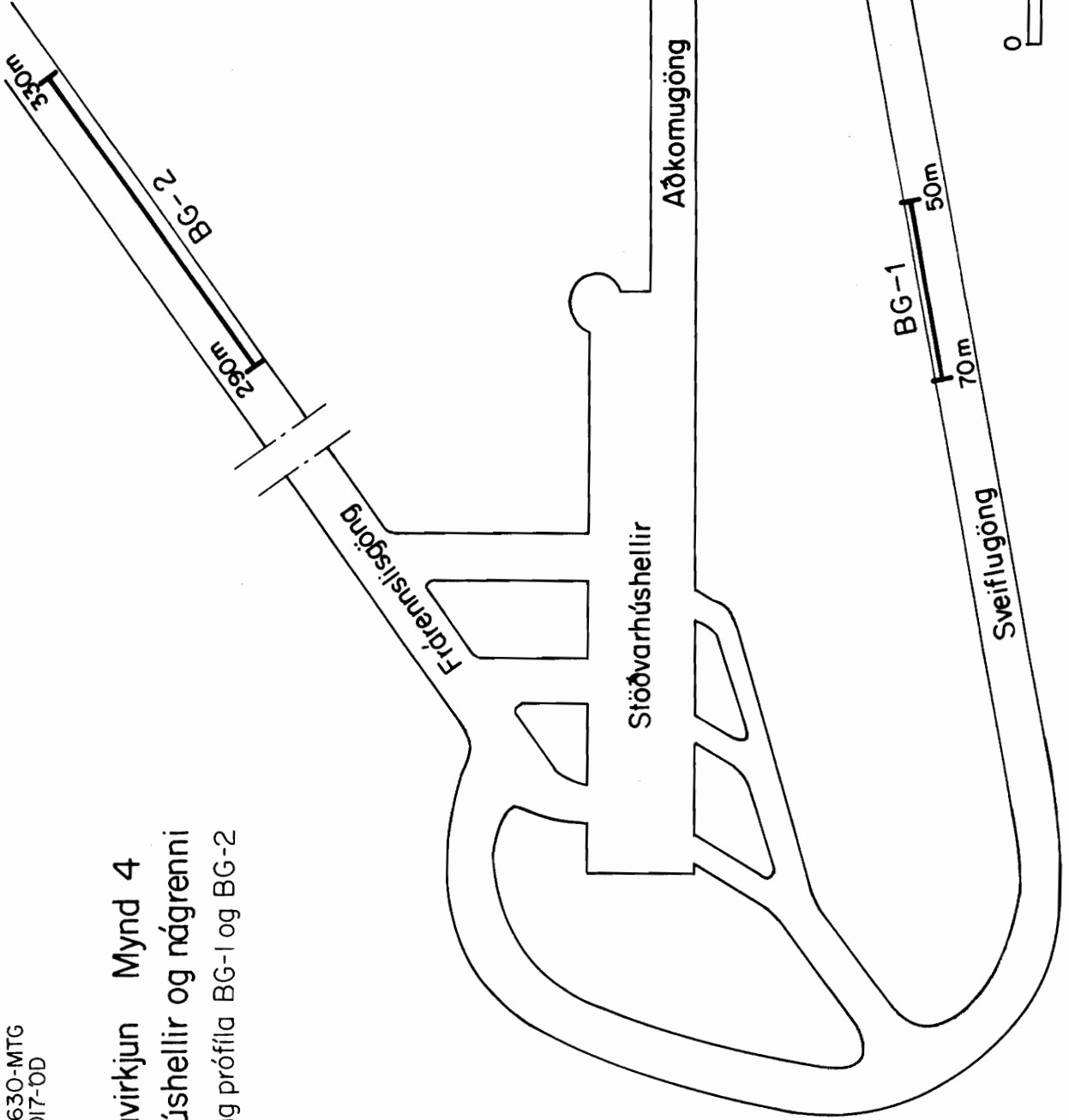
Mynd 3

BLÖNDUVIRKJUN

Afstöðumynd neðanjarðarmannvirkja
Mælistaðir P- og S-bylgjuhraða

1- VOD-MJ-630-MTG
89.01.0017-0D

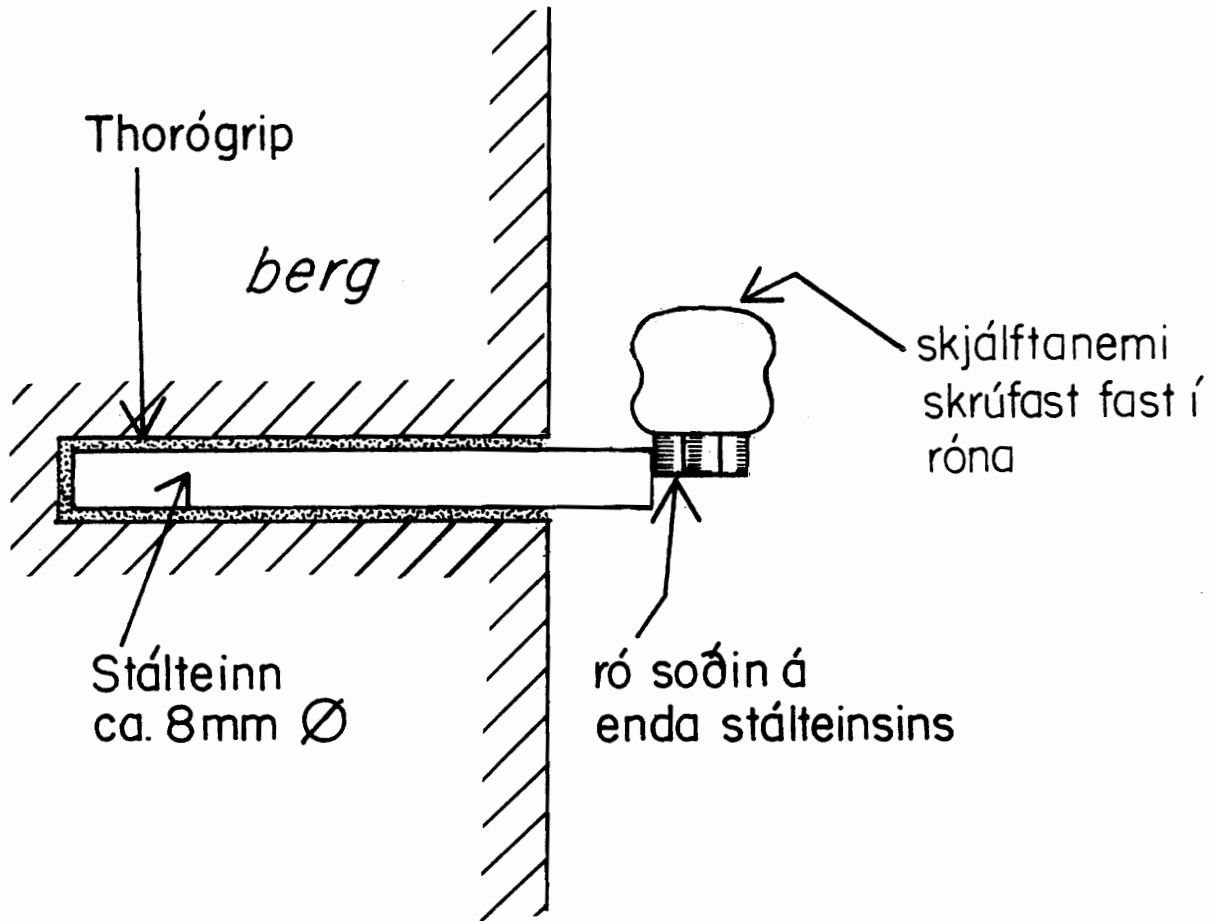
Blönduvirkjun Mynd 4
Stöðvarhúshellir og nágrenni
Staðsetning prófala BG-1 og BG-2





Blönduvirkjun

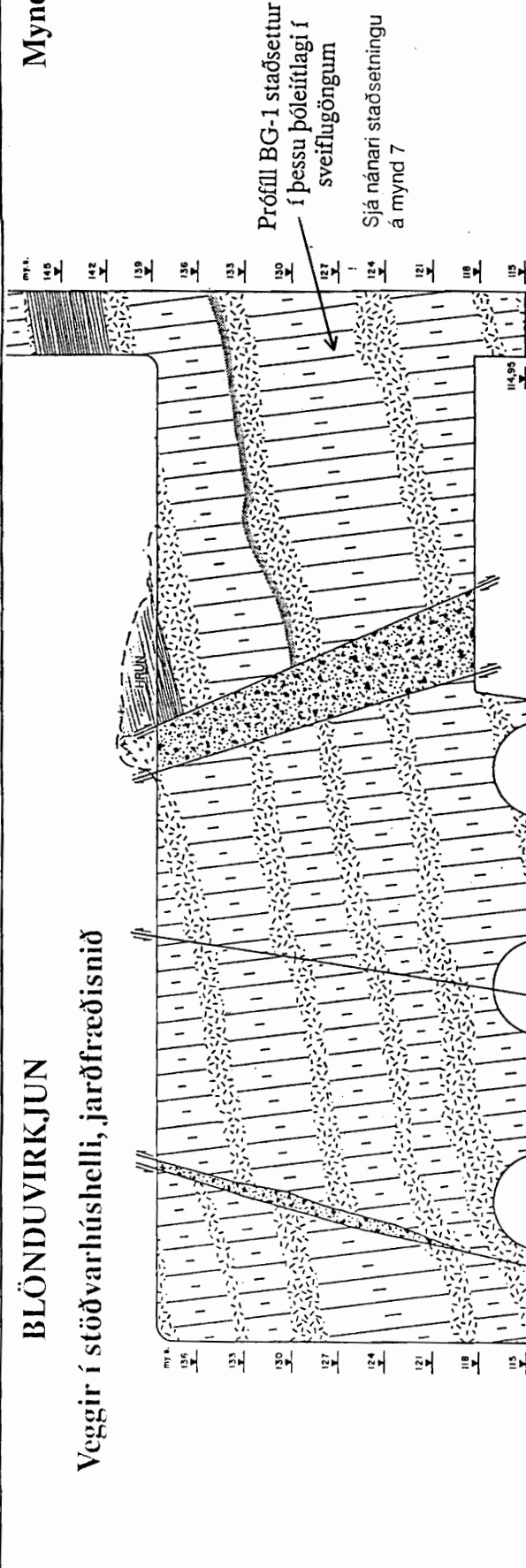
Frágangur á skjálftanema (*geofón*) í bergi



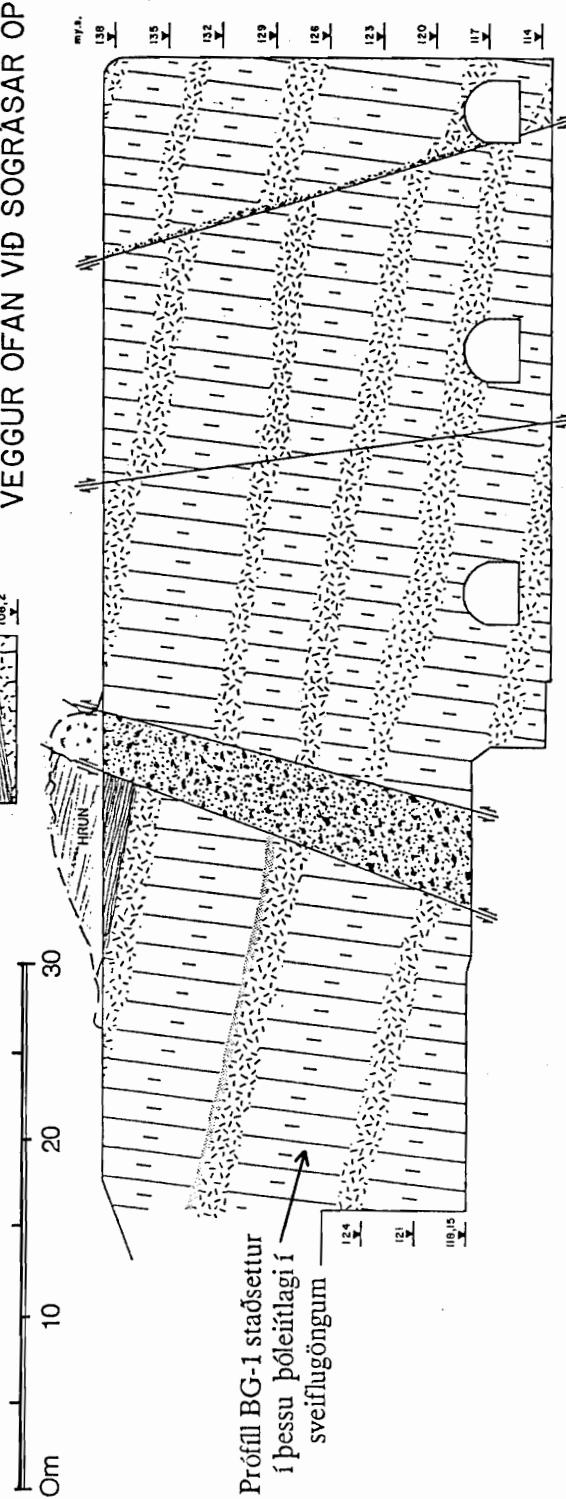
BLÖNDUVIRKJUN

Veggir í stöðvarhúshelli, jarðfræðisnið

Mynd 6



VEGGUR OFAN VÍÐ SOGRÁRAR OP



SKÝRINGAR:

- Póleitt basalt
- Kargaberg
- Setberg
- Brotabergs mulningur (Misgengis breksía)
- Misgengisfiötur

VEGGUR OFAN VÍÐ GREININGAR OP

LANDSVIRKJUN
THE NATIONAL POWER COMPANY, ICELAND

T. 04.05. '88 M.
H. Y. 5. Nr

BLANDA

STÖÐVARHÚS

STÖÐVARHÚSVEGGIR - JARÐFRÆÐISNIÐ



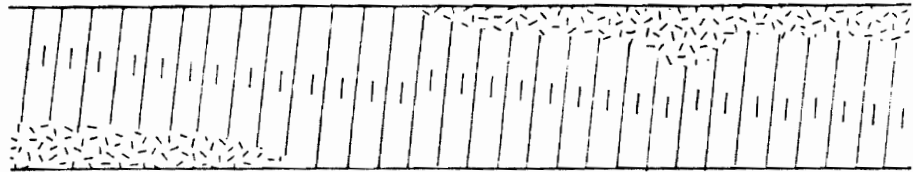
VOD-MJ-630-MTG
89.01.0020-0D

Mynd 7

BLÖNDUVIRKJUN

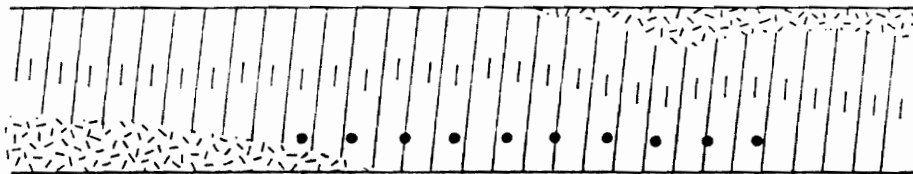
Prófíll BG-1 í sveiflugöngum
staðsetningar nema í bergvegg

Vinstri
bergveggur

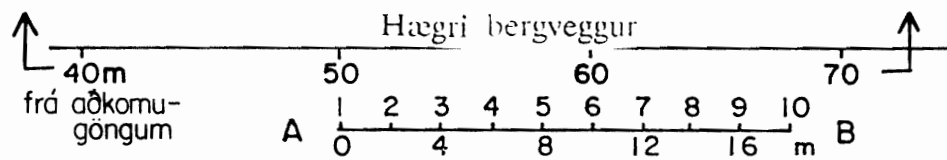
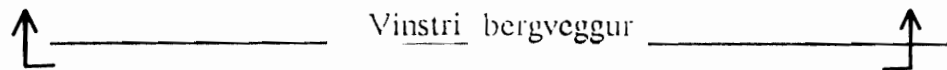


(hægri og vinstri miðast við að horft sé niður göngin frá aðkomugöngum)

Hægri
bergveggur



nemi nr. 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

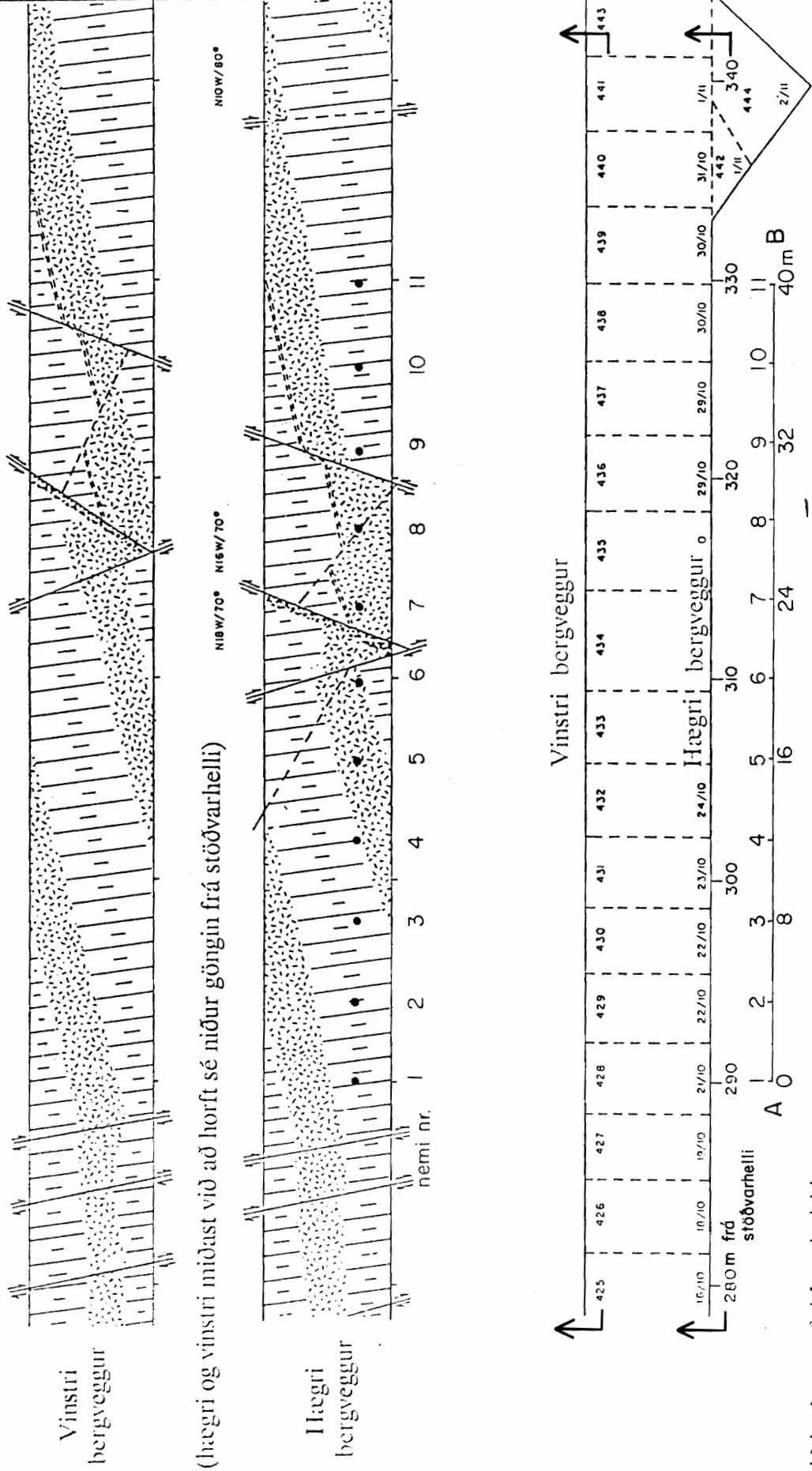


Jarðfræðisnið jarðganga frá Landsvirkjun

Mynd 8

BLÖNDUVIRKJUN

Prófil BG-2 í frárennslisgöngum,
staðsetningar nema í bergvegg

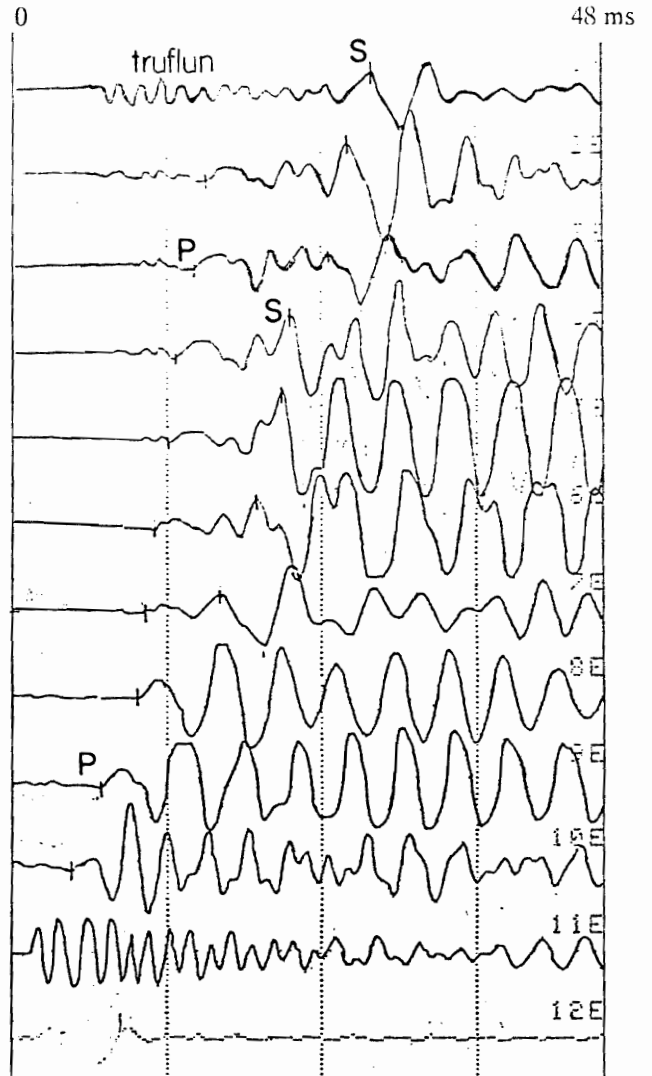
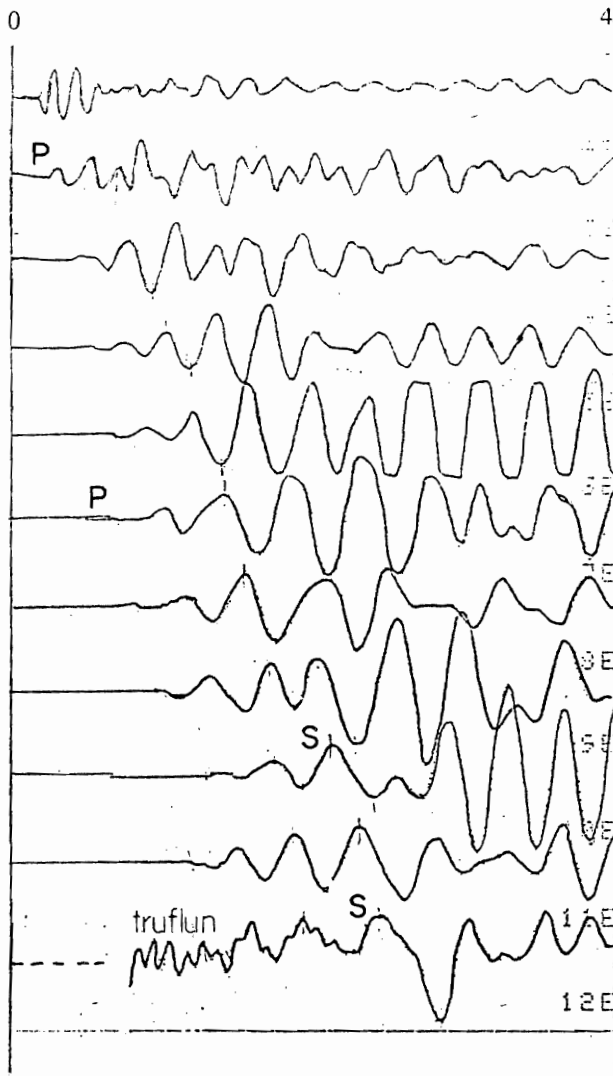


Mynd 9

BLÖNDUVIRKJUN

BG-2, bylgjulínurit

Lóðréttir nemar notaðir og sleggjunni slegið niður á lárétta syllu.
Til verða bæði P- og S-bylgjur. P-bylgjan er veik en hún er fyrsta
útslag á línuritunum (P) en S-bylgjan kemur síðar og er orkumeiri.
Auðveldast er að sjá hana á fjarlægustu nemunum (S).



EL	P	GAIN	RECORDING
1	+	4	[RECORDING]
2	+	4	[RECORDING]
3	+	4	[RECORDING]
4	+	4	[RECORDING]
5	+	4	[RECORDING]
6	+	4	[RECORDING]
7	+	4	[RECORDING]
8	+	4	[RECORDING]
9	+	4	[RECORDING]
10	+	4	[RECORDING]
11	+	4	[RECORDING]
12	+	4	[RECORDING]

BG-2A

EL	P	GAIN	RECORDING
1	+	2	[RECORDING]
2	+	2	[RECORDING]
3	+	2	[RECORDING]
4	+	2	[RECORDING]
5	+	2	[RECORDING]
6	+	2	[RECORDING]
7	+	2	[RECORDING]
8	+	2	[RECORDING]
9	+	2	[RECORDING]
10	+	2	[RECORDING]
11	+	2	[RECORDING]
12	+	2	[RECORDING]

BG-2B

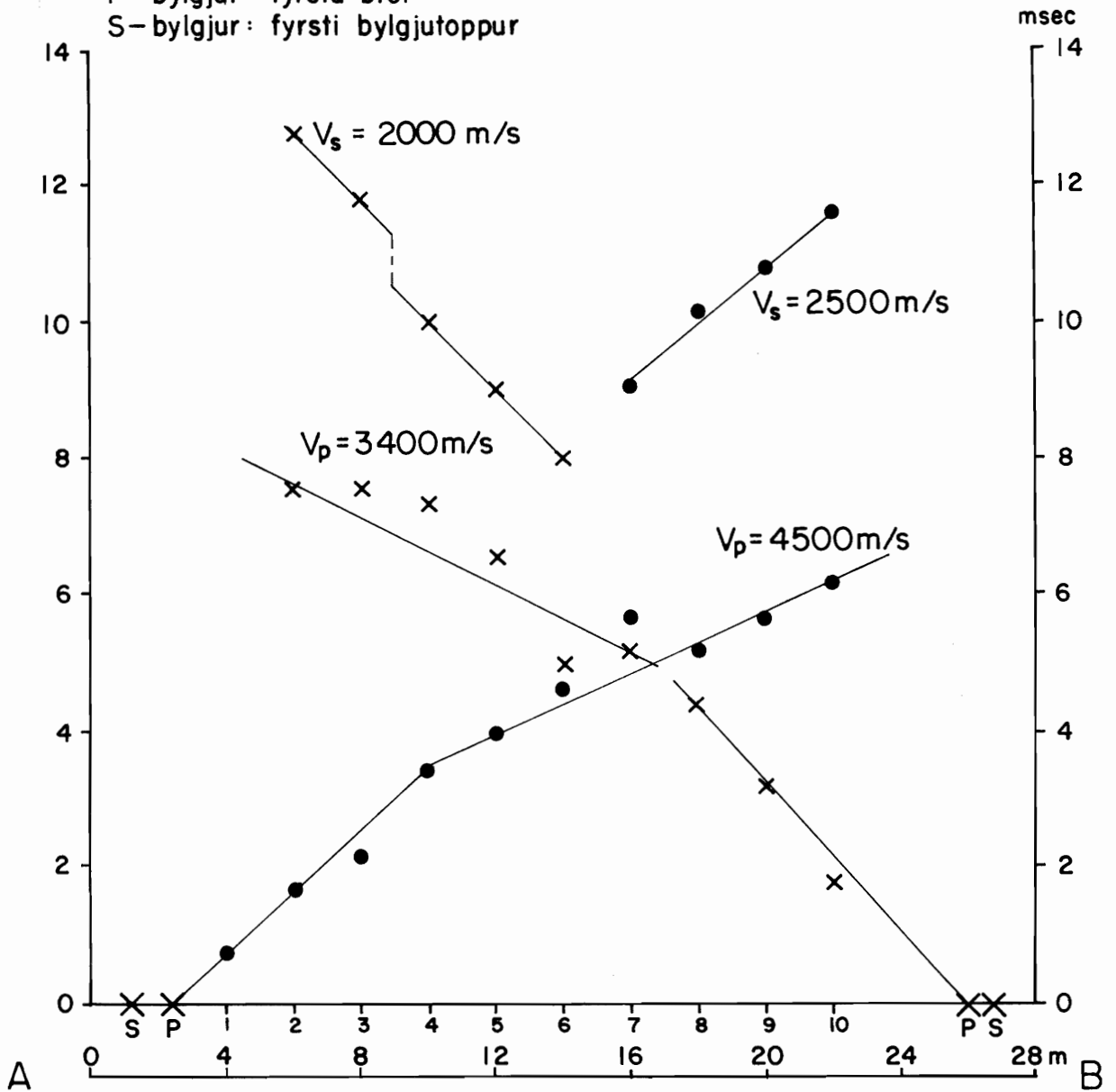


MYND 10

BG-1 *Fartimalinurit*

P-bylgjur: fyrsta brot

S-bylgjur: fyrsti bylgjutoppur



MYND II

BG-2 *fastímalínurit*

P-bylgjur: fyrsta brot

S-bylgjur: fyrsti bylgjutoppur

