

Niðurbrot óbundins burðarlags undir sveiflandi álagi

Lokaskýrsla

Ásbjörn Jóhannesson
Hafsteinn Hilmarsson
Oddur Þórðarson

Maí 2016



Niðurbrot óbundins burðarlags undir sveiflandi álagi

Lokaskýrsla

Reykjavík: Nýsköpunarmiðstöð Íslands, 2016.

Unnið fyrir Rannsóknasjóð Vegagerðarinnar.

Höfundar skýrslunnar bera ábyrgð á innihaldi hennar. Niðurstöður hennar ber ekki að túlka sem yfirlýsta stefnu Vegagerðarinnar eða álit þeirra stofnana eða fyrirtækja sem höfundar starfa hjá.

ÁGRIP

Tilgangur verkefnisins er að kanna hvort raunhæft sé að nota gangfræðilegt (e. dynamic) þríasapróf til að spá um niðurbrot burðarlagsefna undir umferð, þ.á.m. myndun fínafna af því tagi sem spillir burðargetu burðarlags.

Verkið var unnið í þrem áföngum. Niðurstöður prófana í 1. og 2 áfanga hafa þegar verið birtar [Ásbjörn Jóhannesson o.fl., 2014; Ásbjörn Jóhannesson o.fl., 2015]. Í viðauka með þessari skýrslu eru birtar niðurstöður prófana sem gerðar voru í 3. áfanga verkefnisins. Í skýrslunni eru niðurstöður prófana í öllum áföngunum þremur teknar saman í eina heild og dregnar af þeim viðurkvæmilegar ályktanir.

Við prófanirnar var notuð aðferð sem var þróuð í 1. áfanga. Sýni af burðarlagsefni, þeim hluta sem er á kornastærðabilinu 4-16 mm, er prófað í þrías þar sem hliðarstuðningurinn er stöðugur (200 kPa) meðan á prófinu stendur en lóðrétta álagið er látið sveiflast á bilinu 200 til 900 kPa. Að prófun lokinni er sýnið siktað og breyting á sáldurferlinum notuð sem mælikvarði á niðurbrot.

Þessari prófunaraðferð var beitt á sex óbundin burðarlagsefni sem höfðu Los Angeles gildi á bilinu 14-43 %. Eitt efnanna var prófað í tvígang til að afla upplýsinga um tvímælingagildi (e. repeatability) prófunaraðferðarinnar.

Niðurstöðurnar benda til þess að niðurbrot í gangfræðilegu þríasaprófi aukist með minnkandi styrkleika samkvæmt LA-prófi þegar sáldur gegnum 4 mm sikti er notað sem mælikvarði á niðurbrot, skýringarhlutfallið R^2 er 0,78. Fleiri mælikvarðar á styrkleika burðarlagsefnis voru bornir saman við niðurbrot í gangfræðilegu prófi, en skýringarhlutfall þeirra reyndist lægra, í sumum tilfellum óverulegt.

Hlutfall fínafnis sem myndast við gangfræðilega prófun er lítið, 0,3-2,7 % af prófsýninu og fer vaxandi með hækkandi Los Angeles gildi. Að jafnaði er aðeins ríflega helmingur þessa fínafnis smærri en 20 μm . Það er því ólíklegt að niðurbrot undir umferð hafi áhrif á vatns- eða frostnæmi burðarlagsins.

Athuganir á nákvæmni, raunar mjög takmarkaðar, benda til þess að tvímælingagildi fyrir mylsnu, sem myndast við prófunina og smýgur 4 mm sikti, sé um 1 %, og tvímælingagildi á fínafni (smærra en 63 μm) sem myndast við prófunina sé um 0,4 %. Þessi tvímælingagildi gefa til kynna að nákvæmni prófunaraðferðarinnar sé viðunandi.

Gangfræðilegt próf er að líkindum góð eftirlíking á þeirri áraun sem óbundið burðarlag í vegi verður fyrir frá umferð og nothæft til að meta niðurbrot á endingartímanum undir umferð. Prófananiðurstöðurnar gefa til kynna að gangfræðileg prófun í þríasatæki geti gefið vísbendingar um niðurbrot burðarlags undir umferð. Í prófuninni verður mælanleg breyting á sáldurferli. Hins vegar er óvíst að niðurbrot sem mælist í prófuninni í núverandi mynd samsvari niðurbroti sem verður undir umferð, vegna þess að sáldurferill prófunarsýnisins er verulega frábrugðinn sáldurferli óbundins burðarlags.

Gangfræðilegt próf á burðarlagsefnum er tímafrekt og dýrt. Tilraunir sem gerðar voru í þessu verkefni til að nota ódýrar prófanir (Los Angeles-próf, kúlnakvarnarpróf og Bg-stuðul) til að segja fyrir um niðurbrot í gangfræðilegu prófi báru takmarkaðan árangur, skýringarhlutfall þeirra reyndist lágt, síst þó fyrir Los Angeles próf.

EFNISYFIRLIT

ÁGRIP	1
1. INNGANGUR	3
2. PRÓFUNARSÝNI OG PRÓFUNARAÐFERÐ	4
3. NIÐURSTÖÐUR PRÓFANA	6
3.1 Mælikvarðar á niðurbrot í gangfræðilegu prófi	6
3.2 Breytingar á sáldurferli við prófun	6
3.3 Þyngdarhlutfall mylsnu eftir gangfræðilegt próf	7
3.4 Áhrif fíngerðrar mylsnu á frostnæmi og vatnsnæmi	11
3.5 Varanleg samþjöppun	13
3.6 Holrýmd í prófunarsýnum í byrjun prófs	14
3.7 Tvímælingagildi á niðurbrotsmælingum	14
4. UMRÆÐA OG ÁLYKTANIR	15
4.1 Kostir og gallar prófunaraðferðarinnar	15
4.2 Meginniðurstaða	15
4.3 Nákvæmni og hittni	15
4.4 Forspárgildi hefðbundinna prófunaraðferða	16
4.5 Fínefni og vatnsnæmi	16
4.6 Áhrif niðurbrots á frostnæmi	17
4.7 Varanleg samþjöppun	17
4.8 Ályktanir	18
5. TILLÖGUR AÐ FRAMHALDSRANNSÓKNUM	19
HEIMILDIR	22
VIÐAUKI I. Sáldurferlar sýna á ýmsum stigum prófunar	23
VIÐAUKI II. Niðurstöður berggreininga á prófunarsýnum	31
VIÐAUKI III. Línurit af varanlegri samþjöppun sýna í gangfræðilegri prófun	34
VIÐAUKI IV. Bg-stuðlar (Standard Proctor þjöppun)	38

1. INNGANGUR

Kröfur til sáldurferils burðarlagsefna tilgreina m.a. að hlutfall fínefnis¹ skuli vera undir tilteknu hámarki, sem að jafnaði er 5% eða 7% [Vegagerðin, 2015, bls. 5-26 til 5-35]. Þessi krafa á að minnka líkur á að burðarþol skerðist til muna þótt vatn komist í burðarlagið.

Nú er það svo að efni í burðarlögum molnar smám saman niður fyrir áhrif frá umferðinni. Þetta á ekki síst við ef slitlagið er klæðing, því hún er þunn og hefur mjög litla stífni, og getur þar af leiðandi ekki dreift umferðaráláginu yfir stærri flöt í burðarlaginu, líkt og malbiks- eða steypuslitlag gerir. Afleiðingin er sú að fínefni í burðarlagi undir klæðingu hættir til að aukast með tíð og tíma og getur orðið snöggtum meira en í sýnum af sama burðarlagsefni sem eru tekin strax að lokinni vinnslu þess. Orsakirnar geta verið margvíslegar, og umfangið fer að sjálfsgöðu eftir eiginleikum steinefnisins, einkum höggþoli, slit- eða núningsþoli og frostþoli.

Niðurbrot, annað en það sem stafar af frost/þíðusveiflum, verður einkum í tveim þrepum:

- Á framkvæmdaskeiðinu molnar burðarlagsefni að einhverju leyti niður vegna áhrifa frá efnisflutningum og vinnuvélum, svo og meðan á þjöppun stendur vegna höggáhrifa frá titurvöltum;
- Eftir að vegurinn er fullfrágenginn og umferð hefur verið hleypt á hann, heldur steinefnið áfram að molna niður vegna áraunar frá umferðinni, líklega bæði vegna innbyrðis mismunarhreyfinga steinefniskornanna, þ.e. núnings á milli þeirra, og höggáhrifa frá umferðinni.

Ef burðarlagsefni er hætt við að molna undir umferð getur svo farið að niðurbrotið verði með tímanum svo mikið að það komi niður á burðargetu vegarins.

Algengustu prófunaraðferðir hérlendis til að meta styrkleika burðarlagsefnis eru Los Angeles próf (LA-próf) og Bg-stuðull. Þær líkja hins vegar ekki vel eftir álagi sem burðarlagsefni verður fyrir frá umferðinni. Það gerir gangfræðilegt (e. dynamic) próf hins vegar, þar er hægt að líkja að meira eða minna leyti eftir aðstæðum „in situ“.

Tilgangur verkefnisins er að:

- Afla upplýsinga um líklegt niðurbrot í burðarlagsefni á löngum tíma undir umferð með gangfræðilegri prófunaraðferð;
- Tengja niðurstöður sem fengnar eru á þennan hátt við ódýra prófunaraðferð, t.d. Bg-stuðul, kúlnakvarnar- eða LA-próf;
- Meta hvort gangfræðileg prófun sé raunhæf til að meta niðurbrot burðarlagsefnis.

Í 1. áfanga þessa verkefnis var unnið að þróun prófunaraðferðar og sagt stuttlega frá ýmsum innlendum og erlendum heimildum sem hafðar voru til hliðsjónar við þróun hennar [Ásbjörn Jóhannesson o.fl., 2014]. Ennfremur var greint frá niðurstöðum prófana á einu burðarlagsefni eftir að prófunaraðferðin var komin á endanlegt form. Þær gáfu vísbendingu um að prófunaraðferðin gæti verið raunhæf. Í 2. og 3. áfanga verkefnisins voru gerðar prófanir á fáeinum burðarlagsefnum með áður nefndri prófunaraðferð.

Verkið var unnið á Nýsköpunarmiðstöð Íslands fyrir styrk frá Rannsóknasjóði Vegagerðarinnar. Verkefnishóp skipuðu Ásbjörn Jóhannesson, Hafsteinn Hilmarsson og Oddur Þórðarson, allir starfsmenn Nýsköpunarmiðstöðvar Íslands.

¹ Fínefni; efniskorn sem eru smærri 63 µm.

2. PRÓFUNARSÝNI OG PRÓFUNARÆÐFERÐ

Í 3. áfanga voru prófuð sýni af burðarlagsefnum úr tveim námum. Auk þess var prófun endurtekin á sýni frá Skurðsbrúnunum² með einni breytingu á prófunarfyrirmælum. Breytingin var gerð til þess að sveiflufjöldinn yrði sá sami fyrir öll sýnin. Niðurstöður prófana í 3. áfanga eru sýndar í viðaukum I-IV.

Í 3. áfanga voru þessi burðarlagsefni prófuð:

Skurðsbrúnir² við Norðausturveg, námunr. 22731³

Grímsá við Upphéraðsveg, námunr. 18586

Stapafell við Grindavíkurveg, námunr. 16931

Í 2. áfanga:

Skurðsbrúnir² við Norðausturveg, námunr. 22731

Lambafell við Þrengslaveg, námunr. 16825

Vatnsskarð við Krísuvíkurveg, námunr. 16878

Í 1. áfanga:

Afstapahraun við Reykjanesbraut, námunr. 20452⁴.

Burðarlagsefnin voru einkum valin með hliðsjón af berggerð og styrkleika. Nokkrir eiginleikar þeirra eru sýndir í töflu 2.1 [Ásbjörn Jóhannesson o.fl., 2014; Ásbjörn Jóhannesson o.fl., 2015].

Tafla 2.1. Niðurstöður berggreiningar og styrkleikaprófana á burðarlagsefnum, svo og líklegt notagildi þeirra í burðarlag skv. sömu prófunarniðurstöðum ásamt kröfum Vegagerðarinnar [Vegagerðin, 2015, bls. 5-24 til 5-42]. Upplýsingar um sáldurferil, frostþol, brothlutfall og kornalögun vantar, svo að flokkun eftir notagildi getur tekið breytingum að þeim fengnum.

Efni (námuheiti og námunúmer)	Kverni [%]	LA-gildi [%]	Bg-stuðull ⁵ [%]	Berggreining 2./3. fl. ⁶ [%]	Notagildi [ÁDU _p]
Afstapahraun (nnr. 20452)	10,1	23	4,4	16/5 ⁷	≥ 400
Grímsá (nnr. 18586)	16,1	14	7,1	43/19	≥ 400
Lambafell (nnr. 16825)	11,1	17	3,6	10/40	≥ 400
Skurðsbrúnir (nnr. 22731)	16,7	43 ⁸	10,0	100/0	ónothæft
Stapafell (nnr. 16931)	29,9	38	13,3	53/47	ónothæft
Vatnsskarð (nnr. 16878)	15,5	28	3,7	95/4	<400

Berggreining er gerð í samræmi við berggreiningarkerfi Rb [Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins, 1989], kverni (kvarnargildi) er mælt skv. ÍST EN 1097-9 [Íslenskur staðall, 1998a] og LA-gildi skv. ÍST EN 1097-2, grein 5 [Íslenskur staðall, 1998b]. Bg-stuðull er mældur eftir Standard Proctor þjöppun

² Í áfangaskýrslu 2 [Ásbjörn Jóhannesson o.fl., 2015] er náman (Skurðsbrúnir) nefnd Bakkaá.

³ Sýnið er fengið úr tveim borkjörnum sem voru teknir úr námustæðinu og malaðir niður í hæfilegar stærðir til prófunar. Þeir hafa merkin HHK-28 og HHK-32. Gangfræðileg prófun varaði í 1.000.000 sveiflur. Sams konar sýni var prófað í 2. áfanga verkefnisins en varaði aðeins í 170.000 sveiflur í gangfræðilegu prófi vegna ákvæðis í prófunarfyrirmælum (um að prófun skyldi hætt þegar samþjöppun sýnisins hefði náð 10 %).

⁴ Í áfangaskýrslu 1 [Ásbjörn Jóhannesson o.fl., 2014] er náman (Afstapahraun) nefnd Kúagerði, fyrra námunr. var 441-16-02.

⁵ BG-stuðull er mældur með Standard Proctor þjöppun og á samskonar efni og var notað í gangfræðilega prófun, þ.e; efni sem smýgur 4 mm sikti er siktað frá fyrir prófun. Í hefðbundinni mælingu á Bg-stuðli er notuð Modified Proctor þjöppun og efni sem er smærra en 63 µm er þvegið úr sýninu fyrir prófun [Vegagerðin 2015, bls. 5-12].

⁶ Flokkun skv. kröfum til slitlagsefnis.

⁷ Efnið í 2. flokki er ferskt, blöðrótt basalt, en efnið í 3. flokki er basaltgjall og vikur.

⁸ Meðaltal prófana á tveimur borkjörnum, HHK-28 og HHK-32 [H5/15, 2015].

(ekki Modified Proctor þjöppun eins og verklýsingar mæla fyrir um) og á sýni sem hefur sama sáldurferil og það sem fer í gangfræðilega prófun. Notagildi steinefnanna (umferðarþol) í burðarlag er metið skv. kröfum í leiðbeiningum frá Vegagerðinni [Vegagerðin, 2015, bls. 5-24 til 5-42]. Mat á notagildi er ekki tæmandi, því upplýsingar um sáldurferil, frostþol, brothlutfall og kornalögun vantar, og þær gætu rýrt notagildið.

Í þessari skýrslu er úrvinnsla gagna byggð á prófananiðurstöðum úr öllum áföngunum þremur, þ.e. sex sýnum af steinefnum úr jafnmörgum námum.

Öll sýni hafa sama sáldurferil þegar þau eru byggð inn fyrir þríasprófið. Þau brotna óhjákvæmilega niður meðan á innbyggingunni stendur. Niðurbrot í innbyggingu er metið með því að sikta eitt sýni (af hverju steinefni) eftir innbyggingu og án frekari prófunar. Niðurbrot sem þá verður er síðan dregið frá mældu niðurbroti eftir gangfræðilega prófun (sem er samsett úr niðurbroti í innbyggingu og niðurbroti í gangfræðilegri prófun). Ennfremur má gera ráð fyrir því að eitthvert niðurbrot verði við siktun, en það er talið vera svipað hvort sem siktun eftir gangfræðilega prófun eða siktun eftir innbyggingu á í hlut svo að áhrif þess á niðurstöðu prófunarinnar hverfa við leiðréttingu vegna niðurbrots í innbyggingu. Í skýrslu um 1. áfanga verkefnisins [Ásbjörn Jóhannesson o.fl., 2014] er rökstuðningur fyrir vali á aðferð við gangfræðilega prófun, m.a. með vísan til heimilda.

Hinn gangfræðilegi hluti prófunarinnar er í stórum dráttum á þessa leið:

1. Prófunin er gerð í þríasataeki og er takmörkuð við kornastærðina 4-16 mm. Prófunin er gerð á sívalningslaga sýni sem er 100 mm í þvermál og 200 mm hátt. Í innbyggingu er sýnið þjappað þannig að rúmþyngdin samsvari Standard Proctor rúmþyngd.
2. Rakastig sýnisins við innbyggingu og prófun svarar til mettivatns í yfirborðsþurru efni (e. saturated surface dry).
3. Sýnið er ræst út úr prófunarhylkinu meðan á prófun stendur, þannig að þrýstingur inni í sýninu er jafn ríkjandi loftþyngd.
4. Endaálag við prófun fylgir sínusferli milli 200 kPa og 900 kPa. Hliðarálag er stöðugt, 200 kPa. Sveiflutíðni er 2Hz.
5. Prófuninni er fram haldið þar til annað af tvennu gerist; sýnið gengur saman um 20 %⁹ (40 mm) eða sveiflufjöldinn nær einni milljón.
6. Að prófun lokinni er sáldurferill sýnisins ákvarðaður á bilinu 63 μ m til 16 mm. Sáldurferill fínefnis (smærra en 63 μ m) er ákvarðaður sérstaklega.

Nokkru nánari lýsingu á prófunaraðferðinni er að finna í skýrslu um 1. áfanga verkefnisins [Ásbjörn Jóhannesson o.fl., 2014].

Niðurbrot var mælt á tveim sýnum af efni frá Vatnsskarði (annars einu sýni af hverju efni). Þetta var gert til að fá einhverja vísbendingu um tvímælingagildi (e. repeatability) mælingarinnar.

Sáldurferlar sýnanna sem voru prófuð í 3. áfanga; a) fyrir innbyggingu í þrías (ferillinn er eins fyrir öll steinefnin), b) eftir innbyggingu og c) eftir innbyggingu og gangfræðilega prófun, eru sýndir í viðauka I. Niðurstöður berggreininga á prófunarsýnum eru sýndar í viðauka II. Línurit af varanlegri samþjöppun sýnanna á fyrstu og síðustu 200 sveiflunum eru sýnd í viðauka III. Samsvarandi upplýsingar fyrir sýni sem voru prófuð í 1. og 2. áfanga er að finna í áfangaskýrslum 1 og 2 [Ásbjörn Jóhannesson o.fl., 2014; Ásbjörn Jóhannesson o.fl., 2015]. Niðurstöður mælinga á Bg-stuðli (eftir Standard Proctor þjöppun) eru sýndar í viðauka IV.

⁹ Þetta ákvæði er breytt frá fyrri áföngum, var áður 10 % (20 mm).

3. NIÐURSTÖÐUR PRÓFANA

3.1 Mælikvarðar á niðurbrot í gangfræðilegu prófi

Sáldurferill sýnanna tekur breytingum í prófunarferlinu og þær má nota á ýmsa vegu til að meta niðurbrot. Hér eru þrjú kostir nefndir en fleiri standa til boða.

Ein aðferð er að mæla breytingu í sáldri (eða í siktileif) fyrir hvern stærðaflokk efnisins. Þessi aðferð lýsir vel efnistapi í grófasta stærðaflokki prófsýnisins og efnisaukningu í öllum stærðaflokkum undir þeim fíngerðasta. Hins vegar er hún gagnslítill fyrir sérhvern stærðaflokk þar á milli því að mylsna úr stærðaflokknum fyrir ofan bætist við í mælda flokknum en mylsna sem myndast í mælda flokknum lendir í næsta flokki fyrir neðan. Breyting á efnismagni í mælda flokknum sýnir þar af leiðandi aðeins hvort niðurbrot í honum er meira eða minna en í næsta flokki fyrir ofan [Leslie, 1963, bls. 195-199].

Önnur aðferð er að styðjast við flatarmálið á milli tveggja ferla á sáldurlínuriti með línulegan kornastærðaás, annars vegar sáldurferilsins og hins vegar beinnar línu sem tengir saman tvo punkta á sáldurlínuritinu; annar er valinn á línunni sem markar 0 % sáldur, hinn á samsvarandi línu fyrir 100 % sáldur. Með samanburði á flatarmáli fengnu á þennan hátt fyrir prófun, og öðru fengnu á sama hátt eftir prófun, má grundvalla formúlu fyrir niðurbroti [Lackenby o.fl., 2007, bls. 529].

Þriðja aðferðin er að mæla uppsafnað niðurbrot líkt og gert er þegar Bg-stuðull er mældur [Jón Skúlason, 1979, bls. 2].

Í þessari rannsókn var niðurbrot í gangfræðilegu prófi mælt á tvo vegu, annars vegar sem hlutfall sýnis sem smýgur 4 mm sikti eftir prófun (sýnið var hreinsikað á 4 mm sikti fyrir prófun), hins vegar sem hlutfall sýnis sem smýgur 63 µm sikti eftir prófun. Auk þess var kannað hversu stór hluti fínefnis (<63 µm) sem myndast við prófunina er smærri en 20 µm.

3.2 Breytingar á sáldurferli við prófun

Öll sýnin voru hreinsiktuð á 4 mm sikti og höfðu sama sáldurferil áður en þau voru byggð inn í þrías til gangfræðilegrar prófunar. Sáldurferillinn er sýndur í viðauka I. Í sama viðauka eru sýndir sáldurferlar prófunarsýnanna eftir innbyggingu sýnis í gangfræðilegt próf og enn fremur að prófinu loknu. Lykiltölur úr þessum sáldurferlum eru birtar í töflu 3.1, þ.e. mæliniðurstöður á sáldri gegnum 4 mm og 63 µm sikti eftir innbyggingu sýnis í gangfræðilegt próf og að gangfræðilegu prófi loknu. Í töflunni eru einnig birtar tölur um niðurbrot í gangfræðilegu prófi að teknu tilliti til niðurbrots sem verður meðan á innbyggingu sýnisins stendur (nánar í áfangaskýrslu 2, bls. 5). Taflan nær til allra sýnanna sem voru prófuð í þessu verkefni.

Öll sýnin sem voru prófuð í þessum (þriðja) áfanga stóðust 1.000.000 sveiflur í prófun. Skurðsbrúnir hafði áður verið prófað (í 2. áfanga, próf A) en þá var prófun hætt eftir 170.000 sveiflur í samræmi við prófunarfyrirmæli, þar sem sýnið hafði þá gengið saman um 10 %. Í þessum (þriðja) áfanga leyfðu prófunarfyrirmælin allt að 20 % samþjöppun eða 1.000.000 sveiflur, og skyldi prófun hætt þegar öðru hvoru markinu væri náð.

Tafla 3.1. Sáldur gegnum 4 mm og 63 μ m sikti á ýmsum stigum prófunar og reiknað niðurbrot í gangfræðilegu prófi í þrías¹⁰.

	Sáldur á ýmsum stigum prófunar					
	Eftir innbyggingu		Eftir gangfræðilegt próf		Niðurbrot í prófi (mylsna)	
Efni (námuheiti)	4 mm [%]	63 μ m [%]	4 mm [%]	63 μ m [%]	4 mm [%]	63 μ m [%]
Afstapahraun	0,9	0,2	5,7	0,5	4,8	0,3
Grímsá	0,7	0,2	1,9	0,3	1,2	0,1
Lambafell	0,7	0,1	2,0	0,3	1,3	0,2
Skurðsbrúnir, próf A ¹¹	3,3	0,5	12,8	1,9	9,5	1,4
Skurðsbrúnir, próf B	-	-	21,1	2,7	17,8	2,2
Stapafell	6,1	0,6	14,1	1,0	8,0	0,4
Vatnsskarð, próf A	1,1	0,3	3,3	0,3	2,2	0,0
Vatnsskarð, próf B	-	-	3,8	0,5	2,7	0,2

3.3 Þyngdarhlutfall mylsnu eftir gangfræðilegt próf

Í þessum kafla er gerð grein fyrir mylsnu, bæði grófri og fíngerðri, sem myndast við gangfræðilega prófun í þrías og sambandi hennar við niðurstöður þriggja hefðbundinna styrkleikaprófana, þ.e. LA-gildi, kverni (kvarnargildi) og Bg-stuðul (Standard Proctor þjöppun).

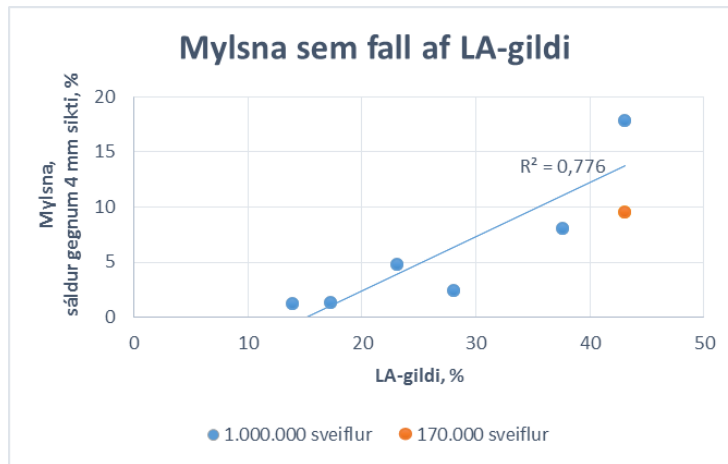
3.3.1 Samband grófrar mylsnu og styrkleika

Með grófri mylsnu er átt við efni sem smýgur 4 mm sikti eftir gangfræðilega prófun að frádregnu samskonar efni sem verður til við innbyggingu sýnisins í þrías.

Mynd 3.1 sýnir samband LA-prófs (sjá töflu 2.1) og mylsnu smærri en 4 mm (sjá töflu 3.1), þ.e. þyngdarhlutfall sýnis sem smýgur 4 mm sikti eftir gangfræðilegt próf í þrías að frádregnum þeim hluta sem verður til við innbyggingu sýnisins.

¹⁰ Sýnin voru hreinsikuð á 4 mm sikti fyrir prófun. Próf á Vatnsskarðsefni var tvítekið til að afla upplýsinga um tvímælingagildi, sjá kafla 3.7. Gangfræðilegri prófun á öðru sýninu frá Skurðsbrúnum (próf A) var hætt eftir 170.000 sveiflur, svo að niðurbrot þess í prófinu er vantalið í samanburði við önnur efni í töflunni. Prófið var síðan endurtekið (próf B) með venjulegum (1.000.000) sveiflufjölda.

¹¹ Gangfræðilegu prófi var að jafnaði hætt þegar annað hvort af tveim skilyrðum hafði verið uppfyllt; að sveiflufjöldinn hefði náð einni milljón eða að sýnið hefði gengið saman um 10 % (20 mm). Niðurbrot í þessari prófun (Skurðsbrúnir, próf A) er ekki sambærilegt við aðrar niðurstöður í töflunni, þar sem prófinu var hætt eftir riflega 170.000 sveiflur; þá hafði sýnið gengið saman um 10 %. Öðrum prófunum var haldið áfram þar til 10⁶ sveiflum var náð.

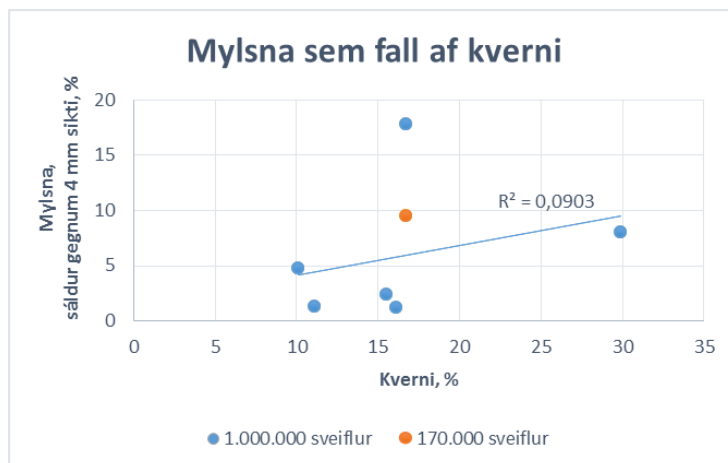


Mynd 3.1. Mylsna eftir gangfræðilegt próf sem fall af Los Angeles (LA-) gildi. Mylsnan er ákvörðuð sem hlutfall sýnisins sem smýgur 4 mm sikti eftir prófun. Appelsínuguli punkturinn, sem táknar Skurðsbrúnir eftir 170.000 sveiflur, er undanskilinn við ákvörðun línunnar.

Mynd 3.1 gefur til kynna að sambandið milli hlutfalls mylsnu, sem smýgur 4 mm sikti eftir gangfræðilega prófun, og LA-gildis sýnisins geti verið línulegt. Línulegt líkan með LA-gildi sem skýringarbreytu skýrir um 78 % breytilekans í mylsnuhlutfalli ($R^2=0,78$), sem nægir til að hafna tilgátu um að ekkert samband sé á milli LA-gildis og mylsnu, miðað við 5 % marktæktarkröfu¹². Hins vegar er líkanið ótraust því það uppfyllir ekki kröfur um dreifingu leifa.

Afstaða punktanna til línunnar getur bent til þess að hlutfall mylsnu aukist hraðar eftir því sem LA-gildið hækkar en mælingarnar eru of fáar til að skera úr um það.

Mynd 3.2 sýnir samband kvernis (kvarnargildis, sjá töflu 2.1) og mylsnu smærri en 4 mm (sjá töflu 3.1), þ.e. hlutfall sýnis sem smýgur 4 mm sikti eftir gangfræðilegt próf í þrías að frádregnum þeim hluta sem verður til við innbyggingu sýnisins.

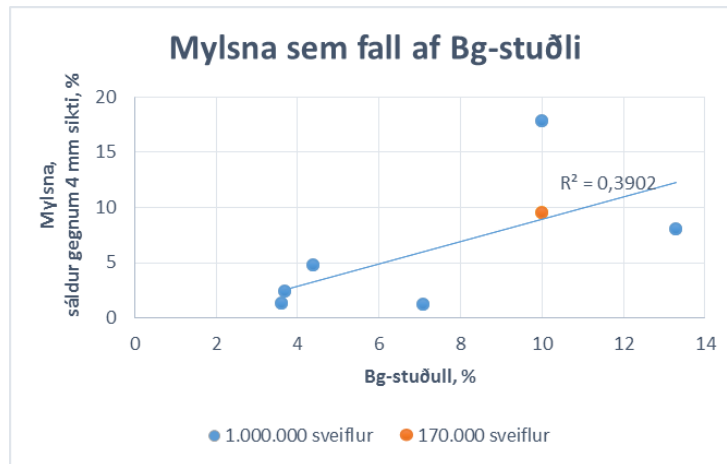


Mynd 3.2. Mylsna eftir gangfræðilegt próf sem fall af kverni (kvarnargildi). Mylsnan er hlutfall sýnisins sem smýgur 4 mm sikti eftir prófun. Appelsínuguli punkturinn, sem táknar Skurðsbrúnir eftir 170.000 sveiflur, er undanskilinn við ákvörðun línunnar.

¹² Marktæktarkrafa táknar mestu fyrirfram ákveðnar líkur á að hafna núlltilgátu í tölfræðilegri prófun (hér; að ekkert samband sé á milli kvernis (kvarnargildis) og mylsnuhlutfalls) þegar hún er sönn.

Samkvæmt mynd 3.2 er sambandið milli mylsnuhlutfalls og kvernis afar veikt, ef nokkuð, skýringarhlutfall línulegs líkans (R^2) er aðeins um 0,1 sem er víðs fjarri því að nægja til að hafna tilgátu þess efnis að ekkert samband sé á milli kvernis og mylsnu (miðað við 5 % marktæktarkröfu). Punkturinn sem táknar Skurðsbrúnir eftir 1.000.000 sveiflur er einna mest á skjön við aðra punkta á línuritinu. Ef hann er tekinn út hækkar skýringarhlutfallið í 51 %, en það nægir ekki til að hafna tilgátu um að ekkert samband sé á milli LA-gildis og mylsnu, miðað við 5 % marktæktarkröfu.

Mynd 3.3 sýnir samband Bg-stuðuls (eftir Standard Proctor þjöppun, sjá töflu 2.1) og mylsnu smærri en 4 mm (sjá töflu 3.1), þ.e. hlutfall sýnis sem smýgur 4 mm sikti eftir gangfræðilegt próf í þrías að frádregnum þeim hluta sem verður til við innbyggingu sýnisins.



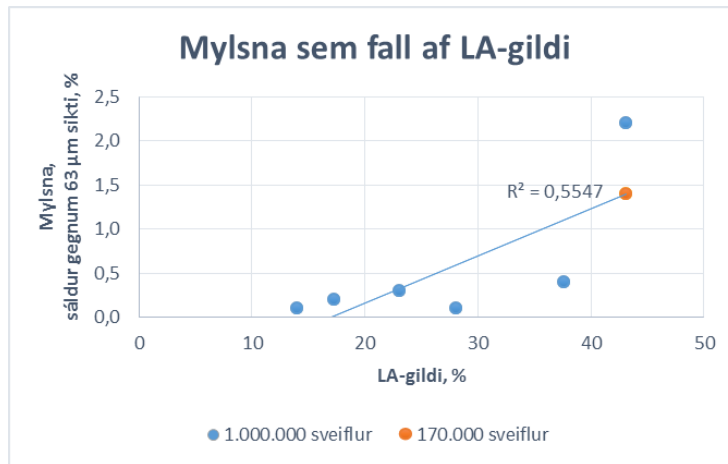
Mynd 3.3. Mylsna eftir gangfræðilegt próf sem fall af Bg-stuðli (Standard Proctor þjöppun). Mylsnan er ákvörðuð sem hlutfall sýnisins sem smýgur 4 mm sikti eftir prófun. Appelsínuguli punkturinn, sem táknar Skurðsbrúnir eftir 170.000 sveiflur, er undanskilinn við ákvörðun línunnar.

Mynd 3.3 útilokar ekki að sambandið milli hlutfalls mylsnu, sem smýgur 4 mm sikti eftir gangfræðilega prófun, og Bg-stuðuls sýnisins (eftir Standard Proctor þjöppun) geti verið línulegt. En hún sýnir einnig að sambandið er mjög veikt; skýringarhlutfall línulegs líkans fyrir sambandið er aðeins 0,39 sem er fjarri því að nægja til að hafna tilgátu um að ekkert samband sé á milli Bg-stuðuls og mylsnu, miðað við 5 % marktæktarkröfu. Líkt og á mynd 3.2 er það punkturinn sem táknar Skurðsbrúnir á línuritinu sem einna helst sker sig úr með hátt hlutfall mylsnu miðað við Bg-stuðul. Ef hann er tekinn út hækkar skýringarhlutfallið í 58 %, sem nægir þó ekki til að hafna tilgátu um að ekkert samband sé á milli LA-gildis og mylsnu, miðað við 5 % marktæktarkröfu.

3.3.2 Samband fíngerðar mylsnu og styrkleika

Með fíngerðri mylsnu er átt við efni sem smýgur 63 μ m sikti eftir gangfræðilega prófun að frádregnu samskonar efni sem verður til við innbyggingu sýnisins í þrías.

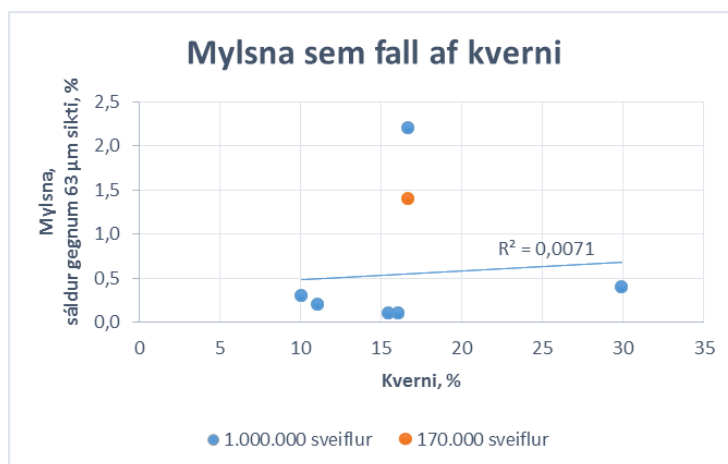
Mynd 3.4 sýnir samband LA-prófs (sjá töflu 2.1) og fíngerðrar mylsnu (sjá töflu 3.1), þ.e. hlutfall sýnis sem smýgur 63 μ m sikti eftir gangfræðilegt próf í þrías að frádregnum þeim hluta sem verður til við innbyggingu sýnisins.



Mynd 3.4. Fínefnismylsna eftir gangfræðilegt próf sem fall af Los Angeles (LA-) gildi. Mylsnan er ákvörðuð sem hlutfall sýnisins sem smýgur 63 μm síkti eftir prófun. Appelsínuguli punkturinn, sem táknar Skurðsbrúnir eftir 170.000 sveiflur, er undanskilinn við ákvörðun línunnar.

Mynd 3.4 gefur til kynna að línulegt samband milli hlutfalls mylsnu, sem smýgur 63 μm síkti eftir gangfræðilega prófun, og LA-gildis sýnisins sé hæpin tilgáta. Línulegt líkan með LA-gildi sem skýringarbreytu skýrir raunar 55 % breytileikans í mylsnuhlutfalli, en það nægir ekki til að hafna tilgátu um að ekkert samband sé á milli LA-gildis og mylsnu, miðað við 5 % marktæktarkröfu. Myndin sýnir jafnframt að einn punktur (Skurðsbrúnir) hefur veruleg áhrif á legu línunnar, sem rýrir enn frekar trúverðugleika línulegs líkans. Ef hann er tekinn út lækkar skýringarhlutfallið enn frekar (í 44 %).

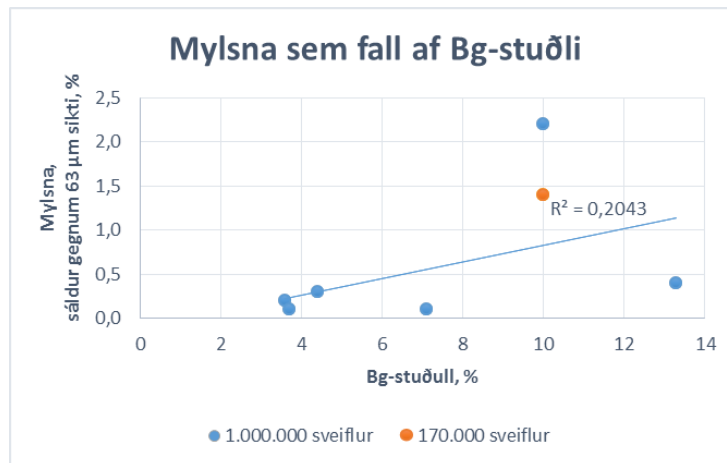
Mynd 3.5 sýnir samband kvernis (kvarnargildis, sjá töflu 2.1) og fíngerðrar mylsnu (sjá töflu 3.1), þ.e. hlutfall sýnis sem smýgur 63 μm síkti eftir gangfræðilegt próf í þrías að frádregnum þeim hluta sem verður til við innbyggingu sýnisins.



Mynd 3.5. Fínefnismylsna eftir gangfræðilegt próf sem fall af kverni (kvarnargildi). Mylsnan er ákvörðuð sem hlutfall sýnisins sem smýgur 63 μm síkti eftir prófun. Appelsínuguli punkturinn, sem táknar Skurðsbrúnir eftir 170.000 sveiflur, er undanskilinn við ákvörðun línunnar.

Mynd 3.5 gefur enga ástæðu til að ætla að kverni segi fyrir um magn fínefnis sem myndast við gangfræðilega prófun. Línulegt líkan með kverni (kvarnargildi) sem skýringarbreytu skýrir aðeins um 1 % breytileikans í mylsnuhlutfalli. Einn punktur á myndinni (Skurðsbrúnir) sker sig gersamlega úr, en þótt hann sé felldur út bætir það líkanið ekki að neinu ráði.

Mynd 3.6 sýnir samband Bg-stuðuls (eftir Standard Proctor þjöppun, sjá töflu 2.1) og fíngerðrar mylsnu (sjá töflu 3.1), þ.e. hlutfall sýnis sem smýgur 63 μm sikti eftir gangfræðilegt próf í þrías að frádregnum þeim hluta sem verður til við innbyggingu sýnisins.



Mynd 3.6. Fínefnismylsna eftir gangfræðilegt próf sem fall af Bg-stuðli (eftir Standard Proctor þjöppun). Mylsnan er ákvörðuð sem hlutfall sýnisins sem smýgur 63 μm sikti eftir prófun. Appelsínuguli punkturinn, sem táknar Skurðsbrúnir eftir 170.000 sveiflur, er undanskilinn við ákvörðun línunnar.

Mynd 3.6 gefur til kynna að Bg-stuðull (eftir Standard Proctor þjöppun) skýri að mjög litlu leyti magn fínefnis sem myndast við gangfræðilega prófun. Línulegt líkan með Bg-stuðul sem skýringarbreytu skýrir aðeins 20 % breytileikans í mylsnuhlutfalli, sem er langt frá því að nægja til að hafna tilgátu um að ekkert samband sé á milli Bg-stuðuls og mylsnu, miðað við 5 % marktæktarkröfu. Þótt punkturinn sem einna mest sker sig úr á myndinni (Skurðsbrúnir) sé felldur út bætir það líkanið ekki að neinu ráði.

3.4 Áhrif fíngerðar mylsnu á frostnæmi og vatnsnæmi

Leiðbeiningar Vegagerðarinnar [Vegagerðin, 2015, bls. 5-4] um val á burðarlagsfni gera kröfur um að þyngdarhlutfall efnis sem er smærra en 20 μm , reiknað af þeim hluta burðarlagsins sem er smærri en 22 mm, sé ekki hærra en 3 %. Að gangfræðilegum prófunum loknum var sáldurferill fíngerðrar mylsnu mældur til þess kanna líkur á að mylsnan ryfi þetta hámark. Mælingin var gerð í ljörva [Arnþór Óli Arason o.fl., 2004] og á kornastærðabilinu 2-63 μm . Ágrip niðurstaðna er sýnt í töflu 3.2. Aðeins sá hluti sem verður til við gangfræðilega prófun er tekinn með, niðurbrot sem verður í innbyggingu er undanskilið.

Tafla 3.2. Þyngdarhlutfall mjög smárra korna (< 20 µm) sem myndast við gangfræðilega prófun á sýnum í þrías.

Efni (námuheiti)	Þyngdarhlutfall af fínefni (< 63 µm)	Þyngdarhlutfall af heildarsýni	
	< 20 µm, %	< 63 µm, %	< 20 µm, %
Afstapahraun	65	0,3	0,2
Skurðsbrúnir A ¹³	52	1,4	0,7
Skurðsbrúnir B	57	2,2	1,3
Grímsá	54	0,1	0,1
Lambafell	64	0,2	0,1
Vatnsskarð A	47	0,0	0,0
Vatnsskarð B	60	0,2	0,1
Stapafell	50	0,4	0,2

Niðurstöður í töflu 3.2 sýna að í flestum tilfellum er sá hluti efnisins óverulegur, sem er smærri en 20 µm og myndast við gangfræðilega prófun, í mesta lagi um 0,2 % af þeim hluta sem er smærri en 22 mm. Undantekningin er efnið frá Skurðsbrúnum þar er tilsvareandi hluti 1,3 % (eftir 1.000.000 sveiflur).

Ef þessar niðurstöður gefa rétta mynd af myndun fínefnis í burðarlagi undir umferð, er ljóst að það er mjög lítið. Efni sem er smærra en 20 µm og myndast undir umferð er samkvæmt þessu í flestum tilfellum minna en tíundi hluti þess sem það má mest vera samkvæmt leiðbeiningum Vegagerðarinnar. Jafnvel fyrir Skurðsbrúnir, sem er mjög lélegt burðarlagsefni (ónothæft skv. kröfum Vegagerðarinnar, sjá töflu 2.1) nær hlutinn sem er smærri en 20 µm ekki helmingi af hámarksgildinu. Hitt verður að hafa í huga að við útlögn burðarlagsefnis og þjöppun verður niðurbrot sem, ásamt upprunalegu fínefni í burðarlagsefninu, getur ef til vill riðið baggamuninn.

Leiðbeiningar Vegagerðarinnar um val á burðarlagsefni gera ennfremur kröfur um að þyngdarhlutfall fínefnis (þ.e. smærra efni en 63 µm) sé ekki hærra en 5 % [Vegagerðin 2015, bls. 5-39], og er þá miðað við þann hluta burðarlagsefnisins sem er smærri en 22 mm. Þessi krafa á að tryggja að burðarlagsefnið sé ekki vatnsnæmt.

Samkvæmt töflunni hér að ofan er fínefni sem myndast í gangfræðilegri prófun mjög lítið, minna en tíundi hluti af því sem áður nefndar kröfur leyfa. Efnið frá Skurðsbrúnum er undanskilið, enda lélegt. Ef gangfræðileg prófun gefur rétta mynd að niðurbroti undir umferð má telja nánast útilokað að fínefnamyndun í burðarlagi undir umferð sem stenst hefðbundnar styrkleikakröfur sé svo mikil að hún verði til þess að burðarlagsefnið verði vatnsnæmt.

Ekki er hægt að útiloka að í einhverjum tilfellum geti samanlagt niðurbrot við útlögn og niðurbrot undir umferð rofið hámarkið, en sennilega tekur krafa Vegagerðarinnar um fínefnainnihald tillit til líklegs niðurbrots meðan á útlögn stendur.

¹³ Prófun á þessu sýni var hætt eftir 170.000 sveiflur. Önnur sýni voru látin sæta 1.000.000 sveiflum.

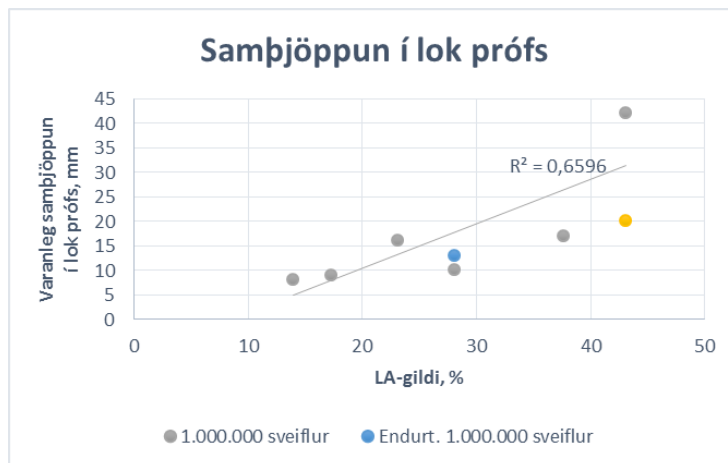
3.5 Varanleg samþjöppun

Tafla 3.3 sýnir varanlega samþjöppun sýna við prófun, annars vegar eftir 200 sveiflur, hins vegar í lok prófunar, þ.e. eftir 1.000.000 sveiflur (nema Skurðsbrúnir A, þar var prófun hætt eftir 170.000 sveiflur), sjá viðauka III. Varanleg samþjöppun er mæld sem breyting á hæð sýnis frá prófunarbyrjun og þar til tilteknum sveiflufjölda er lokið. Aflestur er í báðum tilfellum gerður í slökunarstöðu álags svo að fjöðrun í sýninu hefur ekki áhrif á niðurstöðuna.

Tafla 3.3. Varanleg samþjöppun í prófunarsýnum í byrjun og lok gangfræðilegs prófs.

Efni (námuheiti)	Varanleg samþjöppun	
	Eftir 200 sveiflur, mm	Að prófun lokinni, mm
Afstapahraun	6	16
Grímsá	4	8
Lambafell	6	9
Skurðsbrúnir, próf A	6	20 ¹⁴
Skurðsbrúnir, próf B	10	42
Stapafell	5	17
Vatnsskarð, próf A	4	10
Vatnsskarð, próf B	5	13

Mynd 3.7 sýnir varanlega samþjöppun í lok gangfræðilegs prófs sem fall af LA-gildi. Hún gefur til kynna að samþjöppunin skýrist að nokkru leyti af LA-gildi steinefnisins. Skýringarhlutfallið er nægilega hátt til að hafna tilgátu um að ekkert samband sé á milli LA-gildis og varanlegrar samþjöppunar, miðað við 5 % marktæktarkröfu¹⁵. Hins vegar gefa athuganir á leifum til kynna að samband varanlegrar samþjöppunar og LA-gildis sé ekki endilega línulegt.



Mynd 3.7. Varanleg samþjöppun í gangfræðilegu prófi sem fall af LA-gildi. Gul punkturinn táknar samþjöppun í sýni frá Skurðsbrúnunum eftir 170.000 sveiflur, sá blái (og grár punktur á sömu lóðlínu) tákna varanlega samþjöppun í sýnum frá Vatnsskarði eftir 1.000.000 sveiflur. Lega línunnar ákvarðast einvörðungu af gráu punktunum.

¹⁴ Afbrigðilegur sveiflufjöldi; prófun var hætt eftir 170.000 sveiflur.

¹⁵ Marktæktarkrafa táknar mestu fyrirfram ákveðnar líkur á að hafna núlltilgátu í tölfræðilegri prófun (hér; að ekkert samband sé á milli LA-gildis og varanlegrar samþjöppunar) þegar hún er sönn.

3.6 Holrýmd í prófunarsýnum í byrjun prófs

Tafla 3.4 sýnir holrýmd í prófunarsýnum eftir innbyggingu í þrías og áður en gangfræðileg prófun hófst. Holrýmdin er lítið eitt mismunandi eftir steinefnum, á bilinu 37 til 41 %. Þar sem öll sýnin höfðu sama sáldurferil í upphafi prófs er líklegt að mismunurinn í holrýmd stafi af mismun á lögum kornanna í sýnunum.

Til samanburðar má geta þess að holrýmd í steinefni með þéttum sáldurferli getur verið 20 %, jafnvel minni [Wallace o.fl., 1967, bls. 67]. Há holrýmd eykur líkur á niðurbroti þar eð snertipunktur steinefnakornanna verða færri. Það má því gera ráð fyrir að niðurbrot sýna í gangfræðilegu prófi eins og hér er lýst sé meira en í burðarlagi úr sama steinefni með hefðbundnum (þéttum) sáldurferli. Sömuleiðis má ætla að mikið niðurbrot í sýni frá Skurðsbrúnum sé ekki vegna afbrigðilegar kornalögunar, þar sem holrýmdin er svipuð og í hinum sýnunum.

Tafla 3.4. Holrýmd í prófunarsýnum í byrjun gangfræðilegs prófs.

Sýni	Holrýmd í sýni, [%]
Afstapahraun	41
Grímsá	37
Lambafell	40
Skurðsbrúnir	38
Stapafell	41
Vatnsskarð	40

3.7 Tvímælingagildi á niðurbrotsmælingum

Mælingar á niðurbroti eftir gangfræðilegt próf (að frádregnu niðurbroti við innbyggingu) voru tvíteknar á burðarlagsefni frá Vatnsskarði til þess að fá einhverja hugmynd um tvímælingagildi (e. repeatability) prófunaraðferðarinnar. Niðurstöðurnar eru sýndar í töflu 3.1; sýnin eru aðgreind sem próf A og próf B.

Samkvæmt þessum niðurstöðum er staðalfráviknið 0,35 á sáldri gegnum 4 mm sikti, og 0,14 á sáldri gegnum 63 µm sikti. Þessar tölur svara til tvímælingagilda sem eru 1,0 % fyrir sáldur gegnum 4 mm sikti og 0,4 % fyrir sáldur gegnum 63 µm sikti¹⁶. Þessi tvímælingagildi eru lægri en vænta mætti fyrir siktunina eina sér [ASTM C 136 – 96a, 1999, bls. 80].

¹⁶ Tvímælingagildi gefur eftirfarandi upplýsingar:

Ef mismunur tveggja mælinga, sem eru gerðar af sama manni á sitt hvoru sýninu, með sömu aðferð, sömu tækjum, á sömu rannsóknastofu og með stuttu millibili, er minni en tvímælingagildið, eru litlar líkur (<5 %) á að mældur eiginleiki sýnanna tveggja sé í raun mismunandi.

4. UMRÆÐA OG ÁLYKTANIR

Í þessari rannsókn var gangfræðilegu prófi beitt til að líkja eftir álagi frá umferð á óbundið burðarlag í vegi með klæðingarslitlagi. Sýni af burðarlagsefni voru byggð inn í þrías og látin sæta 1.000.000 álagssveiflum sem svarar nokkurn veginn til umferðar þungra bíla á 10 ára tímabili á vegi með 3000 bíla umferð á sólarhring. Hæðin á sýnunum var 20 cm, sem er algeng þykkt á burðarlagi í vegi með þessari umferð og klæðingarslitlagi. Hámarksálag á sýnið í hverri sveiflu var 900 kPa, sem svarar til leyfilegs hámarksþrýstings í hjólbarða skv. reglugerð um gerð og búnað ökutækja [Samgönguráðuneytið, 2004, 16. grein].

4.1 Kostir og gallar prófunaraðferðarinnar

Gangfræðileg prófunaraðferð hefur ýmsa kosti en einnig vissa galla. Álagsþátturinn í prófunarfyrirkomulaginu sýnist vera trúverðug eftirlíking álags frá umferð þungra bíla á burðarlag í vegi. Sömuleiðis líkir umbúnaður sýnisins nokkuð vel eftir raunverulegum aðstæðum í burðarlagi. Að þessu leyti stendur prófunaraðferðin hefðbundnum aðferðum frammar (sem margar hverjar eiga lítið skylt við raunverulegar aðstæður og álag í vegi).

Helstu gallar eru þeir að í fyrsta lagi tekur prófunaraðferðin ekkert tillit til léttra bíla sem oft eru um 90 % af umferðinni. Það kemur þó tæplega að sök því samkvæmt fjórða veldis reglunni [Evensen o.fl., 1992, bls. 9-10] eiga léttir bílar lítinn þátt í hrörnun vega. Í öðru lagi er sáldurferill prófunarsýnanna verulega frábrugðinn sáldurferli í hefðbundnu burðarlagsefni, vegna þess að allt efni smærra en 4 mm er sikað frá. Fyrir vikið brotnar sýnið að öllum líkindum meira niður en ella, þar eð snertipunktur kornanna verða færri og þrýstingurinn að sama skapi meiri í hverjum snertipunkti. Í þriðja lagi er hliðarstuðningurinn meiri en gerist í burðarlagi undir klæðingarslitlagi sem eykur líkur á niðurbroti [Lee o.fl., 1967, bls. 70]. Tvær síðastnefndu undantekningarnar benda til þess að niðurbrot í gangfræðilegu prófi eins og hér var beitt sé meira en í raunverulegu burðarlagi. Engu að síður má ætla að prófunaraðferðin gefi niðurstöður, sem í það minnsta raði burðarlagsefnum á skynsamlegan hátt eftir tilhneigingu þeirra til að molna niður undir umferð. Í fjórða lagi er prófunaraðferðin tímafrek og dýr og getur að því leyti ekki keppt við hefðbundin styrkleikapróf á burðarlagsefnum.

4.2 Meginniðurstaða

Niðurstöður rannsóknarinnar styðja tilgátu þess efnis að gangfræðileg prófun í þrías gefi upplýsingar um líklegt niðurbrot burðarlags undir umferð. Þau sex sýni sem voru prófuð spanna breitt gæðabil ef miðað er við styrkleikakröfur Vegagerðarinnar til burðarlagsefna [Vegagerðin, 2015, bls. 5-41 til 5-42]. Í öllum sýnunum kemur fram mælanleg breyting á sáldurferli eftir gangfræðilega prófun í þrías. Ef miðað er við 5 % marktæktarkröfu og tvímælingagildi fyrir sáldurgreiningu [ASTM C 136-96a, 1999, bls. 80] er breytingin í öllum tilfellum marktæk fyrir sáldur gegnum 4 mm sikti. Breytingin er einnig mælanleg fyrir sáldur gegnum 63 µm sikti en aðeins marktæk fyrir sýni frá Skurðsbrúnum, miðað við áðurgreindar forsendur. Þar sem aðstæður í prófinu eru um margt líkar því sem gerist í burðarlagi undir umferð má ætla að prófunaraðferðin sé í sjálfu sér skynsamleg. Hins vegar er þeirri spurningu enn ósvarað hvort niðurbrot í gangfræðilegu prófi sé sams konar og álíka mikið og niðurbrot í burðarlagi, og það verður ekki gert nema með mælingum „in situ“ til samanburðar.

4.3 Nákvæmni og hittni

Tvímælingagildi (e. repeatability) fyrir niðurbrot, mælt sem sáldur gegnum 4 mm og 63 µm sigti eftir gangfræðilega prófun í þrías, eru lág (kafli 3.6), lægri en vænta mætti fyrir sáldurgreininguna eina sér [ASTM C 136-96a, 1999, bls. 80]. Eftir því að dæma er nákvæmni prófunarinnar fyllilega viðunandi

fyrir báðar stærðirnar, en sá hængur er á að tvímælingagildin eru aðeins ákvörðuð fyrir sýni úr einni námu, og þau verður því að taka með fyrirvara meðan víðtækari athuganir liggja ekki fyrir.

Um hittni (e. accuracy) er ekkert hægt að segja, þar sem engar samanburðarmælingar hafa verið gerðar „in situ“ sem er nauðsynleg forsenda.

4.4 Forspárgildi hefðbundinna styrkleikaprófana

Þegar niðurstöður þriggja hefðbundinna styrkleikaprófana, Los Angeles prófs, kúlnakvarnarprófs¹⁷ og Bg-stuðuls (eftir Standard Proctor þjöppun), eru bornar saman við mylsnu sem smýgur 4 mm sikti eftir gangfræðilegt próf kemur í ljós að magn hennar minnkar í öllum tilfellum með vaxandi styrkleika samkvæmt áðurnefndum prófunum. Línulegt samband er sterkast fyrir Los Angeles-gildi (skýringarhlutfall 78 %), næst sterkast fyrir Bg-stuðul (skýringarhlutfall 39 %) en lakast fyrir kúlnakvarnarpróf (skýringarhlutfall 9 %). Einungis fyrstnefnda skýringarhlutfallið er nægilega hátt til að hægt sé að hafna tilgátu þess efnis að ekkert samband sé á milli Los Angeles-gildis og mylsnu, miðað við 5 % marktæktarkröfu. Með öðrum orðum; ef gert er ráð fyrir að niðurbrot í gangfræðilegu prófi sé góður mælikvarði á niðurbrot óbundins burðarlagsefnis undir umferð tákna þetta að Bg-stuðull (eftir Standard Proctor þjöppun) hafi takmarkað gildi til að spá um endingu og kúlnakvarnarpróf ekkert gildi.

Línulegt samband milli mylsnu sem smýgur 63 µm sikti eftir gangfræðilegt próf og niðurstaðna úr áðurnefndum styrkleikaprófunum er afar veikt. Skýringarhlutfallið er á bilinu 0-55 % (hæst fyrir Los Angeles-gildi) og er í öllum tilfellum of lágt til að hafna tilgátu þess efnis að ekkert samband sé á milli mylsnu af þessari stærð eftir gangfræðilega prófun og niðurstöðu viðkomandi prófunaraðferðar (þ.e. Los Angeles-gildis, Bg-stuðuls eða kúlnakvarnarprófs), miðað við 5 % marktæktarkröfu.

Rétt er að undirstrika að þessar ályktanir byggjast á sex mælingum, og skýringarhlutfallið þarf að vera hátt til þess að samband milli háðrar og óháðrar breytu geti talist marktækt þegar mælingarnar eru svona fáar.

Á myndum 3.1-3.6 má sjá að sýni frá Skurðsbrúnum hefur sérstöðu, það brotnar meira niður í gangfræðilegu prófi en búast mætti við út frá niðurstöðum prófana á öðrum efnum í rannsókninni. Þetta sést á því að á öllum myndunum liggur punkturinn sem táknar Skurðsbrúnir fyrir ofan aðhvarfslínuna, í flestum tilfellum langt fyrir ofan hana. Svo virðist sem efnið frá Skurðsbrúnum búi yfir einhverjum veikleikum gagnvart gangfræðilegu álagi, sem ekki koma fram í hefðbundnum styrkleikaprófunum.

4.5 Fínefni og vatnsnæmi

Myndir 3.4-3.6 gefa til kynna að fínefni (þ.e. korn smærri en 63 µm) sem myndast í gangfræðilegu prófi sé minna en 0,5 % af þyngd prófsýnis í fimm sýnum af sex. Undantekningin er efnið frá Skurðsbrúnum, þar er hlutfallið 2,2 %.

Í verklýsingum Vegagerðarinnar [Vegagerðin, 2015, bls. 5-25] er að jafnaði gerð krafa um að þungahlutfall fínefnis í burðarlagi sé að hámarki 5%. Þá er miðað við að fínefnainnihald geti hækkað um 1-2 % við útlögn. Í norskum verklýsingum [Statens vegvesen, 2014, bls. 211] er steinefni ekki talið vatnsnæmt ef fínefnisinnihaldið, reiknað sem þungahlutfall af þeim hluta steinefnisins sem smýgur 22,4 mm sikti, er minna en 7 %.

Fínefni sem myndast við gangfræðilega prófun á sýnunum sem voru prófuð í þessari rannsókn er langtum minna en svo að það sprengi rammann í verklýsingunum. Það er ekki því ástæða til að ætla

¹⁷ Reynslan hefur sýnt að kúlnakvarnarpróf mælir fyrst og fremst slitstyrkleika steinefnis, en hefur lítið forspárgildi fyrir höggþol.

að burðarlagsefni af því tagi sem hér var prófað brotni niður undir umferð í svo miklum mæli það ríði baggamuninn hvað vatnsnæmi snertir, nema því aðeins að burðarlagsefnið sé mjög ríkt af fínefni þegar það er lagt út, eða molni mjög mikið niður meðan á útlögn og þjöppun stendur.

4.6 Áhrif niðurbrots á frostnæmi

Skv. töflu 3.2 lætur nærri að um helmingur fínefnis (þ.e. korn smærri en 63 μm) sem myndast í gangfræðilegu prófi sé smærra en 20 μm . Þessi hluti fínefnisins er talinn eiga þátt í frostnæmi og er þess vegna stundum takmarkaður í verklýsingum.

Í verklýsingum Vegagerðarinnar fyrir burðarlagsefni er í vissum tilfellum gerð krafa um að hlutfall fínefnis sem er smærra en 20 μm sé undir 3%, reiknað sem þungahlutfall af efni sem er smærra en 22 mm [Vegagerðin, 2015, bls. 5-4 og 5-39]. Í norskum verklýsingum [Statens vegvesen, 2014, bls. 211] er burðarlagsefni ekki talið frostnæmt ef magn fínefnis smærra en 20 μm , reiknað sem þungahlutfall af þeim hluta steinefnisins sem smýgur 22,4 mm sikti, er minna en 3 %.

Í töflu 3.2 kemur fram að hlutfall fínefnis undir 20 μm sem myndast við gangfræðilega prófun er í flestum tilfellum á bilinu 0,1-0,2 % reiknað sem þungahlutfall af prófsýni. Undantekningin er efni frá Skurðsbrúnum, þar er hlutfallið 1,3 %. Það eru því afar litlar líkur á að fínefni sem myndast við niðurbrot í burðarlagsefnum af sama tagi og voru prófuð í þessari rannsókn geri þau frostnæm, svo fremi að fínefnisinnihaldið sé ekki nærri leyfðu hámarki fyrir útlögn eða molni verulega niður við útlögn.

4.7 Varanleg samþjöppun

Í töflu 3.3 kemur fram að varanleg samþjöppun á prófunarsýnunum nemur yfirleitt 8-20 mm (á 200 mm háum sýnum) meðan á prófun stendur. Sýnið frá Skurðsbrúnum er þó undantekning, þar er samþjöppunin langtum meiri, eða 42 mm. Línurit af fyrstu 200 sveiflunum (sjá viðauka III) sýna að varanleg samþjöppun í sýnunum er hröðust rétt í byrjun prófunarinnar en síðan hægir hratt á henni. Möguleg skýring á þessari hegðun er að steinarnir í sýnunum breyti afstöðu sinni hver til annars meðan á prófinu stendur, og brotni, einkum í byrjun, enda má heyra brak í sýnunum í fyrstu sveiflunum.

Línurit (ekki sýnt) af varanlegri samþjöppun sem fall af kverni í kúlnakvarnarprófi sýnir lítið eða ekkert samband milli þessara breyta, hvort heldur varanleg samþjöppun er mæld eftir fyrstu 200 sveiflunum eða eftir 1.000.000 sveiflur. Svipuðu máli gegnir um varanlega samþjöppun sem fall af Bg-stuðli. Hins vegar er marktækt samband (sjá mynd 3.7) milli varanlegrar samþjöppunar eftir 1.000.000 sveiflur (en ekki eftir fyrstu 200 sveiflunum) og styrkleika samkvæmt LA-prófi, sé miðað við 5 % marktæktarkröfu; skýringarhlutfallið (R^2) er 0,68 en þarf að vera að vera 0,66 hið minnsta til að hafna tilgátu um að meint tengsl milli varanlegrar samþjöppunar og LA-gildis séu tilviljun.

Sennilega verður einhver samþjöppun í burðarlagi á notkunartíma vegarins og það er ekki fráleitt að ætla að varanleg samþjöppun í prófunarsýni eftir gangfræðilega prófun í þrías geti gefið vísbindingu um hjólför í klæðingarslitlagi sem er lagt á burðarlag úr sama steinefni. Prófunarsýnin eru 20 cm há sem svarar til hefðbundinnar þykktar á burðarlagi úr möluðu bergi [Statens vegvesen, 2014, bls. 225]. Á hinn bóginn er líklegt að samþjöppun meðan á prófun stendur sé til muna meiri en verður í raunverulegu burðarlagi. Ástæðan er sú að holrýmd í prófunarsýninu er meiri en í burðarlagi í vegi, vegna þess að allar kornastærðir smærri en 4 mm vantar í prófunarsýnið.

4.8 Ályktanir

Innan þeirra takmarkana sem rannsókninni eru settar sýnist réttmætt að svara rannsóknaspurningunum í inngangi skýrslunnar á eftirfarandi hátt:

- a) Gangfræðileg prófunaraðferð líkir vel eftir álagi frá umferð á burðarlag, og er að því leyti raunhæf aðferð til að meta líkur á niðurbroti í burðarlagsefni vegna umferðarálags.
- b) Af þeim þrem aðferðum (LA-próf, kúlnakvarnarpróf, Bg-stuðull eftir Standard Proctor þjöppun) til að meta styrkleika burðarlagsefnis sem voru bornar saman við gangfræðilega prófunaraðferð, virðist LA-gildið vera heppilegasti mælikvarðinn á styrkleika.
- c) Mjög lítið myndast af fínefni (smærra en 63 μm eða smærra en 20 μm) í sýnum í gangfræðilegri prófun. Því má telja ólíklegt að fínefni, sem myndast í burðarlagi undir umferð, verði svo mikið að það spilli burðarlaginu.

Niðurstöður rannsóknarinnar gefa jafnframt til kynna að hefðbundin styrkleikapróf geti í undantekningartilfellum stórlega vanmetið niðurbrot burðarlagsefnis undir umferð, því eitt sýnanna (Skurðsbrúnir) brotnar miklu meira niður í gangfræðilegu prófi en ætla mætti af niðurstöðum LA-prófs. Rannsóknin gefur engar vísbendingar um ástæðuna, en nærtækasta ágiskunin er að hennar sé að leita í kristallabyggingu steinefnisins.

5. TILLÖGUR AÐ FRAMHALDSRANNSÓKNUM

Prófunaraðferðinni sem var beitt í þessu rannsóknarverkefni er ætlað að meta styrkleika steinefnis í burðarlagi, og líkur á að það muni með tímanum molna niður undir umferð. Í þessu skyni er sýni af steinefninu látið sæta áraun sem eftir föngum líkist þeirri áraun sem burðarlag í vegi verður fyrir á nýtingartímanum, í meginatriðum sveiflandi álagi og þrýstingi sem svarar til þrýstings frá hjólbarða á þungum bíl. Á þessum forsendum má ætla að prófunaraðferðin sé í stórum dráttum raunhæf eftirlíking af aðstæðum og áraun í vegi og veiti upplýsingar um líkur á að steinefnið molni niður undir umferð. Engu að síður er ljóst að prófunaraðferðin hefur ýmsa vankanta í núverandi mynd og að öllum líkindum er hægt að endurbæta hana.

Hér á eftir eru viðraðar nokkrar tillögur að úrbótum á prófunaraðferðinni ásamt rökstuðningi og hugmyndum að verktilhögun.

1. Prófunaraðferðin er dýr í núverandi mynd og kemur þess vegna ekki til greina sem eftirlitspróf, og aðrar ódýrari aðferðir verða að koma í stað hennar í slíkum tilfellum. Niðurstöður þessarar rannsóknar benda sterklega til þess að þrjár hefðbundnar aðferðir (LA-próf, kúlnakvarnarpróf og Bg-stuðull) til að prófa styrkleika burðarlagsefnis hafi takmarkað forspárgildi fyrir niðurbrot undir sveiflandi álagi. Af þessum þremur aðferðum hefur einungis LA-prófið tölfraðilega marktækt skýringarhlutfall, 78 %, sem er þó ekki sérlega hátt. Þess vegna er æskilegt að reyna fleiri ódýrar aðferðir til styrkleikaprófana. Nokkrar slíkar eru taldar upp í skýrslu frá BUSL [Pétur Pétursson, 1998, bls. 9-14] en sú upptalning er ekki tæmandi.
2. Sáldurferill prófunarsýnanna er talsvert frábrugðinn sáldurferli í hefðbundnu burðarlagi, því kornastærð sýnanna er takmörkuð við við 4 mm að neðan og 16 mm að ofan. Fyrir þessu eru prófunartæknilegar ástæður. Annars vegar takmarkar þríasinn, sem var notaður við prófanirnar, þvermál sýnisins við 100 mm og hlutfallið milli þvermál sýnis og hámark kornastærðar í sýninu er gjarna takmarkað við 4:1 í þríasaprófunum [Leslie, 1963, bls. 192]. Hins vegar er vandkvæðum bundið að meta niðurbrotið ef sýnin innihalda smáar kornastærðir. Að öllum líkindum verður þetta fyrirkomulag til þess að sýnin brotna meira niður en þau myndu gera ef sáldurferill þeirra væri ekki takmarkaður að neðan við 4 mm. Smærri korn í sýnunum myndu væntanlega styðja við stærri kornin og hlífa þeim, enda hafa rannsóknir sýnt að einskorna sýni hafa hærri Bg-stuðul en sýni af sama steinefni með þéttum sáldurferli [Pétur Pétursson, 1998, bls. 12-13]. Af þessari ástæðu er æskilegt að prófa einnig sýni með svipuðum sáldurferli og tíðkast í burðarlagi. Það kallar að öllum líkindum á nýjar aðferðir til að mæla niðurbrot.
3. Mælikvarði sá sem er notaður á niðurbrot í þessari rannsókn er að sumu leyti óheppilegur. Hann veitir aðeins upplýsingar um það hversu mikið hlutfall stærsta stærðaflokksins minnkar við prófunina, og hver sé stærðadreifing þess hluta, sem smýgur neðri stærðamörk sýnisins að prófun lokinni [Leslie, 1963, bls. 195-199]. Aðrir mælikvarðar koma til greina [Sigurður Erlingsson, 1996, bls. 5-6] sem gætu reynst heppilegri.
4. Orsakir aflfræðilegs niðurbrots í burðarlagi eru tvenns konar. Annars vegar eru áhrif frá efnisflutningum og völtun meðan á útlögn burðarlagsins stendur. Hins vegar eru áhrif frá umferðinni eftir að vegurinn er tekinn í notkun. Áraunin frá þessum tveim þáttum er sennilega talsvert ólík; meðan á útlögn stendur stafar hún frá mjög þungum efnisflutningabílum og titringi eða höggum frá völtum, en stendur stutt. Að útlögn lokinni tekur umferðin við en áhrif hennar eru annars eðlis. Sú áraun að vissu leyti takmörkuð vegna takmarkana á leyfðum loftþrýstingi í hjólbörðum, en hún er langvarandi og getur staðið yfir í áratugi. Þar sem áraunin er ólík á þessum tveim tímabilum er líklegt að niðurbrotið sé það

einnig. Prófunaraðferðin sem var notuð í þessu verkefni líkir fyrst og fremst eftir seinna tímabilinu.

Með þetta í huga er æskilegt að kanna hvernig niðurbroti í burðarlagi er háttað í raun, annars vegar meðan á útlögn stendur, hins vegar eftir að vegur er tekinn í notkun. Þá kemur helst til greina að grafa burðarlag upp strax að lokinni útlögn (og áður en slitlag er lagt á veginn), taka sýni af burðarlaginu og bera sáldurferil þeirra saman við sáldurferil burðarlagsefnisins fyrir útlögn. Þessi hluti rannsóknarinnar gæti gefið upplýsingar um einkenni niðurbrots meðan á útlögn stendur. Í annan stað þarf að grafa upp burðarlag sama vegar eftir að hann hefur verið í notkun um nokkurra (t.d. 10 ára) skeið og bera sáldurferla sýna af burðarlaginu saman við sáldurferla af sama burðarlagi fyrir (eða betra; eftir) útlögn. Með þessu móti ætti að vera hægt að fá greinargóða mynd af raunverulegu niðurbroti í burðarlagi vegarins. Þetta þarf að gera á nokkrum tegundum burðarlagsefna; of fáar efnisgerðir geta leitt til villandi niðurstaðna.

5. Gangfræðileg prófun eins og henni hefur verið beitt í þessari rannsókn gefur (með einni undantekningu, Skurðsbrúnir) engar upplýsingar um það hvernig niðurbrot breytist með tíma (eða sveiflufjölda). Niðurstöður gangfræðilegra prófana á efninu frá Skurðsbrúnum benda til þess að um það bil helmingur niðurbrots eftir 1.000.000 sveiflur eigi sér stað á fyrstu 170.000 sveiflunum. Síðan er með öllu óvíst hvað gerist eftir 1.000.000 sveiflur og ekki síður hvort niðurbrotsferillinn breytist á svipaðan hátt hjá öðrum burðarlagsefnum. Þetta væri fróðlegt að athuga nánar.
6. Upplýsingar um hittni (e. accuracy) og nákvæmni (e. precision) prófunaraðferðar eru æskilegar þegar notagildi prófunaraðferðar er metið. Hittni tilgreinir hversu lík prófunarniðurstaðan er réttu gildi. Hittni gangfræðilegrar prófunaraðferðar væri hægt að meta með samanburði á sáldurferlum sýnis eftir gangfræðilega prófun annars vegar og sýnis af burðarlagi löngu eftir útlögn hins vegar. Upplýsinga um nákvæmni er hægt að afla með endurteknum prófunum á samskonar sýni¹⁸.

Vissar upplýsingar liggja fyrir um nákvæmni prófunaraðferðarinnar, sjá kafla 3.7, en engan veginn nægilegar því að nákvæmni getur verið fall af eiginleikum (styrkleika) efnisins sem verið er að prófa. Frekari rannsóknir á hittni og nákvæmni eru þess vegna æskilegar.

7. Óbundið burðarlagsefni er oftast nær miklu grófara en 16 mm og samkvæmt leiðbeiningum Vegagerðarinnar [Vegagerðin, 2015, bls. 5-25] getur hámarks kornastærð verið allt upp í 90 mm. Það verður að teljast líklegt að hámarks kornastærð burðarlags hafi áhrif á niðurbrot þess og þessi áhrif væri æskilegt að kanna. Hins vegar orkar tvímælis að bera niðurstöður gangfræðilegrar prófunar á mjög grófum sýnum saman við niðurstöður hefðbundinna prófunaraðferða (LA-prófs, kúlnakvarnarprófs og Bg-stuðuls) vegna þess að hámarks kornastærð í síðarnefndu prófununum er takmörkuð við 16 mm. Í annan stað þarf þeim mun stærri og öflugri þríasatæki sem sýnin eru grófari, því að þvermál sýnisins þarf að vera minst fjórföld hámarks kornastærð. Engu að síður væri forvitnilegt að beita gangfræðilegri prófun á grófari burðarlagsefni en gert var í þessari rannsókn.

¹⁸ Hittni og nákvæmni má lýsa lauslega þannig:

Ef skotið er til marks á skotskífu lýsir hittnin meðalfjarlægð örvanna frá miðju skotskífunnar. Nákvæmni lýsir því hversu nærri örvanna eru hver annarri. Ef þær eru í þéttum hnapp er nákvæmni góð, jafnvel þótt miðja hans sé langt frá miðju skotskífunnar. Eins er hittnin góð þótt örvanna séu dreifðar út um alla skífuna, ef miðja þeirra er nærri miðju skotskífunnar.

8. Eitt burðarlagsefnanna sem prófuð voru í þessari rannsókn (Skurðsbrúnir) sker sig úr hvað snertir niðurstöður prófana. Í gangfræðilegri prófun er niðurbrot þess mun (jafnvel tvöfalt) meira en búast mætti við með hliðsjón af niðurstöðum hefðbundinna styrkleikaprófana. Í niðurstöðum berggreiningar á þessu burðarlagsefni kemur fram að það hafi opna kristallabyggingu og ef til vill má rekja þessa sérstöðu til hennar. Að því gefnu að gangfræðilegt próf sé lýsandi fyrir niðurbrot burðarlags undir umferð sýnir þessi niðurstaða að hefðbundin styrkleikapróf geti í sumum tilfellum ofmetið styrkleika burðarlagsefna. Samanburðarprófanir (gangfræðilegt próf og hefðbundin styrkleikapróf) á burðarlagsefnum sem hafa viðlíka bergfræðilega eiginleika og Skurðsbrúnir geta þess vegna verið forvitnilegt viðfangsefni.

HEIMILDIR

- Arnpór Óli Arason og Ásbjörn Jóhannesson. (2004). *Sáldurgreining smárra korna í steinefnasýnum*. Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins, Reykjavík.
- ASTM C 136 – 96a. (1999). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. 1999 Annual Book of ASTM Standards. Volume 04.02 Concrete and Aggregates. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken.
- Ásbjörn Jóhannesson, Hafsteinn Hilmarsson og Oddur Þórðarson. (2014). *Niðurbrot óbundins burðarlags undir sveiflandi álagi*. Áfangaskýrsla, NMÍ 14-02. Nýsköpunarmiðstöð Íslands, Reykjavík.
- Ásbjörn Jóhannesson, Hafsteinn Hilmarsson og Oddur Þórðarson. (2015). *Niðurbrot óbundins burðarlags undir sveiflandi álagi*. Áfangaskýrsla 2, NMÍ 15-01. Nýsköpunarmiðstöð Íslands, Reykjavík.
- Evensen, R., Senstad, P. (1992). *Distress and damage factors for flexible pavements*. Publication no. 66, Directorate of Public Roads, Norwegian Road Research Laboratory, Oslo.
- H5/15. (2015). Rannsókn fyrir Vegagerðina, Akureyri. Nýsköpunarmiðstöð Íslands, Reykjavík.
- Íslenskur staðall. (1998a). *ÍST EN 1097-9. Tests for mechanical and physical properties of aggregates. – Part 9: Determination of the resistance to wear by abrasion from studded tyres – Nordic test*. Staðlaráð Íslands, Reykjavík.
- Íslenskur staðall. (1998b). *ÍST EN 1097-2. Tests for mechanical and physical properties of aggregates. – Part 2: Methods for the determination of resistance to fragmentation*. Staðlaráð Íslands, Reykjavík.
- Jón Skúlason. (1979). *Athugun á malarslitlögum*. Unnið fyrir Vegagerð ríkisins.
- Lackenby, J., Indraratna, B., McDowell, G. and Christie, D. (2007). *Effect of confining pressure on ballast degradation and deformation under cyclic triaxial loading*. Géotechnique 57, No. 6, 527-536.
- Lee, K.L, Farhoomand, I. (1967). *Compressibility and Crushing of Granular Soil in Anisotropic Triaxial Compression*. 19th Can. Soil Mech. Conf. Canadian Geotechnical Journal, vol. IV, no. 1.
- Leslie, Dana D. (1963). *Large-Scale Triaxial Tests on Gravelly Soils*. Proceedings of the Second Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 181-202.
- Pétur Pétursson. 1998. *Niðurbrot steinefna. Styrkleiki – veðrunarþol - slitþol*. Lokaskýrsla. Skýrsla E-20, BUSL-Efnisgæðanefnd, Reykjavík.
- Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins. (1989). *Berggreiningarkerfi Rb*. Flokkun og gæðamat steinefna, 3. útgáfa, Reykjavík.
- Samgönguráðuneytið. (2004). *Reglugerð 822/84 um gerð og búnað ökutækja*. <http://www.reglugerd.is/interpro/dkm/WebGuard.nsf/key2/822-2004> Sótt 2016-05-22.
- Sigurður Erlingsson. (1996). *Niðurbrot steinefna í óbundnum burðarlögum – Staða þekkingar*. Skýrsla E-5. BUSL-Efnisgæðanefnd, Reykjavík.
- Statens vegvesen. (2014). *Vegbygging*. Håndbok N200. Vegdirektoratet, Oslo. http://www.vegvesen.no/attachment/188382/binary/980128?fast_title=H%C3%A5ndbok+N200+Vegbygging+%2821+MB%29.pdf Sótt 2015-04-01.
- Vegagerðin. (2015). *Efnisrannsóknir og efniskröfur. Leiðbeiningar við hönnun, framleiðslu og framkvæmd. Burðarlag*. [http://www.vegagerdin.is/Vefur2.nsf/Files/Kafli5_Burdarlag_2015/\\$file/Kafli5_Burdarlag_2015.pdf](http://www.vegagerdin.is/Vefur2.nsf/Files/Kafli5_Burdarlag_2015/$file/Kafli5_Burdarlag_2015.pdf) Sótt 2016-05-22.
- Wallace, H.A., Martin, J.R. (1967). *Asphalt Pavement Engineering*. McGraw-Hill, New York.

VIÐAUKI I

SÁLDURFERLAR SÝNA Á ÝMSUM STIGUM PRÓFUNAR

Viðauki I-1. Sáldurferill fyrir innbyggingu í þrías.

Aths. Sáldurferillinn er eins fyrir öll steinefni.

Viðauki I-2. Grímsá, sáldurferill eftir innbyggingu í þrías.

Viðauki I-3. Grímsá, sáldurferill eftir gangfræðilega prófun í þrías.

Viðauki I-4. Skurðsbrúnir², sáldurferill eftir innbyggingu í þrías.

Viðauki I-5. Skurðsbrúnir, sáldurferill eftir gangfræðilega prófun í þrías.


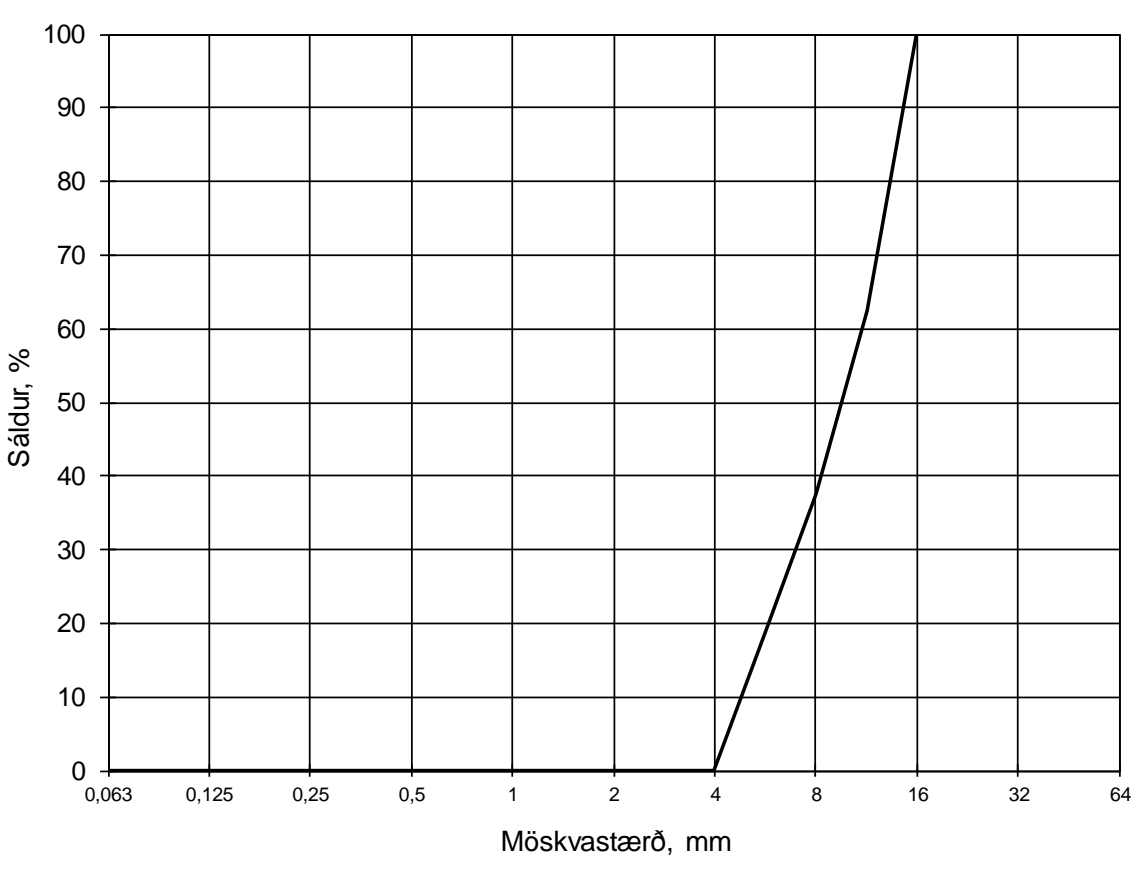
Viðauki I-6. Stapafell, sáldurferill eftir innbyggingu í þrías.

Viðauki I-7. Stapafell, sáldurferill eftir gangfræðilega prófun í þrías.


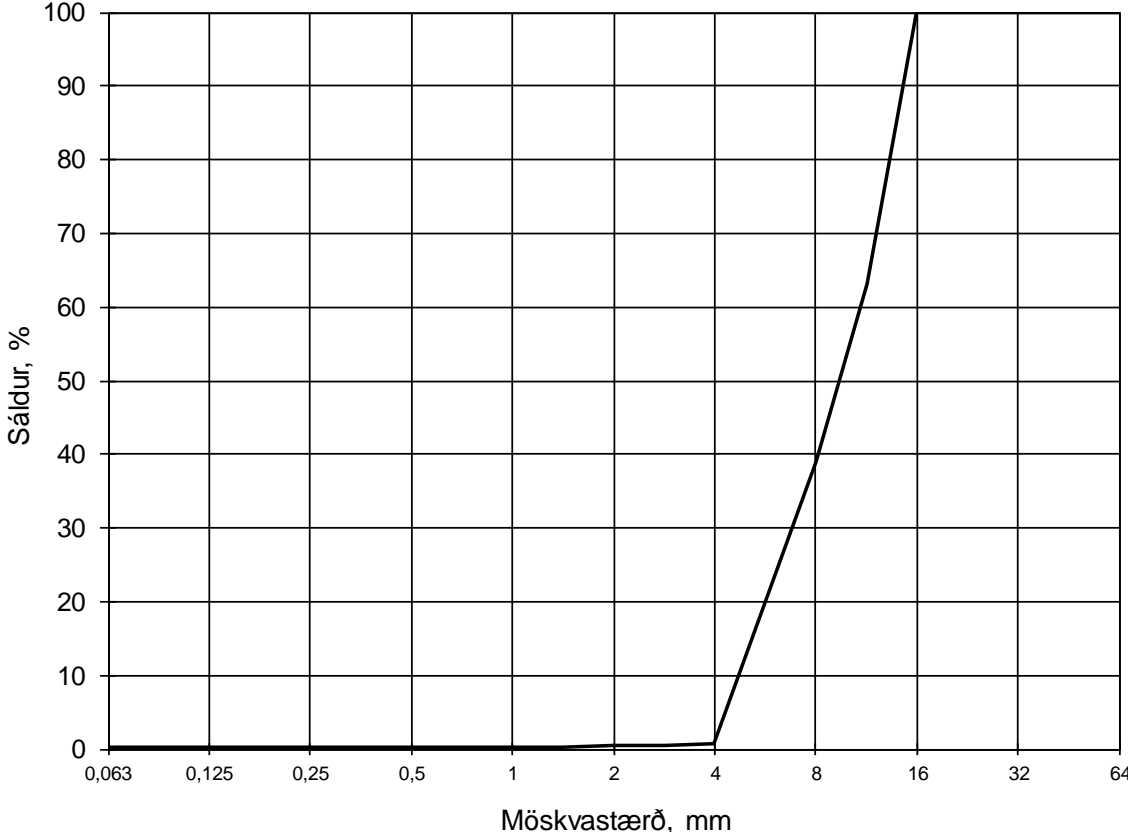
Aths. Sýni frá Skurðsbrúnum var einnig prófað í 2. áfanga verkefnisins, en þá aðeins í 170.000 sveiflur, í þessum áfanga í 1.000.000 sveiflur.

Aths. Sáldurferlar sýna frá Afstapahrauni, Lambafelli, Skurðsbrúnum (prófun í 170.000 sveiflur) og Vatnsskarði eru sýndir í fyrri áfangaskýrslum [Ásbjörn Jóhannesson o.fl., 2014; Ásbjörn Jóhannesson o.fl., 2015].


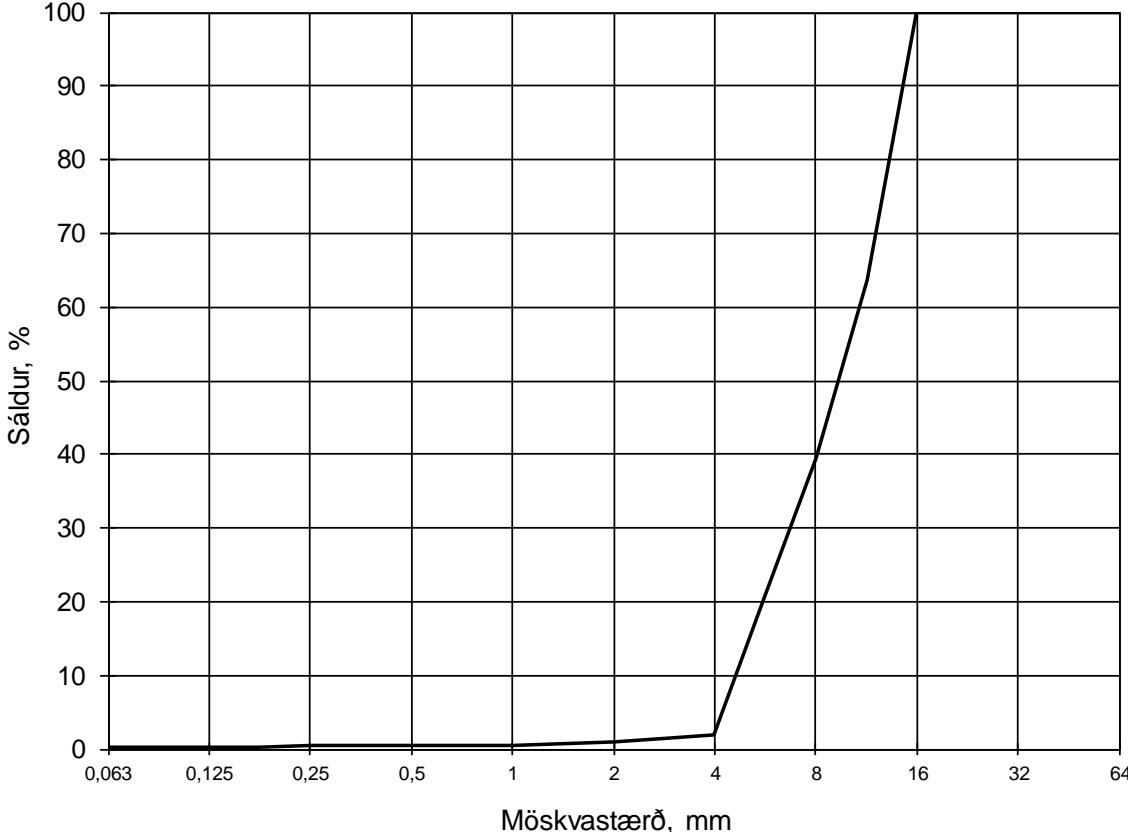
Viðauki I-1. Sáldurferill fyrir innbyggingu í þrías

 Nýsköpunarmiðstöð Íslands											Rannsókn nr. 2MR13007			
											Dags.			
Rannsókn á kornadreifingu (skv. IST EN 933-1)											Framkv. af O.P.			
Fyrir: Vegagerðina.						Náma: Allar námur.								
Vegna: Niðurbrots óbundins burðarlags.						Sendandi: Ásbjörn Jóhannesson.								
Heildarþungi sigtaðs sýnis (g):			Heildarþungi (<16mm) (g):			Merking sýnis: Fyrir innbyggingu.								
Bakki (tara), (g):		Frátekið+bakki (g):		Þurr + bakki (g): 100,0		Votsigt. + bakki (g):		Húmus, gr.:		Slamm, %:		Raki, % 0,0		
Möskv. Þyngd (g)	64	32	22,4	16	11,2	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	botn
Sáldur, %	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Athugasemdir:														
Sáldurferill sýnis fyrir innbyggingu í þrías (sami sáldurferill fyrir öll sýni).														
$D_{10} =$ mm		$D_{30} =$ mm		$D_{60} =$ mm		$C_u =$		$C_c =$ #####						
 <p>The graph shows a sieve analysis curve. The x-axis represents sieve size in millimeters (mm) on a logarithmic scale, with values 0,063, 0,125, 0,25, 0,5, 1, 2, 4, 8, 16, 32, and 64. The y-axis represents the percentage of material passing through the sieve (Sáldur, %), ranging from 0 to 100. The curve is flat at 0% until the 4mm sieve, then rises to 100% at the 16mm sieve.</p>														


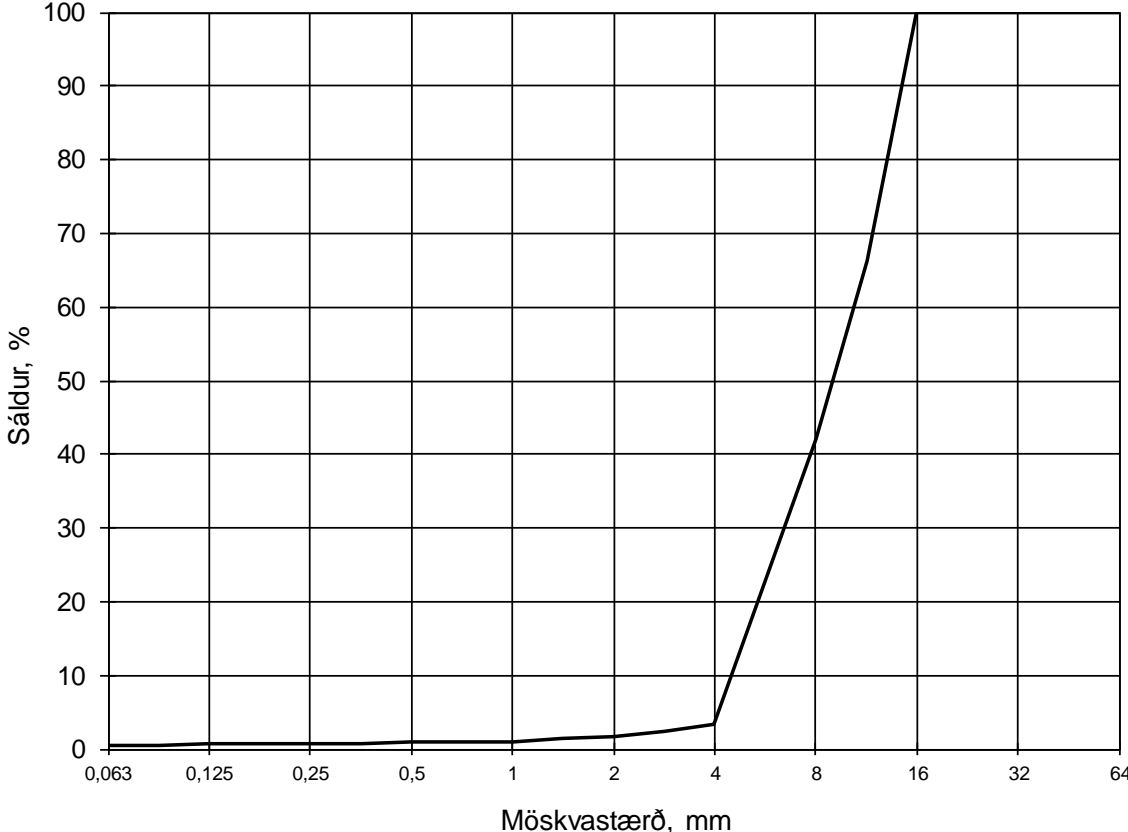
VIÐAUKI I-2. Grímsá, sáldurferill eftir innbyggingu í þrías

 Nýsköpunarmiðstöð Íslands													Rannsókn nr. 2MR13007	
													Dags.	
Rannsókn á kornadreifingu (skv. IST EN 933-1)													Framkv. af O.P.	
Fyrir: Vegagerðina.						Náma: Grímsá.								
Vegna: Niðurbrots óbundins burðarlags.						Sendandi: Ásbjörn Jóhannesson.								
Heildarpungi sigtaðs sýnis (g):				Heildarpungi (<16mm) (g):				Mörking sýnis: Eftir innbyggingu.						
Bakki (tara), (g):		Frátekið+bakki (g):		Purrt +bakki (g):		Votsigt. + bakki (g):		Húmus, gr.:		Slamm, %:		Raki, %		
78,4		2790,5		2790,5		2783,9						0,0		
Möskv. Þyngd (g)	64	32	22,4	16	11,2	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	botn
	0	0	0	0	998,1	1657,0	2694,4	2701,8	2703,9	2705,1	2705,5	2705,8	2706,3	2713,2
Sáldur, %	100,0	100,0	100,0	100,0	63,2	38,9	0,7	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	
Athugasemdir:														
Sáldurferill sýnis eftir innbyggingu í þrías.														
$D_{10} = 4,98 \text{ mm}$			$D_{30} = 7,07 \text{ mm}$			$D_{60} = 10,78 \text{ mm}$			$C_u = 2,2$			$C_c = 0,9$		
														


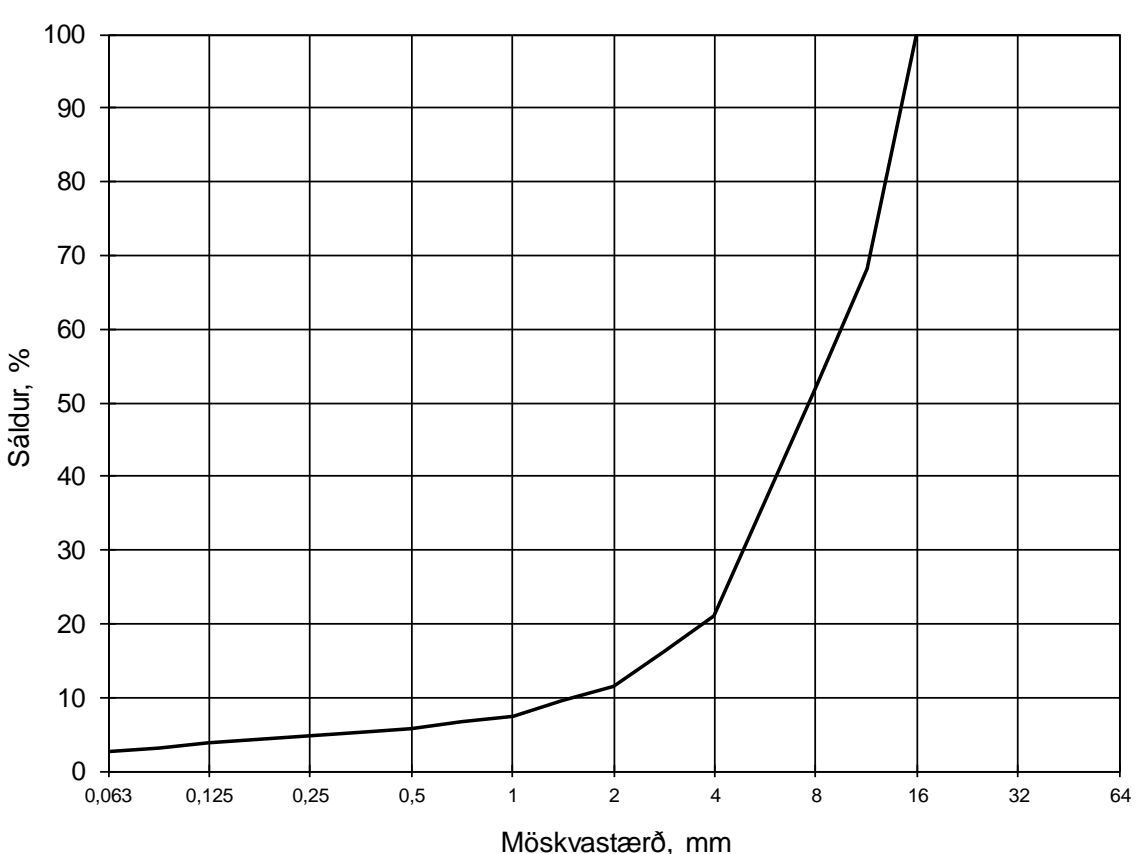
Viðauki I-3. Grímsá, sáldurferill eftir gangfræðilega prófun í þrías

 Nýsköpunarmiðstöð Íslands											Rannsókn nr. 2MR13007			
											Dags.			
Rannsókn á kornadreifingu (skv. IST EN 933-1)											Framkv. af O.P.			
Fyrir: Vegagerðina.						Náma: Grímsá.								
Vegna: Niðurbrots óbundins burðarlags.						Sendandi: Ásbjörn Jóhannesson.								
Heildarþungi sigtaðs sýnis (g):				Heildarþungi (<16mm) (g):				Mörking sýnis: Eftir gangfræðilega prófun.						
Bakki (tara), (g):		Frátekið+bakki (g):		Purrt +bakki (g):		Votsigt. + bakki (g):		Húmus, gr.:		Slamm, %:		Raki, %		
78,5		2787,6		2787,6		2778,1						0,0		
Möskv. Þyngd (g)	64	32	22,4	16	11,2	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	botn
	0	0	0	0	983,4	1637,8	2657,7	2686,4	2694,2	2697,6	2699,1	2700,0	2700,9	2710,1
Sáldur, %	100,0	100,0	100,0	100,0	63,7	39,5	1,9	0,8	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3	
Athugasemdir: Sáldurferill sýnis eftir gangfræðilega prófun í þrías.														
$D_{10} = 4,86 \text{ mm}$			$D_{30} = 6,99 \text{ mm}$			$D_{60} = 10,71 \text{ mm}$			$C_u = 2,2$			$C_c = 0,9$		
														


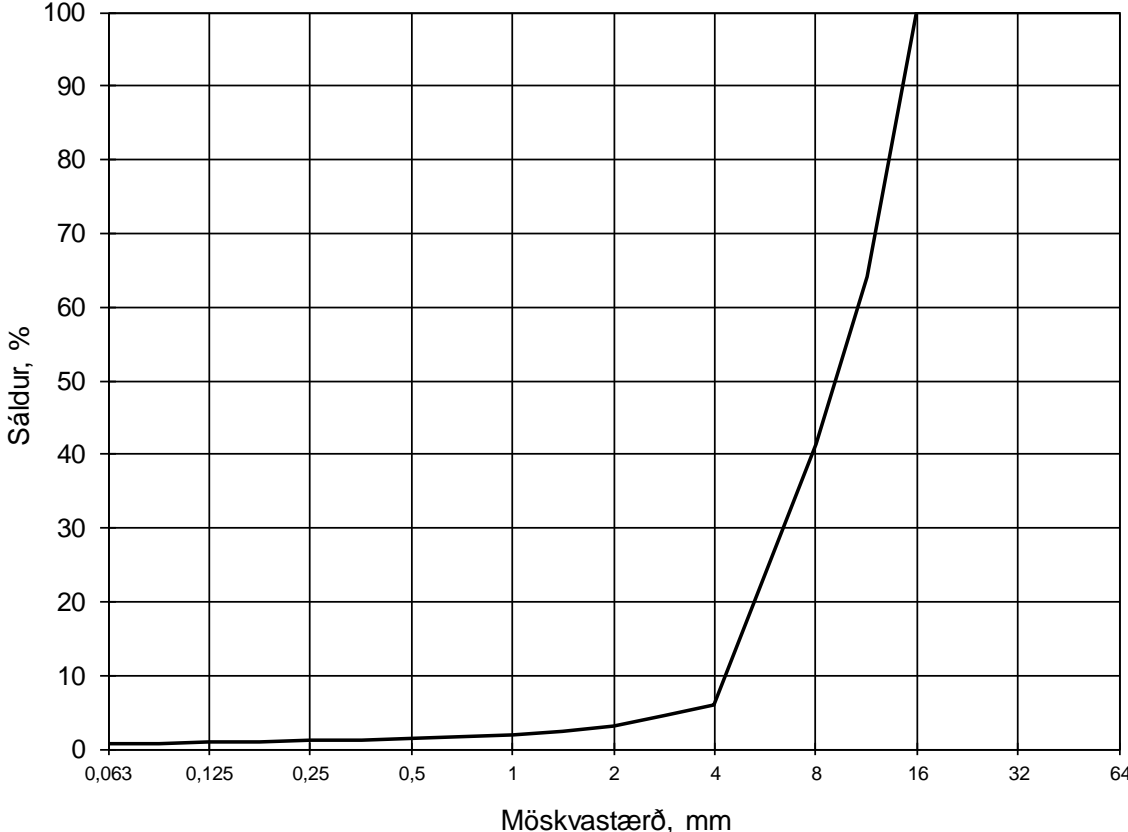
Viðauki I-4. Skurðsbrúnir, sáldurferill eftir innbyggingu í þrías

 Nýsköpunarmiðstöð Íslands											Rannsókn nr. 2MR13007			
											Dags.			
Rannsókn á kornadreifingu (skv. IST EN 933-1)											Framkv. af O.P.			
Fyrir: Vegagerðina.						Náma: Skurðsbrúnir.								
Vegna: Niðurbrots óbundins burðarlags.						Sendandi: Ásbjörn Jóhannesson.								
Heildarþungi sigtaðs sýnis (g):				Heildarþungi (<16mm) (g):				Merking sýnis: Eftir innbyggingu.						
Bakki (tara), (g):		Frátekið+bakki (g):		Purrt +bakki (g):		Votsigt. + bakki (g)		Húmus, gr.:		Slamm, %:		Raki, %		
76,6		2857,8		2811,4		2803,1						1,7		
Möskv. Þyngd (g)	64	32	22,4	16	11,2	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	botn
	0	0	0	0	923,5	1585,9	2644,2	2690,7	2706,2	2710,8	2713,2	2716,7	2721,9	2726,6
Sáldur, %	100,0	100,0	100,0	100,0	66,2	42,0	3,3	1,6	1,0	0,9	0,8	0,7	0,5	
Athugasemdir: Sáldurferill sýnis eftir innbyggingu í þrías.														
$D_{10} = 4,69 \text{ mm}$			$D_{30} = 6,76 \text{ mm}$			$D_{60} = 10,38 \text{ mm}$			$C_u = 2,2$			$C_c = 0,9$		
														


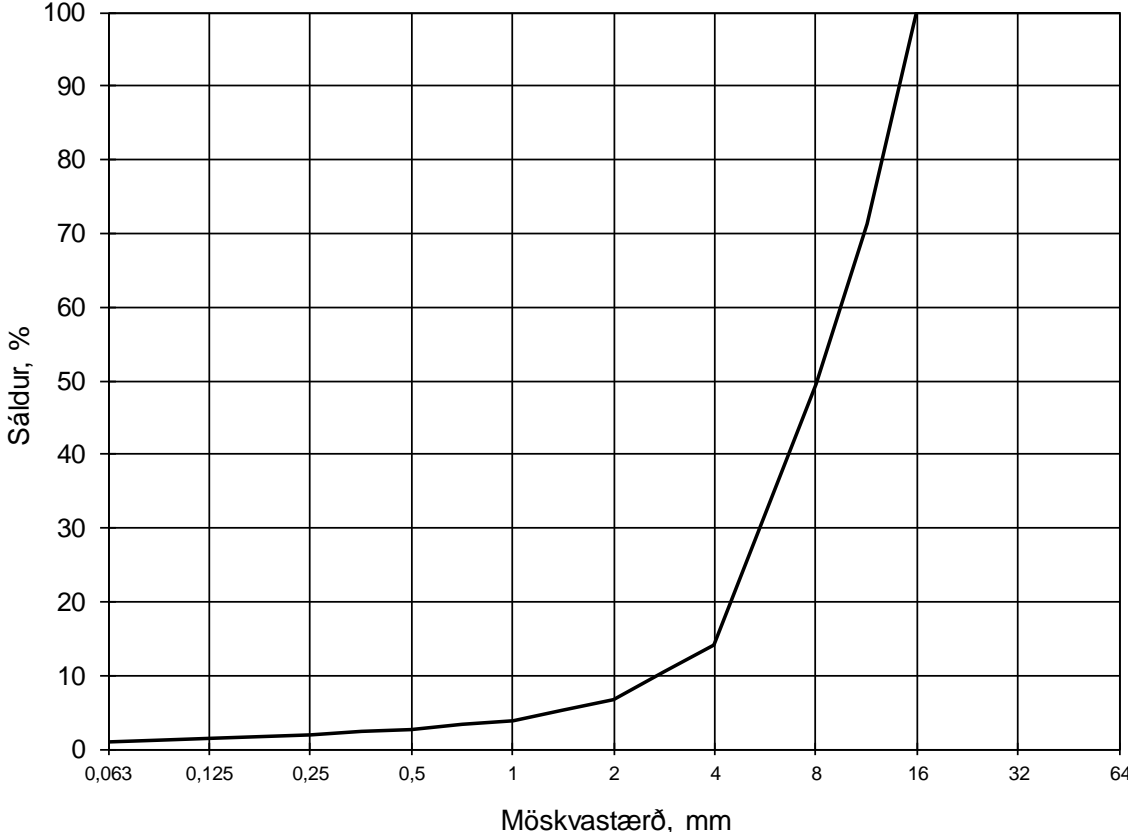
Viðauki I-5. Skurðsbrúnir, sáldurferill eftir gangfræðilega prófun í þrías.

 Nýsköpunarmiðstöð Íslands											Rannsókn nr. 2MR13007			
											Dags.			
Rannsókn á kornadreifingu (skv. IST EN 933-1)											Framkv. af O.P.			
Fyrir: Vegagerðina.						Náma: Skurðsbrúnir.								
Vegna: Niðurbrots óbundins burðarlags.						Sendandi: Ásbjörn Jóhannesson.								
Heildarþungi sigtaðs sýnis (g):				Heildarþungi (<16mm) (g):				Merking sýnis: Eftir gangfræðilega prófun.						
Bakki (tara), (g):		Frátekið+bakki (g):		Purrt +bakki (g):		Votsigt. + bakki (g):		Húmus, gr.:		Slamm, %:		Raki, %		
77,3		2814,3		2814,3		2748,2						0,0		
Möskv. Þyngd (g)	64	32	22,4	16	11,2	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	botn
	0	0	0	0	870,4	1307,1	2159,9	2420,8	2533,2	2578,2	2603,8	2634,3	2663,1	2670,9
Sáldur, %	100,0	100,0	100,0	100,0	68,2	52,2	21,1	11,6	7,4	5,8	4,9	3,8	2,7	
Athugasemdir:														
Sáldurferill sýnis eftir gangfræðilega prófun í þrías.														
Álagsprófun 1.000.000 sveiflur.														
$D_{10} = 1,62 \text{ mm}$			$D_{30} = 5,14 \text{ mm}$			$D_{60} = 9,56 \text{ mm}$			$C_u = 5,9$			$C_c = 1,7$		
 <p>Sáldur, %</p> <p>Möskvastærð, mm</p>														

Viðauki I-6. Stapafell, sáldurferill eftir innbyggingu í þrías.

 Nýsköpunarmiðstöð Íslands											Rannsókn nr. 2MR13007			
											Dags.			
Rannsókn á kornadreifingu (skv. IST EN 933-1)											Framkv. af O.P.			
Fyrir: Vegagerðina.						Náma: Stapafell.								
Vegna: Niðurbrots óbundins burðarlags.						Sendandi: Ásbjörn Jóhannesson.								
Heildarþungi sigtaðs sýnis (g):				Heildarþungi (<16mm) (g):				Merking sýnis: Eftir innbyggingu.						
Bakki (tara), (g):		Frátekið+bakki (g):		Purrt +bakki (g):		Votsigt. + bakki (g):		Húmus, gr.:		Slamm, %:		Raki, %		
80,0		2228,8		2228,8		2220,6						0,0		
Möskv. Þyngd (g)	64	32	22,4	16	11,2	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	botn
	0	0	0	0	769,9	1259,9	2018,0	2084,2	2108,0	2118,2	2124,7	2130,6	2135,6	2140,5
Sáldur, %	100,0	100,0	100,0	100,0	64,2	41,4	6,1	3,0	1,9	1,4	1,1	0,8	0,6	
Athugasemdir: Sáldurferill sýnis eftir innbyggingu í þrías.														
$D_{10} = 4,44 \text{ mm}$			$D_{30} = 6,71 \text{ mm}$			$D_{60} = 10,61 \text{ mm}$			$C_u = 2,4$			$C_c = 1,0$		
														

Viðauki I-7. Stapafell, sáldurferill eftir gangfræðilega prófun í þrías.

 Nýsköpunarmiðstöð Íslands											Rannsókn nr. 2MR13007			
											Dags.			
Rannsókn á kornadreifingu (skv. IST EN 933-1)											Framkv. af O.P.			
Fyrir: Vegagerðina.						Náma: Stapafell.								
Vegna: Niðurbrots óbundins burðarlags.						Sendandi: Ásbjörn Jóhannesson.								
Heildarþungi sigtaðs sýnis (g):				Heildarþungi (<16mm) (g):				Merking sýnis: Eftir gangfræðilega prófun.						
Bakki (tara), (g):		Frátekið+bakki (g):		Purrt +bakki (g):		Votsigt. + bakki (g):		Húmus, gr.:		Slamm, %:		Raki, %		
78,2		2224,9		2224,9		2208,8						0,0		
Möskv. Þyngd (g)	64	32	22,4	16	11,2	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	botn
	0	0	0	0	614,5	1085,2	1843,5	2003,0	2063,4	2089,2	2104,4	2116,6	2126,0	2131,7
Sáldur, %	100,0	100,0	100,0	100,0	71,4	49,4	14,1	6,7	3,9	2,7	2,0	1,4	1,0	
Athugasemdir: Sáldurferill sýnis eftir gangfræðilega prófun í þrías.														
$D_{10} = 2,89 \text{ mm}$			$D_{30} = 5,80 \text{ mm}$			$D_{60} = 9,54 \text{ mm}$			$C_u = 3,3$			$C_c = 1,2$		
														

VIÐAUKI II


NIÐURSTÖÐUR BERGGREININGA Á PRÓFUNARSÝNUM

Viðauki II-1. Grímsá.


Viðauki II-2. Stapafell.

Aths. Berggreiningar sýna frá Afstapahrauni, Lambafelli, Skurðsbrúnum og Vatnsskarði eru sýndar í áfangaskýrslu 2 [Ásbjörn Jóhannesson o.fl., 2015]. Þar er Skurðsbrúnir nefnd Bakkaá.

Viðauki II-1. Grímsá, berggreining

 Nýsköpunarmiðstöð Íslands	<i>Verkefnisnr.</i>	2MR13007		
	<i>Frkv. af</i>	MIK		
	<i>Dags. ranns.</i>			
Berggreining (ÍST EN 932-3 og Rb blað nr. Rb Yp ₁ .009)				
Greiðandi: Vegagerðin.	Nafn umbjóðanda-tengiliðar / verkbeiðanda: Ásbjörn Jóhannesson.			
Verkefni: Niðurbrot óbundins burðarlags.	Merking sýnis: Grímsá, 11-16mm.			
Náma: Námunúmer: 185686 Heiti námu: Grímsá Tökustaður: Efnisflokkur:	Sýni: Sýnisgerð: Malað berg Kornastærð greind: 8,0-11,2 mm Greint í: Víðsjá Þunnsneið nr.:			
Bergbrigði:				
Gæðaflokkur	Lykill	Fjöldi korna	% fjölða	Berg / steintegund, ummyndun, þéttleiki, annað
+	*			
1	1	0141	83	37,7 Basalt, lítillaga ummyndað, þétt
2	1	0142	2	0,9 Basalt, lítillaga ummyndað, blöðrótt
2	2	0121	52	23,6 Basalt, ummyndað, þétt
2	2	0122	1	0,5 Basalt, ummyndað, blöðrótt
3	3	0131	11	5,0 Basalt, mjög ummyndað, þétt
3	3	0131	5	2,3 Basalt, mjög ummyndað, þétt
1	1	25	2	0,9 Díasbas
2	2	252	7	3,2 Díasbas, ummyndað
2	2	03	32	14,5 Ríólít (líparít)
3	3	12	22	10,0 Óflokkuð korn
3	3	13	2	0,9 Basaltgjall og -vikur
3	3	06	1	0,5 Holufyllingar
Alls:		220	100,0	
Gæðaflokkun:				
			+	*
			v. bundins slitlags	v. steinsteypu
			%	%
	1. flokkur		39	40
	2. flokkur		43	42
	3. flokkur		19	19
Mat á kornalögun og áferð			Mat á hreinleika	
Athugasemdir: Basalt, lítillaga ummyndað, þétt. Af þessum 83 kornum eru 14 mjög fínkornótt hugsamlega íslandít. Basalt, mjög ummyndað, þétt, kornin 5 eru ljógræn af mikilli ummyndun.				

Viðauki II-2. Stapafell, berggreining

 Nýsköpunarmiðstöð Íslands Berggreining (ÍST EN 932-3 og Rb blað nr. Rb Yp ₁ .009)	Verkefnisnr.	2MR13007		
	Frkv. af	MIK		
	Dags. ranns.			
Greiðandi: Vegagerðin.	Nafn umbjóðanda-tengiliðar / verkbeiðanda: Ásbjörn Jóhannesson.			
Verkefni: Niðurbrot óbundins burðarlags.	Merking sýnis: Stapafell, 4-16 mm			
Náma: Námunúmer: 16931 Heiti námu: Stapafell Tökustaður: Efnisflokkur:	Sýni: Sýnisgerð: Malað berg Kornastærð greind: 8,0-11,2 mm Greint í: Víðsjá Þunnsneið nr.:			
Bergbrigði:				
Gæðaflokkur	Lykill	Fjöldi	%	Berg / steintegund, ummyndun, þéttleiki, annað
+	*	korna	fjölda	
2	1	0112	109	52,9 Basalt, ferskt, nokkuð blöðrótt (5-25%)
3	2	0113	95	46,1 Basalt, ferskt, mjög blöðrótt (>25%)
2	1	011230	1	0,5 Basalt, ferskt, blöðrótt, að hluta glerjað
3	2	0912	1	0,5 Basaltgler, ferskt, blöðrótt
Alls:		206	100,0	
Gæðaflokkun:				
			+	*
			v. bundins slitlags	v. steinsteypu
			%	%
	1. flokkur		0	53
	2. flokkur		53	47
	3. flokkur		47	0
Mat á kornalögun og áferð			Mat á hreinleika	
Athugasemdir:				
Basaltið er með ferskum plagióklas- og ólívínílum. Ekkert korn var nálægt því að geta flokkst sem lítt blöðrótt þ.e. minna en 5 % blöðrótt. Mjög oft er basaltið með blöðrur í tveimur stærðum það er litlar blöðrur eru í grunnmassanum.				

VIÐAUKI III

LÍNURIT AF VARANLEGRI SAMÞJÖPPUN SÝNA Í GANGFRÆÐILEGRI PRÓFUN

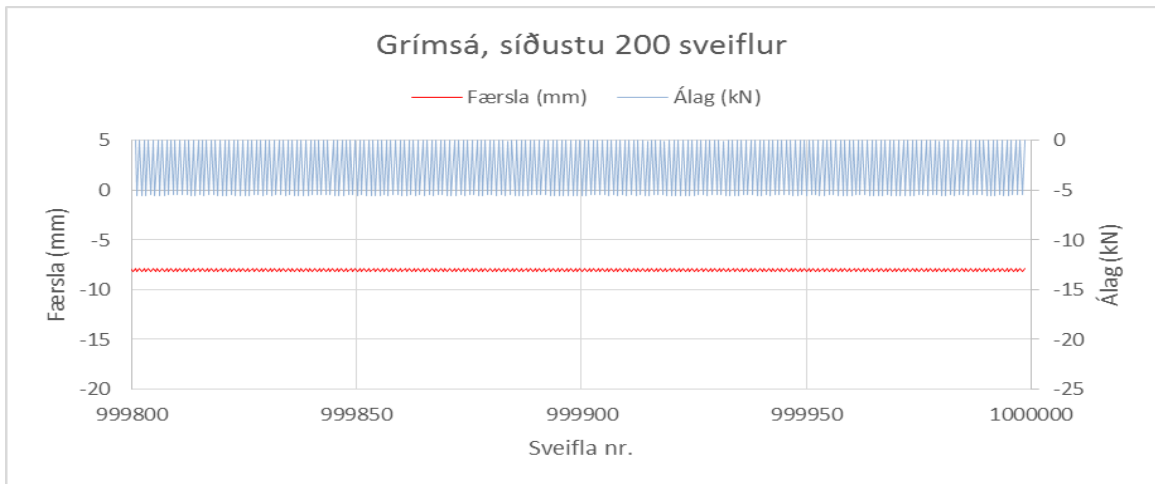
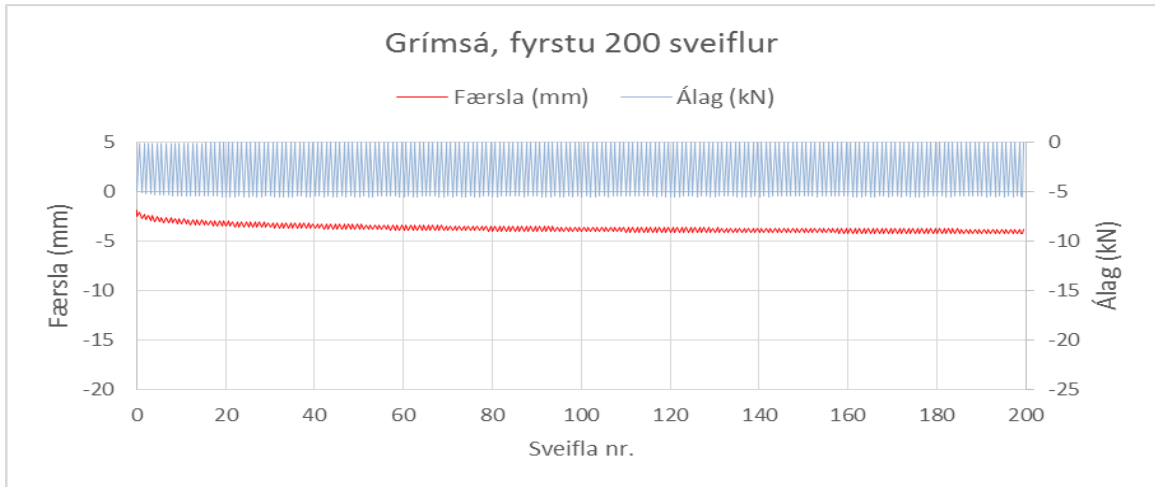
Viðauki III-1. Grímsá.

Viðauki III-2. Skurðsbrúnir.

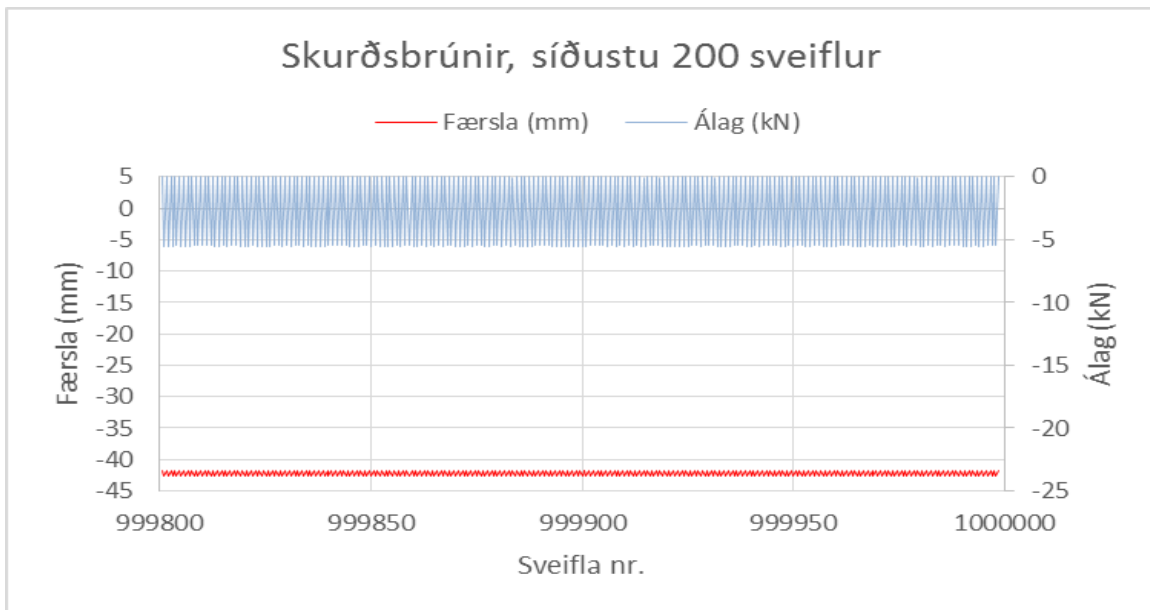
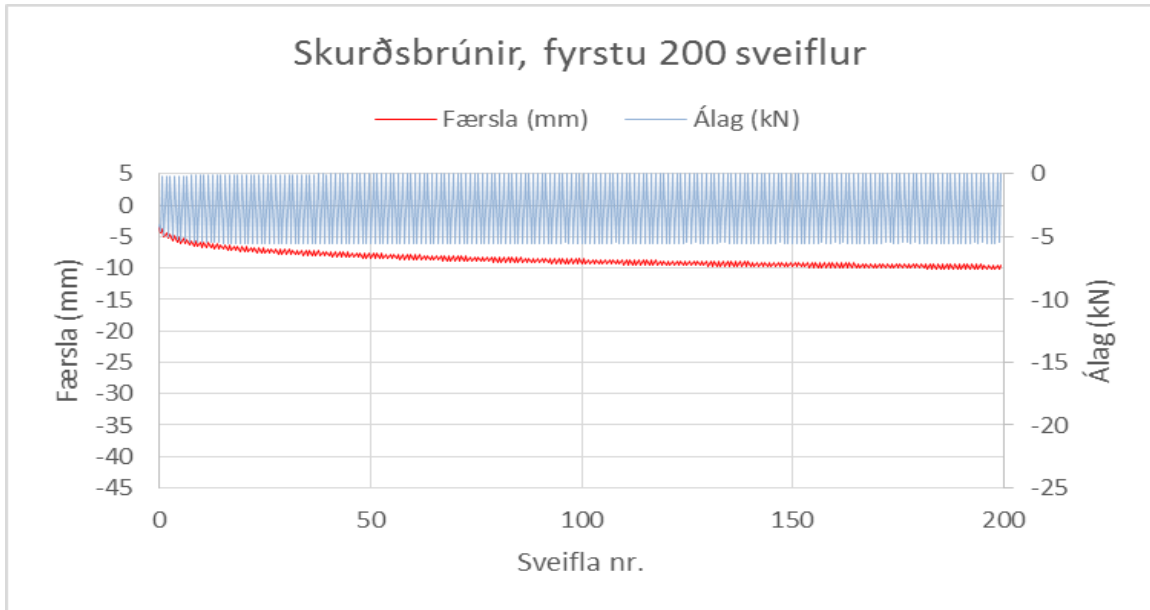
Viðauki III-3. Stapafell.

Aths. Línurit af varanlegri samþjöppun sýna frá Afstapahrauni, Lambafelli, Skurðsbrúnum (prófun í 170.000 sveiflur) og Vatnsskarði eru sýnd í áfangaskýrslu 2 [Ásbjörn Jóhannesson o.fl., 2015]. Þar er Skurðsbrúnir nefnd Bakkaá.

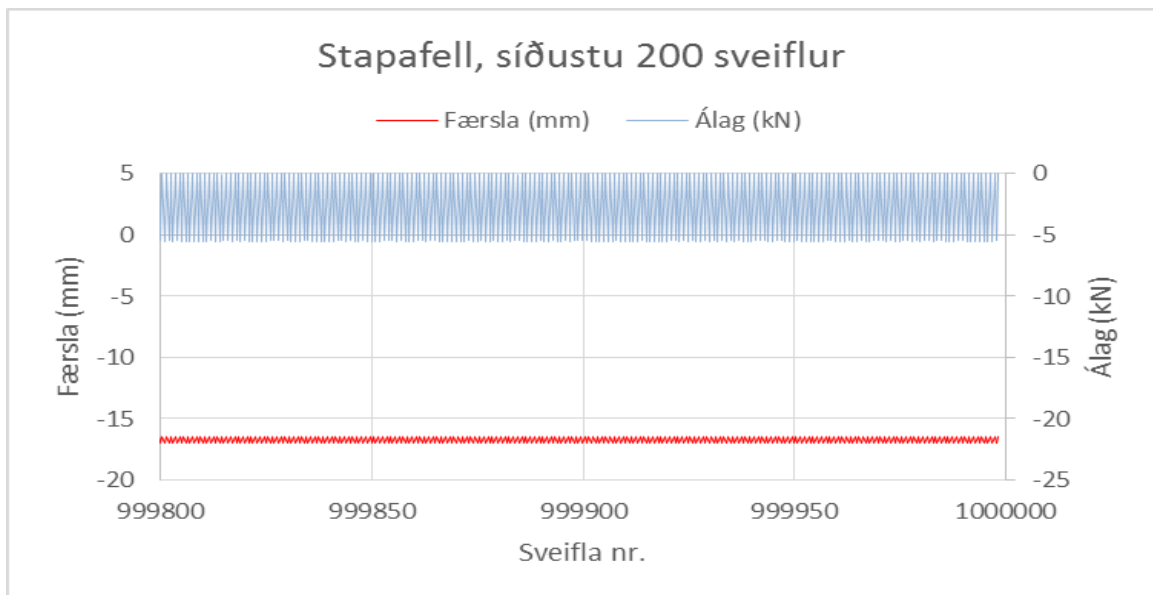
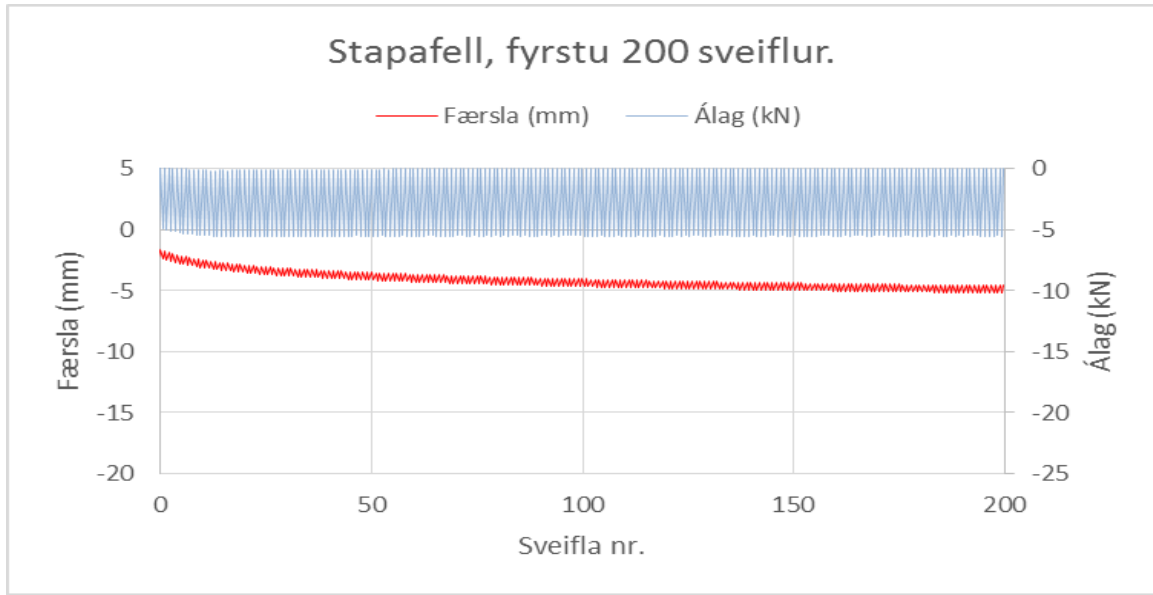
Viðauki III-1. Grímsá, varanleg samþjöppun



Viðauki III-2. Skurðsbrúnir, varanleg samþjöppun



Viðauki III-3. Stapafell, varanleg samþjöppun



VIÐAUKI IV

Bg-STUÐLAR (Standard Proctor þjöppun)


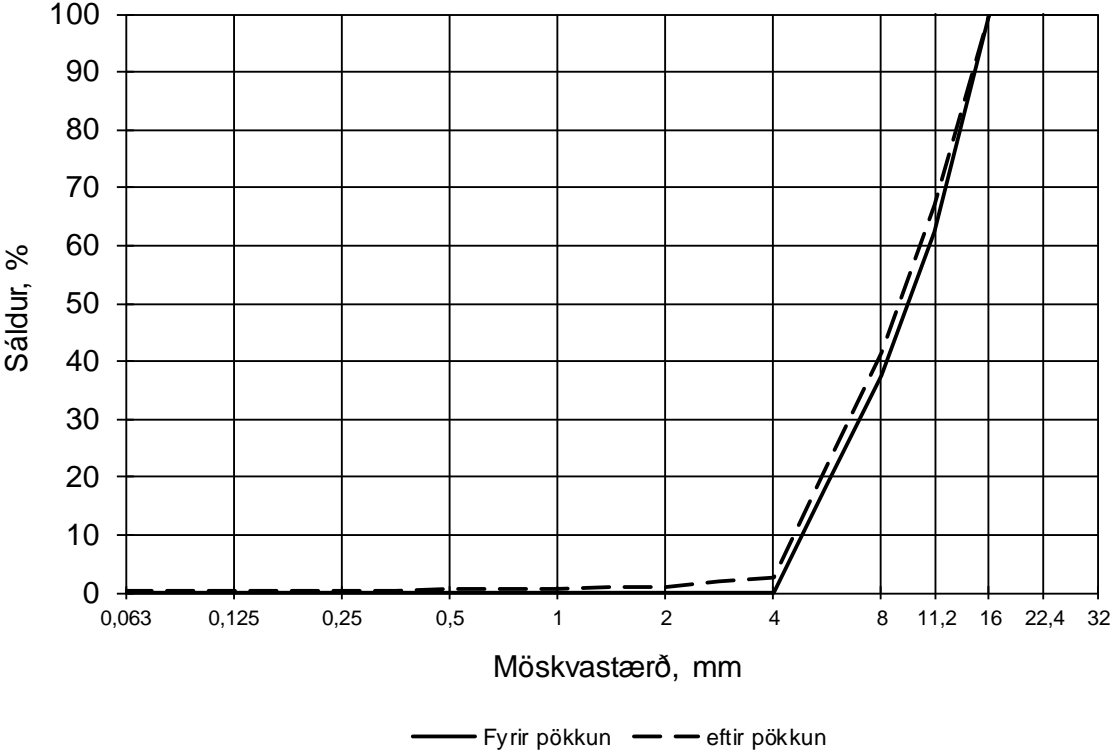
- Viðauki IV-1. Afstapahraun
- Viðauki IV-2. Grímsá
- Viðauki IV-3. Lambafell
- Viðauki IV-4. Skurðsbrúnir
- Viðauki IV-5. Stapafell
- Viðauki IV-6. Vatnsskarð

Aths. Bg-stuðlar sem eru birtir hér á eftir eru ekki fengnir með hefðbundinni ákvörðun á Bg-stuðli.


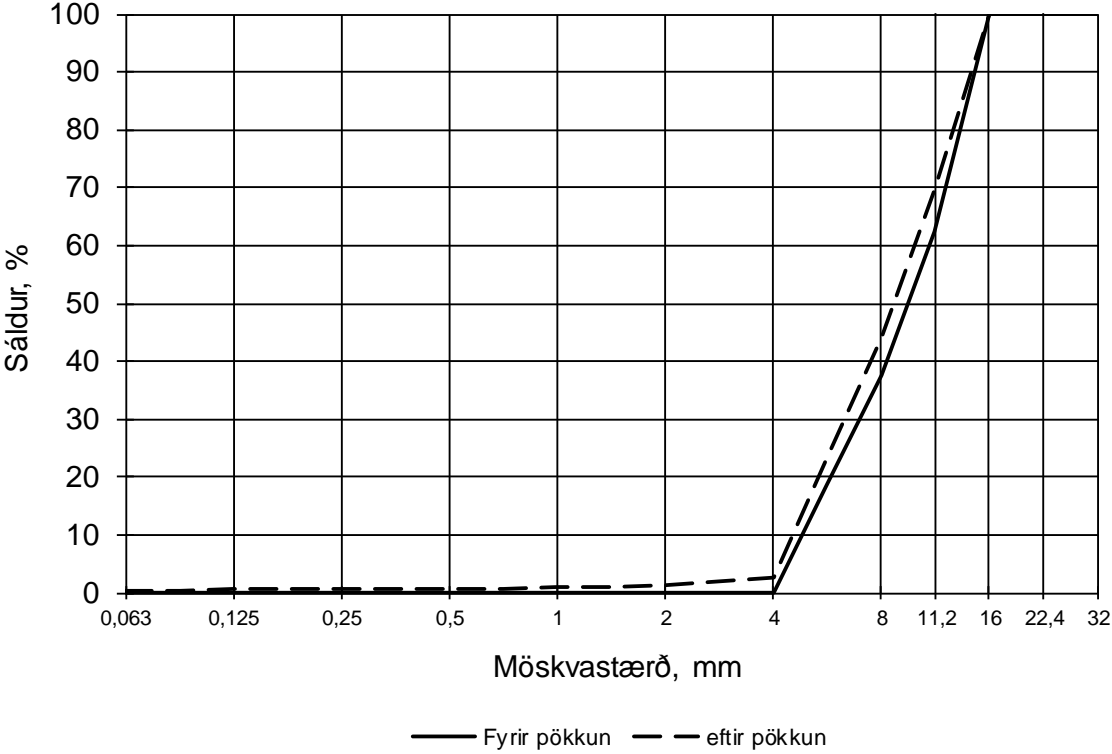
Frávikin eru þessi:

- *Sýnin hafa sama sáldurferil (gisinn) og sýni sem fara í gangfræðilega prófun, ekki Fuller-sáldurferil (þéttan) eins og í hefðbundnu prófi á Bg-stuðli.*
- *Sáldurferill sýnanna spannar bilið milli 4 mm og 16 mm, en ekki bilið milli 63 μ m og 22,4 mm eins og í hefðbundnu prófi á Bg-stuðli.*
- *Rakastig sýnanna samsvarar (nokkurn veginn) mettivatni þeirra, en er ávallt 6 % í hefðbundnu prófi á Bg-stuðli.*
- *Þjöppun sýnanna samsvarar Standard Proctor þjöppun, en samsvarar Modified Proctor þjöppun í hefðbundnu prófi á Bg-stuðli.*


Viðauki IV-1. Bg-stuðull, Afstapahraun

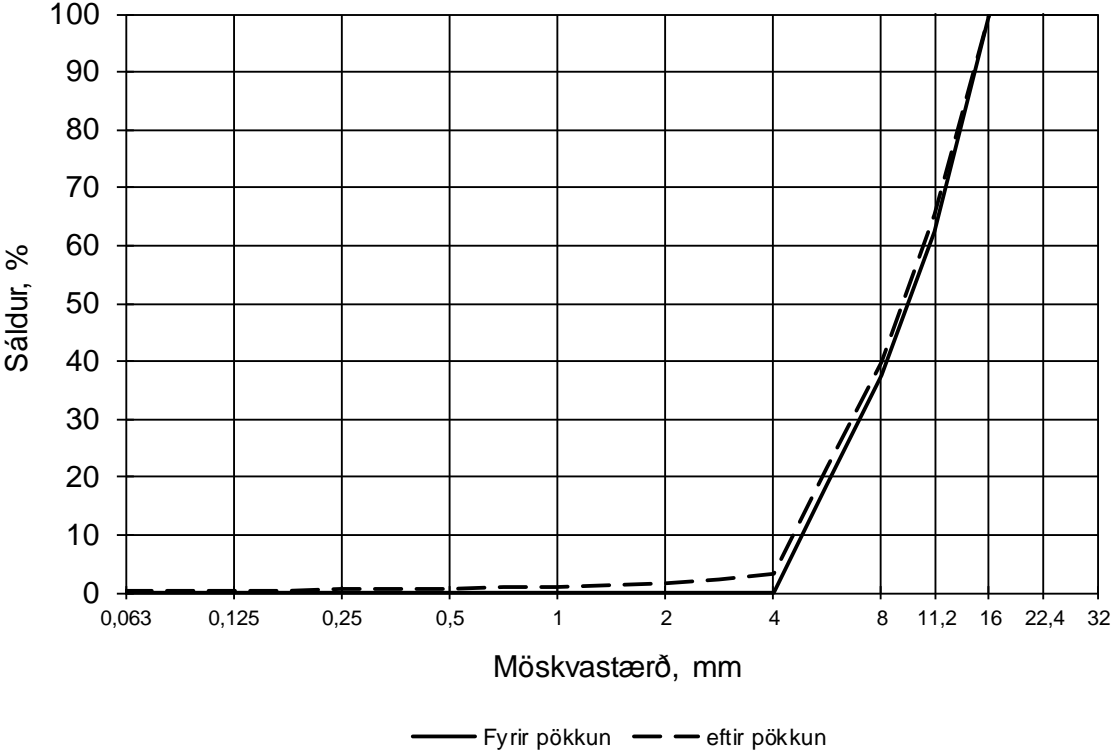
 Nýsköpunarmiðstöð Íslands													Rannsókn nr. 2MR13007	
													Dags.	
Bg - stuðull (Standard Proctor þjöppun)													Framkv. af O.P.	
Fyrir: Vegagerðina.						Náma: Afstapahraun.								
Vegna: Niðurbrot óbundins burðarlags.						Sendandi: Ásbjörn Jóhannesson.								
		Þyngd fyrir þökkun				Þyngd eftir þökkun								
		100,0				100,0								
Möskv. f.þökk, g	32	22,4	16	11,2	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	botn	
		0,0	0,0	0,0	37,5	62,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
Möskv. e.þökk, g	32	22,4	16	11,2	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	botn	
		0,0	0,0	0,0	33,1	58,6	97,5	98,9	99,3	99,5	99,6	99,6	99,7	100,0
 <p style="text-align: center;">— Fyrir þökkun - - - eftir þökkun</p>														
Sáldur, %	32	22,4	16	11,2	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	botn	
f.þökk		100,0	100,0	100,0	62,5	37,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Sáldur, %	32	22,4	16	11,2	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	botn	
e.þökk		100,0	100,0	100,0	66,9	41,4	2,5	1,1	0,7	0,5	0,4	0,4	0,3	0,0
$\Delta 1 - \Delta 2$		0,0	4,4	-0,5	-1,4	-1,4	-0,4	-0,2	-0,1	0,0	-0,1	-0,3		
Bg - stuðullinn er 4,4														

Viðauki IV-2. Bg-stuðull, Grímsá

 Nýsköpunarmiðstöð Íslands													Rannsókn nr. 2MR13007	
													Dags.	
Bg - stuðull (Standard Proctor þjöppun)													Framkv. af O.P.	
Fyrir: Vegagerðina.						Náma: Grímsá.								
Vegna: Niðurbrot óbundins burðarlags.						Sendandi: Ásbjörn Jóhannesson.								
		Þyngd fyrir þökkun			Þyngd eftir þökkun									
		100,0			100,0									
Möskv. f.þökk, g	32	22,4	16	11,2	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	botn	
		0,0	0,0	0,0	37,5	62,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
Möskv. e.þökk, g	32	22,4	16	11,2	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	botn	
		0,0	0,0	0,0	30,4	56,0	97,5	98,7	99,1	99,3	99,4	99,5	99,6	100,0
														
Sáldur, %	32	22,4	16	11,2	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	botn	
f.þökk		100,0	100,0	100,0	62,5	37,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Sáldur, %	32	22,4	16	11,2	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	botn	
e.þökk		100,0	100,0	100,0	69,6	44,0	2,5	1,3	0,9	0,7	0,6	0,5	0,4	
$\Delta 1 - \Delta 2$		0,0	7,1	-0,6	-4,0	-1,2	-0,4	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	-0,4		
Bg - stuðullinn er 7,1														

Viðauki IV-3. Bg-stuðull, Lambafell

 Nýsköpunarmiðstöð Íslands													Rannsókn nr.		2MR13007	
													Dags.			
Bg - stuðull (Standard Proctor þjöppun)													Framkv. af		O.P.	
Fyrir:						Náma:										
Vegagerðina.						Lambafell.										
Vegna:						Sendandi:										
Niðurbrot óbundins burðarlags.						Ásbjörn Jóhannesson.										
		Þyngd fyrir þökkun				Þyngd eftir þökkun										
		100,0				100,0										
Möskv.	32	22,4	16	11,2	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	botn			
f.þökk, g		0,0	0,0	0,0	37,5	62,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0			
Möskv.	32	22,4	16	11,2	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	botn			
e.þökk, g		0,0	0,0	0,0	34,8	60,2	96,8	98,4	99,0	99,3	99,5	99,6	99,8	100,0		


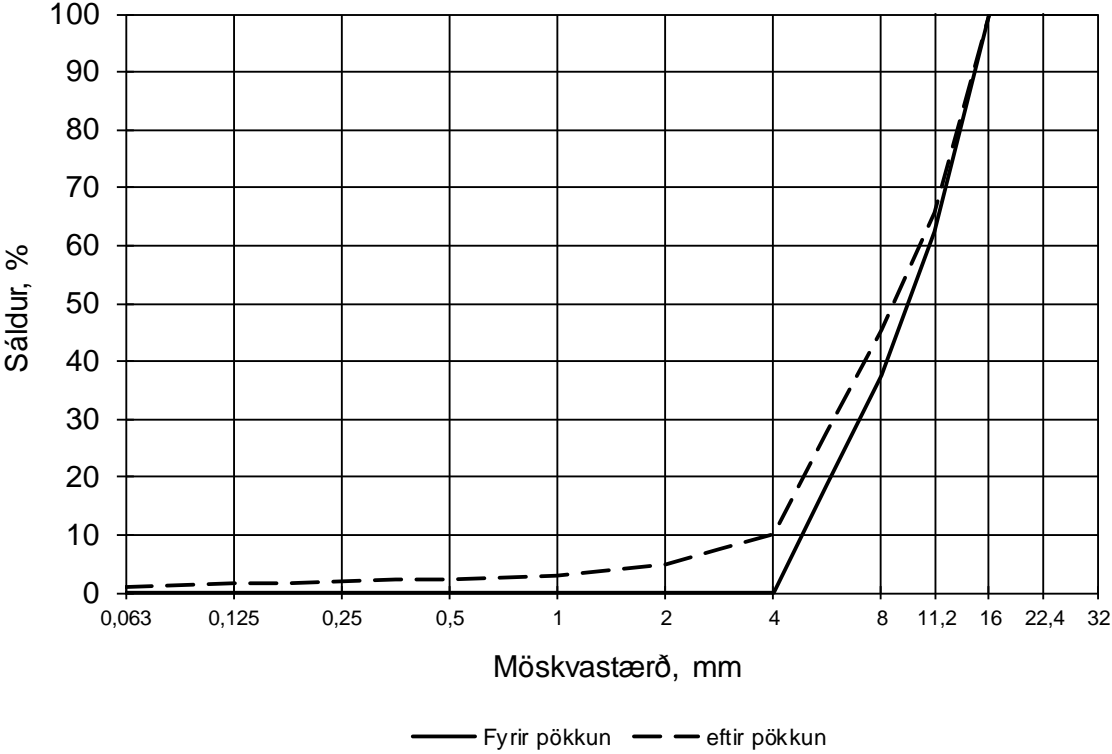


— Fyrir þökkun - - - eftir þökkun


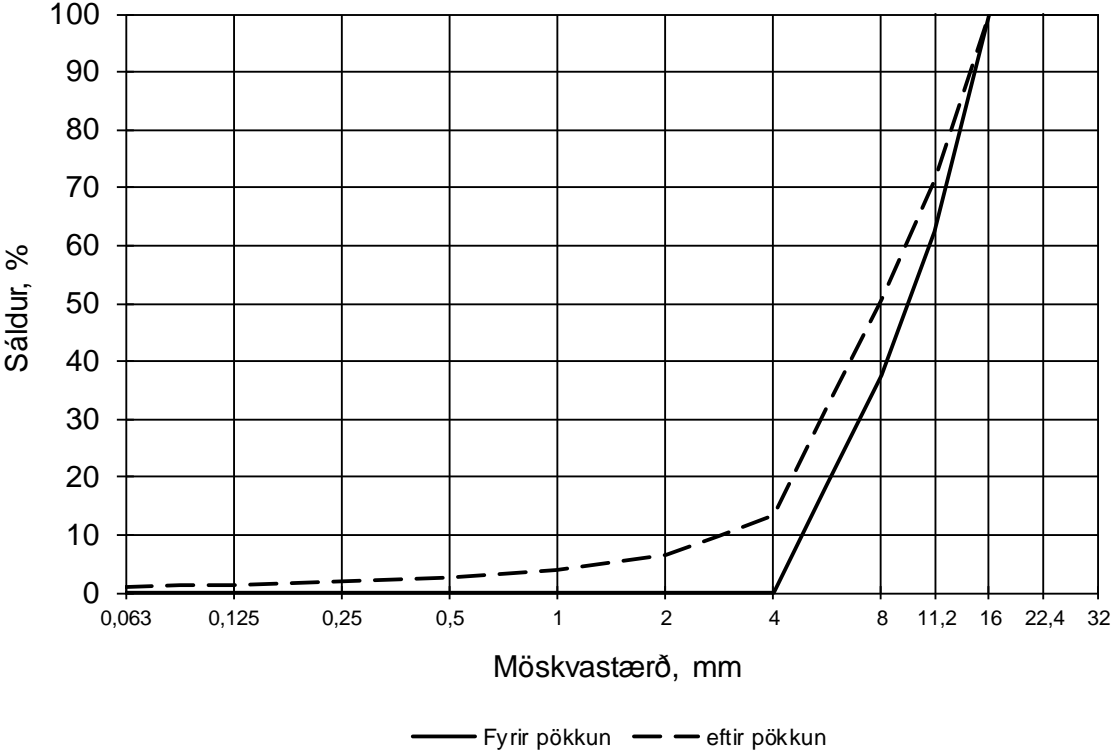
Sáldur, %	32	22,4	16	11,2	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	botn
f.þökk	100,0	100,0	100,0	62,5	37,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Sáldur, %	32	22,4	16	11,2	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	botn
e.þökk	100,0	100,0	100,0	65,2	39,8	3,2	1,6	1,0	0,7	0,5	0,4	0,2	0,0
Δ1-Δ2		0,0	2,7	-0,4	0,9	-1,6	-0,6	-0,3	-0,2	-0,1	-0,2	-0,2	

Bg - stuðullinn er 3,6


Viðauki IV-4. Bg-stuðull, Skurðsbrúnir

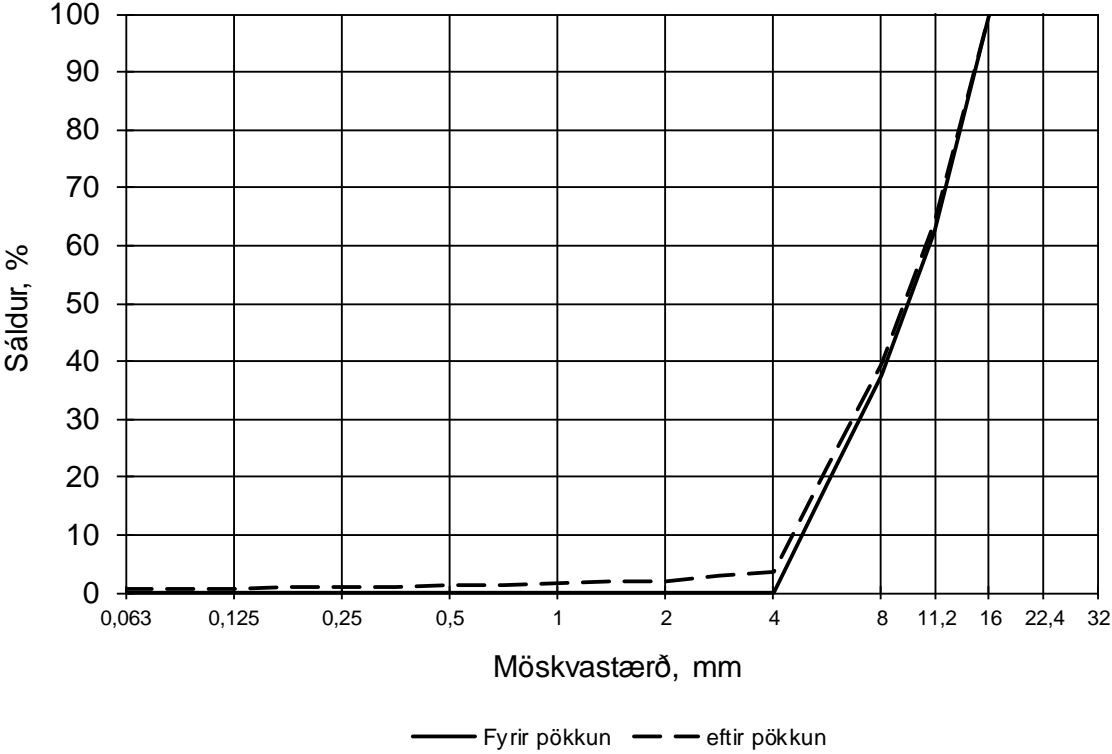
 Nýsköpunarmiðstöð Íslands													Rannsókn nr. 2MR13007	
													Dags.	
Bg - stuðull (Standard Proctor þjöppun)													Framkv. af O.P.	
Fyrir: Vegagerðina.						Náma: Skurðsbrúnir.								
Vegna: Niðurbrot óbundins burðarlags.						Sendandi: Ásbjörn Jóhannesson.								
		Þyngd fyrir þökkun				Þyngd eftir þökkun								
		100,0				100,0								
Möskv. f.þökk, g	32	22,4	16	11,2	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	botn	
		0,0	0,0	0,0	37,5	62,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
Möskv. e.þökk, g	32	22,4	16	11,2	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	botn	
		0,0	0,0	0,0	34,3	54,7	90,0	95,0	96,9	97,6	98,0	98,5	99,0	100,0
														
Sáldur, %	32	22,4	16	11,2	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	botn	
f.þökk		100,0	100,0	100,0	62,5	37,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Sáldur, %	32	22,4	16	11,2	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	botn	
e.þökk		100,0	100,0	100,0	65,7	45,3	10,0	5,0	3,1	2,4	2,0	1,5	1,0	0,0
$\Delta 1 - \Delta 2$		0,0	3,2	4,6	2,2	-5,0	-1,9	-0,7	-0,4	-0,5	-0,5	-1,0		
Bg - stuðullinn er 10														

Viðauki IV--5. Bg-stuðull Stapafell

 Nýsköpunarmiðstöð Íslands													Rannsókn nr. 2MR13007	
													Dags.	
Bg - stuðull (Standard Proctor þjöppun)													Framkv. af O.P.	
Fyrir: Vegagerðina.						Náma: Stapafell.								
Vegna: Niðurbrot óbundins burðarlags.						Sendandi: Ásbjörn Jóhannesson.								
		Þyngd fyrir þökkun				Þyngd eftir þökkun								
		100,0				100,0								
Möskv. f.þökk, g	32	22,4	16	11,2	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	botn	
		0,0	0,0	0,0	37,5	62,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
Möskv. e.þökk, g	32	22,4	16	11,2	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	botn	
		0,0	0,0	0,0	28,7	49,2	86,7	93,4	96,1	97,3	98,0	98,6	99,1	100,0
 <p style="text-align: center;">— Fyrir þökkun - - - eftir þökkun</p>														
Sáldur, % f.þökk	32	22,4	16	11,2	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	botn	
		100,0	100,0	100,0	62,5	37,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Sáldur, % e.þökk	32	22,4	16	11,2	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	botn	
		100,0	100,0	100,0	71,3	50,8	13,3	6,6	3,9	2,7	2,0	1,4	0,9	0,0
$\Delta 1 - \Delta 2$		0,0	8,8	4,5	0,0	-6,7	-2,7	-1,2	-0,7	-0,6	-0,5	-0,9		
Bg - stuðullinn er 13,3														

Viðauki IV-6. Bg-stuðull, Vatnsskarð.

 Nýsköpunarmiðstöð Íslands													Rannsókn nr.		2MR13007	
													Dags.			
Bg - stuðull (Standard Proctor þjöppun)													Framkv. af		O.P.	
Fyrir:						Náma:										
Vegagerðina.						Vatnsskarð.										
Vegna:						Sendandi:										
Niðurbrot óbundins burðarlags.						Ásbjörn Jóhannesson.										
		Þyngd fyrir þökkun				Þyngd eftir þökkun										
		100,0				100,0										
Möskv.	32	22,4	16	11,2	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	botn			
f.þökk, g		0,0	0,0	0,0	37,5	62,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0			
Möskv.	32	22,4	16	11,2	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	botn			
e.þökk, g		0,0	0,0	0,0	36,0	60,4	96,3	97,9	98,5	99,8	99,0	99,2	99,4	100,0		



— Fyrir þökkun - - - eftir þökkun

Sáldur, %	32	22,4	16	11,2	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	botn
f.þökk	100,0	100,0	100,0	62,5	37,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Sáldur, %	32	22,4	16	11,2	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	botn
e.þökk	100,0	100,0	100,0	64,0	39,6	3,7	2,1	1,5	1,2	1,0	0,8	0,6	0,0
Δ1-Δ2		0,0	1,5	0,6	1,6	-1,6	-0,6	-0,3	-0,2	-0,2	-0,2	-0,6	

Bg - stuðullinn er 3,7



**Nýsköpunarmiðstöð
Íslands**

Akureyri | Egilsstaðir | Húsavík | Höfn | Ísafjörður | Reykjavík | Sauðárkrúkur | Vestmannaeyjar