

*and*

**FRÁRENSLI KRÖFLUVIRKJUNAR**

**ORKUSTOFNUN STRAUMFRÆÐISTÖÐ**  
**NEA HYDRAULIC LABORATORY**  
**REYKJAVÍK ICELAND**

ORKUSTOFNUN

STRAUMFRÆDISTOD

# FRÁRENSLI KRÖFLUVIRKJUNAR

*útlán*

JÓN INGIMARSSON

JÓNAS ELÍASSON

SVEN P. SIGURDSSON

## E f n i s y f i r l i t.

	bls.
1. Formáli og Ágrip	1
2. Tilgangur og forsendur	3
2.1 Tilgangur rannsóknarinnar	3
2.2 Rannsóknaraðferð	3
2.3 Grunnvatnsskil	4
2.4 Meðalgrunnvatnshæð	4
2.5 Lektarstuðlar	4
2.6 Úrkoma og afrennbæli	5
2.7 Magn affallsvatns og gufu	6
3. Reikniniðurstöður	6
3.1 Núverandi meðalgrunnvatnshæð	6
3.2 Lón í þríhyrningadal	7
3.3 Lón í Hlíðardal	9
3.4 Breytingar á rennsli með tíma	11
4. Efnainnihald vatnsins	12
Ritskrá	13
Viðauki A, Lýsing á reikniáðferð	1
A.1 Stærðfræðilegt samband	1
A.2 Nálgunaraðferð	3
A.3 Notkun	4
A.4 Tímaáhrif	7
Viðauki B, Reiknuð grunnvatnshæð og hækkun í öllum punktum svæðis.	9

## M y n d s k r á

nr.	heiti
0,1	Reikninet grunnvatns
0,2	Eðlilegt grunnvatnsborð
0,3	Lón í þríhyrningadal
0,4	Lón í þríhyrningadal Rennsli til jarðhitasvæðis
0,5	Lón í Hlíðardal
0,6	Lón í Hlíðardal Rennsli til jarðhitasvæðis
0,7	Lón í Hlíðardal Yfirborðsrennsli til Búrfellshrauns
0,8	Lón í Hlíðardal Yfirborðsrennsli til Búrfellshrauns Rennsli til J.h.s.

## 1. FORMÁLI OG ÁGRIP

Skýrsla þessi er samin að tilhlutan jarðhitadeildar Orkustofnunar, og fjallar hún um útreikninga á rennsli frárennslisvatnsins frá Kröfluvirkjun. Miðað er við, að frárennslisvatnið leiti niður til grunnvatnsins fljótlega eftir að því er sleppt og breytingar þær, sem það veldur á grunnvatnsborði og rennslistíminn til Mývatns er síðan áætlaður.

Til verksins hefur verið notuð tölvuforskrift, unnin á Straumfræðistöð Orkustofnunar, af Snorra P. Kjaran, verkfræðing. Prófun forskriftarinnar naut stuðnings Háskóla Íslands, en verk sitt hefur Snorri unnið undir stjórn Jónasar Elíassonar, prófessors, samkvæmt rannsóknarsamningi Orkustofnunar og Háskóla Íslands. Umsjón af hálfu jarðhitadeildar hafði Sven Sigurðsson, en mikinn hluta verksins hefur Jón Ingimarsson, verkfræðingur Straumfræðistöðvar unnið og hefur til þess notið aðstoðar jarðfræðinganna Kristjáns Sæmundssonar og Stefáns Arnórssonar, auk áðurgreindra manna.

Helztu niðurstöður eru þær, að frárennslisvatnið veldur allmiklum breytingum á grunnvatnshæðinni í nágrenni við niðurrennslisstaðinn, þó mestum ef lónið er staðsett í Þríhyrningadal, en minni ef það er staðsett í Hlíðardal og frárennslinu veitt þaðan niður til Búrfellsbrauna. Töluverðar líkur eru á, að frárennslið leiti með tíð og tíma niður til jarðhitasvæðisins aftur, og þá frekar ef lónið er staðsett í Þríhyrningadal. Slíkt tekur alllangan tíma, þar eð jarðhitasvæðið er á 1-2 kílómetra dýpi.

Stytzta rennslisteið til Mývatns er reiknuð og fundið, að vatnið sé því sem næst 30 ár á leið sinni til Mývatns. Með tilliti til þessa langa rennslistíma og þeirra breytinga, sem verða á efnainnihaldi vatnsins á leið þess eftir jarðlögnum og við kólnunina í lóninu er hættan á mengun í Mývatni af þess völdum talin nær engin.

Hins vegar er hugsanlegt, að grunnvatnsborðshækkunin valdi auknu rennsli í lindum, þar sem þær eru og jafnvel geti sprottið upp nýjar í nágrenni lónsins. Höfundum er ekki ljóst, hvort slíkt er til góðs eða ills frá náttúruverndarsjónarmiði. Lindarrennslið getur einnig verið tímabundið fyrirbrigði, ef verulegur hluti frárennslisins leitar til jarðhitasvæðisins jafnóðum og þrýstingur á því lækkar.

Þess ber að geta, að forsendur reikninganna eru fremur veikar og þær því ekki settar fram í tölulegu formi, nema að litlu leyti. Niðurstaðan er hins vegar það ótvíráð, að ekki er álitin þörf á frekari forsendukönnun á þessu stigi málsins, enda yrði sú rannsókn óhjákvæmilega mjög umfangsmikil. Hins vegar er gerð tillaga að staðsetningu rannsóknarborholu, þar sem hægt verður að fylgjast með vatnsborði og efnainnihaldi, og gætu niðurstöður úr þeim rannsóknum gefið tilefni til að endurskoða útreikningana.

## 2. TILGANGUR OG FORSENDUR

### 2.1 Tilgangur rannsóknarinnar

Tilgangur þessarar rannsóknar er að rannsaka vissa þætti umhverfis-áhrifa frárennslisvatns Kröfluvirkjunar eftir að það hefur sigið í jörð niður. Þeir þættir, sem kannaðir voru, eru sem hér segir:

Legga meðalgrunnavatnsborðs.

Hækkun grunnavatnsborðs, ef frárennslislón er í Þríhyrningadal.

Hækkun grunnavatnsborðs, ef frárennslisli er veitt í Hlíðardalslæk.

Áhrif bakrennslis til jarðhitasvæðisins á grunnavatnsborð.

Fljótustu lekaleiðir til Mývatns.

Heppilegasta staðsetning á rannsóknarholum.

Þar sem grunnavatnsfræðilegar forsendur reikninganna eru fremur veikar, verður því ekki haldið fram, að þessi atriði séu könnuð til hlítar. Niðurstaðan er hins vegar nokkuð einhlít, svo að á þessu stigi málsins verður frekari rannsóknarþörf ekki greind, nema hvað nauðsynlegt er að fylgjast með frárennslinu eftir að virkjunin fer í gang. Verður nánar vikið að þessum atriðum síðar.

### 2.2 Rannsóknaraðferð

Rannsókninni er þannig hagað, að gert er sérstakt reiknilíkan af svæðinu innan helztu grunnavatnsskila, sem upptök sín eiga í Mývatni og umlykja Kröflusvæðið. Sjálfir reikningarnir eru framkvæmdir á tölvu Háskóla Íslands, en hún er tengd Skýrsluvélum ríkisins og Reykjavíkurborgar. Sjálfa reikniforskriftina, sem notuð er, hefur Snorri P. Kjaran, lic. techn., gert. Lýsingu á sjálfri reikniaðferðinni er að finna í viðauka A hér að aftan, sem Sven Sigurósson, reiknifræðingur, hefur ritað.

Í raun rétttri byggist rannsóknaraðferð þessi á að tengja saman hinar ýmsu vatnafræðilegu upplýsingar, er fyrir liggja, á þann hátt að hin endanlega niðurstaða sé í innra samræmi við þær upplýsingar, sem hún byggir á. Hinn samtengjandi þáttur er almenn fræðileg vitneskja

um hegðun grunnvatnsrennslis, en hún er í stuttu máli sú, að grunnvatnsstraumurinn leitar undan halla grunnvatnsborðsins, og hraði hans er hvarvetna í samræmi við lekastuðul berggrunnins og halla grunnvatnsborðsins. Sjálfar upplýsingarnar eru um jarðfræði svæðisins, legu grunnvatnsskila, grunnvatnshæð á nokkrum stöðum á svæðinu, frárennsli Mývatns (vatnsmagn í Laxá) og úrkomumagn á svæðinu. Nauðsynlegt reyndist að gera nokkrar leiðréttingar á úrkomumagni því, sem uppfékkst gefið á Veðurstofunni, en sú leiðrétting er í samræmi við upplýsingar Veðurstofunnar um hugsanlegar skekkjur í úrkomumælingum.

### 2.3 Grunnvatnsskil

Staðsetning grunnvatnsskila er áttluð af Kristjáni Sæmundssyni jarðfræðingi. Guttormur Sigbjarnarson hefur sömu hugmyndir um grunnvatnsskil til norðurs frá Mývatni, en ekki er samræmi milli þeirra um grunnvatnsskilin til austurs, Guttormur álitur þau vera nær Mývatni, þ.e. að þau liggja frá Hágöngum, vestan við Jörund og suður í Vestari-Skógarfjöll. Grunnvatnsskil, sem notuð eru við reikningana eru á teikn. nr. 01. Á sömu teikn. er svæðið, sem notað er við reikningana einnig ákvarðað og þríhyrninganet reiknilíkansins sýnt (sjá ennfremur viðauka A).

### 2.4 Meðalgrunnvatnshæð:

Á svæðinu er grunnvatnshæðin þekkt í grófum dráttum á um sex stöðum auk þess vatnsborð á Mývatni. Staðirnir eru merktir inn á teikn. nr. 01. Auk þess er grunnvatnshæðin þekkt á nokkrum stöðum utan við mörk svæðisins. Út frá þessu o.fl. hefur Kristján Sæmundsson giskað á meðalgrunnvatnshæðarlínur (300 m, 400 m og 500 m), sjá teikn. nr. 02.

### 2.5 Lektarstuðlar

Við gerð reiknilíkansins var stuðst við jarðfræðilegar upplýsingar frá Kristjáni Sæmundssyni og Stefáni Arnórssyni á þann hátt, að heillegar jarðmyndanir, sem líklegt er talið að hafi svipaðann lektarstuðul hver myndun fyrir sig, voru aðgreindar með þríhyrningahliðum (mynd 0.1), og meðalgrunnvatnshæðin var síðan reiknuð út. Ef ekki er samræmi milli úrkomu og lekastuðla, sem reiknað er



með, fæst skökk vatnshæð á þeim stöðum þar sem vatnshæðin er fyrirfram þekkt og þá þarf að endurtaka reikningana með nýjum lekastuðlum (sjá viðauka A), uns samræmi fæst. Eftir nokkrar tilraunir af þessu tagi fengust þeir lekastuðlar sem lesa má á mynd 0.1. Algengustu lekastuðlarnir, og þær jarðmyndanir sem þeir eiga við eru sem hér segir

0.126	m <sup>2</sup> /sek	Hraun, brunnin eftir jökultíma
0.00756	"	Grágrýti
0.00252	"	
0.00126	"	Móburg
0.000315	"	Jarðhitaummynduð svæði

Niðurstaða þessi er í samræmi við jarðfræðilega vitneskju um þéttleika hinna ýmsu myndana. Aðrir lekastuðlar sem fengust og sjá má á mynd 0.1 eru settir til jöfnunar á milli hinna ýmsu svæða, og eins til að jarðvatnsborð sé hvarvetna undir yfirborði. Heildarfjöldi stuólanna gefur til kynna að fyrirliggjandi upplýsingar séu fullnýttar, og á þessum stuðlum eru frekari reikningar byggðir.

## 2.6 Úrkoma og afrennsli:

Við ákvörðun á úrkomu á svæðinu var stuðst við bréf frá Veðurstofu Íslands til Stefáns Arnórssonar jarðfræðings, dags. 29. okt. 1975. Í bréfinu kemur fram að meðalársúrkoma við Reykjahlíð er 394 mm/ári, þar af eru um 60% snjór og slydda. Út frá þessu hefur Veðurstofan áætlað að úrkoman á svæðinu sé frá um 400 og upp í yfir 800 mm/ári. Bréfinu fylgdi úrkomukort. Í bréfinu segir að fremur sé um of lágar, en of háar tölur að ræða. Úrkomumælarnir nái að líkindum ekki allri þeirri úrkomu, sem til jarðar fellur, einkum þegar snjóar í hvassviðri, einnig sé lítið vitað um áhrif landslags á úrkomuna.

Samkvæmt rennslismælingum Vatnamælinga O.S. er meðalafrennsli Laxár við Mývatn um 26 l/sek km<sup>2</sup>, sem svarar til um 820 mm/ári í úrkomu. Sú tala er mun hærri en mælingar Veðurstofu gefa til kynna.

Út frá þessum atriðum var úrkoman áætluð yfir svæðið. Gert var ráð fyrir að úrkoman væri um 500 mm/ári við Mývatn og færi upp í um 1200 mm/ári nyrst á svæðinu, sjá teikn. nr. 01.

Víðast hvar á svæðinu seytlar öll úrkoma í jarðvatnið. Ekkert yfirborðsafrennsli er á svæðinu (engar ár eða lækir) nema Hlíðardalslækur, en hann á upptök sín í grennd við Kröflu en hverfur niður í jarðveginn stuttu þar fyrir neðan. Tillit er tekið til hans með því að lækka hluta úrkomunnar, sem blandast grunnvatninu á upptökusvæði hans.

### 2.7 Magn affallsvatns og gufu

Kröfluvirkjun á að geta framleitt allt að 70 MW. Þar sem við viljum fá "stationary" lausnina (þ.e.a.s. lausnina þegar tíminn hættir að hafa áhrif), þá er eðlilegt að nota einhvers konar meðalgildi yfir árið. Því var ákveðið að miða við 60 MW afl.

Af flæðiriti 50.012 og töflu I, í "Kröfluveita-skýrsla um forhönnun aðveitu Kröfluveitu", dags. í nóv. 1975, má ráða að við 60 MW afl er gufunotkun, sem inn í virkjunina fer um 510 kg/sek, og affallsvatnið samtals um 370 l/sek auk 126 kg/sek af gufu. Eitthvað af gufunni kemur til með að þéttast, en á móti kemur að eitthvað af affallsvatninu gufar upp. Því var ákveðið í samráði við Valdimar K. Jónsson hjá Verkfræðistofu Sigurðar Thoroddsen s.f., að átla affallsvatnið að meðaltali 370 l/sek.

## 3. REIKNINIÐURSTÖÐUR

### 3.1 Núverandi meðalgrunnvatnshæð

Að fengnum lekastuðlum var núverandi grunnvatnshæð reiknuð út, og er hún sýnd á mynd 0.2. Þar eru einnig sýndar línur, er Kristján Sæmundsson hefur áætlað á grundvelli þeirra punkta, þar sem vatnshæð er þekkt og áður var getið, en þeir eru einnig sýndir á mynd 0.2 með tilheyrandi hæðartölum. Ósamræmi milli lína Kristjáns og hinna útreiknuðu er ekki meira en við er að búast, þegar tekið er tillit til þess, hvað punktarnir eru fáir.

Grunnvatnshæðin á mynd 0.2 er útreiknuð þrýstihæð þess grunnvatns, sem streymir í gegnum þríhyrningana í reikninetinu. Þar sem grunnvatnsbratti er mikill, t.d. í fjallshlíðum, má búast við, að sjálft yfirborð

grunnvatnsins sé heldur hærra en hið útreiknaða, enda er grunnvatnið á slíkum stöðum á leið niður í jarðlög, og þrýstihæð þess fer minnkandi, eftir því sem neðar kemur. Til glöggvunar má geta þess, að þrýstihæð grunnvatns á ákveðnum stað á ákveðnu dýpi er sú hæð, sem vatnsborð í fóðraðri borholu, sem boruð er niður á það dýpi, stígur upp í.

Ennfremur er hugsanlegt, að þrýstihæð sé heldur meiri á einstaka stað en mynd 0.2 gefur til kynna. Þetta á við, þar sem grunnvatnsbratti er mikill og mjög lek jarðlög liggja ofan á minna lekum, t.d. hraun ofan á grágrýti.

Slík frávik sem þessi eru staðbundin fyrirbrigði, sem stafa frá því, að grunnvatnsrennslið á hverjum einstökum stað er ekki í lárétta stefnu. Þessi frávik hafa þó hverfandi áhrif á heildarrennslið.

### 3.2 Lón í Þríhyrningadal

Til að rannsaka áhrif frárennislóns í Þríhyrningadal var reiknað með, að frárennslið færi niður í 3 punktum í þeim hlutföllum sem hér segir:

Punktur nr.	18	19	28
Hlutfall	1/4	1/2	1/4

Þetta er gert til að líkja sem best eftir samfelldu seytli úr Þríhyrningadal niður til grunnvatns og þeirri útbreiðslu, sem straumurinn óhjákvæmilega nær á niðurleiðinni, t.d. með því ef lindir spretta upp í utanverðum fjallshlíðum dalsins og renna eitthvað á yfirborðinu sem lækir, áður en þær hverfa niður í jörðina aftur. Slík fyrirbrigði hafa komið í ljós annars staðar, t.d. í lekatilraunum við Langöldu. Hvernig slíkt rennsli finnur sér leið í smáatriðum, er hins vegar ómögulegt að segja fyrir um, nema hvað það mun finna sér leið eftir þeim sprungum, sem víðastar eru. Fyrir heildargrunn vatnsstrauminn til Mývatns skiptir þetta líka litlu máli, nema ef

vatnið getur fundið leið eftir meira eða minna opnum sprungum alla leið þangað niður, en að þessum möguleika verður lauslega vikið síðar.

Niðurstaðan er sýnd á mynd 0.3 sem jafnhæðarlínur grunnvatnsborós. Af línunum er ljóst, að frárennslisvatnið rennur í nyrzta hluta Mývatns eftir svæðinu vestan Dalfjalls. Á myndinni er sýnd stytztta lekaleið til Mývatns. Áætlað er, að frárennslisvatnið sé að minnsta kosti 30 ár að renna þá leið, en sú tala er þó fremur ódrugg.

Frárennslisvatnið veldur mikilli grunnvatnsboróshækkun á svæðinu. Á mynd 0.3 er það svæði afmarkað, þar sem grunnvatnsboróshækkunin reiknast meiri en 2 metrar. Svæðið er 136 km<sup>2</sup> að stærð og meðalhækkun innan þess 6,8 metrar. Við slíka hækkun er að sjálfsögðu hætta á, að grunnvatnið nái upp í jarðlög, þar sem það hefur ekki runnið, áður en hækkunin skeði. Ef slík jarðlög eru mikið lekari en hin, eykst rennslishraðinn frá því, sem hér er táknað með, og dregur þá úr hækkuninni. Þetta mun t.d. eiga sér stað austan Dalfjalls, en þar kemur fram mikil grunnvatnstunga suðaustur af Kröflu og Sandbotnafjalli, sem táknar það, að sú úrkoma, sem ekki kemst sína eðlilegu leið niður að Mývatni vestan Dalfjalls fyrir frárennslisvatninu, leitar nú þarna niður í staðinn. Sums staðar reiknast hækkunin svo mikil, að jafnhæðarlínurnar lenda yfir jarðaryfirborði, sem í reynd mundi tákna, að lindir myndu myndast í nánd við þessa staði og renna eftir yfirborðinu, unz þær finna staði, þar sem grunnvatnsborðið er komið undir jarðaryfirborð, en þar komast þær aftur niður. Ef yfirborðslögin eru mikið lekari en þau neðri, þurfa þó engar lindir að koma fram af þeim orsökum, sem áður er getið.

Þessi grunnvatnsboróshækkun mun enn fremur valda því, að þrýstingur á rennsli grunnvatns til dýpri jarðlaga eykst. Það hjálpar enn fremur til, að virkjun jarðhitasvæðisins við Kröflu lækkar þrýstinginn í þessum djúpu jarðlögum. Til þess að athuga áhrif slíks leka til dýpri jarðlaga var athugað, hvaða áhrif dæling í punktunum 12 og 13 hefði á grunnvatnsstöðuna á mynd 0.3. Útilokað er að spá í það magn, sem kann að leka þessa leið, en áhrifin eru lítil, nema lekamagnið nemi helmingi frárennslisvatnsins eða rúmlega það, svo að reiknað var, hvaða áhrif 250 l/sek leki til jarðhitasvæðisins hefði. Það er gert með því að reikna með, að þessu magni sé dælt upp úr punktunum 12 og 13.

Breytingin, sem þetta veldur, er sýnd á mynd 0.4, og er hægt að bera hana saman við myndir 0.2 og 0.3. Svæðið, þar sem meira en 2 metra grunnvatnsborðshækkun á sér stað, minnkar úr  $136 \text{ km}^2$  (mynd 0.2) í  $60 \text{ km}^2$ , og meðalhækkun innan þess verður 5.1 metri í stað 6.8 áður. Lega 350 metra grunnvatnslínunnar og grunnvatnsborðs fyrir sunnan hana er mjög svipuð í öllum þremur tilvikum (myndir 0.2, 0.3 og 0.4).

Á mynd 0.3 er sýnd heppileg staðsetning rannsóknarborholu, þar sem hægt er að fylgjast með vatninu, verði frárennslislón í Þríhyrningadal. Holan er innan þess svæðis, þar sem einhver hækkun grunnvatnsborðsins á í öllum tilfellum að koma fram, en misjafnlega mikil, eftir því hve mikið rennur til baka til jarðhitasvæðisins. Ennfremur er hægt að fylgjast með efnasamsetningu vatnsins í holunni.

### 3.3 Lón í Hlíðardal

Í Hlíðardalnum er jörð töluvert þéttari en umhverfis Þríhyrningadal og líkur á yfirborðsrennsli því meiri. Frárennslisvatnið á hér því um 3 leiðir að velja, - aftur til jarðhitasvæðis, eftir jarðlögum austan Dalfjalls niður til Mývatns, og eftir Hlíðardalslæk niður til Búrfellshrauna og þaðan til Mývatns. Í raun mun vatnið skipta sér á þessar leiðir í einhverjum nú óþekktum hlutföllum. Grunnvatnslínur, sem miðast við, að allt vatnið sé komið niður í jarðlögin á svæðinu milli punkta 30 og 39 og fari þaðan eftir jarðlögum til Mývatns, eru sýndar á mynd 0.5. Grunnvatnsborðshækkun 2 metrar eða meir, verður á  $175 \text{ km}^2$  svæði, en meðalhækkunin er heldur minni en fyrir Þríhyrningadalslónið, eða 4.4 metrar. Sömu fyrirvarar gilda um þessa hækkun og áður var getið.

Ef frárennslisvatnið rennur allt niður Hlíðardalslæk og hverfur í Búrfellshraun, er það fljótar á leiðinni til Mývatns. Reikningar, sem gera ráð fyrir, að það sé komið niður í jarðlögin á svæðinu milli punkta 47 og 55, eru sýndir á mynd 0.7. Grunnvatnsborðshækkun meiri en 2 metrar verður nú á  $98 \text{ km}^2$  svæði, en meðalhækkun aðeins 2.2 metrar.

Fljótasta lekaleið til Mývatns er sýnd á mynd 0.7; streymistíminn er reiknaður 30 ár eða meir, sama og fyrir Þríhyrningadalslónið. Heppileg staðsetning rannsóknarborholu er einnig sýnd. Niðurstöður úr henni munu gefa til kynna efnasamsetningu vatnsins og að hve miklu leyti það fer milli Hverfjalls og Námafjalls, en alllangur tími mun líða, áður en niðurstöður fást úr henni, svo að til greina kemur að bora aðra fyrst, nær niðurrennsliðinu. Hættan er hins vegar sú, að ef niðurrennslið er ekki rétt staðsett, getur holan gefið villandi upplýsingar, svo framarlega sem hún verður staðsett ofarlega í því.

Áhrif leka til jarðhitasvæðisins eru sýnd á myndum 0.6 og 0.8. Reikningarnir eru byggðir á sama lekamagni til jarðhitasvæðisins og gert var fyrir Þríhyrningadalslónið. Er þetta gert til samræmis, þó að ekki sé líklegt, að lekinn verði sá sami í öllum tilfellum. Nánari athuganir á þessu atriði geta farið fram, þegar valið hefur verið á milli þessara tveggja möguleika, lóns í Hlíðardal eða Þríhyrningadal.

### 3.4 Breytingar á rennsli með tíma

Forskriftin, sem notuð var við reikningana, getur ennfremur reiknað breytingar á rennsli og grunnvatnshæð með tíma, en ekki var farið út í nákvæma reikninga af því tagi að svo stöddu. Reiknaður var lengsti tímastuðull svæðisins (sjá viðauka A), og reyndist hann vera 15.3 ár.

Þeir reikningar, sem að framan er lýst, miðast við endanlegt ástand, en reikna má út, hve langan tíma tekur að ná því. Reyndist það vera 10 - 35 ár. Breytingarnar ske því mjög hægt, og endanlegt ástand næst ekki fyrr en svipað langur tími er liðinn, og tekur frárennslisvatnið að ná Mývatni eftir fljótustu lekaleið.

Auk þessa ber að hafa í huga, að reikningarnir miðast við, að Kröflu-virkjun gangi á því sem næst fullum afköstum árið um kring, eða 60 MW. Slíkt verður þó ekki fyrr en eftir nokkur ár, og lengist þá tíminn enn meir.

Hugsanlegt er að frárennsli frá þríhyrningadalslóni taki styttri tíma, ef vatnið nær að finna leið eftir opnum sprungum nær alla leið. Líkur á þessu eru þó taldar litlar. Lekaleiðin frá Hlíðar-dalslóninu (mynd 0.7) er sem næst þvert á sprungustefnuna, og því kemur þess háttar rennsli ekki til greina í því tilfelli.

#### 4.0 EFNAINNIHALD VATNSINS

Allmikið hefur verið rætt og ritað um efnainnihald frárennslisvatnsins, svo að hér verður aðeins dregið á það helzta. Að öðru leyti vísast til ritverkaskrár.

Helztu efnin, sem máli skipta, og áhrif þeirra, eru:

Kísill veldur útfellingum á yfirborði og getur á löngum tíma stíflað niðurrennslið. Þar sem frárennslinu er fyrst veitt í lón, er auðvelt að fylgjast með vatnsborðinu og sjá þannig, hvort niðurrennsli sé eðlilegt, ef ekki er hægt að auka það með því að róta upp botninum. Kostnaður af slíkum aðgerðum yrði hverfandi.

Brennisteinsvetni hefur eitruverkanir á fiska, en í snertingu við jarðveginn breytist það í hættulaus sölt, jafnóðum og vatnið kólnar. Til að byrja með rýkur svo mikið af því út í andrúmsloftið, að það, sem eftir verður, er hættulaust hvort eð er. Mengunarhætta af því er því engin, er niður til Mývatns kemur.

Fosfat er í hóflegu magni velkominn áburður í lífríki lands og vatna. Óhófleg notkun fosfats (og annarra áburðartegunda) veldur truflun á þörungagróðri og orsakar áburðarmengun. Allt frárennslisvatn Kröfluvirkjunar inniheldur fosfat, sem að magni til er um 1200 kg/ári. Mikið af því binzt í jarðveginum rétt eins og fosfat, sem borið er á tún. Heildarmagnið er aðeins 1/20 - 1/30 af því magni, sem árlega er borið á tún umhverfis Mývatn, svo að ekki er hægt að álíta, að það valdi áburðarmegnun, nema hún sé þegar fyrir hendi.



R i t s k r á.

1. Vatnshæð Mývatns. Sigurjón Rist. Orkumál.
2. The distribution of some trace elements in thermal waters in Iceland. UN. symp. on the development and utilization of geoth. res. Piza 1970. Stefán Arnórsson. Geothermics, special issue 2,2:542-546.
3. Námafjall-Krafla. Áfangaskýrsla um rannsókn jarðhitasvæðanna. Júní 1971. Guðm. Guðmundsson, Guðmundur Pálmason, Karl Grönvold, Karl Ragnars, Kristján Samundsson og Stefán Arnórsson.
4. Jarógufuaflostöð. Frumáætlun um aflstöð með tilliti til virkjunar í námafjalli eða Kröflu. Júní 1972. Jarðhitadeild og Verkfræðistofa Guðm. og Kristjáns.
5. Uppleyst efni í heitu vatni. Stefán Arnórsson. OS-JHD 7317.
6. Jarógufuaflostöð. Frumáætlun um 8 MW, 12 MW, 16 MW og 55 MW aflstöð með tilliti til virkjunar í Námafjalli eða Kröflu. Sept. 1973. Jarðhitadeild og Verkfræðist. Guðm. og Krstjáns.
7. Theoretical and Numerical Models of Groundwater Reservoir Mechanism. Lic. techn. ritgerð við Instituttet for strömningsmekanik og Vandbygning, Tækniháskóli Danmerkur. Snorri Páll Kjaran.
8. Reservoir Mechanism Analysed by the Method of Galerkin and Orthogonal Eigenfunctions. Jónas Eliásson og Snorri Páll Kjaran. Nordic Hydrology 7, 1976, 31-42.
9. Practical Aspects of the Linear Groundwater Reservoir Models. Jónas Eliásson, Snorri Páll Kjaran. Nordic Hydrological Conference 1976.
10. Programs to Calculate Groundwater Elevation and Groundwater flow. Runólfur Ingólfsson og Snorri Páll Kjaran. Handrit til hjá Straumfræðistöð.
11. Álitsgerð um mengunarhættu vegna affallsvatns frá gufuvirkjun við Kröflu eða Hverarönd. Nóv. 1974 OS-JHD-7427/OS-ROD-7421.
12. Geothermal energy in Iceland - utilization and environmental problems. Stefán Arnórsson OS-JHD 7516.
13. Preliminary design report for Krafla geothermal power plant for Krafla project executive committee, Akureyri, Iceland. Vol. 1

Apríl 1975/ Rogers Engineering Co. and Thoroddsen and Partners,  
Ármúla 4, Rvk.

14. Rapid scaling of Silica in two district heating systems. Sverrir Þórhallsson, Karl Ragnars, Stefán Arnórsson, Hrefna Kristmannsdóttir. Second UN symp. on the developm. and use of geoth. res. San Fransisco, 1975.
15. Bréf frá Veðurstofu Íslands til Stefáns Arnórssonar, dags. 29. okt. 1975 um úrkomu á svæðinu.
16. Kröfluveitta, skýrsla um forhönnun aðveittu Kröfluvirkjunar. Unnið fyrir OS, VST. Virkir.
17. Kísill og brennisteinsvetni í affallsvatni frá gufuborholum. Stefán Arnórsson, OS-JHD 7601.
18. Vatnasvið Hlíðadalslækjar og affallsvatn frá Kröfluvirkjun. Stefán Arnórsson og Einar Gunnlaugsson, OS-JHD 7602.

## VIÐAUKI A

### LÝSING Á REIKNIAÐFERÐ

#### A.1. Stærðfræðilegt samband

Við ákvörðun grunnvatnshæðar á Kröflusvæðinu er gengið út frá, að grunnvatnshæðin lúti eftirfarandi stærðfræðilegu sambandi (diffurjöfnu) innan tilgreinds svæðis

$$\frac{\partial}{\partial x} (T(x,y) \frac{\partial h(x,y)}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (T(x,y) \frac{\partial h(x,y)}{\partial y}) + R(x,y) = 0 \quad (*)$$

Hér er  $h(x,y)$  grunnvatnshæðin í yfirborðspunktinum  $(x,y)$ ,  $R(x,y)$  innstreymið (infiltration) og  $T(x,y)$  svokallaður lektarstuðull (coefficient of transmissivity).

Í sambandinu er gert ráð fyrir, að innstreymi breytist ekki með tíma og jafnvægi ríki milli þess og grunnvatnsrennslis. Síðan er byggt á þeirri grundvallarforsendu, að stefna grunnvatnsstraums sé sú sama og stefna svokallaðs piezometrísks þrýstigradients og að straumhraðinn sé í réttu hlutfalli við stærð hans (Lögmál Darcys).

Hlutfallsstuðullinn, vatnsleiðnin (hydraulic conductivity) er konstant margfeldi af permeabilitetsstuðlinum í punktinum, ef kinematísk seigja vatnsins er ekki breytileg. Auk þess er gengið út frá þeirri einföldunarforsendu, að piezometriskur þrýstigradient á sérhverju dýpi í grunnvatnsgeymum ákvarðist af halla grunnvatnsyfirborðs, þ.e. að hydrostatísk þrýstidreifing ríki í geymnum. Slík forsenda er jafngild því að gera ráð fyrir, að lóðréttur grunnvatnsstraumur sé hverfandi miðað við láréttan. Þá verður heildargrunnvatnsrennslí í gegnum lóðrétt snið í grunnvatnsgeymnum margfeldi af grunnvatnshæðargradient í tilsvareandi yfirborðspunkti og stuðli, sem er aftur margfeldi af þykkt geymisins undir þeim punkti og meðalvatnsleiðni. Sá stuðull er ofangreindur lektarstuðull,  $T$ . Loks er gert ráð fyrir því í sambandinu (\*), að vatnsleiðni sé ekki stefnubundin í láréttu plani.

Sambandið (\*) ákvarðar grunnvatnshæðina einkvæmt í sérhverjum yfirborðspunkti á hinu tilgreinda svæði, ef lektarstuðull og innstreymi er

tilgreint fyrir sérhvern punkt innan svæðisins og auk þess annaðhvort grunnvatnshæð eða heildarrennsli í gegnum lóðrétt snið fyrir sérhvern yfirborðspunkt á jaðri svæðisins. Ef jaðar svæðis fellur saman við grunnvatnsskil eða straumlínu, getum við þannig tilgreint, að innrennsli grunnvatns fyrir slíkan jaðarpunkt er núll, og ef jaðar fellur saman við stöðuvatn, getum við tilgreint vatnshæðina sem grunnvatnshæð. Innstreymi jafngildir yfirleitt úrkomu í punktum, nema þar sem t.d. vatn rennur burt sem yfirborðslakur, affallsvatn rennur niður eða vatn kemur upp úr holu. Auk þess getur snjóköma valdið töf í innstreymi, þó ekki sé tekið tillit til slíkra áhrifa hér, þar sem gert er ráð fyrir, að innstreymi sé óháð tíma. Til þess að ákvarða lektarstuðul þyrfti samkvæmt framansögðu að þekkja bæði þykkt grunnvatnsgeymis og meðalpermealitet undir sérhverjum yfirborðspunkti, en hjá þessu má þó oft, með sneiða óbeinni ákvörðun, eins og nánar er vikið að í A.3.

Eftir að grunnvatnshæð hefur verið ákvörðuð, má draga upp grunnvatnsstraumlínu hornrétt á jafnhæðarlínu. Út frá lektarstuðli og grunnvatnshæðargradient má ákvarða heildarrennsli í gegnum lóðrétt snið. Með því að deila upp í þetta rennsli með þykkt grunnvatnsgeymis má ákvarða meðal effektivan straumhraða og með því að deila upp í þann hraða með effektivri holrýmd (porosity) má ákvarða meðalgildi fyrir raunverulegan hraða, sem er þá í öfugu hlutfalli við margfeldi geymsþykkta og holrýmdar. Þannig má meta fyrst út frá straumlinum, hvaða leið innstreymisvatn, t.d. affallsvatn, fer frá tilteknum punkti og síðan út frá hraða, hversu lengi það er að fara ákveðna leið. Þó ber að hafa í huga, að vatnið mundi dreifast út frá tiltekinni straumlinustefnu vegna dispersjónar og diffusjónar, en slík áhrif verða ekki metin með hjálp (\*).

Um nánari útleiðslu á sambandinu (x) og skilgreiningar á vatnafræðilegum hugtökum vísast til lic.techn. ritgerðar eftir Snorra Pál Kjaran, verkfræðing. Hér skal aðeins lögð áherzla á það, að vegna forsendunnar um að lóðrétt vatnsrennsli sé hverfandi, miðað við lárétt, er aldrei hægt að gera sér vonir um, að sambandið ákvarði nákvæmt gildi fyrir h í yfirborðspunktum, þar sem við höfum mikið staðbundið innstreymi, t.d. niðurrennsli affallsvatns, en áhrif slíks innstreymis á grunnvatnshæð

geta engu að síður ákvarðast vel fjarri slíkum punkti. Forsendan um stefnu óháða vatnsleiðni í láréttu plani getur leitt til ónákvæmra gilda fyrir h, þar sem lóðréttar sprungur beina grunnvatnsstraumnum í ákveðna stefnu.

## A.2 Nálgunaraðferð

Þótt stærðfræðilega sambandið (X) ákvarði h einkvæmt, getum við í reynd ekki fundið út frá því töluleg gildi fyrir h (leyst diffurjöfnuna), nema fyrir mjög reglubundin svæði. Við ákvörðun á h beitum við því nálgunaraðferð, sem byggist á því að búa svæðið niður í þríhyrnings-svæði (búta "finite elements") og gera ráð fyrir, að h breytist línulega (grunnvatnsyfirborðið sé skáplan) í hverjum þríhyrningi. Þá nægir að ákvarða h í hornpunktum þríhyrninganna innan svæðisins, svo og þeim hornpunktum á jaðri, þar sem rennsli hefur verið tilgreint í stað hæðar. Þá ákvörðun má síðan einfalda frekar, ef við gerum ráð fyrir, að tilgreindir lektarstuðlar séu konstant innan hvers þríhyrnings og innstreymið breytist línulega í hverjum þríhyrningi. Til viðbótar má gera ráð fyrir svokölluðu punktinnstreymi í tilteknum hornpunktum.

Meginreiknivinnan við ákvörðun grunnvatnshæðar felst nú í að leysa saman línulegar líkingar, sem verða jafn margar og þeir hornpunktar, sem ákvarða skal h fyrir. Við leitumst þá við að hafa þríhyrningana sem stærsta, án þess að valda of mikilli skekkju með nálguninni, að h og R breytist línulega og T sé konstant innan hvers þríhyrnings. Jafnframt er tekið mið af því, hversu ítarleg þau gögn um þessi gildi eru, sem lögð eru til grundvallar reikningunum. Merkja verður hornpunkta í vaxandi töluröð. Það skiptir loks máli til þess að draga úr reiknivinnu að haga megi merkingunni þannig, að mesti mismunur á tölugildum samliggjandi punkta verði sem minnstur.

Snorri Páll Kjaran hefur hannað forrit, sem setur sjálfkrafa upp hinar línulegu líkingar, samkvæmt aðferð, sem kennd er við Galerkin ef lesnar eru inn fyrir hvern hornpunkt eftirfarandi upplýsingar: einkennisnúmer punkts og aðliggjandi punkta, x- og y-hnit, gildi punkt- og samfellds innstreymis og lektarstuðla í aðliggjandi

þríhyrningum. Auk þess verður að lesa inn upplýsingar um grunnvatnshæð eða -rennsli í jaðarpunktum. Í forritinu eru síðan leystar saman þessar líkingar og prentuð út grunnvatnshæð í hornpunktum. Nánari lýsingu á forriti Snorra Páls verður að finna í skýrslu sem Runólfur Ingólfsson, verkfræðingur hefur skrifað, en nánari greinargerð fyrir forsendum forritsins í llc.techn. ritgerð Snorra Páls.

### A.3 Notkun

Þegar við þekkjum grunnvatnshæð í punktum innan hins tilgreinda lokaða svæðis eða í jaðarpunktum, þar sem við tilgreinum grunnvatnarennsli, má nota ofangreint forrit óbeint til þess að meta lektarstuðla innan þríhyrningssvæða. Við byrjum þá með ákveðna upphafságiskun á lektarstuðlum, ákvörðum grunnvatnshæð út frá þeim með forritinu, þerum reiknaða grunnvatnshæð saman við þekkta hæð í tilteknum punktum, reynum síðan út frá frávikum milli þekktra og reiknaða gilda að endurbæta lektarstuðulgildin á einhvern kerfisbundinn hátt, notum forritið aftur til þess að reikna út nýja grunnvatnshæð o.s.frv. þar til viðunandi samræmi fæst milli þekktra og reiknaðra gilda. Sömu leiðis má bera saman þekkt og reiknað heildarrennsli gegnum þríhyrningsrendur milli jaðarpunkta, þar sem grunnvatshæð hefur verið tilgreind (sbr. samband (\* \*) hér á eftir)

Á Kröflusvæðinu liggur beint við að nota fyrst þekktar upplýsingar um grunnvatnshæð nú til þess að meta lektarstuðla með því að nota forritið óbeint, og nota síðan þessi metnu stuðla til þess að ákvarða grunnvatnshæðina eins og hún verður með tilkomu affallsvatns og borhola, sem túlka má sem viðbótar punktinnstreymi í punktum, þar sem vatnið fer mör og negatívt innstreymi (útstreymi) í holupunktum. Þar eð grunnvatnshæðin er aðeins þekkt í fáum punktum, er ekki hægt að ákvarða lektarstuðlana einkvæmt á þennan hátt, heldur verða að koma til viðbótarforsendur út frá jarðfræði svæðisins, t.d. um það, hvaða þríhyrningssvæði megi ætla, að hafi sömu lektarstuðla.

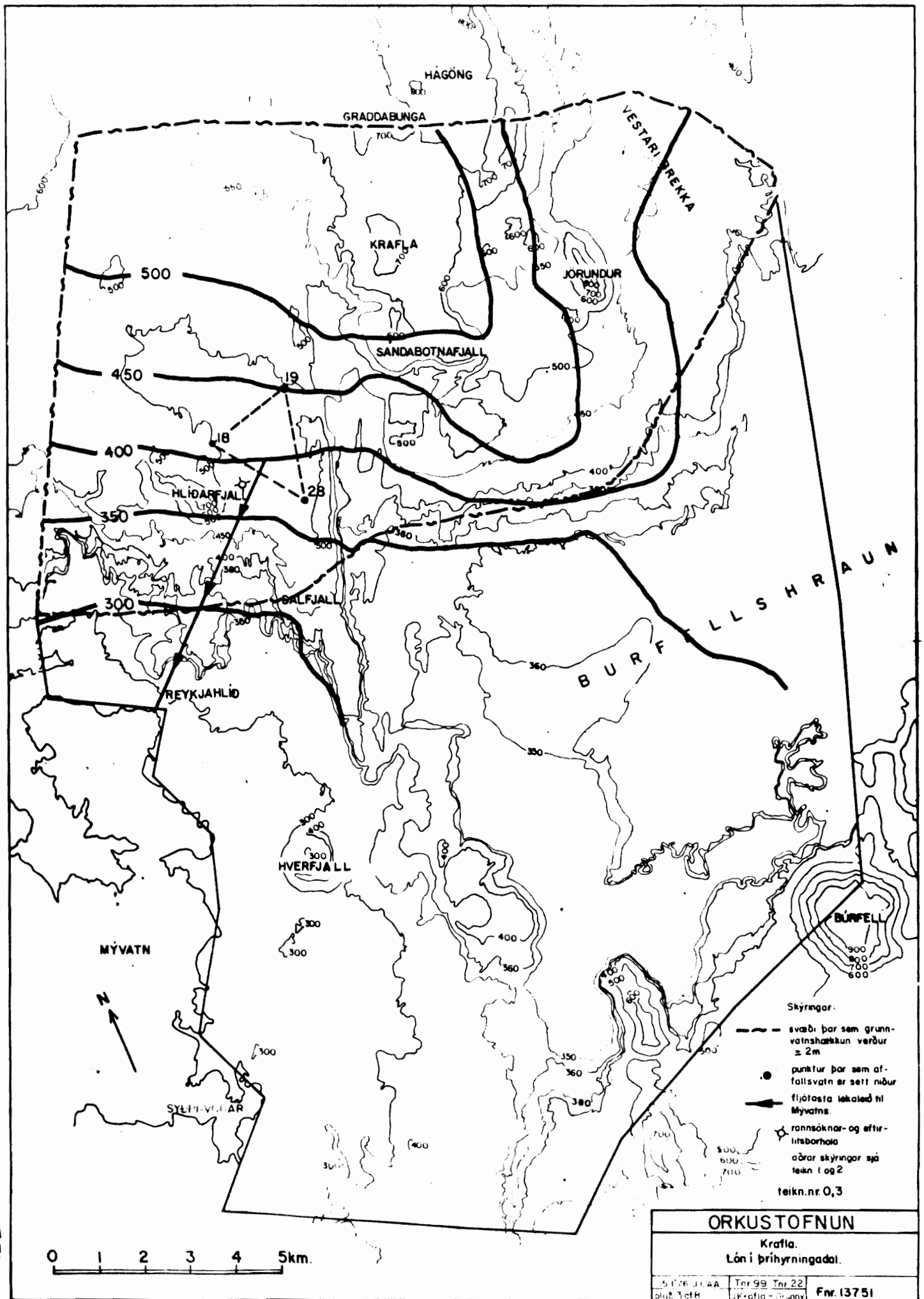
Varðandi síðari hluta reikninganna er rétt að benda á eftirfarandi:

1) Hið gefna samband milli grunnvatnshæðar og innstreymis er línulegt. Þetta þýðir, ef við reiknum út að viðbótar innstreymi

í punkti  $i$  leiði til grunnvatnshækkunar  $h_i$  í punkti  $k$  og viðbótarinnstreymi  $r_j$  í punkti  $j$  leiði til grunnvatnshækkunar  $h_j$  í punkti  $k$ , að þá má álykta að grunnvatnshækkunin verði  $\alpha h_i + \beta h_j$  ef við höfum viðbótarinnstreymi  $\alpha r_i$  í punkti  $i$  og samtímis viðbótarinnstreymi  $\beta r_j$  í punkti  $j$ . Til þess að ákvarða áhrifin af öllum hugsanlegum kombinásjónum af viðbótar innstreymi (og útstreymi) í  $N$  málamanandi punktum, nægir því að framkvæma  $N$  reikninga með forritinu og ákvarða þá í hvert skipti áhrifin af gefnu viðbótarinnstreymi í einum hinna  $N$  punkta.

2) Nálgunaraðferðin, sem forritið byggist á, felur það í sér að það hefur nákvæmlega sömu áhrif að tilgreina, að samfelld innstreymi hafi gefið gildi í ákveðnum punkti og sé núll í öllum öðrum punktum, eins og að tilgreina að 2/3 þessa gildis sé punktinnstreymi í hinum gefna punkti og dreifa síðan hinum 1/3 innstreymisins, sem punktinnstreymi á aðliggjandi punkta. Túlkun niðurrennslis affallsvatns sem samfellds innstreymis í stað punktinnstreymis mundi því einfaldlega svara til þess, að við dreifðum sama innstreymi á fleiri punkta. Í einu tilviki þegar hvoru tveggja var reynt varð t.d. grunnvatnshækkun við að tilgreina affallsvatnsniðurrennslið sem samfelld innstreymi 60-95% af þeirri hækkun sem varð, þegar niðurrennslið var tilgreint sem punktinnstreymi.

3) Ekki er raunhæft að líta á allt vatn, sem kemur úr borholu, sem útstreymi í þeim punkti, þegar meginhluti vatnsins kemur úr æðum, sem eru á miklu dýpi. Ætla má að hluti slíkra <sup>æða</sup> sé tiltölulega óháður efsta grunnvatnsgeymnum og, þar sem samband sé á milli, sé vatnsleiðni í lárétta stefnu miklum mun meiri en leiðnin í lóðrétta stefnu. Það hefur aftur í för með sér, að ekki kemst á jafnvægi milli svörunar yfirborðsgrunnvatnshæðar við vatnsstreymi út um holuna fyrr en löngu eftir að jafnvægi hefur komist á milli svörunar grunnvatnshæðar og niðurrennslis affallsvatns. Þá hlýtur áhrifasvæðið vegna vatnstapsins á grunnvatnsyfirborðinu að verða mun víðáttumeira en það hefði orðið, ef sama vatnsmagn hefði verið tekið ofar úr grunnvatnsgeymnum. Nákvæmt mat á þessum þáttum fengist ekki nema með þrívíðum reikningum, þar sem tekið væri tillit til



- Skýringar.
- svæði þar sem grunnvatnshættikun verður  $\geq 2m$
  - punktur þar sem af-fallsvatn er sett niður
  - ➔ fljótasta lokalet til Mývatns.
  - ☆ rannsóknar- og eftirlitsborhala
  - aðrar skýringar sjá teikn 1 og 2
- teikn.nr.0,3

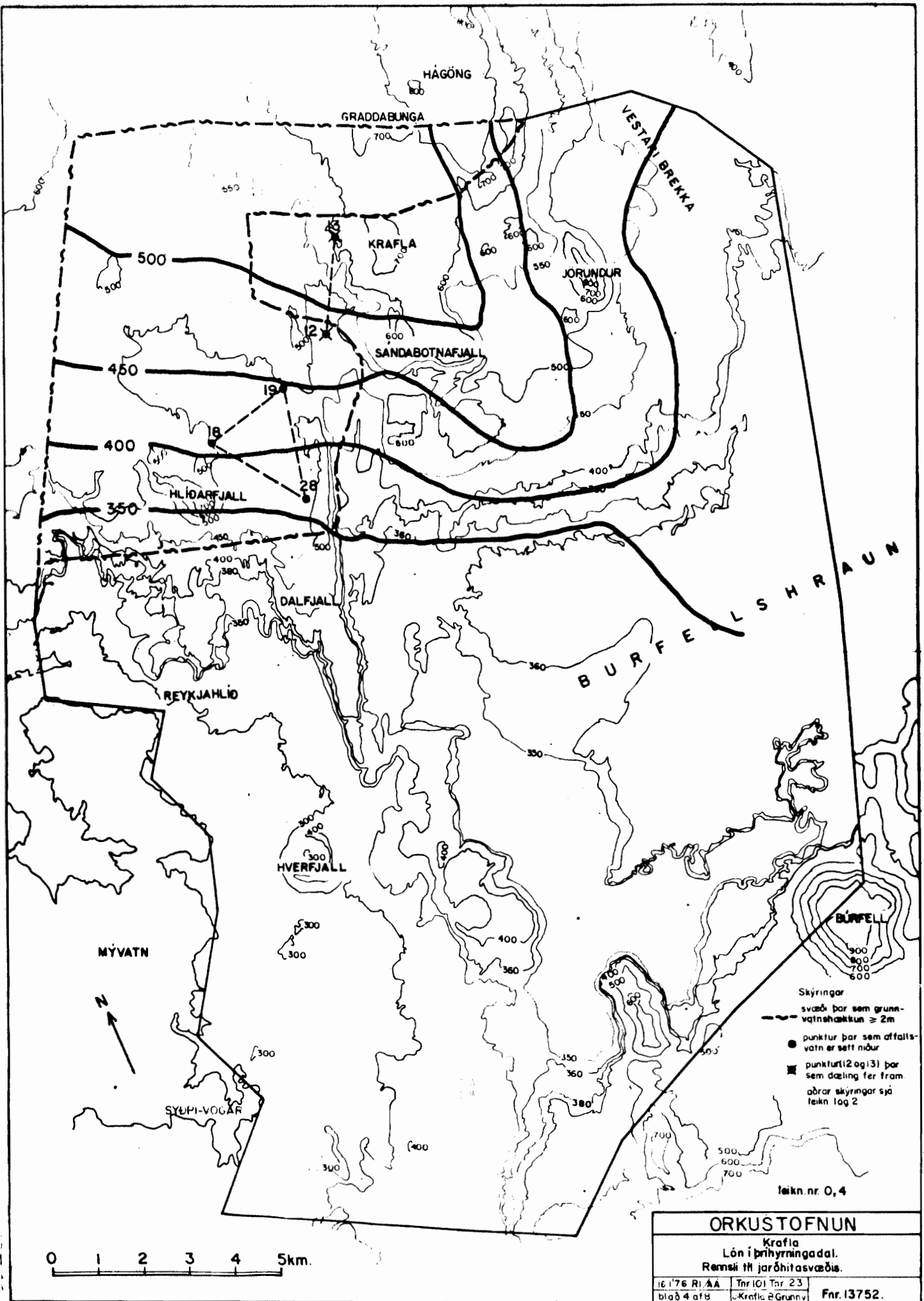
**ORKUSTOFNUN**

Krafla.  
Lón í Þríhyrningadal.

5176 J14A	Tr. 99	Tr. 22	Fr. 13751
bl. 3 af 8	Krafla	grunnv.	

13751





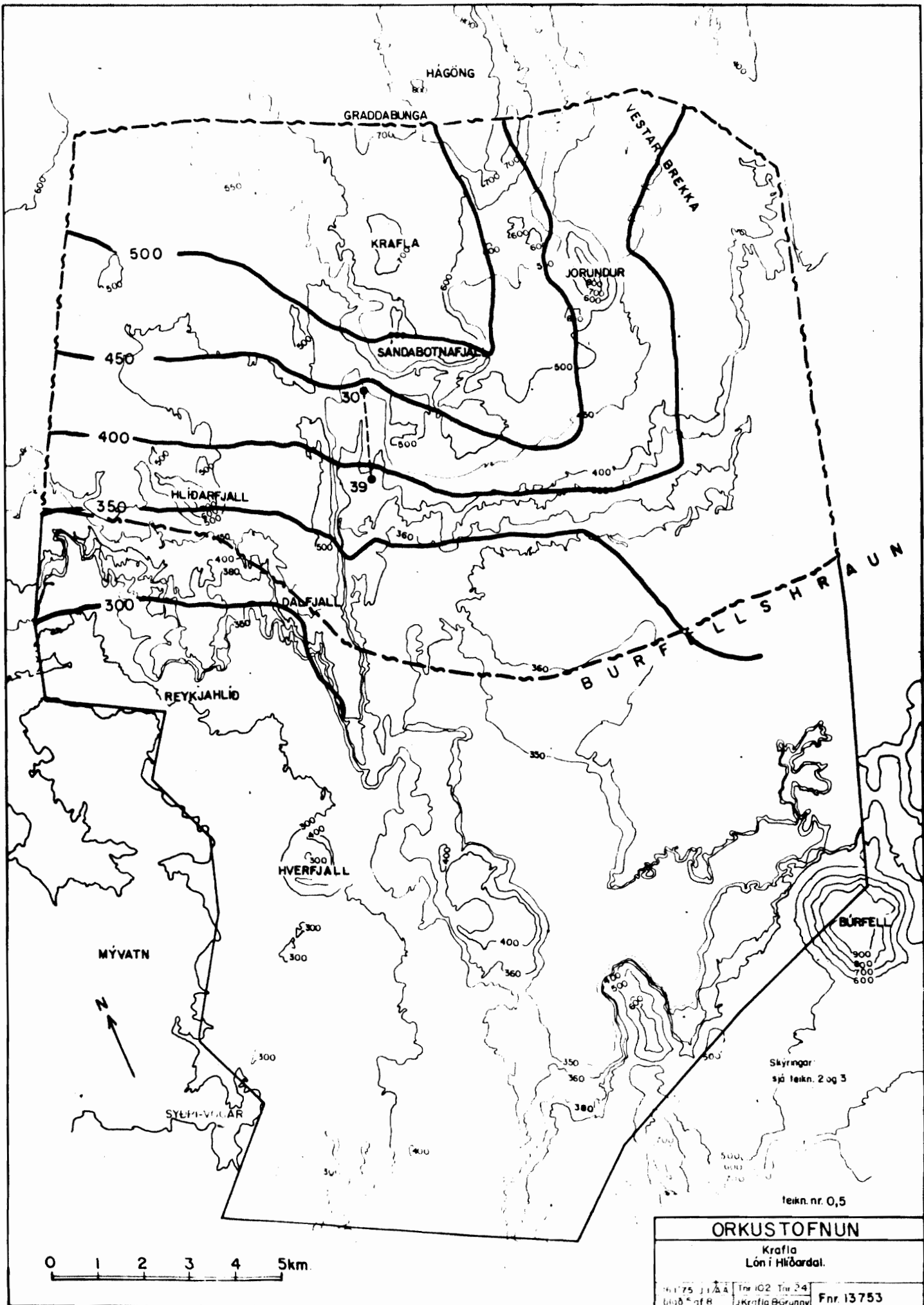
- Skýringar
- svæði þar sem grunnvatnshækkun  $\geq 2m$
  - punktur þar sem affallsvatn er sett niður
  - punktur (2 og 3) þar sem dæling fer fram
  - abrar skýringar sjá teikn. nr. 0, 4

**ORKUSTOFNUN**

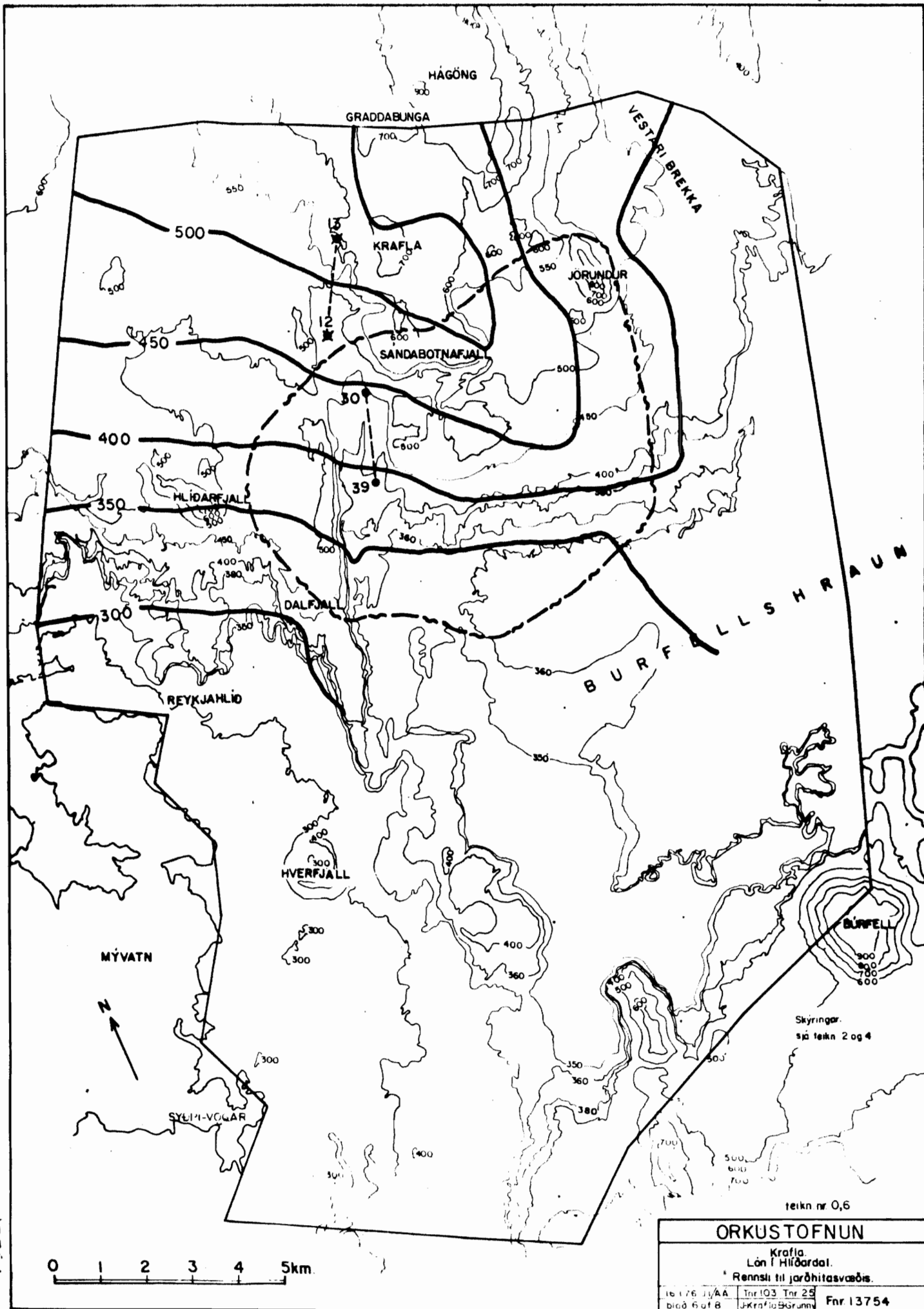
Krafla  
Lón í þrihyrningadal.  
Rensli til jarðhitasvæðis.

1:76 R. AA	Þr 101 Þr 23
blað 4 af 8	Krafla 2 Grunnv.

Fnr. 13752.

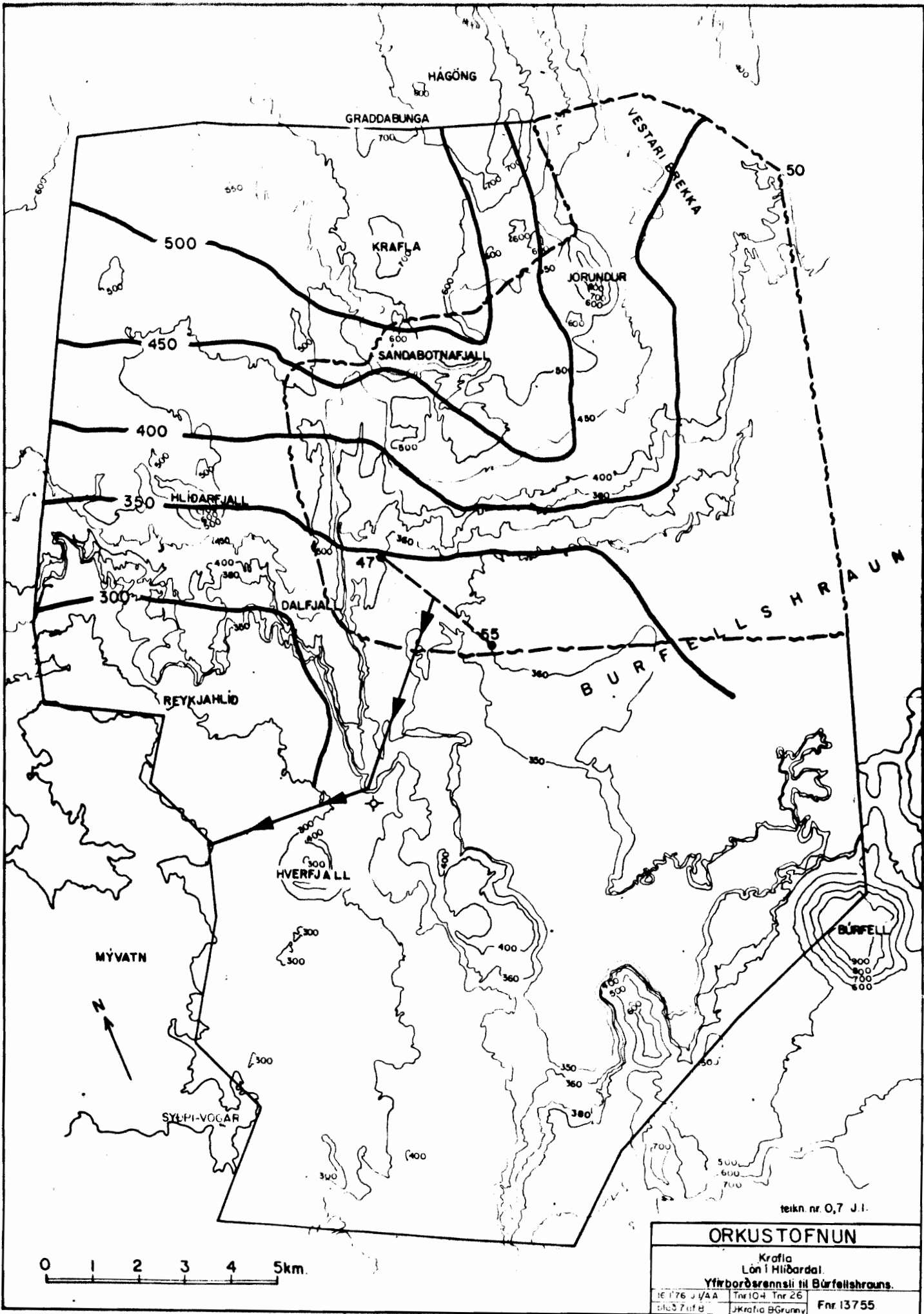


<b>ORKUSTOFNUN</b>	
Krafla Lón í Hlíðardal.	
1:75 11.11.75	Til 102 Tr 24
Útgef. 5.11.75	Krafla Bógrunn
<b>Fnr. 13753</b>	



13754

<b>ORKUSTOFNUN</b>	
Krafla. Lón í Hlíðardal. Rennsi til jarðhitasvæðis.	
1:6 1/6 1/AA	Tar 103 Tar 28
blöð 6 af 8	JKrafla 9 Grunnv.
Fnr 13754	



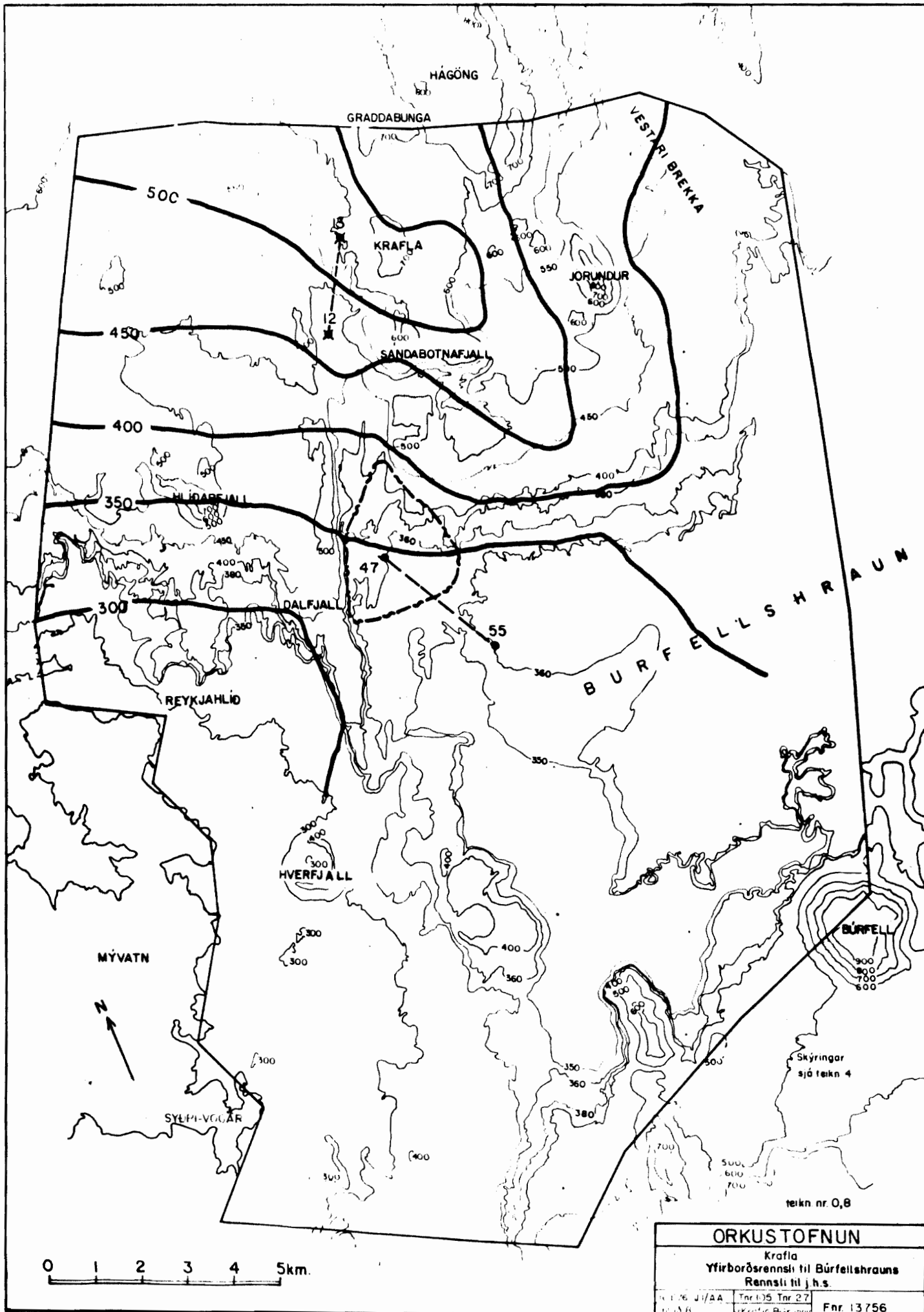
tekn. nr. 0,7 J.I.

**ORKUSTOFNUN**

Krafla  
Lón í Hlíðardal  
Yfirborðsrennsli til Búrfellshrauns.

16 176 J/AA	Tnr 104	Tnr 26
bls 7. af 8	JKrafla BGrunnv.	Fnr 13755

13755



<b>ORKUSTOFNUN</b>	
Krafla Yfirborðsrennsli til Búrfellsbrauns Rennsli til j.h.s.	
1:26 JI/AA	Tár 1:25 Tár 2:7
1:15 B	Krafla B-straumi
Fnr. 13756	

13756