

NMÍ 14-02

# Niðurbrot óbundins burðarlags undir sveiflandi álagi

Áfangaskýrsla

Ásbjörn Jóhannesson  
Hafsteinn Hilmarsson  
Oddur Þórðarson

Maí 2014



Nýsköpunarmiðstöð  
Íslands

# **Niðurbrot óbundins burðarlags undir sveiflandi álagi**

## **Áfangaskýrsla**

Reykjavík: Nýsköpunarmiðstöð Íslands 2014.

Unnið fyrir Rannsókn- og þróunarsjóð Vegagerðarinnar.

Höfundar skýrslunnar bera ábyrgð á innihaldi hennar. Niðurstöður skýrslunnar ber ekki að túlka sem yfirlýsta stefnu Vegagerðarinnar né heldur sem álit Nýsköpunarmiðstöðvar Íslands.

## ÁGRIP

Í skýrslunni er greint frá fyrstu tilraunum til að þróa aðferð sem líkir eftir niðurbroti burðarlagsefnis í vegi undir umferðarálagi. Sýni af burðarlagsefninu er prófað í þrías þar sem hliðarstuðningurinn er óbreyttur meðan á prófinu stendur en lóðrétta álagið er látið sveiflast. Þessi prófunaraðferð getur gefið upplýsingar um líkur á fínefnamyndun í burðarlaginu vegna innbyrðis núnings á milli efniskorna fyrir áhrif umferðarinnar.

Á grundvelli tilraunanna hefur verið samin tillaga að verklýsingu fyrir prófunaraðferð. Matsstíkar prófunaraðferðarinnar byggjast á breytingum í sáldurferli sýnis eftir allt að eina milljón álagspúlva í gangfræðilegu (e. dynamic) þríasaprófi, þar sem hliðarálagið er 200 kPa og lóðrétt álag fylgir sínussveiflu milli 200 og 900 kPa. Prófunaraðferðin er tafsöm (ein prófun að meðtöldum nauðsynlegum undirbúningi tekur um 10 daga) og að sama skapi dýr.

Eitt sýni af burðarlagsefni (frá Kúagerði á Reykjanesi) hefur verið prófað í samræmi við aðferðina, þó aðeins einu sinni. Prófananiðurstöður gefa til kynna lítilsháttar aukningu á efni sem smýgur 4 mm sikti (5%) og á efni sem smýgur 63  $\mu\text{m}$  sikti (0,3 %). Aukningin er í báðum tilfellum lítil en marktæk. Engin aukning mældist í innihaldi af smágerðu fínefni (< 20  $\mu\text{m}$ ), í raun mældist minnkun, úr 70 % í 66 %, þegar breytingin er reiknuð fyrir efni smærra en 63  $\mu\text{m}$ .

Leiðbeiningar Vegagerðarinnar, hvað styrkleika varðar, leyfa notkun á þessu burðarlagsefni án takmarkana á umferð ( $\geq 400$  þungir bílar á dag). Að þessu leyti eru niðurstöðurnar í samræmi við væntingar. Hins vegar er engin vitneskja fengin að svo komnu um nákvæmni prófunaraðferðarinnar né heldur forsagnargildi hennar.

## EFNISYFIRLIT

ÁGRIP	1
1. INNGANGUR	3
2. UM PRÓFANIR Á BURÐARLAGSEFNUM	4
2.1 Fyrimæli Vegagerðarinnar um styrkleikaprófanir á burðarlagsefnum	4
2.2 Íslenskar rannsóknir á niðurbroti í burðarlagi	4
2.3 Erlendar rannsóknir á niðurbroti í burðarlagi	5
3. UNDIRBÚNINGUR AÐ PRÓFUNUM	8
3.1 Tillaga að prófunaraðferð	8
4. NIÐURSTÖÐUR PRÓFANA Á BURÐARLAGSEFNI FRÁ KÚAGERÐI	12
4.1 Breytingar á sáldurferli	12
4.2 Kvarnargildi	12
5. UMRÆÐA OG ÁLYKTANIR	13
HEIMILDIR	14
VIÐAUKI I. PRÓFUNARLÝSING	16
VIÐAUKI II. TILRAUNIR MEÐ MISMUNANDI FYRIRKOMULAG PRÓFANA Í ÞRÍÁS	18
VIÐAUKI III. SÁLDURFERLAR SÝNA AF BURÐARLAGSEFNI FRÁ KÚAGERÐI	23
VIÐAUKI IV. NIÐURSTÖÐUR KÚLNAKVARNARPRÓFS Á BURÐARLAGSEFNI FRÁ KÚAGERÐI	27

## 1. INNGANGUR

Kröfur til sáldurferils burðarlagsefna tilgreina m.a. að hlutfall fínefnis (smærra en 63  $\mu\text{m}$ ) skuli vera undir tilteknu hámarki (sem að jafnaði er 5 %). Þessi krafa á að minnka líkur á að burðarþol skerðist úr hófi fram þótt vatn komist í burðarlagið.

Nú er það svo að efni í burðarlögum molnar smám saman niður fyrir áhrif frá umferðinni. Þetta á einkum við ef slitlagið er klæðing, því hún er þunn og hefur mjög litla stífni, og getur þar af leiðandi ekki dreift umferðarálaginu yfir stærri flöt í burðarlaginu, líkt og malbiksslitlag gerir. Afleiðingin er sú að fínefni í burðarlagi undir klæðingu hættir til að aukast með tíð og tíma og getur orðið snöggum meira en í sýnum af sama burðarlagsefni sem eru tekin meðan á vinnslu þess stendur. Orsakirnar geta verið margvíslegar, og umfangið fer að sjálfsgöðu eftir eiginleikum steinefnisins, einkum höggþoli, slitþoli 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 þó fremur vegna innbyrðis mismunarhreyfinga steinefniskornanna, þ.e. núnings á milli þeirra, heldur en höggáhrifa frá umferðinni.

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

Tilgangur verkefnisins sem þessi skýrsla fjallar um er að:

- Afla upplýsinga um líklegt niðurbrot í burðarlagsefni á löngum tíma undir umferð, með prófunaraðferð sem líkir eftir umferðarálagi;
- Tengja niðurstöður sem fengnar eru á þennan hátt við ódýra prófunaraðferð, t.d. kúlakvarnarpróf;
- Meta hvort þessi prófunaraðferð sé raunhæf.

Auk prófana á burðarlagsefni voru kannaðar ýmsar innlendar og erlendar heimildir um prófunaraðferðir fyrir burðarlagsefni, með hliðsjón af líklegu notagildi þeirra.

Verkið var unnið fyrir styrk frá Rannsókn- og þróunarsjóði Vegagerðarinnar. Verkefnishópurinn var skipaður þeim Ásbirni Jóhannessyni, Hafsteini Hilmarssyni og Oddi Þórðarsyni, sem allir eru starfsmenn Nýsköpunarmiðstöðvar Íslands, svo og Gunnari Bjarnasyni frá Vegagerðinni. Verkefnisstjóri var Óskar Örn Jónsson á Nýsköpunarmiðstöð Íslands.

## 2. UM PRÓFANIR Á BURÐARLAGSEFNUM

### 2.1 Fyrirmæli Vegagerðarinnar um styrkleikaprófanir á burðarlagsefnum

Þrenns konar styrkleikapróf<sup>1</sup> eru notuð héraendis til að sneiða hjá burðarlagsefnum sem eru líkleg til að molna niður (Vegagerðin 2014, bls. 5-37\_5-40). Eitt þeirra er Los Angeles próf (ÍST EN 1097-2, 1998). Niðurstaða prófsins er blanda af höggþoli og slitþoli (Krebs og Walker 1971, bls. 262) og hana ber að nota með gætni, einkum til samanburðar á steinefnum af ólíkum uppruna (ASTM Standard C131). Annað próf er Bg-stuðull sem þó er ekki staðlað próf<sup>2</sup>. Mælikvarði prófsins er breyting á sáldurferli sýnis eftir höggáraun (þjöppun í Proctor-hamri) en upprunalega var þessi mælikvarði notaður til að meta niðurbrot í þríasaprófi á grófu steinefni (Marsal 1973, bls. 130). Þriðja prófið er berggreining, sem raunar er eigindlegt mat á steinefni og ekki styrkleikapróf en gefur þó vísbendingu um styrkleika. Berggreining er staðlað próf (ÍST EN 932-3, 1996), en héraendis eru notuð mun ýtarlegri greiningarfyrirmæli. Kröfur í leiðbeiningum Vegagerðarinnar til burðarlagsefnis með hliðsjón af berggreiningu eru einungis leiðbeinandi (Vegagerðin 2014, bls. 5-37).

Kúlnakvarnarpróf (ÍST EN 1097-9, 1998) hefur einnig verið notað til að meta styrkleika steinefna, þó ekki í burðarlög. Það líkist Los Angeles prófinu að nokkru leyti í framkvæmd og áraunin er einnig blanda af núningi og höggum. Þrátt fyrir það benda prófanir á íslenskum steinefnum til þess að fylgni milli niðurstaðna þessara tveggja prófunaraðferða sé ekki marktæk (Pétur Pétursson 1996, bls. 23). Vera má að höggþol vegi þyngra í prófunarniðurstöðu Los Angeles prófsins en kúlnakvarnarprófsins.

### 2.2 Íslenskar rannsóknir á niðurbroti í burðarlagi

Tafla 2.1 sýnir breytingar á tólf ára tímabili á fínefnainnihaldi í þrem íslenskum vegarköflum með klæðingarslitlagi (S.Erlingsson, G.Bjarnason & V.Thorisson 2000, bls. 318). Kaflarnir voru byggðir 1986 og grafið í þá til rannsókna 1998. Breytingin sem taflan sýnir er sennilega ýkt því að burðarlagspykktir kaflanna voru vanhannaðar af ásettu ráði, m.a. til þess að undirstrika líkleg áhrif af of litlum lagþykktum. Í heimildinni eru engar upplýsingar um styrkleika steinefnisins.

**Tafla 2.1.** Breyting á fínefnainnihaldi (<75  $\mu$ ) á 12 ára tímabili í burðarlagi úr mulinni mól í þrem vegarköflum. Taflan sýnir mismun á fínefnishlutfalli (mælt í %) 1986 og 1998.

	Kafla 1.4.1	Kafla 1.4.2	Kafla 3.2.3.1
Efra burðarlag, %	+3,1	+2,1	-1,9
Neðra burðarlag, %	+4,4	+6,8	+2,4
Umferð, ÁDU	445	445	370

Jón Skúlason (1979) gerði athuganir á niðurbroti í malarslitlagsefnum í lofthamri. Sýni af dæmigerðu malarslitlagsefni úr fjórum námum voru prófuð. Grófara efni en 19 mm var siktað frá en að öðru leyti var sáldurferillinn óbreyttur. Fínefni í sýnunum var á bilinu 7-13 mm og Bg-stuðull á bilinu 3-13 %.

Sýninu var pakkað í stálhólk, hliðstæðum Standard Proctor móti með 102 mm þvermál. Rakastig við þökkun var 10 % af þurri þyngd. Ofan á sýnið kom stimpill sem setti sveiflandi álag á sýnið, högg sem áttu að líkja eftir umferð. Fast álag var 284 kPa og sveiflandi álag var 107 kPa til viðbótar fasta

<sup>1</sup> Í þessu samhengi er frostþolspróf undanskilið, það tilheyrir ekki aflfræðilegum (e. mechanical) styrkleikaprófunum.

<sup>2</sup> Hugmyndin að þessu prófi er sótt til Marshal (1973), bls. 130-132, sjá Jón Skúlason (1979). Nánari lýsing á framkvæmd prófsins er varðveitt á Nýsköpunarmiðstöð Íslands.

álaginu. Sveiflandi álag stóð á sýninu í 0,5 s í hvert skipti en á milli högga var 1,5 s hvíldartími. Lengsta prófunarskeiðið nam 200.000 höggum.

Sýnin voru sikuð fyrir og eftir prófun og sáldurferlarnir bornir saman. Jafnframt var fylgst með niðurbroti sama efnis í vegi með sýnatöku og siktun.

Helstu niðurstöður voru þær að niðurbrot malarslitlags í vegi er of flókið fyrirbrigði til að hægt sé að líkja eftir því með prófun í lofthamri. Mælingar sýndu að efnið brotnaði mest niður við þjöppun í mót fyrir prófun, en lítið til viðbótar í sjálfri prófuninni, þ.e. undir sveiflandi álagi. Veruleg dreifing á niðurstöðum var áberandi.

Arnpór Óli Arason (2005) gerði athuganir á þjöppunareiginleikum tíu burðarlagsefna í snúðþjöppu. Tilgangurinn var að bera saman heppilegasta þjöppunarraka fyrir snúðþjöppun annars vegar og Proctorþjöppun hins vegar. Sem aukageta var niðurbrot í snúðþjöppun kannað með því að bera saman sáldurferla prófunarsýna fyrir og eftir snúðþjöppun. Í skýrslunni eru ekki birtar tölur um niðurbrot, aðrar en samanburður á Bg-stuðli þriggja efna eftir Modified Proctor þjöppun annars vegar og snúðþjöppun (BG“gyro“) hins vegar. Af samanburðinum að dæma er Bg-stuðullinn nokkuð svipaður fyrir þessar tvær þjöppunaraðferðir, frávikin eru í báðar áttir og innan við 20 %. Af sáldurferlum fyrir sýnin, fyrir og eftir þjöppun í snúðþjöppu, sem eru birtir í skýrslunni má ætla að snúðþjappa mylji sýnin talsvert niður, lauslega áætlað af ferlunum er aukningin í efni sem smýgur 100 µm sikti á bilinu 1-4 %, og 1-12 % fyrir efni sem smýgur 4 mm sikti.

### 2.3 Erlendar rannsóknir á niðurbroti í burðarlagi

Sigurður Erlingsson (1996) hefur tekið saman yfirlit um ýmsan fróðleik um niðurbrot steinefna og prófanir á því. Þar kemur meðal annars fram (bls. 3-4) að magn niðurbrots er háð allmörgum eiginleikum steinefnisins, þ.á.m. kornastærðadreifingu, lögun efnisagna, virku spennuástandi, holrýmistölu, hörku agnanna og vatnsinnihaldi efnisins. Áhrif vatnsinnihalds geta orðið töluverð. Hann segir einnig frá ýmsum aðferðum (bls. 5-6) til að meta niðurbrot út frá sáldurferlum fyrir og eftir álagspróf. Síðast en ekki síst nefnir hann dæmi úr heimildum um tengsl milli þrýstispennu og niðurbrots (bls. 3). Svo virðist sem niðurbrot byrji fyrir alvöru þegar ákveðinni þrýstispennu er náð (og hún er sem vænta má breytileg eftir efnunum) en dæmin spanna 700 til 3500 kPa. Í sömu heimild (bls. 14) færir hann rök að því að spennuárun frá 10 tn valtara í 20 cm þykku burðarlagi sé um 1000 kPa við neðra borð burðarlagsins en 2000 kPa við efra borð þess. Hann birtir einnig niðurstöður sínar frá útreikningum á hámarksspennum í nokkrum álagsprófum (bls. 16) og þar kemur fram að hámarksspenna í Modified Proctor prófi er 1870 kPa. M.ö.o. svarar hámarksspenna í Modified Proctor prófi nokkurn veginn til spennuárunar í 20 cm þykku burðarlagi frá 10 tn valtara.

Transportation Research Board lét gera ýtarlega samanburðarrannsókn (Saeed, Hall og Barker 2001) á aðferðum sem eru notaðar til að prófa og velja steinefni í óbundin burðar- og styrktarlög vega. Í rannsókninni var lögð áhersla á að vinsa úr aðferðir sem væru líklegar til að spá fyrir um frammistöðu steinefna og að gera tillögur um nýjar prófunaraðferðir þar sem þess væri talin þörf. Prófunaraðferðir sem voru teknar til skoðunar og eiga að lýsa styrkleika steinefna (e. toughness) voru Los Angeles próf, AIV (Aggregate Impact Value), ACV (Aggregate Crushing Value), Micro-Deval, snúðþjöppupróf (Gyratory Test), AAV (Aggregate Abrasion Value) og Durability Mill. Þessum prófunum voru gefnar einkunnir, byggðar á huglægu mati, sem eiga að lýsa notagildi þeirra, þar á meðal spá um frammistöðu (e. performance predictability). Einkunnirnar voru þrjár, G (Good), F (Fair) og P (Poor). Af áður nefndum prófunaraðferðum fengu tvær, ACV og Micro-Deval, einkunnina G; allar hinar fengu

einkunnina F (bls. 9). Fimm fyrstnefndu prófunum var síðan beitt á valinn hóp steinefna og niðurstöðurnar bornar saman við reynslu af sömu steinefnum. Á grundvelli þessa samanburðar var svo ályktað að af prófunum sem eiga að lýsa *styrkleika* steinefna (e. toughness and abrasion resistance) hefði einungis Micro-Deval tengsl við frammistöðu (e. performance) í óbundnum lögum yfirbyggingar (bls. 47). Hinsvegar er tekið fram að skerstyrkur steinefnisins hafi miklu meiri áhrif á frammistöðu steinefnis í óbundnum lögum yfirbyggingar en nokkurt annað próf. Reyndar hafi stífni (e. stiffness) svipuð áhrif en hún sé sterklega háð skerstyrk (bls. 47).

Þess má geta að meðal prófunaraðferða sem voru teknar til skoðunar var gangfræðilegt (e. dynamic) þríasapróf, en aðeins í þeim tilgangi að meta skerstyrk steinefnis.

Höbada (1977) telur líklegt að vissar tegundir skemmda á vegum í Svíþjóð megi rekja til niðurbrots í burðarlagi. Hann álitur að tilhneiging burðarlagsefnis til að mynda fínefni sé einn afdrifaríkasti eiginleiki þess (bls. II) og tekur fram að þjálni fínefnisins skipti máli þegar rakastig þess er hátt (bls. IV). Hann telur einnig að hefðbundin styrkleikapróf eins og hrökknipróf, Los Angeles próf og Dorrypróf (s. sliptal) gefi ekki rétta mynd af hæfni sem burðarlagsefni (bls. I) og bendir jafnframt á að prófunaraðferðir sem henta vel í einu landi þurfi ekki að reynast vel í öðru (bls. 1). Hann nefnir einnig að hefðbundnar prófunaraðferðir beiti skammvinnri en öflugri áraun, en í veginum myndist fínefni að öllum líkindum vegna langvarandi núnings milli efniskorna fyrir áhrif umferðarinnar (bls. 6). Höbada bendir líka á að niðurbrot að vissu marki þurfi ekki endilega að vera neikvætt svo fremi niðurbrotið myndi ekki þjált (e. plastiskt) fínefni, og vitnar í heimild þess efnis að burðareiginleikar efnis með mikla holrýmd geti jafnvel batnað ef efniskornin raðast þéttar við niðurbrotið (bls. 1). Hann er aftur á móti efnis um að rétt sé að nota einungis grófa hlutann af steinefninu til prófunar, það geti skekkt niðurstöðuna, því fíngerðasti hlutinn sé oft lélegasti hluti burðarlagins (bls. 5).

Í leit að hentugu prófi gerði Höbada samanburð á reynslu af allmörgum (12) burðarlagsefnum (stærðaflokknum 0-16 mm) og tvenns konar prófunum á þeim, annars vegar hrærsluprófi í vatni þar sem eiginleikar efnisins fyrir og eftir hrærsluna eru bornir saman eftir 10 mínútna hrærslu (bls. 9-11), hinsvegar þjöppun í Proctormót (AASHTO T 180). Niðurstaðan varð í stuttu máli sú að fínefnamyndunin í hrærsluprófinu væri álíka mikil og í burðarlagi undir umferð, en niðurbrot á grófu efni lítið (nema efnið væri lélegt), svo að sáldurferillinn yrði svipaður og í sýnum teknum úr vegi. Þjálni fínefnisins sem myndaðist í hrærsluprófinu varð þó meiri en í vegi. Í þjöppunarprófinu myndaðist hins vegar allt of lítið fínefni og þjálni (s. plastictet) þess var minni en reyndin varð í burðarlagi. Höbada telur æskilegt að þróa hrærsluprófið frekar (bls. V).

Paige-Green (2007) staðhæfir að sérhvert gosberg sem hefur kristallast við háan hita sé í eðli sínu óstöðugt og veðrist með tímanum (bls. 3). Hann segir einnig að margs konar prófunaraðferðum hafi verið beitt til að greina heppileg steinefni frá óheppilegum en þrátt fyrir það hafi komið upp vegaskemmdir sem séu raktar til lélegrar endingar (e. durability) og það hafi skert traust á prófunaraðferðunum (bls. 4). Hann skýrir frá umfangsmiklum prófunum á steinefnum úr 12 námum í Suður-Afríku sem eru að uppruna til dólerít og basalt. Alls var beitt 16 aðferðum, mörgum þeirra velþekktum, til að meta efnin (bls. 7). Niðurstöðurnar voru bornar saman við huglægt mat á reynslu af efnunum. Meðal annars kom í ljós að steindastærðir virtust hafa meiri áhrif á niðurstöðu Los Angeles prófs en ending (e. durability) steinefnisins (bls. 10). Ennfremur virtist engin ein af aðferðunum sem sem teknar voru til skoðunar gefa afdráttarlausar vísbendingar um endingu steinefnis af þessari gerð (crushed basic crystalline rock). Þá er eftirtektarvert að Los Angeles próf (þurr prófun) virtist ekki henta til að greina á milli steinefna sem endast vel og hinna sem endast illa (bls. 13). Washington



Degradation Test (WSDOT T 113) og náskykt próf, Aggregate Durability Index (AASHTO T 210) reyndust hafa sterkasta tengingu við frammistöðu (e. performance) (bls. 11). Aggregate Durability Index virtist þó passa betur við reynslu (14).

Niðurstöður mismunandi prófa stangast sumar hverjar á, sem að mati Paige-Green bendir til þess að fleiri en eina prófunaraðferð þurfi til að úrskurða um endingu (e. durability) steinefnis (bls 15).

Liu og samstarfsmenn hans (2012) gerðu samanburð á notagildi fjögurra prófunaraðferða, Micro-Deval, Washington Degradation Test, Los Angeles prófi og súlfatprófi til að meta endingu (e. durability) steinefna í burðarlag. Rannsóknin var takmörkuð við 16 steinefni frá Alaska.

Í heimildakönnun tengdri rannsókninni kemur fram að steinefni geta spillst (e. degrade) vegna núnings hvert við annað í röku umhverfi eða molnunar og myndað þjált fínefni sem minnkar núningsviðnám kornanna innbyrðis og getur þannig valdið skemmdum á vegi (bls. 6 og 10). Í heimildakönnuninni kemur einnig fram að sum steinefni spillast hraðar í röku ástandi en þurru (bls. 6). Flest ríki BNA nota Los Angeles prófið til að meta endingu steinefna (bls. 5) en það er (samkvæmt heimildinni) ekki framkvæmanlegt á votu steinefni (bls. 6). Prófanir gáfu til kynna að meðal niðurstaðna af áðurnefndum samanburði sé fylgni sé einna sterkust milli Micro-Deval og Washington Degradation Test ( $r=-0,65$ ) en annars lítil ( $r=0,35$  eða minni) (bls. 37). Niðurstaða rannsóknarinnar er á þann veg að Washington Degradation Test sé ótraustara en hin prófin í samanburðinum, en æskilegt sé að taka Micro-Deval upp sem viðbótarpróf (auk Los Angeles prófs og súlfatprófs) á steinefnum í Alaska.

Meðan á byggingu vegarins stendur verður steinefni í burðarlagi vegarins fyrir mikilli áraun frá þungaflutningum á efni og vinnuvélum sem getur valdið niðurbroti. Sigurður Erlingsson (2000, bls. 19) tilgreinir að dæmi séu um að öxulpungi ökutækja vinnuumferðar sé allt upp í fjórfalt leyfilegt öxulálag, en á móti komi að þrýstingur í hjólbörðum sé hafður lægri en tíðkast í hefðbundinni umferð. Niðurbrot kemur fram sem breyting á sáldurferli, m.a. sem aukið fínefnainnihald.

Í Kanada (Án höfundar 2012) hafa verið gerðar athuganir á tilhneingingu steinefna til að brotna niður meðan á byggingu vegar stendur, með því að þjappa það í snúðþjöppu (e. gyratory compactor). Í þessu skyni var snúðþjappa (sem gerir allt í senn, að þjappa steinunum saman, nudda þeim hverjum við annan, brjóta þá og mylja) notuð til að líkja eftir áraun sem efnið verður fyrir meðan á byggingu vegarins stendur og eftir að hann er opnaður fyrir umferð. Prófunaraðferðinni var beitt á sjö burðarlagsefni og notagildi aðferðarinnar metið.

Niðurstaðan var á þá leið að þessi aðferð geti komið að gagni til að meta burðarlagsefni, geti útilokað ónothæf efni, en geti þó ekki komið í stað hefðbundinna prófunaraðferða að svo stöddu. Ennfremur þurfi að safna upplýsingum um raunverulegt niðurbrot í vegi áður en hægt sé að setja fram kröfur. Niðurstöðurnar benda til þess að gildandi kröfur (til niðurstaðna úr Los Angeles prófi og Micro-Deval) til grófra steinefna efna séu við hæfi.

### 3. UNDIRBÚNINGUR AÐ PRÓFUNUM

Á undirbúningsstiginu var ætlunin að koma sér niður á heppileg prófunarskilyrði, einkum sýnisgerð (þ.m.t. sáldurferil, stærð, lögun og innbyggingu), sveiflutíma, lóðrétt álag og hliðarálag í prófun, svo og aðferðir til að meta áhrif af prófuninni. Á þessu stigi þótti skynsamlegt að velja lélegt burðarlagsefni til fyrstu prófana, en þó nothæft samkvæmt verklysingum Vegagerðarinnar fyrir vegi með litla umferð (Vegagerðin 2014, bls. 5-37\_5-40). Röksemdafærslan fyrir þessu vali var á þá leið að áhrif umferðar á niðurbrot burðarlagsefnis væru líklegri til að koma fram á lélegu efni en sterku. Ef prófunaraðferðin sýndi engin áhrif á lélegt efni væri ólíklegt að nokkur áhrif kæmu fram á sterkari efnum og þar með væri prófunin tilgangslaus.

Verkefnishópurinn gerði tillögu að tveim burðarlagsefnum til prófunar, frá Lárkoti (nnr. 557-12-09) og Kúagerði (nnr. 441-16-02) og varð Kúagerði fyrir valinu. Tafla 3.1 sýnir eiginleika þess varðandi styrkleika og kornalögun ásamt leiðbeinandi kröfum Vegagerðarinnar (Vegagerðin 2014, bls. 5-37\_5-40) til burðarlagsefnis þar sem umferð þungra bíla ( $\dot{A}DU_p$ ) er 400 bílar á dag eða meiri.

**Tafla 3.1.** Nokkrir efniseiginleikar burðarlagsefnis frá Kúagerði (Pétur Pétursson, 2008) ásamt kröfum í leiðbeiningum Vegagerðarinnar um val á burðarlagsefni (Vegagerðin, 2014).

Efniseiginleiki	Mæling	Krafa
Berggreining, 3. flokks efni [%]	5 <sup>3</sup>	≤12
Los Angeles gildi (ÍST EN 1097-2) [%]	23,1	<25
Bg-stuðull (mod) [-]	10,0	≤10
Kleyfnistuðull (ÍST EN 933-3) [%]	13,6	≤20
Kúlnakvörn (ÍST EN 1097-9) [%]	10,0	engin

Samkvæmt leiðbeiningum Vegagerðarinnar um val á burðarlagsefni (Vegagerðin 2014, bls. 5-37\_5-40) mæta framangreindir efniseiginleikar kröfum til burðarlagsefnis þar sem þung umferð ( $\dot{A}DU_p$ ) er ≥ 400 þungir bílar á dag. M.ö.o. er þetta efni í hæsta gæðaflokki hvað styrkleika og kornalögun snertir. Í ljósi þess að efnið átti að miðast við lágmarkskröfur til burðarlagsefnis, sýna þessar niðurstöður að efnið er óheppilega valið með tilliti til þess að tilgangurinn er að komast að notagildi prófunaraðferðarinnar.

#### 3.1 Tillaga að prófunaraðferð

Verkefnishópurinn gerði drög að vali á prófunaraðstæðum í þríasaprófi. Þar var haft að leiðarljósi að:

- Niðurbroti í burðarlagi má skipta í tvo ólíka þætti, niðurbrot á framkvæmdastigi og niðurbrot á notkunartímabili vegarins. Niðurstöður heimildakönnunar gefa til kynna að niðurbrot í Modified Proctor prófi henti vel til að ákvarða niðurbrot á framkvæmdastiginu. Aðstæður í þrías geta líkt eftir aðstæðum á notkunarstiginu og rétt sé að miða prófunarfyrirkomulagið við öflun upplýsinga um niðurbrot á notkunarstiginu fyrst og fremst.
- Val á lóðréttu álagi skyldi annars vegar taka mið af líklegu álagi í yfirborði burðarlags undir klæðingu, hins vegar af álagi sem mögulegt er að setja á sýni í þríasnum. Í burðarlaginu er það loftþrýstingur í hjólbarða sem hefur mest að segja um lóðréttar spennur í burðarlagi (Refsdal 2011, bls. 3). Samkvæmt útreikningum (Sigurður Erlingsson 2000, bls. 16) er lóðrétt spenna á yfirborði burðarlags undir klæðingu nánast hin sama og þrýstingur í hjólbarða sem

<sup>3</sup> Þessi hluti er basaltgjall og vikur.

fer um veginn (en minnkar til muna niður eftir burðarlaginu). Hámark leyfilegs þrýstings í hjólbarða er 9 bör eða 900 kPa (Samgönguráðuneytið 2004, 16. grein). Lóðréttar spennur geta að hámarki verið um 3 MPa í þríasnum, miðað við sívalningssýni sem er 100 mm í þvermál.

- Val á hliðarálagi tæki annars vegar mið af líklegu hliðarálagi í burðarlagi, hins vegar af álagi sem mögulegt er að setja á sýni í þríasnum. Hvað fyrrnefnda atriðið snertir er hliðarálag frá jarðvegsþrýstingi óverulegt í burðarlagi. Hliðarálag frá umferð er hins vegar mjög breytilegt eftir stöðu hjólbarða miðað við þann örbút af burðarlaginu sem á í hlut (Sigurður Erlingsson 2000, bls. 6). Í þrías verður hliðarálagið að vera fast og láréttar spennur geta mestar verið um 1 MPa.
- Lóðrétt álagið væri sveiflandi og sveiflutíðnin nægilega mikil til að hægt yrði að ná 1.000.000 sveiflum á vikutíma. Þetta svarar um það bil til þungaumferðar í 10 ár á vegi með 3000 ÁDU og til þess þarf sveiflutíðnin að vera 2 Hz.
- Heimildir um styrkleikaprófanir á þurrum steinefnum annars vegar og rökum hins vegar sýna að styrkleiki minnkar oft þegar efnin blotna. Þetta á einkum við um ummynduð efni. Á þessari forsendu var lagt til að efnin yrðu prófuð rök. Raki í burðarlögum er mjög breytilegur og líklegur raki er á bilinu 5-15 (þyngdar)prósent, 6 % er líkleg tala. Ljóst er steinefnasýni með litlu eða engu fínefni halda takmörkuðum raka, eða einungis sem svarar mettivatni þess. Þar sem sýni í þríasaprófunum eru klædd með rakapéttri gúmmíhúð meðan á prófun stendur, er ekki hætt á að raki tapist úr sýnunum meðan þau eru prófuð.
- Ýmsir mælikvarðar á niðurstöður koma til greina, s.s. aukning á fínefni (smærra en 63  $\mu\text{m}$ ) við prófunina; breyting á hlutfalli efnis sem smýgur 4 mm sikti; niðurbrotsmat með samskonar reikniaðferð og notuð er til að finna Bg-stuðul; líka kemur til greina að mæla aukningu efnis smærra en 20  $\mu\text{m}$ , sem vísbendingu um áhrif á þjálmi.
- Af tæknilegum ástæðum verður að takmarka kornastærðir í sýnum í þríasaprófi við 20 mm (þótt stærstu korn í burðarlagsefni séu sjaldan undir 22 mm og oft miklu stærri). Leyfilegt fínefni í burðarlagi (smærra en 63  $\mu\text{m}$ ) er allt að 5 %. Fínefnið er líklegt til að fjölga snerti-flötum milli korna í prófunarsýni og stækka þá, og verja efniskornin þannig í einhverjum mæli gegn niðurbroti. Það er óheppilegt þegar tilgangur prófunarinnar er að framkalla niðurbrot. Þess vegna kemur til greina kemur að nota aðeins hluta úr sáldurferli burðarlags, t.d. 10-20 mm.

Á grundvelli þessara tillagna voru samin drög að prófunarlýsingu. Verklýsingin hefur síðan verið endurbætt með hliðsjón af reynslu. Núgildandi prófunarlýsing er birt í viðauka I. Meginatriði hennar ásamt tilheyrandi röksemdafærslu fara hér á eftir.

Sýnið er grófsiktað á 4 mm og 16 mm siktum og stærðirnar á milli notaðar til prófunar. Þessi hluti endurspeglar ekki kornastærðadreifingu burðarlagsefnis, en er valinn til að flýta fyrir niðurbroti, þar sem smærra efni en 4 mm, einkum þó fíngerðasti hlutinn, er líklegt til að verja sýnið gegn niðurbroti.

Innbyggingu er hagað þannig að rúmþyngd sýnisins að henni lokinni sé sem næst rúmþyngd eftir Standard Proctor þjöppun. Hún er til muna minni en tíðkast við þjöppun burðarlaga. Modified Proctor er líklega raunhæfari, en er líkleg til að brjóta sýnið meira niður en Standard Proctor þjöppun. Þar sem megingilgangur prófunarinnar er að kanna fínefnamyndun undir umferðarálagi fremur en niðurbrot á framkvæmdatíma er Standard Proctor þjöppun talið heppilegra val.

Þar sem sýnið er mun hærra (20 cm) en tíðkast í Standard Proctor þjöppun (11,6 cm) eru sýnin þjöppuð í fleiri lögum (átta í stað þriggja) og með svokallaðri undirþjöppun. Tilgangur hennar er að rúmþyngd sýnisins verði eftir föngum jöfn í sýninu frá efra borði og niður úr. Í hvert lag er viktað

ákveðið efnismagn sem m.a. ákvarðast af rúmþyngd efnisins við Standard Proctor þjöppun. Hvert lag er síðan þjappað þar til samanlagt rúmmál þess og allra laga þar fyrir neðan hefur náð ákveðnu marki (en ekki með ákveðinni þjöppunarorku eins og áskilið er í Proctor þjöppun). Á þennan hátt er eftir föngum tryggt að rúmþyngd sýnisins verði jöfn í sýninu, frá efra borði og niður úr.

Gera má ráð fyrir að rakt steinefni hafi að jafnaði minna slitþol gagnvart núningi en þurrt. Ennfremur er líklegra að burðarlag í vegi sé rakt fremur en þurrt og því er settur raki í sýnið (fyrir innbyggingu) sem svarar til mettvatns þess. Rakastig sýnisins breytist ekki meðan á prófun standur þar sem það er klætt í loft- og vatnspétta gúmmíhúð í þríasnum.



**Mynd 3.1.** Burðarlagsýni í þrías, tilbúið til prófunar.

Prófunarsýnin voru 100 mm í þvermál og 200 mm á hæð. Þau voru þjöppuð í stálhólki sem er skorinn eftir endilöngu í tvo jafnstóra hluta þannig að auðvelt er að taka mótið utan af sýninu. Mótin voru klædd að innan með tvöfaldri gúmmíhúð sem fylgir sýninu eftir innbyggingu. Hún gerir kleift að byggja upp hliðarþrýsting meðan á prófun í þríasnum standur og án þess að vatn komist inn í sýnið.

Að innbyggingu lokinni er prófunarsýninu komið fyrir í lokuðu og gegnsæu hylki í þríasnum. Þrýsting í hylkinu (hliðarþrýsting,  $\sigma_3$ ) er hægt að velja en hann er fasti meðan á prófun stendur. Loftþrýstingurinn inni í sýninu er jafn ríkjandi loftþrýstingi utan við þríasinn, þar sem gangur þar á milli er hafður opinn. Á enda sýnisins kemur svo sveiflandi álag,  $\sigma_1$ , sem er stillanlegt (lágmark og hámark auk sveiflutíma).

Sveiflutíðni meðan á prófun stendur er 2 Hz. Þessi sveiflutíðni var valin með það fyrir augum að hægt væri að ljúka einni prófun með allt að  $10^6$  sveiflum á einni viku. Önnur sveiflutíðni var ekki reynd en vera má að þessi sveiflutíðni sé svo mikil að sýnið hafi ekki tíma til rétta sig upp á milli álagspúlva. Engin merki sáust þó um það á stuttum bútum af línuritum af prófunarferlinu.

Þegar prófun er lokið er sýnið siktað. Mælikvarði á niðurbrot er annars vegar sýnishluti sem smýgur 4 mm sikti (mælt í %), hins vegar sýnishluti (af heildarsýni) sem smýgur 63  $\mu\text{m}$  sikti. Þar sem sýnið brotnar óhjákvæmilega eitthvað niður í innbyggingu er eitt sýni byggt inn og síðan siktað (án prófunar í þrías) til að fá mat á niðurbrot sem verður við innbygginguna eina.

Sá hluti sem smýgur 63  $\mu\text{m}$  sikti eftir prófun er tekinn frá og sáldurferill hans ákvarðaður allt niður að 2  $\mu\text{m}$ . Þetta er gert í því skyni að afla vitnesku um kornastærðir í fíngerðasta niðurbrotsefninu, þ.e. því sem smýgur 63  $\mu\text{m}$  sikti. Sú vitneskja getur mögulega gefið vísbendingar um það hvort niðurbrotsefnið sé frostnæmt eða þjál. Fínefni smærra en 63  $\mu\text{m}$  sem verður til við innpökkun er einnig sáldurgreint á sama hátt til samanburðar.

Fáeinir prófanir voru gerðar í tilraunaskyni meðan leitað var að heppilegum prófunarskilyrðum. Fjórum þeirra er lýst stutt stuttlega í viðauka II.

## 4. NIÐURSTÖÐUR PRÓFANA Á BURÐARLAGSEFNI FRÁ KÚAGERÐI

### 4.1 Breytingar á sáldurferli

Eitt sýni af burðarlagsefni frá Kúagerði var prófað í samræmi við prófunarlýsinguna í viðauka I. Þessi prófun er sú sama og er lýst í viðauka II, tilraun 4.

Sáldurferill sýnisins áður en það var byggt inn er sýndur á línuriti í Viðauka III-1. Samsvarandi sáldurferill eftir innbyggingu (og fyrir prófun í þrías) er sýndur á línuriti í Viðauka III-2. Samanburður á þessum tveim sáldurferlum sýnir að:

- sýnið brotnar niður við innbygginguna. Að henni lokinni fara 0,9 % sýnisins gegnum 4 mm sikti og 0,2 % gegnum 63  $\mu$ m sikti<sup>4</sup>.

Sáldurferill samskonar sýnis eftir innbyggingu og prófun er sýndur á línuriti í Viðauka III-3. Samanburður á þessu línuriti og línuriti í Viðauka III-2 (eftir innbyggingu eingöngu) sýnir að:

- sýnið brotnar enn frekar niður við prófun í þrías. Eftir leiðréttingu vegna niðurbrots sem stafar frá innbyggingu fara 4,8 % sýnisins gegnum 4 mm sikti og 0,3 % sýnisins gegnum 63  $\mu$ m sikti.

Mælingar á þeim hluta sýnisins sem er smærri en 63  $\mu$ m sikti, annars vegar eftir innþökkun og hins vegar eftir prófun í þrías, sýna óverulega breytingu, raunar minnkun, á innihaldi af fínefni sem er smærra en 20  $\mu$ m; úr 70 % (reiknað af efni smærra en 63  $\mu$ m) í 66 %. Ef hluti sýnis sem smýgur 20  $\mu$ m sikti getur talist vísbending um þjálmi burðarlagsefnis (sem verður að teljast líklegt) bendir niðurstaðan ekki til breytinga á þjálmi eftir prófun í þrías.

### 4.2 Kvarnargildi

Með verkefninu var m.a. fyrirhugað að tengja niðurstöður niðurbrots í þríasaprófi við niðurstöður úr ódýru styrkleikaprófi.

Heimildakönnunin gefur vísbendingar um að Micro-Deval próf (ÍST EN 1097-1) hafi tengsl við frammistöðu (e. performance) burðarlagsefna (Saeed, Hall og Barker 2001; Liu, Mullin og Rein, 2012). Prófunin byggist að nokkru leyti á því að nudda votum efniskornunum saman. Hræslupróf í vatni er af svipuðum toga og hefur tengsl við fínefnamyndun í burðarlagi undir umferð (Höbeda 1977). Hvorugt þessara prófa tíðkast hérlandis en þriðja prófið, kúlnakvarnarpróf (ÍST EN 1097-9), sem hefur verið notað hér um nokkurt skeið, er mjög svipað Micro-Deval prófinu, og er ódýrt og fljótlegt. Á þessum forsendum var kúlnakvarnarprófið valið sem ódýr prófunaraðferð sem gæti komið í stað niðurbrotsprófana á burðarlagsefnum í þrías, ef tengsl milli niðurstaðna reynast viðunandi.

Niðurstöður kúlnakvarnarprófs (Viðauki IV) á burðarlagsefni frá Kúagerði sýndu 10,1 % niðurbrot. Tenging milli niðurstaðna þessara tveggja prófunaraðferða er ekki möguleg að svo stöddu, til þess þarf að prófa nokkur burðarlagsefni af mismunandi styrkleika, helst 5-10, með báðum aðferðum.

<sup>4</sup> Rétt er að taka fram að við siktun verður að öllum líkindum eitthvert niðurbrot við það að efniskornin nuddast við vírnetið í siktunum, en hversu mikið er óvíst. Hins vegar má ætla að niðurbrot af þessum sökum sé svipað í sýnum sem eru borin saman, þannig að það hafi ekki afgerandi áhrif á samanburðinn.

## 5. UMRÆÐA OG ÁLYKTANIR

Niðurstöður þessarar rannsóknar styðja tilgátu um að hægt sé að nota þrías til að líkja eftir gangfræðilegu (e. dynamic) álagi sem efni í burðarlagi vegar verður fyrir eftir að vegurinn er tekinn í notkun. Með því að velja heppilega samsetningu lóðrétts álags og hliðarálags virðist vera gerlegt að láta sýnið sæta  $10^6$  álagspúlsum án þess að skerdbrot verði í sýninu, þó að lóðréttt álag nái 900 kPa í hverri álagssveiflu, en það svarar til hámarks þeirrar spennu sem búast má við í efra borði burðarlags undir klæðingu (eftir að vegur er tekinn í notkun). Á þennan hátt er hægt að líkja eftir niðurbroti, einkum þó síendurteknum núningi á milli efniskorna í burðarlaginu, sem ætla má að valdi aukningu í innihaldi þess af smágerðu fínefni á löngum tíma. Að þessu leyti er prófunaraðferðin raunhæfari en hefðbundnar prófunaraðferðir sem eru notaðar héraendis, og byggjast oftast en ekki á fljótverkri áraun frá höggum fremur langvarandi núningssáhrifum. Prófunaraðferðin gerir þó ekki kleift að líkja eftir sveiflum í hliðarálagi, líkt og gerist fyrir áhrif umferðarinnar í örbút af burðarlagi, sem rýrir nokkuð hæfni prófunaraðferðarinnar til að líkja sómasamlega eftir umferðarálagi.

Við prófun með þessum hætti kemur fram mælanleg breyting á sáldurferli sýnisins, bæði þegar miðað er við sáldur gegnum 4 mm sikti og gegnum 63  $\mu$ m sikti. Að svo stöddu hefur prófunaraðferðin aðeins verið reynd á einu burðarlagsefni. Breyting á sáldurferli mældist fremur lítil, enda var prófunin gerð á sterku efni. Hins vegar verður engin merkjanleg breyting á hluta fínefnis undir 20  $\mu$ m. Það minnkar líkur á að prófunaraðferðin geti spáð fyrir um myndun fínefnis sem gæti verið þjálta (e. plastic) í burðarlaginu.

Leit í heimildum að dæmum um sams konar notkun þríasaprófs hefur ekki borið árangur. Hins vegar benda ýmsar upplýsingar í heimildum til þess að prófunaraðferðir sem byggjast á núningi milli efniskorna geti verið heppilegri en þær sem byggjast á höggþoli, til að spá fyrir um endingu burðarlagsefna.

Prófunaraðferðin hefur óneitanlega vankanta. Einn er sá að í núverandi mynd gerir hún ráð fyrir þröngum flokki kornastærða (4-16 mm) í prófsýninu. Þar með vantar fínni hluta burðarlagsins í prófsýnið sem samkvæmt heimildum getur allt eins innihaldið lélegra efni en grófari hlutinn. Af þessum sökum geta niðurstöðurnar gefið bjagaða mynd af væntanlegu niðurbroti í burðarlagsefni. Í annan stað er prófunaraðferðin mjög tímafrek og dýr. Í verkefnislýsingunni var gert ráð fyrir því að sýnin yrðu prófuð jafnhliða með einhverri einfaldri og ódýrri prófunaraðferð og niðurstöður þessara tveggja prófunaraðferða tengdar saman með einhverjum hætti. Hvort þetta reynist mögulegt er allsendis óvíst að svo stöddu. Í þriðja lagi er ólíklegt að prófunaraðferðin gefi nokkrar nothæfar upplýsingar um niðurbrot í burðarlagi á framkvæmdatíma. Áraun á burðarlagsefnið er þá annars konar en undir hefðbundinni umferð, og upplýsingar úr heimildum benda til þess að prófunaraðferðir sem nota höggáraun fremur en núning séu heppilegri í því skyni.

Að öllu samanlögðu verður ekki annað séð en að prófun í þrías geti líkt nokkuð vel eftir kringumstæðum í burðarlagi undir umferð. Hins vegar hefur aðferðinni aðeins verið beitt á eitt burðarlagsefni enn sem komið er svo að reynslan er afar takmörkuð. Af sömu ástæðu er ekkert vitað um endurtekn-ingarnákvæmni. Ennfremur má búast við að prófunaraðferðin eigi eftir að taka breytingum með aukinni reynslu, ef tilraunum með hana verður fram haldið.

## HEIMILDIR

- AASHTO T 180. (1986). *Moisture-Density Relations of Soils Using a 1-lb [4.54 kg] Rammer and an 18-in. [457 mm] Drop*. Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Part II. Fourteenth Edition. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington.
- AASHTO T 210. (1986). *Aggregate Durability Index*. Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Part II. Fourteenth Edition. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington.
- Arnþór Óli Arason. (2005). *Prófun á óbundnum efnum í gyroþjöppu*. Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins, skýrsla nr. 05-02, Reykjavík.
- ASTM Standard C131. (1999). *Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*. ASTM International, West Conshohocken, PA. <http://www.astm.org>
- Án höfundar. (2012). *Assessment of the Degradation Potential of Road Base Aggregates using a Gyrotory Compactor*. [http://www1.mtq.gouv.qc.ca/en/projet\\_recherche/description.asp?NO\\_PROJ=R414.1P1](http://www1.mtq.gouv.qc.ca/en/projet_recherche/description.asp?NO_PROJ=R414.1P1)
- Höbeda, P., Bünzow, L. (1977). *Nedbrytningsbenägenhet hos bärlagergrus – resultat från laboratorieförsök*. Rapport nr. 140. Statens väg- och trafikinstitut, Linköping.
- ÍST EN 1097-1. (1996). *Tests for mechanical and physical properties of aggregates. – Part 1: Determination of the resistance to wear (micro-Deval)*. Staðlaráð Íslands, Reykjavík.
- ÍST EN 1097-2. (1998). *Tests for mechanical and physical properties of aggregates. – Part 2: Methods for the determination of resistance to fragmentation*. Staðlaráð Íslands, Reykjavík.
- ÍST EN 1097-9. (1998). *Tests for mechanical and physical properties of aggregates. – Part 9: Determination of the resistance to wear by abrasion from studded tires – Nordic test*. Staðlaráð Íslands, Reykjavík.
- ÍST EN 932-3. (1996). *Tests for general properties of aggregates. – Part 3: Procedure and terminology for simplified petrographic description*. Staðlaráð Íslands, Reykjavík.
- Jón Skúlason. (1979). *Athugun á malarlittögum*. Unnið fyrir Vegagerð ríkisins. Almenna verkfræðistofan, Reykjavík.
- Krebs, Robert D., Walker, Richard D. (1971). *Highway Materials*. McGraw-Hill Book Company, New York.
- Liu, J., Mullin A., Rein, J. (2012). *Use of the Micro-Deval Test for Assessing Alaska Aggregates*. Final Project Report. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alaska, Fairbanks. [http://ine.uaf.edu/autc/files/2012/08/Liu-MD-Final-Report\\_-draft-08-03-12.pdf](http://ine.uaf.edu/autc/files/2012/08/Liu-MD-Final-Report_-draft-08-03-12.pdf)
- Marsal, R. J. (1973). *Mechanical properties of rockfill*. Í: Ronald C. Hirschfeld and Steve J. Poulos (editors), *Embankment dam engineering: Casagrande volume*. Wiley, New York.
- Paige-Green, P. (2007). *Durability testing of crystalline rocks and specification for use as road base aggregate*. <http://researchspace.csir.co.za/dspace/handle/10204/1316>
- Pétur Pétursson. (1996). *Niðurbrot steinefna – 2. áfangaskýrsla*. Skýrsla E-14. BUSL – Efnisgæðanefnd, Reykjavík.
- Pétur Pétursson. (2008). *Niðurbrot steinefna. Fersk og blöðrótt sýni steinefnabanka frá Reykjanesi og nágrenni*. Skýrsla nr. NMÍ 08-06. Nýsköpunarmiðstöð Íslands, Reykjavík.



- Refsdal, G. (2011). Kapittel 9, *Dimensjonering av forsterkning*.  
[http://www.vegvesen.no/\\_attachment/290259/binary/512531](http://www.vegvesen.no/_attachment/290259/binary/512531)
- S.Erlingsson, G.Bjarnason & V.Thorisson. (2000). *Seasonal variation of moisture and bearing capacity on Icelandic test road sections*. Proceedings of the Fifth International Symposium on Unbound Aggregates in Roads. Dawson (ed.) Balkema, Rotterdam.
- Saeed, A., Hall, J. W., and Barker, W. (2001). *Performance-Related Tests of Aggregates for Use in Unbound Pavements Layers*. NCHRP Report No. 453. Transportation Research Board National Research Council, Washington.
- Samgönguráðuneytið. (2004). *Reglugerð 822/84 um gerð og búnað ökutækja*.  
<http://www.reglugerd.is/interpro/dkm/WebGuard.nsf/key2/822-2004>
- Sigurður Erlingsson. (1996). *Niðurbrot steinefna í óbundnum burðarlögum - staða þekkingar*. BUSL – Efnisgæðanefnd, skýrsla E-5, Reykjavík.
- Sigurður Erlingsson. (2000). *Niðurbrot steinefna í óbundnum burðarlögum – áhrifavaldar og útreikningar*. BUSL – Efnisgæðanefnd, skýrsla E-19, Reykjavík.
- Vegagerðin. (2014). *Efnisrannsóknir og efniskröfur. Leiðbeiningar við hönnun, framleiðslu og framkvæmd*.  
[http://www.vegagerdin.is/Vefur2.nsf/Files/Kafli5\\_Burðarlag\\_2014/\\$file/Kafli%205%20Bur%C3%B0arlag\\_2014.pdf](http://www.vegagerdin.is/Vefur2.nsf/Files/Kafli5_Burðarlag_2014/$file/Kafli%205%20Bur%C3%B0arlag_2014.pdf)
- WSDOT T 113. (2009 ). *WSDOT Method T 113. Method of Test for Determination of Degradation Value*. WSDOT Materials Manual M 46-01.03.  
<http://www.wsdot.wa.gov/publications/manuals/fulltext/M46-01/t113.pdf>

## VIÐAUKI I

### PRÓFUNARÝSING<sup>5</sup>

Tilgangur prófunarinnar er að nota þrías til að líkja eftir því hvort og hvernig steinefni brotna niður undir umferðarálagi.

1. Prófunin er gerð á þeim hluta efnisins sem er á milli 4 og 16 mm. Sáldurferill prófsýnis á að vera í samræmi við töflu 1 (sem leggur hluta af sáldurferli burðarlagsefnis úr möluðu bergi, flokkunarstærð 0/22 mm, til grundvallar, sjá leiðbeiningar Vegagerðarinnar um kröfur til burðarlagsefna (Vegagerðin 2014, bls. 5-28)).

**Tafla 1.** Undirbúningur að gerð prófsýnis.

Korna- stærð [mm]	Hluti [%]	Upp- safnað [%]	Áætlunar- sýni, þyngd [g]	Prófsýni, þyngd [g]
<4	0	0	0	
4-5,6	11,25	11,25	428	
5,6-8	26,25	37,5	997	
8-11,2	25	62,5	950	
11,2-16	37,5	100	1425	
>16	0	100	0	

2. Til undirbúnings að sýnum til prófunar þarf að finna mettivatn efnisins í prófsýninu, rúmþyngd þess eftir Standard Proctor þjöppun og sáldurferil eftir Standard Proctor þjöppun. Til að tryggja nægilegt efni í prófanirnar er heppilegt að ganga út frá u.þ.b. 50 kg frumsýni (60-70 % efnisins eru líkleg til að ganga úr við undirbúninginn) og sikta í kornastærðaflokka skv. töflu 1.
3. Hverja kornastærð fyrir sig þarf að þvo. Úr kornastærðunum þarf að setja saman minnst tvö áætlunarsýni (sjá töflu 1).
4. Á einu slíku áætlunarsýni þarf að ákvarða mettivatn þess.
5. Í annað slíkt áætlunarsýni þarf að setja raka samsvarandi mettivatni (sjá 4. lið) og ákvarða rúmþyngd þess eftir Standard Proctor þjöppun. Að því búnu skal reikna út hver þyngd hvers kornastærðar í prófunarsýni þarf að vera og færa inn í fimmta dálkinn (prófsýni) í töflu 1.
6. Síðan skal vikta úr hverjum kornastærðaflokki í hvert prófunarsýni fyrir sig samkvæmt sama dálki, blanda saman og splitta í átta hluta (einn hluta fyrir hvert lag í þjöppun í innbyggingu).
7. Áður en prófunarsýni eru byggð inn þarf að setja í þau raka samsvarandi mettivatni samkvæmt 4. lið og láta standa yfir nótt í lokuðu íláti.
8. Prófunarsýni skulu byggð inn í tvöfalt gúmmihulstur með Standard Proctor þjöppun og 12 % undirpökkun<sup>6</sup> í Ø 10 cm mót, 20 cm hátt, í átta lögum.
9. Á einu slíku (innbyggðu) sýni skal ákvarða sáldurferil skv. lið 13. (Tilgangurinn er að finna hvort efniskorn í sýninu brotna niður við þjöppunina og, ef svo er, hversu mikið).

<sup>5</sup> Þar sem engin fyrirmynd að prófunaraðferðinni er þekkt, má reikna með að hún muni taka breytingum með hliðsjón af reynslu.

<sup>6</sup> Undirpökkun; sýnið er þjappað í mörgum lögum og með auknum fjölda högga eftir því sem þjöppuðum lögum fjölga í mótinu. Þetta er gert til þess að þjöppun sýnisins verði sem jöfnust í mótinu frá yfirborði til botns. Höggafjöldi fyrir hvert lag er reiknaður út með þar til gerðu forriti sem er varðveitt á Nýsköpunarmiðstöð Íslands.

10. Prófunarsýnin skulu prófuð með föstu hliðarálagi ( $\sigma_3$ ) 200 kPa, og sveiflandi, lóðréttu álagi ( $\sigma_1$ ) sem er 200 kPa (160 kg á öxul) á hvíldarskeiðinu en 900 kPa (720 kg á öxul) á álagsskeiðinu.
11. Sveiflutíðnin í prófuninni skal vera 2 Hz.
12. Prófun skal fram haldið þar til annað af tvennu gerist; sýnið gengur saman um 10 % eða fjöldi álagspúlva nær  $10^6$  (um það bil vika í prófun ef sýnið brotnar ekki).
13. Að prófun lokinni skal sýnið þvegið á 63  $\mu\text{m}$  sikti. Efnið sem smýgur þetta sikti skal þurrkað (varlega) og varðveitt til frekari prófana ef þurfa þykir. Sá hluti sem situr eftir á 63  $\mu\text{m}$  sikti skal þurrkaður og siktaður á siktaraðinni 4-5,6-8-11,2 mm.

Síðast breytt 2014-04-16. ÁJ.

#### HEIMILDIR

1. Vegagerðin. (2014). Efnisrannsóknir og efniskröfur - leiðbeiningar við hönnun framleiðslu og framkvæmd. Kafli 5 - Burðarlag.  
[http://www.vegagerdin.is/Vefur2.nsf/Files/Kafli5\\_Burðarlag\\_2014/\\$file/Kafli%205%20Bur%C3%B0arlag\\_2014.pdf](http://www.vegagerdin.is/Vefur2.nsf/Files/Kafli5_Burðarlag_2014/$file/Kafli%205%20Bur%C3%B0arlag_2014.pdf)

## VIÐAUKI II

### TILRAUNIR MEÐ MISMUNANDI FYRIRKOMULAG PRÓFANA Í ÞRÍÁS

Hér á eftir er lýst fáeinum tilraunum sem voru gerðar í leit að heppilegri prófunaraðferð. Þær fólust að mestu í tilraunum með mismunandi lárétt og lóðrétt álag á sýni við prófun í þríás. Prófunaraðferðinni var síðan breytt smám saman með hliðsjón af reynslunni sem aflaðist. Hér á eftir er fjórum slíkum tilraunum lýst stuttlega ásamt ályktunum sem voru dregnar af þeim. Síðasta tilraunin var talin skila viðunandi árangri.

#### Tilraun 1 (merki S1-3):

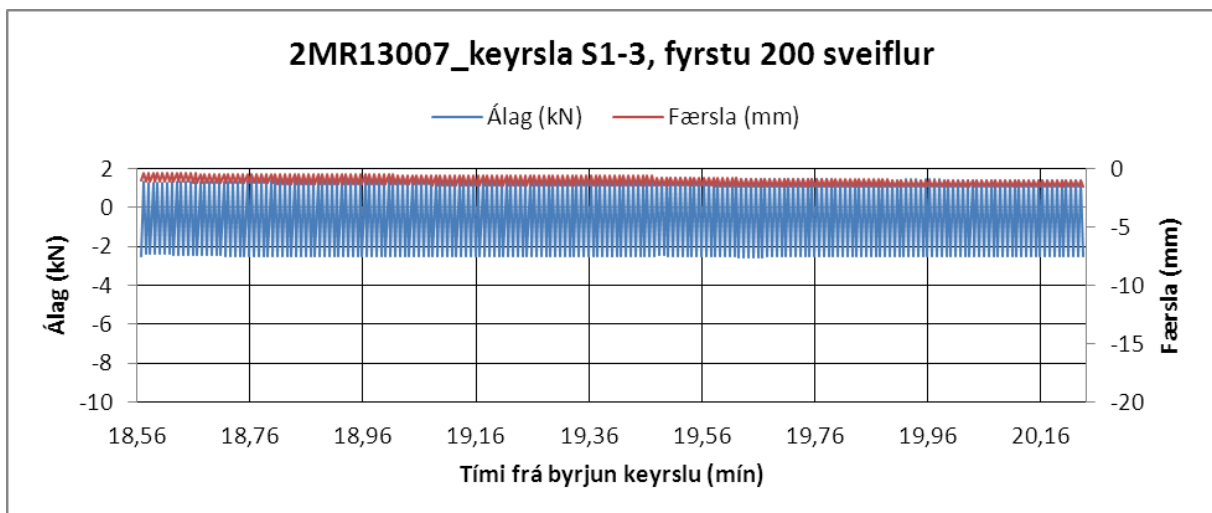
*Stutt lýsing og tilgangur.* Í þessari tilraun var lóðrétt álagið látið sveiflast milli 718 kPa (hámark) og 218 kPa (lágmark). Hliðarálagið var haft 400 kPa. Hlutfallið  $\sigma_1/\sigma_3$  var að hámarki 1,8; að lágmarki 0,5. Að öðru leyti var prófunaraðferðin í samræmi við verklýsinguna sem er birt í viðauka I.

Tilgangurinn með því að hafa lóðrétt álagið lægra en hliðarálagið í hluta af álagspúlsinum (þ.e. ýmist hærra eða lægra en hliðarálagið) var að ýta undir mismunarhreyfingu á steinunum í sýninu og fá þá þannig til að nuddast saman. Hliðarálagið í þessari tilraun var haft hátt til að koma í veg fyrir (sker)brot í sýninu meðan á prófun stæði.

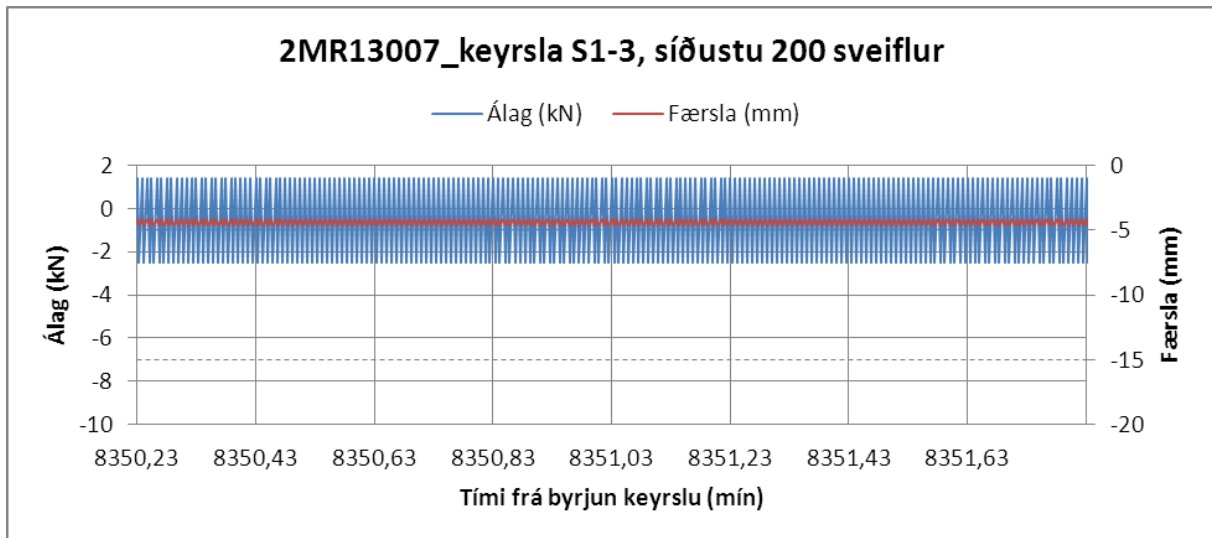
*Niðurstöður.* Varanleg samþjöppun varð um 4 mm meðan á keyrslunni stóð og sýnið stóðst  $10^6$  sveiflur. Varanleg samþjöppun á sýninu mældist hverfandi lítil á fyrstu 50 sveiflunum, sem tæpast getur staðist. Slaglengd í sveiflunni var nánast óbreytt allan prófunartímann, um 0,5 mm. Fyrstu og síðustu 200 sveiflurnar ásamt færslu eru sýndar á myndum V-II-1 og V-II-2.

Að prófun lokinni mældist sáldur gegnum 4 mm sikti 1,8 % og gegnum 0,063  $\mu$ m sikti 0,1 % (hvort tveggja eftir leiðréttingu vegna niðurbrots í innbyggingu og siktun). Engin merki sjást um brot í sýninu á síðustu 200 sveiflunum (myndi koma fram sem skörp breyting á færsluferlinum).

*Ályktun.* Meðan á prófun stóð sást engin mismunarhreyfing á steinum. Ef til vill er hliðarálagið svo hátt að það (ásamt gúmmíhúðinni sem umlykur sýnið) læsir stöðu steinanna innbyrðis þannig að þeir geta lítið hreyfst.



**Mynd V-II-1.** Álag og færsla í fyrstu 200 sveiflunum í tilraun 1. Álag sem þjappar sýninu saman er negatíft og færslan sömuleiðis. 0-punktur álagsins svarar til hliðarþrýstingsins (400 kPa).



**Mynd V-II-2.** Álag og færsla í síðustu 200 sveiflunum í tilraun 1. Álag sem þjappar sýninu saman er negatíft og færslan sömuleiðis. 0-punktur álagsins svarar til hliðarþrýstingsins (400 kPa).

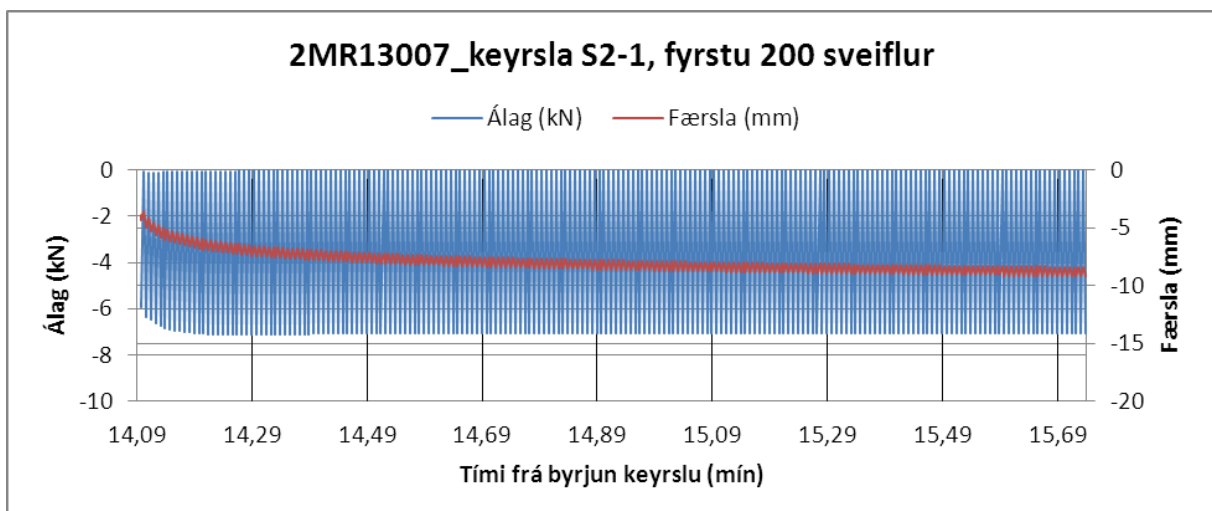
#### Tilraun 2 (merki S2-1):

*Stutt lýsing og tilgangur.* Lóðrétt álagið var aukið og látið sveiflast milli 1100 kPa (hámark) og 200 kPa (lágmark). Hliðarálagið var minnkað í 200 kPa. Hlutfallið  $\sigma_1/\sigma_3$  var að hámarki 5,5, að lágmarki 1,0. Að öðru leyti var prófunaraðferðin í samræmi við verklýsinguna sem er birt í viðauka I.

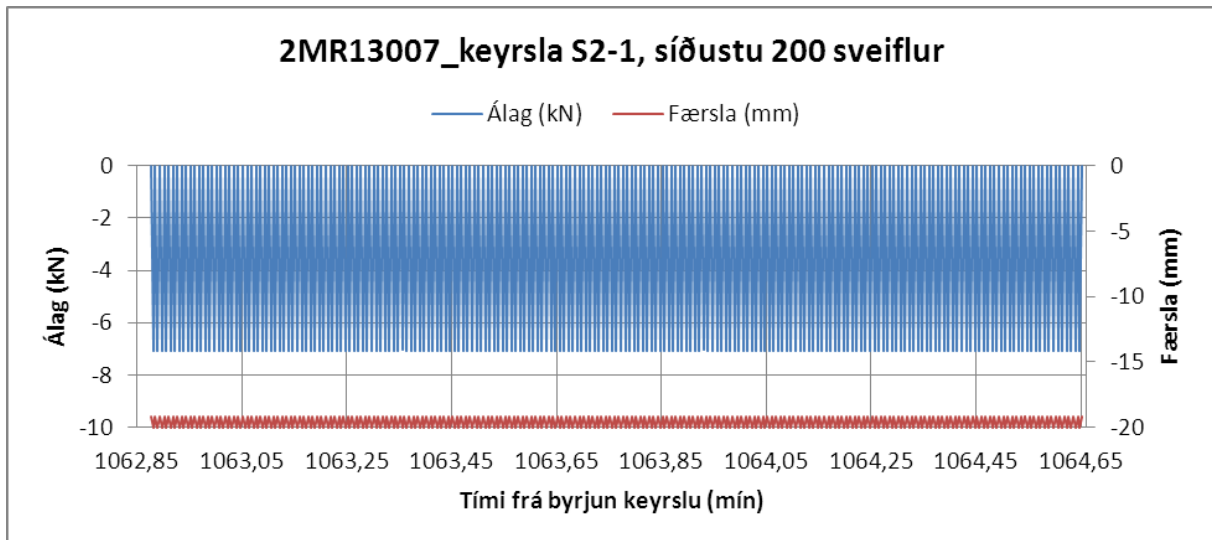
Hliðarálagið í þessari tilraun var minnkað til þess að ýta undir mismunarhreyfingu steinanna í sýninu og lóðrétt álagið aukið í sama tilgangi.

*Niðurstöður.* Varanleg samþjöppun á sýninu er mikil í byrjun, mældist ríflega 3 mm á fyrstu 50 sveiflunum og var orðin 20 mm eftir ríflega 125.000 sveiflur. Þá var prófun hætt. Slaglengd í sveiflunni var óbreytt allan tímann, um 0,8 mm. Fyrstu og síðustu 200 sveiflurnar ásamt færslu eru sýndar á myndum V-II-3 og V-II-4.

Að prófun lokinni mældist sáldur gegnum 4 mm sikti 5,5 % og gegnum 0,063  $\mu\text{m}$  sikti 0,3 % (hvort tveggja eftir leiðréttingu vegna niðurbrots í innbyggingu og siktun). Engin merki sjást um brot í sýninu á síðustu 200 sveiflunum (myndi koma fram sem skörp breyting á færsluferlinum).



**Mynd V-II-3.** Álag og færsla í fyrstu 200 sveiflunum í tilraun 2. Álag sem þjappar sýninu saman er negatíft og færslan sömuleiðis. 0-punktur álagsins svarar til hliðarþrýstingsins (200 kPa).



**Mynd V-II-4.** Álag og færsla í síðustu 200 sveiflunum í tilraun 2. Álag sem þjappar sýninu saman er negatíft og færslan sömuleiðis. 0-punktur álagsins svarar til hliðarþrýstingsins (200 kPa).

*Ályktun.* Lóðréttu álagið er að öllum líkindum of hátt miðað við hliðarálagið.

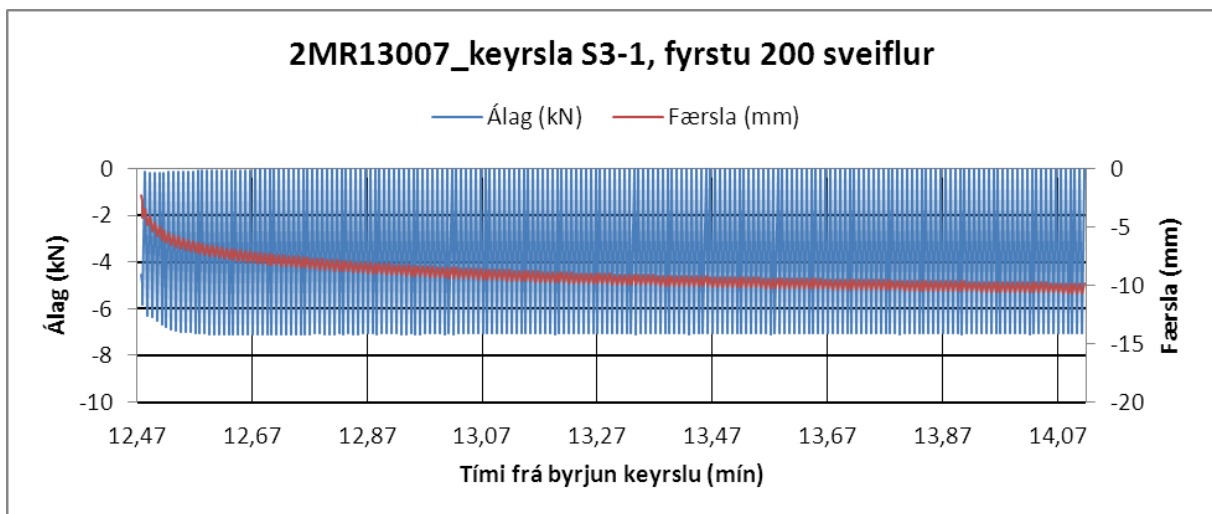
### Tilraun 3 (merki S3-1):

*Stutt lýsing og tilgangur.* Þessi tilraun er endurtekning á tilraun 2 (með óbreyttu lóðréttu álagi og hliðarálagi).

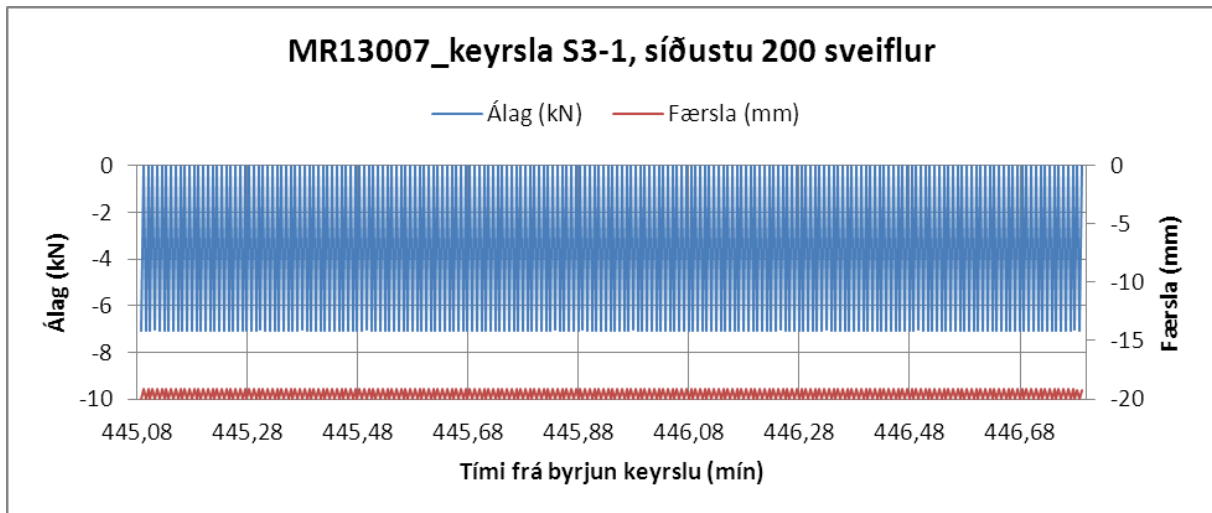
*Niðurstöður.* Í fyrstu sveiflunni (eða sveiflunum) heyrst greinilegt brothljóð í sýninu. Sýnið virðist aflagast á þann veg að stórir steinar í því séu á leið út úr hliðum þess.

Varanleg samþjöppun á sýninu mældist um 6 mm á fyrstu 50 sveiflunum og var orðin 20 mm eftir ríflega 50.000 sveiflur. Þá var prófun hætt. Slaglengd í sveiflunni var óbreytt allan tímann, um 0,8 mm. Fyrstu og síðustu 200 sveiflunar ásamt færslu eru sýndar á myndum V-II-5 og V-II-6.

Að prófun lokinni mældist sáldur gegnum 4 mm sikti 5,2 % og gegnum 0,063  $\mu\text{m}$  sikti 0,4 % (hvort tveggja eftir leiðréttingu vegna niðurbrots í innbyggingu og siktun). Engin merki sjást um brot í sýninu á síðustu 200 sveiflunum (myndi koma fram sem skörp breyting á færsluferlinum).



**Mynd V-II-5.** Álag og færsla í fyrstu 200 sveiflunum í tilraun 3. Álag sem þjappar sýninu saman er negatíft og færslan sömuleiðis. 0-punktur álagsins svarar til hliðarþrýstingsins (200 kPa).



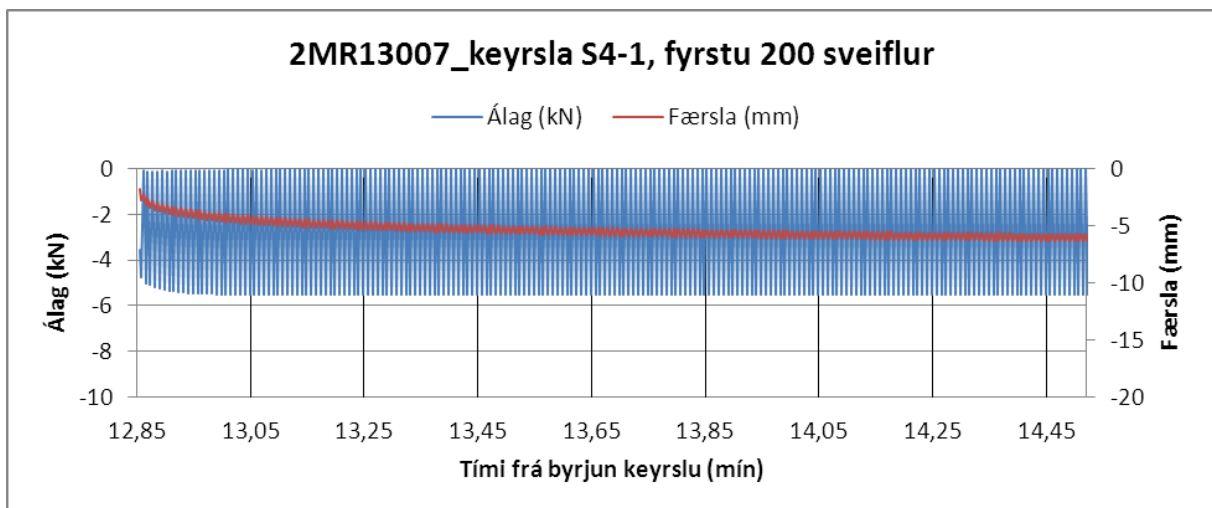
**Mynd V-II-6.** Álag og færsla í síðustu 200 sveiflunum í tilraun 3. Álag sem þjappar sýninu saman er negatíft og færslan sömuleiðis. 0-punktur álagsins svarar til hliðarþrýstingsins (200 kPa).

*Ályktun.* Má telja víst að lóðrétt álagið sé of hátt miðað við hliðarálagið til þess að sveiflufjöldinn nái tilsettu marki ( $10^6$ ).

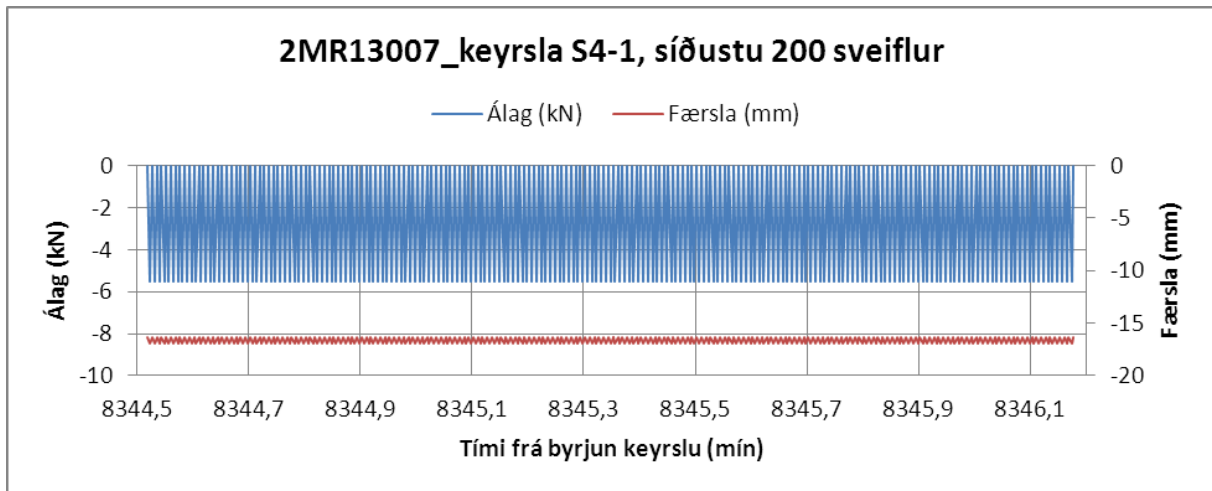
**Tilraun 4 (merki S4-1):**

*Stutt lýsing og tilgangur.* Í þessari tilraun var lóðrétt álagið minnkað lítið eitt frá síðustu tilraun og látið sveiflast milli 900 kPa (hámark) og 200 kPa (lágmark). Hliðarálagið var haft óbreytt, 200 kPa. Hlutfallið  $\sigma_1/\sigma_3$  var að hámarki 4,5, að lágmarki 1,0. Prófunaraðferðin var í fullu samræmi við verklýsinguna sem er birt í viðauka I.

Markmiðið með þessum breytingum var að fjölga sveiflunum í prófuninni til muna (helst upp í  $10^6$ ), þó þannig að lóðrétt álagið svaraði nokkurn veginn til leyfilegs hámarksþrýstings í hjólbarða.



**Mynd V-II-7.** Álag og færsla í fyrstu 200 sveiflunum í tilraun 4. Álag sem þjappar sýninu saman er negatíft og færslan sömuleiðis. 0-punktur álagsins svarar til hliðarþrýstingsins (200 kPa).



**Mynd V-II-8.** Álag og færsla í síðustu 200 sveiflunum í tilraun 4. Álag sem þjappar sýninu saman er negatíft og færslan sömuleiðis. 0-punktur álagsins svarar til hliðarþrýstingsins (200 kPa).

*Niðurstöður.* Varanleg samþjöppun á sýninu mældist um 3 mm á fyrstu 50 sveiflunum og um 15 mm þegar prófun var hætt eftir  $10^6$  sveiflur. Slaglengd í sveiflunni var óbreytt allan tímann, um 0,7 mm. Fyrstu og síðustu 200 sveiflurnar ásamt færslu eru sýndar á myndum V-II-7 og V-II-8.

Að prófun lokinni mældist sáldur gegnum 4 mm sikti 4,8 % og gegnum 0,063  $\mu$ m sikti 0,3 % (hvort tveggja eftir leiðréttingu vegna niðurbrots í innbyggingu og siktun). Engin merki sjást um brot í sýninu á síðustu 200 sveiflunum (myndi koma fram sem skörp breyting á færsluferlinum).


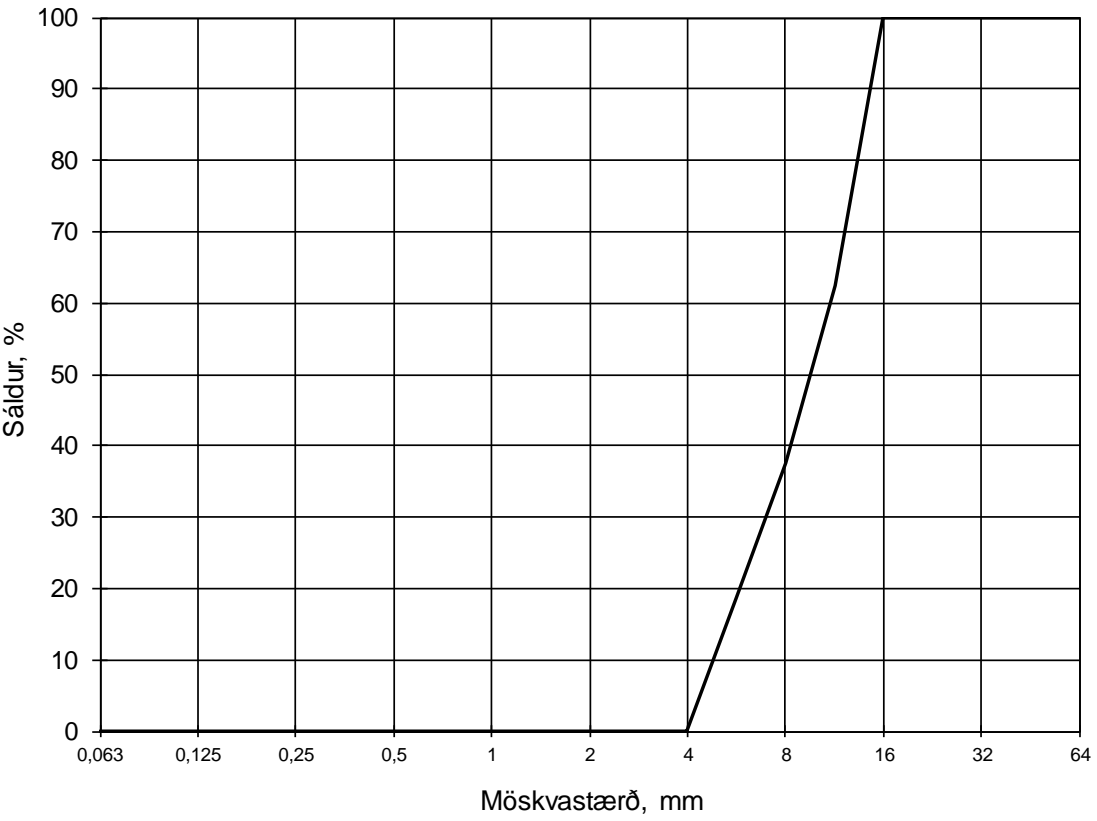
*Ályktun.* Þetta val á lóðréttu álagi og hliðarálagi var talið viðunandi. Lóðrétta álagið svarar til leyfilegs hámarksþrýstings í hjólbarða og álagssveiflurnar ná tilskildum fjölda ( $10^6$ ). Þó endurspeglar hliðarálagið að öllum líkindum ekki aðstæður í burðarlagi, m.a. vegna þess að hliðarálagið er fast en prófunarbúnaðurinn getur ekki skilað breytilegu hliðarálagi.




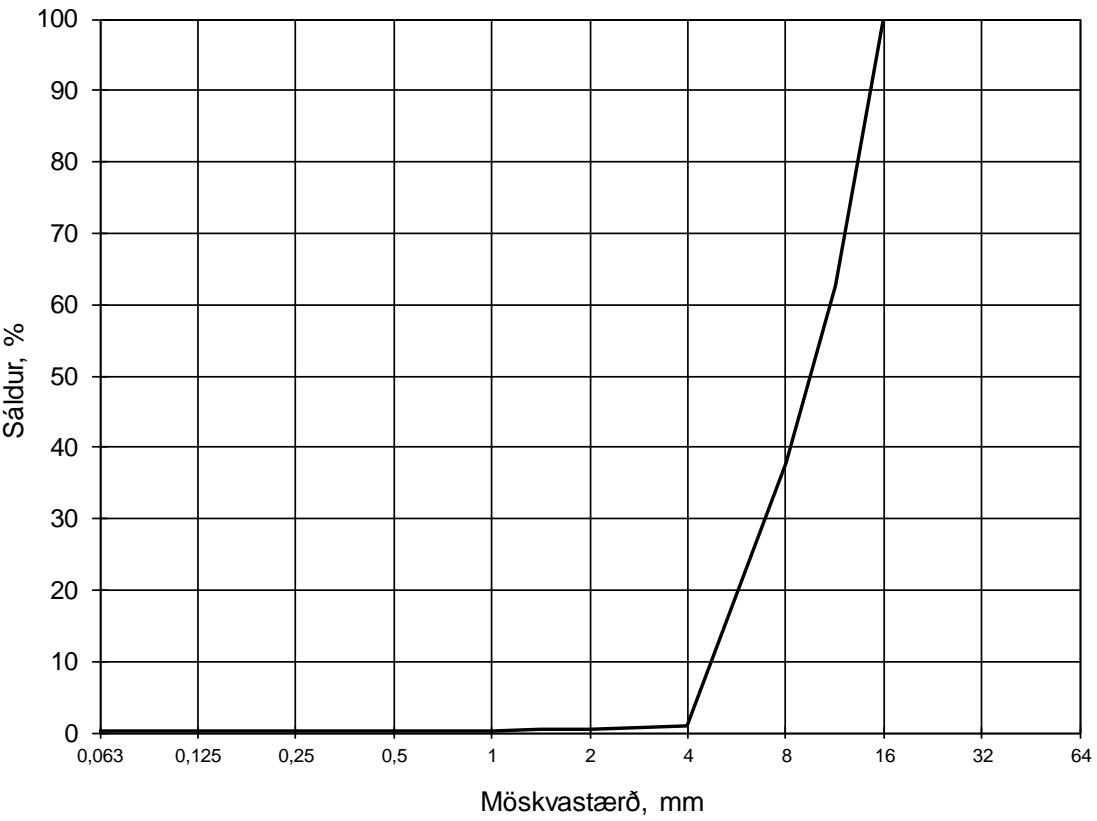
### **VIÐAUKI III.**

#### **SÁLDURFERLAR SÝNA AF BURÐARLAGSEFNI FRÁ KÚAGERÐI**


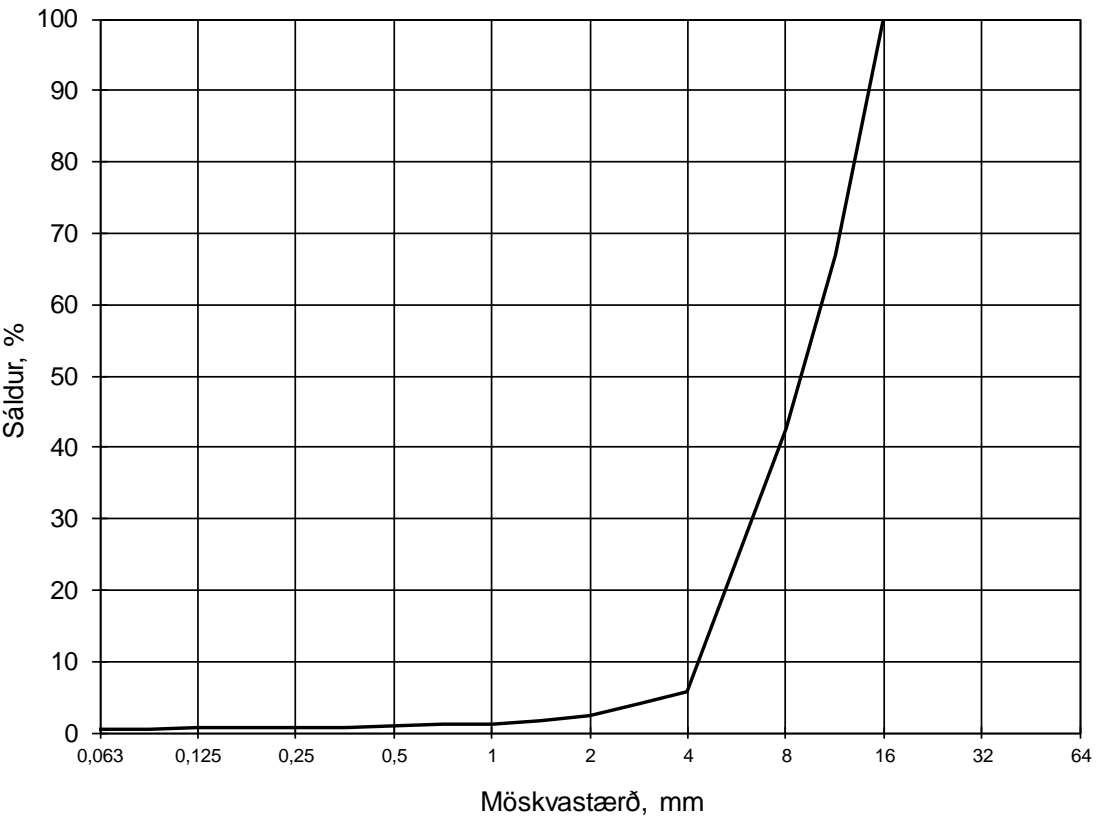
## Viðauki III-1. Sáldurferill fyrir innbyggingu

 <b>Nýsköpunarmiðstöð Íslands</b>											Rannsókn nr. <b>2MR13007</b>			
											Dags.			
											Framkv. af			
<b>Rannsókn á kornadreifingu (skv. IST EN 933-1)</b>														
Fyrir: <b>Vegagerðina.</b>						Náma: <b>Kúagerði ( steinefnabanki )</b>								
Vegna: <b>Niðurbrots óbundins burðarlags.</b>						Sendandi: <b>Ásbjörn Jóhannesson.</b>								
Heildarpungi sigtaðs sýnis (g):			Heildarpungi (<16mm) (g):			Merking sýnis: <b>Fyrir innbyggingu</b>								
Bakki (tara), (g):		Frátekið+bakki (g):		Purrt +bakki (g):		Votsigt. + bakki (g):		Húmus, gr.:		Slamm, %:		Raki, %		
				<b>100,0</b>								<b>0,0</b>		
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
Sáldur, %	100,0	100,0	100,0	100,0	62,5	37,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Athugasemdir: <b>Sáldurferill sýnis til innbyggingar.</b>														
$D_{10} =$ mm			$D_{30} =$ mm			$D_{60} =$ mm			$C_u =$		$C_c =$ #####			
 <p>The diagram is a semi-logarithmic plot of cumulative percentage passing (Sáldur, %) on the y-axis (0 to 100) against sieve size (Möskvastærð, mm) on the x-axis (0,063 to 64). The curve shows 0% passing for sieves up to 4mm, then rises to approximately 37.5% at 8mm, 62.5% at 16mm, and reaches 100% at 16mm.</p>														

## Viðauki III-2. Sáldurferill eftir innbyggingu

 <b>Nýsköpunarmiðstöð Íslands</b>										Rannsókn nr. <b>2MR13007</b>				
										Dags. <b>27.11.2013</b>				
<b>Rannsókn á kornadreifingu (skv. IST EN 933-1)</b>										Framkv. af <b>O.P.</b>				
Fyrir: <b>Vegagerðina.</b>					Náma: <b>Kúagerði ( steinefnabanki )</b>									
Vegna: <b>Niðurbrots óbundins burðarlags.</b>					Sendandi: <b>Ásbjörn Jóhannesson.</b>									
Heildarþungi sigtaðs sýnis (g):			Heildarþungi (<16mm) (g):			Merking sýnis: <b>Eftir þökkun handvirkt í þríasamót.</b>								
Bakki (tara), (g): <b>78,4</b>		Frátekið+bakki (g): <b>2829,5</b>		Purrt +bakki (g): <b>2786,7</b>		Votsigt. + bakki (g):		Húmus, gr.:		Slamm, %:		Raki, %: <b>1,6</b>		
Möskv.	64	32	22,4	16	11,2	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	botn
Þyngd (g)	0	0	0	0	1008,5	1686,2	2683,9	2696,7	2700,4	2702,0	2702,7	2703,3	2704,0	2708,3
Sáldur, %	100,0	100,0	100,0	100,0	62,8	37,7	0,9	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	
Athugasemdir: <b>Votsigtað</b>														
$D_{10} = 4,99 \text{ mm}$			$D_{30} = 7,16 \text{ mm}$			$D_{60} = 10,85 \text{ mm}$			$C_u = 2,2$			$C_c = 0,9$		
 <p>Sáldur, %</p> <p>Möskvastærð, mm</p>														

## Viðauki III-3. Sáldurferill eftir prófun í þrías

 <b>Nýsköpunarmiðstöð Íslands</b>													Rannsókn nr. <b>2MR13007</b>				
													Dags. <b>7.1.2014</b>				
<b>Rannsókn á kornadreifingu (skv. IST EN 933-1)</b>													Framkv. af <b>O.P.</b>				
Fyrir: <b>Vegagerðina.</b>						Náma: <b>Kúagerði (steinefnabanki)</b>											
Vegna: <b>Niðurbrots óbundins burðarlags.</b>						Sendandi: <b>Ásbjörn Jóhannesson.</b>											
Heildarþungi sigtaðs sýnis (g):				Heildarþungi (<16mm) (g):				Merking sýnis: <b>Þrías 4. Eftir álagsprófun.</b>									
Bakki (tara), (g): <b>77,9</b>			Frátekið+bakki (g):			Purrt +bakki (g): <b>2786,7</b>			Votsigt. + bakki (g): <b>2775,2</b>			Húmus, gr.:		Slamm, %:		Raki, %:	
Möskv.	64	32	22,4	16	11,2	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	botn			
Þyngd (g)	0	0	0	0	894,0	1552,3	2554,5	2647,1	2674,2	2684,2	2688,7	2691,3	2694,0	2697,3			
Sáldur, %	100,0	100,0	100,0	100,0	67,0	42,7	5,7	2,3	1,3	0,9	0,7	0,6	0,5				
Athugasemdir: <b>Votsigtað</b>																	
$D_{10} = 4,47 \text{ mm}$			$D_{30} = 6,63 \text{ mm}$			$D_{60} = 10,28 \text{ mm}$			$C_u = 2,3$			$C_c = 1,0$					
																	

## **VIÐAUKI IV.**

### **NIÐURSTÖÐUR KÚLNAKVARNARPRÓFS AF BURÐARLAGSEFNI FRÁ KÚAGERÐI**

## Viðauki IV-1 Kúlnakvarnarpróf

Nýsköpunarmiðstöð  
ÍslandsRanns. 2MR13007  
Dags. 21.1.2014  
Frkv. O.P.**Kúlnakvarnarpróf**

IST EN 1097-9

**Unnið fyrir:** Vegagerðina.**c/o:** Ásbjörn Jóhannesson.**Náma:** Kúagerði ( steinefnabanki )

Sýni í kúlnakvörn - 14-16mm

Þyngd (g)			Rúmþyngd (g/cm <sup>3</sup> )			Metti- vatn %
í vatni	Yfirborðsþurrt	Ofnþurrt	Apparent	Bulk	SSd	
524,8	799,8	784,4	3,022	<b>2,852</b>	2,908	2,0

Sýni í kúlnakvörn - 11,2-14mm

Þyngd (g)			Rúmþyngd (g/cm <sup>3</sup> )			Metti- vatn %
í vatni	Yfirborðsþurrt	Ofnþurrt	Apparent	Bulk	SSd	
1029,9	1565,3	1536,7	3,032	<b>2,870</b>	2,924	1,9

Í kúlnakvörn (g) **1076** Par af 14 -16mm: 376 g 35%  
11,2-14mm: 699 g 65%**Kvarnargildi**

Sýni	Þyngd fyrir próf (g)	Þyngd eftir próf (g)	Kvarnargildi (%)
I	1076,1	969,4	9,9
II	1075,9	965,6	10,3
<b>Meðaltal:</b>			<b>10,1</b>



**Nýsköpunarmiðstöð  
Íslands**

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