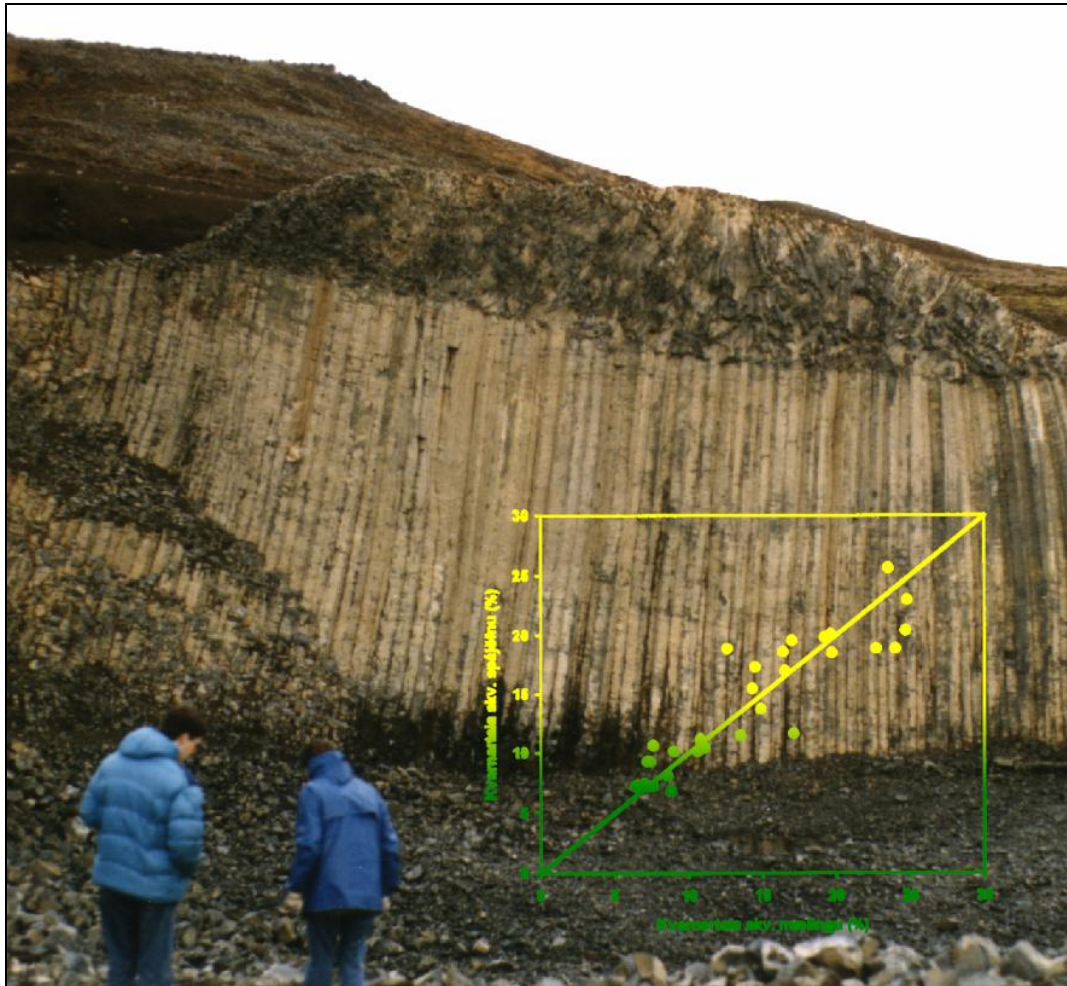




L Í N U H Ö N N U N  
V E R K F R Æ Ð I S T O F A

## BERGGERÐ OG TÆKNILEGIR EIGINLEIKAR STEINEFNA



RANNSÓKNARVERKEFNI UNNIÐ Í SAMSTARFI VIÐ  
RANNSÓKNASTOFNUN BYGGINGARIÐNAÐARINS

STYRKT AF  
MENNINGAR - OG FRAMFARASJÓÐI LUDVIGS STORR  
OG VEGAGERÐINNI

REYKJAVÍK 1996



**LÍNUHÖNNUN HF**

**BERGGERÐ OG TÆKNILEGIR  
EIGINLEIKAR STEINEFNA**

**ÞORGEIR S. HELGASON  
OG  
JÓN HAUKUR STEINGRÍMSSON**

**RANNSÓKNARVERKEFNI UNNIÐ Í SAMSTARFI VIÐ  
RANNSÓKNASTOFNUN BYGGINGARIÐNAÐARINS**

**STYRKT AF  
MENNINGAR - OG FRAMFARASJÓÐI LUDVIGS STORR  
OG VEGAGERÐINNI**

**REYKJAVÍK 1996**



## ÁGRIP

Í skýrslunni eru birtar niðurstöður rannsóknarverkefnis, sem unnið hefur verið að, með hléum á undanförunum árum hjá verkfræðistofunni Línuhönnun hf.. Með styrk úr Menningar- og framfarasjóði Ludvigs Storr, sem veittur var 1994 gafst tækifæri til að ljúka verkefninu. Aðal samstarfsaðili Línuhönnunar var Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins, og auk Menningar- og framfarasjóðsins hefur Vegagerðin lagt fé til verkefnisins.

Segja má að tilgangurinn með verkefninu hafi verið að "sannprófa" eftirfarandi tilgátu: Hægt er að áætla með viðunandi árangri tæknilega eiginleika jarðefna og steinefna ef berggerð (bergsamsetning) þeirra er þekkt. Með jarðefni er átt við efni í náttúrunni og lítt unnin efni úr setlögum eða föstu bergi, en með steinefni er átt við efni sem unnið er úr jarðefni t.d. með mölun og hörpun.

Berggerð er einn af þremur grunneiginleikum lausra eða óbundinna jarð- og steinefna. Hérlendis er notuð prófunaraðferð við greiningu þessa eiginleika sem þróuð var á Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins, og heitir prófunaraðferðin berggreiningarkerfi Rb, og er henni lýst lauslega í skýrslunni.

Gögnin, sem unnið var með í rannsókninni eru annars vegar niðurstöður mælinga á háðum eiginleikum, þ.e.a.s. tæknilegum eiginleikum eins og t.d. einása þrýstistyrk og frost-þíðu niðurbroti, og hins vegar niðurstöður, á sömu eða sambærilegum sýnum, á óháðum grunneiginleika, berggerð. Gögn fengust úr prófritgerðum og hjá Malbikunarstöð Reykjavíkurborgar, Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins, Steinefnanefnd og Vegagerðinni, en aðeins örfáar nýjar mælingar voru gerðar. Eiginleikumum, sem teknir eru til athugunar er lýst í 2. kafla.

Niðurstöður verkefnisins eru birtar sem tafla í 3. kafla, sem sýnir tæknilega eiginleika nokkurra íslenskra berggerða. Þessa töflu má m.a. nota þegar greindir eru eiginleikar hreinna berggerða, en vegna takmarkaðra gagna eru eyður í henni, og oft eru aðeins ein eða tvær mælingar lagðar til grundvallar uppgefna gildi.

Til að áætla eiginleika blandaðra efna, sem eru samsett úr ýmsum berggerðum, eru birtar reiknijöfnur eða spájöfnur í 4. kafla. Þær sýna reynslusamband á milli berggerða og eiginleika, sem fengið er með fjölbreytu-aðhvarfsgreiningu, og eru niðurstöðurnar mjög marktækar, en skýringarhlutfallið er misjafnlega gott. Spájöfnurnar fyrir Dorry-slittölu og kvarntölu eru þökkalega gagnlegar, en jafna fyrir frost-þíðu niðurbrot er gagnslítill.

Meginniðurstaða verkefnisins er sú að ekki er hægt að hafna áðurnefndri tilgátu um forspárgildi mælinga á berggerðum í steinefnum. Með öðrum orðum þá virðist þær aðferðir sem hér eru kynntar vera vænleg leið til að meta ýmsa eiginleika jarð- og steinefna með einni prófunaraðferð, berggreiningu. Til að gera fullnægjandi spájöfnur, og fullkláraða töflu um eiginleika hreinna berggerða, þarf miklu stærri rannsókn, mun meiri gögn og beita þarf nýjum og endurbættum tölfræðiaðferðum.

## FORMÁLI

Upphaf rannsóknarinnar sem kynnt er í skýrslunni má rekja til rannsóknarverkefnis á Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins (Rb). Undirritaður, sem starfaði þar frá 1978-1990, skilgreindi verkefni, sem hét Gæðaflokkun fylliefna í steinsteypu, í janúar 1987. Að tillögu Hákonar Ólafssonar forstjóra var ákveðið að útvíkka verkefnið og sækja um styrk frá Rannsóknaráði ríkisins (Steypuefni og innri gerð steinsteypu, mars 1987), sem fékkst um sumarið 1987. Auk Rannsóknaráðs greiddi Steinsteypunefnd og Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins kostnað við verkefnið.

Unnið var að verkefninu næstu árin, og var þá lögð einna mest áhersla á að byggja upp aðstöðu á Rb til rannsókna á innri gerð steinsteypu (þunnsneiðagerð, smásjárskoðun) og ráðinn aðstoðarmaður og sérfræðingur til að sinna þeim þætti. Hefur verið unnið áfram að þróun og rannsóknum á þessu sviði á Rb. Einnig var unnið að rannsókn á kornalögun steinefna í steinsteypu. Um niðurstöður þessara verkþátta má lesa í skýrslum [Þorgeir S. Helgason og Auður Andrésdóttir 1989], [Auður Andrésdóttir 1990], [Edda Lilja Sveinsdóttir 1991], og [Jón Eiríksson, Einar Einarsson og Aðalheiður Ásmundsdóttir 1992], og verður ekki fjallað frekar um þennan verkhluta hér.

Markmið steypu- eða steinefnabætti verkefnisins, sem núverandi verkefni er framhald af, var orðað þannig: „..Að geta, í vaxandi mæli, ákvarðað gæði fylliefnis í steinsteypu með berggreiningu einni saman.“ Að þessum verkhluta var unnið með hléum frá 1987, og samdar áfangaskýrslur til Rannsóknaráðs um framvindu verkefnisins og tvær ráðstefnugreinar, sjá [Þorgeir S. Helgason og Hildur Jóna Gunnarsdóttir 1990] og [Þorgeir S. Helgason 1990]. Vinnan lagðist að mestu niður haustið 1990 þegar undirritaður réðist til starfa hjá Línuhönnun hf., en þó var gerð tilraun til að klára það og var samið ófullgert handrit að skýrslu sem hefur gengið manna á meðal [Þorgeir S. Helgason og Þorsteinn Jóhannsson, 1992].

Eftirtaldir sérfræðingar unnu að steinefnahluta verkefnisins með undirrituðum á tímabilinu 1987-1992: Ásbjörn Jóhannesson verkfræðingur á Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins, Hildur Jóna Gunnarsdóttir mannvirkjajarðfræðingur, þá á Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins, og Þorsteinn Jóhannsson jarðfræðingur á Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins og síðar á Rannsóknastofnun landbúnaðarins.

Í inngangi hér á eftir er rakið hvernig núverandi verkefni varð síðan til, en því var ætlað að reka endahnúttinn á þá vinnu sem hófst með verkefninu Steypuefni og innri gerð steinsteypu árið 1987.

Reykjavík, í maí 1996  
Þorgeir S. Helgason

## EFNISYFIRLIT

ÁGRIP	i
FORMÁLI	ii
EFNISYFIRLIT	iii
SKRÁ UM MYNDIR	v
SKRÁ UM TÖFLUR	vi
1. INNGANGUR	1
1.1 Almennt	1
1.2 Áraun og eiginleiki	1
1.3 Tengsl berggerðar og efniseiginleika	2
1.4 Berggreining	3
1.5 Niðurstaða	4
2. EIGINLEIKAR OG PRÓFUNARAÐFERÐIR	7
2.1 Almennt	7
2.2 Einása þrýstistyrkur	8
2.3 Punktálagsgildi og einása þrýstistyrkur skv. punktálagsgildi	8
2.4 Einása kleyfnitogstyrkur	9
2.5 Fjaðurstuðull og poissionshlutfall	10
2.6 Rúmþyngd, holrýmd og fleira	11
2.7 Schmidt-hörkutala	12
2.8 Vatnspenslutala	13
2.9 Dorry-slittala	13
2.10 Kvarnartala	13
2.11 Frost-þíðu niðurbrot	14
2.12 Alkalívirkni skv. hraðprófi	14
3. TAFLA UM TÆKNILEGA EIGINLEIKA BERGGERÐA	15
3.1 Almennt	15
3.2 Skýringar við eiginleikatöflu	15
3.3 Niðurstaða um eiginleika berggerða	16
4. SPÁJÖFNUR	21
4.1 Almennt	21
4.2 Fjölbreytu-aðhvarfsgreining	21
4.3 Berggerðir í aðhvarfsgreiningunni	22
4.4 Spájafna fyrir Dorry-slittölu	23
4.5 Spájafna fyrir kvarnartölu	25
4.6 Spájafna fyrir frost-þíðu niðurbrot	26
4.7 Niðurstaða og dæmi um notkun spájafnanna	28

5. MEGINNIÐURSTÖÐUR OG UMRÆÐUR	30
6. LOKAORÐ	32
HEIMILDIR	35
ENGLISH SUMMARY	39



## SKRÁ UM MYNDIR

Mynd 1	Berggreiningarkerfi Rannsóknastofnunar byggingariðnaðarins	5
Mynd 2	Samband einása þrýstistyrks og punktalagsgildis	9
Mynd 3	Samband einása þrýstistyrks og Schmidt-hörkutölu	11
Mynd 4	Dorry-slittala, $S_D$ - samband mældra og spáðra gilda	24
Mynd 5	Kvarnartala, $S_k$ - samband mældra og spáðra gilda	25
Mynd 6	Frost-þíðu niðurbrot, $F_S$ - samband mældra gilda og spáðra gilda	26

## SKRÁ UM TÖFLUR

Tafla 3.1	Tafla um tæknilega eiginleika berggerða	
	3.1.1 Styrkur og aðrir eiginleikar	16
	3.1.2 Rúmþyngd og aðrir eiginleikar	17
	3.1.3 Punktálagsgildi og aðrir eiginleikar	18
	3.1.4 Kornarúmþyngd og aðrir eiginleikar	19
Tafla 4.1	Berggerðir í aðhvarfsgreiningu	22

# 1. INNGANGUR

## 1.1 Almenn

Eins og fram kemur í formála má rekja upphaf rannsóknarinnar sem fjallað er um í skýrslunni, til verkefnis á Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins, sem unnið var að með hléum 1987-1990 og í litlum mæli 1990-1992. Rannsóknarverkefnið sem skýrslan fjallar um hófst hins vegar 1994, eins og nú skal rakið.

Haustið 1993 leitaði Menningar- og framfarasjóður Ludvigs Storr, við Háskóla Íslands, að verkefnum á starfssviðum sjóðsins til að styrkja. Línuhönnun lagði fram nokkrar hugmyndir, og var formlega sótt um í október 1993. Í janúar 1994 var tilkynnt að sjóðurinn hefði ákveðið að styrkja verkefnið "Tæknilegir eiginleikar íslenskra berggerða" (ábyrgðarmaður Þorgeir S. Helgason jarðfræðingur). Unnið var að verkefninu um vorið 1994 af Agli Þorsteins verkfræðingi og Þorgeiri, en í nóvember 1994 var Jón Haukur Steingrímsson jarðfræðingur ráðinn til að sinna því með Þorgeiri. Var unnið að verkefninu fram yfir áramót 1995, og aftur í árslok 1995 og fyrri hluta árs 1996.

Segja má að tilgangurinn með verkefninu hafi verið að "sannprófa" eftirfarandi tilgátu: Hægt er að áætla með viðunandi árangri tæknilega eiginleika jarðefna og steinefna ef berggerð (bergsamsetning) þeirra er þekkt. Með jarðefni er átt við efni í náttúrunni og lítt unnin efni úr setlögum eða föstu bergi, en með steinefni er átt við efni sem unnið er úr jarðefni t.d. með mólun og hörpun. Í umsókn til Menningar- og framfarasjóðsins var lýsing verkefnisins orðuð þannig:

"Markmið rannsóknarverkefnisins er að kanna tæknilega eiginleika íslenskra berggerða, en þær eru flokkaðar samkvæmt berggreiningarkerfi Rannsóknastofnunar byggingariðnaðarins. Sem dæmi um mismunandi berggerðir má nefna þessar: Ferskt, þétt basalt; ferskt, blöðrótt basalt; ummyndað, þétt basalt og ferskt, þétt líparít. Sem dæmi um þá eiginleika sem til rannsóknar eru má nefna brotþol, kornarúmþyngd og slitþol. Notaðar verða eldri rannsóknarniðurstöður, og gerðar nýjar mælingar. Fundið verður mæligildi sem best á við um hverja berggerð fyrir sig, og verða niðurstöðurnar settar fram í töflu.

Steypu- eða gatnagerðarefni, svo dæmi séu tekin, eru hins vegar oftast blöndur af mismunandi berggerðum, og þá er æskilegt að geta áætlað eða spáð fyrir um eiginleika blöndunnar. Þetta samband berggerða og eiginleika í bergblöndu er með ýmsu móti, og verður það fundið með tölfræðilegum aðferðum. Niðurstöðurnar verða birtar sem spájöfnur."

Fyrstu niðurstöður verkefnisins voru kynntar á ráðstefnu norrænna steinefna-sérfræðinga í Osló í nóvember 1994 [Þorgeir S. Helgason 1994].

## 1.2 Áraun og eiginleiki

Meginefni verkefnisins er samband berggerðar og eiginleika. Þó er nauðsynlegt að ræða lauslega um samband eiginleika og áraunar, en Steinefnanefnd, sem starfaði í áratug á vegum Malbikunarstöðvar Reykjavíkurborgar, Rannsóknastofnunar byggingariðnaðarins og Vegagerðarinnar, fjallaði allnokkuð um það í sínum skýrslum [Steinefnanefnd 1994a].

Álagið frá umhverfinu reynir á einn eða fleiri eiginleika efnisins, og því þarf að þekkja eða mæla þessa eiginleika steinefnanna til að geta sagt til um hvernig þau bregðast við áraun. Þegar best lætur endurspeglar einn mældur eiginleiki á fullnægjandi hátt áraunina, en í mörgum tilvikum er áraunin margþætt. Dæmi af fyrri taginu er afláraun eða þrýstingur á malarkorn í slitlagi vegar, þ.e.a.s. áhugi er á að kanna þessa áraun eingöngu, þá getur mæling á brotþoli (t.d. með einása þrýstiprófi eða punktalagsprófi) lýst á viðunandi hátt hættunni á broti í malarkornunum. Dæmi af seinna taginu gæti verið þegar áhugi er á að kanna samanlagða áraun á slitlagið við vetraraðstæður þar sem saltað er að vetri; þar er áraunin af aflrænum toga, auk rakaálags, varmaálags og efnaálags a.m.k.; þar þyrfti fullnægjandi lýsing að fela í sér mælingu á styrk, núningsþoli, rúmmálshegðun vegna rakabreytinga, rúmmálshegðun vegna varmaabreytinga, þoli gegn frostþenslu og efnaþoli a.m.k. (Hérlendis hefur verið leitast við að meta þessa áraun með a.m.k. tvenns slags aðskildum prófum, annars vegar svokölluðum slitþolsprófum og hins vegar frostþolsprófum).

### 1.3 Tengsl berggerðar og efniseiginleika

Efniseiginleikar ráðast af grunneiginleikum efnisins. Í efnisfræðinni hefur þetta verið orðað þannig, í lauslegri þýðingu: "Í faginu efnisfræði er reynt að útskýra samhengið á milli efniseiginleika og uppbyggingar, samsetningar og gerðar einstakra efna og efnahópa." [Markestad, Asbjörn og Magne Maage 1975]. Í setbergi eru fimm grunneiginleikar sem stjórna öllum öðrum eiginleikum (E) þess, segir Griffiths [Griffiths, John C. 1967]. Þessu samhengi má lýsa þannig:

$$E = f(b, s, l, le, p) \quad (1.1)$$

Grunneiginleikarnir eru:

b, berggerð  
s, kornastærð  
l, kornalögun

og staðsetning korna í rúminu, sem skipt hefur verið í tvo þætti:

le, legu og  
p, pökkun.

Griffiths fullyrðir einnig að þessir fimm grunneiginleikar séu fullnægjandi til að einkenna setbergið og greining þeirra sé nauðsynleg og nægjanleg forsenda til að finna sérhvern eiginleika E.

Svipaðar hugmyndir eru uppi í fræðilegri jarðtækni [Mitchell, J. K. 1993].

Ef þóruvökva, pv er bætt við sem grunnþætti, þá breytist jafna 1:

$$E = f(b, s, l, le, p, pv) \quad (1.2)$$

Í þessari rannsókn er einkum beint sjónum að eiginleikum jarð- og steinefna sem mældir eru á rannsóknarstofu á lausum og óbundnum efnum þar sem lega og pökkun koma ekki

við sögu, og stærð korna í prófi og þóruvatni er haldið föstu. Við þessar aðstæður gildir því:

$$E(s, pv) = f(b, l) \quad (1.3)$$

Í verkefninu er til viðbótar gert ráð fyrir að lögun kornanna sé nokkuð föst, og einfaldast þá grundvallarjafnan enn frekar:

$$E(l, s, pv) = f(b) \quad (1.4)$$

Þessar fræðilegu forsendur (jarð)efnisfræðinnar hafa verið hafðar að leiðarljósi í rannsókninni. Í kafla 3 verða birtar töflur sem sýna eiginleika hreinna berggerða ( $b_x$ ), og í 4. kafla spájöfnur á formi reynslulíkings fyrir blöndur berggerða ( $b_1, b_2, \dots, b_n$ ).

#### 1.4 Berggreining

Berggreining er prófunaraðferð á jarð- og steinefnum í mannvirkjagerð, sem er til í ýmsum útfærslum um allan heim. Hérlendis hefur hún verið notuð frá 1957, fyrst með lauslegu mati en frá 1974 var farið að greina skipulega a.m.k. 100 korn úr efnissýninu. Árið 1979 var framkvæmdin enn bætt, en stærsta skrefið var stigið 1982-83 við tölvuvæðingu, og það kerfi sem nú er notað hérlendis við berggreiningu er í meginatriðum óbreytt frá þeim tíma. Við tölvuvæðinguna hlaut það nafnið Berggreiningarkerfi Rannsóknastofnunar byggingariðnaðarins, enda þróað þar í samvinnu við Vegagerðina og fleiri aðila [Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins 1989].

Meginatriði berggreiningarkerfisins, og sem gerir það frábrugðið flestum eða öllum erlendum kerfum er hin fastákveðna sundurgreining bergtegunda í undirflokk, sem hlutu nafnið berggerð. Þannig er hægt að skipta bergtegundinni basalt, algengustu bergtegund landsins, í marga undirflokk; t.d. eru þeir 8 hér í verkefninu. Þessi sundurgreining helgast af skilgreiningu berggerðar, sem er þannig:

Berggerð er berg- eða steintegund, nánar skilgreind ef með þarf eftir ummyndunarstigi, þéttleika og í undantekningartilvikum öðrum þáttum.

Hér verður ekki gefin nánari lýsing á kerfinu, heldur fyrst og fremst vísað í greinargóða lýsingu þess á Rb-blaði [Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins 1990a]. Einnig má fá yfirlit um það í ráðstefnugreinum [Þorgeir S. Helgason 1983] og [Þorgeir S. Helgason og Hildur Jóna Gunnarsdóttir 1990] en nákvæma og formlega útlitun er að finna í Rb-riti nr. 57 [Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins 1989].

Mynd 1.1 sýnir ferilinn við greiningu skv. kerfinu.

Á næstu árum verður þetta kerfi leyst af hólmi af evrópskum prófunarstöðlum, sem unnið er að, sjá [CEN, Comité Européen de Normalisation 1994b] og [CEN, Comité Européen de Normalisation 1994a], og Íslendingar eru skuldbundnir að taka upp. Íslenskar ráðleggingar eða leiðsögureglur með stöðlunum verða væntanlega byggðar á áður nefndu berggreiningarkerfi, svo líklega verður breytingin yfir í samevrópska prófunaraðferð ekki erfið.

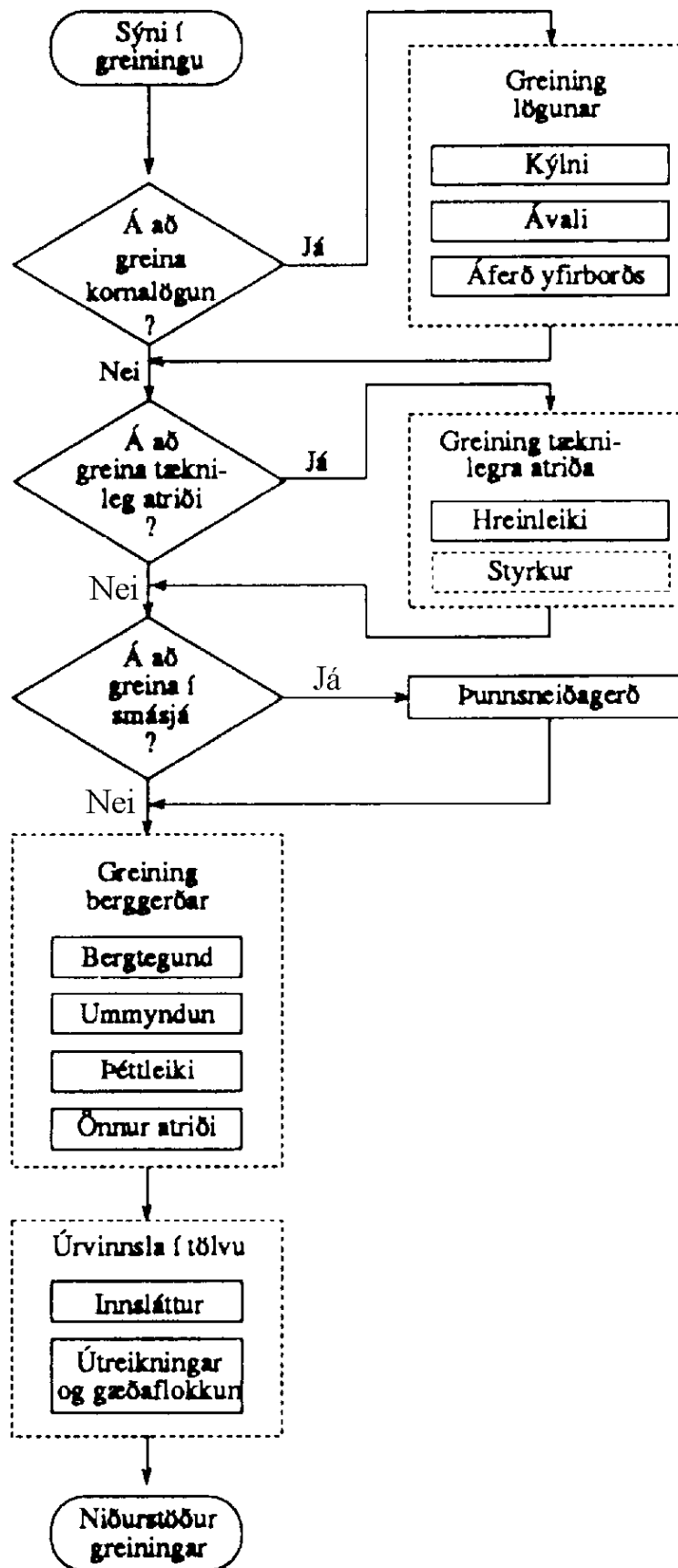
## 1.5 Niðurstaða

Til að geta sagt til um hegðun steinefnis við umhverfisáraun þarf að þekkja fjölmarga eðlis- og efnafræðilega eiginleika þess, grunneiginleika og/eða afleidda eiginleika.

Fræðilega séð eru tvær meginleiðir færar til að afla upplýsinga um afleiddu eiginleikana; annars vegar að mæla þá beint á efninu, og hins vegar að mæla grunneiginleika efnisins og reikna síðan út, eða spá fyrir um afleiddu eiginleikana einn af öðrum með hjálp orsakalíkinga eða reynslulíkinga. Efnisfræðileg þekking er enn sem komið er of lítil til að skilja orsakasamhengið og því er á þessu stigi nær eingöngu hægt að leita að reynslusambandi til að fá spálíkingar.

Rannsóknarverkefnið beinist að því að greina afleidda eiginleika jarð- og steinefna út frá grunneiginleikanum berggerð.

Í 2. kafla verður fjallað lauslega um þær prófunaraðferðir sem teknar hafa verið fyrir í verkefninu, áður en kynnt verður tafla um tæknilega eiginleika íslenskra berggerða í 3. kafla, og spájöfnur í 4. kafla.



Mynd 1

Berggreiningarkerfi Rannsóknastofnunar byggingariðnaðarins, leiðarit





## 2. EIGINLEIKAR OG PRÓFUNARAÐFERÐIR

### 2.1 Almennt

Í kaflanum er fjallað um þá eiginleika sem unnið hefur verið með í verkefninu, bæði við gerð eiginleikatöflunnar, sem birt er í 3. kafla, og við gerð spájafnanna, sem birtar eru í 4. kafla. Það var ekki ætlunin með verkefninu að mæla skipulega fyrirfram valda eiginleika jarð- og steinefna, heldur að nota auðfengnar mælingar til að sýna fram á eða prófa þá tilgátu sem sett er fram í 1. kafla um að hægt sé að áætla með góðum árangri tæknilega eiginleika jarðefna og steinefna ef berggerð þeirra er þekkt.

Það sem réði vali eiginleikanna sem fjallað er um var því fyrst og fremst það, hvort til væru mælingar á þeim ásamt mælingum á berggerð sömu steinefna, enda leyfði fjárhagur verkefnisins ekki að gerðar væru nema fáeinar nýjar mælingar.

Hér á eftir er rætt um hvern eiginleika út af fyrir sig, og *fjallað um eftirtalin atriði*, eftir því sem þau eiga við hverju sinni:

(Nafn Rannsóknastofnunar byggingariðnaðarins er skammstafað með Rb).

*Inngangur:* M.a. fjallað um tilganginn með því að mæla eða þekkja eiginleikann og þá að nokkru leyti fylgt flokkun eiginleikanna í riti alþjóðlega bergtæknisambandsins [Brown, E. T. 1977], þ.e.a.s. hér, í þá sem notaðir eru til að einkenna og flokka berg og þá sem notaðir eru við hönnun í bergi (einkum jarðganga).

*Prófunaraðferð*, sem fylgt var við mælingu.

*Heiti, tákni, mælistærð og mælieining:* Á eftir heiti og tákni eiginleika, sjá kafla 3.2 um eiginleika, er sýnd *mælistærð* og stærðartákni eiginleikans, sbr. eftirfarandi tilvitnun úr [Staðlaráð Íslands 1989]: „Stærð (mælistærð): Tilgreinir eiginleika hlutar eða fyrirbæris sem hægt er að mæla eða reikna út.“ Á eftir stærðinni fylgir tákni mælieiningarinnar skv. SI-kerfinu [Staðlaráð Íslands 1989].

Eftirfarandi stærðartákni eru notuð:

A=flatarmál

F=kraftur

l=lengd

m=massi

$m_e$ =massi fastefnis eftir próf (þurrt efni)

$m_f$ =massi fastefnis (þurrt efni)

$m_u$ =upprunalegur massi

$m_v$ =massi vatns í sýni

V=rúmmál

$V_h$ =rúmmál holrýmis

$V_f$ =rúmmál fastefnis.

*Sýnisgerð:* M.a. kornastærðir sem mældar voru.

*Gögn:* Hvaðan mæligögnin eru fengin. Gögn eru m.a. fengin úr eftirtöldum skýrslum Rb og prófritgerðum, og hér á eftir verður vísað í þær með stytta formi á eftirfarandi hátt:

Rb skýrsla H90/882 [Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins 1990d],  
Rb skýrsla H90/1284 [Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins 1990c],  
Rb skýrsla H90/1075 [Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins 1990b],  
prófritgerð Birgis Jónssonar [Birgir Jónsson 1971], og  
prófritgerð Eddu Lilju Sveinsdóttur [Edda Lilja Sveinsdóttir 1984].

*Athugasemdir:* Önnur atriði sem ástæða er til að geta um.

## 2.2 Einása þrýstistyrkur

*Inngangur:* Einása þrýstistyrkur (eða einása brotþol) er mælikvarði á þol bergs og steinefna gegn þrýstiáraun, og er m.a. notaður til að einkenna og flokka berg, en síður við hönnun.

*Prófunaraðferð:* Einása þrýstipróf, ASTM D-2938-86 [ASTM 1990b].

*Heiti, tákn, mælistærð og mælieining:* Einása þrýstistyrkur,  $\sigma_b = \left[ \frac{F}{A} \right] = \text{Pa}$

*Sýnisgerð:* Kjarnar sem notaðir voru í brotþolsmælingu voru 4,75 cm í þvermál og 10,0 cm á lengd.

*Gögn:* Niðurstöður um brotþol kjarna eru fengnar úr Rb skýrslum nr. H90/882, H90/1284, og H90/1075, og úr prófritgerðum Birgis Jónssonar og Eddu Lilju Sveinsdóttur.

## 2.3 Punktálagsgildi og einása þrýstistyrkur skv. punktálagsgildi

*Inngangur:* Markmið punktálagssprófs er að fá mælikvarða á einása þrýstistyrk [Farmer, Ian 1983], en aðferðin er einfaldari og ódýrari en einása þrýstipróf, sjá 2.2 til samanburðar.

*Prófunaraðferð:* Punktálagsspróf er framkvæmt skv. lýsingu í skýrslu Steinefnanefndar [Steinefnanefnd 1994b].

*Heiti, tákn, mælistærð og mælieining:*

Punktálagsgildi (PÁ-gildi),  $I_{S(50)} = \left[ \frac{F}{A} \right] = \text{Pa}$

Einása þrýstistyrkur skv. punktálagsgildi,  $\sigma_{c(I_{S50})} = \left[ \frac{F}{A} \right] = \text{Pa}$

*Sýnisgerð:* Valin eru 20 korn fyrir hverja berggerð úr kornastærðinni 12,5 - 19,0 mm. Þeim berggerðum sem eru innan við 5% af sýni er sleppt.

*Gögn:* Eru fengin úr áðurnefndri skýrslu [Steinefnanefnd 1994b].

*Athugasemdir:* Venjulega er prófið framkvæmt á þurrkuðum sýnum ( $I_{S(50)}$ ), en hér eru einnig sýnd gildi fyrir rakt efni (mettað-yfirborðsþurrt) ( $I_{S(50-r)}$ ). Punktálagsgildi er einnig nefnt PL-gildi í skýrslu Steinefnanefndar.

Punktálagsspróf á ekki við í völubergi og jökulbergi vegna þess hve breytileg kornastærð þessara flokka er.

Skv. [Farmer, Ian 1983] er náið samband á milli punktálagsgildis  $I_S$  og einása þrýstistyrks  $\sigma_p$ :

$$\sigma_{p(I_S50)} = C * I_S \quad (2.1)$$

Gildi fastans  $C$  er háð þvermáli kjarna, og fyrir það þvermál sem hér er miðað við, þ.e.a.s.  $D=50$  mm ætti að nota fastann  $C = 23$  skv. fyrrnefndri heimild:

$$\sigma_{p(I_S50)} = 23 * I_{S(50)} \quad (2.2)$$

Skv. þeim samanburði sem hægt er að gera út frá gögnum í verkefningu, á sambandi niðurstaðna úr einása þrýstiprófi og punktálagsprófi, fæst hins vegar eftirfarandi samband, sbr. mynd 2:

$$\sigma_{p(I_S50)} = 17 * I_{S(50)} \quad (2.3)$$

$$\sigma_{p(I_S50-r)} = 24 * I_{S(50-r)} \quad (2.4)$$

Jafna 2.3 er notuð hér til að umreikna punktálagsgildi yfir í einása þrýstistyrk í töflu 3.1.3.

## 2.4 Einása kleyfnitogstyrkur

*Inngangur:* Einása kleyfnitogstyrkur er mælikvarði á togstyrk, en prófunin er einfaldari og ódýrari en mæling á togstyrk. Kleyfnitogstyrkur er notaður við hönnun mannvirkja í bergi.

*Prófunaraðferð:* ASTM D-3967-86 [ASTM 1990d].

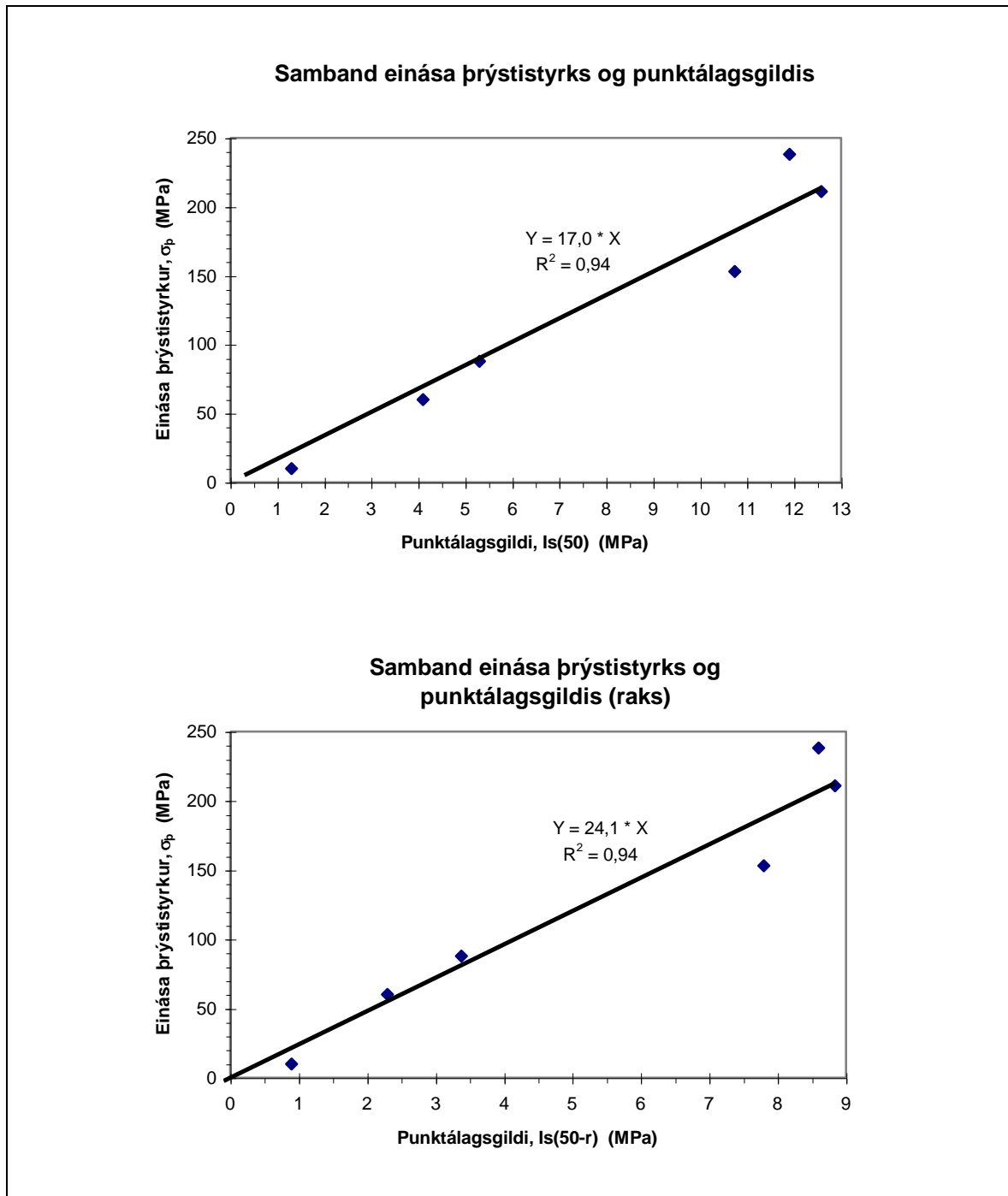
*Heiti, tákn, mælistærð og mælieining:*

Einása kleyfnitogstyrkur,  $\sigma_{kt} = \left[ \frac{F}{A} \right] = \text{Pa}$

*Sýnisgerð:* Kjarnar sem notaðir voru í brotþolsmælingu voru 4,75 cm í þvermál og 10,0 cm á lengd.

*Gögn:* Niðurstöður um einása kleyfnitogstyrk kjarna eru fengnar úr Rb skýrslum nr. H90/882 og H90/1284.

*Athugasemdir:* Kjarnarnir eru klofnir eftir langás við prófunina.



**Mynd 2** Samband einása þrýstistyrks (skv. einása þrýstiprófi) og punktálagsgildis (skv. punktálagsprófi). Efri hluti myndarinnar gildir fyrir jöfnu 2.3, og neðri fyrir jöfnu 2.4.

## 2.5 Fjaðurstuðull og poissionshlutfall

*Inngangur:* Fjaðurstuðull og poissionshlutfall, mælt í einása prófi, eru mælikvarðar á þól bergs og steinefna gegn formbreytingum, og eru þessir eiginleikar

notaðir til að flokka og einkenna berg [Brown, E. T. 1977], og við hönnun í bergi [Farmer, Ian 1983].

*Prófunaraðferð:* ASTM D-3148-86 [ASTM 1990c].

*Heiti, tákn, mælistærð og mælieining:*

$$\text{Fjaðurstuðull, } E = \left[ \frac{F/A}{l/l} \right] = \left[ \frac{F}{A} \right] = \left[ \frac{\text{Pa}}{\text{m}^2} \right]$$

$$\text{Poissonshlutfall, } \nu = \left[ \frac{l}{l} \right] = \left[ \frac{\text{m}}{\text{m}} \right]$$

*Sýnisgerð:* Mælingar voru gerðar á borkjörnum sem voru 4,75 cm í þvermál og 10,0 cm á lengd

*Gögn:* Niðurstöður um fjaðurstuðla og poissonshlutfall kjarna eru fengnar úr Rb skýrslum nr. H90/882, H90/1284 og úr prófritgerðum Birgis Jónssonar og Eddu Lilju Sveinsdóttur.

*Athugasemdir:* Yfirleitt eru fáar mælingar í hverjum flokki, en fjölda mælinga á bak við hvert gildi má sjá í viðauka 1.

## 2.6 Rúmþyngd, holrýmd og fleira

*Inngangur:* Eiginleikar sem eru notaðir til að flokka og einkenna berg, og við hönnun og framleiðslu t.d. á malbiki og steinsteypu.

*Prófunaraðferð:* ASTM C 127-88 [ASTM 1990e] og [I.S.R.M. 1977b]. Sjá einnig umfjöllun um rúmþyngdareiginleika í [Vinnuhópur um blöðrótt steinefni 1986].

*Heiti, tákn, mælistærð og mælieining:*

$$\text{Rúmþyngd, } \rho = \left[ \frac{m}{V} \right] = \left( \frac{g}{\text{cm}^3} \right)$$

$$\text{Sýndareðlisþyngd, } \rho_f = \left[ \frac{m_f}{V_f} \right] = \left( \frac{g}{\text{cm}^3} \right)$$

$$\text{Kornarúmþyngd (mettað, yfirborðsþurrt), } \rho_{f(my)} = \left[ \frac{m_f}{V_f} \right] = \left( \frac{kg}{\text{m}^3} \right)$$

$$\text{Holrýmd, } n = \left[ \frac{V_h}{V} \right] = \left[ \frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^3} \right]$$

$$\text{Mettivatn, } v_m = \left[ \frac{m_v}{m_f} \right] = \left[ \frac{\text{g}}{\text{g}} \right]$$

*Sýnisgerð:* Úr kjörnum voru sagaðar sneiðar, 4,75 cm í þvermál og 1-2,5 cm á lengd. Malarkornum var hins vegar safnað sérstaklega til mælinga á hreinum bergtegundum.

*Gögn:* Niðurstöður um rúmþyngd, sýndareðlisþyngd og holrýmd kjarna eru fengnar úr Rb skýrslum nr. H90/882, H90/1284 og úr prófritgerðum Birgis Jónssonar og Eddu Lilju Sveinsdóttur. Kornarúmþyngd og mettivatn malarkorna var hins vegar mæld sérstaklega í verkefninu, á flokkuðum kornum úr hreinum bergtegundum.

*Athugasemdir:* Í [Staðlaráð Íslands 1990] er talað um eðlismassa lausavöru og eðlismassa korna í stað rúmþyngdar og kornarúmþyngdar, og vatnsísog í stað mettivatns, og í [Staðlaráð Íslands 1989] segir að "annað heiti yfir þéttleika er eðlismassi".

## 2.7 Schmidt-hörkutala

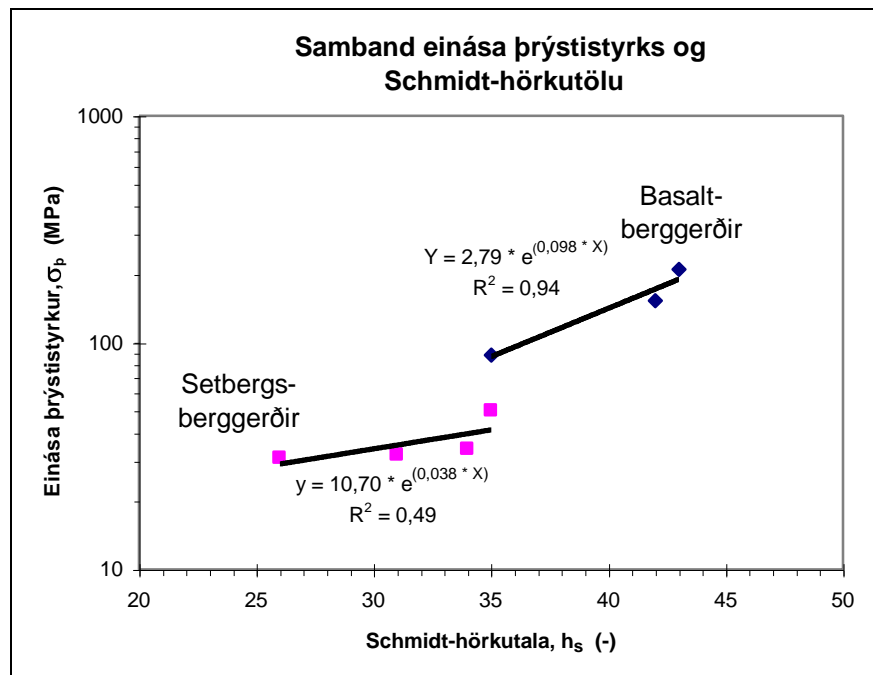
*Inngangur:* Tilgangur mælingar þessa eiginleika er að flokka og einkenna berg.  
*Prófunaraðferð:* Schmidt-hörkupróf [I.S.R.M. 1977a, 3. hluti].

*Heiti, tákn, mælistærð og mælieining:* Schmidt-hörkutala,  $h_s = \left[ \frac{F}{F} \right] = \left( \frac{F}{F} \right)$

*Sýnisgerð:* Mælingar voru gerðar á borkjörnum sem voru 4.75 cm í þvermál og 10.0 cm á lengd.

*Gögn:* Niðurstöður mælinga eru fengnar úr Rb skýrslum H90/882 og H90/1284.

*Athugasemd:* Skv. [Farmer, Ian 1983] er samband á milli Schmidt-hörkutölu og einása þrýstistyrks, ólínulegt samband "háð rúmþyngd". Ef litið er á niðurstöðurnar sem liggja hér fyrir, og þær flokkaðar eftir berggerðum, en rúmþyngdin er háð berggerðinni, má sjá sömu tilhneigingu, sjá mynd 3, en fleiri mælingar þarf til að draga frekari ályktanir af þessu.



**Mynd 3** Samband einása þrýstistyrks (skv. einása þrýstiprófi) og Schmidt-hörkutölu (skv. Schmidt-hörkuprófi).

## 2.8 Vatnspenslutala

*Inngangur:* Prófinu er ætlað að meta viðnám setbergs og steinefna úr setbergi við raka-þurrksveiflu, og er eiginleikinn notaður til að einkenna og flokka setberg.

*Prófunaraðferð:* Vatnspensluþróf. Mæling var framkvæmd skv. leiðbeiningum framleiðanda tækisins, ELE Ltd. Þær eru mjög líkar prófunaraðferð I.S.R.M. [I.S.R.M. 1977a, 2. hluti].

*Heiti, tákn, mælistærð og mælieining:* Vatnspenslutala,  $I_d = \left[ \frac{m_e}{m_f} \right] = \%$

*Sýnisgerð:* 40 til 60 g molar voru brotnir úr borkjörnum og reynt að hafa þá sem mest kúlulaga.

*Gögn:* Niðurstöður mælinga eru fengnar úr Rb skýrslum H90/882 og H90/1284.

*Athugasemdir:* Þetta próf er aðeins gert á setbergi.

## 2.9 Dorry-slittala

*Inngangur:* Dorry-slittala er mælikvarði á slitþol steinefna í bundnum slitlögum, einkum vegna áraunar frá nagladekkjum [Steinefnanefnd 1992].

*Prófunaraðferð:* Dorry-próf, sem er framkvæmt á Rb, skv. endurbættri norskri verklýsingu. Því er nánar lýst í áður nefndri skýrslu Steinefnanefndar.

*Heiti, tákn, mælistærð og mælieining:* Dorry-slittala,  $S_D = \left[ \frac{m}{m/V} \right] = \text{N}^{-1} = \text{cm}^3$

*Sýnisgerð:* 25 korn í kornastærðinni 11,2 - 12,5 mm eru valin í samræmi við hlutfall úr berggreiningu. Bergtegundum sem er minna en 4% af er sleppt.

*Gögn:* Niðurstöður 128 slitmælinga voru fengnar úr gagnasafni Rb og Steinefnanefndar.

*Athugasemdir:* Steinefnanefnd hefur einnig rannsakað Dorry-slittölu í rökum sýnum. Hér er eingöngu unnið úr gögnum fyrir þurrar mælingar.

## 2.10 Kvarntala

*Inngangur:* Kvarntala er eiginleiki sem er mælikvarði á þol steinefna í bundnum slitlögum gegn áraun nagladekkja, en talið er að kvarntalan endurspegli betur en Dorry-slittalan þolið gegn núnings og þrýstiárauninni sem steinefnin verða fyrir [Steinefnanefnd 1994b].

*Prófunaraðferð:* Kúlnakvarnarpróf. Sú prófunaraðferð sem var notuð hér til skamms tíma var skv. sænskri verklýsingu en síðar var skipt yfir og nú er fylgt prófunaraðferð skv. uppkasti að staðli CEN.

*Heiti, tákn, mælistærð og mælieining:* Kvarntala,  $S_k = \left[ \frac{m}{m} \right] = \%$

*Sýnisgerð:* 1 kg af mól í kornastærðinni 11,2 - 16,0 mm.

*Gögn:* eru fengin úr skýrslu Steinefnanefndar og frá Malbikunarstöð Reykjavíkurborgar.

*Athugasemdir:* Kúlnakvarnarpróf er alltaf gert á röku efni.

## 2.11 Frost-þíðu niðurbrot

*Inngangur:* Niðurbrotið er mælikvarði á frostþol eða frost-þíðu-veðrunarþol steinefnis.

*Prófunaraðferð:* Frostþolspróf Steinefnanefndar (stundum talað um 5. þrep prófsins). Sjá [Steinefnanefnd 1990].

*Heiti, tákn, mælistærð og mælieining:* Frost-þíðu niðurbrot,  $F_s = \left[ \frac{m}{m} \right] = \%$

*Sýnisgerð:* Ýmist er prófaður sandur í kornastærðinni 2,4-4,75 mm eða mól í kornastærðinni 9,5-12,5 mm, eða báðar stærðirnar. Prófuð eru tvö hlutsýni, 2x400 g í hvorri kornastærð.

*Gögn:* Niðurstöður 34 frostþolsmælinga á 9,5 - 12,5 mm kornum, sem fengnar voru úr gagnasafni Rb og Steinefnanefndar.

*Athugasemdir:* Hér eru aðeins notaðar niðurstöður fyrir frostþolsmælingar á efni í malarstærðinni.

## 2.12 Alkalívirkni skv. hraðprófi

*Inngangur:* Alkalívirkni skv. hraðprófi er mælikvarði á hættunni á alkalí-kísilþenslu í steinsteypu.

*Prófunaraðferð:* „Hraðpróf“ er framkvæmt eftir staðlinum ASTM C 289-87 [ASTM 1990a].

*Heiti, tákn, mælistærð og mælieining:*

Lækkun í basastyrk,  $R_c = \left[ \frac{n}{V} \right] = \left( \frac{mol}{l} \right)$

Upplestur kísill,  $S_c = \left[ \frac{n}{V} \right] = \left( \frac{mol}{l} \right)$

*Sýnisgerð:* Útbúin eru þrjú 25 g sýni í kornastærðinni 150 - 300 mm af hreinum bergtegundum.

*Gögn:* Mælingin var framkvæmd vegna þessarar skýrslu, af Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins og Iðntæknistofnun Íslands.



### 3. TAFLA UM TÆKNILEGA EIGINLEIKA BERGGERÐA

#### 3.1 Almennt

Í kaflanum er birt tafla með gildum fyrir nokkra eiginleika, og allnokkrar íslenskar berggerðir. Hrein tilviljun ræður nokkru um þá eiginleika sem hér eru teknir fyrir, enda eru upplýsingarnar sem koma fram í töflunni, og sýna samband berggerðar og eiginleika steinefna, fengnar úr ýmsum áttum. Fáeinar mælingar hafa verið gerðar sérstaklega sem liður í verkefninu, en mest hefur þó fengist af mæliniðurstöðum úr rannsóknagögnum Steinefnanefndar og þjónusturannsóknum Rannsóknastofnunar byggingariðnaðarins, sbr. umfjöllun í kafla 2.3.

Misjafnlega mikið hefur verið greint af eiginleikum fyrir hinar ýmsu berggerðir, í samræmi við tilgang og umfang verkefnisins, en tilgangurinn hér og nú er fyrst og fremst að sýna að eiginleikarnir breytast með berggerð. Litið er á það sem framhaldsverkefni að fylla út í töfluna.

Dæmi um sambærilega töflu, um eiginleika danskra steinefna, er að finna í Beton-Bogen [Aalborg Portland 1979]. Hreinn Haraldsson [Hreinn Haraldsson 1984] hefur birt yfirlit yfir vissa eiginleika berggerða.

#### 3.2 Skýringar við eiginleikatöflu

Sjá einnig 2. kafla.

##### **Berggerð**

*Númer í tölvuskrá:* xx-y-z Hér táknar xx númer bergtegundar, y táknar númer ummyndunarstigs og z táknar númer þéttleikastigs í berggreiningarkerfinu (Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins 1989). Dæmi: 01-4-1

*Heiti:* Samsett úr bergtegund og e.t.v. ummyndun og þéttleika. Dæmi: Basalt, lítillaga ummyndað, þétt. Setberg (05-0-0): Ýmis konar setberg er hér tekið saman, þar á meðal það sem tekið er fyrir í töflunni undir heitunum sandsteinn, siltsteinn, völuberg og jökulberg. Jökulberg: Setberg, sem flokkað hefur verið í gögnum sem unnið var úr sem jökulberg, þó að uppruninn sé eflaust oft óviss.

Skyggð svæði þýða að berggerðin er ekki greind eftir ummyndun og þéttleika.

##### **Eiginleiki**

*Heiti:* Eiginleikanum er gefið heiti, sem stundum er fengið úr heimildum, t.d. [Staðlaráð Íslands, 1990] og stundum ekki. Dæmi: Einása þrýstistyrkur.

*Tákn:* Eiginleikanum er gefið tákn, sem stundum er fengið úr heimildum, t.d. [Holtz, R. D. og W. D. Kovacs 1981] og stundum ekki. Iðulega standa táknin fyrir enskt orð eða hugtak, og er þá reynt að þýða þau, en þó eru notuð tákn úr ensku ef þau hafa öðlast að því er virðist fjölpjóðlegan sess (t.d. I fyrir index, sem þýðir "stuðull, tala, formúla" [Sören Sörenson, Jóhann Hannesson og Jóhannes Þorsteinsson 1984]). Dæmi:  $\sigma$  c.

*Tákn mælieiningar:* Í samræmi við SI-kerfið [Staðlaráð Íslands 1989]. Dæmi: MPa. Ef einingalaust þá er merkt (- eða %).

*Magntala (mæligildi):* Gefið er upp meðaltal, og innan sviga er staðalfrávik meðaltalsins. Dæmi: 211 (51). Þar sem aðeins liggja fyrir ein eða tvær mælingar (n=1 eða 2) er magntalan einnig innan sviga, og í stað staðalfrávíks er merkt (-). Dæmi: (238) (-).

Þar sem skortir mæligildi er eyða í töflu.

Dökkskyggð svæði þýða að þar á ekki við að mæla eiginleikann fyrir viðkomandi berggerð.

### 3.3 Niðurstaða um eiginleika berggerða

Aðgangur að fyrirbyggjandi mæligögnum réði mestu um val á berggerðum og eiginleikum sem teknar eru með í eiginleikatöfluna.

Hér eru birtar niðurstöður um ýmsa tæknilega eiginleika allmargra íslenskra berggerða, og þó að niðurstöðurnar geti komið að gagni við gæðaflokkun berggerða og í sumum tilvikum við hönnum með steinefni þá verður að hafa það í huga að hér er ekki um tæmandi mælingar að ræða heldur fyrst og fremst verið að sýna fram á að hægt er að búa til slíka eiginleikatöflu fyrir einstakar berggerðir.

Heiti eiginleika og tákn er mjög á reiki í heimildum, og væri gagnlegt að samræma þau meðal manna á steinefnasviðinu. Stundum er notað heitið á prófunaraðferðinni þegar verið er að fjalla um eiginleika; það er t.d. áberandi þegar verið er að fjalla um grunneiginleikann berggerð að talað sé um berggreiningu.

Holrýmd í berggerðum sem teljast þéttar skv. íslenska berggreiningarkerfinu er hærri en menn eiga að venjast í erlendum berggerðum, sem helgast af yfirgnæfandi magni gosbergs í berggrunni landsins.

**Tafla 3.1.1** Tæknilegir eiginleikar berggerða  
Styrkur og aðrir eiginleikar (mældir á borkjörnum)

Berggerð				Eiginleiki				
Númer í tölvuskrá	Heiti			Heiti, tákn og tákn mælieiningar				
				Einása þrýstistyrkur $\sigma_p$ (MPa)	Schmidt- hörkutala $h_s$ (-)	Kleyfni- togstyrkur $\sigma_{kt}$ (MPa)	Fjaður- stuðull $E$ (GPa)	Poission's- hlutfall $\nu$ (-)
	Bergtegund	ummyndun	þéttleiki	Meðaltal og staðalfrávik magntölu eða mæligildis Ef fjöldi mælinga er aðeins 1 eða 2 eru svigar um meðaltalið og strík í stað staðalfráviks				
01-1-1	Basalt	ferskt	þétt	(238) (-)	(46) (-)	(15) (-)	(41) (-)	(0,26) (-)
01-1-2	Basalt	ferskt	blöðrótt					
01-1-3	Basalt	ferskt	fínblöðrótt					
01-4-1	Basalt	lítillaga umm.	þétt	211 (51)	43 (4,6)	15 (3,3)	51 (19)	0,22 (0,04)
01-4-2	Basalt	lítillaga umm.	blöðrótt	88 (27)	35 (3,8)	8 (1,5)	(27) (-)	(0,25) (-)
01-2-1	Basalt	ummyndað	þétt	153 (62)	42 (6,4)	15 (4,5)	60 (14)	0,26 (0,09)
01-2-2	Basalt	ummyndað	blöðrótt	(60) (-)		(10) (-)	(37) (-)	(0,25) (-)
01-3-1	Basalt	mjög umm.	þétt					
09-4-1	Basaltgler	lítillaga umm.	þétt					
11-4-0	Gjall	lítillaga umm.						
02-4-1	Andesít	ummyndað	þétt					
03-1-1	Líparít	ferskt	þétt					
03-2-1	Líparít	ummyndað	þétt					
04-0-0	Móberg			10 (4,2)			3,6 (1,2)	
05-0-0	Setberg			32 (21)	31 (7,0)	3,9 (1,6)	5,2 (3,9)	0,19 (0,15)
19-0-0	Siltsteinn			50 (35)	35 (5,0)	3,2 (1,6)		
20-0-0	Sandsteinn			34 (18)	34 (7,2)	3,6 (1,6)	7,1 (4,8)	0,25 (0,14)
21-0-0	Völuberg			31 (20)	26 (3,3)	4,4 (2,0)		
23-0-0	Jökulberg			22 (11)			4,5 (2,5)	

**Tafla 3.1.2** Tæknilegir eiginleikar berggerða  
Rúmþyngd og aðrir eiginleikar (mældir á borkjörnum)

Berggerð				Eiginleiki			
Númer í tölvuskrá	Heiti			Heiti, tákn og tákn mælieiningar			
				Rúmþyngd $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Sýndar- eðlisþyngd $\rho_f$ (g/cm <sup>3</sup> )	Holrým n (%)	Vatnspenslu- tala Id (-)
	Bergtegund	ummyndun	þéttleiki	Meðaltal og staðalfrávik magntölu eða mæligildis Ef fjöldi mælinga er aðeins 1 eða 2 eru svigar um meðaltalið og strik í stað staðalfráviks			
01-1-1	Basalt	ferskt	þétt	(2,94) (-)	(3,05) (-)	(2,9) (-)	
01-1-2	Basalt	ferskt	blöðrótt				
01-1-3	Basalt	ferskt	fínblöðrótt				
01-4-1	Basalt	lítillega umm.	þétt	2,87 (0,07)	2,98 (0,06)	3,3 (1,7)	
01-4-2	Basalt	lítillega umm.	blöðrótt	2,55 (0,15)	2,87 (0,21)	9,4 (2,5)	
01-2-1	Basalt	ummyndað	þétt	2,84 (0,09)	2,95 (0,06)	4,7 (4,2)	
01-2-2	Basalt	ummyndað	blöðrótt	(2,40) (-)	(2,88) (-)	(12,3) (-)	
01-3-1	Basalt	mjög umm.	þétt				
09-4-1	Basaltgler	lítillega umm.	þétt				
11-4-0	Gjall	lítillega umm.					
02-4-1	Andesít	ummyndað	þétt				
03-1-1	Líparít	ferskt	þétt				
03-2-1	Líparít	ummyndað	þétt				
04-0-0	Móberg						
05-0-0	Setberg			2,12 (0,26)	2,79 (0,13)	32,6 (10,1)	92 (18)
19-0-0	Siltsteinn			1,94 (1,19)	2,78 (0,08)	40,4 (8,4)	97 (2,6)
20-0-0	Sandsteinn			2,02 (0,16)	2,72 (0,09)	33,5 (8,0)	90 (22)
21-0-0	Völuberg			2,38 (0,27)	2,89 (0,14)	22,8 (3,1)	94 (8,9)
23-0-0	Jökulberg			2,24 (0,09)			

**Tafla 3.1.3** Tæknilegir eiginleikar berggerða  
Punktálagsgildi og aðrir eiginleikar (mældir á setkornum og mulningi)

Berggerð				Eiginleiki			
Númer í tölvuskrá	Heiti			Heiti, tákn og tákn mælieiningar			
				Punktálagsgildi	Einása þrýstistyrkur skv. punktálagsgildi ( $I_{s(50)}$ )	Punktálagsgildi (rakt)	Dorry-slittala
	Bergtegund	ummyndun	þéttleiki	$I_{s(50)}$ (MPa)	$\sigma_p$ ( $I_{s(50)}$ ) (MPa)	$I_{s(50-r)}$ (MPa)	$S_D$ (cm <sup>3</sup> )
Meðaltal og staðalfrávik magntölu eða mæligildis Ef fjöldi mælinga er aðeins 1 eða 2 eru svigar um meðaltalið og strik í stað staðalfráviks							
01-1-1	Basalt	ferskt	þétt	11,9 (3,0)	202 (51)	8,6 (2,0)	0,41 (0,03)
01-1-2	Basalt	ferskt	blöðrótt	4,8 (1,2)	82 (20)	4,5 (0,7)	(1,33) (-)
01-1-3	Basalt	ferskt	fínblöðrótt				(1,10) (-)
01-4-1	Basalt	lítill. umm.	þétt	12,6 (2,4)	214 (41)	8,8 (2,4)	0,39 (0,11)
01-4-2	Basalt	lítill. umm.	blöðrótt	5,3 (0,4)	90 (7)	3,4 (0,5)	
01-2-1	Basalt	ummyndað	þétt	10,7 (1,4)	182 (24)	7,8 (1,6)	0,62 (0,11)
01-2-2	Basalt	ummyndað	blöðrótt	(4,1) (-)	(70) (-)	(2,3) (-)	
01-3-1	Basalt	mjög umm.	þétt	6,4 (0,7)	109 (12)	4,0 (0,8)	
09-4-1	Basaltgler	lítill. umm.	þétt	(4,9) (-)	(83) (-)	(7,7) (-)	
11-4-0	Gjall	lítill. umm.					
02-4-1	Andesít	ummyndað	þétt				
03-1-1	Líparít	ferskt	þétt	9,1 (1,2)	155 (20)	(7,1) (-)	
03-2-1	Líparít	ummyndað	þétt			(5,9) (-)	
04-0-0	Móberg			(1,3) (-)	(22) (-)	(0,9) (-)	
05-0-0	Setberg						
19-0-0	Siltsteinn						
20-0-0	Sandsteinn						
21-0-0	Völuberg						
23-0-0	Jökulberg						

**Tafla 3.1.4** Tæknilegir eiginleikar berggerða  
Kornarúþpyngd og aðrir eiginleikar (mældir á setkornum og mulningi)

Berggerð				Eiginleiki			
Númer í tölvuskrá	Heiti			Heiti, tákn og tákn mælieiningar			
				Kornarúþpyngd (mettað, yfirborðspurt)	Mettivatn	Alkalívirgni skv. hraðprófi; lækun í basastyrk Rc, og uppleystur kísill Sc	
	Bergtegund	ummyndun	þéttleiki	$\rho_{f(my)}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$v_m$ (%)	Rc (mmól/l)	Sc (mmól/l)
Meðaltal og staðalfrávik magntölu eða mæligildis Ef fjöldi mælinga er aðeins 1 eða 2 eru svigar um meðaltalið og strik í stað staðalfráviks							
01-1-1	Basalt	ferskt	þétt	(2,84) (-)	(1,6) (-)	(61) (-)	(130) (-)
01-1-2	Basalt	ferskt	blöðrótt	(2,46) (-)	(2,8) (-)	(55) (-)	(108) (-)
01-1-3	Basalt	ferskt	fínblöðrótt				
01-4-1	Basalt	lítill. umm.	þétt	(2,89) (-)	(1,9) (-)	(125) (-)	(122) (-)
01-4-2	Basalt	lítill. umm.	blöðrótt				
01-2-1	Basalt	ummyndað	þétt	(2,85) (-)	(2,7) (-)	(186) (-)	(113) (-)
01-2-2	Basalt	ummyndað	blöðrótt	(2,64) (-)	(5,3) (-)	(254) (-)	(87) (-)
01-3-1	Basalt	mjög umm.	þétt	(2,69) (-)	(5,0) (-)	(301) (-)	(38) (-)
09-4-1	Basaltgler	lítill. umm.	þétt	(2,86) (-)	(0,8) (-)	(71) (-)	(44) (-)
11-4-0	Gjall	lítill. umm.		(1,13) (-)	(18,0) (-)	(129) (-)	(86) (-)
02-4-1	Andesít	ummyndað	þétt				
03-1-1	Líparít	ferskt	þétt	(2,44) (-)	(4,8) (-)	(216) (-)	(408) (-)
03-2-1	Líparít	ummyndað	þétt				
04-0-0	Móberg						
05-0-0	Setberg			(2,24) (-) ()	(15,4) (-)	(703) (-)	(45) (-)
19-0-0	Siltsteinn						
20-0-0	Sandsteinn						
21-0-0	Völuberg						
23-0-0	Jökulberg						

## 4. SPÁJÖFNUR

### 4.1 Almennt

Þegar unnið er með eina berggerð ætti að vera hægt að segja til um hegðun efnisins undir ákveðinni áraun eða í ákveðnu prófi með því að nota eiginleikatöflu eins og þá sem birt er í kafla 3. Í langflestum tilvikum er hins vegar efni úr námum blanda af ýmsum berggerðum. Í þeim tilvikum sem tæknilegir eiginleikar berggerða eru línulega háðir berggerðunum má þá eftir sem áður nota eiginleikatöfluna til að meta gæði eða eiginleika heildarefnisins, en í öðrum verður að leita að reynslusambandi sem nota má til að spá fyrir um eiginleikana, enda þekking ekki á því stigi enn sem komið er að fyrir liggi kennilegar líkingar sem skýra út frá orsakasambandi nákvæmlega hvernig tæknilegir eiginleikar breytast með berggerð.

Í verkefninu var unnið að gerð reynslulíkinga eða spájafna fyrir tengsl berggerða við frost-þíðu niðurbrot, Dorry-slittölu og kvarnartölu. Hér er því verið að spá fyrir eða áætla hvernig efnið muni standa sig í ákveðnu prófi en ekki á notkunarstað. Spáin um hvernig efnið stenst kröfur á notkunarstað verður því aldrei betri en hæfileikar þessara prófa til sömu hluta eru. Við gerð þessara spájafna var beitt fjölbreytu aðhvarfsgreiningu með tölfræðiforritinu SPSS [SPSS Inc. 1986].

### 4.2 Fjölbreytu-aðhvarfsgreining

Fjölbreytu-aðhvarfsgreining (multiple regression) er ein af þeim aðferðum sem beitt er við gerð eða "hönnun" spájafna þar sem margar óháðar breytur ( $x_1, x_2, \dots$ ) eru notaðar til að skýra háðu breytuna ( $y$ ). Hér eru háðu breytur: Frost-þíðu niðurbrot,  $F_S$ ; Dorry-slittala,  $S_D$ ; og kvarnartala,  $S_K$ . Óháðu breytur eru allt að 28 berggerðir, sjá kafla 4.3.

Í stuttu máli sagt þá kannar tölfræðiforritið hvaða óháðu breytur skýra mestan breytileika innan háðu breytunnar, velur þær svo úr og hannar jöfnuna m.t.t. bestu línu á milli raungilda ( $y$ ) og spágilda ( $\hat{y}$ ) háðu breytunnar. Niðurstaða greiningarinnar er sýnd sem jafna aðhvarfsins; hversu stóran hluta breytileikans (mældur með ferveiki  $s^2$ , variance) hún skýrir, þ.e.a.s. skýringarhlutfallið ( $R^2$  eða  $r^2 = s_y^2/s_{\hat{y}}^2$ , coefficient of determination); og loks hvort sambandið sem fæst á milli óháðu breytanna og háðu breytunnar sé marktækt (significant). Í forritinu er sett krafa um að líkurnar á að sambandið sé til komið fyrir tilviljun séu innan við 5%, þ.e.a.s. marktæknikrafan (significance level) er  $p < 0,05$ , og er sambandinu hafnað ef líkurnar eru meiri.

Hægt er að stýra því hvernig SPSS-forritið velur úr óháðu breytunum, og boðið upp á fimm aðferðir, sem hér er gefin eftirfarandi nöfn: Inntökuaðferð (forward method, eða forward variable selection); brottfallsaðferð (backward method, eða backward variable elimination); þrepaaðferð (stepwise method, eða stepwise variable entry and removal); inntöku-þvingunaraðferð (enter method, eða forced entry), og loks brottfalls-þvingunaraðferð (remove method, eða forced removal).

Áður en að aðhvarfsgreiningunni sjálfri kemur er kannað samband háðu og óháðu breytanna, og það einfaldað með því að gera það sem línulegast, t.d. með því að umbreyta annarri hvorri breytunni eða báðum í lógaritmann af breytunni.

Með fylgnifylki (correlation matrix) er hægt að skoða innbyrðis fylgni einstakra breyta, bæði óháðu og háðu breytanna og einnig á milli óháðu breytanna sjálfra. Þar sést hvaða óháðu breytur hafa mest eða minnst áhrif á háðu breytuna. Ef sterk fylgni kemur fram á milli tveggja óháðra breyta getur það haft ruglandi áhrif á aðhvarfsgreininguna, og þarf að bregðast við því.

Yfirleitt var byrjað á að gera greininguna með þrepaaðferðinni, en stundum farið yfir í inntöku-þvingunaraðferðina þegar jafnan var farin að þróast og haldið áfram þar til hæsta mögulega skýringarhlutfalli var náð.

### 4.3 Berggerðir í aðhvarfsgreiningunni

Gögnin sem unnið var með voru flokkuð þannig að búinn var til tafla með 27 eða 28 berggerðum sem allar niðurstöður úr berggreiningum voru settar inn í, sjá töflu 4.1. Voru þessa berggerðir notaðar við greininguna eins og fram kemur í köflunum hér á eftir.

Eins og kemur fram í köflunum hér á eftir eru mæligögnin í sumum tilvikum mjög fátækleg og í öðrum þökkaleg. Algeng þumalfingursregla er að ekki skuli vera færri en 10 mæligildi háðrar breytu fyrir hverja óháða breytu sem unnið er með, og miðað við 28 óháðar breytur þyrftu því að liggja fyrir 280 mælingar. Nú er það hins vegar svo að af berggerðunum í töflu 4.1 eru margar sjaldgæfar berggerðir, sem finnast oft aðeins á afmörkuðum svæðum á landinu, og koma sumar þeirra ekki fyrir í neinni mælingu í sumum tilvikum (Dorrry-slitgildi, frost-þíðu niðurbrot) eða aðeins í fáum. Basalt er ráðandi bergtegund í öllum mælingum, í samræmi við berggrunn Íslands þar sem um 90% er basalt. Spájöfnurnar taka þar með ekki tillit til allra berggerða og er því nauðsynlegt að miða við að nota þær því aðeins, að til dæmis 75% af berggerðunum falli í þá berggerðarflokka sem jafnan tekur til.



**Tafla 4.1** Berggerðir í aðhvarfsgreiningu

Nr. berggerðar í aðhvarfsgreiningu	Nr. berggerðar skv. berggreiningarkerfi Rb (í tölvuskrá)	Skammstöfun berggerðar	Heiti berggerðar
1	0111	Bfþ	Basalt-ferskt-þétt
2	0141	Bluþ	Basalt-lítillega ummyndað -þétt
3	0112	Bfbl	Basalt-ferskt-blöðrótt
4	0113	Bffbl	Basalt-ferskt-fínblöðrótt
5	0121	Buþ	Basalt-ummyndað -þétt
6	0122	Bubl	Basalt-ummyndað-blöðrótt
7	0131	Bmuþ	Basalt-mjög ummyndað-þétt
8	0211	Afþ	Andesít-ferskt-þétt
9	0221	Auþ	Andesít-ummyndað-þétt
10	0311	Lfþ	Líparít-ferskt-þétt
11	0321	Luþ	Líparít-ummyndað-þétt
12	0400	Mó	Móberg
13	0500	Set	Setberg
14	0600	Holu	Holufyllingar
15	0700	Skel	Skeljabrot
16	0911	Bglfþ	Basaltgler-ferskt-þétt
17	0921	Bgluþ	Basaltgler-ummyndað-þétt
18	1100	Gjall	Gjall (sama berggerð og 1300: basaltgjall)
19	1700	Vikur	Vikur (sama berggerð og 1600: líparítvikur)
20	2511	Díffþ	Díabas-ferskt-þétt
21	2521	Díuþ	Díabas-ummyndað-þétt
22	2611	Grfþ	Granófýr-ferskt-þétt
23	2621	Grþ	Granófýr-ummyndað -þétt
24	2711	Gafþ	Gabbró-ferskt-þétt
25	2721	Gauþ	Gabbró-ummyndað-þétt
26	0000	Ý(1-2)	Ýmis korn (góð og meðalgóð)
27	2400	Ý(3)	Ýmis korn (léleg korn)
28	0142	Blubl	Basalt-lítillega ummyndað-blöðrótt

#### 4.4 Spájafna fyrir Dorry-slittölu

Fjallað er um þennan eiginleika í kafla 2.9. Dorry-slitþolspróf mælir hversu mikið 25 malarkorn af stærðinni 11,2-12,5 mm, sem stept eru í platta slitna við núning með dufti á slípiskífu, mælt sem þungatap og umreiknað í rúmmál. Því er ætlað til að meta styrk efnis gagnvart áhrifum frá negldum hjólbörðum, en það líkir þó ekki eftir höggáraun sem ljóst er að á sér stað vegna naglanna. Engu að síður á þetta próf sér langa sögu bæði erlendis og hér á landi.

Af spájöfnunum sem hér eru birtar eru flestar mælingar á bak við aðhvarfsgreininguna sem gerð var á sambandinu á milli Dorry-slittölu og berggerðar, eða 128 mælingar. Alls hafa 24 berggerðir úr töflu 4.1 greinst í einhverjum þessara 128 mælinga. Þar af koma 9 berggerðir fyrir í fleiri en 10 mælingum, og eru þær allar afbrigði basalts.

Niðurstaða prófunar með gögnin í forritinu var sú að nóg væri að vinna með eftirtaldir fimm berggerðir, og gildir jafnan því fyrir efnissýni þar sem um eða yfir 75% berggerðanna er ein eða fleiri þessara berggerða:

- basalt-ferskt-þétt, Bfþ (%)
- basalt-ferskt-blöðrótt, Bfbl (%)
- basalt-ferskt-fínblöðrótt, Bffbl (%)
- basalt-lítillega ummyndað-þétt, Blup (%)
- basalt-ummyndað-þétt, Bup (%)

Af þessum fimm berggerðum ganga fjórar inn í spájöfnuna, þ.e.a.s. *Bfþ*, *Blup*, *Bfbl* og *Bffbl*. Form hennar, sem gildir fyrir 11,2-12,5 mm malarkorn er eftirfarandi, þar sem  $S_D$  (cm3) táknar Dorry-slittölu, en beitt var inntökuaðferðinni:

$$S_D = 0,634 + (0,25 \times (- (0,009 \times Bfþ) - (0,006 \times Blup) + (0,025 \times Bfbl) + (0,027 \times Bffbl))) \quad (4.1)$$

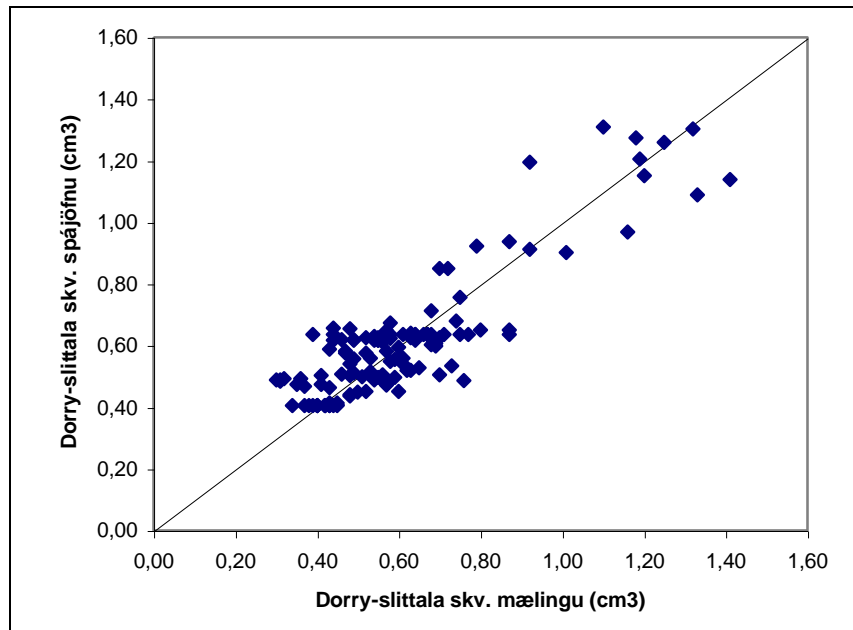
Þetta aðhvarf skýrir 75% breytileikans í slittölunni, þ.e.a.s. skýringarhlutfallið  $R^2=0,75$ , og marktækni er mjög mikil, þ.e.a.s.  $p < 0,00005$ . Sem dæmi um áhrif berggerða má benda á breytuna basalt-ummyndað-þétt, Bup, sem virðist að óskoðuðu máli vera mikilvæg breyta. Þrátt fyrir að þó nokkur fjöldi mæligilda sé á bak við þennan flokk hækkar skýringarhlutfallið aðeins um 0,005 við það að bæta þessari breytu inn í jöfnuna. Marktæk fylgni kemur fram á milli Bup og Bfþ og því skýrir Bfþ ákveðinn breytileika í Bup.

Við notkun er hlutfall (%) berggerða sett inn í jöfnu 4.1 (þó aðeins umreiknað hlutfall berggerða sem ná 4%, og færu þar með í hvern hinna fjögurra platta sem búnir eru til fyrir Dorry-prófið). (Margfeldistalan 0,25 fellur niður úr jöfnunni ef fjöldi korna af hverri berggerð í platta - alls 25 korn - er settur í stað prósentuhlutfalls kornanna).

Fylgnistuðlar háðu breytunnar við óháðu breytunnar eru sem hér segir:

Háð breyta: Dorry-slittala	Óháðar breytur: Berggerðir			
	Bfþ	Blup	Bfbl	Bffbl
$S_D$	-0,35	-0,26	0,62	0,62

Til að sýna árangur aðhvarfsins er sýnt samband mældra gilda og spáðra á mynd 4.



**Mynd 4** Dorry-slittala,  $S_D$  - samband mældra og spáðra gilda. Beina línan sýnir fullkomið samband.

#### 4.5 Spájafna fyrir kvarnartölu

Fjallað er um þennan eiginleika í kafla 2.10. Kúlnakvarnarpróf er annað slitþolspróf sem ætlað að mæla niðurbrot steinefna vegna nagladekkjaáraunar, en í því lendir efnið í annarri áraun heldur en í Dorry-prófinu. Sýnið, sem er mól af stærðinni 11,2-16,0 mm er sett í tromlu ásamt stálkúlum og vatni, en þannig líkir það bæði eftir sliti vegna núnings og höggáraunar. Þetta próf er tiltölulega einfalt og ódýrt í framkvæmd, auk þess sem það gefur mjög gott samræmi við niðurstöður á slitmælingum úti í götu. Þetta próf á sér hins vegar ekki langa sögu hér á landi og því var ekki úr stóru gagnasafni að móða.

Fáar mælingar voru til sem hægt var að taka til greiningar, og af þeim uppfylltu 34 skilyrði til að vera tekin með í aðhvarfsgreininguna. Fjöldi berggerða er 27 í safninu, en þar af koma 7 berggerðir fyrir í fleiri en 10 mælingum, og eru þær allar afbrigði basalts. Hæsta skýringarhlutfallinu (0,88) náði forritið þegar sjö berggerðir voru inni: Bfþ, Bfbl, Bluþ, Blubl, Buþ, Bubl, og Bmuþ. Bfbl var fellt út vegna lélegrar fylgni við kvarnartölu (0,01), og gildir spájafnan því fyrir efnissýni þar sem um eða yfir 75% berggerðanna er ein eða fleiri eftirtalinna sex berggerða:

- basalt-ferskt-þétt, Bfþ (%)
- basalt-lítillaga ummyndað-þétt, Bluþ (%)
- basalt-lítillaga ummyndað-blöðrótt, Blubl (%)
- basalt-ummyndað-þétt, Buþ (%)
- basalt-ummyndað-blöðrótt, Bubl (%)
- basalt-mjög ummyndað-þétt, Bmuþ (%)

Buþ og Bmuþ höfðu góða fylgni við kvarnartölu (0,5 og -0,63), en eru ekki tekin með í jöfnuna, sem er gerð með inntöku-þvingunaraðferðinni, vegna mikillar innbyrðis fylgni við Bfþ (-0,65 og -0,8). Með því að nota aðeins fjórar berggerðir féll skýringarhlutfallið

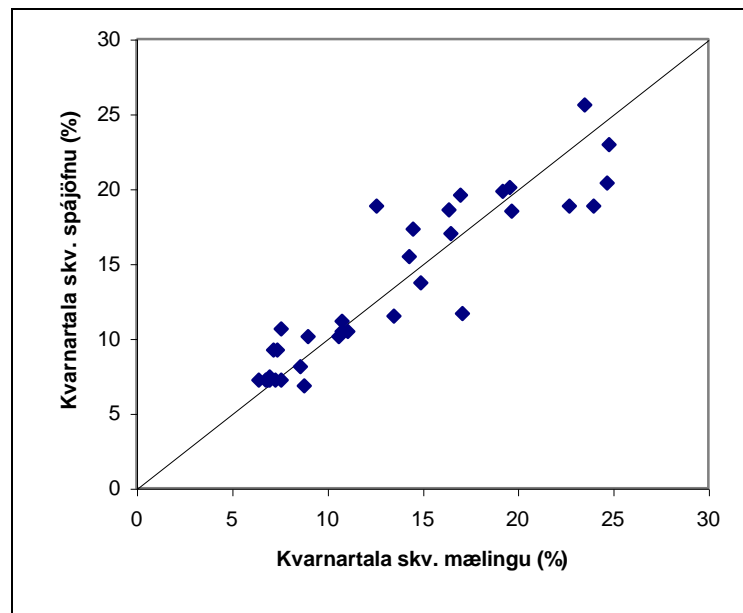
lítillaga, í  $R^2=0,84$ , en sambandið er mjög marktækt ( $p<0,00005$ ). Form jöfnunnar, sem gildir fyrir 11,2-16,0 mm malarkorn er eftirfarandi, þar sem  $S_k$  (%) táknar kvarnartölu, en við notkun er prósentgildi berggerða, sem fæst við berggreiningu sett inn í jöfnuna:

$$S_k = 18,851 - (0,120 \times Bfp) - (0,028 \times Blup) + (0,172 \times Blubl) + (1,372 \times Bubl) \quad (4.2)$$

Fylgnistuðlar háðu breytunnar við óháðu breytunnar eru sem hér segir:

Háð breyta: Kvarnartala	Óháðar breytur: Berggerðir			
	Bfp	Blup	Blubl	Bubl
$S_k$	-0,87	0,27	0,42	0,56

Til að sýna árangur aðhvarfsins er sýnt samband mældra gilda og spáðra á mynd 5.



**Mynd 5** Kvarnartala,  $S_k$  - samband mældra og spáðra gilda. Beina línan sýnir fullkomið samband.

#### 4.6 Spájafna fyrir frost-þíðu niðurbrot

Fjallað er um þennan eiginleika í kafla 2.11. Aðeins voru notaðar mælingar sem eru framkvæmdar samkvæmt 5 þrepi frostþolsprófs Steinefnanefndar [Steinefnanefnd 1990]. Það mun líkja best eftir aðstæðum í malbiki í Reykjavík og var tekið upp á Rb árið 1989 og hefur verið notað síðan. Í prófinu eru 70 frost-þíðu sveiflur, og jafngildir það einum vetri. Sveiflurnar eru frá  $+4^\circ\text{C}$  til  $-4^\circ\text{C}$  og eru 10 á sólarhring í 1% saltlausn. Ákveðið var að skoða aðeins mælingar á kornum í malarstærð (á 9,5-12,5 mm kornum), en prófið er einnig framkvæmt á sandi (á 2,4 - 4,75 mm).

Mælingar sem fullnægðu öllum skilyrðum voru 44 talsins, sem er vitaskuld lítið þegar unnið er með 25 breytur, en þar af koma 11 berggerðir fyrir í fleiri en 10 mælingum. Beitt var þrepaaðferðinni. Háðu breytunni  $F_s$  er breytt, þ.e.a.s. tekinn er náttúrulegi lógaritminn af henni, en óháðu breytunum er ekki breytt, og eru þær allar 25 til skoðunar, þ.e.a.s. jafnan gildir formlega fyrir allar berggerðirnar í töflu 4.1 aðrar en Grub, Gafþ og Gaup. Forritið tók inn fjórar breytur í aðhvarfsjöfnuna, þ.e.a.s. Bluþ (basalt-lítillaga ummyndað-þétt), Buþ (basalt-ummyndað þétt), Mó (móberg) og Set (setberg, ýmiss konar), og er form niðurbrots-jöfnunnar, fyrir 9,5-12,5 mm malarkorn, þannig:

$$\ln(F_s) = 0,812 - (0,011 \times \text{Bluþ}) + (0,023 \times \text{Buþ}) + (0,070 \times \text{Mó}) + (0,141 \times \text{Set}) \quad (4.3a)$$

eða

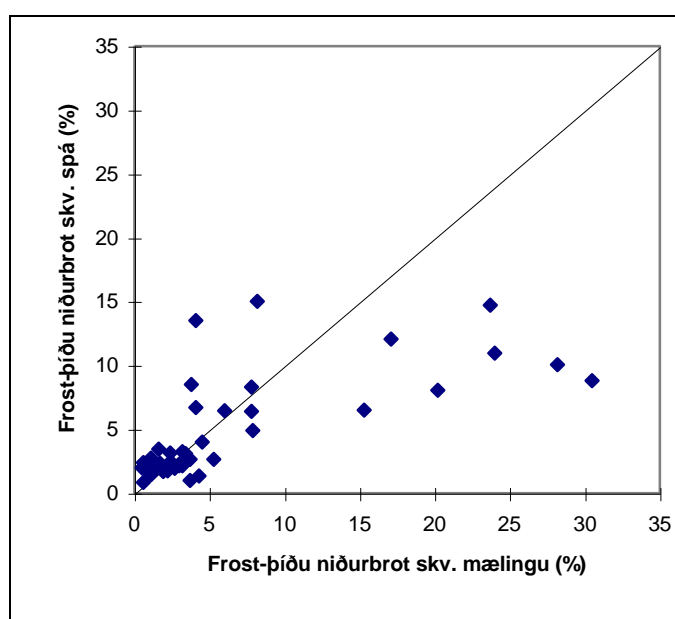
$$F_s = 2,252 \times e^{-0,011 \times \text{Bluþ}} \times e^{0,023 \times \text{Buþ}} \times e^{0,070 \times \text{Mó}} \times e^{0,141 \times \text{Set}} \quad (4.3b)$$

Skýringarhlutfallið fyrir spájöfnuna skv. þrepaaðferð er  $R^2=0,60$ , og marktækni, þ.e.a.s. líkindi tilviljanasambands er  $p=0,00005$ . Við notkun er prósentgildi berggerða, sem fæst við berggreiningu sett inn í jöfnuna.

Fylgnistuðlar háðu breytunnar við óháðu breytur eru sem hér segir:

Háð breyta: Frost-þíðu niðurbrot	Óháðar breytur: Berggerðir			
$F_s$	Bluþ	Buþ	Mó	Set
	-0,39	0,57	0,36	0,48

Til að sýna árangur aðhvarfsins er sýnt samband mældra gilda og spáðra á mynd 6.



**Mynd 6** Frost-þíðu niðurbrot,  $F_s$  - samband mældra gilda og spáðra gilda. Beina línan sýnir fullkomið samband.

#### 4.7 Niðurstaða og dæmi um notkun spájafnanna

Jafna 4.1, en þó einkum jöfnur 4.2 og 4.3 eru byggðar á ófullkomnum gögnum, og því tæplega hægt að líta á þær sem fullnothæfar á þessu stigi máls. Virðist þó mega nota jöfnur 4.1 og 4.2 um Dorry-slittölu og kvarnartölu með viðunandi árangri, ef jarð- eða steinefnið sem er verið að meta er um eða yfir 75% gert úr þeim berggerðum sem tilgreindar eru fyrir spájöfnurnar, en jöfnurnar fyrir frost-þíðu niðurbrot eru lítt nothæfar.

Í þessu samhengi er rétt að rifja upp tilganginn eða markmiðið með rannsóknarverkefninu, sem sett er fram sem fullyrðing í fyrsta kaflanum, um að hægt sé að áætla með góðum árangri tæknilega eiginleika jarðefna og steinefna ef berggerð þeirra er þekkt. Niðurstöðurnar sýna að ekki er hægt að hafna þessari fullyrðingu, og verður það að teljast góður árangur úr rannsókninni, en miklu viðameira gagnasafn þarf að liggja fyrir til að hægt sé að búa til fullboðlegar spájöfnur (um kvarnartölu og frost-þíðuniðurbrot a.m.k.).

Taka má dæmi um notkun spájafnanna. Gefnar eru eftirfarandi niðurstöður berggreiningar á sýnum úr tveimur námum á Suðurlandi (greiningin var einungis gerð á stærðum 4,8-9,5 mm, en er hér tekin sem hún gildi fyrir allar kornastærðir sem spájöfnurnar ná til):

Berggerð	Náma A		Náma B	
	Hlutfall (%)	Hlutfall (%) í Dorry-slitþolsprófi	Hlutfall (%)	Hlutfall (%) í Dorry-slitþolsprófi
Basalt-ferskt-þétt	41	43	32	33
Basalt-ferskt-blöðrótt	24	25	0	0
Basalt-lítillaga ummyndað-þétt	7	7	66	67
Basalt-lítillaga ummyndað-blöðrótt	5	5	0	0
Basaltgler-lítillaga ummyndað-þétt	3	0	0	0
Gjall	12	12	1	0
Setberg	4	4	0	0
Móberg	4	4	0	0
Vikur	0	0	1	0

Skv. þessum niðurstöðum yrði spágildin sem hér segir:

Náma	Dorry-slittala skv. spájöfnu 4.1	Kvarnartala skv. spájöfnu 4.2	Frost-þíðu niðurbrot skv. spájöfnu 4.3
A	0,68	Jafnan gildir ekki	(7,2)
B	0,46	13,2	(1,1)

Hér er lögð áhersla á að gildi spárinnar um frost-þíðu niðurbrotið er lítið, með því að hafa niðurstöðuna innan sviga. Skv. þessum niðurstöðum, og í ljósi krafa sem Steinefnanefnd

setti fram 1994 [Steinefnanefnd 1994a] mætti ætla að efni úr námu A væri talið óhæft eða í besta falli hæft í klæðingu og malbik á umferðarlitla vegi, en efni úr námu B dygði á umferðarmikla vegi.

Ljóst er að spájöfnur í líkingu við þær sem hér eru birtar koma ekki í stað allra mælinga á eiginleikum efnisins, en hins vegar má fækka mælingum umtalsvert. Þær geta gefið góða hugmynd um hvernig efnið muni haga sér undir ákveðinni áraun, og þar með hjálpað til við efnisleit, efnisval, við val sýna sem send eru í prófun hverju sinni o.s.frv.

## 5. MEGINNIÐURSTÖÐUR OG UMRÆÐUR

Til að geta sagt til um hegðun jarð- og steinefna við áraun þarf að þekkja fjölmarga eðlis- og efnafræðilega eiginleika þeirra, grunneiginleika og afleidda eiginleika. Afleiddu eiginleikarnir ráðast af grunneiginleikunum, og er því fræðilega séð mögulegt að áætla þá ef grunneiginleikarnir eru þekktir. Berggerð er einn af grunneiginleikum jarð- og steinefna, og í verkefninu sem skýrslan fjallar um er fengist við að kanna samband berggerðar og afleiddra, tæknilegra eiginleika jarð- og steinefna sem notuð eru við mannvirkjagerð. Berggreining er prófunaraðferðin sem notuð er til að mæla berggerð.

Allnokkur fjöldi mælinga liggur fyrir um ýmsa tæknilega eiginleika berggerða í íslenskum jarð- og steinefnum, og eru þær dregnar saman í töflu 3. Verulegur ávinningur væri af því að fullkomna þessar mælingar.

Í 4. kafla eru birtar spájöfnur fyrir þrjá eiginleika jarð- og steinefna, og geta tvær af jöfnunum komið að nokkru gagni við mat á efnunum, en til að komast af tilraunastigi á fullt notkunarstig þarf þó að stórauka gagnasafnið fyrir þessa eiginleika og bæta við um aðra eiginleika.

Segja má að tilgangurinn með verkefninu hafi verið að sannprófa eftirfarandi tilgátu: Hægt er að áætla með góðum árangri tæknilega eiginleika jarðefna og steinefna ef berggerð þeirra er þekkt. Niðurstöðurnar sýna að ekki er hægt að hafna þessari fullyrðingu, og verður það að teljast góður árangur úr rannsóknarverkefninu, en miklu viðameira gagnasafn þarf að liggja fyrir til að hægt sé að fylla í eyðurnar í eiginleikatöflunni, og til að búa til fullboðlegar spájöfnur.

Ljóst er að eiginleikatafla og spájöfnur í líkingu við þær sem hér eru birtar koma ekki í stað allra mælinga á eiginleikum efnisins, en hins vegar má fækka mælingum umtalsvert. Með hjálp þessara upplýsinga má fá góða hugmynd um hvernig efnið muni haga sér undir ákveðinni áraun eða við ákveðna prófun, og þar með nýtast þær við efnisleit, efnisval, við val sýna sem send eru í prófun o.s.frv.

Í þessari rannsókn hefur eingöngu verið kannað sambandið á milli tæknilegra eiginleika jarð- og steinefna (E), skv. niðurstöðum ákveðinna staðlaðra prófana, og eins grunneiginleika þeirra, berggerðarinnar (b). Í þessum prófunum gildir jafnframt að stærð (s) og þórúvökvi (pv) er fasti, og til einföldunar hefur verið gert ráð fyrir því að svo sé einnig um lögum (l), sbr. jöfnu 1.4:

$$E(l, s, pv) = f(b)$$

Í framhaldi verkefnisins væri nærtækt að kanna áhrif lögunar, enda vitað að hún er ekki fasti nema í vissum prófum, t.d. í Dorry-slitþolsprófi, og vitað að lögunin hefur umtalsverð áhrif á prófunarniðurstöður t.d. í kúlnakvarnarprófi (Halldór Torfason 1995, munnl. upplýs.). Þá væri sambandið sem til rannsóknar væri eins og lýst er í jöfnu 1.3:

$$E(s, pv) = f(b, l)$$





## 6. LOKAORÐ

Höfundar skýrslunnar vilja þakka þeim sem stutt hafa rannsóknarverkefnið með vinnuframlagi og/eða fjárframlagi, en þeir eru Menningar- og framfarasjóður Ludvigs Storr (fjárhagsstyrkur til að hefja rannsóknina), Línuhönnun hf. (vinnuframlag á öllum stigum rannsóknarinnar), Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins (vinnuframlag vegna gagnaöflunar, mælinga, funda, og yfirllesturs), Vegagerðin (fjárframlag til að ljúka úrvinnslu og skýrslugerð), og Iðntæknistofnun Íslands (vinnuframlag vegna mælinga).

Gögn til úrvinnslu í rannsókninni fengust að langmestu leyti úr fyrirbyggjandi rannsóknarskýrslum, eins og fram kemur í 2. kafla, og var þannig hægt að halda kostnaði við verkefnið niðri. Af þessum upplýsingum má nefna gögn Steinefnanefndar sem voru mikið nýtt, en hún starfaði í áratug á vegum Malbikunarstöðvar Reykjavíkurborgar, Rannsóknastofnunar byggingariðnaðarins og Vegagerðarinnar; Malbikunarstöð Reykjavíkurborgar lagði til gögn um kvartartölur til úrvinnslu; mælingar sem gerðar voru hjá Rb á borkjörnum fyrir Landsvirkjun og Vegagerðina vegna jarðgangnagerðar gáfu mikið efni fyrir eiginleikatöfluna í 3. kafla, sem og önnur þau gögn úr rannsóknum fyrir ýmsa aðila sem Rb veitti aðgang að; og loks að Birgir Jónsson og Edda Lilja Sveinsdóttir jarðverkfræðingar veittu aðgang að gögnum úr prófritgerðum sínum.

Edda Lilja Sveinsdóttir jarðverkfræðingur á Rb, Egill Þorsteins verkfræðingur á Línuhönnun, Laufey Tryggvadóttir faraldsfræðingur hjá Krabbameinsfélagi Íslands, Pétur Pétursson jarðfræðingur á Rb, og Þórir Ingason verkfræðingur á Rb lásu yfir handrit að skýrslunni á mismunandi stigum og gerðu tillögur um ýmsar breytingar.

Að lokum er þess að geta að visst framhald verður á rannsóknum þeim sem hér hefur verið skýrt frá á vegum BUSL-samstarfsins um rannsókn- og þróunarverkefni í vega- og gatnagerð, sem Vegagerðin, Borgarverkfræðingurinn í Reykjavík, Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins og Verkfræðideild Háskóla Íslands standa að.



TBS105TH.DOC

## HEIMILDIR

Aalborg Portland 1979. Beton-Bogen. Cementfabrikkernes tekniske Oplysningkontor, Aalborg, 719 bls.

ASTM 1990a. C 289-87: Potential reactivity of aggregates (chemical method). *Annual Book of ASTM Standards*, 04.02 - Concrete and aggregates. ASTM - American Society for Testing and Materials, 159-165.

ASTM 1990b. D 2938-86: Unconfined compressive strength of intact rock core specimens. *Annual Book of ASTM Standards*, 04.08 - Soil and Rock; Dimension Stone; Geosynthetics. ASTM - American Society for Testing and Materials, 360-361.

ASTM 1990c. D 3148-86: Elastic moduli of intact rock core specimens in uniaxial compression. *Annual Book of ASTM Standards*, 04.08 - Soil and Rock; Dimension Stone; Geosynthetics. ASTM - American Society for Testing and Materials, 391-394.

ASTM 1990d. D 3967-86: Splitting tensile strength of intact rock core specimens. *Annual Book of ASTM Standards*, 04.08 - Soil and Rock; Dimension Stone; Geosynthetics. ASTM - American Society for Testing and Materials, 518-520.

ASTM 1990e. C 127-88: Specific gravity and absorption of coarse aggregates. *Annual Book of ASTM Standards*, 04.02 - Concrete and aggregates. ASTM - American Society for Testing and Materials, 159-165.

Auður Andrésdóttir 1990. Smásjártækni við rannsóknir á steinsteypu. Áfangaskýrsla 1 í rannsókn V-266. Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins, Reykjavík, 18 bls.

Birgir Jónsson 1971. Geotechnical properties of tillite and moberg from southern central Iceland. M.Sc. ritgerð, University of Durham.

Brown, E.T. 1977. Rock characterization testing and monitoring. Pergamon Press, Oxford, 211 bls.

CEN, Comité Européen de Normalisation 1994a. Proposed draft prEN 932-4: Tests for general properties for aggregates. Methods for description and petrography - Quantitative and qualitative procedures. British Standards Institution, London, 29 bls.

CEN, Comité Européen de Normalisation 1994b. Proposed final draft of prEN 932-3: Methods for qualitative petrographic description - simplified procedure. British Standards Institution, London, 12 bls.

Edda Lilja Sveinsdóttir 1984. Geological factors controlling the difference in compressive strength of basalts from Iceland. M.Sc. ritgerð, Queen's University.

Edda Lilja Sveinsdóttir 1991. Steypuefni og innri gerð steinsteypu I. Smásjártækni. Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins, Reykjavík, 25 bls.

Farmer, I. 1983. Engineering behaviour of rocks. 2. útg. Chapman and Hall, London, 208 bls.

Griffiths, J.C. 1967. Scientific method in analysis of sediments. McGraw-Hill, New York, 508 bls.

Holtz, R.D. og W.D. Kovacs 1981. An introduction to geotechnical engineering. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, 733 bls.

Hreinn Haraldsson 1984. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 73-76.

I.S.R.M. 1977a. Suggested methods for determining hardness and abrasiveness of rocks. Í: Brown, E.T. (ritstj.), Rock characterization testing and monitoring. Pergamon Press, Pergamon Press, 95-103.

I.S.R.M. 1977b. Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake-durability index properties. Í: Brown, E.T. (ritstj.), Rock characterization testing and monitoring. Pergamon Press, Pergamon Press, 79-94.

Jón Eiríksson, Einar Einarsson og Aðalheiður Ásmundsdóttir 1992. Steypuefni og innri gerð steinsteypu II. Kornalögun í fylliefnum steinsteypu. Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins, Reykjavík, 37 bls.

Markestad, A. og M. Maage 1975. Bygningsmaterillære 1. Tapir, Osló, bls.

Mitchell, J.K. 1993. Fundamentals of soil behavior. 2 útg. John Wiley & Sons, New York, 437 bls.

Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins 1989. Berggreiningarkerfi Rannsóknastofnunar byggingariðnaðarins. Flokkun og gæðamat steinefna. 3. útgáfa. Höfundar Þorgeir S. Helgason og Guðmundur H. Guðfinnsson. Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins, Reykjavík, 57 bls.

Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins 1990a. Berggreiningarkerfi Rb. Höfundur Hildur J. Gunnarsdóttir. Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins, Reykjavík, 6 bls.

Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins 1990b. Rannsókn H90/1075 unnin fyrir Vegagerð ríkisins. Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins, Reykjavík.

Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins 1990c. Rannsókn H90/1284 unnin fyrir Landsvirkjun. Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins, Reykjavík.

Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins 1990d. Rock mechanical testing for Fljótsdalur hydroelectric project, headrace tunnel. Rannsókn H90/882 unnin fyrir Landsvirkjun. Höfundar Gunnar Svavarsson og Þorgeir S. Helgason. Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins, Reykjavík, 40 bls.

SPSS Inc. 1986. SPSS/PC+ for the IBMPC/XT/AT. SPSS Inc., Chicago.

Staðlaráð Íslands 1989. Leiðbeiningakver um SI-kerfið - Système International d'Unités. 1. útgáfa. Staðlaráð Íslands, Reykjavík, 28 bls.

Staðlaráð Íslands 1990. Forstaðall ENV 206:1990. Steinsteypa - Eiginleikar, framleiðsla, niðurlögn og samræmi við kröfur. Staðlaráð Íslands, Reykjavík, 33 bls.

Steinefnanefnd 1990. Steinefni í bundin slitlög. Frostþolspróf. Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins, Reykjavík, 59 bls.

Steinefnanefnd 1992. Steinefni í bundin slitlög. Slitþolspróf. Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins, Reykjavík, 62 bls.

Steinefnanefnd 1994a. Steinefni í bundin slitlög. Ráðstefnurit. Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins, Reykjavík.

Steinefnanefnd 1994b. Steinefni í bundin slitlög. Styrkleikapróf. Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins, Reykjavík, 78 bls.

Sören Sörenson, Jóhann Hannesson og Jóhannes Þorsteinsson 1984. Ensk-íslensk orðabók. Örn og Örlygur, Reykjavík, 1241 bls.

Vinnuhópur um blöðrótt steinefni 1986. Bruk av poröst steinmateriale til asfaltdekker. Skýrsla NVS-33-10:1986. Norræna vegtæknisambandið, Nefnd 33-Asfaltbundin slitlög, Reykjavík, 56 bls.

Þorgeir S. Helgason, 1983. Berggreiningarkerfi Rannsóknastofnunar byggingariðnaðarins. Í: Jarðefni til vega- og gatnagerðar, 18/1-18/14. Reykjavík.

Þorgeir S. Helgason, 1990. Characteristics, properties, and quality rating of Icelandic volcanic aggregates. 43rd Canadian Geotechnical Conference, St. Foy. Université Laval, 1:339-345.

Þorgeir S. Helgason, 1994. Forudsigelse af tekniske egenskaper baseret på bjergartssammensætning. Í: 3. nordiske forskerseminar om steinmaterialer som byggeråstoff, 10-10. Osló.

Þorgeir S. Helgason og Auður Andrésdóttir, 1989. Smásjártækni við rannsóknir á steinsteypu og fylliefnum. Í: Steinsteypudagurinn 1989, 1-14. Reykjavík.

Þorgeir S. Helgason og Hildur Jóna Gunnarsdóttir, 1990. Gæðamat steypufna og Berggreiningarkerfi Rb. Í: Steinsteypudagurinn 1990, 1-21. Reykjavík.

Þorgeir S. Helgason og Þorsteinn Jóhannsson, 1992. Samband berggerðar og eiginleika steinefna, handrit.





## ENGLISH SUMMARY

### PETROGRAPHIC TYPES AND TECHNICAL PROPERTIES OF AGGREGATES

In this report the results of a research project at Linuhonnun Ltd. Consulting Engineers are presented. The project was started some years ago, and with a grant from the Ludvig Storr Fund for Culture and Economic Advancement, at the University of Iceland, it was possible to finish it. Linuhonnun has collaborated with the Icelandic Building Research Institute and others on the project, and besides the grant from Ludvig Storr, the Public Roads Authority has made financial contribution to it.

One can say that the purpose with the project has been to "test" or verify the following statement: It is possible to predict the technical properties of mineral aggregates, with satisfactory results if their "petrographic types" (from petrographic description) are known.

"Petrographic type" (being defined as rock or mineral type, further classified if necessary according to the stage of alteration and porosity of the particles and sometimes other aspects) is one of three fundamental properties of unbound, bulk aggregates. In Iceland a formal petrographic description method has been in use since 1979, and the method is described briefly in Chapter 1.

The data that were analysed in the project are test results from quarries and sediments in Iceland. On one hand are results on the independent variable, petrographic type, and on the other hand the results on various dependent variables, i.e. results from tests on properties such as uniaxial compressive strength, freeze-thaw breakdown, etc. The data were collected from commercial tests and research projects, with almost no new tests being done. The dependent properties being studied are described in Chapter 2.

The results of the project are presented, in Chapter 3, as a table of the technical properties of certain petrographic types. Due to the limited data, results are missing for many of the properties, and frequently the value reported is only based on one or two measurements. This table can be used when the properties of pure petrographic types are being sought.

To deal with a mixture of different types, the experimental predictive equations in Chapter 4 have been prepared. Here the results of multiple regression analysis are presented, showing highly significant results but with varying coefficient of determination. The equations for the prediction of "Dorry abrasion value" and the "Nordic abrasion value" are fairly useful, but the one for the freeze-thaw breakdown is rather useless.

The main conclusion of the project is that one can not reject the before mentioned statement, regarding the predictive aspect of petrographic description of aggregates. In other words, the methods presented here, especially the predictive equations or modelling, seem to be a viable method to evaluate various technical properties of aggregates with only one test, the petrographic description. A much larger research project, with larger data base, and new and refined statistical techniques are needed to come up with good-quality predictive equations for the various properties of aggregates and a finished table of properties.

