



ORKUSTOFNUN
RAFORKUDEILD

JARÐFRÆÐILEGAR OG LANDFRÆÐILEGAR
FORSENDUR VATNSAFLS ÍSLANDS

eftir

HAUK TOMASSON

jarðfræðing

Október 1971

JARÐFRÆÐILEGAR OG LANDFRÆÐILEGAR
FORSENDUR VATNSAFLS ÍSLANDS

eftir

HAUK TÓMASSON

jarðfræðing

Október 1971

JARÐFRÆÐILEGAR OG LANDFRÆÐILEGAR FORSENDUR VATNSAFLS ÍSLANDS

1. Inngangur.

Ísland býr yfir tveimur verulegum orkulindum, vatnsafl og jarðvarma. Orkulindir þessar eru nokkuð mismunandi að eðli og nytjar þeirra eru hagkvæmastar þannig, að vatnsaflíð sé notað til raforkuframleiðslu en jarðvarminn til varmaframleiðslu fyrir húshitun eða iðnað. Hér verður eingöngu rætt um vatnsaflíð, sem sennilega er stærsta orkulind Íslands, en stærð vatnsaflsins sem orkulindar er nokkurn veginn þekkt. Jarðvarminn er mun verr þekktur. Alls er talið að framleiða megi með vatnsaflum um 35.000 GWh á ári á Íslandi, þegar nokkurn veginn er fullvirkjað, þar af 28.000 GWh í ódýrum virkjunum. Söluverðmæti ódýru orkunnar á lágsta hugsanlega verði er varla undir 7,5 milljörðum króna á ári og getur vel verið tvöfalt það.

Notendur rafmagns á Íslandi eru tvenns konar, þ.e. hinn almenni notandi með ýmsa smáíðju annars vegar og stjórnendur, sem byggist að verulegu leyti á ódýrri raforku hins vegar. Út um hinar dreifðu byggðir landsins keppir vatnsorkan við raforkuframleiðslu með dieselvélum en hún kostar um 1,20 kr/kWh við stöðvarvegg, en á orkuveitusvæði Landsvirkjunar er verðið um 66 aurar á kWh til rafveitna og er þar um að ræða framleiðslukostnað, háspennntan dreifingarkostnað, ýmiss gjöld og ágóða. En til Álverksmiðjunnar er verðið 26 aurar á kWh og sama verð er væntanlegt til Áburðarverkstmiðjunnar. Öll þessi verð, sem hér er talað um, eru miðuð við fyrri hluta ársins 1970.

Raforkuverð frá vatnsorkuveri er fyrst og fremst fjármagnskostnaður. Beinn rekstrar-kostnaður vatnsaflsvirkjana er mjög lítil. Á mynd 1 og 2 eru línurit, sem gerð hafa verið á Verkfræðistofu Sigurðar Thoroddsen af Lofti Þorsteinssyni, prófessor, sem skýra nokkuð, hvernig fjármagnskostnaður vatnsorkuvera er til kominn. Verðið er eins og áður miðuð við fyrri hluta árs 1970. Á mynd 1 eru línur, sem sýna grunnkostnað og heildarkostnað vatnsaflsvirkjunar miðuð við mismunandi fallhæð og rennsli. Grunnkostnaður vatnsaflsvirkjunar er sá kostnaður, sem alltaf hlýtur að verða til staðar, þ.e. kostnaður við stöðvarhús, vélar, rafbúnað, yfirföll, lokur, stöðvarvarðahús o.fl. Heildarkostnaðurinn, sem sýndur er á mynd 1, er miðuður við að raforkan kosti um 30 auru kWh með um 10% fjármagnskostnaði á ári. Bilið á milli tölunnar fyrir grunnkostnað og tölunnar fyrir heildarkostnað er þá hægt að nota til hins breytilega kostnaðar, sem er stíflur og vatnsvegir. Vatnsvegir geta verið skurðir, jarðgöng eða pípur. Á mynd 2 er sýndur kostnaður við stíflur og jarðgöng. Því lengra sem bilið er á milli grunnkostnaðarlínu og heildarkostnaðarlínu á mynd 1 því hærri upphæð er hægt að eyða í vatnsvegi og stíflur, eins og sýnt er á mynd 2.

Þegar vatnsvirkjun hefur verið greidd upp eða verðbólga gert fjármagn það, sem í hana hefur verið lagt, verðlítið eða verðlaust, þá kostar raforkan frá vatnsaflsverinu mjög lítið. Vatnsaflsver getur því grætt á verðbólgu svipað og venjulegur húsbýggjandi á Íslandi. Þetta er meginmunur á vatnsorku og flestri annarri orku, svo sem orku frá varmarafstöðvum, hvort sem það er frá jarðvarma- eða eldneytisrafstöðvum, sem fylgja verðbólgu mun betur en vatnsaflsstöðvar.

2. Landmótun

Eftir aðstæðum er hægt að ná falli til virkjunar á þrjá vegu. (1) Með byggingu stíflu, sem myndar fallið; (2) með vatnsvegum; (3) með blöndu af hvoru tveggja.

Að sjálfsögðu þarf alltaf einhverja stíflu og vatnsvegi, jafnvel þó fallinu sé aðallega náð með öðru tveggja. Á Íslandi er lang algengast að fallinu sé náð með vatnsvegum. Nokkuð stórar stíflur þarf þó væntanlega að byggja, en það er í öðrum tilgangi en beinlínis að ná fallinu, þ.e.a.s. til miðlunar á vatni, en nánar verður rætt um það síðar.

Aðstæður til þess að virkjanir hér á landi ná fallinu til virkjunar með vatnsvegum en ekki stíflum er mótun landsins. Flestir dalir á Íslandi, eru jökulsorfnir og eru því U-lagaðir, sem kallað er. Á mynd 3 er þversnið í U-laga dal, þ.e., af innri hluta Eyjafjarðar. Það sýnir hve dalurinn er breiður í botninn. Rúmmál stíflu verður mjög mikið ef ná á nokkurri fallhæð með stíflun í slíkum dal. Dalir, sem vatn hefur eingöngu rofið, eru V-lagaðir. Þeir eru varla til á Íslandi, því að allir dalir hér hafa orðið fyrir jökulsvörfun. Á mynd 3 er til samanburðar sýndur V laga dalur álíka djúpur og Eyjafjarðardalurinn. Sá dalur er í Guatemala. Þar sést hve dalurinn er þröngur í botninn og þar væri því hægt að ná verulegu falli án þess að stíflan yrði mjög stór. Á mynd 3 eru einnig sýnd 2 gljúfur í sama mælikvarða. Gljúfur á Íslandi eru grafin af vatni á tiltölulega skömmum tíma síðan jökla Ísaldar leysti fyrir um 10.000 árum. Á þeim tíma hefur vatnið eitt unnið að gljúframyndun. Gljúfur hefur brattari hlíðar heldur en dalur og undir venjulegum kringumstæðum er botn gljúfursins mjór eða aðeins farvegur árinna sem fyllir hann við venjulegt rannslí þannig er gljúfur Jökulsár á Brú við Hafrahvamma á 3 mynd. Við ferkari þróun gljúfranna verða þau að sjálfsögðu að dölum, V-laga, ef ekki kemur til jökulsvörfun. Í gljúfrum er oft hægt að byggja mjög háar stíflur vegna þess hversu þau eru þröng og með bráttar hlíðar. Hæstu stíflur á Íslandi verða í gljúfrum en þau eru dýpst um 200 m djúp. Hæsta stífla er við Skeiðsfoss í Fljótum 30 m há. Á þeim stað eru nærri 3/4 hlutar fallsins fengnir með stíflunni en einungis rúmlega 1/4 hluti með vatnsvegum. Allar aðrar virkjanir á Íslandi ná mestum hluta fallsins með vatnsvegum, eða frá 75% - 99%.

Langsnið af á fer eftir ýmsum aðstæðum og jarðsögu svæðisins, sem hún rennur um. Árnar hafa tilhneigingu til að fá langsnið, sem nálgast parabólu í lögun, þannig að þær hafi mestan bratta efst, sem smám saman minnkar eftir því sem neðar dregur. Svona langsnið er kallað þroskað, sem þýðir að áin hefur í langan tíma runnið á sama stað við svipuð ytri skilyrði og ekki komið til öfl, sem hafa truflað viðleitni árinna til rofs niður í þroskað langsnið.

Áhrifaríkust við að trufla árnar eru hraun sem runnið hafa eftir dölum þeirra eða fyrir þá og hækkað botninn í þeim eða stíflað þá upp. Þroskað langsnið af ám er að sjálfsögðu helzt að finna í þeim hlutum Íslands, sem eru jarðsögulega gamlir, en ár á jarðsögulega ungum svæðum hafa mjög unglegt langsnið. Afstöðubreytingar láðs og lagar geta líka haft truflandi áhrif á langsnið ána.

Á myndum 4 og 5 eru langsnið af nokkrum ám hér á landi. Á mynd 4 eru Þjórsá, Hvítá í Árnessýslu, Hvítá í Borgarfirði og Eyjafjarðará. Af þessum ám hefur Þjórsá unlegast langsnið, Hvítá í Árnessýslu hefur þroskaðra, en Hvítá í Borgarfirði og Eyjafjarðará þroskaðast. Á mynd 5 eru Jökulsá á Fjöllum, Jökulsá á Brú og Lagarfljót með Jökulsá í Fljótsdal. Þar er greinilegt að Jökulsá á Fjöllum hefur lang unlegast langsnið. Jökulsá á Brú kemur næst og Jökulsá í Fljótsdal þroskaðast langsnið. Aldur þessara langsniða fylgir mjög vel áætluðum aldri bergsins, sem árnar renna um. Þannig er Jökulsá á Fjöllum í lang yngstu jarðmynduninni heildarlega séð af öllum þessum ám.

Til þess að virkjunarstaðir skapist í ám þurfa árnar að hafa unglegt langsnið, ef virkja á í farveginum sjálfum. Ástæðan til þess er að í þroskuðu langsniði er fallið mest og brattinn mestur við upptök árninnar þar sem rennslið er minnst. Aftur á móti getur mikið fall verið hvar sem er í unglegu sniði og getur þá áin verið búin að safna miklu vatni á stað þar sem fall er mikið á stuttum kafla.

Annar möguleiki til virkjunar er að virkja á milli dala og er þá yfirleitt virkjað frá ungum dal til þroskaðri dals, sem samsíða liggur. Hinn þroskaðri dalur er þá dýpra niðurgraffinn og skapar það skilyrðin til virkjunar. Stærsta virkjun á Íslandi í dag er einmitt virkjuð við svona aðstæður. Þjórsá er virkjuð frá dalnum austan Búrfells, sem fyllst hefur af hraunum á tímanum síðan jökla ísaldar leysti, niður í Þjórárdal, sem er dalur Fossár og hefur ekki truflast að ráði af hraunrennsli. Margir aðrir mjög góðir virkjunarstaðir byggjast á þessum möguleika, þ.á.m. hin margumtalaða Austurlandsvirkjun, sem byggir á því að nýta fallið niður í mjög þroskaðan dal Jökulsár í Fljótsdal.

Kortið á mynd 6 sýnir Ísland skipt niður í landmótunarfræðilegar einingar. Skipt er í þessar einingar með virkjunarhæfni svæðanna í huga. Eining 1 er jöklar að mestu leyti í yfir 1000 m hæð. Þeir liggja uppi á hásléttunni eða við jaðar hennar og ná upp úr henni allt að 1000 m.

Eining 2 er háslétta. Hún er hér skilgreind sem samfelld hálendi án dalamyndunar í að minnsta kosti 400 m hæð yfir sjó. Breidd hálendisræmu þarf að vera minnst 15 km til að teljast samfelld. Samfelld háslétta er mjög mikilvæg vegna þess að uppi á henni rennur saman það vatn, sem bezt er virkjunarlegt. Hásléttan er að verulegu leyti ungar jarðmyndanir.

Eining 3 er ung dalamyndun. Í þessari einingu eru árnar með ung vanþróuð langsnið. Samt eru hér töluverðir dalir með verulegu vatnsafli.

Eining 4 er þroskuð dalamyndun. Dalirnir eru þó misjafnlega þroskaðir. Virkjunarstaðir eru helzt þar sem hægt er að nýta fall á milli misjafnlega þroskaðra dala, svo sem á Austurlandi og á vestanverðu Norðurlandi.

Eining 5 er sundurskorið hálendi með miðdal. Þess konar miðdalur er Hvalfjörður, Hvammsfjörður og svo Eyjafjörður. Einkenni þessarar myndunar er að landið er mjög sundurskorið af dölum og ekkert samfellt hálendi, en aðaldalirnir eru þroskaðir og ná niður fyrir sjávarmál. Hliðardalirnir eru mun brattari. Á þessu svæði er ekki mikið vatnsafl vegna þess að hvergi ná að myndast verulegar ár.

Eining 6 er fjarða- og smádalamyndun. Þetta eru Vestfirðir og Austfirðir. Á þessu svæði er yfirleitt ekki um samfellt hálendi að ræða, heldur landið mjög sundurskorið og dalbotnarnir eru að mestu leyti neðan sjávarmáls. Aðeins er um að ræða staði fyrir smáar virkjanir, nema ef til vill af smáhálendi sunnan Drangajökuls.

Eining 7 er strandflöt og grunnir þroskaðir dalir. Strandflötin er væntanlega mynduð af vatns- og sjávarrofi niður í samfellt láglandi. Upp af strandflötinni ganga dalir, flestir grunnir og þroskaðir. Svipuð strandflöt er til víðar á landinu t.d. er Breiðafjörður svipuð strandflöt, nema hún er rétt neðan við sjávarmál, þannig að aðeins tindarnir standa upp úr, sem eyjar. Ekki er um neitt umtalsverð vatnsafl að ræða á þessu svæði.

Eining 8 er ung smádalamyndun. Þessi eining er jarðfræðilega miklu yngri heldur en einingarnar, sem hér á undan hafa verið ræddar, því á þessu svæði hefur eldvirkni verið til skamms tíma og eru jafnvel ennþá virk eldfjöll. Þetta svæði nær yfir Snæfellsnes og hluta af Vestur-Skaftafellssýslu. Vatnsafl er lítið hér.

Eining 9 eru dalir fylltir af jöklum. Þetta er við suðurströndina sunnan Vatnsjökuls og Mýrdalsjökuls og fylla skrifjöklar þeirra marga dalina þannig að vatnið undan jöklunum kemur ekki fram fyrr en niður á láglandi og því ekki virkjanlegt fall í ánum.

3. jarðfræði

Á 7. mynd er jarðfræðikort af Íslandi, þar sem sýndir eru meginrættir jarðfræðinnar. Það er mjög náið samspil milli jarðfræðilegra þátta og landmótunar. Þannig eru allar helztu myndanirnar með þroskaða dali frá Tertier jarðsögutímabilinu og hafa haft 2 milljónir ára eða meira til mótunar. Hinir óþroskaðri dalir eru aftur á móti myndaðir á Kvarter jarðsögutímabilinu og jafnvel þeir óþroskuðustu síðast á Kvarter og hafa ekki haft til myndunar meira en frá nokkrum þúsundum ára niður í 100-200 þúsund ár. Það er þess vegna, að verulegur hluti af vatnsaflí Íslands er í mjög ungum jarðmyndunum, sem um leið bjóða upp á margs konar vandamál vegna leka og lélegrar stæðni bergsins.

Í mjög grófum dráttum má segja að bergið sé því betra til mannvirkjagerðar því eldra sem það er. Þetta hefur þó að sjálfsögðu undantekningar. Ástæðan til þess að bergið verður betra til mannvirkjagerðar eftir því sem það er eldra, er að milli-lög milli blágrýtislaga eða hraunlaga og móbergslög bindast því betur því eldri sem þau verða. Það sem veldur bindingunni er alls konar útfellingar í berginu, sem bindur það saman og gerir það sterkara og vatnsheldara. Þetta tekur sinn tíma, og er reyndar öll jarðsaga Íslands rúmlega 20 milljónir ára örstuttur tími jarðsögulega séð.

Eitt atriði getur orðið neikvætt með aldrinum, en það er að þessar ummyndanir gangi of langt þannig, að bergið verði að leir. Mest ber á þessum neikvæðu eiginleikum í sambandi við líparít og þarf það ekki að verða mjög gamalt til þess að fá þá. Líparítið er þess vegna haft sem ein kortaeining óháð aldri. Ungu líparíti fylgir gjarnan jarðhiti. Yfirleitt verður því að segja að líparítsvæðin, hvort sem þau eru ung eða gömul, eru nokkur hættusvæði jarðfræðilega séð, ef gera á þar mannvirki inn í berginu.

Af blágrýti eða hraunum eru fjórar myndanir. Elzt er hið svokallaða Tertiera blágrýti myndað fyrir Ísöld. Þetta berg er yfirleitt mjög vel vatnspétt. Vandamál þess eru fyrst og fremst í sambandi við millilög, sem geta verið leirkennd. Þessi millilög eru væntanlega flest annað hvort fyrrverandi öskulög eða fyrrverandi jarðvegur frá myndunartíma blágrýtismyndunarinnar.

Næsta kortaeining er aðallega hraun og meðfylgjandi millilög runni á fyrri hluta og miðhluta kvartertímans. Í þessum myndunum finnst þó nokkuð mikið af jökulbergslögum, svo að telja verður að hún sé til orðin á Ísöld sem hraunrennsli á hlýviðrisskeiðum hennar. Bergið er utan núverandi eldvirknissvæða og myndar eins konar belti beggja vegna við það.

Af svipuðum aldri en myndað á jökulsskeiðum á fyrri og miðhluta ísaldar er móberg, sem orðið er yfirleitt vel samlímt og nokkuð þétt berg. Móbergið er lint berg og hefur því oft eyðst mjög mikið af rofi. Sést því mikið minna af því heldur en af hraununum á svipuðum aldri. Ofan á sumum þessara móbergsmýndana er smávegis af hraunlögum, sem ekki eru kort lögð hér. Þessar tvær myndanir eru í heild vanda-minnstar við mannvirkjagerð. Bergið er yfirleitt ekki ummyndað svo skaði sé að og vatnsheldni bergsins mjög þökkaleg og jafnvel ágæt.

Næsta myndun er það sem venjulega er kallað yngra grágrýtið og liggur mjög nærri núverandi eldvirknissvæðum. Þetta berg er hraunlög runnin að mestu á síðasta hlýviðrisskeiði ísaldar. Yngra grágrýtið sýnir öll einkenni þess að landslag hafi verið svipað og það er í dag, þegar það varð til. Margar grágrýtisdýngjur eru til frá þessum tíma og stendur Reykjavík á hraunum runnum frá einni slíkri, þ.e. Mosfellsheiði.

Á síðustu Ísöld var mikil eldvirkni og mynduðust þá mikil móbergsfjöll. Þessi móbergsfjöll eru hin eiginlega móbergsmyndun, sem venjulega er nefnd svo. Móbergsmyndunin er blanda af móbergstuffi og breksíu og bólstrabergi á sama hátt og eldra móbergið, en munurinn á þessum myndunum er samt mjög mikill frá verkfræðilegu sjónarmiði, því hið unga móberg er mjög lekt og oft mjög illa samlímt og stendur þá illa í jarðgöngum.

Yngsta jarðmyndunin er hraun runnin eftir að Ísöld lauk eða á síðustu 10.000 árum. Þessi hraun eru mjög lek venjulega og í samtandi við þau eru oft meiri háttar jarðfræðileg vandamál.

Á kortinu eru sýndar línur, sem gefa til kynna legu gossvæða, sem virk hafa verið eftir að jökla síðustu ísalda leysti. Þessar línur falla ekki endilega saman við sprungulínur heldur tengja þær saman svæði þar sem eldsumbrot hafa verið og eru yfirleitt gýgar ekki fjær en 10 km frá þessum línum og að mestu leyti mjög nærri þeim eða alveg á þeim. Þykkt línanna á að gefa til kynna það magn hraunkviku, sem komið hefur þar upp á eftir jökultíma. Langmest eldvirkni hefur verið eftir fjórum línum með norðaustur- suðvestur stefnu. Ein þessara lína er í vestara eldgosabeltinu, sem gengur frá Reykjanesi, en hinar þrjár eru í eystra eldgosabeltinu og er miðlínan lang samfelldust af þeim og væntanlega hefur frá henni mest magn gosefna komið eftir jökultíma. Í Kollóttudyngju beygir þessi lína til norð-norð vesturs og eru þar í röð á henni margar mjög virkar eldstöðvar, og er það aðal eldvirknilínan á Norðurlandi. Þessi eldvirknilína á Norðurlandi er hornrétt á eldvirknilínu á Reykjanesi. Eldvirknilínan á Reykjanesi myndar töluvert horn við sjálfar sprungurnar. Hornrétt á norðaustur-suðvestur línurnar virðast vera eldvirknilínur beggja vegna Hofsjökuls og Tungnafellsjökuls. Öræfajökul er hægt að tengja einni þessara lína. Þessar línur eru aðallega um miðbik landsins. Þessi stefna hornrétt á aðalstefnuna er einnig að finna í Mýrdalsjökli og fjöllum þáðan í átt til Heklu. Á Snæfellsnesi er sérstök stefna á eldvirkninni og hafa tvær slíkar línur verið lagðar út. Önnur er alveg yfirgnæfandi. Í sömu stefnu raðar sér eldvirkni, sem þverar aðaleldvirknilínurnar á Suðurlandi frá Heklu og í átt til Síðufjalla. Loks er á Norðurlandi ein eldvirknilína með stefnu aðeins austar en norður. Er sú stefna nokkurnvegin samsíða sprungustefnum á svæðinu. Á kortinu eru loks línur, sem gefa til kynna sprungur þar sem sig hefur örugglega átt sér stað eftir að jökla ísalda leysti og oft myndað sigdældir. Þau svæði eru: Á Norðurlandi meðfram Jökulsá á Fjöllum frá Axarfirði og upp í jökul; á Suðurlandi meðfram aðal eldvirknilínunni þar og samsíða henni og svo á Reykjanesi og norður af Þingvöllum.

Að sjálfsögðu eru eldvirknilínur og virk sprungusvæði óæskileg þar sem reisa á mannvirki í sambandi við virkjanir. En þar sem hinir beztu virkjunarstaðir landslagslega séð eru oft á eða nærri þessum svæðum, þá er hætt við að leggja verði í þá áhættu að byggja mannvirki þar sem sprungur virkar og eldvirkni getur skaðað mannvirkin og rekstur þeirra.

4. Vatn

Til virkjunar þarf tvennt, fallhæð og vatn. Við höfum nú rætt nokkuð hvernig fallhæð er hægt að ná til virkjunar og nú erum við komin að vatninu. Vatnið sem virkjað er er úrkoma sem fellur á landið og rennur síðan af því í ánum sem virkja á. Úrkoman berst til landsins með vindum aðallega úr þrem megin áttum, þ.e. suðaustan, suðvestan og norðaustan vindum.

Suðaustan vindur er algengasta úrkomuátt á landinu og kemur með henni mest úrkoman, enda er hún heitust úrkomuátta. Suðaustanáttin ber úrkomu til Suðurstrandarinnar og fjallanna upp frá henni alla leið frá Austfjörðum að Reykjanesi en mest þó á Mýrdalsjökul og Vatnajökul og svæðið á milli þeirra og er þar langmest úrkoma á landinu.

Næst algengasta úrkomuáttin er suðvestanátt eða útsynningurinn svokallaði, sem ber verulega úrkomu til Vesturlands og Suðurlands vestan til.

Þriðja úrkomuáttin er norðaustanátt. Hún ber úrkomu til Norðurlands, sérstaklega þá til annesjanna á Norðurlandi. Þetta er kaldasta úrkomuáttin og úrkoman því minnst í henni.

Úrkoman er yfirleitt mæld í millimetrum á ári, en í okkar tilfelli er úrkoman oft mæld í afrennsli, t.d. lítrum af km^2/sek . Algengt afrennsli sunnanlands er 100-150 lítrar af km^2/sek , en norðanlands, sérstaklega þó í innsveitum norðanlands, þar sem engin af meginúrkomuáttunum nær mikilli úrkomu, getur afrennslið farið niður fyrir 20 lítra af km^2/sek .

Á mynd 8 er kort, sem sýnir meðalrennsli þeirra straumvatna á Íslandi, sem hafa rennsli yfir $10 \text{ m}^3/\text{sek}$. Það kemur greinilega fram á þessu korti, hversu langsamlega mest afrennslið er sunnanlands og allar stærstu árnar eru þar. Norðanlands eru líka stórar ár, sérstaklega norðaustanlands, en þær byggjast á úrkomu sem komin er með sunnanátt, en fallið sem snjór á Vatnajökul og síðan runnið í föstu formi frá hábungu hans til jaðars skriðjöklanna í 700-800 m hæð þar sem þeir bráðna og mynda þessar stóru ár á norðausturlandi.

Úrkoman fer ekki strax til áнна að öllu leyti. Hún getur geymzt á tvennan hátt. Ef úrkoman fellur sem snjór, þá rennur hún ekki til áнна fyrir en snjóinn leysir. Að verulegu leyti er þessi seinkun eingöngu innan eins árs, þannig að úrkoman fellur sem snjór á veturna og bráðnar og rennur af á vorin. Þetta veldur árssveiflu í rennsli áнна.

Að nokkru leyti er úrkoman geymd í mörg ár í föstu formi í jöklunum. Við vitum ekki, hversu mörg ár úrkoman getur geymzt þar, en í öllum líkindum getur það verið hundruð og jafnvel þúsundir ára. Jöklarnir eru gífurleg vatnsforðabúr. Jöklarnir á Íslandi eru að rúmmáli um 4.000 km^3 eða á við 20 ára úrkomu á landið. Afrennsli frá jöklunum fer ekki eftir úrkomu dagsins í dag heldur miklu frekar eftir hitasfigi.

Afrennsli frá jökli er því meira á flatareiningu því neðar sem jökultungan liggur. Á 9. mynd er línurit tekið úr tímaritinu **JÖkli úr grein** eftir Albert Bauer, sem sýnir, hvernig afnám og ákoma breytist með hæð yfir sjó. Við sjávarmál er bráðnun um 11 m fram yfir ákomu og er rennsli af jökultungu, sem nær niður að sjávarmáli, því mjög mikið. Í 800 m hæð er afnám um 2,5 m fram yfir ákomu og er það mjög algengt afrennsli af jökulsporðum þeim sem afrennsli hafa til þeirra vatna sem aðallega á að virkja. Í 11-1200 m hæð er afnám og ákoma jafnmikil og þar fyrir ofan er ákoman meiri. Af því svæði rennur vatnið í föstu formi niður til jaðranna þar sem það síðan bráðnar. Þetta línurit á við hlýviðrisskeiðið frá 1920-1965. Í kaldara loftslagi færast öll línar til og afrennsli verður minna frá jöklunum.

Á 8. mynd er sýnt ágizkað afrennsli frá hinum ýmsu jöklum til áнна sem taka við rennslinu frá þeim. Einnig eru tölur fyrir hæðir á jökulsporðum þeim sem vatnið kemur undan. Að sjálfsögðu hefur afrennsli frá jöklum mjög mikla árssveiflu, er miklu meira á sumrin en á veturna. Seinni part vetrar er það víða hverfandi lítið eða jafnvel alls ekki neitt. Rennslið frá jöklunum kemur víða í mikilli hæð fram, t.d., frá Hofsjökli og öllum vestur- og norðurjaðri Vatnajökuls kemur rennslið fram í 600-800 m hæð fyrir sjó. Það er því hægt að nýta þetta vatn í mjög miklu falli.

Vegna hinnar sterku árssveiflu í jökulvatninu er nauðsynlegt að byggja miðlanir til þess að geyma vatnið frá sumrinu til vetrarins. Ef ekki eru byggðar miðlanir í jökulám er vatnið til einskis nýtt því við höfum engan þann iðnað eða þann notanda, sem eingöngu vill nota rafmagn á sumrin en hefur ekki þörf fyrir það á veturna. Það er miklu frekar öfugt.

Nokkur hluti úrkomunnar fer niður í jarðveginn, sérstaklega á þeim hlutum landsins, sem eru úr mjög ungum jarðmyndunum, hraunum og ungu móbergi. Þessi úrkoma kemur fram einhversstaðar neðar sem lindir. Lindirnar hafa nokkurn veginn jafnt rennsli hvort sem er að sumri eða vetri og hafa því ár, sem koma frá lindasvæðunum, verið virkjaðar fyrst á undan öðrum ám, vegna þess að ekki er þörf á verulegum miðlunum fyrir það vatn. Lindirnar eru allar þær stærstu, sýndar á 8. mynd og með samiburði við jarðfræðikortið sézt, að lindirnar eru allar við eða nærri jöðrum hrauna.

Sem eitt lindasvæði er skilgreint svæði með lindum á hringlaga svæði, sem í mesta lagi er 10 km í þvermál. Stærstu lindirnar eru við Þingvallavatn við Vellankötlu, en þar koma fram um $70 \text{ m}^3/\text{sek}$. Hringirnir fyrir lindirnar sýna í hvaða hæð þær koma fram. Það er greinilegt að lindarvatnið kemur fram miklu lægra en jökulvatnið. Þó að lindarvatnið sé mjög gott vatn, þannig að það er jafn mikið vetur sem sumar, þá er mikið minna vatnsafl í því einmitt af þessari ástæðu, að það hefur mjög oft runnið neðanjarðar niður undir láglandi. Sjálfsagt rennur töluvert lindarvatn beint í sjóinn og kemur því hvergi fram til notkunar.

Lindárnar hafa fram að þessu mest verið virkjaðar vegna þess að ekki þurfti að ráðast í dýrær miðlanir í sambandi við virkjanir í þeim. Þetta er að sjálfsögðu mjög mikilvægt meðan að raforkukerfin eru svo lítil að þau geta ekki kostað miðlunarfrankvæmdir. Öll raforkukerfi á landinu eru svo lítil í dag nema Suðvesturlandskerfið.

5. Ýmis atriði og vandamál.

Sérstök vandamál í sambandi við virkjanirnar eru: 1) Öryggi virkjanna vegna eldvirkni 2) lekavandamál, 3) aurburður 4) jökulhlaup 5) ís í ánum, 6) samkeppni við aðra notkun 7) náttúruvernd.

Margir virkjunarstaðir eru á hraunum, nærri eldvirknilínum eða virkum sprungusvæðum. Gos geta því haft víðtækar afleiðingar fyrir sumar virkjanir jafnvel þótt takast meggi að hindra eyðileggingu þeirra. En veruleg rekstrartruflun í 1-2 ár er líkleg afleiðing. Bezta ráðið gegn þessari hættu er að dreifa virkjunum á mörg svæði og nota staðina sem ekki eru í hættu vegna eldvirkni en það eru sem betur fer margi.

Á hraunum og sprungusvæðum er verulegt lekavandamál. Á sumum virkjunarstöðum eru inntakslónsstæðin svo lek að búast má við leka úr þeim upp á tugi m^3/sek til að byrja með. Sumsstaðar er hægt að gera við þessu með því að þétta gegnum hraunin niður í þéttara berg. En annars staðar og víðar er það kostnaðar vegna alls ekki hægt. Landið undir jöklinum er að eyðast með hraðanum allt að 3 mm á ári og þessa landeyðingu bera árnar til sjávar. Einnig á sér stað landeyðing af vindi og vatni þar sem jarðvegurinn eyðist. Samanlagt berst á þennan hátt af landinu um 80 milljónir tonna af föstum efnum á ári. Þessi aurburður mun, setjast í uppistöðulón og þá sérstaklega miðlunarlón, sem byggja verður vegna jökulvatnsins. Smám saman fyllast þessi miðlunarlón af aurburðinum. Flest eru þau þó hugsuð svo stór að þau endast í aldir. Mestu aurburðarárnar eru að sjálfsögðu þær ár, sem mest hafa vatnið frá jökklum, svo sem Jökulsá á Dal, Jökulsá á Fjöllum og Þjórsá og árnar í Skaftafellssýslum.

Aurburðurinn leysir að verulegu leyti vandamál sem að ofan er getið, þ.e. hinn mikla leka sem búast má við af hraununum og öðrum ungum jarðmyndunum. Það hefur sýnt sig við tilraunir að aurburður jökuláanna þéttir hraun mjög ört. Er því vegna hans hægt að virkja á hraunum án þess að lekinn verði verulegt vandamál.

Þegar aurburður af landinu stöðvast að 1/2 til 1/3 í miðlunarlónum má búast við nokkru landbroti við suðurströndina og ef til vill Héraðsflóa og Axarfjörð vegna minnkaðs aurburðar til sjávar. Að nokkru leyti hefur þetta þó jákvæðar hliðar því búast má við að hafnarskilyrði við þessar strendur muni frekar batna því að ósar ánnu sérstaklega þó Þjórsár og Ölfusár, munu dýpka og grafast út.

Annar erfiðleiki, sem búast má við vegna virkjunar jökulvatnsins eru jökulhlaupin, sem koma í sumar ár. Jökulhlaupin koma sérstaklega í árnar frá Vatnajökli og Mýrdalsjökli. Þau eru tvennskonar. Annars vegar eru það jökulstífluð vötn, sem tæmast í hlaupi, og hins vegar jökulhlaup, sem stafa af eldgosum undir jöklunum. Seinni gerðin af jökulhlaupum eru miklu stærri og stærst eru talin Kötluhlaup en einnig hafa verið stór hlaup frá Grímsvötnum.

Stærsta jökulhlaup, sem ummerki sjást um, er þó við Jökulsá á Fjöllum. Þar hefur orðið gífurlegt jökulhlaup fyrir um 2000-2500 árum. Það varð sennilega við gos í Kverkfjöllum. Graftarmáttur þessa hlaups hefur verið gífurlegur og hefur að verulegu leyti myndað Jökulsárgljúfrin. Gljúfrin í Jökulsá eru af allt annari stærð en önnur gljúfur á Íslandi og er þó berggrunnur þar torgræfur, að mestu leyti þykk og sterk blágrýtislög. Ásbyrgi myndaðist einnig í þessu jökulhlaupi. Á 3. mynd er þversnið af Jökulsárgljúfrinu ofan við Hafragil og sé það borið saman við gljúfrið í Jökulsá á Dal við Hafrahvamna sézt að það er miklu breiðara og næstum því eins og U-lagaður dalur frekar en vatnssorfið gljúfur.

Jökulhlaup geta verið meiri háttar vandamál við virkjun sumra fljóta hér á landi. Auk Jökulsá á Fjöllum, þar sem komið hafa mörg jökulhlaup fyrir utan hið gífurlega stóra hlaup, sem varð fyrir 2000-2500 árum síðan, þá er oft jökulhlaup í Skaftá og í ánum, sem koma undan Mýrdalsjökli og vestanverðum Vatnajökli. Sum af þessum jökulhlaupum eru svo stór að þau útiloka algjörlega virkjun í þeim ám, sem þau hlaupa í. Mesta rennsli í jökulhlaupum hefur verið áætlað um 100.000 m³/sek., úr Kötluhlaupum og helmingi minna í Skeiðarárhlaupum, en hið mikla jökulhlaup í Jökulsá á Fjöllum fyrir rúmum 2000 árum hafði hámarksrennsli 1/2 - 1 milljón m³/sek.

Stærstu jökulhlaup geta gjöreyðilagt virkjanir og flutt til virkjunarstaði. Minni jökulhlaup gera nauðsynleg stór yfirföll á stíflum og aukakostnað af þeim sökum.

Þegar frost gerir snögglega á auðar ár bólga árnar upp vegna ísmyndunar og mjög mikið ísrek berst niður árnar samfara minnkuðu rennsli vegna bindingar vatns í ís í farvegum vatnasviðsins stórum og smáum. Eftir 2-3 daga jafnar rennslið sig aftur. Það er því æskilegt að hafa inntakslón við virkjanir, sem innihalda 3-4 daga vatnsnotkun virkjunarinnar, ef ístruflanir eiga að haldast í lágmarki. Eftir að jökulárnar hafa verið virkjaðar verður vetrarrensli meira en nú er. Þetta getur valdið vissum erfiðleikum vegna ísmyndunar niðri á laglendi því að meira vatni fylgir að öllu öðru óbreyttu meiri ísmyndun. Þetta er þó mjög flókið mál og fer mjög eftir því, hvort virkjanir verði niðri á laglendi með inntakslónum þar, sem hindrað geta ísmyndun.

6. Félagsleg atriði.

Þau atriði, sem eftir er að ræða eru varla landfræðileg eða jarðfræðileg heldur félagsleg og fjárhagsleg vandamál. Rétt þykir mér þó að ræða þau lítið eitt til þess að fá heildaryfirsýn.

Samkeppni við aðra notkun er tvennskonar, þ.e.a.s. Önnur nýting ána og Önnur nýting landsins. Vatnsaflíð er að mestu leyti í ám þar sem fiskigengd er lítil eða jafnvel engin. Fyrir landið í heild verða því litlir árekstrar við fiskræktunarsjónarmið. Frekar munu möguleikar til fiskræktunar vaxa vegna þess að árnar verða hreinni en nú er og laxa og silungsgengd því auðveldari. Einnig má búast við jafnara rennsli hafi jákvæð áhrif í því sambandi. Auk þess má geta þess að áætlaðar tekjur af veiði í íslenskum ám og vötnum voru 1969, 80 millj. króna eða einungis 1/100 af því sem vatnsaflíð getur gefið.

Landnotkun vatnsaflsins fer varla yfir 1000 km² og verður fyrst og fremst í 400-700 m hæð yfir sjó. Að mestu leyti er þetta land algjör eyðimörk þótt smávegis beitarnland sé á lægri stöðunum. Afrakstur af grónum afréttarlöndum er varla yfir 500 millj. kr. á ári og sézt því gerla að skaði á afréttarlöndum vegna virkjanan verður varla teljanlegur.

Árekstur við náttúruverndunarsjónarmið eru nú fyrisjáanleg á 2 stöðum þ.e. í Þjórsárverum og við Gullfoss. Þetta eru hrein félagsleg og fagurfræðileg vandamál en á þessum stöðum er veruleg vatnsorka og það sem meira er um vert, þetta eru staðir þar sem virkjanir eru öruggar með tilliti til náttúrurhamfara. Að setta náttúruverndar og virkjunarsjónarmið er nauðsynlegt og ætti að vera framkvæmanlegt.

7. Lokaorð.

Niðurstaða þessarar hugleiðinga um landfræðilegar og jarðfræðilegar forsendur vatnsaflsins á Íslandi eru þær, að nýtanlegt vatnsafl sé mest á Suðurlandi, á vatnasviðum Hvítár og Þjórsár, og á Norðausturlandi á vatnasviðum Jökulsár á Fjöllum, Jökulsár á Dal og Lagarfljóts. Í öðrum landshlutum er lítið um vatnsafl og mun það vatnsafl yfirleitt vera dýrt.

Við Tungná, neðanverða Þjórsá og neðsta hluta Hvítár svo og við Jökulsá á Fjöllum eru virkjunarstaðir á svæðum þar sem hraun hafa runnið á síðustu 10.000 árum. Við Jökulsá á Fjöllum er auk þess hættusvæði vegna sigdalda og mikilla jökulhlaupa. Efri hluti Þjórsár og Hvítár svo og eystri hluti Austurlandsvirkjunar er á jarðfræðilega öruggum svæðum.

Eins og nú horfir eru engar líkur á því að aðrir atvinnuvegir en raforkuiðnaður geti keypt um landnotkun við árnar. Til þess er framleiðnimunur raforkuiðnaðarins og annarra hugsanlegra atvinnuvega allt of mikill. Auk þess verður ekki um mikla samkeppni að ræða frá öðrum atvinnuvegum, vegna þess að raforkuiðnaðurinn útilokar engan veginn aðra notkun landsins, þar sem 99% þess munu vera algjörlega ósnert af hans hálfu. Að mestu leyti er því vatnsaflíð hrein viðbót við annan hugsanlegan afrækstur af landinu.

GEOLOGICAL AND GEOGRAPHICAL CONDITIONS FOR HYDRO-POWER IN ICELAND

S U M M A R Y

The hydro-power potential in Iceland is estimated to be some 35.000 Gwh per year.

The Cost of hydro-power plants is mainly capital investment, which is illustrated by Figs. 1 & 2, showing basic cost and variable cost for water conductors and dams. Total cost is assumed to be 3 1/2 U.S. mills per kWh with 10% capital cost.

The geomorphological factors, which determine the type of hydro-power plants, are:

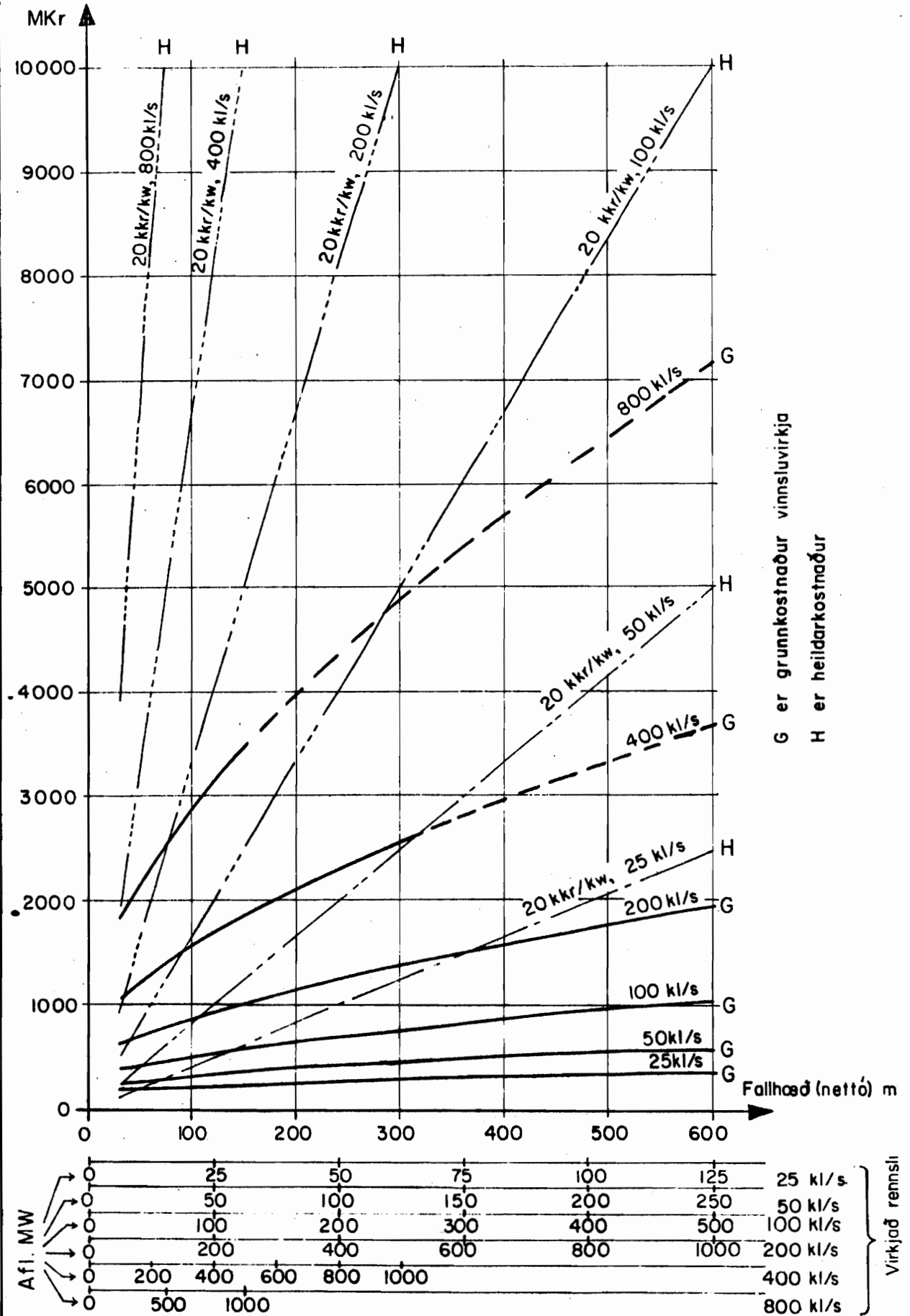
a) The cross section of most glacier eroded and U-shaped valleys (Fig. 3) prevents the building of dams as the volume of such dams would be too large. Therefore most hydro-power plants depend on water conductors to form the necessary head. b) The age of the valley landscape and the longitudinal section along the talweg. The old valleys have a parabolic shape and the steepest gradient is at the headwaters of the rivers where the discharge is small. The younger valleys have irregular talwegs and a steep gradient can occur anywhere in the longitudinal section. Such valleys offer good power sites. (See Figs. 4 and 5). Another possibility is to use the head difference between two adjacent valleys of different age. The older valley is cut deeper and head difference of several hundreds of metres may exist.

There is close relationship between the anticipated age of landscape and the geology (Figs 6 and 7). The mature landscapes usually occur in Tertiary rock formations but the younger valleys in Quaternary rock formations. Many of the best sites, topographically seen, are in very young formations from the last glacial of the Pleistocene to postglacial time. All rock formations in Iceland are volcanic and engineering properties depend therefore mostly on the age of the rock. Formations built up by Tertiary and early Quaternary lava flows and pyroclastic rocks are the best ones from engineering standpoint but the móberg formations from the last glacial and the postglacial lava flows are problematic due to high permeability and bad consolidation of móberg and interbeds. Tectonic movements can cause some concern, where graben tectonics occur at or close to the sites and volcanic activity may be harmful at some of the sites.

The water for power production comes from precipitation brought to the country with humid winds, mainly from three directions. Mostly it is carried by the southeasterly wind, the southwesterly and finally by the cool northeasterly wind. The two southerly winds bring precipitation to the southcoast and the mountains and glaciers inland. In this part of the country the run-off amounts to 100-200 l/sec/km² but in the northern part it is only 20 l/sec/km². The average flow of the larger rivers in Iceland is shown in Fig. 8. The discharge depends on geological factors as in the most pervious part of the country the precipitation is carried underground and issues in springs at a much lower elevation. The discharge of the glacier fed rivers depends as much on temperature as on precipitation. The big rivers of the northeast are all fed by precipitation which falls as snow in the centre of Vatnajökull and melts at the northern margin of the glacier. Figure 9 shows the Vatnajökull glacier at different elevations. Much of the hydro-power potential is contained in glacier fed rivers, which issue from the glaciers at an elevation of 600-800 m a.s. The silt transport of Icelandic rivers amounts to some 80.000.000 metric tons per year. In due time the silt transport fills the reservoirs, but this usually takes a long time. The silt transport is also beneficial as it will thighten the reservoirs in the pervious part of the country. Sudden frost periods lasting for 2-3 days decrease the discharge of the rivers. An intake pound with storage capacity of 2-3 days reduces ice problems to a great degree.

Sudden floods due to the emptying of marginal lakes or sub-glacial eruptions can cause major problems at some of the glacier fed rivers. This is specially the case with some of the rivers flowing from Vatnajökull. The biggest flood, leaving geological evidence, was in Jökulsá á Fjöllum reaching a peak of 0.5-1.0 million kl/sec. The hydro-power is mainly found in southern Iceland with its high precipitation and young valley development and secondly in northeastern Iceland with its valleys of different age and meltwater from the Vatnajökull outlet glaciers.

Stofnkostnaður vinnsluvirkja.



Tölurnar fyrir ofan gefa afl í MW miðað við mismunandi fallhæð og rennsli.

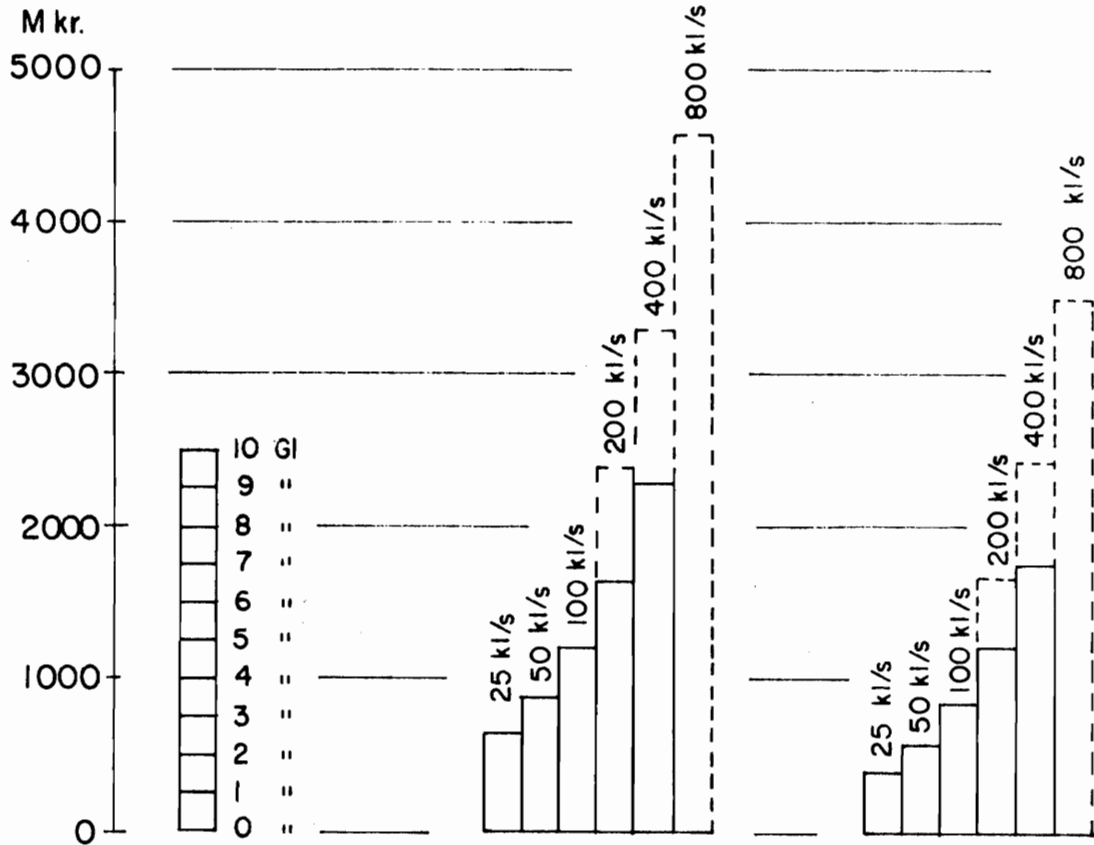
KOSTNAÐUR VIÐ STÍFLUR OG VATNSVEGI

Mynd 2

Breytilegur kostn.
við jarðstíflugerð

Fóðruð jarðgöng
Mkr/10 km göng

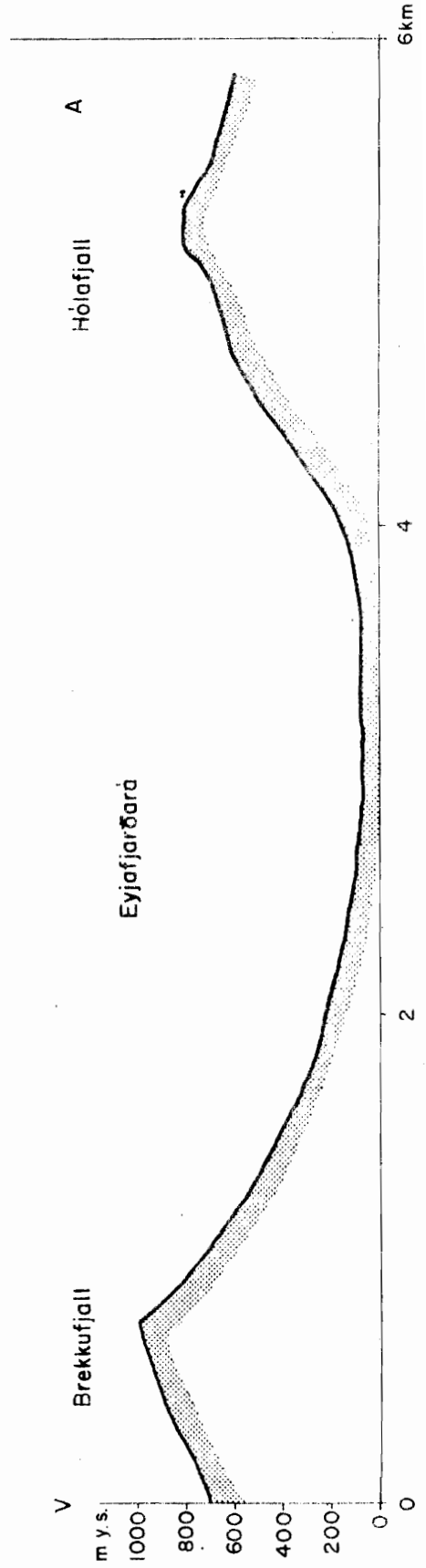
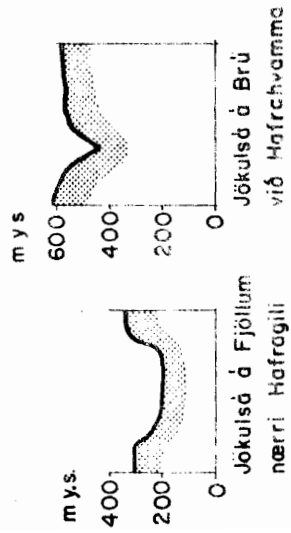
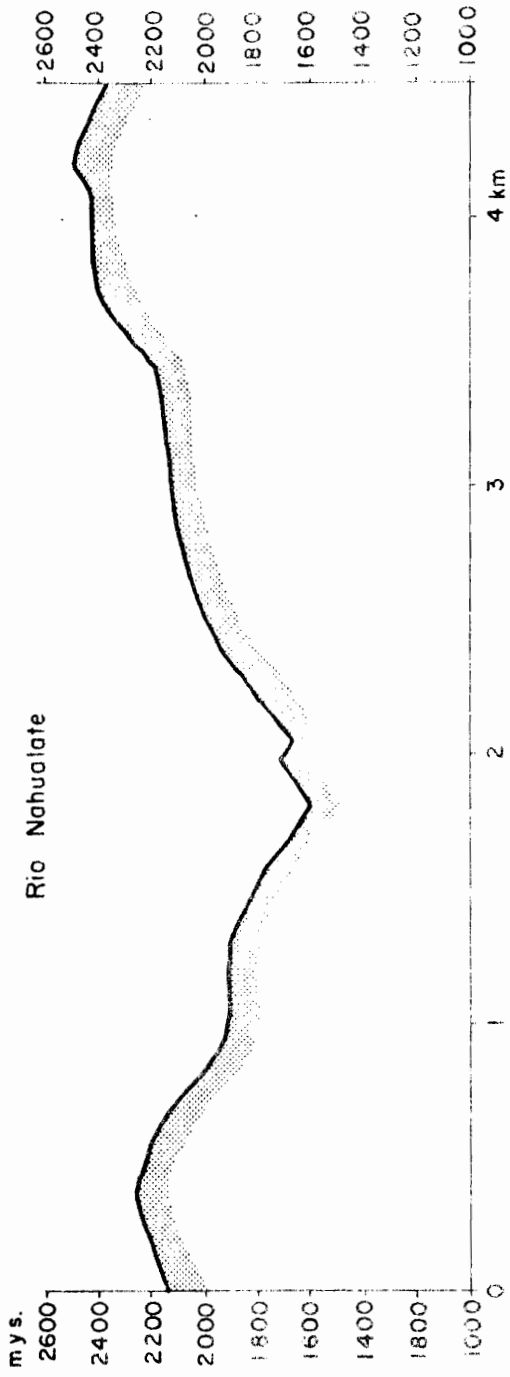
Jarðgöng fóðruð að 1/5 hluta
Mkr /10 km göng



Breytilegur kostnaður við vatnsvegi. Strikalínur miðast við, að vatnsvegir séu byggðir í tveimur áföngum.

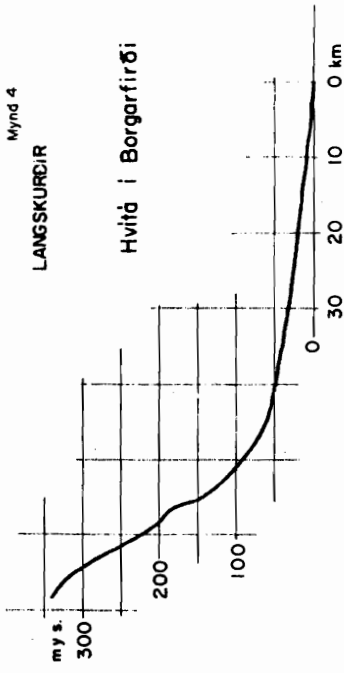
Hæð súlna sýnir rennsli.

ÞVERSKURÐIR DALA

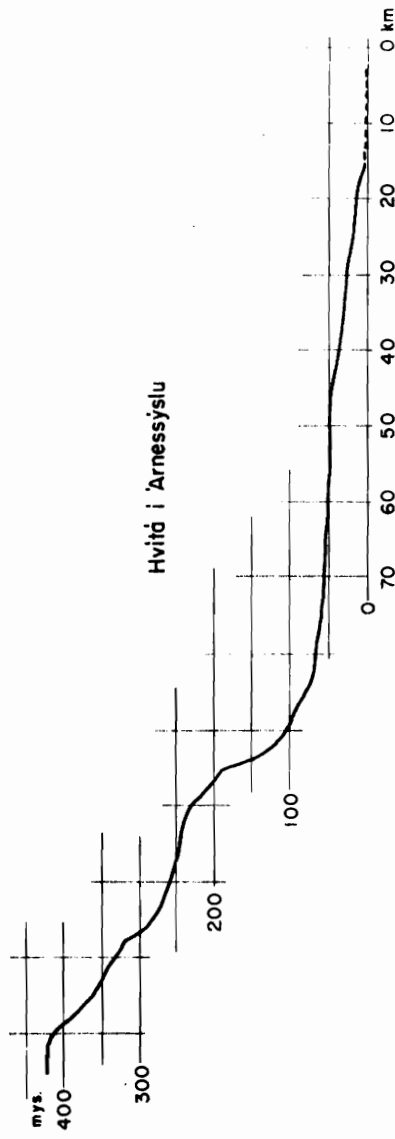


LANGSKURDIR

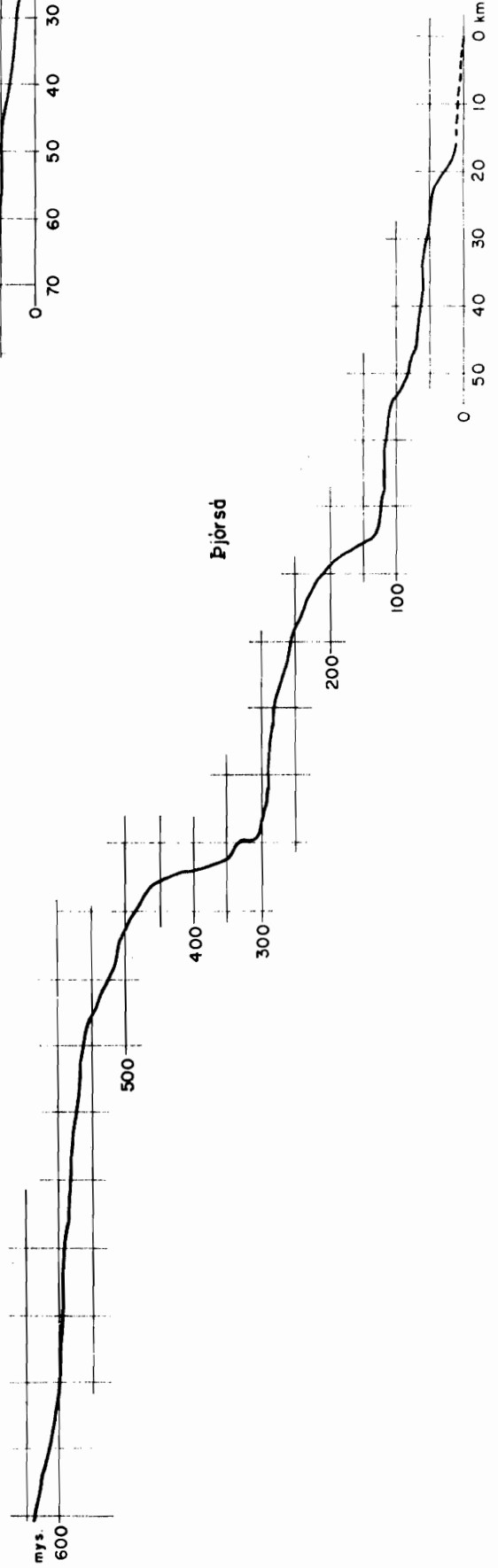
Hvítá í Borgarfirði



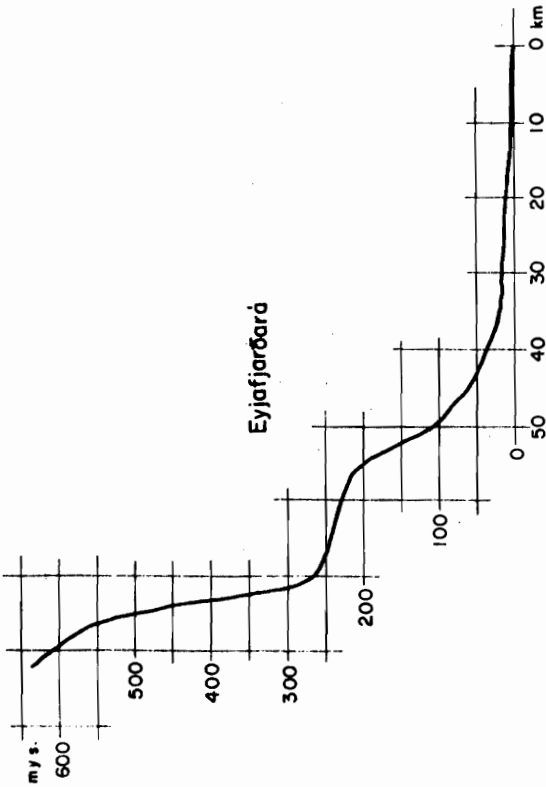
Hvítá í Arnessýslu



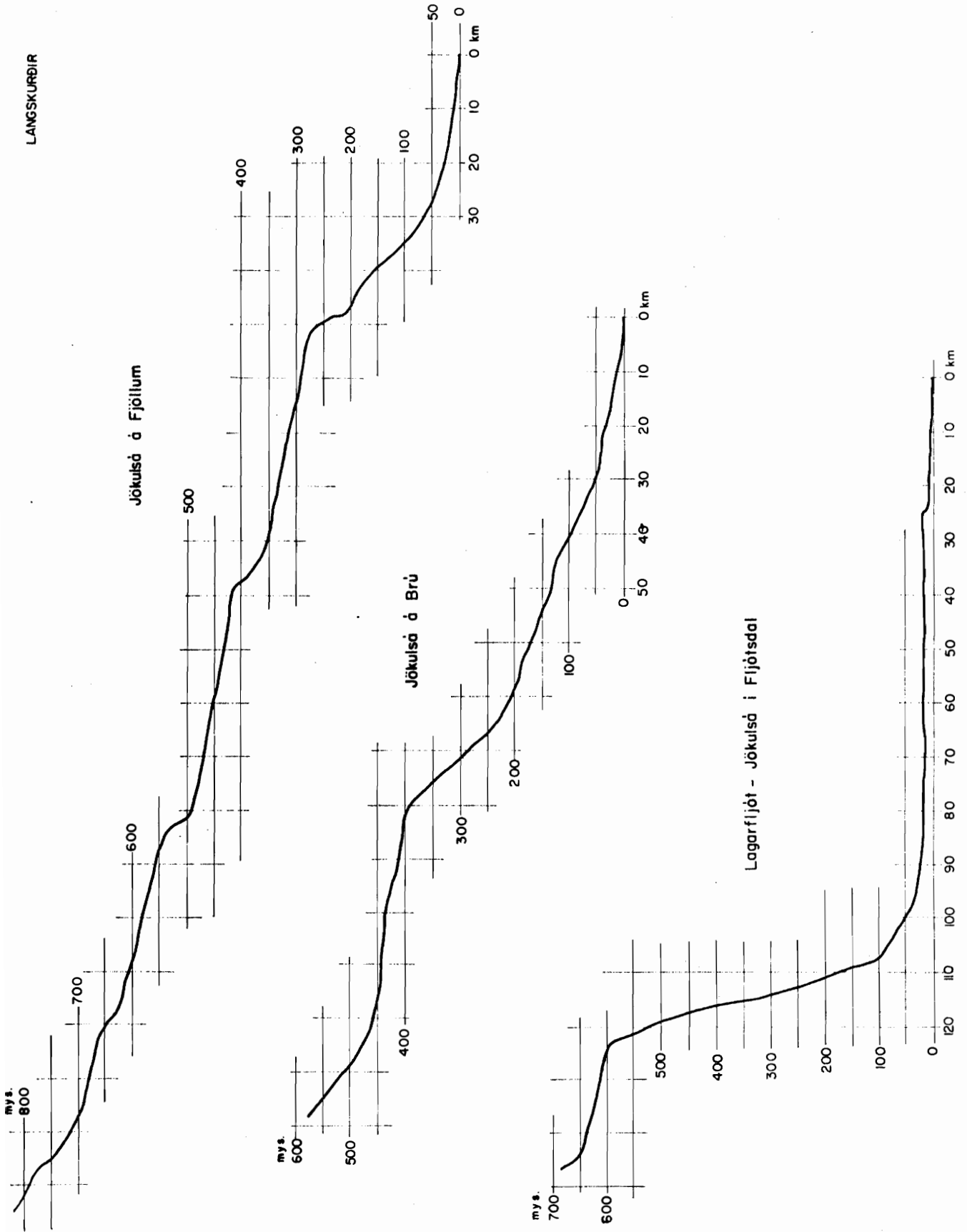
Þjórsd



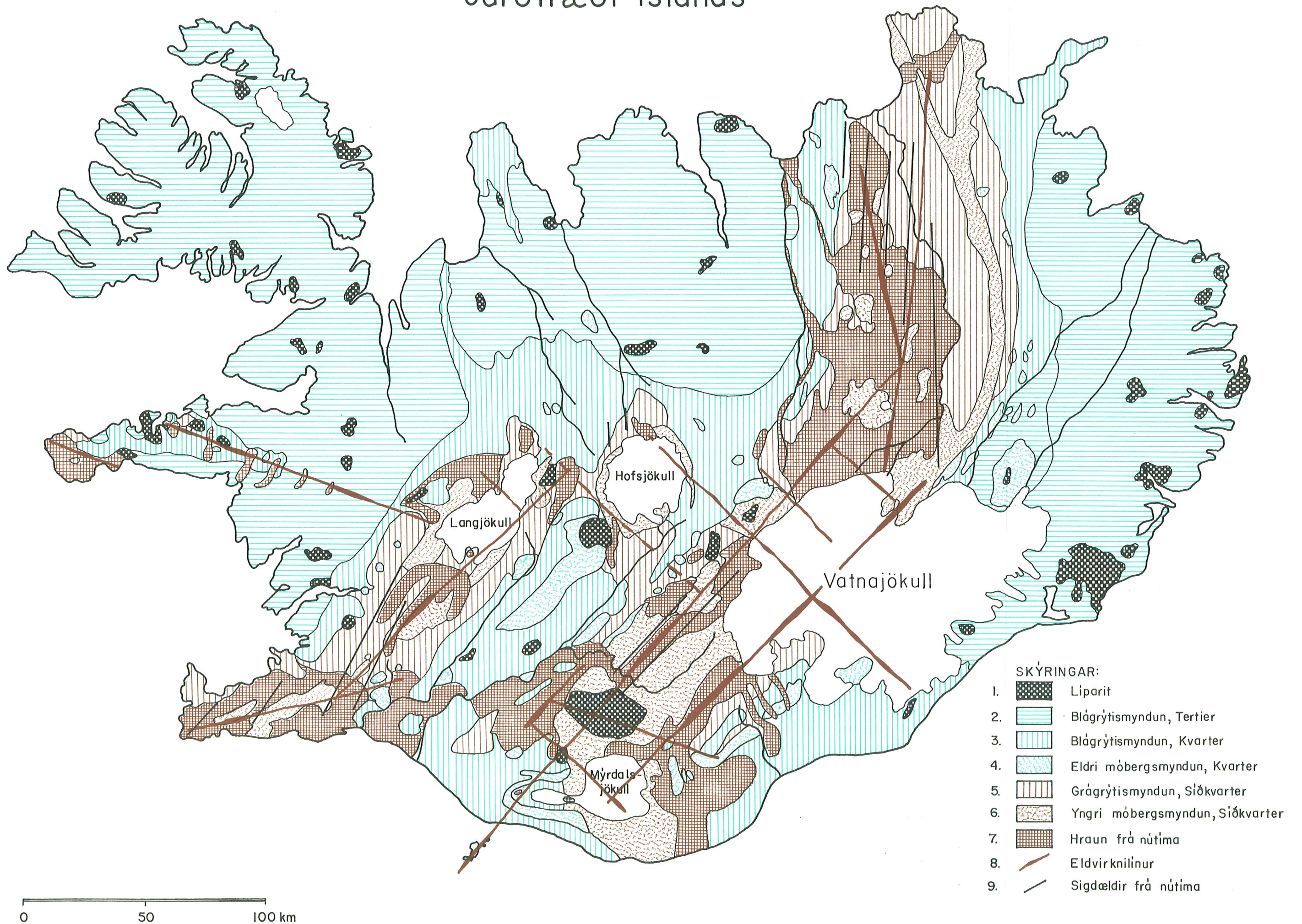
Eyjafjarðard



LANGSKURÐIR

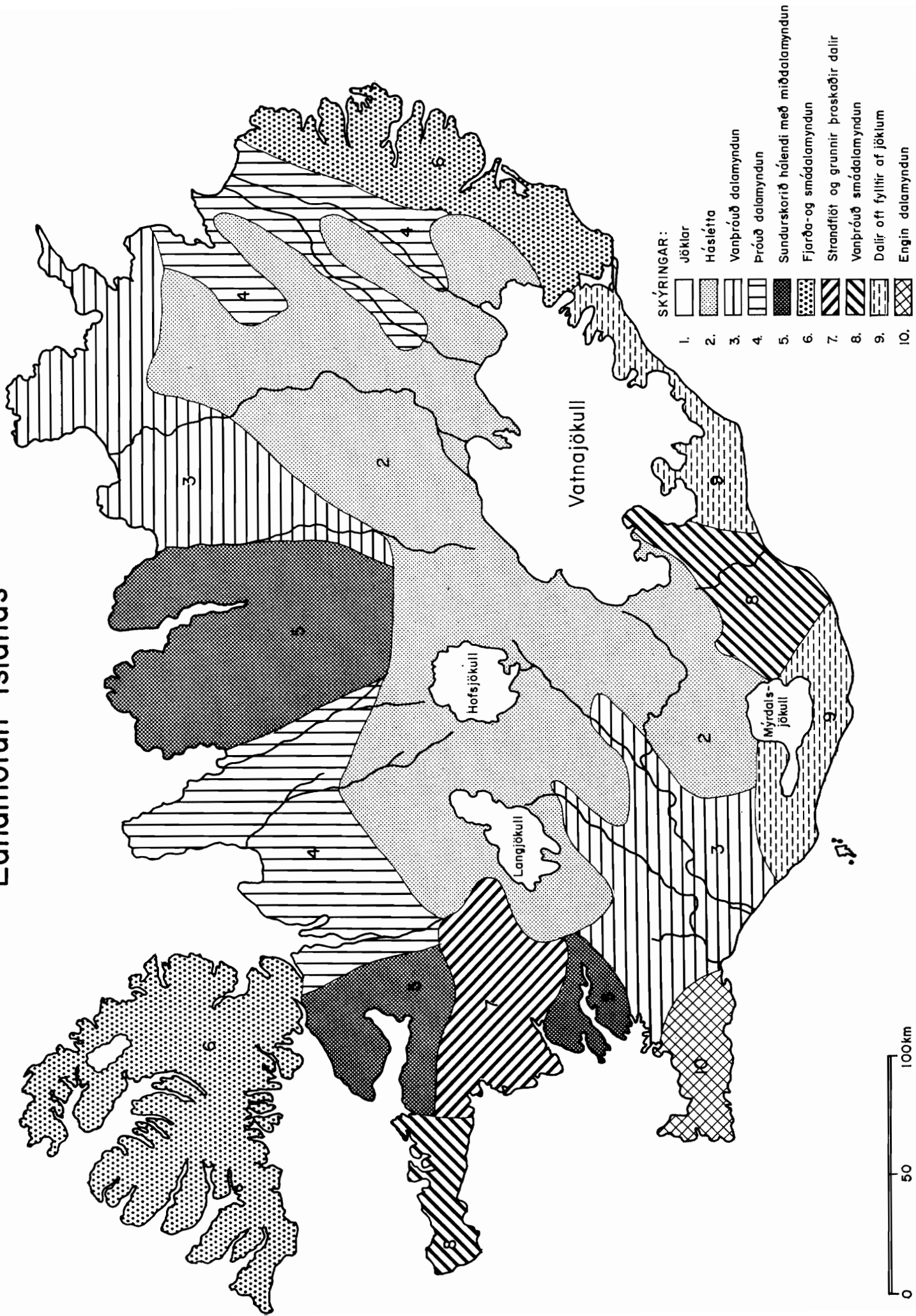


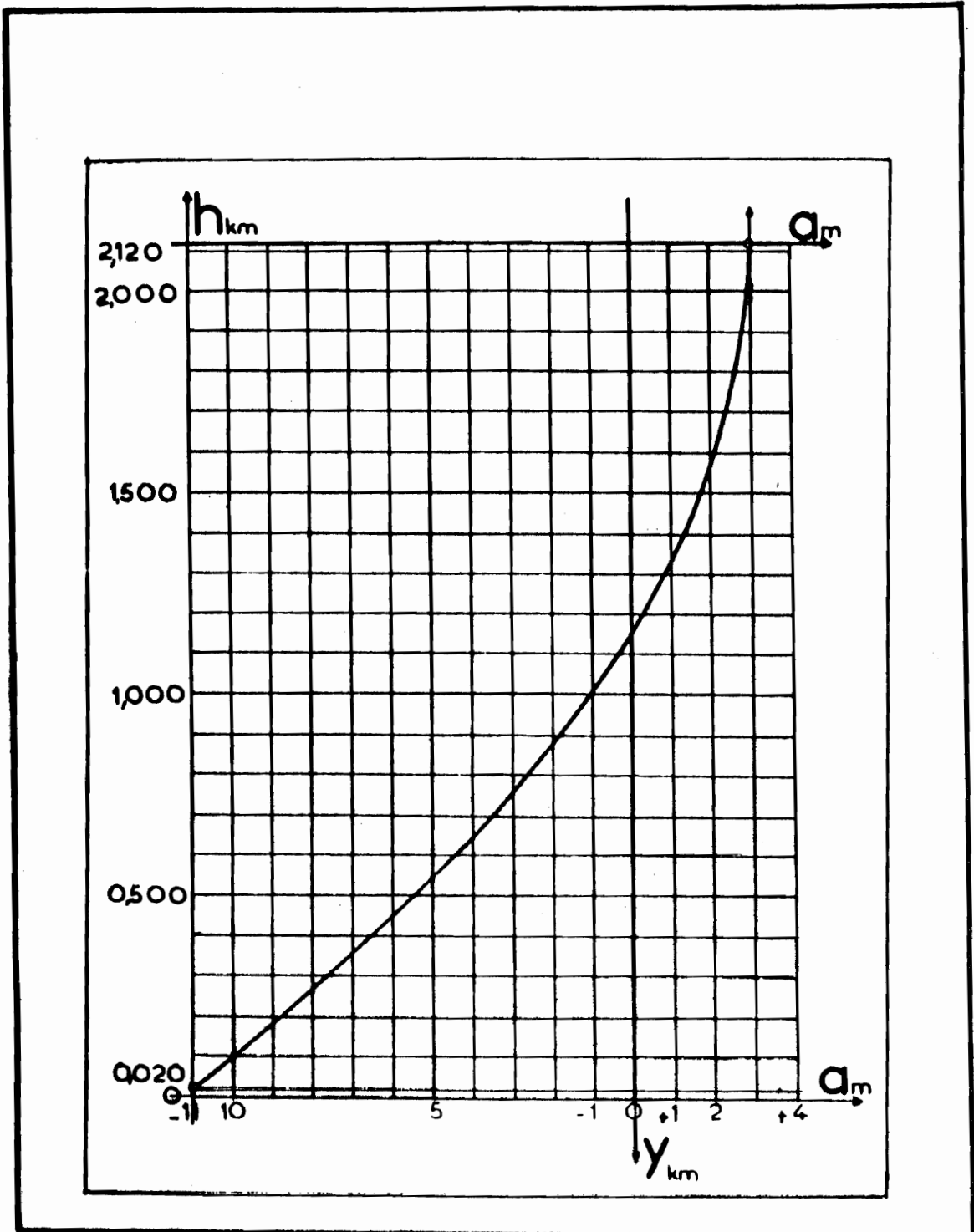
Jarðfræði Íslands



0 50 100 km

Landmótun Íslands





Samband afnáms (a) og hæðar (h) yfir sjávarmál