



HÁSKÓLI ÍSLANDS

Verkfræðistofnun Háskóla Íslands

Jarð- og vegtæknistofa

Burðarlagsefni úr vegbyggingu í Kjós -Mælingar á stífni og CBR gildi-

Brynhildur Magnúsdóttir
Sigurður Erlingsson



Ágúst 2003

EFNISYFIRLIT

1. INNGANGUR.....	3
2. ÁRAUN Í VEGI VEGNA UMFERÐAR	4
3. EFNISHEGDUN JARÐEFNA VIÐ SVEIFLUÁLAG	6
4. UNDIRBÚNINGUR OG FRAMKVÆMD PRÓFANA	9
4.1. ÞJÖPPUNARPRÓF.....	9
4.2. CBR-PRÓF	9
4.3. STÍFNIPRÓF.....	11
5. JARÐEFNI TIL PRÓFUNAR.....	13
6. NIÐURSTÖÐUR	16
7. TENGL STÍFNI OG CBR-GILDIS.....	18
8. SAMANTEKT	20

1. INNGANGUR

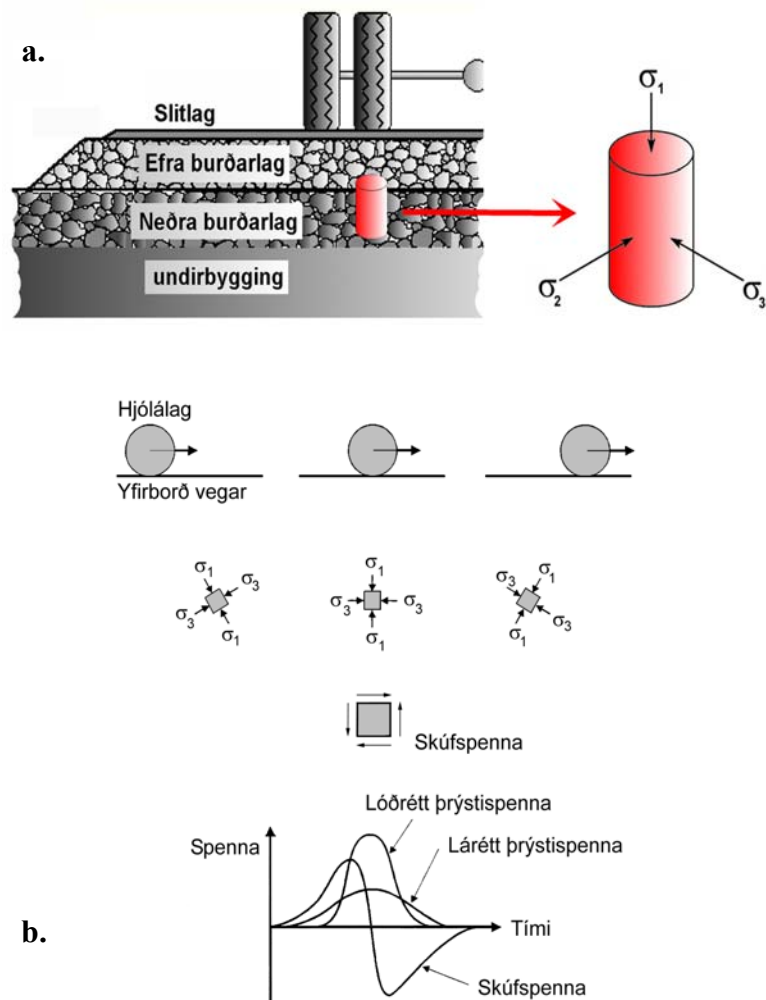
Árið 1986 voru byggðir nokkrir tilraunavegkaflar rétt sunnan við Laxá í Kjós. Tilraunakaflarnir voru hefðbundnar vegbyggingar með klæðingu, þó voru lagþykktir burðarlaga nokkru þynnri en venja er til og finefnainnihald í hærra lagi. Tilgangurinn var m.a. að fylgjast með hvernig veikum vegbyggingum myndi reiða af.

Í þessum tilraunaköflum var síðan komið fyrir ýmsum mælinemum sumarið 1998. Var í um tveggja ára skeið fylgst með frostdýpi og grunnvatnsstöðu, raka og hitastigi á mismunandi dýpi, auk þess sem burðarþol var mælt reglulega með falllóði. Sýni voru einnig tekin úr burðarlögum og fyllingum veganna. Tilgangurinn var m.a. að fylgjast með og afla upplýsinga um áhrif veðurfars á burðarþol vegarins.

Í þessu verkefni sem ber heitið *Tilraunakaflar vegagerðarinnar – Samanburður á CBR gildum og niðurstöðum úr þríasaprófunum*. er unnið með sýni sem tekin voru úr einu vegsniði. Niðurstöður eru bornar saman úr þremur mismunandi prófunum þ.e. þjöppunarprófi, CBR-prófi og stífniprófi, úr öllum burðarlagsefnum úr sniði 1.4.2. úr Vesturlandsvegi í Kjós. Burðarlagsefnin eru: efra burðarlagsefni 1 (Eb-1), efra burðarlagsefni 2 (Eb-2), neðra burðarlagsefni 1 (Nb-1) og neðra burðarlagsefni 2 (Nb-2). Í Alverki eru gerðar kröfur til CBR-gilds þegar lagt er mat á heppileika jarðefna til að nota sem burðarlög í vega- og gatnagerð. Ekki eru gerðar neinar kröfur um stífnieiginleika jarðefnanna. Í dýnamísku þríasaprófi er hægt að ákvarða stífni jarðefna, en stífni jarðefna í vegbyggingu lýsir getu þeirra til að dreifa álagi með dýpi og er því grundvallarstærð í við ákvörðun á lagþykktum einstakra laga í vegbyggingunni og er því grundvallarstærð í hönnunarferlinu. Við Verkfræðistofnun HÍ hefur verið komið fyrir búnaði til að ákvarða stífnieiginleika jarðefna með sveiflufræðilegu þríasaprófi og eru í þessu verkefni bornar saman niðurstöður úr dýnamísku þríasaprófi og CBR-prófi og kannað er hvort unnt sé að finna tengsl milli niðurstaðna úr þessum prófunum.

2. ÁRAUN Í VEGI VEGNA UMFERÐAR

Raunverulegt álagsform umferðar á vegbygginguna sem undir hvílir, samanstendur af stuttum og snöggum álagspúlsum. Þegar öktæki ekur eftir vegyfirborði verður því bæði þrýsti- og togspennuáraun sem og skúfspennuáraun í vegbyggingunni. Stærð þessara spenna er fall af tíma og tengist hraða og þyngd ökutækis. Því rísa þrýsti- og togspennurnar þegar hjól ökutækisins nálgast, ná ákveðnu hámarki og falla síðan aftur, er ökutækið fjarlægist (sjá mynd 1.). Í álagsprófi á tilraunastofu, þar sem líkja á eftir raunverulegri áraun, er mikilvægt að tillit sé tekið til þessa, en hins vegar eru það tiltölulega fá próf sem gera það.



Mynd 1. Spennuástand í vegi vegna hjólaálags. Mynd a. sýnir hefðbundna vegbyggingu ásamt því spennuástand sem þar ríkir. Mynd b. sýnir hvernig spennuþættir í vegbyggingunni breytast sem fall af tíma þegar ökutæki ekur eftir vegyfirborðinu.

CBR-próf er stöðuálagspróf þar sem sívalningslaga staut er þrýst hægt ofan í jarðefni og fengin eru tengsl þrýstikraftsins og þeirrar færslu sem hann veldur, ofan í efnið. Út frá kraft-færsluferlinum er CBR gildi jarðefnisins síðan ákvarðað. Prófið er einfalt og metur einhverskonar burð efnisins. Með burði er hér átt við mótstöðu efnisins við að hindra það að stauturinn þrýstist ofan í það. Prófið hefur fengið mikla útbreiðslu við veghönnun, en lýsir þó engan vegin eftir raunverulegu álagsformi umferðar. Í nýjum hönnunaraðferðum, s.k. greiningaraðferðum, sem hefur komið til tals að taka upp í vegagerð á að byggja meira á raunhegðun en þar er gert ráð fyrir að nýttar séu niðurstöður úr prófunum sem líkja eftir raunverulegri hegðun vegarains. Slík próf er líklegt að hægt sé að kvarða við raunhegðun og verða því grunnur að hönnunaraðferð framtíðarinnar, CBR-próf verður trúlega ekki þar á meðal.

Í sveiflufræðilegu þríasaprófi er hins vegar auðvelt að líkja vel eftir lóðréttum þrýstispennupólsum umferðar. Einnig er hægt að líkja eftir láréttri þrýstispennu (sjá mynd 1). Eftir skúfspennuáruninni verður hins vegar einungis líkt í prófi með færanlegu álagi. Slík próf eru mjög umfangsmikil og dýr og í dag óraunhæf sem hluti af hönnun eða hefðbundnu eftirliti eða ástandsgreiningu í vega- eða gatnagerð (Sigurður Erlingsson og Brynhildur Magnúsdóttir, 2001).

Hér eru niðurstöður úr rúmþyngdar-, CBR-, og stífniprófunum borin saman fyrir fjögur burðarlagsefni úr tilraunakafla í vegbyggingu í Kjós. Tilgangurinn er meðal annars sá að kanna hvort sjá megi tengsl milli niðurstaðna prófananna.

3. EFNISHEGÐUN JARÐEFNA VIÐ SVEIFLUÁLAG

Úr sveiflufræðilegum þríasaprófunum fást upplýsingar um stífni jarðefnis (á formi ólínulegs fjaðrandi efnislíkans), (Correia ofl, 1999. Sigurður Erlingsson og Brynhildur Magnúsdóttir, 2001). Prófanirnar gefa nokkuð raunhæfar upplýsingar um hegðun efnisins úti í vegi og má því m.a. nota þær við fræðilega greiningu við hönnun vegna og gatna (analytical pavement design procedure).

Gróf jarðefni sýna flókna ólínulega fjaðrandi-deiga efnishegðun við ytri áraun sem líkir eftir hjólaálagi ökutækja. Svörun jarðefnisins má tákna með streitum þess, og er hægt að skipta heildarstreitunum í fjaðrandi (elastic) streitur og deigar (plastic) streitur, þ.e.

$$\varepsilon^{tot} = \varepsilon^{el} + \varepsilon^{pl} \quad (3.1)$$

Við venjulegt umferðarálag er stærsti hluti streitanna vegna fjaðrandi efnishegðunar og einungis lítil hluti streitanna vegna varanlegrar aflögunar.

Í stífniþrófi er könnuð ólínuleg fjaðrandi svörun jarðefnisins. Í þríasaprófinu er hliðarþrýstingi haldið föstum og því er $\sigma_3 = \sigma_2$. Lóðréttri spennu σ_1 er hins vegar breytt til að líkja eftir spennupólsum hjólaálags. Einfaldast er að sýna spennuástandið í prófinu með því að nýta sér meðalpennuna p og fráviksspennuna q , þ.e:

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + 2\sigma_3) \quad \text{og} \quad q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (3.2)$$

Á sambærilegan hátt eru skilgreindar rúmstreitur ε_v og fráviksstreita ε_q , þ.e:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3 \quad \text{og} \quad \varepsilon_q = \frac{2}{3}(\varepsilon_1 - \varepsilon_3) \quad (3.3)$$

þar sem ε_1 er áslæg streita og ε_3 er lárétt streita. Á sama hátt og fyrir spennur gildir í þríasaprófi að $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$.

Tengsl spenna og streita má nú skrifa samkvæmt lögmáli Hooke sem hornalínufylki:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_v \\ \varepsilon_q \end{bmatrix} = \frac{1}{M_r} \begin{bmatrix} 3(1-2\nu) & 0 \\ 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

þar sem E og ν eru stífnistuðull og hlutfall Poissons fyrir efnið, skilgreind sem:

$$M_r = \frac{q}{\varepsilon_1} \quad \text{og} \quad \nu = -\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1} \quad (3.5)$$

Úr tilraunum hefur komið í ljós að stífnistuðullinn, M_r , er spennuháður. Hlutfall Poissons, ν er það hins vegar ekki, eða a.m.k. í mun minna mæli, og er mjög gjarnan litið á það sem fasta. Til eru margar líkingar til að lýsa tengslum sífni við spennuástandið. Eins sú mest notaða og jafnframt ein sú einfaldasta er svo kallað k - ϕ líking (Correia ofl, 1999. Sigurður Erlingsson og Brynhildur Magnúsdóttir, 2001) þ.e:

$$M_r = k_1 \left(\frac{3p}{p_a} \right)^{k_2} \quad (3.6)$$

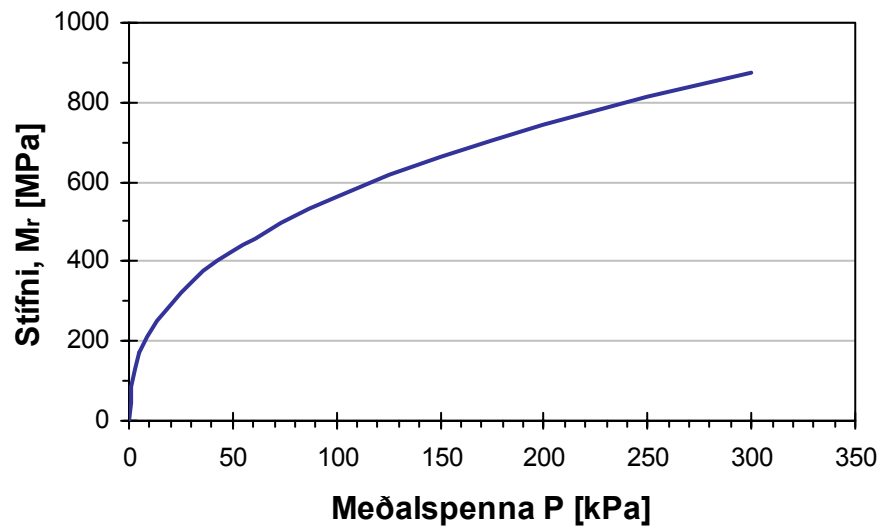
Þar sem k_1 og k_2 eru fastar sem ákvarðast í prófuninni og p_a er viðmiðunarþrýstingur, $p_a = 100$ kPa.

Með því að innfæra líkingu (3.6) í (3.4) er ljóst að tengsl streitu og spennu er ólínulegt samband sem má skrifa á vektorformi, sbr. líkingu (4), sem

$$[\boldsymbol{\varepsilon}] = [\mathbf{C}(p)][\boldsymbol{\sigma}] \quad (3.7)$$

þar sem $[\boldsymbol{\varepsilon}]^T = [\varepsilon_v, \varepsilon_q]^T$ og $[\boldsymbol{\sigma}]^T = [p, q]^T$ og $[\mathbf{C}(p)]$ er s.k. compliance fylkið.

Í sveiflufræðilegu þríasaprófi eru stuðlarnir k_1 og k_2 ákvarðaðir og því er stífnin M_r þekkt sem fall af meðalspennunni p . Mikilvægt er að hafa í huga að stífnin er fall af meðalspennunni p . Lítið ökutæki (lítið hjólaálag) veldur lítilli spennuaukningu á ákveðnu dýpi, t.d. í miðju burðarlagi er það ekur yfir ákveðin viðmiðunarstað, en stórt og þungt ökutæki veldur hinsvegar umtalsverðri spennuaukningu. Þessi ökutæki valda því mismikilli spennuaukningu p og því er svörun jarðefnisins mismikil (svörunin er ólínuleg s.k.v jöfnu (3.6)) og því er stífnin mismikil. Af þessum sökum er ekki hægt að gefa stífnina upp sem eina ákveðna tölu nema að tilgreina við hvaða meðalspennu átt er við. Til að auðvelda samanburð í niðurstöðukafla þessarar skýrslu er einmitt brugðið á þetta ráð og stífnin er reiknuð út frá líkingu (3.6) við $p = 250$ kPa. Með þessari aðferð er mun auðveldara að fá samanburð milli stífni efnanna sem hér hafa verið prófuð. Hafa ber þó í huga að ökutæki eru misþung og valda mismikilli spennuaukningu í vegbyggingunni og því gætu önnur stífnigildi átt betur við á stundum. Þetta ætti þó ekki að koma að sök því hér er fyrst og fremst verið að bera stífnina saman innbyrðis á milli efnanna og við að velja annað gildi á meðalspennuaukningunni færast gildin öll til, en innbyrðis afstaða helst nánast óbreytt.



Mynd 2. *Stífni burðarlagsefnis sem fall af meðalspennu, fengin með jöfnu (3.6). Myndin sýnir niðurstöður úr prófunum á efra burðarlagsefni 2 frá Dælisá (Eb-1) úr vegbyggingu 1.4.2. í Kjós. Sjá má að stífnin er háð meðalspennunni, P , og fer stífnin vaxandi þegar meðalspennan hækkar.*

4. UNDIRBÚNINGUR OG FRAMKVÆMD PRÓFANA

Á fjórum efnum, efra burðarlagi 1 og 2 og neðra burðarlagi 1 og 2 úr vegsniði úr Vesturlandsvegi í Kjós (snið 1.4.2.) hafa verið framkvæmd þrenns konar próf, þ.e. Proctor þjöppunarpróf, CBR-próf og dýnamískt þríasapróf til ákvörðunar á stífni. Hér verður gerð grein fyrir framkvæmd þessara prófa.

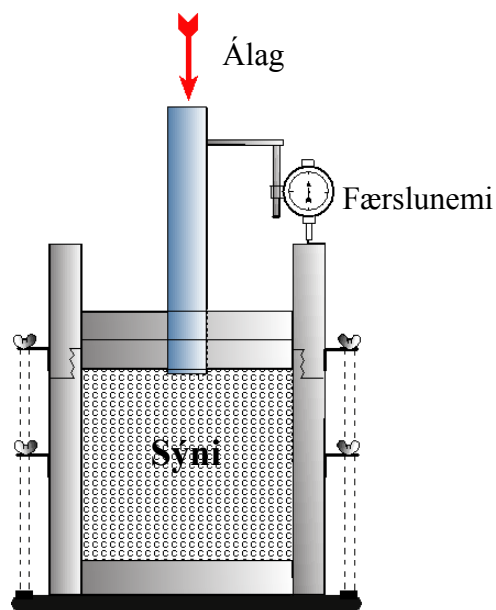
4.1. Þjöppunarpróf

Þjöppunarpróf er notað til að athuga sambandið á milli rakastigs og þurrar rúmþyngdar jarðefnis. Prófið gengur út á að jarðefni, við mismunandi rakastig, er þjappað í mót af ákveðinni stærð ($943,3 \text{ cm}^3$). Með því að þekkja rakastig efnisins við hverja þjöppun má finna þurra rúmþyngd sýnisins, en þurr rúmþyngd er mælikvarði á þjöppunina. Til eru tvær gerðir af þessu prófi þ.e. Standard Proctor próf en þar er efninu þjappað í mótið í þremur lögum, 25 slög á hvert lag, með hamri sem vegur 2,5 kg og með fallhæð 304,8 mm. Hin gerðin, Modified Proctor próf, gengur út á að jarðefninu er þjappað í sama mót í 5 lögum, 25 slög á hvert lag, með hamri sem vegur 4,54 kg og hefur fallhæðina 457,2 mm. Hugsunin er að jarðefninu sé þjappað í mótið með fyrirfram gefinni þjöppunarorku á rúmmálseiningu og fyrir Standard Proctor prófið er þessi orka $592,5 \text{ kJ/m}^3$ og fyrir Modified Proctor próf er þessi þjöppunarorka 2696 kJ/m^3 . Prófið er framkvæmt á allri kornakúrfu efnisins sem smýgur 19 mm sigti, því er sá hluti sem grófari er sigtaður frá. Hér hefur verið notuð orka sem svarar til Standard þjöppunarorku í allar prófanirnar.

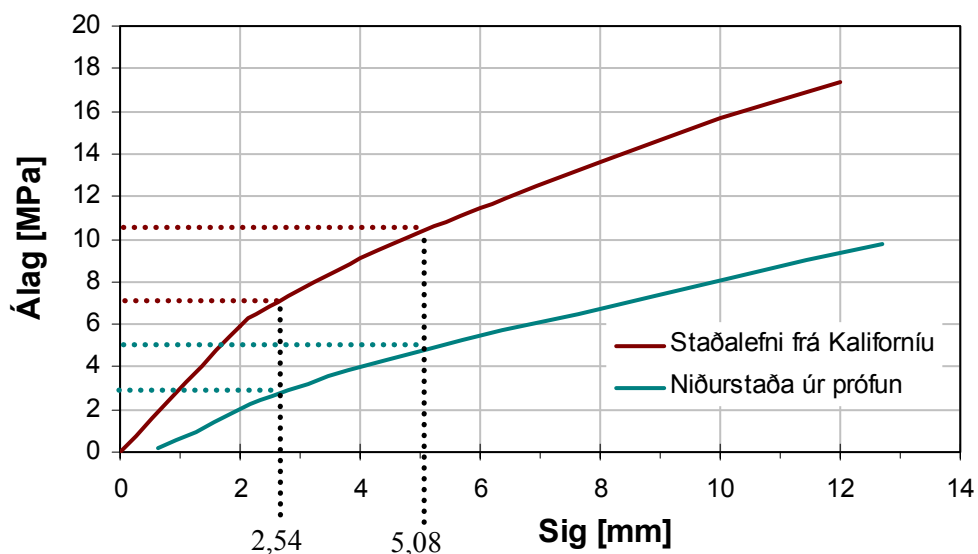
4.2. CBR-Próf

Sýni er þjappað með þjöppun sambærilegri við Standard Proctor þjöppun, í hólk sem er með 152 mm þvermál og er hæð hólksins frá 152 til 178 mm. Rakastig sýnisins við þjöppun er haft nálægt kjörrakastigi efnisins. Eftir þjöppun eru lögð tvö lóð (hringlaga lóð með gati í miðju) ofan á sýnið sem á að samsvara þyngd efri laga vegarins, og að því loknu er hólknum með lóðunum og sýninu komið fyrir í vatnsbaði í fjóra daga. Þegar vatnsmettun sýnisins er lokið er hólkurinn tekinn upp úr vatnsbaðinu og hann látinn standa í 15 mínútur. Að því loknu er CBR próf framkvæmt (California Bearing Ratio test).

Við framkvæmd CBR-prófs er stálstaut komið fyrir í gatið á lóðunum sem liggja ofan á jarðefninu og er stauturinn síðan rekinn niður í jarðefnið með jöfnum hraða (1 mm/mín) og krafturinn mældur við fyrirfram ákveðna færslu. CBR-gildið er fundið með því að bera saman það álag sem þarf til að þrýsta stautnum ákveðna dýpt og það álag sem þurfti til að koma honum sömu dýpt í staðalefni frá Kaliforníu, en þaðan er prófið upprunnið. CBR-gildið er yfirleitt fundið út við tvær mismunandi dýptir, þ.e. þegar stauturinn er kominn niður um 2,54 mm og 5,08 mm, og er hærra CBR-gildið notað.



Mynd 3. CBR-mót ásamt stálhólki og færslumæli.



Mynd 4. Dæmigerðar niðurstöður úr CBR-prófi. CBR-gildið er fundið út með því að bera saman sig eftir 2,54 og 5,08 mm við sig staðalefnis frá Kaliforníu.

4.3. Stífniþróf

Þvermál sýnis sem notað er til stífniþrófana er 150 mm og hæð þess 300 mm. Hægt er því að prófa með góðu móti steinefni með stærstu kornastærð $d_{max} = 30-35$ mm. Sýnið er byggt upp í stálhólki sem klæddur hefur verið að innan með gúmmíhulsu. Við þjöppun sýnisins er notaður Modified Proctor þjöppunarhamar og er sýnið byggt upp í 11 – 13 lögum og er höggafjöldi á hvert lag á bilinu 14 – 54, allt eftir því hver þjöppun sýnisins skal vera þegar prófað er. Í þessari rannsókn voru notuð sýni sem voru þjöppuð með þjöppunarorku, mótsvarandi Standard Proctor þjöppun ($592,5 \text{ kJ/m}^3$) og höggafjöldi á hvert lag (11 lög) var því 14.

Eftir þjöppun er sýnið klætt með annarri gúmmíhulsu þar sem að við þjöppunina myndast gjarnan göt á innri hulsuna. Meðan á þjöppun stendur eru rekin ankeri inn í sýnið sem festingar fyrir mælinema eru síðan festir á. Nánari lýsingu á undirbúningi og uppbyggingu sýnis má finna í Brynhildur Magnúsdóttir (2001).



Mynd 5. Þríásapróf, a) full þjappað sýni í stálhólki, sjá má ankeri standa út úr stálhólknum b) sýni með áfasta mælinema, c) sýni í prófun í þríásahúsi.

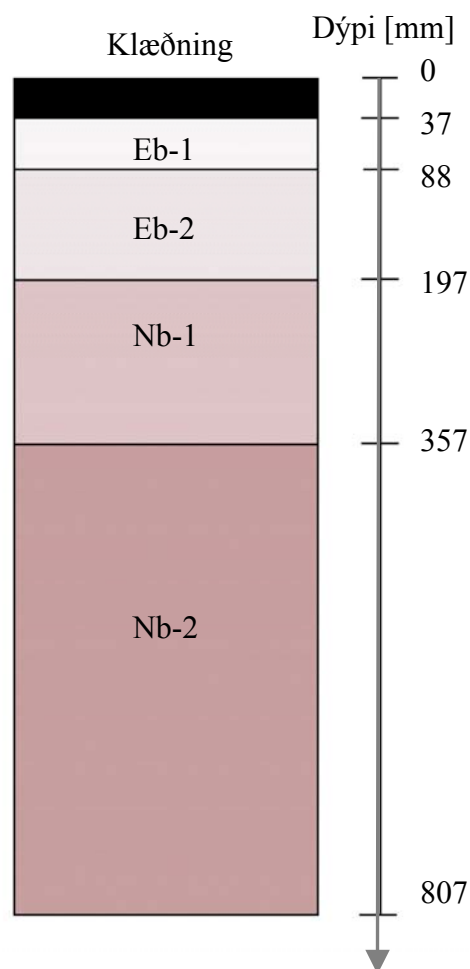
Til að ákvarða samband streitu og spenna í þríásaprófi, og þar með k_1 , k_2 og ν , (sjá kafla 3) þarf að framkvæma fjölda mælinga til að spanna það svið af meðalspennu p og fráviksspennu q sem misþungir öxlar umferðar geta valdið. Til þess eru notaðar 16 álagsraðir. Stífniþróf skiptist í undirbúningsfasa og prófunarfasa.

Undirbúningsfasinn samanstendur af 20.000 álagspúlsum og hefur það hlutverk að jafna svörun sýnisins áður en mælingar hefjast. Prófunarfasinn samanstendur af 16 álagsröðum sem hver samanstendur af 100 álagspúlsum og er gögnum um hegðun efnisins safnað úr 10 síðustu púlsum hvernar raðar. Prófanirnar fara einnig fram við mismunandi hliðarþrýsting þar sem álagsröðunum er skipt í fernt og fer

hliðarþrýstingur hækkandi eftir hverjar 4 álagsraðir. Nánari lýsingar á framkvæmd prófana og birtingu niðurstaðna má finna í Brynhildur Magnúsdóttir (2001) og Brynhildur Magnúsdóttir og Sigurður Erlingsson (2002).

5. JARÐEFNI TIL PRÓFUNAR

Fjögur burðarlagsefni úr vegsniði 1.4.2 (sjá mynd 6) frá Vesturlandsvegi í Kjós voru prófuð og voru niðurstöður þeirra bornar saman. Eitt þessara efna, efra burðarlagsefni 1 (Eb-1) samanstendur að mestu af fersku basalti og er ættað úr Laxárbergsnámu í Kjós, hin efnin þrjú, efra burðarlagsefni 2 (Eb-2), neðra burðarlagsefni 1 (Nb-1) og neðra burðarlagsefni 2 (Nb-2) eru að mestu úr ummynduðu basalti og eru tekin úr Dælisárnámu í Kjós, en hafa mismunandi kornastærðardreifingu.



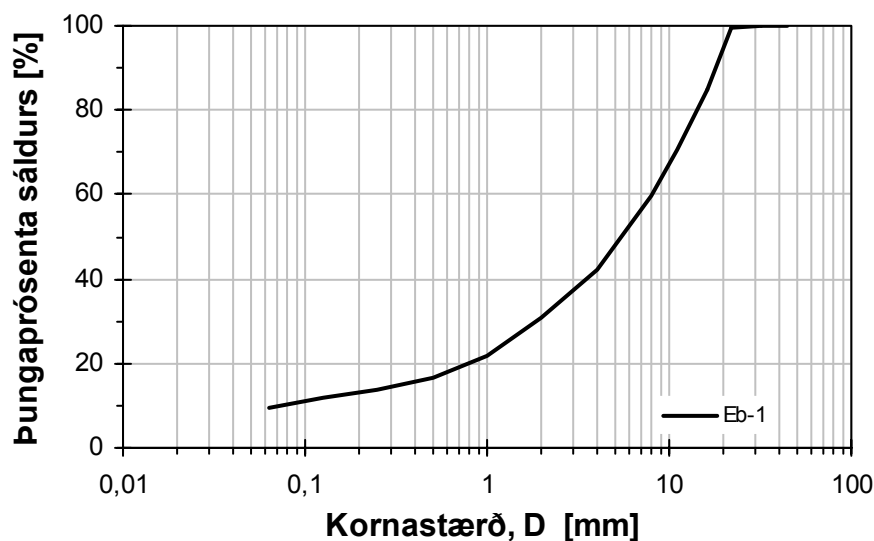
Mynd 6. Þversnið vegbyggingar á tilraunavegi í Kjós (vegsnið 1.4.2.)

Á töflu 1 má sjá yfirlit yfir nokkrar stærðir tengdar kornakúrfum þessara efna og kornakúrfur efnisins úr Eb-1 (Laxárbergsnáma) má sjá á mynd 7 og kornakúrfur efnanna Eb-2, Nb-1 og Nb-2 (Dælisárnáma) má sjá á mynd 8.

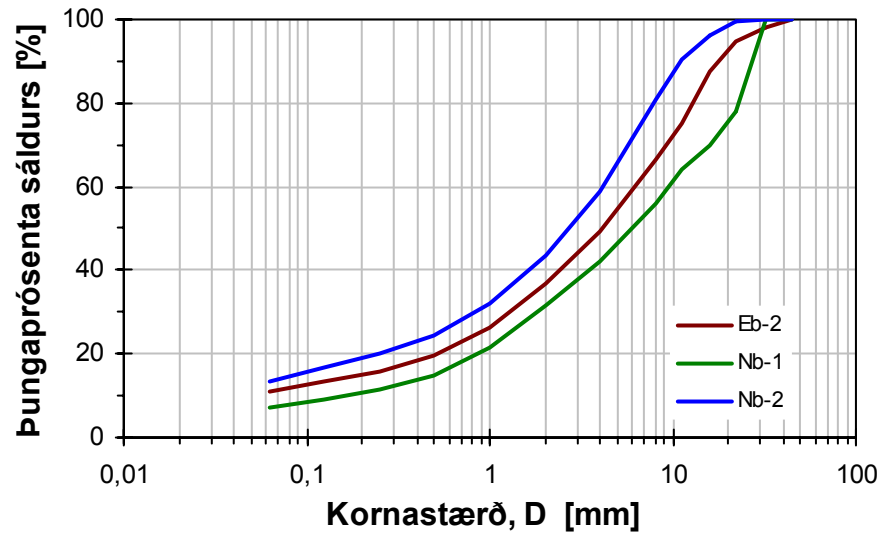
Tafla 1. *Fínefnainnihald, stærsta kornastærð, grófleikatala og kornadreifingarstuðull burðarlagsefnanna fjögurra.*

Lag	Skammst.	Náma	D <65 µm [%]	D _{max} [mm]	C _u [-]	C _c [-]
Efra burðarlag 1	Eb-1	Laxárberg	9,7	22,4	127	7,9
Efra burðarlag 2	Eb-2	Dælisá	11,1	32	103	3,5
Neðra burðarlag 1	Nb-1	Dælisá	7,2	32	60	2,4
Neðra burðarlag 2	Nb-2	Dælisá	13,2	32	100	4,0

Eins og sjá má á töflu 1 og myndum 7 og 8 er fínefnahlutfall allra efnanna nokkuð hátt, eða frá 7,2 – 13,2 %. Fínefnainnihald þessara efna er heldur hærra en tíðkast hér á landi í burðarlögum. Kornakúrfurnar eru hins vegar allar nokkuð góðar og flokkast efnin öll samkvæmt USCS flokkunarkerfinu sem GW (möl með góða kornadreifingu)



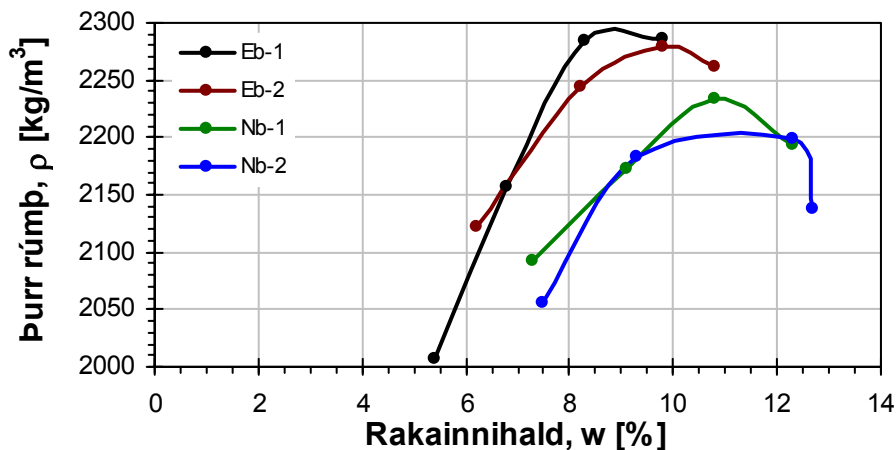
Mynd 7. *Kornakúrfur burðarlagsefna úr efra burðarlagi úr vegbyggingu Vesturlandsvegi í Kjós, snið 1.4.2. Eb-1 er efra burðarlagsefni 1 og er ættað úr Laxárbergsnámu.*



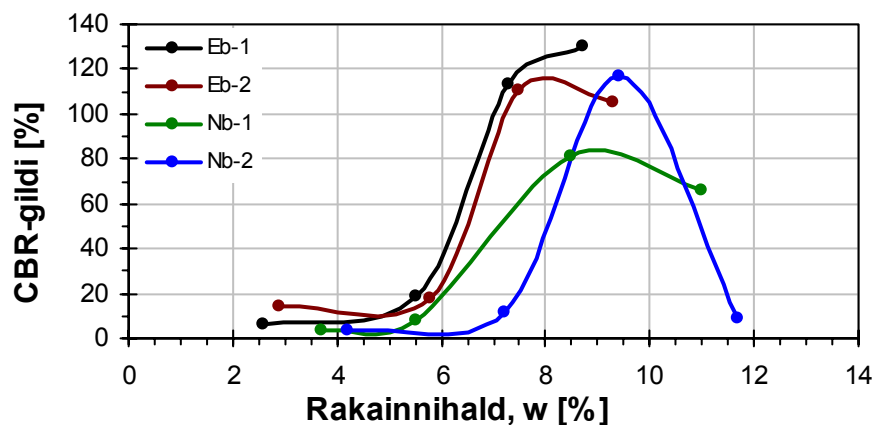
Mynd 8. Kornakúrfur burðarlagsefna úr vegbygginguá Vesturlandsvegi í Kjós, snið 1.4.2. Eb-2 er efra burðarlagsefni 2, Nb-1 er neðra burðarlagsefni 1 og Nb-2 er neðra burðarlagsefni 2. Öll þrjú efnin eru úr Dælisárnámu.

6. NIÐURSTÖÐUR

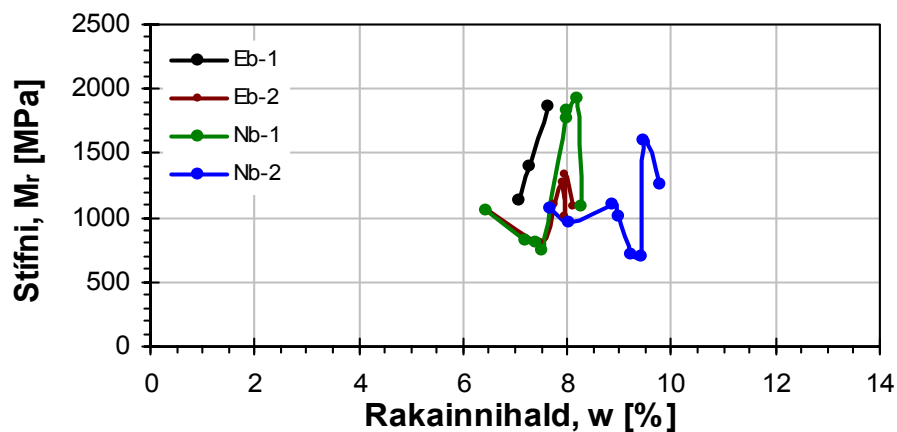
Niðurstöður prófana má sjá í viðauka og á myndum 9 - 11. Alls voru framkvæmd 4 rúmþyngdarpróf og 4 CBR próf á hverju efni, en 3 - 7 stífnipróf voru framkvæmd á hverju efni.



Mynd 9. Þjöppunarkúrfur allra efnanna sem fall af raka.



Mynd 10. CBR-gildi allra efnanna sem fall af raka.



Mynd 11. Stífni gildi allra efnanna sem fall af raka.

Miðað er við meðalspennu $p = 250 \text{ kPa}$

Tafla 2. Samanburður á þeim rakastigum sem hæðstu gildi gáfu við Standard Proctor þjöppun, CBR mælingar og stífnigildi.

		Rakastig við prófun [%]			
		Eb-1	Eb-2	Nb-1	Nb-2
St.Proctor	w_{opt}	9,8	9,8	10,8	12,3
CBR	w_{opt}^{CBR}	8,7	7,5	8,5	9,4
Stífni	$w_{opt}^{M_r}$	7,6	7,9	8,2	9,5

Sjá má á töflu 2 að mun meiri munur er á milli þeirra rakastiga sem hæstar prófananiðurstöður gefa milli annars vegar w_{opt} og CBR-gildis, og hins vegar á milli w_{opt} og stífnigildis. Mun minni munur, er á þeim rakagildum sem gefa hæsta prófananiðurstöður, er á milli CBR-gilda og stífnigilda.

Munurinn á þeim rakagildum sem hæsta niðurstöðu gefa í Proctor prófi og CBR-prófi er á bilinu 1,1 – 2,9 og er meðaltal mismunarins 2,15 prósentustig. Munurinn á þeim rakagildum sem hæsta niðurstöðu gefa í proctor prófi og Stífniprófi prófi er á bilinu 1,8 – 2,8 og er meðaltal mismunarins 2,49 prósentustig. Munurinn á þeim rakagildum sem hæsta niðurstöðu gefa í CBR-prófi og Stífniprófi er á bilinu 0,1 – 1,64 og er meðaltal mismunarins 0,64 prósentustig.

Athyglisvert er að hæstu gildi við CBR-prófanir og stífniprófanir nást þegar rakastig efnisins við prófun er nálægt því að vera 2 - 2,5 prósentustigum lægra en kjörrakastig efnisins er.

7. TENGSL STÍFNI OG CBR-GILDIS

CBR-prófið var þróað árið 1929 í Californíu (Hoff, 1999) og hefur síðan þá verið notað víða um heim til að meta burð vegagerðarefna. Eftir því sem tíminn leið voru þróaðar aðrar aðferðir til að prófa vegagerðarefni og árið 1962 kynnti Seed et al (Witczak ofl., 1995) hugmyndina um stífnistuðul sem hann skilgreindi sem hlutfallið á milli álagðrar lóðréttrar spennu og fjaðrandi lóðréttrar streitu, sjá jöfnu (3.6). Síðan þá hafa margar tilraunir hafa verið gerðar til að meta samband á milli gilda úr CBR-prófi og milli stífnistuðuls, M_r , til notkunar við veghönnun.

Stífnipróf er nokkuð umfangsmikið próf og krefst sérstaks álagsbúnaðar. CBR-próf er hins vegar mun umfangsminna próf og mun ódýrara. Því er mikill akkur falin í því ef hægt er að fá mat á stífni burðarlaga út frá CBR-gildi þeirra. Á töflu 3 má sjá helstu líkingar sem notaðar hafa verið til að ákvarða stífnigildi grófra jarðefna út frá CBR-gildi þeirra.

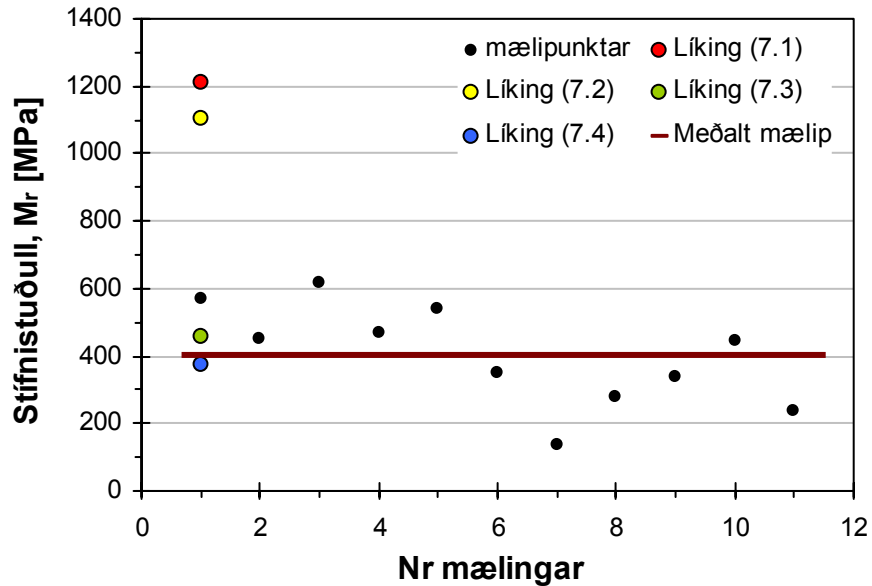
Tafla 3. *Yfirlit yfir líkingar sem hafa verið notaðar til að meta stífni út frá CBR-gildi jarðefna. Stífnin er gefin í MPa en CBR-gildið í % (Witczak ofl. 1995).*

Líking	Stofnun	Nr
$M_r = 10,35 \cdot CBR$	Shell Oil	7.1
$M_r = 37,3 \cdot CBR^{0,711}$	U.S.Army corps of Engineers (USAGE)	7.2
$M_r = 20,7 \cdot CBR^{0,65}$	South African Council on Scientific and Industrial Research (CSIR)	7.3
$M_r = 17,25 \cdot CBR^{0,64}$	Transport and Road Research Laboratory (TRRL)	7.4

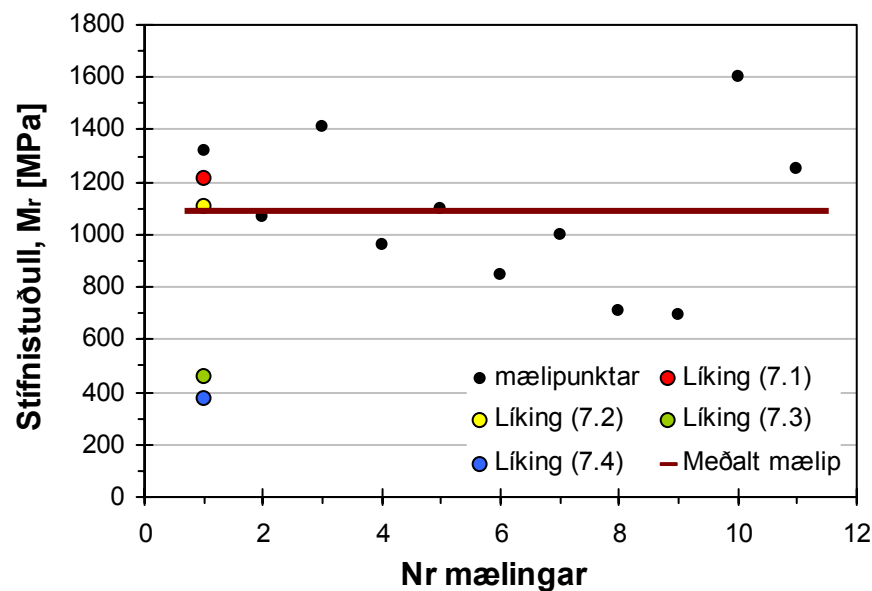
Ef þessum jöfnum er beitt á niðurstöður þríasaprófana úr vegbyggingu í Kjós kemur í ljós að jöfnur 7.1 og 7.2 falla best að gögnunum þegar hliðarþrýstingur, P , er hár, eða nálægt 250 kPa. En eins og áður hefur komið fram er stífnistuðullinn mjög háður, P . Hins vegar falla jöfnur 7.3 og 7.4 betur að niðurstöðum prófananna þegar hliðarþrýstingurinn er tiltölulega lágur eða um 25 kPa. eins og sjá má á myndum 12 og 13.

Líkingar 7.1 og 7.2 gefa því svipað stífnigildi og mælt er í þríasaprófunum við háa meðalspennu en líkingar 7.3 og 7.4 gefa hins vegar raunhæfara mat á stífninni við lága meðalspennu. Ástæðan helgast trúlega af þeirri áraun sem þær prófanir valda

sem líkingarnar byggja á. Líkingar 7.1 og 7.2 byggja því á prófunum þar sem beitt er mikilli áraun og gefa því raunhæf gildi við þær aðstæður, Líkingar 7.3 og 7.4 byggja því á sama hátt á prófunum þar sem beitt er lágrri meðalspennu og gefa því betri samsvörun við þess háttar aðstæður.



Mynd 12. Niðurstöður stífnimælinga, við $P = 25$ kPa, á Neðra burðarlagsefni 2 (Nb-2) bornar saman við áætlaða stífni s.k.v jöfnum 7.1 – 7.4.



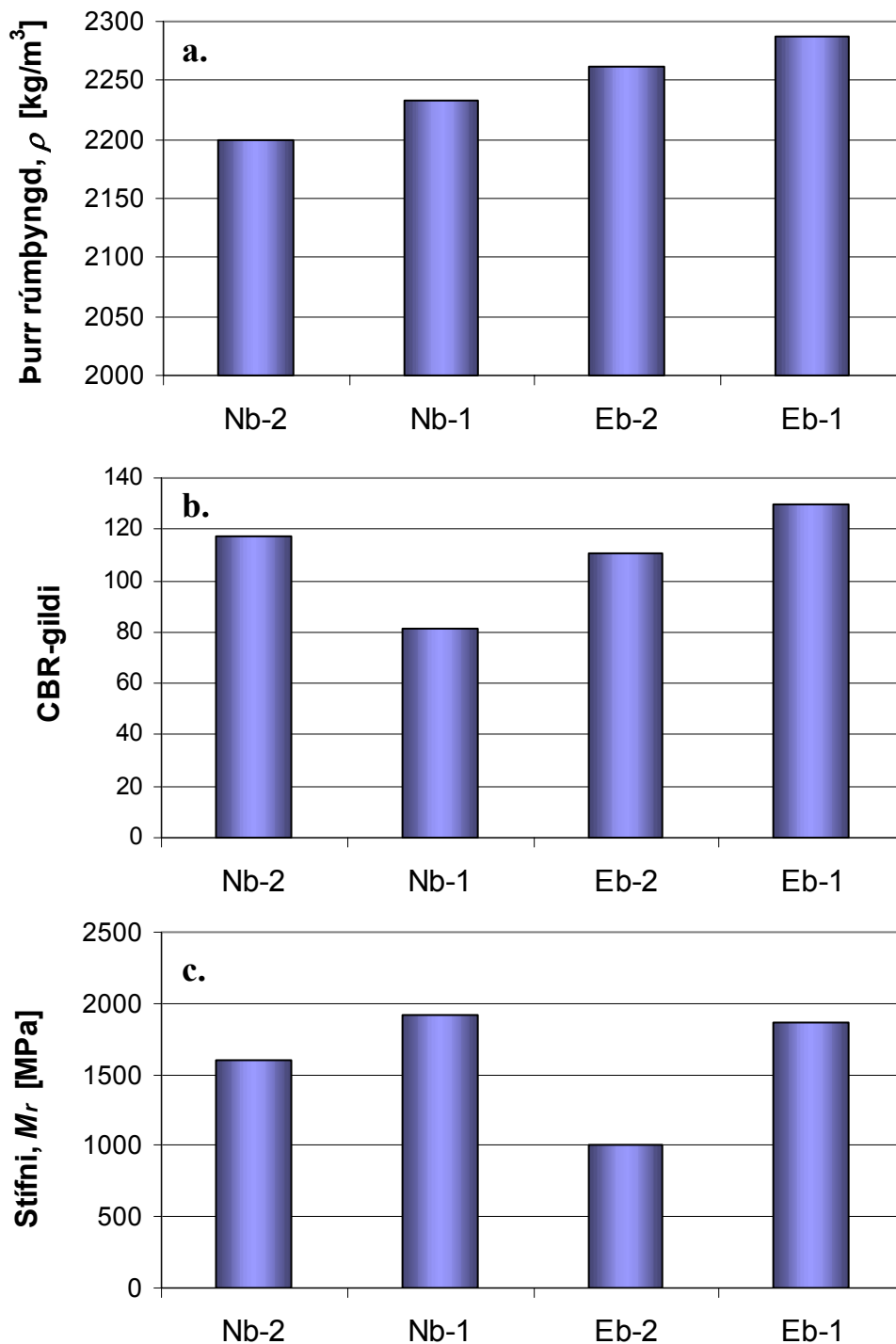
Mynd 13. Niðurstöður stífnimælinga, við $P = 250$ kPa, á Neðra burðarlagsefni 2 (Nb-2) bornar saman við áætlaða stífni s.k.v jöfnum 7.1 – 7.4.

8. SAMANTEKT

Erfitt er að bera saman niðurstöður úr stífniprófi og CBR-prófi þar sem stífniprófið mælir fjaðrandi eiginleika efnisins, en CBR-prófið mælir fyrst og fremst styrk og burðareiginleika efnisins. Hægt er þó að bera saman hvaða rakastig efnisins við þjöppun gefur hæsta CBR-gildi og stífngildi. Í þessum samanburði kom í ljós að hæstu CBR-gildi og stífngildi nást þegar prófin voru gerð við rakastig sem eru 2 – 2,5 % undir kjörrakastigi efnisins, þ.e. að stífni og CBR-gildi er hæst við um 2-2,5 % lægra rakastig en kjörrakastig þeirra er.

Líkingar í töflu 3 til að meta stífni burðarlagsefnanna fjögurra út frá CBR-gildi virðast gefa nokku raunhæf gildi, þ.e. líkingar 7.1 og 7.2 gefa raunhæf stífngildi við ástand þar sem beitt er mikilli áraun, en líkingar 7.3 og 7.4 gefa raunhæf gildi þegar beitt er lítilli áraun.

Annan samanburð má sjá á mynd 14 Þar er efnunum raðað upp í sömu röð, þ.e. eftir hækkandi hæstu rúmþyngd (14a) Sjá má að efnin raðast nokkuð “rétt” upp miðað við rúmþyngdarmælingarnar þ.e. rúmþyngdir efnanna lækka eftir því sem neðar dregur í vegbygginguna. Ekki er eins augljóst að sjá að niðurstöður úr hinum prófunum hagi sér svipað nema þá CBR-gildin sem virðast hækka með aukinni rúmþyngd, með þeirri undantekningu að CBR-gildið fyrir Nb-2 er allt of “hátt”. Óljósara samband virðist vera milli niðurstaðna úr CBR-gildi og rúmþyngdarmælingum við niðurstöður úr stífniprófunum, en hafa ber í huga að niðurstöðurnar eru ekki alveg sambærilegar þar sem rakastigin sem miðað er við eru eftir prófun í stífniprófunum, en miðað er við rakastig við þjöppun við niðurstöður í CBR-prófum og rúmþyngdarmælingum. Auk þess er einungis um fjögur efni að ræða en fleiri efni þyrfti að prófa til að fá marktækari niðurstöður.



Mynd 14. Samanburður á niðurstöðum rúmþyngdarprófana (a), CBR-prófana (b.) og stífniprófananna, $P = 250 \text{ kPa}$ (c.). Efnunum er raðað upp eftir hækkandi rúmþyngd.

Á niðurstöðum prófananna, sem kynntar eru í þessari skýrslu, má sjá að einhver tengsl eru á milli stífngilda, ákvörðuðu í þríasaprófi og CBR-gildis ákvörðuðu úr hefðbundnu CBR-prófi. Tengslin eru þó óljós og ljóst er að prófa þarf fleiri efni til að fá marktækari niðurstöður.

9. HEIMILDIR

AASHTO T 294-92 I (1992). *Interim method of test for resilient modulus of unbound granular base/subbase materials and subgrade soils* – SHRP protocol P46. American Association of State Highway and Transportation Officials.

Brynhildur Magnúsdóttir og Sigurður Erlingsson, (2002). *Repeated load triaxial testing for quality assessment of unbound granular base course materials*. 9th Nordic Aggregate Research Conference 12 – 14 sept 2002, Reykjavik, Iceland

Brynhildur Magnúsdóttir, Sigurður Erlingsson og Þorsteinn Þorsteinsson, (2002). “*Sveiflufræðileg þríasapróf á lausum jarðefnum*,” BUSL skýrsla B-33, Vegagerðin, Reykjavik, 42 s.

Brynhildur Magnúsdóttir (2001). “*Stífni grófra jarðefna ákvörðuð með sveiflufræðilegum þríasaprófunum*.” Meistaragráðuritgerð, Háskóli Íslands, Reykjavik

CEN prENV 00227413 (1997). *Unbound and hydraulic bound mixtures for roads* – Test methods – Cyclic load triaxial test. Draft. Brussels: CEN/TC227/WG4/TG2, 18 s.

Correia, G., Hornych, P., og Akou, Y., (1999). “*Review of models and modelling of unbound granular materials*.” Workshop on “modelling and advanced testing for unbound granular materials.”

Gunnar Bjarnason, Pétur Pétursson og Sigurður Erlingsson, (2001). “*Niðurbrot steinefna. Styrkleiki-veðrunarþol-slitþol*,” Ráðstefnuhefti. Lokaráðstefna BUSL. 6 apríl, s. 39-62.

Gunnar Bjarnason, Sigurður Erlingsson, Pétur Pétursson og Valtýr Thorisson, (1999). “*COURAGE – Icelandic final report*,” , Doc. no 8/7, WP2/4, WP3/6 Public Roads Administration, Reykjavik, 60 s.

Gunnar Bjarnason, Sigurður Erlingsson, Pétur Pétursson og Valtýr Thorisson, (1999). “*COURAGE – Construction with Unbound Road Aggregates in Europe - Icelandic final report*,” , BUSL report E-36, Public Roads Administration, Reykjavik, 63 s.

Gunnar Bjarnason, Sigurður Erlingsson og Pétur Pétursson, (1999). “*Aggregate resistance to fragmentation, weathering and abrasion – comparison of different test methods*,” , Doc. no. 8/8, WP2/5, WP3/7 Public Roads Administration Reykjavik, 32 s.

Gunnar Bjarnason, Sigurður Erlingsson og Pétur Pétursson, (1999). “*COURAGE-Aggregate resistance to fragmentation, weathering and abrasion – comparison of different test methods*,” , BUSL report E-37, Public Roads Administration Reykjavik, 35 s.

Hoff, Inge. (1999). *Material Properties of Unbound Aggregates for Pavement Structures*. Doktor ingeniöravhandling 1999:53. Institutt for veg- og jernbanebygging. NTNU, Trondheim.

Sigurður Erlingsson, Gunnar Bjarnason og Valtýr Thorisson (2002). “*Seasonal variation of moisture and bearing capacity in roads with a this surface dressing waering course,*” Proceedings from the 9th International Conference on Asphalt Pavements, Copenhagen, Denmark, . CD-diskur.

Sigurður Erlingsson og Brynhildur Magnúsdóttir, (2002). “*Dynamic Triaxial Testing of Unbound Granular Base Course Materials,*” Proceedings from the 6th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields BCRA’02, Lisbon, Portugal, s. 989-1000.

Sigurður Erlingsson, Gunnar Bjarnason and Valthýr Thórisson (2001). “*Árstíðarbundnar sveiflur í burðargetu vega vegna raka og hitabreytinga,*” Lokaráðstefna BUSL, Hótel Loftleiðir, Reykjavík, 6. apríl, s. 31-38.

Sigurður Erlingsson og Brynhildur Magnúsdóttir, (2001). “*Ákvörðun á stifni óbundinna vegagerðarefna á tilraunastofu,*” Árbók VFÍ/TFÍ 2000/2001, Reykjavík, s. 339-346.

Sigurður Erlingsson (2000). “*Dynamic triaxial testing of unbound base course materials,*” Proceedings of the Nordic Geotechnical Conference, NGM 2000, *Finish Geotechnical Society*, June, Helsinki, s. 69-76.

Sigurður Erlingsson (2000). “*Dynamic triaxial testing of unbound granular materials,*” BUSL skýrsla no. B-27, Reykjavík, 15 s.

Sigurður Erlingsson, (1998). “*Sveiflufræðileg þríasapróf á steinefnum,*” BUSL-report nr. B-16, Reykjavík, 28 s.

Witczak M.W., Qi x., Mirza M.W. (1995). “*Use of Nonlinear Subgrade Modulus in AASHTO Design Procedure*”. *Journal of Transportation Engineering*. Vol 121., s 273-282.

Viðaukar

Niðurstöður prófana

Tafla V1. Niðurstöður úr Standard þjöppunarprófi

Efni	Raki w [%]	Rúmþyngd ρ [kg/m³]
Efra burðarlagsefni 1 (Eb-1)	5,4	2006,5
Efra burðarlagsefni 1 (Eb-1)	6,8	2157,6
Efra burðarlagsefni 1 (Eb-1)	8,3	2284,5
Efra burðarlagsefni 1 (Eb-1)	9,8	2286,7
Efra burðarlagsefni 2 (Eb-2)	6,2	2121,6
Efra burðarlagsefni 2 (Eb-2)	8,2	2244,7
Efra burðarlagsefni 2 (Eb-2)	9,8	2278,7
Efra burðarlagsefni 2 (Eb-2)	10,8	2261,6
Neðra burðarlagsefni 1 (Nb-1)	7,3	2092,1
Neðra burðarlagsefni 1 (Nb-1)	9,1	2172,4
Neðra burðarlagsefni 1 (Nb-1)	10,8	2233,7
Neðra burðarlagsefni 1 (Nb-1)	12,3	2193,4
Neðra burðarlagsefni 2 (Nb-2)	7,5	2055,2
Neðra burðarlagsefni 2 (Nb-2)	9,3	2183,4
Neðra burðarlagsefni 2 (Nb-2)	12,3	2199,6
Neðra burðarlagsefni 2 (Nb-2)	12,7	2137,0

Tafla V2. Niðurstöður CBR-prófa.

Efni	Raki w [%]	CBR [kg/m³]
Efra burðarlagsefni 1 (Eb-1)	2,6	6
Efra burðarlagsefni 1 (Eb-1)	5,5	19
Efra burðarlagsefni 1 (Eb-1)	7,3	113
Efra burðarlagsefni 1 (Eb-1)	8,7	130
Efra burðarlagsefni 2 (Eb-2)	2,9	14
Efra burðarlagsefni 2 (Eb-2)	5,8	18
Efra burðarlagsefni 2 (Eb-2)	7,5	111
Efra burðarlagsefni 2 (Eb-2)	9,3	105
Neðra burðarlagsefni 1 (Nb-1)	3,7	4
Neðra burðarlagsefni 1 (Nb-1)	5,5	8
Neðra burðarlagsefni 1 (Nb-1)	8,5	81
Neðra burðarlagsefni 1 (Nb-1)	11	66
Neðra burðarlagsefni 2 (Nb-2)	4,2	4
Neðra burðarlagsefni 2 (Nb-2)	7,2	12
Neðra burðarlagsefni 2 (Nb-2)	9,4	117
Neðra burðarlagsefni 2 (Nb-2)	11,7	9

Tafla V3. Niðurstöður úr Stífniþrófunum.

Efni	Raki	k₁	k₂
	w		
	[%]	[kPa]	[-]
Efra burðarlagsefni 1 (Eb-1)	7,06	264,7	0,92
Efra burðarlagsefni 1 (Eb-1)	7,28	329,8	0,60
Efra burðarlagsefni 1 (Eb-1)	7,63	324,5	0,87
Efra burðarlagsefni 2 (Eb-2)	6,5	488,6	0,38
Efra burðarlagsefni 2 (Eb-2)	7,47	362,6	0,40
Efra burðarlagsefni 2 (Eb-2)	7,76	320,6	0,61
Efra burðarlagsefni 2 (Eb-2)	7,91	391,4	0,59
Efra burðarlagsefni 2 (Eb-2)	7,94	332,7	0,55
Efra burðarlagsefni 2 (Eb-2)	7,96	375,9	0,63
Efra burðarlagsefni 2 (Eb-2)	8,12	260,8	0,71
Neðra burðarlagsefni 1 (Nb-1)	7,53	310,4	0,44
Neðra burðarlagsefni 1 (Nb-1)	7,98	454,1	0,57
Neðra burðarlagsefni 1 (Nb-1)	8,00	464,1	0,56
Neðra burðarlagsefni 1 (Nb-1)	8,21	390,4	0,81
Neðra burðarlagsefni 1 (Nb-1)	8,29	459,1	0,45
Neðra burðarlagsefni 2 (Nb-2)	8,85	362,9	0,70
Neðra burðarlagsefni 2 (Nb-2)	9,21	277,8	0,52
Neðra burðarlagsefni 2 (Nb-2)	9,41	323,4	0,38
Neðra burðarlagsefni 2 (Nb-2)	9,47	458,7	0,63
Neðra burðarlagsefni 2 (Nb-2)	9,8	326,4	0,61