Jarðefni, þjöppun og samanburður aðferða við þjöppumælingar

Benjamín Ingi Böðvarsson

Byggingasvið THÍ
Haust 2004

TD-bt-04-09

TÆKNIHÁSKÓLI ÍSLANDS
Technical University of Iceland

Heiti verkefnis: Jarðefni, þjöppun og samanburður aðferða við þjöppunarmælingar

Deild: Byggingadeild

Tegund verkefnis: Jarðtækni .

Önn	**Áfangi**
Haust 2004	BT LOK 1012

Útdráttur

Í þessu riti er fjallað almennt um jarðefni og þá þætti sem hafa áhrif á grundunarhæfni þess.

Fjallað er um þjöppun jarðefnis og helstu áhrifsþætti þjöppunar.

Gerð er samantekt á helstu aðferðum sem notaðar eru til þjöppumælinga hér á landi og þær bornar saman.

Sérstaklega eru niðurstöður plötuprófs og falllóðsprófs skoðaðar og fylgni skoðuð þar á milli til þess að athuga hvort yfirfæra megi uppsafnaða reynslu plötuprófsins yfir á falllóðsprófið.

Fjallað er um þjöppumæli í völturum og skráningartæki hans og hvernig þessi búnaður mætir nýjum og hertari kröfum við þjöppunar-eftirlit.

Markmiðið er að setja fram niðurstöður um hvaða aðferðir eru hentugar í mati á þjöppun, á hverjum stað, við grundun mannvirkja.

Höfundur:

Benjamín Ingi Böðvarsson

Leiðbeinendur:

Haraldur Sigursteinsson
Ingunn Sæmundsdóttir

Stofnun:

Vegagerðin

Tengiliður:

Ingunn Sæmundsdóttir

Dagsetning: **08.12.2004**

Lykilorð íslensk **Lykilorð ensk**

Jarðefni	**Soil**
Þjöppun	**Compaction**
Þjöppunarpróf	**Compaction tests**
Titringsvaltari	**Vibration roller**

Dreifing
opin ☐ **lokuð** ☐ **til** .

1. Inngangur

1.1 Almennt

> „Hann er líkur manni, er byggði hús, gróf djúpt fyrir og grundvallaði það á bjargi. Nú kom flóð og flaumurinn skall á því húsi, en fékk hvergi hrært það, vegna þess að það var vel byggt.“[1]

Mannvirki, í hvaða formi sem er, hafa alla tíð fylgt manninum, enda er hann mikil sköpunarvera. Eins og sjá má af tilvitnuninni hér á undan, er langt síðan að maðurinn öðlaðist skilning á því að mikilvægt er að grunda mannvirki vel og að sterkt berg er ákjósanlegasta undirstaðan. Nútíma mannvirkjagerð er mikið frábrugðin því sem þá var og hefur þróast mikið gegnum aldirnar, en mikilvægi grundunar er enn í fullu gildi og verður það ætíð. En grundun á bergi er ekki alltaf möguleg, af ýmsum ástæðum og því hefur maðurinn þurft að finna út hvernig hægt er að tryggja góða grundun á lausum jarðlögum.

Jarðefni er mest notaða byggingarefnið í heiminum í dag og fyrir utan það að vera notað gríðarlega mikið til grundunar mannvirkja, er það einnig mikið notað í steypu. Fjölmargir þættir í eðli jarðefnis hafa áhrif á hæfileika þess til grundunar og ber helst að nefna gerð, stærð og lögun einstakra jarðefniskorna og hvernig dreifingu þeirra er háttað um efnið. Einnig hefur rakainnihald mikil áhrif og þéttleiki efnisins eða holrýmd þess. Mikilvægt er að þekkja alla þættina vel, því hægt er að hafa áhrif á þá með ýmsum hætti og þannig stuðla að því að grundun verði með besta móti.

Með hæfilegri þjöppun jarðefnis má minnka holrýmd þess og auka þéttleika til muna, þannig að jarðefnið standist betur álag frá mannvirki, sem til stendur að grunda á því. Áhrifsþættir þjöppunar eru margir og mismunandi og þar sem nútíma þjóðfélög verja gríðarlegum fjármunum á ári hverju til jarðefnisþjöppunar, er afar mikilvægt að góð hagræðing sé til staðar í þeim efnum.

Nokkrar aðferðir hafa verið fundnar upp til þess að meta gæði þjöppunar og byggja þær á mismunandi mælingum sem gerðar eru á jarðefninu. Helst ber að nefna ýmiskonar rúmþyngdarmælingar, t.d. sandkeilupróf, sigmælingar, t.d. plötupróf og falllóðspróf og loks má nefna nýjung sem verið hefur að ryðja sér til rúms, þ.e. þjöppumælar í völturum sem mæla hreyfifræðilegan stífleika jarðefnisins.

[1] Biblían. Lúk, 6:48

1.2 Markmið verkefnis

Í þessu riti er fjallað almennt um jarðefni, hvernig myndun þess á sér stað í náttúrunni og þeir þættir skoðaðir sem áhrif hafa á hæfni þess til grundunar. Einnig er fjallað um þjöppun jarðefnis og helstu áhrifsþætti þjöppunar. Í framhaldi af því eru gildandi grundunarstaðlar og íslenskar verklýsingar um þjöppun skoðaðar.

Þungamiðjan liggur svo í umfjöllun á mismunandi aðferðum til þjöppunarmælinga. Gerð er samantekt á þeim aðferðum sem notaðar eru til þjöppumælinga og fjallað ítarlega um þær sem eru algengar hérlendis. Lagt er mat á upplýsingargildi og áreiðanleika þeirra við eftirlit með þjöppun og reynt að koma auga á hverjir helstu kostir og gallar þeirra eru. Í niðurstöðum er leitast við að meta aðferðirnar hlutlægt og flokka þær eftir hagnýtu notagildi við þjöppunareftirlit.

Sérstaklega eru skoðaðar og bornar saman niðurstöður mælinga frá plötuprófum og falllóðsprófum og athugað hvort einhver fylgni sé á milli þeirra og þá einkum með það í huga að athuga hvort yfirfæra megi uppsafnaða reynslu plötuprófsins, sem svo lengi hefur verið nær einsráðandi hérlendis, yfir á falllóðsprófið, við þjöppunareftirlit. Í því samhengi er stuðst við mælingar á Hringbraut, Vesturlandsvegi og Reykjanesbraut, ásamt eldri samanburðarskýrslur sem gefnar hafa verið út, bæði hérlendis og erlendis.

Að endingu er fjallað sérstaklega um þjöppumæla í völturum, skráningartæki þeirra og hvernig þessi búnaður mætir nýjum og hertari kröfum í þjöppunareftirliti. Ýmsir kostir þeirra, umfram hefðbundnari eldri aðferðir, eru skoðaðir, ásamt helstu ókostum. Útskýrt er hvernig niðurstöður þeirra eru kvarðaðar miðað við þekktari próf sem meiri reynsla er af og skoðað hvort mögulegt sé að þessi aðferð gæti komið í stað plötuprófs.

Markmiðið er að setja fram niðurstöður um hvaða aðferðir eru hentugar í mati á þjöppun, á hverjum stað, við grundun mannvirkja.

2. Helstu niðurstöður

Tæknileg skilgreining jarðefnis segir að það sé einfaldlega allur efsti hluti jarðskorpunnar, þ.e. laus jarðlög sem liggja ofan á berggrunni. Myndun þess á sér einkum stað með veðrun og svörfun á berggrunni landsins. Helstu eiginleikar jarðefna sem tilgreina hæfni þeirra til grundunar eru kornastærðardreifing, flæði- og þjálnimark, þjálni, rúmþyngd, kornarúmþyngd, rakagildi, samband rúmþyngdar og raka og glæðitap.

Tilgangur þjöppunar á lausum jarðefnum er fyrst og fremst að minnka loft- og vatnsrými í jarðveginum og þannig auka rúmþyngd, styrk og burðargetu. Áhrifsþættir þjöppunar eru jarðefnisgerð, rakainnihald, þjöppunaraðferð og stífni undirlags.

Algengast er að mæliaðferðir á þjöppun ákvarði annaðhvort svokallaða þjöppunargráðu, þar sem mæld rúmþyngd úti í mörkinni er borin saman við ákvarðaða hámarks rúmþyngd á rannsóknarstofu, eða fjaðurstuðul, sem byggir á sigmælingum undan ásettu álagi. Helstu mæliaðferðir á þjöppun hérlendis eru „Proctor“ próf og hristiborðspróf (rannsóknarstofupróf), sandkeilupróf og ísatópamælingar (rúmþyngdarpróf) og plötupróf og falllóðspróf (sigmælingar). Þær eru hinsvegar mismikið notaðar og hefur plötuprófið þar vinninginn. Þjöppumælir í völturum er nýjung sem hefur verið að ryðja sér til rúms hérlendis í auknum mæli, en hann ákvarðar hreyfifræðilegan stífleika jarðefnis, út frá svörun þess gagnvart titringsálagi.

Niðurstöður samanburðarmælinga voru frekar dreifðar og því var fylgni milli þeirra almennt mjög léleg. Talið er að það sé vegna þess að mismunandi forsendur voru notaðar við mælingar, þ.e. margar plötustærðir og mismunandi álag og einnig vegna þess að fáar mælingar voru notaðar í samanburðinn. Bent er á að ef með nokkru móti á að geta yfirfært uppsafnaða reynslu plötuprófsins yfir á falllóðið, þurfi að gera vandaðan samanburð, þar sem forsendur eru skýrar og nákvæmlega eins milli aðferða, mælingar nægilega margar og framkvæmd prófa hagrætt þannig að þau líkjast betur hvort öðru.

Þjöppumælir og skráningartæki í völturum eru tvímælalaust bylting í þjöppunarmælingum, þar sem búnaðurinn gefur svo auðskiljanlegar niðurstöður, á svo sniðugan máta, á svo stórum svæðum, á svo skömmum tíma. Einfalt er að gera mælingar með búnaðinum og lærist það fljótt, jafnframt hefur hann marga kosti fram yfir eldri hefðbundnari aðferðir. Á næstu árum er mikilvægt að menn reyni að tileinka sér aðferðina, séu duglegir að kvarða niðurstöður hennar við þekktari próf og safna kvörðuðum niðurstöðum saman, með það í huga að útbúa reynslu- eða gagnabanka, sem gæti síðar orðið til þess að niðurstöður mætti túlka án kvörðunar

3. Jarðvegur

3.1 Almennt um jarðveg

Allir vita hvað jarðvegur er og hvaða þýðingu hann hefur fyrir líf mannanna. Fyrir utan það að vera uppspretta lífs og fæðu um örófir alda er hann einnig hentugur sem byggingarefni og hafa menn nýtt sér það. Á Íslandi hefur jarðvegur verið grundvöllur þess að hér hefur verið unnt að byggja upp nútíma þjóðfélag á seinustu árum og áratugum. Jarðvegurinn eða jarðefnin, eins og einnig er talað um, eru mismunandi af gerð og gæðum og henta því til mismunandi hluta. Næringarrík gróðurmoldin hentar t.a.m. ekki til grundunar mannvirkja og grófur sandur þykir ekki kjörinn til ræktunar.

Þegar jarðefni eru skoðuð með það fyrir augum að nota þau til byggingaframkvæmda eru gæðin alveg sérstaklega rannsökuð og metin. Mismunandi kröfur eru gerðar til efnisgæða eftir því um hverskonar mannvirki er um að ræða. Mest þurfa gæðin að vera í fylliefnum steinsteypu og slitlögum vega og gatna, en minni kröfur eru gerðar til efna sem notuð eru í fyllingar af ýmsu tagi. Á Íslandi er mjög mikið um laus jarðefni en hágæðaefni eru af skornum skammti. Það er því afar mikilvægt að meta hversu góð efnin þurfa að vera í viðkomandi mannvirki, til þess að ekki sé verið að bruðla með alltof góð efni þar sem lakari gætu nýst.

Í íslensku Alfræðiorðabókinni er jarðvegur skilgreindur á tvennan hátt, annarsvegar frá náttúrlegu sjónarmiði og hinsvegar frá jarðtæknilegu sjónarmiði. Samkvæmt náttúrulegri skilgreiningu er jarðvegur yfirborðslag jarðskorpunnar þar sem gróður getur þrifist. Er samsetningin þá takmörkuð við tvo hópa af efnum, óuppleysanlegar jarðvegsmyndanir af bergveðrun annarsvegar og lífrænni rotnun hinsvegar. Samkvæmt jarðtæknilegri skilgreiningu er jarðvegur einfaldlega allur efsti hluti jarðskorpunnar, þ.e. laus jarðlög sem liggja ofan á berggrunni.[2]

Þar sem þetta verkefni snýr að þjöppun og þjöppumælingum fjallar þessi kafli aðallega um jarðveg í jarðtæknilegu samhengi, þ.e.a.s. um þá þætti sem segja til um gerð og gæði jarðefnisins og hvaða rannsóknum er beitt til að meta þau. Þó er fyrst lítillega fjallað er um berggrunn Íslands og hvernig laus jarðlög myndast af honum. Í því samhengi er mikið stuðst við rit Hreggviðar Norðdahls; Hagnýt laus jarðlög.[3]

3.2 Berggrunnur Íslands

3.2.1 Almennt

Stærsti hluti lausra jarðlaga er orðinn til við veðrun og rof á berggrunni landsins. Eiginleikar jarðlaganna eru því arfur frá bergrunni og eru gerð, samsetning og

[2] Íslenska Alfræðiorðabókin. 1990
[3] Rannsóknarstofnun Byggingariðnaðarins. 1992

ástand bergsins mikilvæg atriði. Berggrunnur Íslands er að mestu úr hraunlögum og móbergi með set og setbergslögum á milli.

Hraunlögin eru storkuberg en gerð þess er háð efnasamsetningu kvikunnar, aðstæðum við storknun o.fl. Við flokkun storkubergs er einkum tvennt sem skiptir máli, þ.e. kísilsýrumagn (SiO_2) og storknunarstaður. Tafla 1 sýnir íslensku storkubergstegundirnar. Móberg er úr ummynduðum og samlímdum lausum gosefnum. Við flokkun þess er einkum stuðst við upprunalega kornastærð gosefnanna. Set og setbergslögin eru flokkuð eftir kornastærð og umhverfinu sem setmyndunin á sér stað í.

		Kísilsýrumagn		
		Súrt > 65% SiO_2	Ísúrt 65 - 52% SiO_2	Basískt < 52% SiO_2
Storknunarstaður	Gosberg	Líparít	Andesít	Basalt
	Gangberg	////	////	////
	Djúpberg	Granófýr	Díorít	Gabbró
Frumsteindir		Kvars Ortóklas Plagíóklas Glimmer	//// //// //// ////	Plagíóklas Pýroxen Seguljárnsteinn Ólivín

Tafla 1. Íslenskar storkubergstegundir.[4]

Hlutur helstu bergtegunda í berggrunni landsins er þannig:[5]

1) Basalt (mest)
2) Móberg
3) Líparít
4) Andesít
5) Gabbró
6) Granófýr (minnst)

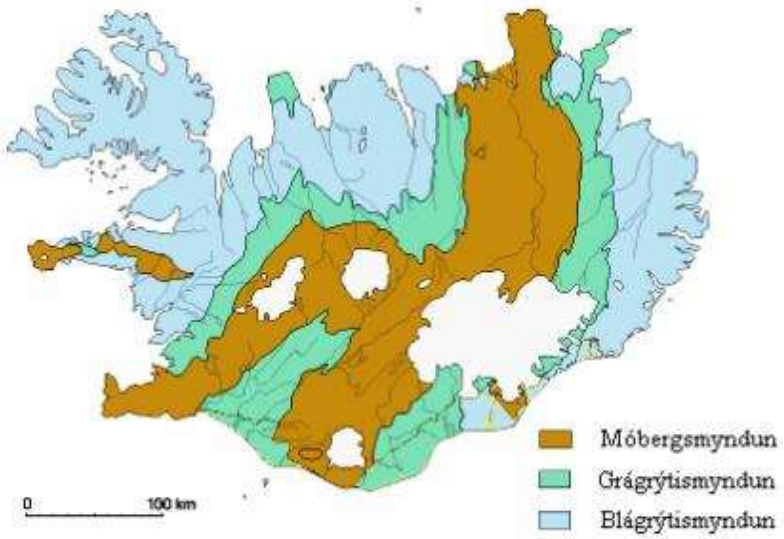
Jarðmyndunum Íslands er skipt í fjóra meginflokka eftir jarðsögulegum aldri og eru þeir nokkuð frábrugðnir hver öðrum. Flokkarnir eru þessir:[6]

Blágrýtismyndun	> 3 milljón ára
Grágrýtismyndun	0,7-3 milljón ára
Móbergsmyndun	10-700 þúsund ára

[4] Þorleifur Einarsson. 1991
[5] Hreggviður Norðdahl. 1992
[6] Hreggviður Nordahl. 1992

Nútímamyndanir < 10 þúsund ára

Með talsverðri nálgun má segja að hraunlögin tilheyri blá- og grágrýtismynduninni, móberg móbergsmynduninni og setlög nútímamynduninni. Útbreiðsla þessara jarðmyndana er eftirfarandi:



Mynd 1. Þrjár helstu berggrunnsmyndanir Íslands.[7]

3.2.2 Eiginleikar íslenskra bergtegunda

Innri og ytri gerð íslenskra bergtegunda ræður hagnýtum eiginleikum þeirra. Þegar verið er að meta gæði bergtegunda er þeim gjarnan skipt í fjóra aðalflokka; gosberg, djúpberg, gjósku og setberg. Með tilliti til notkunar í steinsteypu og bundin slitlög eru gosberg og djúpberg bestu bergtegundirnar en gjóska og setberg eru mun lakari. Þeir þættir í gerð bergsins sem í þessum tilgangi er farið eftir eru styrkur, veðrunarþol og efnafræðilegir eiginleikar.

Styrkur: Styrkur bergs er háður kornasstærð þess, þéttleika og ummyndun, en ummyndun er efnafræðileg breyting á frumgerð bergsins og steintegundum þess. Mjög ummyndað berg er stundum sagt vera morkið eða fúið. Um kornastærðina gildir almennt að smákornótt eða dulkornótt berg er sterkara en stórkornótt. Þéttleiki bergs og ummyndun ráða miklu um það hvernig bergið bregst við broti og svörfun. Því þéttara sem bergið er, minna ummyndað og minna blöðrótt, því sterkara er það.

Veðrunarþol: Þol bergs gagnvart mikilvirkustu veðrun hérlendis, frostveðrun, ræðst af sömu innri þáttum þess og styrkur. Blöðrótt berg veðrast mun hraðar en þétt berg. Sama máli gegnir ef bergið er straumflögótt og sprungið.

Efnafræðilegir eiginleikar: Þeir eiginleikar segja til um uppbyggingu bergsins og hvernig það bregst við hinum ýmsu aðstæðum og eru þeir fyrst og fremst

[7] Þorleifur Einarsson. 1991:94

háðir uppruna bergs og ummyndun þess. Basalt hefur t.a.m. mun stöðugri efnasamsetningu en líparít og því meiri sem ummyndunin er því lakari eru eiginleikarnir. Efnasamsetning líparíts er t.d. ekki talin henta til framleiðslu á steinsteypu vegna svokallaðrar alkalívirkni þess sem stafar af auðleysanlegri kísilsýru í líparítinu.

3.2.3 Berggreining

Tilgangur berggreiningar er að gæðaflokka berggerð korna í lausum jarðlögum með tilliti til þess, að efnin verða notuð í hinar ýmsu ólíku tegundir mannvirkja. Við bergreiningu er ekki um yfirlitsmat alls sýnishornsins að ræða, heldur er hvert korn greint fyrir sig. Þær berg- og steintegundir sem koma fyrir í sýnishornum af lausum jarðlögum eru þær sömu og berggrunnur landsins er gerður úr.

Við berggreiningu eru ekki allar kornastærðir viðkomandi efnis skoðaðar, heldur er ákveðinn stærðarflokkur eða flokkar valdir sérstaklega til rannsóknar. Venjulega er kornastærðin 4,75 til 9,5 mm greind, en korn af þessari stærð má greina til tegunda með berum augum eða í víðsjá. Kornastærðir á bilinu 0,15 til 2,36 mm eru skoðaðar í þunnsneið við 32 til 200 falda stækkun. Tölfræðilega viðunandi niðurstaða telst fást með greiningu á 200 til 400 kornum úr hverjum stærðarflokki. Berggreiningu er gjarnan skipt í áfanga og sýnir eftirfarandi tafla þá vel:

Almenn greining	Lögun korna	Kýlni Ávali Áferð
	Tæknilegir eiginleikar	Hreinleiki Styrkur
Greining berggerða	Berg- og steintegundir Ummyndun Þéttleiki Annað	

Tafla 2. Helstu áfangar berggreiningar.[8]

Lögun korna: Segir til um hvernig kornin í jarðefninu eru í laginu, t.d. hvort þau eru núin eða köntuð. Eins og sjá má af töflu 2 er lögun korna gjarnan lýst með þremur hugtökum; kýlni, ávala og áferð. Kýlni segir til um hve líkt kornið er kúlu. Ávali lýsir köntum kornanna, þ.e. hvort þeir eru skarpir eða núnir. Áferð segir til um hvort yfirborð kornanna er slétt eða hrjúft.

Tæknilegir eiginleikar: Tilgreina hreinleika og styrk jarðefnis. Með hreinleika er átt við hvort kornið er gert úr einni bergtegund eða hvort það er blanda af tveimur eða fleiri. Styrkur er metin út frá kornastærð, þéttleika og ummyndunarstigi.

[8] Hreggviður Nordahl. 1992

Berg- og steintegundir: Segja til um hverra bergtegundar kornin eru. Er þá einkum verið að greina djúpberg frá gosbergi og skoða kísilsýrumagn (SiO_2).

Ummyndun: Tilgreinir hvort einhver frumsteintegund hafi breyst og þá hve mikið, en greining á ummyndunarstigi korna er enn sem komið er frekar afstæð. Greining ummyndunar er stundum gerð á óbeinan hátt og er þá gjarnan miðað við hvort kornið hefur tapað miklu eða litlu af upphaflegum styrk sínum. Mismunandi litur veitir einnig oft upplýsingar um ummyndun.

Þéttleiki og annað: Segir til um þéttleika korna og ýmsa aðra eiginleika eins og t.d. hvort þau eru sprungin, innihalda eitthvað lífrænt o.fl.

Þegar korn eru gæðaflokkuð er einungis tekið tillit til berggerða korna en ekki til þátta almennrar greiningar. Gæðaflokkunin byggist því einkum á berg- og steintegund kornanna, ummyndun þeirra og þéttleika. Fyrir hvern þátt er gefin hluteinkunn (1 (best), 2 eða 3 (lakast)) en lægsta hluteinkunn ræður síðan lokaeinkunn hverrar berggerðar. Einkunn eða gæði efnisins í heild ræðst svo af hlutföllum korna þessara þriggja gæðaflokka.

1.flokkur = góð korn
2.flokkur = miðlungs góð korn
3.flokkur = léleg korn

Tafla 3 sýnir hvaða einkunn íslensku bergtegundirnar hafa fengið og í hvaða flokki þau hafa lent í með tilliti til notkunar í bundið slitlag annarsvegar og steinsteypu hinsvegar.

Berggreining		Bundið slitlag			Steinsteypa		
		1. fl.	2. fl.	3. fl.	1. fl.	2. fl.	3. fl.
Gosberg	Basalt	*			*		
	Líparít		*			*	
	Andesít	*				*	
	Hrafntinna		*				*
	Biksteinn		*				*
Djúpberg	Gabbró	*				*	

	Granófýr	*		*	
Gjóska	Basaltgler		*	*	
	Basaltgjall		*		*
	Basaltvikur		*		*
	Líparítvikur		*		*
Setberg	Leirsteinn		*		*
	Siltsteinn		*		*
	Sandsteinn		*		*
	Völuberg		*		*
	Jökulberg		*		*
Annað	Móberg		*		*
	Setberg		*		*
	Gler		*		*
	Gjall		*		*
	Vikur		*		*
	Holufyllingar		*		*
	Skeljabrot	*		*	
	Kristallar	*		*	
Þéttleiki	Þétt	*		*	
	Fínblöðrótt		*	*	
	Blöðrótt	*		*	
Ummyndun	Ferskt	*		*	
	Lítillega ummyndað	*		*	
	Ummyndað	*		*	
	Mjög ummyndað		*		*

Tafla 3. Berggreining og gæðaflokkun korna lausra jarðlaga.[9]

3.3 Myndun lausra jarðlaga

Ísland er jarðfræðilega ungt land og mótun þess ör. Myndun lausra jarðlaga hér á landi gengur þar af leiðandi mun hraðar fyrir sig heldur en í hinum jarðfræðilega miklu eldri nágrannalöndum okkar. Uppruni allra lausra jarðlaga, nema gjósku sem myndast við eldsumbrot, er berggrunnur landsins. Myndun þeirra á sér stað í þremur áföngum, við veðrun og svörfun á berggrunni landsins, við flutning þess efnis sem þannig losnar og við setlagamyndun, þ.e. þegar efnið staðnæmist og hleðst upp. Auk þess myndast laus jarðlög við eldsumbrot, rof og endurupphleðslu eldri setlaga.

3.3.1 Veðrun

Veðrun nefnist það þegar berg molnar eða grotnar og verður þannig að bergmylsnu án þess þó að færast af veðrunarstað. Veðrun er gjarnan skipt í efnaveðrun og aflveðrun. Efnaveðrun á sér stað þegar berg grotnar niður fyrir

[9] Hreggviður Nordahl. 1992

áhrif uppleystra efna sem eru í regn- eða grunnvatni[10]. Bergið leysist þá ýmist hreinlega upp við efnabreytingu eða efnaskipti eiga sér stað milli bergs og upplausnar. Efnaveðrun er mjög háð loftslagi og gerist helst í miklum hita og við mikinn raka. Vegna norðlægrar legu Íslands og kulda gætir hennar því ekki í miklum mæli, nema á jarðhitasvæðum landsins. Aflveðrun er aftur á móti mikilvirkari í þessu tilliti. Hún á sér stað t.d. vegna hitabrigða, frostveðrunar, sundrungar við myndun saltkristalla og áhrifa frá plöntum og dýrum.

Eins og áður segir er frostveðrun mikilvirkust veðrunar hérlendis. Frostveðrun verður við sífellda endurtekningu frosts og þýðu, þegar vatn frýs í sprungum og holrýmum berggrunnsins. Vatn eykur rúmmál sitt um 9% þegar það frýs og ryður öllu, sem umlykur það, frá sér með gífurlegum krafti. Frost getur því aðeins molað bergið ef það er annaðhvort sprungið eða holótt. Hér á landi er yfirleitt hvort tveggja fyrir hendi í bergi og auk þess er straumflögun algeng. Misjafnt er hvernig íslenskar bergtegundir liggja við frostveðrun, en almennt gildir að því holóttara og sprungnara sem bergið er því meiri verður hún. Við frostveðrun þarf einnig að vera til staðar mikill raki og úrkoma. Á Íslandi má því segja að kjöraðstæður séu fyrir frostverkun.

3.3.2 Svörfun

Berggrunnur Íslands mylst einnig niður á annan aflrænan hátt en við frostveðrun. Svörfun er það kallað þegar ár, jöklar og vindar vinna markvisst að því að grafa sig ofan í bergið. Öll fallvötn bera með sér fastar efnisagnir, stórar og smáar, sem þau sverfa með í farvegi sínum. Framburðurinn skiptist í grugg og botnskrið. Gruggið er fínt (leir, silt og sandur) og sverfur því lítið en botnskriðið inniheldur möl og steina sem veltast og skoppa eftir botninum og grafa sig þannig niður. Vindar vinna á svipaðan hátt á bergrunninum, með því að feykja bergmylsnu á klappir og steina. Hinsvegar er það fyrst og fremst svörfun fornra og núverandi jökla landsins, sem stendur fyrir megninu af frummyndun lausra jarðlaga, hlutur fallvatna og vinda er miklu minni. Þetta má glöggt sjá á framburði jökulánna. Hlutur jökla í myndun lausra jarðlaga í dag er stór og var enn meiri á jökulskeiðum ísaldar þegar jöklar voru mun stærri og þykkari.

3.3.3 Nýmyndun

Laus jarðlög myndast í eldsumbrotum. Þegar bergkvika nær yfirborði greinist hún í loftkennd, laus og föst gosefni. Lausum gosefnum eða gjósku er skipt í þrjá meginflokka, gjall, vikur og gosösku. Gosefni eru ekki mjög ákjósanleg efni til mannvirkjagerða, þó eru þau talsvert notuð í allskonar fyllingar. Apalhraun henta ágætlega í burðarlög, aðallega í neðra burðarlag.

[10] Þorleifur Einarsson. 1991:94

3.3.4 Flutningur

Eftir að fyrsta áfanga myndun lausra jarðlaga er lokið hefst sá næsti, flutningur. Flutningur lausra efna verður aðallega vegna þyngdarhröðunar jarðar og skiptir þá ekki öllu máli hvort efnið flyst með fallvötnum, jöklum eða hrynur eða fýkur.

Flutningur efnis með fallvötnum ræðst af nokkrum frumþáttum í eðli rennandi vatns. Fyrir það fyrsta þarf efni að berast út í fallvötnin til þess að geta flust með þeim og gerist það oftast við hrun eða fok. Síðan ráða straumfræðilegir eiginleikar fallvatnsins hvort efnið flyst með eða ekki. Á Íslandi er fallvötnum skipt niður í þrjár gerðir, þ.e. lindár, dragár og jökulár og flytja þær allar með sér árframburð, þó mismikinn. Sveiflukennt rennsli eftir árstíðum í jökul- og dragám ræður því að þær afkasta mestu við svörfun berggrunnsins og flutning efnis. Af þessum tveimur árgerðum er hlutur jökulánna meiri, eins og sandarnir á sunnanverðu landinu vitna um. Lindárnar afkasta minnst en það er vegna tiltölulega lítils og mjög jafns rennslis.

Jöklar flytja einnig umtalsvert magn jarðefnis með sér. Ólíkt fallvötnunum flytja jöklar jafnt stór björg sem lítil sandkorn. Bergmylsna sem jöklar sverfa úr undirlagi sínu berst að hluta til með leysingarvatni til jökulánna en einnig með jökulísnum í átt að sporði jöklanna. Jarðefni fellur einnig á jöklana með ýmsum hætti. Í eldgosum fellur gjóska á jökla, vindur feykir fínkorna efni út á þá og í skriðuhlaupum hrynur á þá ýmiskonar jarðgrautur. Skriðjöklar eru sérstaklega afkastamiklir við flutning lausra jarðlaga.

Flutningur efnis með vindum er frekar lítill nema við sérstakar aðstæður. Efnisflutningurinn ræðst af vindhraða, tiltæku magni fínkorna efnis og rakastigi þess. Á gróðurvana landi framan við jökla og á gjósku- og uppblásturssvæðum flytja vindar nokkurt magn efnis. Vindborið set er að mestu silt og mjög fínn sandur og er að jafnaði ekki í hópi hagnýtra lausra jarðlaga.

Við hrun eða skriðuföll færast laus jarðlög og berg millilíðalaust úr stað. Flutningur efnis í skriðuhlaupum ræðst fyrst og fremst af hæð lands og halla þess. Hrun getur verið af ýmsum gerðum, allt frá því að vera einn og einn steinn sem fellur úr klettabeltum, yfir í það að vera berghlaup þar sem milljónir rúmmetra færast samtímis úr stað.

3.3.5 Upphleðsla

Þegar fyrsta og öðrum áfanga við myndun lausra jarðlaga er lokið hefst sá þriðji og jafnframt sá síðasti. Upphleðsla þýðir að efnið er ekki lengur í flutningi heldur safnast það saman og margvíslegar setlagamyndanir verða til. Öll hagnýt laus jarðlög eru numin úr einhverskonar setlagamyndunum, en þær eru flokkaðar eftir því hvernig efnið fluttist til og þess umhverfis sem upphleðslan átti sér stað í. Umhverfið ræður miklu um hvers konar setlagamyndanir verða til og þá eiginleika sem lausa jarðefnið hefur. Þegar verið er að fjalla um setlög og lýsa þeim er algengt að eftirfarandi tvö hugtök séu notuð:

Kornastærðardreifing: Segir til um hvaða stærðir eru á kornum jarðefnisins og hvernig innbyrðis dreifing eða hlutfall þeirra er í heildarefninu. Talað er um að jarðefni hafi góða kornastærðardreifingu ef kornin eru af öllum mögulegum stærðum og hlutfall hverrar stærðar svipað. Á hinn bóginn er talað um að kornastærðardreifingin sé léleg þegar korn efnisins eru í svipuðum stærðum og hlutfall þeirra mjög ójafnt. Sérstakt línurit er teiknað upp fyrir eitt og sérhvert jarðefni sem sýnir kornastærðardreifinguna skýrt og skilmerkilega. Um þetta er betur fjallað í kafla 3.4.2.

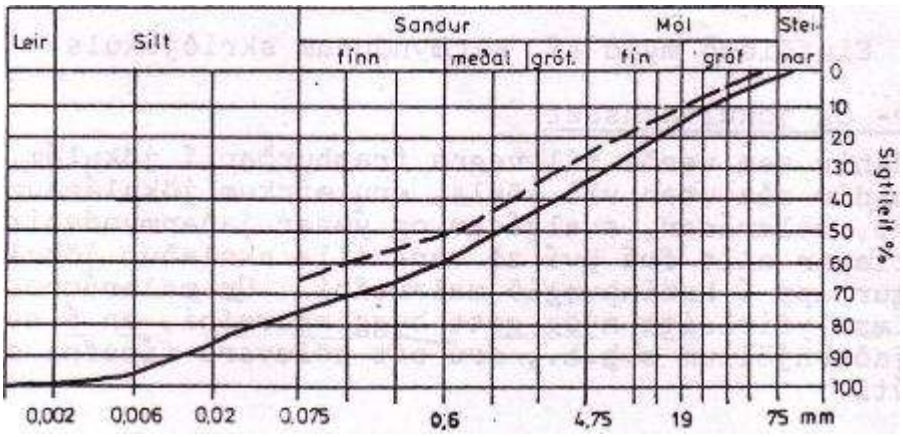
Aðgreining: Hugtak sem lýsir kornarstærðardreifingu jarðefna nánar. Talað er um í þessu samhengi lítið eða illa aðgreint efni annarsvegar og vel eða mikið aðgreint efni hinsvegar. Lítil aðgreining felur í sér að jarðefnið inniheldur margar mismunandi kornastærðir, þ.e. magn kornastærðarflokkanna er nokkuð jafnt. Mikil aðgreining, aftur á móti, felur það í sér að kornastærð jarðefnisins er frekar jöfn, þ.e. einhver ein ákveðin kornastærð er einkennandi fyrir efnið. Við fullkomna aðgreiningu er efnið sagt einkorna, þ.e.a.s. það er allt af einum kornarstærðarflokki.

Allir þeir þættir sem stuðla að flutningi jarðefnis og fjallað hefur verið um hér að framan, þ.e. fallvötn, jöklar, vindar o.fl. skila efninu að lokum af sér á einn eða annan hátt. Þegar það gerist hlaða þeir jarðefninu upp í margvísleg setlög. Hér er ekki farið í það hvernig hver þáttur skilar efninu nákvæmlega af sér. Þess í stað er fjallað aðeins um helstu einkenni hvers setlags.

3.3.6 Gerð lausra jarðlaga[11]

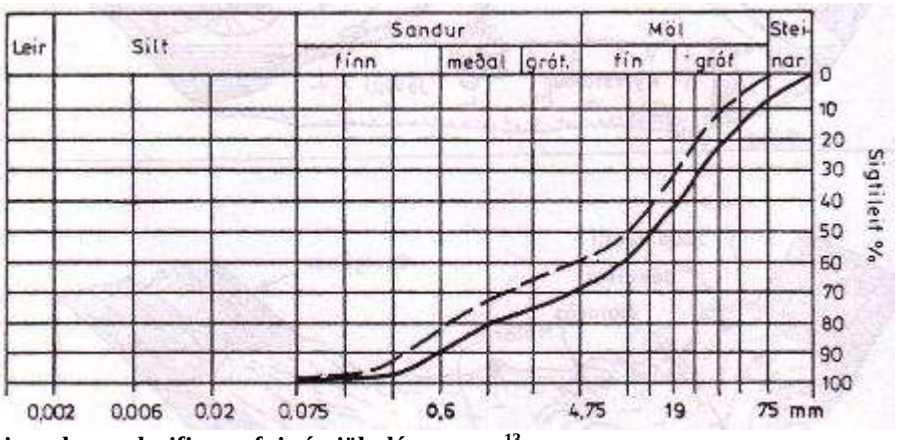
Jökulruðningur: Helsta einkenni er lítil lagskipting og lítil aðgreining. Jökulruðningur inniheldur því allar mögulegar stærðir korna, allt frá leir upp í stórgrýti og er oftast mjög fínefnaríkur. Jökulruðningi er skipt í botnruðning og leysingaruðning og er nokkur munur á kornastærðadreifingu þeirra. Sá fyrrnefndi er yfirleitt fínefnaríkari og samþjappaðri. Jökulruðning má finna víða á landinu. Efnismagn hans er hinsvegar breytilegt og fer m.a. eftir landslagi, t.a.m. er jökulruðningur ekki algengur á brattlendum svæðum. Jökulruðningur er mest notaður í vegfyllingar og stíflukjarna, en einnig í burðarlög og malarslitlög ef gæði eru næg.

[11] Hreggviður Fanndal. 1992



Mynd 2. Dæmi um algenga kornadreifingu efna úr jökulruðningi.[12]

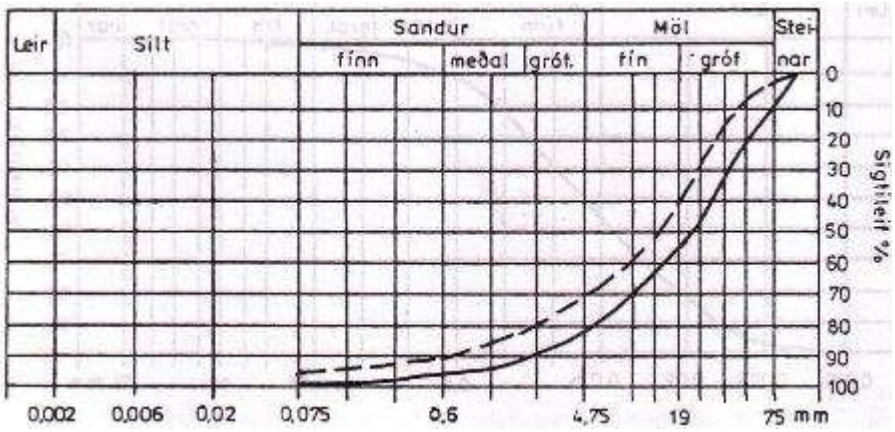
Jökulárset: Vegna mikils breytileika í upphleðslu er jökulárset afar mismunandi og er þess vegna skipt niður í nokkrar tegundir. Helstar þeirra eru malarásar, jaðarhjallar, árhjallar og jökuláraurar. Malarása er helst að finna á suðvestur- og norðausturhluta landsins og þrátt fyrir að heildarefnismagn þeirra sé fremur lítið getur hver einstakur malarás haft að geyma verulegt magn nýtilegs efnis. Jaðarhjalla er helst að finna í dölum á Vesturlandi, Vestfjörðum, Vestur og Mið-Norðurlandi og á Austfjörðum. Heildarefnismagn jaðarhjalla er fremur lítið en þó geta einstaka hjallar verið afar efnismiklir. Árhjallar eru algengastir í dölum landsins milli efstu fjörumarka og jökulgarða frá síðjökultíma og nútíma. Þeir eru algengari en malar- og jaðarhjallar og er því efnismagn þeirra meira. Útbreiðsla jökuláraura er með tvennu móti, þeir eru annarsvegar tengdir núverandi jöklum landsins, eins og t.d. Skeiðarársandur, Mýrdalssandur og Sólheimasandur. Hinsvegar eru fornir jökuláraurar á Rangárvöllum, í Holtum og Grímsnesi. Almennt má segja að jökulárset hafi mikla kornarstærðardreifingu og talsverða lagskiptingu. Efnin einkennast þó fyrst og fremst af kornarstærðum sands, malar og steina en síður af fínefnum. Hrein sandrík möl er algengust og er hún mikið notuð í neðri burðarlög vega. Ef efnið er gróft og gæði næg er hægt að vinna það í efri burðarlög og bundin slitlög.



Mynd 3. Dæmi um kornadreifingu efnis úr jökuláraurum.[13]

[12] Hreinn Haraldsson.1983
[13] Hreinn Haraldsson.1983

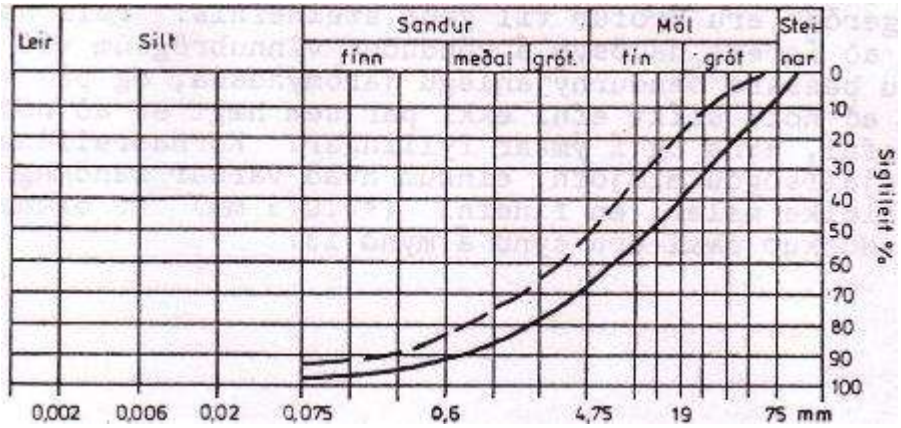
Lind- og dragárset: Oftast nokkuð hreint efni með mjög breytilega kornastærð, þ.e. sandur, möl, gróf möl og stórgrýtt möl. Helsti munurinn frá jökulárseti er sá að í seti lind- og dragár er afar mikil og áberandi lagskipting. Einnig er setið meira aðgreint, í því skiptast á sandlög og grófari malarlög. Kornin í seti lind- og dragáa eru almennt veikari en í jökulársetinu vegna minna niðurbrots við flutning efnisins. Áreyrar og aurkeilur eru algengustu tegundir þessarar setmyndunar. Áreyrar eru algengar meðfram öllum drag- og jökulám landsins. Efni þeirra er yfirleitt vel aðgreind möl og sandur með nokkuð af steinum og silti. Er það oftast nýtt í neðri burðarlög vega en einnig í efri burðarlög og slitlög ef efnið er vel gróft og gæði næg. Aurkeilur eru algegnar um allt land, sérstaklega í brattlendi. Efni aurkeilanna er ekki eins vel aðgreint og inniheldur oft mikið af lífrænum moldarlögum. Oftast notað í fyllingar en einnig algengt í malarslitlög. Efni með lágu fínefnainnihaldi geta verið hæf í neðri burðarlög.



Mynd 4. Dæmi um kornadreifingu efnis úr áreyrum dragár.[14]

Skriður: Skriðuhrun er algengasta setlagamyndun landsins og efnismagn þess því mikið. Fremur illa aðgreint efni með mikla kornastærðardreifingu, allt frá leir upp í stórgrýti. Eftir myndun er skriðum skipt í hraunskriður, skriðukeilur, berghlaup og aurskriður. Efni hraunskriða er frekar aðgreint og inniheldur frekar lítil korn. Þær finnast við klettabelti um allt land. Efni skriðukeila er aðgreint og lagskipt og inniheldur frekar fíngerð köntuð korn. Þær finnast einnig víða um landið. Berghlaup hefur mjög jafna kornarstærðardreifingu og er algengast að það eigi sér stað á blágrýtissvæðum landsins. Í aurskriðum ægir öllum gerðum lausra jarðlaga saman ásamt lífrænum jarðvegi og finnast þær víða um land í brattlendi. Skriður er nothæfar í ýmiskonar fyllingar og malarslitlög og ef gæði eru næg má nota þær í burðarlög.

[14] Hreinn Haraldsson.1983

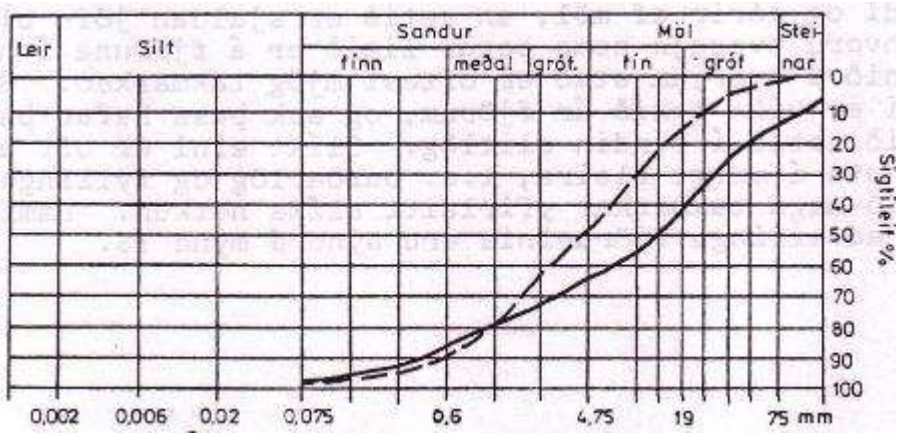


Mynd 5. Dæmi um kornadreifingu skriðuefnis.[15]

Árset í sjó og vatni: Set sem hleðst upp við árósa í kyrrstæðu vatni í sjó, stöðuvötnum og uppistöðulónum stíflna. Setinu er skipt í óseyrar, dalfyllur og leirur. Óseyrar eru oftast þrískiptar, neðst er lagskipt fínefni (silt og sandur), í miðjunni er skáliggjandi malar- og sandsetlög og efst er víxllaga malar- og sandset ásamt nokkru af steinum. Þessi gerð óseyra myndaðist við strendur landsins, einkum í lok síðasta jökulskeiðs og er mikið magn af aðgreindu malar- og sandefni er í þeim. Dalfylla er tvískipt, neðri hlutinn er að mestu úr sandi og fínefnum en efri hlutinn úr sendinni möl með sand- og steinalögum. Setlagamyndir af þessari gerð er nokkuð algengar og er í þeim talsvert magn malar- og sandefna. Leirur eru að megninu til fínkorna efni (sandur og silt), en efst í þeim er stundum þunnt malarlag. Heildarefnismagn nýtanlegra efna úr leirum er fremur lítið hérlendis. Árset úr kyrrstæðu vatni er einkum notað í fyllingar.

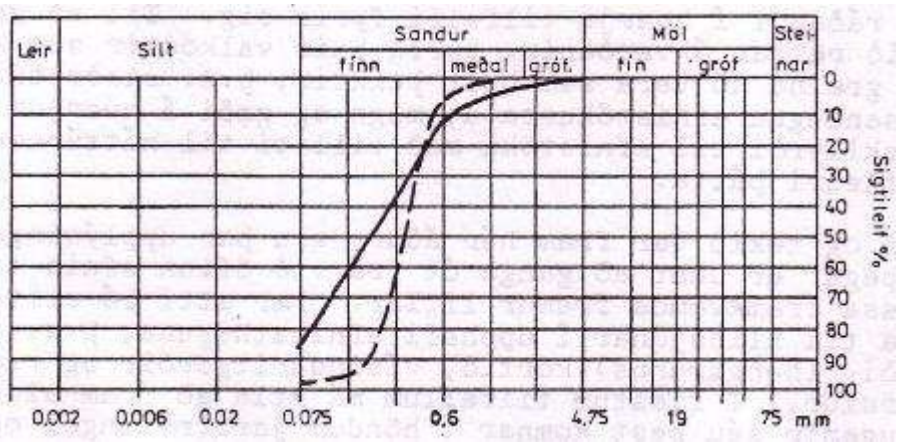
Strandset: Set sem hleðst upp við árósa í sjó, sem er á hreyfingu. Er skipt í fjörur og marbakka eða malarhjalla. Fjöruset er mjög vel aðgreint og er grófast efst í fjörukömbum en fínna nær sjávarmáli. Algengt er að efni úr fjörum sé notað í steinsteypu en einnig í burðarlög og bundin slitlög. Malarhjallar eru ekki ósvipaðir óseyrum að byggingarlagi. Þeir eru úr aðgreindu malar- og sandseti, en set þeirra er hlutfallslega stór hluti alls strandsets. Nothæft í fyllingar, burðarlög, bundin slitlög og steypu.

[15] Hreinn Haraldsson.1983



Mynd 6. Dæmi um kornadreifingu malarhjalla.[16]

Fokset: Megin einkenni er góð aðgreining og frekar lítil meðalkornastærð. Fokset er ýmist ólífrænt (silt og sandur), lífrænt (mold) eða blanda af hvoru tveggja. Það finnst víða um land, en í hlutfallslegu litlum mæli og er almennt lítið notað til mannvirkjagerðar.



Mynd 7. Dæmi um kornadreifingu foksands.[17]

3.3.7 Notkun lausra jarðlaga á Íslandi

Laus jarðlög sem notuð eru í mannvirki eru gjarnan kölluð byggingarefni en með byggingarefnum er átt við náttúruleg efni úr jarð- og berggrunni landsins. Byggingarefni eru mest notuð við framkvæmdir sem tengjast vegagerð, húsbyggingum og stíflugerð.

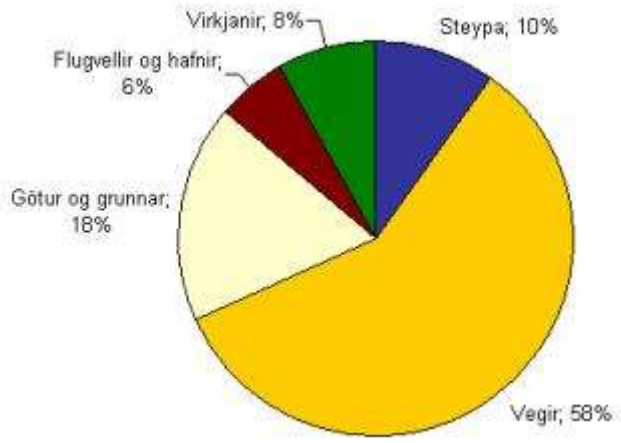
1) Vegagerð	a) Undirbygging
	b) Burðarlag

[16] Hreinn Haraldsson.1983
[17] Hreinn Haraldsson.1983

	c) Jöfnunarlag d) Malarslitlag e) Bundið slitlag
2) Húsbyggingar	a) Fylliefni steinsteypu b) Fylliefni múrs c) Fyllingar í grunnum
3) Stíflugerð	a) Þéttikjarni b) Sía c) Stoðfylling d) Rofvörn

Tafla 4. Helsta notkun byggingarefna.[18]

Heildarnotkun lausra jarðefna á Íslandi er mjög mikil eða um 30 til 40 tonn fyrir hvern íbúa á ári. Samkvæmt Vegagerðinni er um 60% steinefna á Íslandi notuð til vegagerðar (mynd 8) sem er svipað hlutfall og á hinum Norðurlöndunum.



Mynd 8. Steinefnanotkun á Íslandi 1998.[19]

Um 90% allra náma á landinu eru setnámur og einungis um 10% eru bergnámur. Á Íslandi eru skráðar liðlega 3000 námur og á mynd 9 sést hlutfallsleg skipting náma á landinu eftir meginflokkum jarðmyndana. Þar má sjá að algengasta jarðmyndunin er malarhjallar eða 25% setnáma. Malarhjallar er samheiti notað yfir þær jarðmyndanir sem hlaðist hafa upp við hærri sjávarstöðu en nú er. Töluverð efnistaka er einnig í áreyrum vatnsfalla.

[18] Hreggviður Nordahl. 1992
[19] www.vegagerdin.is, rannsóknir og þróun - jarðfræði.

Mynd 9. Hlutfallsleg skipting náma á Íslandi eftir meginflokkum jarðmyndanna.[20]

Notkun grjóts til mannvirkja hér á landi og þá sérstaklega í vegagerð fer smám saman vaxandi, m.a. vegna þess að auðveldara er að tryggja jöfn gæði efnis í góðri grjótnámu en í setnámu. Berg úr grjótnámum er einkum notað í rofvarnir, sem fyllingarefni og í auknum mæli í burðarlög og slitlög.

Eins og áður hefur komið fram er lang algengasta bergtegundin hér á landi basalt (grágrýti/blágrýti) og það er fremur óalgengt að berg af öðrum tegundum sé unnið til vegagerðar. Þó er nokkuð um að efni sé unnið úr móbergi og bólstrabergi. Móberg er nýtt í styrktarlög og vegfyllingar en bólstraberg er gott styrktarlagsefni. Einnig er eitthvað um að grjót sé unnið úr hraunum. Mest hefur verið tekið úr gjallhluta apalhrauna, þ.e. efstu tvo til þrjá metra hraunsins. Þetta efni hefur verið nýtt bæði í styrktarlag og sem fyllingarefni. Í vaxandi mæli hefur á undanförnum árum einnig verið unnið dýpra í hraunið enda fæst þá ferskt, þ.e. mjög lítið ummyndað grjót, til vinnslu í burðarlag, klæðingu og rofvarnir.

Mismunandi kröfur eru gerðar til gæða efnis með hliðsjón af því við hvers konar mannvirkjagerð byggingarefnið á að notast. Eftirfarandi tafla sýnir hvar setlagamyndanir eru ákjósanlegastar:

Setlagamyndun	**Fyllingar**	**Burðarlög**	**Bundin slitlög**	**Steinsteypa**
Jökulruðningur	3	3	3	3
Malarásar	1	1	1	1

[20] www.vegagerdin.is, rannsóknir og þróun - jarðfræði.

Jaðarhjallar	1	2	2	1
Árhjallar	1	2	2	1
Jökuláraurar	1	2	1	2
Árset	2	2	2	2
Aurkeilur	2	2	2	2
Óseyrar	1	2	1	1
Dalfyllur	1	2	1	1
Leirur	3	3	3	3
Fjörur	2	2	2	2
Marbakkar	1	1	1	1
Hrunskriður	2	3	3	2
Skriðukeilur	2	3	3	2
Berghlaup	3	3	3	3
Fokset	3	3	3	3
1 = Ágætlega nothæft		2 = Nothæft	3 = Varhugavert	

Tafla 5. Hæfni helstu setlagamyndana í framkvæmdir.[21]

3.4 Jarðtæknilegir eiginleikar jarðefna

3.4.1 Rannsóknir á byggingarefnum

Mismunandi kröfur eru gerðar til byggingarefna í sérhverri framkvæmd og það er mjög breytilegt hvaða eiginleika, aðra en ákveðna kornarstærðardreifingu, efnin verða að hafa eða vera án. Þessir eiginleikar eru ýmist metnir eða mældir með tæknilegum eða jarðfræðilegum aðferðum og þarf yfirleitt að gera nokkrar tilraunir á hverju efni fyrir sig. T.a.m. ákvarðast hæfni efnis í steinsteypu ekki eingöngu af kornarstærðardreifingu heldur einnig af fjölmörgum öðrum eiginleikum efnisins, t.d. magni lífrænna óhreininda (húmus) og magni örfínna efnisagna (slam). Lokaniðurstaða slíks mats segir þá til um gæði byggingarefnisins með teknu tilliti til fyrirhugaðrar notkunar þess.

[21] Hreggviður Nordahl. 1992

Af framansögðu mætti ætla að gæði eða notkunarhæfni lausra jarðlaga til mannvirkjagerðar verði ekki ákveðin nema að undangengum fjölda tímafrekra og dýrra rannsókna. Slíkt er að sjálfsögðu ekki hagkvæmt og ekki heldur æskilegt áður en gengið hefur verið úr skugga um að efni uppfylli lágmarkskröfur hverju sinni. Til þess að tryggja hagkvæmni við athuganir á byggingarefnum er rannsóknarferlinu gjarnan skipt í þrjá áfanga[22], sem hver um sig hefur sínar áherslur og viðmið og eru þær eftirfarandi:

1) Svæðisbundin úttekt byggingarefna. Aðaláhersla er lögð á jarðfræðilega úttekt einhvers ákveðins svæðis. Útbreiðsla og gerð mismunandi lausra jarðlaga er ákvörðuð, lega líklegra byggingarefna kortlögð og magn þeirra áætlað. Á grundvelli fenginna upplýsinga er ákveðið hvar sýnishorn eru tekin, valdir eru staðir þar sem talið er að þau gefi bestar og nákvæmastar upplýsingar um efnisgerðina.

2) Frumrannsókn byggingarefna á rannsóknarstofu. Sýnishorn sem tekin eru við svæðisbundna úttekt eru rannsökuð á tilraunarstofu. Þessar rannsóknir eru hlutfallslega fljótlegar og ódýrar og er tilgangur þeirra að kanna nokkra þætti í efnisgerð og eiginleikum efnisins sem skera úr um nýtanleika þeirra og hvort frekari rannsókna er þörf. Í þessum tilgangi eru alltaf gerðar prófanir á fyrsta og öðrum þætti og oft á þriðja og fjórða þætti í töflu 6.

3) Ítarleg rannsókn byggingarefna á rannsóknarstofu; Ef niðurstöður frumrannsóknar á byggingarefnum á rannsóknarstofu sýna fram á að efnið er talið hæft til gerðar ákveðins mannvirkis er æskilegt að frekari rannsóknir verði gerðar. Í þeim áfanga eru því gerðar tæmandi rannsóknir á mörgum þáttanna fimm til tólf í töflu 6.

1) Kornastærðardreifing
2) Berggerðir korna efnisins
3) Magn lífrænna óhreininda (Húmus)
4) Magn örfínna korna (Slam)
5) Þjöppunareiginleikar
6) Vatnsleiðni
7) Frostnæmni
8) Styrkur og slitþol korna
9) Veðrunarþol korna
10) Burðarþol efnisins
11) Viðloðun milli korna og olíu
12) Alkalívirkni efnis

Tafla 6. Helstu eiginleikar byggingarefna.[23]

[22] Hreggviður Nordahl. 1992
[23] Hreggviður Nordahl. 1992

Við gerð sumra mannvirkja er mjög mikilvægt að allar upplýsingar um gerð og gæði byggingarefna liggi fyrir, t.d. vegna mikillar stærðar mannvirkis eða erfiðra jarðtæknilegra aðstæðna þar sem staðsetning þess er fyrirhuguð. Í slíkum tilfellum verður byggingarefnið einfaldlega að fara í gegnum allt rannsóknarferlið, þótt það sé tímafrekt og kostnaðarsamt. Hinsvegar er í flestum tilfellum ekki farið svo ítarlega ofan í saumana. Tæknimenn eru stöðugt á höttunum eftir einföldum prófunum sem gefa nægilegar upplýsingar um byggingarefnið, án þess að vera of ítarlegar, tímafrekar og dýrar. Hafa þeir því þróað með sér próf sem gefa óbeinar upplýsingar um eiginleika jarðefnisins og það látið nægja til þess að draga ályktanir um eiginleika þess. Talað er um þessi próf sem almenn próf, enda eru þau notuð í flestum almennum framkvæmdum. Venjulega eru eftirtaldir þættir efnisins metnir við almennu prófin.

1. Kornarstærðardreifing.
2. Flæðimark.
3. Þjálnimark.
4. Þjálni.
5. Rúmþyngd.
6. Kornarúmþyngd.
7. Rakagildi.
8. Samband rúmþyngdar og raka.
9. Glæðitap.

Í þessum kafla er megináhersla lögð á að fjalla nánar um þessar almennu prófanir og um leið skoða hvaða eiginleika jarðefnanna þær eru að meta. Í kjölfarið er fjallað um verkfræðilega eiginleika byggingarefna og að lokum kynnt U.S.C.S. jarðvegsflokkunarkerfið.

3.4.2 Kornastærðardreifing

3.4.2.1 Almennt

Eins og fram hefur komið hér að framan eru kornastærðir hinna ýmsu setlaga afar mismunandi. Jarðvegskorn eða agnir hafa nær ótakmarkað stærðarsvið og má yfirleitt finna mikinn breytileika á stærðum þeirra í sérhverju jarðefnissýni. Mjög mikilvægur þáttur við nýtingu og flokkun lausra jarðlaga er að greina kornastærðir þeirra og kornastærðardreifinguna. Tvö jarðvegsflokkunarkerfi eru einkum notuð hérlendis, annarsvegar bandaríska U.S.C.S flokkunarkerfið, sem notað hefur verið hér um nokkurra ára skeið og hinsvegar evrópskt flokkunarkerfi, sem kom í kjölfar þess að menn fóru að nota Eurocode staðlana hérlendis og vinna stór verk í samstarfi við erlenda aðila.[24] Á flestum Norðurlöndum, Bretlandi og Þýskalandi er evrópska kerfið nær eingöngu notað og sýnir mynd 10 stærðarmörk þess. Fjallað er nánar um U.S.C.S. kerfið í kafla 3.6

Leir	Silt	Sandur	Möl	Steinar	Grjót

[24] Ingunn Sæmundsdóttir (munnleg heimild, 26.nóvember 2004)

Mynd 10. Stærðarmörk jarðefnis samkvæmt evrópska flokkunarkerfinu.[25]

Þegar huga skal að kornastærðardreifingu jarðefnis er það fyrst votsigtað með frekar fínu sigti, sem kallast sigti númer 200. Ef minna er 50% af jarðefninu smýgur í gegnum sigtið er talað um að efnið sé núningsefni. Það þýðir að efnið inniheldur hlutfallslega það lítið af fínefnum (korn < 0,075 mm skv. U.S.C.S.), að það hefur lítil áhrif á eiginleika þess. Allir eiginleikar núningsefna eru háðir kornastærð og kornalögun og hegðun efnis ákvarðast af núningi á milli korna. Ef aftur á móti meira en 50% af jarðefninu smýgur í gegnum sigti nr. 200 er efnið kallað samloðunarefni. Það inniheldur því hlutfallslega mikið af fínefnum sem eru það lítil að eiginleikar ákvarðast af yfirborðskröftum milli korna og vatns og því eru allir eiginleikar mjög háðir vatnsinnihaldi efnisins.

Út frá kornastærðardreifingu byggingarefnis má með góðu móti leggja mat á nokkra aðra þætti jarðefna, eins og t.d. þjöppunareiginleika, sigeiginleika, frostnæmni og útskolunarhættu. Helstu takmörkin við kornarstærðargreiningu eru of stór korn, þ.e. sigti koma ekki með stærri möskvastærð en 125mm. Einnig þarf að fylgjast vel með hlufalli allra fínefna í byggingarefnum og þá sérstaklega passa að hvergi séu samlímd fínefni, sem komi fram sem steinar við sigtun en geti síðar losnað í sundur.

3.4.2.2 Kornadreifing núningsefna

Núningsefni eru flokkuð með sigtun og þannig fengin kornarstærðardreifing þeirra ásamt grófleika. Samloðunarefni eru flokkuð með svokallaðri flotmælingu (e.hydrometer). Niðurstöður þessarra greininga eru ýmist sýndar í línuritum eða lýst með orðum.

Í grófum dráttum er kornastærð núningsefna ákvörðuð þannig að þurrt jarðvegssýni er vigtað og síðan sigtað í gegnum röð af sigtum með mismunandi og ákveðnum möskvastærðum. Sá hluti af sýninu sem verður eftir í hverju sigti er kallaður sigtileif. Hún er vegin í hverju sigti fyrir sig og út frá því er samanlögð massaprósenta, svokölluð sáldurþyngdarprósenta sem fer í gegnum hvert sigti, ákvörðuð. Niðurstöður eru síðan settar upp í línurit þar sem kornastærðir eru sýndar á láréttum lógaritmískum kvarða og sigtileifin eða sáldurþyngarprósentan á lóðréttum venjulegum talnakvarða. Af línuritinu má sjá svokallaðan sáldurferil jarðefnisins og af honum má lesa ýmsar upplýsingar um efnið. Algengt er að tveir stuðlar séu ákvarðaðir út frá ferlinum, þ.e. grófleikatala eða einsleitarstuðull efnisins (C_u) og kornadreifingarstuðull (C_c). Þessir stuðlar eru ákvarðaðir út frá jöfnum (3-1) og (3-2).

[25] Whitlow, Roy. 1983

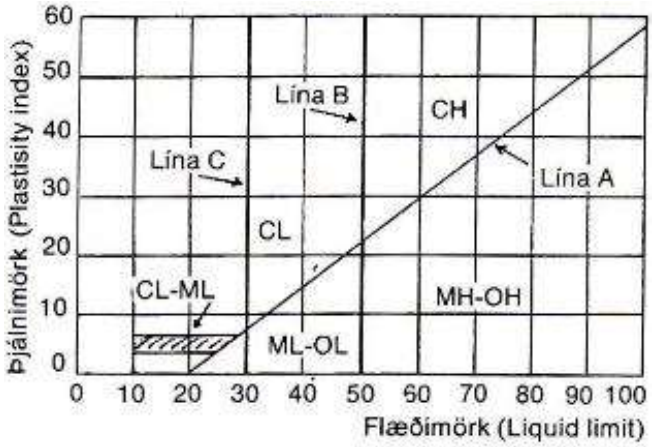
$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (3\text{-}1)$$

$$C_C = \frac{D_{30}^2}{D_{60} D_{10}} \quad (3\text{-}2)$$

D_{10}, D_{30} og D_{60} eru kornastærðir þar sem sáldurþyngarprósenta svarar til 10, 30 og 60, þ.e.a.s. D_{10} táknar þau kornastærðarmörk sem 10% af efninu er minna en, D_{30} þau kornarstærðarmörk sem 30% af efninu er minna en o.s.frv. Samkvæmt U.S.C.S. flokkunarkerfinu er talað um einskorna efni ef einsleitarstuðullinn (C_u) er minni en 5, en fjölkorna ef hann er stærri en 5. Ef kornadreifingarstuðullinn (C_c) er á bilinu 1 til 4 er talað um að efnið hafi góða kornadreifingu, annars ekki.

3.4.2.3 Kornadreifing samloðunarefna

Kornastærðardreifingu samloðunarefna er ekki hægt að ákvarða með sigtun vegna smæðar korna. Hægt er að meta dreifinguna með flotmælingu og fá þannig góða mynd af eiginleikum efnisins. Flotmæling fer þannig fram[26] að vatni er blandað við efnið þar til úr verður fljótandi samfelldur grautur. Eðlisþyngd þessa jarðefnisgrauts er síðan mæld með mismunandi millibili með flotmæli (fljótandi eðlisþyngdarmælir). Af því að stærri efniskorn setjast fyrr til botns en þau sem eru minni er hægt að ákvarða stærðardreifinguna. Niðurstöður þessa prófs eru settar upp á kornadreifingarlínurit hliðstætt við núningsefnin.
Þó hægt sé að ákvarða kornastærðardreifinguna með áðurnefndum hætti eru eiginleikar samloðunarefna oftast frekar metnir út frá þjálni- og samþjöppunareiginleikum. Þessir eiginleikar eru metnir á þann hátt að þjálnimörk (e.plasticity index) og flæðimörk (e.liquid limit) efnisins eru færð inn á svokallað þjálnikort (e.plasticity chart). Á þjálnikortinu gefa staðsetningar punktanna upplýsingar, sem nota má til að meta efnið betur og áætla ýmsa verkfræðilega eiginleika þess. Fjallað er betur um þjálni- og flæðimörk í næstu köflum.

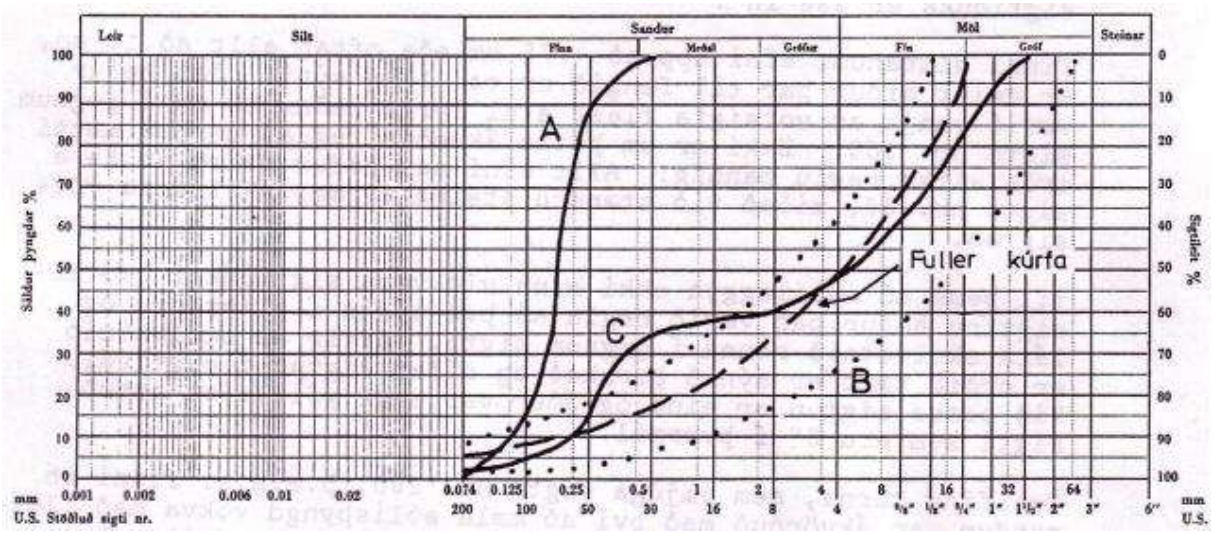


Mynd 11. Þjálnikort. [27]

[26] Forssblad, Lars. 1981
[27] Rannsóknarstofnun Byggingariðnaðarins. 1976

3.4.2.4 Einkennandi kornadreifingarlínur

Kornadreifingalínum byggingarefna er gjarnan skipt niður í þrjú einkennandi form, sem sýnd eru á eftirfarandi mynd:



Mynd 12. Þrjú einkennandi form á kornadreifingarlínum.[28]

Lína A: Einkennandi fyrir frekar einskorna efni, þ.e.a.s. ein kornastærð er ráðandi í efninu. Kornadreifingarlínan er mjög brött og grófleikatalan (C_u) er með lægsta mögulega gildi sem er 1,0. Efnið stenst ekki kröfur kornadreifingarstuðulsins (C_c).

Lína B: Einkennandi fyrir efni með góða kornastærðardreifingu, þ.e.a.s. jöfn og mikil dreifing er á kornastærðum. Línan liggur upp á við með mjúkum boga og grófleikatalan (C_u) er stærri en 5,0. Efnið stenst kröfur kornadreifingarstuðulsins (C_c).

Lína C: Einkennandi fyrir efni með slæma kornadreifingu. Þótt dreifingin nái yfir stórt svið sýnir lóðrétti leggurinn í miðri línunni að einhverjar ákveðnar kornastærðir vantar í efnið. Í örfáum tilfellum getur slíkt efni haft háa grófleikatölu (C_u) og oftast stenst það kröfur kornadreifingarstuðulsins (C_c).

Lína D: Svokölluð Fuller lína sem er reiknuð samkvæmt Fuller jöfnu (3-3) og á að gefa fræðilega þéttustu kornasamsetningu malar. Er þá miðað við að stærstu steinarnir snerti allir hvern annan og að stærðardreifing korna sé hæfileg þannig að holrýmin milli stóru steinanna fyllist. Þannig fylla stöðugt minni korn upp í holrýmin, án þess að stóru steinarnir fari í sundur.

[28] Haraldur Sigursteinsson. 1983

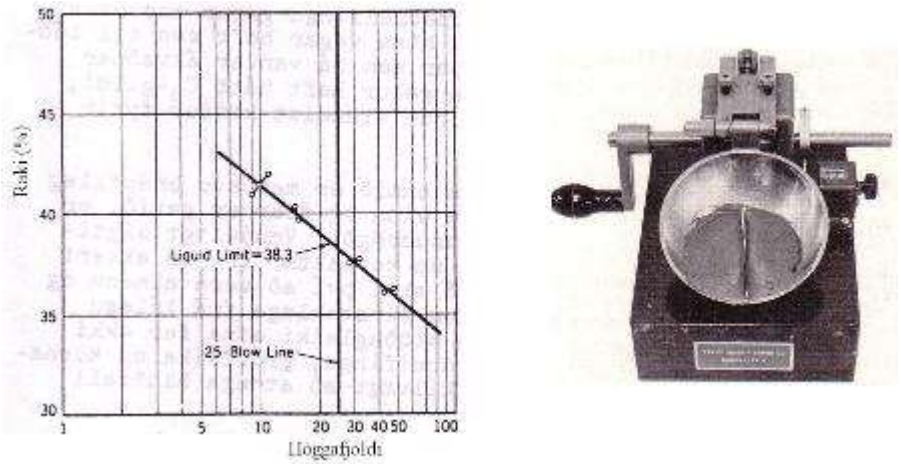
$$P = \sqrt{\frac{D}{D_{max}}} \cdot 100 \qquad (3\text{-}3)$$

3.4.3 Flæðimark

Flæðimark, w_L (e.liquid limit), er hæsta rakagildi sem hrært jarðefnissýni getur haft án þess að missa þjálni sína, þ.e.a.s. þetta eru þau mörk þar sem rakagildi er orðið það mikið að efnið fer úr sínu plastíska ástandi yfir í fljótandi.

Flæðimörk jarðefna eru ákvörðuð með sérstöku tæki sem sænskur vísindamaður að nafni A. Atterberg fann upp. Þar er efninu smurt í skál og í það er gerð þríhyrningslaga rás með hnífi. Hreyfingu eða skjálfta er komið á skálina með því að henni er lyft og hún látin falla til skiptis. Höggin eru talin og þegar sýnið hefur runnið saman á 12,7 mm er skjálftinn tekinn af. Ef það þarf 25 högg til þess að ná þessu bili er talað um að rakainnihaldið sé við flæðimark efnisins. Ef það þarf færri en 25 högg er talið að efnið sé fljótandi og ef það þarf fleiri en 25 högg er talað um að efnið sé plastískt.

Þegar flæðimörkum er náð er sýnið þurrkað við 105°C og rakastig reiknað út. Prófið er gjarnan gert nokkrum sinnum á hverju jarðefni við mismunadi rakastig þess, þannig að nokkur gildi fáist. Niðurstöður eru settar upp í línurit þar sem rakastigið í prósentum er á lóðrétta ásnum en lógaritmi af höggafjöldanum á þeim lárétta. Oftast mynda innsettir punktar beina línu og því má lesa þar af það rakastig sem samsvarar 25 höggum. Eftirfarandi myndir útskýra þetta betur:



Mynd 13. Tæki Attenbergs og línurit til ákvörðunar flæðimarks jarðefna.[29]

3.4.4 Þjálnimark

Þjálnimark, w_P (e.plastic limit), er lægsta rakagildi sem hrært jarðefnissýnishorn getur haft án þess að missa þjálni sína, þ.e.a.s. þetta eru þau mörk þar sem rakagildi er orðið það lítið að efnið fer úr sínu plastíska ástandi yfir í alltof þurrt ástand.

[29] Forssblad, Lars. 1981

Þjálnimörk eru jafnan ákvörðuð með sérstakri aðferð þar sem rakt sýni er tekið og hnoðað vel. Því næst er því rúllað upp í sívalning, u.þ.b. 10 sm langan og 3 mm í þvermál. Þetta er gert nokkrum sinnum við jarðefnið við mismunandi rakastig og ef sívalningurinn byrjar að molna rétt um það bil sem hann er 3 mm í þvermál er talað um að rakastigið sé við þjálnimörk. Tilraunin er endurtekin nokkrum sinnum til þess að fá marktækari niðurstöður.

3.4.5 Þjálni

Þjálni, I_P (e.plasticity index), efnis er mismunur á flæðimarki og þjálnimarki efnis, þ.e. bilið þar sem efnið er plastískt og vel þjált. Flæðimark, þjálnimark og þjálni er einungis ákvarðað fyrir fínefnaríkt samloðunarefni og er notað til þess að meta ýmsa verkfræðilega eiginleika þess. Þjálni núningsefna er ekki hægt að ákvarða. Eftirfarandi jafna sýnir samband flæðimarks, þjálnimarks og þjálni:

$$I_P = w_L - w_P \qquad (3\text{-}24)$$

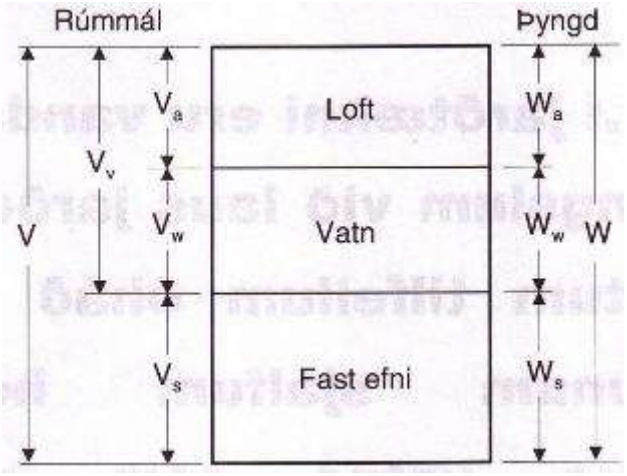
3.4.6 Rúmþyngd

Rúmþyngd segir til um hversu mikið ein rúmmálseining af einhverju tilteknu efni vegur. Rúmþyngd (e.unit weight) jarðefnis er einkum háð holrýmd þess og vatnsinnihaldi, en holrýmd er mjög háð þjöppun efnisins (kafli 4). Í grófum dráttum er rúmþyngdarákvörðun gerð með því að skera til sýni á ákveðinn máta og mæla síðan þyngd þess og rúmmál. Sambandinu er lýst með eftirfarandi jöfnu:

$$\gamma = \frac{W}{V} \qquad (3\text{-}4)$$

γ = rúmþyngd efnis.
W = þyngd efnis.
V = rúmmál efnis.

Jarðvegur er þriggja fasa efni sem samanstendur af föstum jarðvegsögnum, vatni og lofti. Þyngd og rúmmál efnis í mismunandi efnisástandi í jarðvegi má gjarnan túlka með skýringarmynd 14. Heildarrúmmál eða þyngd er táknað með allri myndinni; fasta efnið með lægsta hlutanum, vatn með miðjuhlutanum og loft með efsta hlutanum. Hverri stærð er síðan gefið viðeigandi tákn.



Mynd 14. Samband rúmmáls og þyngdar.[30]

3.4.7 Kornarúmþyngd

Kornarúmþyngd eða eðlislæg þyngd jarðvegsfasta (e.specific gravity) er skilgreind samkvæmt eftirfarandi jöfnu:

$$\gamma_S = \frac{W_S}{V_S} \qquad (3\text{-}5)$$

γ_s = kornarúmþyngd.
W_s = þyngd fasts efnis.
V_s = rúmmál fasts efnis.

Önnur skilgreining talar um að kornarúmþyngd sé hlutfall á milli ákveðins rúmmáls af efni mælt við ákveðið hitastig og þyngdar eimaðs vatns af sama rúmmáli við sama hitastig. Líkingin lítur þá svona út:

$$G_S = \frac{W_S}{V_S \gamma_W} \qquad (3\text{-}6)$$

G_s = kornarúmþyngd.
W_s = þyngd fasts efnis.
V_s = rúmmál fasts efnis.
γ_w = rúmmál vatns.

[30] Oddur Sigurðsson. 2002

Ekki er mikill breytileiki á kornarúmþyngd jarðefna eins og þau koma fyrir úti í mörkinni. Á Íslandi er algengt er að kornarúmþyngd sé á bilinu 28-30 kN/m^3, sem er hærra en víða annarsstaðar.

3.4.8 Rakagildi

Hegðun jarðefnis er gjarnan tengd vatnsmagni sem jarðvegsmassinn inniheldur og því þéttara sem efnið er þeim mun meiri eru áhrif rakans. Mikilvægt er að vita eitthvað um þéttleika jarðefnis til þess að hægt sé að sjá fyrir hver áhrif vatnsmagns verða og til þess að áætla hvernig efnið muni standa sig sem byggingarefni.

Í núningsefnum sem innihalda ekki mikið fínefni eru áhrif raka að jafnaði ekki mikil, nema vatnsmagnið sé þeim mun meira. Hinsvegar geta áhrifin verið umtalsverð í samloðunarefnum sem innihalda mikið fínefni, vegna þess að fínu kornin eru oftast umkringd vatni. Því er best að ákvarða ástand jarðefnis, þ.e. vatnsmagn og þéttleika, á meðan það er enn í sem náttúrulegasta ástandi eða á upprunalegum stað. Slík athugun gefur hagnýtar upplýsingar um hvernig efnið bregst við ýmsum breytingum, t.d. álags- eða rakabreytingum.
Vatnsmagn jarðefnis er ákvarðað í hlutfalli við þyngd efnis eftir þurrkun við 110°C. Eftirfarandi tafla sýnir náttúruleg rakagildi íslenskra jarðefna:

Jarðefni	**Rakagildi (w)**
Gróf möl	< 5%
Sandur	< 10%
Siltríkur sandur	10 -20%
Jökulleir, jökulruðningur	10 - 30%
Fokmold, ólífræn mold	20 - 40%
Leir, lífræn mold, mýri	> 50%

Tafla 7. Náttúrulegt rakagildi íslenskra jarðefna.

3.4.9 Samband rúmþyngdar og raka

3.4.9.1 Almennt

Raki eða vatnsmagn í byggingarefnum skiptir mjög miklu máli þegar verið er að meta gæði þeirra og notkunarmöguleika. „...í jarðtækni eru vandamál í tengslum við laus jarðefni í flestum tilfellum óháð jarðefnunum sjálfum heldur vegna vatns sem er í holrýmum þeirra...“[31]

Þegar samband rúmþyngdar og raka er skoðað er annarsvegar verið að meta ýmis rúmmáls- og rakasambönd, þar sem einstök korn eru tekin fyrir og ýmis hugtök á þeim skoðuð og hinsvegar verið að meta hagstæðasta vatnsmagn í holrýmum efnisins sem gefur mestu rúmþyngd. Það síðarnefnda er ákvarðað með svokölluðu „Proctor“ prófi, en umfjöllun um það er að finna í kafla 5.2.1.

[31] Terzaghi, Karl og Peck, Ralph B. 1967

Hinsvegar verða rúmmáls- og rakasamböndin tekin betur fyrir hér á eftir og útskýrð til hlítar. Gott er að hafa skýringarmynd númer 14 til hliðsjónar.

3.4.9.2 Ýmis sambönd

Rúmmálssambönd má skilgreina eins og sýnt er hér að neðan og eru þau notuð við hina ýmsu útreikninga þegar verið er að skoða eitthvað ákveðið jarðefni og meta það sem byggingarefni.

Holrýmishlutfall eða holrýmistala (e) er hlutfall á milli rúmmáls holrýmis og rúmmáls fasts jarðefnis í gegnum jarðvegsmassa og er hægt að rita:

$$e = \frac{V_v}{V_s} \tag{3-7}$$

V_v = rúmmál holrýmis.
V_s = rúmmál fasts efnis.

Holrýmd eða gljúpleiki (n) er hlutfall á milli rúmmáls holrýmis og rúmmáls jarðefnis sýnis og er venjulega gefið upp sem prósentuhlutfall.

$$n = \frac{V_v}{V} \tag{3-8}$$

V_v = rúmmál holrýmis.
V = heildarrúmmál jarðefnissýnis.

Einnig má sjá að:

$$n = \frac{V_v}{V} = \frac{V_v}{V_s + V_v} = \frac{\frac{V_v}{V_s}}{\frac{V_s}{V_s} + \frac{V_v}{V_s}} = \frac{e}{1 + e} \tag{3-9}$$

Mettunargráða (S) er hlutfall á milli rúmmáls vatns í holrými efnisins og rúmmáls holrýmis og er venjulega gefið upp sem prósentuhlutfall. Jarðvegur sem er fullmettaður af vatni, þ.e. öll holrými eru fyllt vatni, er sagður hafa 100% mettunargráðu, S = 100%.

$$S = \frac{V_w}{V_v} \tag{3-10}$$

V_w = rúmmál vatns.
V_v = rúmmál holrýmis.

Rakainnihald, rök rúmþyngd, þurr rúmþyngd og mettuð rúmþyngd eru sambönd þyngdar í jarðefninu. Þessi þyngdarsambönd má skilgreina eins og sýnt er hér að neðan.

Rakainnihald (w) er hlutfall á milli þyngar fasts efnis í sýni og þyngdar vatns í sýni og er venjulega gefið upp sem prósentuhlutfall.

$$w = \frac{W_w}{W_s} \qquad (3\text{-}11)$$

W_w = þyngd vatns í sýni.
W_s = þyngd fasts efnis í sýni.

Rök rúmþyngd (γ) er hin hefðbundna rúmþyngd sem áður hefur verið tilgreind.

$$\gamma = \frac{W}{V} \qquad (3\text{-}12)$$

W = heildarþyngd jarðefnissýnis.
V = heildarrúmmál jarðefnissýnis.

Þurr rúmþyngd (γ_d). Þyngd lofts (W_a) í jarðvegsmassa er óveruleg og má því skilgreina þurra rúmþyngd sem:

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \qquad (3\text{-}13)$$

W_s = þyngd fasts efnis.
V = rúmmál heildarjarðefnissýnis.

Þegar jarðvegsmassi er algerlega mettaður, þ.e.a.s. öll holrými efnisins eru full af vatni, þá er rök rúmþyngd jöfn mettaðri rúmþyngd (γ_{sat}), þ.e. þegar $V_v = V_w$ þá er $\gamma = \gamma_{sat}$.

Með því að hugsa sér að jarðvegssýni hafi rúmmál fasts efnis sem einn ($V_s = 1$), er hægt að setja fram fleiri og hagnýtari sambönd. Ef $V_s = 1$ þá er $V_v = e$ samkvæmt jöfnu (3-7) og þá er þyngd jarðvegsfastans: $W_s = G_s\gamma_w$, þar sem G_s er kornarúmþyngd og γ_w eðlisþyngd vatns.

Samkvæmt jöfnu (3-11) fæst að $W_w = wW_s$. Því má segja að $W_w = wW_s = wG_s\gamma_w$. Með því að nota síðan sambandið sem gefið er í jöfnu (3-12) fæst:

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_S + W_W}{V_S + V_V} = \frac{G_S \cdot \gamma_W \cdot (1+w)}{(1+e)} \quad (3\text{-}14)$$

Á svipaðan hátt er þurr rúmþyngd:

$$\gamma_d = \frac{W_S}{V} = \frac{W_S}{V_S + V_V} = \frac{G_S \cdot \gamma_W}{(1+e)} \quad (3\text{-}15)$$

Frá jöfnum (3-14) 0g (3-15) má síðan sjá að:

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{(1+w)} \quad (3\text{-}16)$$

Ef jarðvegssýni er fullmettað, $V_s = 1$ þá er $V_v = e$ og einnig:

$$V_V = \frac{W_W}{\gamma_W} = \frac{w \cdot W_S}{\gamma_W} = \frac{w \cdot G_S \cdot \gamma_W}{\gamma_W} = w \cdot G_S \quad (3\text{-}17)$$

Af því leiðir að eingöngu fyrir fullmettaðan jarðveg gildir að:

$$e = w \cdot G_S \quad (3\text{-}18)$$

Mettaða rúmþyngd jarðvegssýnis er nú hægt að finna út frá:

$$\gamma_{sat} = \frac{W_S + W_W}{W_S + V_V} = \frac{G_S \cdot \gamma_W + e \cdot \gamma_W}{1 + e} \quad (3\text{-}19)$$

Sambærileg sambönd og sýnd eru í jöfnunum hér að framan er einnig hægt að setja fram fyrir holrýmd (n). Með því að hugsa sér að sýni hafi rúmmálið einn (V=1), fæst á svipaðan hátt og áður:

$$\gamma = G_s\gamma_w(1-n)(1+w) \quad (3\text{-}20)$$

$$\gamma_d = (1-n)G_s\gamma_w \quad (3\text{-}21)$$

$$\gamma_{sat} = [(1-n)G_s+n]\gamma_w \quad (3\text{-}22)$$

3.4.9.3 Algeng gildi á rúmþyngd (γ) og holrýmishlutfalli (e)

Rúmþyngd jarðefna er mjög mismunandi og vegna þess hve hún er háð holrýmd og vatnsinnihaldi má einnig oft sjá mikinn mun á henni í sama jarðefninu. Það er því mjög æskilegt að rúmþyngd sé ætíð mæld úti í mörkinni og helst á óhreyfðu efni. Ef því er ekki komið við má styðjast við eftirfarandi viðmiðunartöflu, sem sýnir þurra, vota og mettaða rúmþyngd nokkurra jarðefna Taflan er tekin úr ÍST 15 grundunarstaðlinum og á því vel við um íslensk jarðefni. Lítið þjappað efni hefur rúmþyngd nálægt neðra gildinu en mikið þjappað nálægt efra.

Jarðefni	**Rúmþyngd, γ (kN/m^3)**		
	Þurr	**Vot**	**Mettuð**
Grjót	20	20	22
Hraunfylling, lítið brunnin	19-20	19-20	20-21
Haunfylling, mikið brunnin; gjall	8-10	12-13	14-16
Bólstrabergsfylling	17-20	17-20	19-22
Möl	17-20	19-22	20-23
Sandur (ekki vikur, gjall eða skel)	16-18	18-20	19-21
Hekluvikur	6	10	14
Rauðamöl	6	13	16
Mýrdalssandsvikur	10	14	17
Silti (méla)		20	20
Jökulruðningur	20	22	22

Tafla 8. Rúmþyngd jarðefna.[32]

Til samanburðar er látin fylgja eftirfarandi tafla sem gildir fyrir jarðefni í Ameríku. Hún sýnir rúmþyngdir nokkurra jarðefna og einnig holrýmishlutfall, lekt og vatnsinnihald.

Jarðefni	**Hol rýmd n (%)**	**Holrýmis tala e**	**Vatns innihald w (%)**	**Þurr rúmþyngd γ_d (kN/m^3)**	**Vot rúmþyngd γ (kN/m^3)**
Laus einsleitur sandur	46	0,85	32	14,3	18,9
Þéttur einsleitur sandur	34	0,51	19	17,5	20,9
Blandaður, grófur og laus sandur	40	0,67	25	15,9	19,9
Blandaður, grófur og þéttur sandur	30	0,43	16	18,6	21,6
Blandaður, grófur jökulruðningur	20	0,25	9	21,2	23,2
Mjúkur jökulleir	55	1,2	45	////	17,7
Harður jökulleir	37	0,6	22	////	20,7
Mjúkur, örlítið lífænn leir	66	1,9	70	////	15,8
Mjúkur, mjög lífrænn leir	75	3,0	110	////	14,3

[32] ÍST 15. 1990

Mjúkt bentonite	84	5,2	194	////	12,7

Tafla 9. Rúmþyngd, holrýmd, holrýmistala og vatnsinnihald nokkurra jarðefna.[33]

3.4.10 Glæðitap

Ákvörðuð er rýrnun efnis við hitun í u.þ.b. 1000°C miðað við þurra þyngd efnis. Mat á glæðitapi er einkum notað til þess að meta hversu mikið lífrænt efni jarðefnið inniheldur.

3.5 Verkfræðilegir eiginleikar jarðefnis

3.5.1 Almennt

Hér að ofan hefur verið fjallað um jarðefni almennt og reynt að sýna fram á hvaða þætti það þarf að uppfylla til þess að teljast hæft í hin ýmsu mannvirki. Búið er að fjalla um bergtegundirnar sem jarðefniskornin eru úr og hverjir helstu áhrifavaldar eru á hagnýtum eiginleikum þeirra, s.s. uppruni bergsins, þéttleiki, ummyndunarstig o.fl. Einnig hefur verið fjallað um uppbyggingu jarðefnanna, þ.e. hvernig mismunandi stærðir korna raðast upp og hver þáttur vatns og lofts er í holrýmunum. Það liggur því beint við að fjalla næst um verkfræðilega eiginleika jarðefnisins, þ.e. hvernig það stendur sig sem byggingarefni og hvað það er sem þarf að skoða í því samhengi.

3.5.2 Lekt

Efni telst vera lekt eða vatnsleiðandi ef í því finnast samfelld holrými, þ.e. lítil óregluleg göng sem vatn getur flætt um. Þar sem öll jarðefni, jafnvel hinn þéttasti leir, hafa slík holrými eru þau því öll lek og gildir því sama lögmál um þau flestöll. Í jarðtækni getur verið nauðsynlegt að vita hversu mikið vatn flæðir í gegnum jarðefnið á tímaeiningu. Þetta á t.d. sérstaklega við þegar verið er að hanna stíflur, þar verður vitneskja um lekt að liggja fyrir til ákvörðunar á vatnsmagni sem rennur í gegnum og/eða undir stífluna. Einnig er sú vitneskja nauðsynleg til þess að ákvarða hversu mikillar dælingar er þörf á meðan verið er að grafa fyrir undirstöðum bygginga.

Árið 1856 setti Henry Darcy fram líkingu til að áætla rennslishraða vatns í gegnum jarðefni og gildir hún fyrir ýmiskonar jarðvegstegundir.[34] Þegar aftur á móti er verið að meta flæði í gegnum efni eins og hreina möl eða mjög opna grjótfyllingu á lögmál hans ekki við, þar sem í slíkum jarðefnum getur verið um iðustreymi að ræða sem líking Darcy tekur ekki tillit til. Líkingin lítur svona út:

$$v = k \cdot i \qquad (3\text{-}23)$$

þar sem:

v = hraði (sm/sek).

[33] Terzaghi, Karl og Peck, Ralph B. 1967
[34] http://biosystems.okstate.edu/darcy/

k = lektarstuðull (sm/sek).
i = þrýstifall eða vökvastigull (hydraulic gradient).

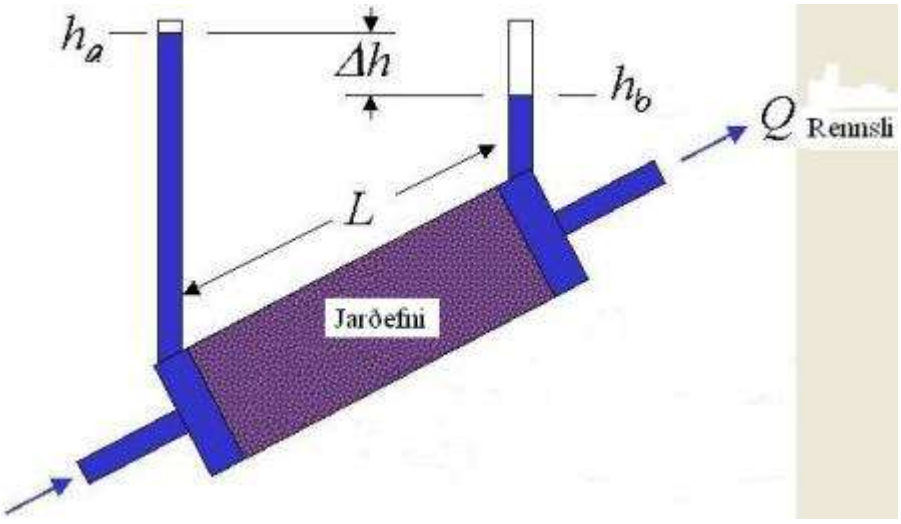
Gildi lektarstuðla er ákaflega mismunandi fyrir mismunandi efni og má sjá helstu gildin í töflu 10.

Jarðefnisgerð	**Lektarstuðull, k (sm/sek)**
Miðlungsgróf til gróf möl	$> 10^{-1}$
Grófur til fínn sandur	10^{-1} - 10^{-3}
Fínn- og siltríkur sandur	10^{-3} - 10^{-5}
Silti, leirríkt silti og siltríkur leir	10^{-4} - 10^{-6}
Leir	$\leq 10^{-7}$

Tafla 10. Lektarstuðlar mismunandi jarðefna.[35]

Til þess að ákvarða lektarstuðul jarðefnis er eftirfarandi líking notuð, sem er leidd út frá rennslislíkingu Johann Bernoullis. Mynd 15 skýrir þetta betur út.

$$i = \frac{\Delta h}{L} \qquad (3\text{-}24)$$



Mynd 15. Líking fyrir útreikningi á lektarstuðli.[36]

[35] Terzaghi, Karl og Peck, Ralph B. 1967
[36] http://biosystems.okstate.edu/darcy/

Hægt er að meta lekt jarðefna á rannsóknarstofu á tvo vegu, annarsvegar með svokölluðu „constant head“ prófi og hinsvegar með svokölluðu „falling head“ prófi. Prófin eru mjög svipuð en helsti munurinn á milli þeirra er sá að í því fyrrnefnda er vatnsþrýstingi inn í efnið haldið stöðugum en í hinu síðarnefnda er vatnsþrýstingi út úr efninu haldið stöðugum. „Constant head“ prófið hentar betur á malarefni, en „falling head“ prófið er frekar notað á fínni og leirkenndari efni.

Vatn í jarðvegi, fyrir neðan yfirborð jarðar, er nefnt grunnvatn og er uppspretta þess fyrst og fremst rigningarvatn. Rennsli vatns í jarðvegi á sér stað í tveimur skilgreindum svæðum, þ.e. í mettuðu svæði og ómettuðu svæði. Mettað svæði liggur undir grunnvatnsborði og eru öll holrými þar fyllt vatni. Efsti hlutinn er undir loftþrýstingi og eftir því sem neðar dregur eykst vökvastöðuþrýstingur og þ.a.l. vökvastigull.

Ómettað svæði liggur á milli grunnvatnsborðs og jarðvegsyfirborðs og seitlar vatn þar um í holrými. Svæðinu er skipt í þrjú minni svæði; háræðarjaðar-, aðsogs- og uppgufunarsvæði. Á háræðarjaðarsvæði getur jarðvegurinn stundum orðið vatnsmettaður vegna hárpípukrafta sem halda vatninu fyrir neðan vökvastöðuþrýsting. Hárpípuvirkni er kraftverkun í vökva sem á sér stað í grönnum pípum (hárpípum) í jarðvegi og pípum almennt. Ef viðloðun milli vökvans og pípunnar er meiri en innri samloðun sjálfs vökvans dregst vökvayfirborðið upp í pípuna en annars dregst það niður. Á aðsogssvæði eru holrýmin hlutfallslega fyllt vatni vegna yfirborðspennu og rennslis frá jarðvegsyfirborði og niður. Á uppgufunarsvæði gufar vatn stöðugt upp.

3.5.3 Spennur og streitur í jarðefni

3.5.3.1. Almennt

Öll mannvirki flytja álag niður í jarðefnið sem þau eru grunduð á og myndar það þrýsti-, sker- og jafnvel togspennur í efninu. Þar að auki eru spennur í jarðefninu vegna eigin þyngdar þess og aukast þær með auknu dýpi. Hægt er að sjá jarðveg fyrir sér sem grind af sterkbyggðum kornum sem umlykja holrými sem innihalda vatn og/eða loft. Jarðvegsgrind getur staðist spennurnar aðeins á þann hátt að kraftar myndist á milli snertiflata kornanna. Þessar kraftayfirfærslur geta verið það breytilegar, bæði í stefnu og magni, að ógerlegt er að ákvarða þær.

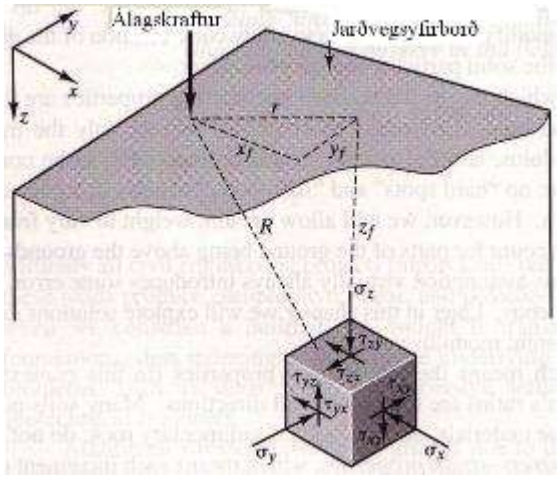
Jarðvegur og berg eru mjög flókin efni sem ekki er hægt að útbúa reikningsleg líkön fyrir án þess að nota til þess ákveðnar einfaldanir. Þessar einfaldanir gera það að verkum að hægt er að meðhöndla jarðefnið á sama hátt og önnur hefðbundin byggingarefni, t.d. steypu og stál. Þess vegna er hægt að beita sömu samböndum við spennu og streitu útreikninga, þó með örítið breyttum forsendum. Til þess að reikna spennur og streitu í jarðvegi er litið á að hann hafi eftirfarandi eiginleika:

1. Óslitið / samfellt efni.

2. Einsleitt.
3. Einsátta (sömu eiginleikar í allar áttir).
4. Línulega fjaðrandi (spennu-streytu eiginleikar).

3.5.3.2. Spennuskilgreining

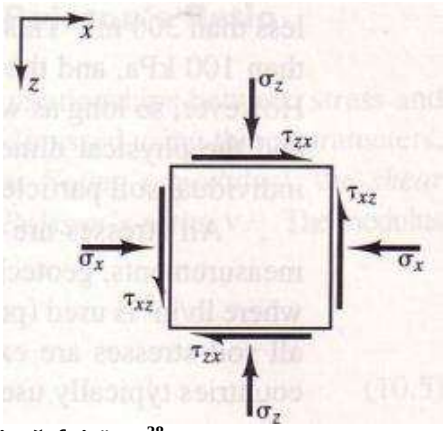
Þegar spennur (e.stress) í jarðefni eru skoðaðar er jarðefninu, líkt og hefðbundnum efnum, skipt í litlar einingar og fær hver hlið hverrar einingar á sig ýmsar spennur, þ.e. tog- og þrýstispennur og skerspennur. Munurinn er hinsvegar sá að í almennum efnum er jákvæð spenna táknuð fyrir tog og neikvæð fyrir þrýsting, en í jarðefnum er þessu snúið við, þ.e. jákvæð spenna táknar þrýsting og neikvæð tog. Þegar efnisögnin er skoðuð er val ása þannig að x og y ásar eru í láréttu plani og z ás í lóðréttu, þ.e. dýpi. Mynd 16 útskýrir þetta betur.



Mynd 16. Spennuögn jarðvegs.[37]

Þegar jarðefnisbúti er snúið hornrétt og samsíða x og z ásum (mynd 17) eru láréttar normalspennur táknaðar með τ_x og τ_y og lóðréttar með τ_z. Hver hlið jarðefnisbútsins fær einnig á sig skerspennur og eru þær táknaðar með tveimur undirtáknum, þ.e. planinu sem spennan er hornrétt á og stefnunni sem hún virkar í. T.d. er τ_{xz} sá hluti skerspennu í plani x (þ.e. plan hornrétt á x ásinn) sem virkar í stefnu z. Til þess að jafnvægi viðhaldist verða spennur í gagnstæðar áttir að vera jafnar, t.d. þarf τ_{xz} að vera jafnt og $-\tau_{zx}$, τ_{yz} að vera jafnt og $-\tau_{zy}$ o.s.frv.

[37] Coduto, Donald P. 1999



Mynd 17. Skilgreindar spennur í jarðefnisögn.[38]

3.5.3.3. Virk spenna

Vatn er, eins og föstu kornin, að jafnaði talið óþjappanlegt og það álag sem kemur á vatnsmettað jarðefni að hluta til borið af kornunum og að hluta af vatninu í holrýmunum.

Árið 1923 setti Karl Terzaghi fram líkingu um virka spennu (e.effective stress) í jarðefnum sem fjallar um kraftayfirfæslur milli kornanna. Þessi grundvallarregla gildir einungis í fullmettuðum jarðvegi með ekkert vatnsstreymi og tengir saman eftirfarandi spennur:

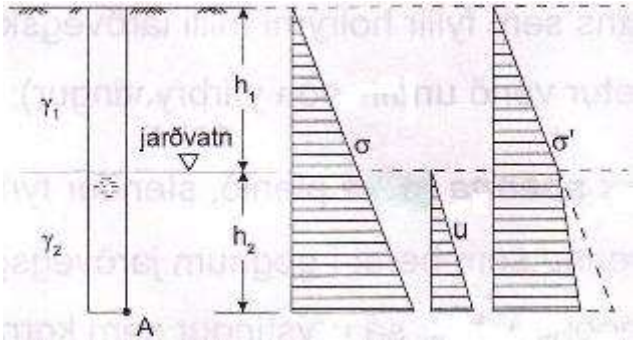
1. Heildar normalspenna (σ) á ákveðnu plani í jarðefnismassanum er kraftur á flatareiningu sem virkar þvert á stefnu plansins.

2. Póruþrýstingur (u) er þrýstingur vegna vatns sem fyllir holrými milli jarðefniskorna (getur verið ýmist undir- eða yfirþrýstingur).

3. Virk normalspenna (σ´) á planið stendur fyrir þá spennu sem berst í gegnum jarðvegsgrindina eingöngu, þ.e. sá þrýstingur sem kornin bera uppi.

Samband milli þessara þriggja spenna sést fyrir neðan en mynd 18 útskýrir þetta betur:

$$\sigma = \sigma' + u \quad \text{eða} \quad \sigma' = \sigma - u \qquad (3\text{-}25)$$

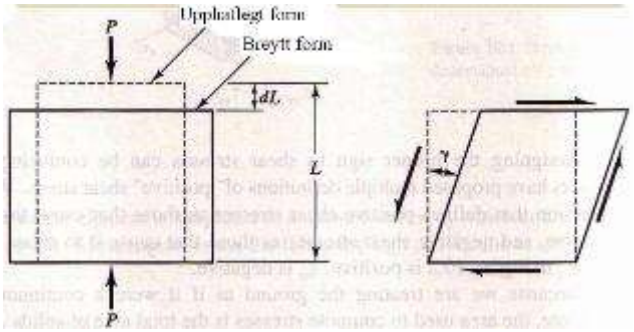


[38] Coduto, Donald P. 1999

Mynd 18. Samband normalspennu (σ), póruþrýstings (u) og virkrar normalspennu (σ´) í jarðvegi.

3.5.3.4. Streituskilgreining

Þegar efni fær á sig spennu þá formbreytist það og í jarðtækni er þessi formbreyting nefnd streita (e.strain). Normalspennur kalla fram normalstreitur í efninu en skerspennur skerstreitur. Normalstreita (ε) er skilgreind sem breyting á lengd (δL) deilt með upphaflegu lengd. Skerstreita (γ) er skilgreind sem hornið á formbreytingunni í radíönum. Eftirfarandi mynd sýnir þetta vel:



Mynd 19. Normal- og skerstreitur jarðefnisagna.[39]

3.5.3.5. Fjaðurstuðull, skerstuðull og Possions-hlutfall

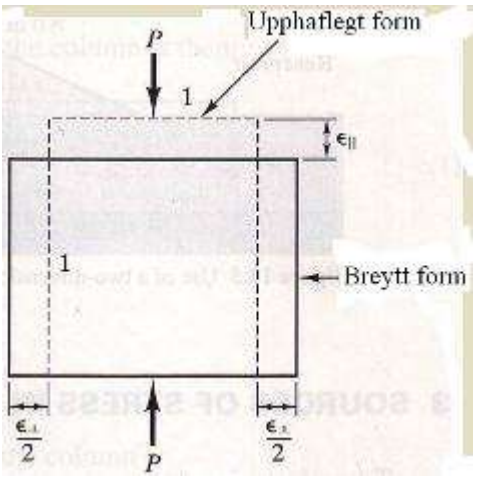
Ýmis sambönd milli spennu og streitu í efni eru notuð til þess að ákvarða formbreytingar. Af þeim er vert að minnast á þrenn, fjaðurstuðul (E), skerstuðul (G) og Possions-hlutfall (μ), en þau gilda einungis í línulega fjaðrandi efnum.

Fjaðurstuðull er hlutfall normalspennu og normalstreitu; $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$ (3-26)

Skerstuðull er hlutfall skerspennu og skerstreitu; $G = \frac{\sigma}{\gamma}$ (3-27)

Possions-hlutfall er hlutfall lóðréttrar og láréttrar streitu; $\mu = \frac{\varepsilon_{lóð}}{\varepsilon_{lá}}$ (3-28)

[39] Coduto, Donald P. 1999



Mynd 20. Skilgreining á Possions-hlutfalli.[40]

3.5.4 Skerstyrkur

Skerstyrkur (e.shear strength) efnis er mesta spenna sem efnið þolir. Ef spennan fer yfir styrkinn brestur efnið og í jarðvegi er þá alltaf um skerbrot að ræða, en ekki tog- eða þrýstibrot. Mörg jarðtæknileg viðfangsefni krefjast þess að skerstyrkur sé metinn, sem dæmi má nefna jarðvegsfláa, ýmsar undirstöður, stoðveggi og vegi. Hægt er að ákvarða skerstyrk jarðefnis á rannsóknarstofu með svokölluðu skerboxprófi.

Skerstyrkur í jarðvegi er nær eingöngu háður því hvernig víxlverkun er á milli korna, en ekki kornastyrk einstakra korna. Skerbrot verður því einungis þegar spennur á milli jarðvegskorna eru það háar að þau skríða eða rúlla yfir hvort annað. Þessari kornavíxlverkun er gjarnan skipt í tvo þætti; núningsstyrk og samloðun. Áður hefur verið talað um að jarðefni sé flokkað í núningsefni og samloðunarefni eftir fínefnainnihaldi og er hér um svipaða skiptingu að ræða, þ.e. talað er um núningsstyrk í núningsefnum og samloðun í samloðunarefnum.

Fyrir öll efni gildir líkingin: $s = c + \sigma' \cdot \tan\phi$ (3-29)

Þar sem s er skerstyrkur jarðvegs, c er samloðun, σ´eru virkar spennur sem verka á flötinn og Φ er skerhorn eða núningstyrkur efnisins. Skerhorn er m.a. háð gerð steinda, lögun korna (því kantaðri korn því hærra skerhorn), kornastærðardreifingu (því betri dreifing því hærra skerhorn), holrýmd (því minna holrými því hærra skerhorn) og magni lífræns efnis.

Í hreinum núningsefnum er samloðun lítil og því stefnir gildið á c á núll. Skerstyrkur er því einungis háður skerhorni og lítur líkingin þá svona út:

[40] Coduto, Donald P. 1999

$$s = \sigma' \cdot \tan\phi \qquad (3\text{-}30)$$

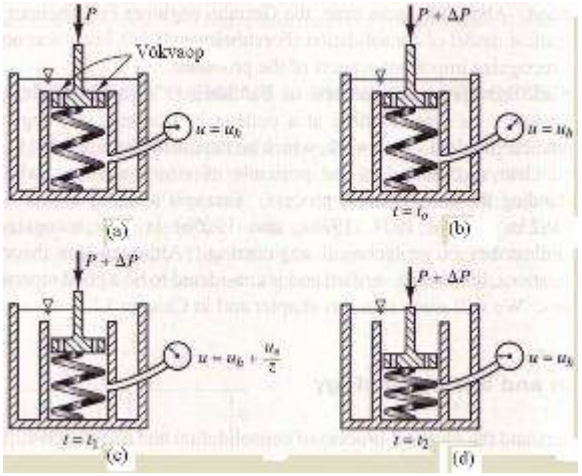
Í samloðunarefnum er skerhornið aftur á móti lítið sem ekkert og því er skerstyrkur einungis háður samloðuninni. Líkingin verður því:

$$s = c \qquad (3\text{-}31)$$

3.5.5 Sig í jarðvegi

Þegar vatnsmettaður jarðvegur verður fyrir auknu álagi hækkar póruþrýstingurinn mjög skyndilega og vatnið leitast við að streyma úr holrýmum. Þessi vatnsdrenun úr holrýmunum leiðir til rúmmálsminnkunar og þar af leiðandi til sigs. Í malar- og sandefnum, sem eru mjög opin og lek, er drenun úr efninu lokið mjög fljótt en í samloðunarefnum tekur það mun lengri tíma.

Til þess að útskýra þetta nánar er gott að sjá fyrir sér jarðveg og vatn í holrýmum hans sem gorm og vökvabullu með drenunarholum, sem spyrna á móti álaginu (mynd 21). Líta má á lið (a) sem upphafstöðu, þ.e. eitthvað álag er til staðar og er búið að vera það lengi. Allt álag er tekið upp af gorminum og því er einungis spenna í honum ($u = u_{h(gormur)}$). Í liði (b) kemur eitthvað nýtt viðbótarálag á kerfið og fyrst um sinn er það einungis tekið upp af vatninu. En um leið og vatnið fer að streyma út um drenholurnar (mishratt eftir jarðefnistegund) flyst hluti af því yfir á gorminn. Þegar vatnið streymir út sígur stimpillinn (jarðvegsyfirborðið niður). Á þessum tímapunkti er spenna bæði í gorminum og í vatninu ($u = u_{h(gormur)} + u_{e(vatn)}$). Ferlið heldur áfram og í liði (c) er spenna í gorminum og í vatninu á vissum tímapunkti orðin jöfn, þ.e. helmingur af álagi tekinn upp af gormi (jarðvegi) og hinn helmingurinn af vatninu. Í lið (d) ríkir jafnvægi enn á ný. Stimpillinn hefur verið að síga undan álaginu og vatnið hefur stöðugt streymt út í samræmi við það. Því kemur að því að öll spennan flyst yfir á gorminn aftur ($u = u_{h(gormur)}$) og aðstæður verða svipaðar og í upphafi að því undanskildu að spennan hefur aukist.



Mynd 21. Gormur og vökvabulla til útskýringar á sigi.[41]

Sigi (e.consolidated settlement) er skipt í skammtímasig (e.primary consolidated settlement), langtímasig (e.secondary consolidated settlement) og afmyndunarsig (e.distortion settlement).

Skammtímasig: Við skammtímasig (δ_c) endurraðast jarðefniskorn í þéttari pökkun vegna aukningar á virkri normalspenna í jarðefni þegar aukið álag er sett á það. Við það minnkar holrýmd og ef jarðefnið er vatnsmettað (S=100%) getur sigið einungis átt sér stað við það að vatnið þrýstist út úr jarðefninu. Skammtímasig gerist í öllum jarðefnum og er mikilvirkast alls sigs.

Langtímasig: Langtímasig (δ_s) er vegna fjaðrandi formbreytinga (elastískar) efniskorna, skriðs, og sundrunar lífrænna agna í jarðefninu og er ekki háð því að vatn þrýstist út. Langtímasig getur verið umtalsvert í mjög mótanlegum leir og lífrænum efnum, en hverfandi lítið í sandi og möl. Ólíkt skammtímasigi er langtímasig ekki háð breytingum á virkri normalspennu.

Afmyndunarsig: Afmyndunarsig (δ_d) gerist þegar hliðarhreyfingar eiga sér stað í jarðefninu vegna viðbragða þess gagnvart breytingum á virkri normalspennu. Þessar hreyfingar eiga sér einkum stað þegar mikið álag er sett á lítinn jarðefnisflöt eða nálægt brún hárra fyllinga og hlaðinna garða.

Heildarsig á jarðefnisyfirborði er summa þessara þriggja þátta:

$$\delta = \delta_c + \delta_s + \delta_d \qquad (3\text{-}32)$$

[41] Coduto, Donald P. 1999

3.6 Jarðvegsflokkunarkerfi U.S.C.S.

Mörg kerfi eru til sem notuð eru til þess að flokka jarðefni eftir efniseiginleikum þeirra og gerð. Það er því nauðsynlegt er að menn komi sér saman um hvaða kerfi skuli nota þannig að allir flokki og meti efnin á sama hátt, a.m.k. þeir sem vinna hjá sömu stofnun. Með þetta í huga var bandaríska flokkunarkerfið U.S.C.S. (Unified Soil Classification System) tekið upp Íslandi árið 1974 af Vegagerðinni. Í kjölfarið tók Rannsóknarstofnun byggingariðnaðarins það upp og gaf út rit um það árið 1976.

Jarðefni er skipt í þrjá meginflokka í U.S.C.S. kerfinu:

1. Gróft efni.
2. Fínt efni.
3. Mjög lífrænt efni.

Efni er skilgreint sem gróft eða fínt á sama hátt og núningsefni og samloðunarefni eru skilgreind, þ.e. efnið telst gróft ef helmingur þess eða minna smýgur í gegnum sigti nr. 200 og fínt ef meira en helmingur smýgur í gegn. Mjög lífrænt efni má yfirleitt greina með sjónrænni skoðun.

Fleiri undirflokkar eru tilgreindir í kerfinu sem lýsa betur grófleika jarðefna. Þar er efnið flokkað í grjót, steina, möl, sand og fínefni. Grófleikamörk þessara flokka eru sýnd á myndinni hér á eftir.

Tafla 11. Kornastærðarflokkun samkvæmt U.S.C.S. kerfi.[42]

Jarðefni er síðan skipt enn nánar niður í fimmtán smærri flokka og er hver þeirra táknaður með ákveðnum bókstöfum. Viðeigandi tákn á hverjum flokki á að segja til um hvers konar eiginleika jarðefnið hefur í jarðtæknilegu tilliti. Hér fyrir neðan má sjá yfirlit yfir þessa táknun en vegna bergfræðilegrar sérstöðu Íslands er búið að bæta við kerfið táknum fyrir hraun, gjall og vikur. Þegar jarðefni lendir á mörkum tveggja flokka fær það gjarnan tvo bókstafi.

Tákn	Skýringar
G	Möl

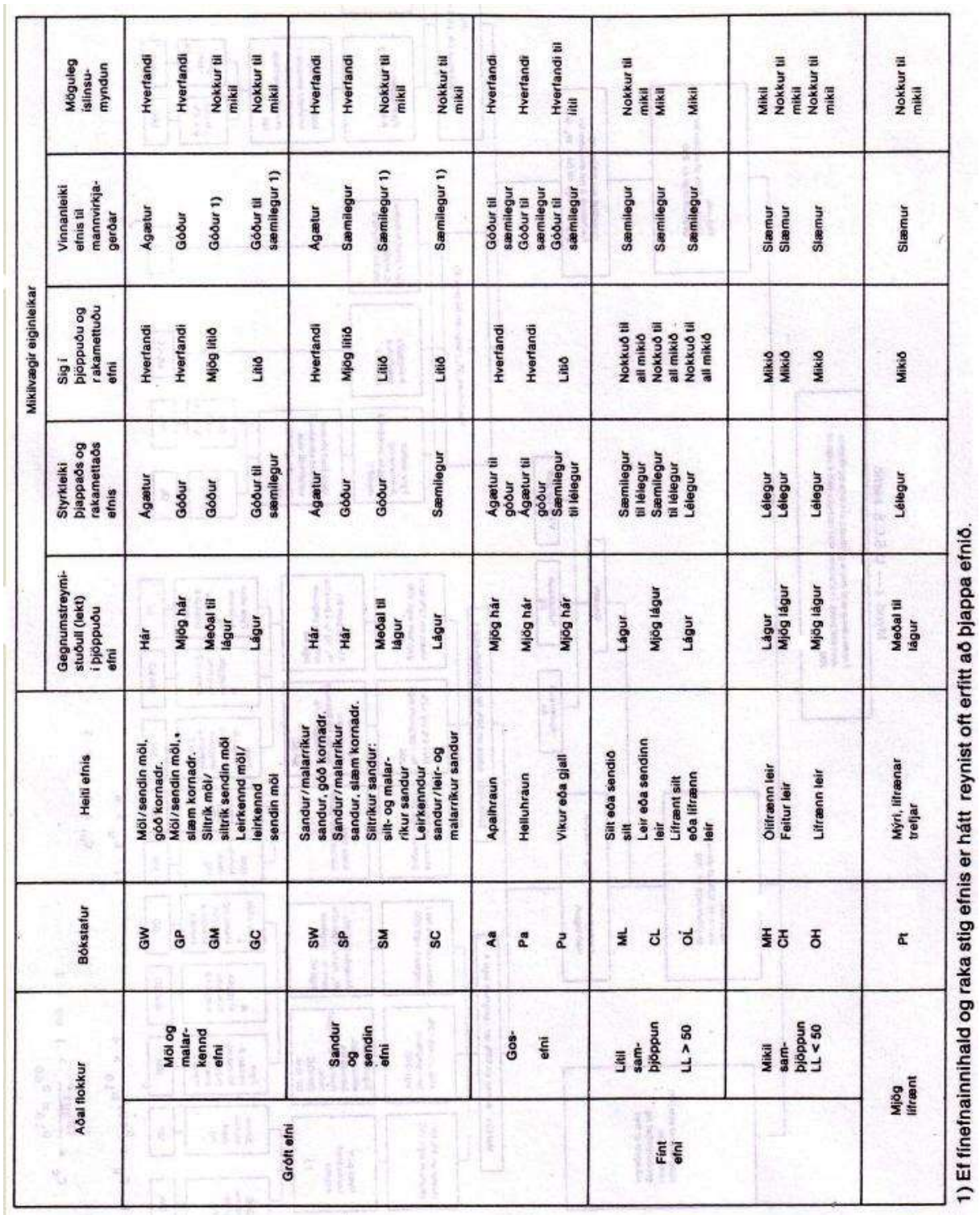
[42] Rannsóknarstofnun Byggingariðnaðarins. 1976

S	Sandur
M	Silt
C	Leir
O	Lífrænt efni
Pt	Mýri
W	Góð kornastærðardreifing
P	Slæm kornastærðardreifing
H	Hátt flæðimark (WL > 50)
L	Lágt flæðimark (WL < 50)
Aa	Apalhraun
Pa	Helluhraun
Pu	Gjall og vikur

Tafla 12. Bókstafatákn jarðvegsflokkunarkerfis U.S.C.S.[43]

Myndirnar hér á eftir sýna flokkun kerfisins og þar má sjá að þegar jarðefni hefur farið í gegnum allt kerfið, eiga að liggja fyrir nokkuð nákvæmar upplýsingar um gerð og eiginleika þess. Kerfið á því að vera mjög hjálplegt tæki þegar verið er að sinna jarðefnisvandamálum af ýmsum toga.

[43] Rannsóknarstofnun Byggingariðnaðarins. 1976

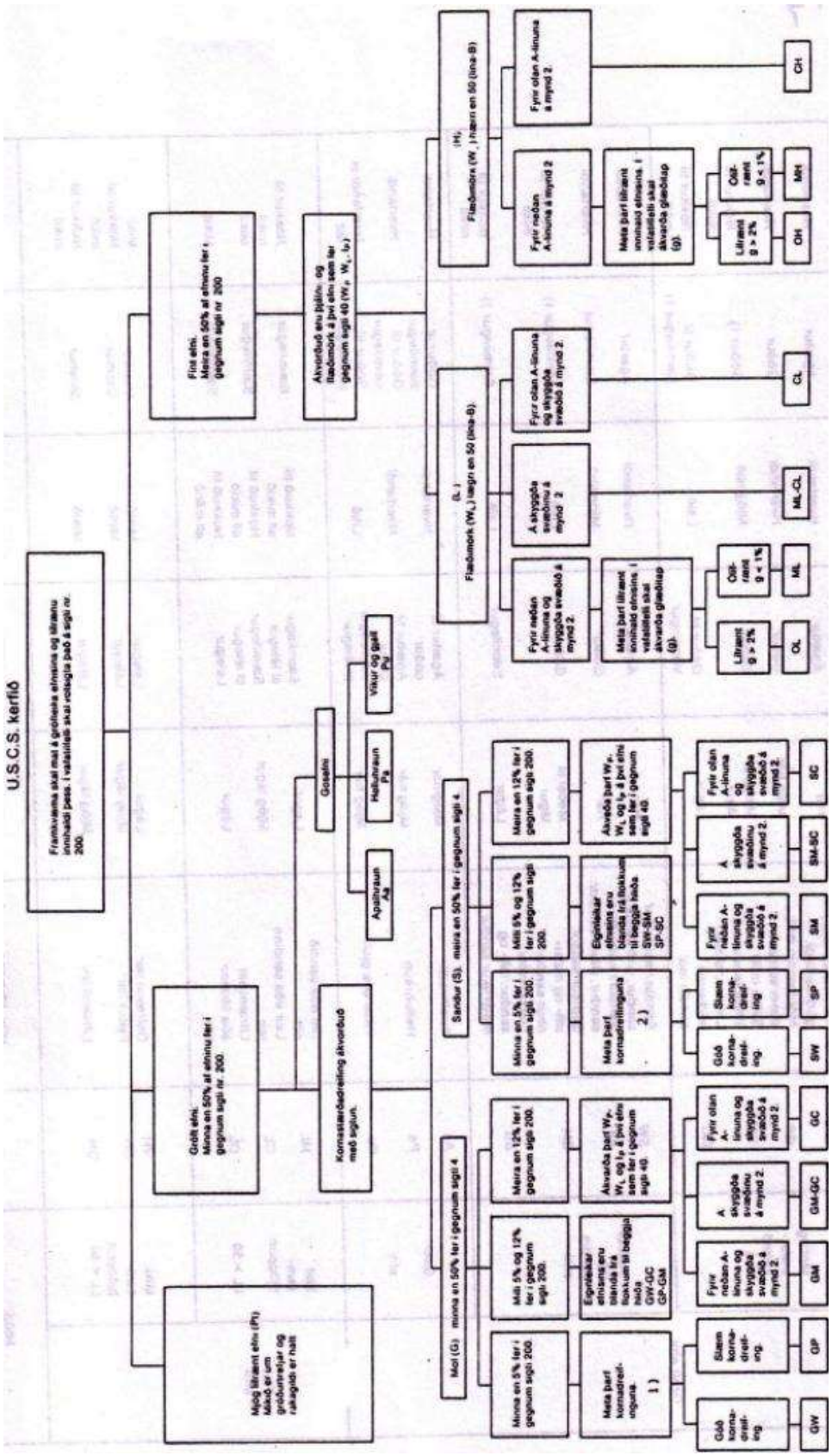


Aðal flokkur		Bókstafur	Heiti efnis	Mikilvægir eiginleikar				
				Gegnumstreymi-stuðull (lekt) í þjöppuðu efni	Styrkleiki þjappaðs og rakamettaðs efnis	Sig í þjöppuðu og rakamettuðu efni	Vinnanleiki efnis til mannvirkja-gerðar	Möguleg íslinsu-myndun
Grófkt efni	Möl og malar-kennd efni	GW	Möl/sendin möl, góð kornadr.	Hár	Ágætur	Hverfandi	Ágætur	Hverfandi
		GP	Möl/sendin möl,* slæm kornadr.	Mjög hár	Góður	Hverfandi	Góður	Hverfandi
		GM	Siltrik möl/siltrik sendin möl	Meðal til lágur	Góður	Mjög lítið	Góður 1)	Nokkur til mikil
		GC	Leirkennd möl/leirkennd sendin möl	Lágur	Góður til sæmilegur	Lítið	Góður til sæmilegur 1)	Nokkur til mikil
	Sandur og sendin efni	SW	Sandur/malarrikur sandur, góð kornadr.	Hár	Ágætur	Hverfandi	Ágætur	Hverfandi
		SP	Sandur/malarrikur sandur, slæm kornadr.	Hár	Góður	Mjög lítið	Sæmilegur	Hverfandi
		SM	Siltrikur sandur: silt- og malar-rikur sandur	Meðal til lágur	Góður	Lítið	Sæmilegur 1)	Nokkur til mikil
		SC	Leirkenndur sandur/leir- og malarrikur sandur	Lágur	Sæmilegur	Lítið	Sæmilegur 1)	Nokkur til mikil
	Gos-efni	Aa	Apalhraun	Mjög hár	Ágætur til góður	Hverfandi	Góður til sæmilegur	Hverfandi
		Pa	Helluhraun	Mjög hár	Ágætur til góður	Hverfandi	Góður til sæmilegur	Hverfandi
		Pu	Vikur eða gjall	Mjög hár	Sæmilegur til lélegur	Lítið	Góður til sæmilegur	Hverfandi til lítil
Fínt efni	Lítil sam-þjöppun LL > 50	ML	Sílt eða sendið sílt	Lágur	Sæmilegur til lélegur	Nokkuð til all mikið	Sæmilegur	Nokkur til mikil
		CL	Leir eða sendinn leir	Mjög lágur	Sæmilegur til lélegur	Nokkuð til all mikið	Sæmilegur	Mikil
		OL	Lífrænt sílt eða lífrænn leir	Lágur	Lélegur	Nokkuð til all mikið	Sæmilegur	Mikil
	Mikil sam-þjöppun LL < 50	MH	Ólífrænn leir	Lágur	Lélegur	Mikið	Slæmur	Mikil
		CH	Feitur leir	Mjög lágur	Lélegur	Mikið	Slæmur	Nokkur til mikil
		OH	Lífrænn leir	Mjög lágur	Lélegur	Mikið	Slæmur	Nokkur til mikil
Mjög lífrænt		Pt	Mýri, lífrænar treðjar	Meðal til lágur	Lélegur	Mikið	Slæmur	Nokkur til mikil

1) Ef fínefnainnihald og raka stig efnis er hátt reynist oft erfitt að þjappa efnið.

Mynd 22. Eiginleikar helstu jarðvegsflokka.[44]

[44] Rannsóknarstofnun Byggingariðnaðarins. 1976



Mynd 23. U.S.C.S. kerfið.[45]

[45] Rannsóknarstofnun Byggingariðnaðarins. 1976

4. Þjöppun jarðefnis

4.1 Tilgangur þjöppunar

Góð og jöfn þjöppun er nauðsynleg í almennum jarðvinnuverkefnum til að ná fram nægilegum gæðum til þess að mannvirki endist og hegði sér í samræmi við hönnun. Þrátt fyrir að kostnaður við þjöppunarvinnu sé lítið brot af heildarframkvæmdakostnaði hvers verks er hlutverk þjöppunar stórt varðandi gæði og endingu mannvirkis, en þrátt fyrir það oft stórlega vanmetið.

Tilgangur þjöppunar á lausum jarðefnum er fyrst og fremst að minnka loft- og vatnsrými í jarðefninu. Við holrýmisminnkun eykst rúmþyngd og þar með skerstyrkur og burðargeta jarðvegsins, en þjöppun eykur einnig stífleika og minnkar lekt efnisins. Hárpípuvirkni samloðunarefna minnkar einnig við þjöppun. Góð þjöppun er ein grunnforsenda þess að jarðvegur geti tekið við ásettu álagi án þess að hann sígi. Hún lágmarkar einnig líkur á varanlegum formbreytingum vegna síendurtekins álags. Í þessum kafla verður fjallað um öll helstu undirstöðuatriði þjöppunar jarðvegs og hvaða kröfur eru gerðar um þjöppun í dag.

4.2 Áhrifsþættir þjöppunar

4.2.1 Jarðefnisgerð

4.2.1.1 Almennt

Jarðefni hafa misjafna eiginleika og eru því misjafnlega hæf til þjöppunar. Fjallað hefur verið um alla helstu eiginleika jarðefna, hverjir þeir eru og hvaða áhrif þeir hafa við notkun efnanna í mannvirkjagerð. Eftirfarandi eiginleikar eru sérstaklega áhrifaríkir: kornalögun (núin eða köntuð korn), kornastærð (gróf eða fín), kornastærðardreifing (einsleit eða blönduð) og rakainnihald. Af þessum eiginleikum skipta kornastærðir og dreifing þeirra alveg höfuðmáli. Í 3. kafla var jarðefnum skipt í samloðunarefni og núningsefni eftir magni sem smýgur í gegnum sigti 200. Hinsvegar þegar verið er að meta þjöppunarhæfni jarðefnis er sú skipting ekki nægilega nákvæm því núningsefni hafa svo mikla stærðardreifingu á kornum. Jarðefnum er því gjarnan skipt í fjóra flokka eftir kornastærðum, þ.e. samloðunarefni, malarefni, núningssefni og grjótfyllingar. Eftirfarandi tafla sýnir hvaða eiginleikar efna í hverjum flokki hafa áhrif á þjöppunarhæfnina:

Jarðvegsgerð			
Samloðunarefni	**Fínefnarík**	**Núningsefni**	**Grjótfylling**

	malarefni	**(fínefnasnauð möl)**	
Kornasamsetning Rakainnihald Þjálni	Kornasamsetning og stærðardreifing Hlutfall grófra korna m.v. fínefni Rakainnihald í fínefnahlutanum	Kornasamsetning og stærðardreifing Lögun og sléttleiki korna	Efnisstyrkur Lögun og sléttleiki korna Kornasamsetning og dreifing

Mynd 24. Áhrifaþættir jarðefnisgerðar á þjöppun.[46]

4.2.1.2 Þjöppun samloðunarefna

Vegna mikils hlutfalls fínefna í samloðunarefnum er þurr rúmþyngd þeirra eftir þjöppun talsvert lægri en þurr rúmþyngd þjappaðra núningsefna, það er vegna þess að fínefnaríkt efni hefur mikið rakainnihald og holrými. Einnig hafa samloðunarefni það lága lekt að vatn þrýstist treglega út úr því við þjöppun og því er megintilgangur þjöppunar á samloðunarefnum einkum sá að lágmarka loftrými í efninu.

Mjög erfitt getur reynst að þjappa samloðunarefni þegar það inniheldur umtalsvert lægri raka en mælt hagstæðasta rakastig efnisins (sjá „Proctor“ próf í kafla 5.2.1). Mikilli þjöppunarorku þarf því að beita á efnið. Eftir því sem rakainnihald eykst minnkar samloðun þannig að efnið verður þjappanlegra og nær hærri rúmþyngd, en hæsta rúmþyngd næst við hagstæðasta rakastigið. Ef rakastigið fer yfir hagstæðasta gildið minnkar þjöppunarhæfnin að sama skapi.

4.2.1.3 Þjöppun fínefnaríkra malarefna

Þjöppunarhæfni malarefna er einnig háð kornasamsetningu og dreifingu en einnig hlutfalli grófra korna miðað við fín korn og rakainnihaldi fínefnahlutans. Í lítt samloðandi jarðefnum úr blönduðum malar- og sandefnum, með lítið fínefnamagn, næst hærri þurr rúmþyngd en í fínefnasnauðum núningsefnum. Ástæðan er sú að í þessum blönduðu malarefnum eru áhrif raka í fínefnahlutanum umtalsverð, á þann hátt að hann dregur úr núningsmótstöðu á meðan á þjöppun stendur og auðveldar þannig við endurröðun jarðefniskornanna. Að öðru leyti er þjöppunarhæfni malarefna svipuð og núningsefna. Ef malarefni er þurrt og frekar einskorna losnar það gjarnan upp við of mikla þjöppun.

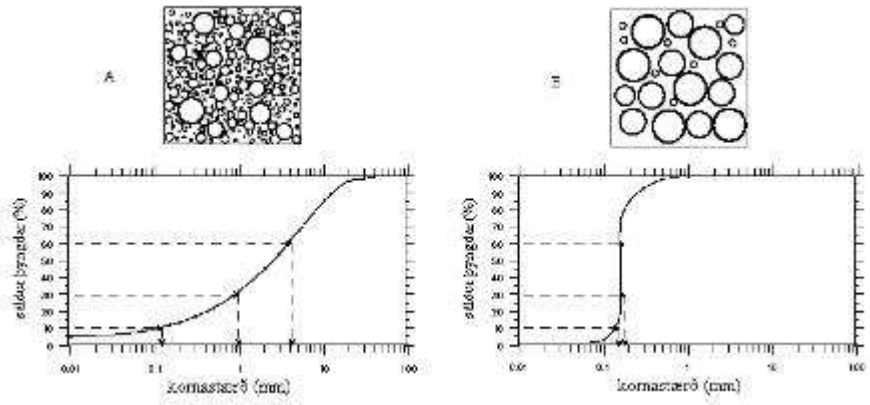
4.2.1.4 Þjöppun núningsefna

Þjöppun núningsefna, þ.e. sands og malar, felur í sér endurröðun korna þannig að loftrými milli stærri korna fyllast af smærri kornum. Við endurröðunina verður til sjálfstætt burðarkerfi sem samanstendur af miklum fjölda jarðvegskorna sem tengjast innbyrðis og dreifa þannig álaginu frá einu korni til annars. Með þessu myndast mikil mótstaða í efninu gagnvart formbreytingum.

[46] Oddur Sigurðsson. 2001

Hinsvegar getur of mikil þjöppun haft neikvæð áhrif og því þarf að meta vel hvenær efnið telst fullþjappað.

Hæfni jarðefnis til að mynda slíkt burðarkerfi er mjög háð viðnámi eða núningi og sambindingu og/eða læsingu milli korna þegar efnið verður fyrir stöðugu eða hreyfanlegu álagi. Yfirleitt eykst viðnám og innri læsing milli korna með aukinni rúmþyngd og hrjúfleika korna. Einnig er geta efnisins til álagsdreifingar með slíku burðarkerfi mikið háð kornastærðardreifingu þess. Ef efni hefur góða kornastærðardeifingu þá fyllast holrými vel og úr verður sterk og stöðug burðargrind við þjöppun. Ef kornastærðardreifingin er aftur á móti frekar léleg þá er lítill möguleiki til endurröðunar, þannig að holrými ná ekki að fyllast sem skildi við þjöppunina. Við það minnkar stöðuleiki burðarkerfisins og burður verður meira háður styrk korna. Rúmþyngd núningsefna er því háð kornasamsetningu og kornadreifingu, en með því að hagræða kornastærðum og dreifingu þeirra á þann hátt að loftrými milli stórra korna nái því sem næst að fyllast næst hámarks rúmþyngd og lágmarks holrýmd í jarðefninu. Þar sem þessi jarðefni eru frekar lek, jafnvel þegar þau eru þjöppuð, hefur rakainnihald ekki veruleg áhrif á þjöppunarferlið.



Mynd 25. Áhrif kornadreifingar á þjöppunarhæfni, (A) góð kornadreifing, (B) léleg kornadreifing

4.2.1.5 Þjöppun grjótfyllinga

Þjöppunarhæfni grjótfyllinga er háð kornalögun, styrk og kornasamsetningu. Mótstaða grjótfyllinga gegn sigi er fyrst og fremst háð efnisgerð bergsins og eiginleikum þess.

Í grjótfyllingum með lélegri kornadreifingu er álagið einungis borið af stærstu kornunum og því er álagsdreifingin í gegnum afar fáa snertifleti. Sig í þannig fyllingu getur því einungis átt sér stað ef snertifletir brotna niður og þess vegna er mikilvægt að efnistyrkur sé nægjanlegur ef fyllingin á að þola ásett álag. Ef kornadreifingin er hinsvegar góð hegðar fyllingin sér á allt annan hátt. Spennudreifing er jafnari og áhrif þjöppunar svipuð og um malarefni sé að ræða, að því einu undanskildu að á grjótfyllingar þarf mun meiri þjöppunarorku.

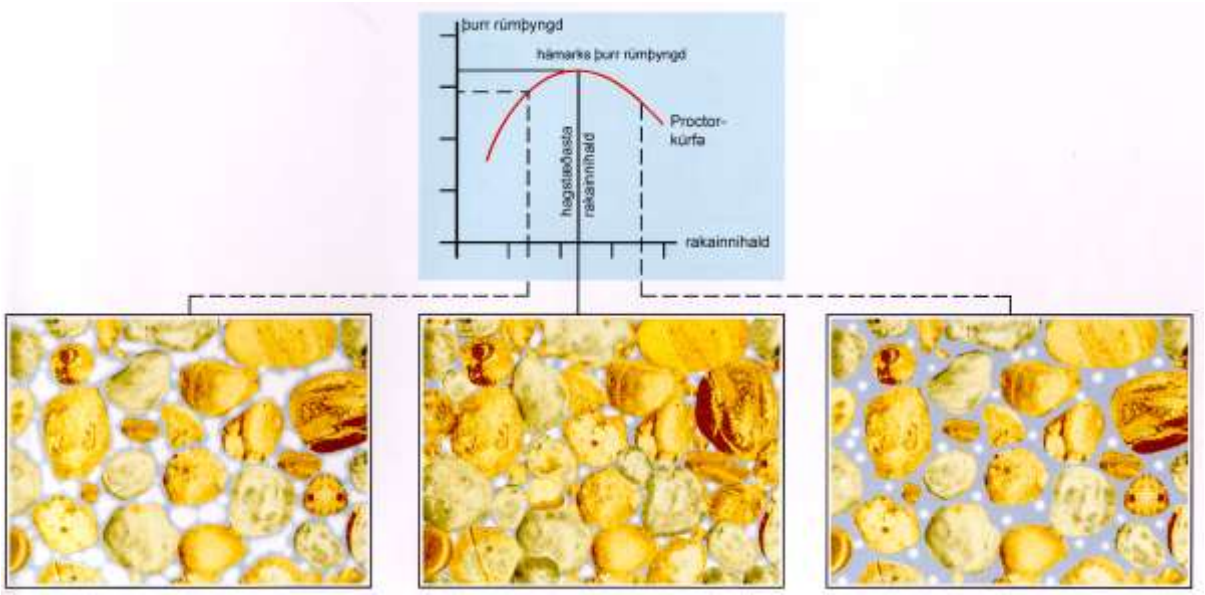
Af ofangreindu má sjá að hægt er að hafa áhrif á þjöppunarhæfni grjótfyllinga með efnisvinnslu og einnig með því að vanda til við niðurlögn og jöfnun efnisins þannig að aðskilnaður þess verði í lagmarki. Lágmarks lagþykkt þarf að vera a.m.k. þrisvar sinnum meiri en stærsta kornastærð í grjótfyllingum.

4.2.1.6 Efnafræðileg bindiefni

Með því að bæta tiltölulega litlu magni af efnafræðilegum bindiefnum, eins og kalki, sementi eða jarðbiki, má auka þjöppunarhæfni jarðvegs og burð til muna. Í því samhengi er mikilvægt að bindiefnin geti verið hlutfallslega jafndreifð í jarðefnismassanum. Helstu áhrifin sem þessi efni hafa á jarðefnið er að mynda sterkari tengingu milli korna og auka vatnsmótstöðu þess.

4.2.2 Rakainnihald

Rakainnihald jarðefnis hefur mjög mikil áhrif á þjöppunarhæfni þess, sérstaklega í samloðunar- og malarefnum sem innihalda mikið fínefni. Sýnt hefur verið fram á að þurr rúmþyngd slíkra efna er mjög háð rakainnihaldinu og við ákveðið hagstæðasta rakagildi næst hámarks þurr rúmþyngd og um leið mesta þjöppun. Þetta er útskýrt ítarlega í kafla 5.2.1 þar sem fjallað er um svokallað „Proctor“ próf, en það er rannsóknarstofupróf til ákvörðunar á hagstæðasta rakagildi og samsvarandi hámarks þurri rúmþyngd jarðefna. Mynd númer 26 sýnir hvaða áhrif rakainnihald hefur á þjöppunareiginleika jarðefnis.



Lágt rakainnihald:	Hagstæðasta rakainnihald:	Hátt rakainnihald:
Mikill núningur milli korna	Bestu þjöppunareiginleikar	Hár póruþrýstingur
Lág rúmþyngd	Hámarks rúmþyngd	Lág rúmþyngd

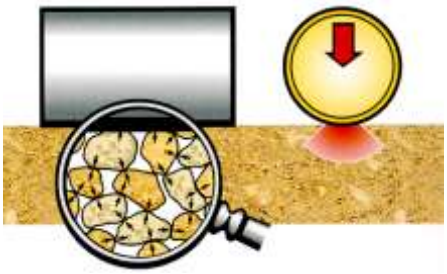
Mynd 26. Áhrif rakainnihalds á þjöppunareiginleika jarðefnis.

4.2.3 Þjöppunaraðferð

Tvær mismunandi aðferðir eru einkum notaðar við þjöppun á jarðefnum, en þær eru þyngdarþjöppun (statísk) og titringsþjöppun (dýnamísk).

4.2.3.1 Þyngdarþjöppun

Eins og nafnið gefur til kynna byggir þyngdarþjöppun á notkun tækja sem aðeins nota sína eigin þyngd til að setja þrýsting á ákveðið svæði og þannig þrýsta niður jarðefninu sem undir er. Ekki er mikið hægt að hafa áhrif á þrýstinginn að öðru leyti en því að breyta þyngd tækisins eða snertifleti á milli tækis og jarðefnis. Með þyngdarþjöppun næst venjulega ágæt þjöppun í efri lögum efnisins, en ekki í þeim neðri. Kraftayfirfærslur milli jarðefniskorna við þjöppunina er þannig háttað að spennudreifingin verður talsvert mikil þannig að þjöppunarþrýstingurinn verður lítill sem enginn á tiltölulega litlu dýpi.



Mynd 27. Kraftayfirfæslur milli snertiflata jarðefniskorna.[47]

4.2.3.2 Titringsþjöppun

Titringsþjöppun byggir á notkun tækja sem beita bæði þyngdar- og titringsálagi á jarðefnið. Mjög algengt er að nota slík þjöppunartæki í dag og má segja að það sé orðin hin hefðbundna aðferð við þjöppun. Titringstæki senda frá sér hraða runu högga niður í jarðefnið og koma kornum þess á hreyfingu með þrýstibylgjum. Titringurinn lágmarkar núning á milli korna og auðveldar þannig til muna við alla endurröðun jarðefniskorna sem leiðir svo til minnkandi holrýmis og hámarks rúmþyngdar. Með þessu fæst einnig aukinn fjöldi snertiflata milli korna sem eykur til muna stöðugleika jarðefnisins og styrk.

Mynd 28. Áhrif tiringsþjöppunar á jarðefniskorn.[48]

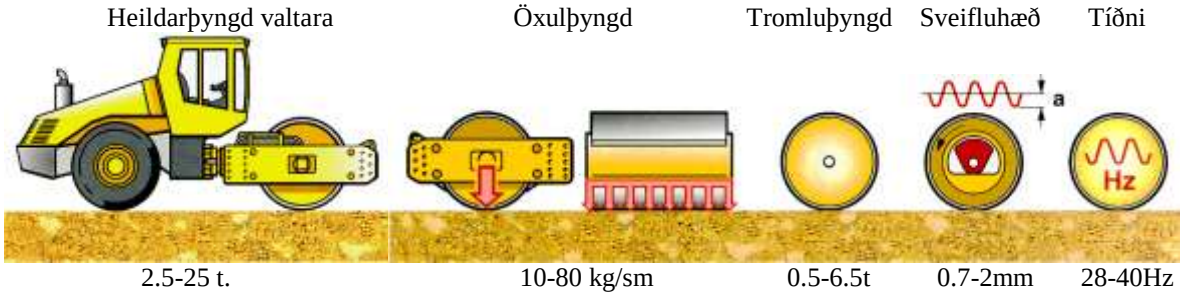
Í völturum er titringur myndaður með því að láta hjámiðjuþyngd (óreglulega lagað lóð) snúast um öxul inni í tromlunni. Framleiðendur hafa stöðugt verið að þróa titringsáhrifin þannig að í dag er hægt, með mikilli nákvæmlega, að stilla hversu mikið tækið þjappar jarðefnið, þ.e. þjöppunarorkuna. Til þess að fá þessa nákvæmni hafa þeir m.a. breytt fyrirkomulagi hjámiðjuþyngdarinnar inni í tromlunni á þann veg að setja tvö lóð í stað eins, nota tvo öxla í stað eins og láta

[47] Oddur Sigurðsson. 2001
[48] Oddur Sigurðsson. 2001

jafnvel lóðin snúast í sitthvora áttina, þ.e. á móti hvort öðru. Með slíkri tækni er hægt að stilla hvort titringur er lóðréttur, láréttur eða bland beggja, en þjöppunarorkan er mest í alveg lóðréttum titringi tromlunnar og minnst í alveg láréttum.

4.2.3.3 Þjöppunarálag

Þjöppunarálag (e.compaction effort) á jarðefni ræðst af þremur þáttum; þjöppunaraðferð, orkunni sem beitt er á það og rúmmáli þjappaðs efnis. Helstu kennistærðir titringsvaltara á þjöppunarálagi eru sýndar á mynd 29. Fyrir gefna þjöppunaraðferð, þ.e. ákveðna tegund af valtara, er þjöppunarálag aukið með aukningu á orku, sem er ýmist aukin eða minnkuð eftir rúmmáli jarðefnisins.



Mynd 29. Helstu kennistærðir titringsvaltara.

Þykkt á útlögðu jarðefni við þjöppun skiptir einnig máli þar sem hún hefur áhrif á rúmþyngd. Þjöppunarspennur eru alltaf hæstar við yfirborð þjappaða lagsins og minnka við aukið dýpi gegnum lagið. Með því að leggja efnið út í hæfilega þykkum lögum og beita á það hæfilegri fyrirfram ákveðinni þjöppunarorku, má stuðla að úrvals þjöppun og hækkun á þurri meðal rúmþyngd lagsins. Val á tækjum til þjöppunar, lagþykktum, hraða og fjölda yfirferða er fyrst og fremst háð þjöppunareiginleikum jarðefnisins. Einnig er breytilegt hver fyrirskrifuð þjöppun er, þar sem misjöfn mannvirki krefjast mismunandi grundunar.

Nútímavaltarar eru afar öflug þjöppunartæki sem flytja mikla orku niður í jarðefnið og er því hæglega, ef ekki er vel að gáð, hægt að ofþjappa efnið. Það gerist helst eftir að holrými hefur verið lágmarkað, við það að þjöppunarspennurnar fara upp fyrir skerstyrk efnisins og í því myndast þá yfirspenna. Umfram póruþrýstingur vegna vatns myndast og varanlegar formbreytingar geta átt sér stað. Lausleiki á yfirborði jarðefnis, eftir yfirferð valtara, er til marks um slíka ofþjöppun, sérstaklega í núningsefnum. Þegar hætta er á að þetta geti gerst er oft brugðið á það ráð að fara síðustu yfirferðirnar á valtaranum með láréttum eða engum titringi. Þannig er komið í veg fyrir að efnið skemmist þegar verið er að tryggja góða þjöppun efst í laginu.

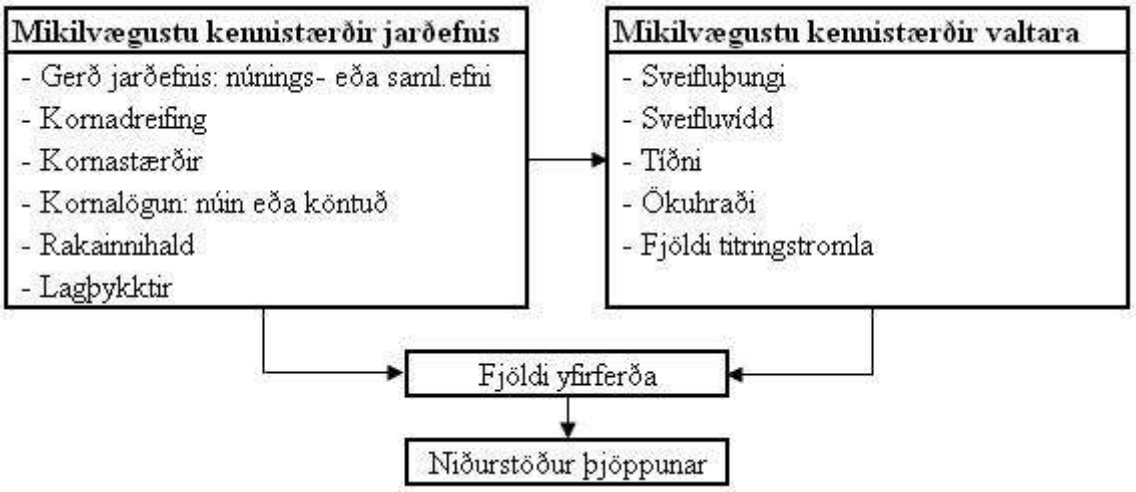
4.2.4 Undirlag

Gæði þjöppunar á jarðefnum er einnig háð undirlagi þeirra, þ.e.a.s. stífleika jarðgrunnsins eða efnisins sem er fyrir neðan viðkomandi efnislag. Ef undirlagið er eftirgefanlegt er ómögulegt að ná fram fullri þjöppun. Þekkt dæmi um þetta er

þegar fyllingar eru lagðar á mýrarsvæði en í þeim tilvikum er erfitt að ná fram góðri þjöppun í fyrsta lagi fyllingarinnar.

4.2.5 Samantekt

Umfjöllunina hér að framan má draga saman í eina töflu þar sem allir helstu áhrifsþættir þjöppunar eru dregnir saman.



Tafla 13. Helstu áhrifaþættir þjöppunar.

4.3 Staðlar um grundun og jarðtækni

Í allri mannvirkjahönnun styðjast menn á einn eða annan hátt við staðla, einskonar leikreglur, sem byggja á mikilli uppsafnaðri reynslu af mannvirkjagerð yfir langan tíma. Sjálfsagt hafa einhver ákvæði staðlanna komið fyrst fram sem einfaldar þumalsputtareglur sem reyndust vel og héldu velli, á meðan að önnur hafa verið samin að mjög vel athuguðu máli út frá niðurstöðum fjölmargra prófanna.

Hugmyndin með notkun staðla hefur dálítið verið að breytast á undanförnum árum, frá því að vera strangir hönnunarskilmálar, yfir í það að vera rit sem setur fram lágmarkskröfur. Með þessu er talið að frelsi hönnuða, til að nota þær aðferðir sem þeir telja hæfa best hverju sinni, sé ekki heft.[49] Í nútímastöðlum er því gerður greinarmunur á ákvæðum sem ber skilyrðislaust að uppfylla og ákvæðum sem eru leiðbeinandi, en slíkar leiðbeiningar eru taldar eiga heima í viðaukum staðlanna (e.informative annexes) eða verklýsingum og gefa þar nánari kröfur.

Vinna við samræmda stöðlun á sviði þolhönnunar hófst hjá Evrópubandalaginu (EB) stuttu fyrir 1980, fyrst á sviði steinsteypu og stáls, en á sviði jarðtækni og grundunar 1981.[50] Síðan þá hafa málin ætíð verið að þróast, skref fyrir skref og hver þjóð leitast við að koma sér upp hentugum stöðlum sem eiga vel við þeirra aðstæður. Á Íslandi tóku nýir staðlar gildi á árunum 1989-1990 á öllum sviðum

[49] Ingunn Sæmundsdóttir. 2002
[50] Ingunn Sæmundsdóttir. 2002

þolhönnunar og var þá um að ræða danska staðla (DS) frá 1982, með misjafnlega ítarlegum, íslenskum sérákvæðum. Á árunum 1991-1994 komu síðan evrópskir forstaðlar (ENV) sem Evrópubandalagið gaf út, til umsagnar, með gildistíma í þrjú ár. Var mælst til að aðildarríki notuðu forstaðlana til reynslu á gildistímanum og gerðu við þá þjóðarskjöl, sem áttu að tryggja að forstaðlarnir virkuðu í samræmi við byggingarlög, reglugerðir og öryggiskröfur, viðkomandi lands. Gildistíminn rann síðan út án þess að vinnu við endurskoðun þeirra væri lokið.

Í Danmörku voru nýir staðlar teknir í gildi 1998 og þeir eldri felldir úr gildi 1999 eftir eins árs aðlögunartíma. Þar með voru þeir staðlar sem Byggingareglugerðin vísaði íslenskum hönnuðum í, orðnir úreltir í Danmörku. Sökum þessa höfðu hönnuðir áhyggjur af réttarstöðu sinni, þar sem ábyrgð var óljós ef þeir notuðu aðra staðla en kveðið var um í Byggingareglugerð. Einnig leiddi jarðskjálftinn á Suðurlandi sumarið 2000 það í ljós að brýnt var að endurskoða íslenska staðla með tilliti til jarðskjálftahönnunar. Eldri staðlar voru líka orðnir tíu ára gamlir og dönsku staðlarnir sem þeir vísuðu í orðnir tuttugu ára gamlir, þannig að sannarlega var kominn tími til að endurnýja þá.

Þann 1. júlí 2002 tóku tveir „staðlapakkar“ gildi hér á landi og með tilkomu þeirra höfðu hönnuðir nú frjálst val um hvorn þeirra þeir notuðu við hönnun mannvirkja, í báðum tilfellum töldust kröfur Byggingarreglugerðar uppfylltar. Einungis var lögð áhersla á að hver staðall tilheyrði heildstæðum staðalpakka, þannig að t.d. Eurocode 7 (jarðtækni- og grundunarstaðall) yrði notaður með öðrum Evrópustöðlum og sambærilegur danskur staðall (DS 415) með öðrum dönskum stöðlum, en ekki blanda staðlapökkunum saman. Um er að ræða eftirfarandi tvo staðlapakka:

1. Evrópska forstaðla með íslenskum þjóðarskjölum.
2. Íslenska staðla, sem eru danskir staðlar ásamt íslenskum sérákvæðum.

Þar með tóku nýir íslenskir staðlar (ÍST) við þeim sem eldri voru og auk þess opnaðist sá möguleiki að velja evrópsku forstaðlana um þolhönnun (ENV) í stað íslenskra. Þannig var stigið eitt skref á langri leið til gildistöku væntanlegra evrópskra þolhönnunarstaðla (EN), en markmið aðildarríkja Evrópubandalagsins er að láta þá leysa þjóðarstaðla af hólmi innan fárra ára.

Óljóst er hvenær von er á að endurskoðun evrópsku forstaðlanna (ENV) ljúki og þeir verði loksins staðfestir sem Evrópustaðlar (EN). Nokkur atriði eru það umdeild að það getur enn verið talsverður tími í það. Því er líklegt að þeir staðlapakkar sem tóku gildi 2002, ásamt vali um hvorn menn vilja nota, verði notaðir áfram í allnokkur ár.

4.4 Verklýsingar fyrir þjöppun

Þrjár tegundir af verklýsingum eru einkum notaðar fyrir þjöppun jarðefna í dag, í fyrsta lagi svokölluð aðferðarverklýsing (e.method specification), í öðru lagi lokaárangursverklýsing (e.end-result specification) og í þriðja lagi sambland þessara tveggja. Svo hefur það færst í vöxt að verktaka eru gefnar frjálsar hendur hvernig hann háttar þjöppunarferlinu, að því tilskildu að það sé hægt að sýna fram á, með prófunum úti í mörkinni, að niðurstaðan sé sambærileg við það sem kveðið er á um í lokaárangursverklýsingu. Slíkt þarf þó alltaf að fá sérstakt samþykki hönnuðar eða eftirlitsaðila.

4.4.1 Aðferðarverklýsing

Í aðferðarverklýsingu eru nákvæmar reglur og lýsingar á þjöppunarverkháttum tilgreindar og ef þeim er rétt fylgt eftir á að fást nægjanleg þjöppun á hverjum stað. Þau atriði sem helst er kveðið á um er tegund þjöppunartækis, fjöldi yfirferða, ökuhraði valtara, tíðni titrunar, lagþykktir jarðefnis og rakainnihald þess. Leitast er eftir að lýsa breiðu vali á þjöppunarvinnslu og með yfirgripsmiklum töflum má finna skipulega, öll viðeigandi atriði fyrir sérhverjar aðstæður. Jarðefnum er skipt í nokkra flokka og eru gefnar mismunandi lýsingar fyrir hvern flokk, þannig að þjöppun sé tryggð hverju sinni.

4.4.2 Lokaárangursverklýsing

Í lokaárangursverklýsingu er lágmarksgildi á þjöppunargráðu ákveðið og það síðan sannreynt með samanburði á rannsóknarstofuprófi og prófi sem gert er á jarðefninu á notkunarstað. Í flestum löndum er algengast að lokaárangurverklýsing sé notuð, sérstaklega í stórum og umfangsmiklum verkum.

4.4.3 Aðferðar- og lokaárangursverklýsing

Í blöndu af aðferðar- og lokaárangursverklýsingu er lámarksgildi sett fram um þjöppunargráðu ásamt ákvæðum um tegund þjöppunartækis, lagþykktir jarðefnis o.fl. Þjöppunargráðan er síðan sannreynd á sama hátt og áður.

4.5 Íslenskar verklýsingar

Við útboðs- og verklýsingagerð um grundun mannvirkja á Íslandi er einkum stuðst við tvær almennar verklýsingar sem byggja að nokkru á eldri, úreltum grundunarstöðlum, þ.e. ÍST 15:1990 með sérákvæðum og eldri útgáfu af Eurocode 7. Um er að ræða annarsvegar verklýsingu Vegagerðarinnar, Alverk ´95 sem einkum er notuð í vegagerð og hinsvegar verklýsingar Rannsóknarstofnunar Byggingariðnaðarins (Rb), ýmis Rb blöð, sem fjalla um grundun húsa.

4.5.1 Alverk ´95

Verklýsingin Alverk ´95 er útbúin og gefin út af Vegagerðinni og í henni er að finna allar almennar upplýsingar um vega- og brúargerð, allt frá aðstöðusköpun til lokafrágangs. Um er að ræða samblöndu af aðferðar- og

lokaárangursverklýsingu þar sem mælt er með vissum aðferðum við framkvæmdina og kveðið er á um að sérstökum prófunum skuli beitt.

Í verklýsingunni eru gerðar kröfur til eftirfarandi fimm atriða fyrir þjöppun jarðefni í fyllingum og/eða burðarlögum:

1. Ákvörðun á fjaðurmótstöðustuðlinum E_2.
2. Ákvörðun á hlutfalli fjaður- og heildarmótstöðu yfirborðs, E_2/E_1.
3. Ákvörðun á þjöppunargráðu.
4. Ákvörðun á hæðarmismuni milli yfirferða valtara.
5. Fyrirskrift um lagþykktir og fjölda yfirferða valtara að ákveðinni þyngd.

Fjórar tegundir prófana (sjá kafa 5.) liggja að baki kröfum 1-4, þ.e. plötupróf til ákvörðunar stuðlanna E_1 og E_2, rúmþyngdarmæling borin saman við „Proctor“ próf til ákvörðunar á þjöppunargráðu og hallamæling til ákvörðunar á hæðarmismuni milli yfirferða valtara. Fimmta krafan er mest notuð af ofangreindum aðferðum við eftirlit á þjöppun,[51] en hún er byggð á eldri mælingum og reynslu. Það hefur samt sýnt sig að þó ákveðin lagþykkt og fjöldi yfirferða sé fyrirskrifuð er það ekki trygging fyrir því að þjöppun takist vel. Því eru alltaf einhverjar prófanir nauðsynlegar til þess að sannreyna þjöppunina.

Mismunandi aðferðir við þjöppun eru tilgreindar í verklýsingunni fyrir mismunandi efnislög í vegagerð, þ.e. fyllingar og efri- og neðri burðarlög. Hér á eftir má sjá hvað Alverk ´95 hefur að segja um helstu tilhaganir sem eru gerðar til hvers lags. Kröfurnar varðandi atriðin fimm í verklýsingunni eru svo sýndar í töflu 17, ásamt helstu kröfum verklýsinga Rb.

4.5.1.1 Fyllingar

> „Þjappa skal undirbyggingu, svo og undirlag hennar ef nauðsyn krefur, eins og verklýsing kveður á um með tæki sem samþykkt hefur verið til þeirra hluta. Fá skal samþykki eftirlitsins á tillögum um aðferðir þær og tæki, sem nota á við þjöppun hvers jarðvegsflokks í undirlagi og fyllingu. Tillögurnar skulu taka til tegunda tækja, fjölda yfirferða og lagþykkta miðað við óþjappað efni. Einnig skulu gerðar þjöppunartilraunir, studdar á prófunum í rannsóknarstofu eftir því sem eftirlitið krefst og með þeim sýnt fram á að með viðkomandi þjöppunartilhögun megi ná tilskilinni þjöppun.
>
> Fínkorna efni skal þjappa strax og þau eru lögð út
>
> Þegar þjöppun fer fram skal leitast við að rakastig malar, með jafnri kornadreifingu, og fínkorna efna sé sem næst lægra gildinu af hagstæðasta rakastigi (W_{opt}) eða 100% mettunarraka að frádregnum 3% ($W_{mettað} - 3\%$). Þjöppun skal haldið áfram þar til náðst hefur sú þjöppun sem krafist er um alla fyllinguna“.[52]

[51] Þórir Ingason og Bjarni Bessason, BUSL Burðarlaganefnd. 1997
[52] Alverk´95. 1995 (grein 33.c)

Uppfylla skal þjöppunarkröfur plötuprófs, rúmþyngarmælingar, hallamælingar eða annarra viðurkenndra aðferða eftir nánari fyrirmælum. Kröfur þessar eru ekki sambærilegar innbyrðis og er óheimilt að nota eina aðferð í stað annarrar nema með sérstöku leyfi eftirlitsins.

4.5.1.2 Neðra burðarlag

„Neðra burðarlag skal þjappa samkvæmt fyrirmælum með tæki, sem samþykkt hefur verið af eftirlitinu til þeirra hluta. Skal leggja burðarlagsefni í lögum, einu eða fleiri, hæfilega þykkum til þess að tilskilin þjöppun náist í burðarlaginu. Fá skal samþykkt eftirlitsins á tilhögum um aðferðir þær, sem nota á við þjöppun burðarlagsins. Tillögurnar skulu taka til tegunda tækja, fjölda yfirferða og lagþykkta miðað við óþjappað efni. Framkvæma skal þjöppunartilraunir, studdar prófunum í rannsóknarstofu, eftir því sem við á og eftirlitið krefst og sýna fram á, að með framkvæmd í samræmi við tillögurnar megi ná þeirri þjöppun sem krafist er. Ef þjöppun er háð raka efnisins skal þjappa efni vott, þ.e. við lægra gildið af eftirfarandi tveimur rakastigum:

1) Hagstæðasta rakastigi samkvæmt Proctor-prófi (W_{opt}).
2) Rakastig, sem er þremur prósentustigum lægra en mettunarraki samkvæmt Proctor-prófi ($W_{mettað}$ -3%).

Ætíð skal haga þjöppun þannig að hún valdi ekki óeðlilega miklu niðurbroti á efni því sem þjappa skal: Ef krafist er mælingar á þjöppun skal mæla með plötuprófi (E2), rúmþyngdarmælingu eða öðrum viðurkenndum aðferðum eftir því sem við á samkvæmt kröfum sérverklýsingar/útboðslýsingar og sem samþykktar eru af eftirlitinu“.[53]

Samkvæmt Alverk´95 fæst venjulega góð þjöppun á neðri burðalögum með lagþykktum, fjölda yfirferða og tækjum eins og sýnt er í eftirfarandi töflu. Samræma þarf hraða tækis og fjölda yfirferða og er almennt miðað við að ekki sé farið hraðar en 1,2 km/klst.

Tæki	Lagþykkt (m)	Fjöldi yfirferða
10 tonna titringsvaltari	0,80	6
5 tonna titringsvaltari	0,40	6
0,5 tonna titringsvaltari	0,30	4
0,1 tonna titringsvaltari	0,20	4
10 tonna bíll	0,25	6

Tafla 14. Leiðbeinandi gildi á þyngd þjöppunartækis, lagþykkt og fjölda yfirferða fyrir neðra burðarlag.[54]

4.5.1.3 Efra burðarlag

Sama tilhögun á þjöppun gildir um efra burðarlag og það neðra, þ.e. grein 52.c. Að auki er eftirfarandi sérstaklega tekið fram: „Efra burðarlag skal þjappa eins

[53] Alverk´95. 1995 (grein 52.c)
[54] Alverk´95. 1995 (grein 52.b)

og sérverklýsing/útboðslýsing kveður á um með tæki sem samþykkt hefur verið af eftirlitinu til þeirra hluta“.[55] Uppfylla skal þjöppunarkröfur ýmist úr plötuprófi, rúmþyngarmælingu, hallamælingu eða öðrum viðurkenndum aðferðum eftir nánari fyrirmælum. Kröfur þessar eru ekki sambærilegar innbyrðis og er óheimilt að nota eina aðferð í stað annarrar nema með sérstöku leyfi eftirlitsins.

Samkvæmt Alverk´95 fæst venjulega góð þjöppun á neðri burðalögum með lagþykktum, fjölda yfirferða og tækjum eins og sýnt er í eftirfarandi töflu. Samræma þarf hraða tækis og fjölda yfirferða og er almennt miðað við að ekki sé farið hraðar en 1,2 km/klst.

Tæki	Lagþykkt (m)	Fjöldi yfirferða
5 tonna titringsvaltari	0,20	4
5 tonna titringsvaltari	0,10	2
0,1 tonna titringsplata	0,20	4
10 tonna bíll	0,25	6

Tafla 15. Leiðbeinandi gildi á þyngd þjöppunartækis, lagþykkt og fjölda yfirferða fyrir efra burðarlag.[56]

4.5.2 Rb blöð

Rannsóknarstofnun Byggingariðnaðarins hefur útbúið ýmsar sjálfstæðar verklýsingar tengdar mannvirkjagerð og kallast þær einu nafni Rb blöð. Í nokkrum þeirra er að finna almennar upplýsingar um grundun húsa og lýsingar á þeim þjöppuprófunum sem Rannsóknarstofnun Byggingariðnaðarins stendur fyrir. Um er að ræða samblöndu af aðferðar- og lokaárangursverklýsingum, þar sem mælt er með vissum aðferðum við framkvæmdina og kveðið á um að sérstökum prófunum skuli beitt.

Samkvæmt Rb blöðum fæst venjulega góð þjöppun á húsfyllingum með lagþykktum, fjölda yfirferða og tækjum eins og sýnt er í eftirfarandi töflu. Samræma þarf hraða tækis og fjölda yfirferða og er almennt miðað við að ekki sé farið hraðar en 1,2 km/klst.

Tæki	Lagþykkt (m)	Fjöldi yfirferða
10 tonna titringsvaltari	0,8	6
5 tonna titringsvaltari	0,4	6
0,5 tonna titringsvaltari	0,3	4
0,1 tonna titringsvaltari	0,2	4
15 tonna jarðýta	0,25	6
10 tonna bíll	0,25	6

[55] Alverk´95. 1995 (grein 53.c)
[56] Alverk´95. 1995 (grein 53.b)

Tafla 16. Leiðbeinandi gildi á þyngd þjöppunartækis, lagþykkt og fjölda yfirferða fyrir húsfyllingar.[57]

Um margra ára skeið hefur plötuprófið nær eingöngu verið notað á höfuðborgarsvæðinu við eftirlitsmælingar á fyllingum. Úti á landi er erfiðara að nota það, vegna fjarlægða og þar er því gripið til hallamælinga og rúmþyngdarmælinga. Niðurstöður rúmþyngdarmælingar þarf, eins og áður greinir, alltaf að bera saman við rannsóknarstofupróf („Proctor“ eða hristiborðspróf) og sér Rannsóknarstofnun byggingariðnaðarins um þau. Kröfur um niðurstöður áðurnefndra prófa eru teknar saman í töflu 17.

4.5.3 Þjöppunarkröfur Alverks´95 og Rb blaða.

Í töflu 17 eru helstu þjöppunarkröfur áðurnefndra verklýsinga sýndar. Þar má finna æskileg gildi á stuðlinum E_2 og hlutfall stuðlanna E_2/E_1 úr plötuprófi. Einnig eru þar æskileg gildi á samanburði þurrar rúmþyngdar, mældri með rúmþyngdarmælingu úti í mörkinni og hámarks þurrar rúmþyngdar, mældri annarsvegar með „Proctor“ prófi og hinsvegar með svokölluðu hristiborðsprófi. Í þessu riti er þjöppunargráða táknuð með Dp þar sem „Proctor“ próf á í hlut en Dr þar sem hristiborðsprófið er viðmið. Þá er í töflunni að finna leyfileg frávik á hagstæðasta rakastigi (Wopt) og leyfilegan prósentumun milli næst síðustu og síðustu yfirferðar valtara sem mældur er með hallamælingu.

	Vegfyllingar Alverk	**Neðra burðarlag Alverk**	**Efra burðalag Alverk**	**Fylling undir hús Rb blöð**
E_2	>100 MPa	100-110 MPa	100-120 MPa	80-120 MPa
E_2/E_1	3,5-4,0	2,5-3,5	2,5-3,5	2,0-2,3
Dp	95-100%	100%	103%	////
Dr	////	////	////	>80%
W_{Opt}	+/- 3%	+/- 2%	+/- 2%	////
Hallam.	12%	10%	////	////

Tafla 17. Helstu þjöppunarkröfur Alverks´95 og Rb blaða.

Í Alverk´95 eru einnig settar fram kröfur um stöðugleika, burð og styrkleika út frá svokölluðum CBR og Bg prófunum. Einnig er þar að finna umfjöllun um eftirlitsprófanir og verklýsingar fyrir bikbundin burðarlög, þ.e.a.s. froðumalbik, þeytumalbik, biksmygið púkk o.fl. Til frekari fróðleiks um þessa þætti er því bent á Alverk´95.

[57] Rannsóknarstofnun Byggingariðnaðarins. 1980

5. Helstu mæliaðferðir á þjöppun

5.1 Almennt

Grundun á jarðvegi kemur mikið við sögu í allri mannvirkjagerð, hvort sem um er að ræða húsbyggingar, vegi, virkjanir eða hvað svo sem manninum dettur í hug að reisa. Það er því mikilvægt að vitneskja um styrk og þjöppunarhæfni jarðefna liggi fyrir ef mannvirkið á að standast tímans tönn og allar tilsettar kröfur.

Byggingartæknifræðingar og -verkfræðingar meðhöndla jarðefni eins og hvert annað byggingarefni og því þurfa þeir að hafa allar helstu upplýsingar um eiginleika jarðefnisins til þess að notkun þess verði sem árangursríkust. Auðvelt er að nálgast grunnupplýsingar um steypu, stál og timbur í góðum handbókum og uppflettiritum sem byggja á fjölmörgum tilraunum sem menn hafa gert og margra áratuga reynslu. Þessu er öðruvísi farið með jarðefni, eiginleikar þeirra eru háðir svo mörgum breytilegum þáttum að það þarf í hverri framkvæmd að gera á þeim prófanir til þess að grunnupplýsingar fáist. Þessar prófanir eru ýmist gerðar á tilraunastofum eða úti í mörkinni, eftir því sem við á og eftir því hvaða þætti er verið er að meta.

Til eru ýmsar aðferðir til að meta þjöppun jarðvegs og byggja þær á mismunandi þáttum. Í þessum kafla er fjallað um algengar mæliaðferðir sem notaðar eru úti í mörkinni og um gagnsemi þeirra. Fyrst er þó fjallað um tvö mikilvæg rannsóknarstofupróf, „Proctor“ próf og hristiborðspróf. Þessi tvö próf eru notuð til þess að búa til kvarða fyrir niðurstöður mikils hluta prófa úti í mörkinni og því er mikilvægt að gera þeim góð skil. Megináhersla er þó lögð á umfjöllun um

svokallað plötupróf og falllóðspróf. Lauslega er fjallað um þjöppumæla í völturum, en þeir eru teknir nánar fyrir í sérstakri umfjöllun í 7.kafla.

Helstu eftirlitsmælingar með þjöppun úti í mörkinni eru eftirfarandi:[58]

1. Rúmþyngdarmælingar.
    - Sandkeilupróf.
    - Vatnsblöðrupróf.
    - Sívalningsrúmmálsmæling.
    - Ísótópamælingar (Troxler).
2. Sigmælingar.
    - Plötupróf .
    - Falllóðspróf.
    - Lítil falllóðspróf.
    - Hallamæling.
3. Aðrar mælingar.
    - Þjöppumælar í völturum.
    - Prófvöltun.
    - Þrýstimælir.

5.2 Kvörðunarpróf á rannsóknarstofu

5.2.1 „Proctor“ próf

Prófið notast við það að þurr rúmþyngd jarðefnis er háð vatnsinnihaldi þess og nýtist það annarsvegar til þess að ákvarða mestu þurra rúmþyngd (M.D.D.) (e.maximum dry density) efnsins og hinsvegar til þess að finna við hvaða vatnsinnihald það þjappast best. Þetta vatnsinnihald er kallað hagstæðasta rakainnihald (O.M.) (e.optimum moisture). Þjöppunareiginleikarnir eru ákvarðaðir með þjöppun án titrun (statískri), þ.e. efnið er þjappað með falllóði í stálsívalningi með um eins líters rúmmáli.

[58] Forssblad, Lars. 1981

Prófið er kennt við verkfræðinginn R.R. Proctor sem fann það upp í kringum 1930. Með rannsóknum sínum sýndi Proctor fram á að árangur þjöppunar er fyrst og fremst háður þjöppunarorkunni og vatnsinnihaldi efnisins sem þjappa skal.[59] Hann fann út að rúmþyngd steinefnis, eftir ákveðna þjöppun, er háð vatnsinnihaldi þess þegar þjöppun fer fram og að við ákveðið vatnsinnihald nær efnið mestu mögulegri þjöppun, þ.e. hæstu þurru rúmþyngdinni. Þetta hagstæðasta rakainnihald er mismunandi eftir jarðefnum og mjög háð kornasamsetningu þeirra.

Fljótlega eftir að Proctor kom fram með prófið var það staðlað og fékk almenna viðurkenningu og var aðferðin þá nefnd „Standard Proctor“. Framkvæmd prófsins er þannig[60] að jarðefnið sem kanna á er fyrst undirbúið á sérstakan hátt. Reynt er, með ákveðnum hætti, að búa til sýni sem endurspeglar jarðefnið vel í heild sinni. Sýninu er komið fyrir í sívölu stálmóti sem er 10 sm í þvermál, samkvæmt ákveðnum reglum. Því næst er það þjappað með falllóði sem er um 2,27 kg á þyngd og fellur úr 30,5 sm hæð ofan við efnið. Á enda falllóðsins er hringlaga stálplata sem er 5 sm í þvermál. Eftir hvert högg snýst mótið með sýninu hluta úr hring og tryggir þannig jafna þjöppun. Sýnið er sett í mótin í þremur lögum, sem hvert er þjappað með 25 höggum frá falllóðinu. Heildarþjöppunarorkan sem sýnið fær við prófunina er 596 kJ/m^3.

Vegna þess hve þjöppunarorkan í „Standard Proctor“ aðferðinni er oft minni en þjöppunarorkan sem fæst með nútímatækjum úti í mörkinni hefur verið sett fram önnur samskonar aðferð, þ.e. „Modified Proctor“. Aðferðirnar eru mjög svipaðar og byggja á nákvæmlega því sama. Munurinn er einungis fólgin í þjöppunarorkunni sem beitt er á efnið. Efnið er þjappað í fimm lögum í „Modified“ aðferðinni með 4,54 kg falllóði úr 45,7 sm hæð í sama móti og í „Standard“ aðferðinni. Eins og áður er hvert lag þjappað 25 sinnum. Heildarþjöppunarorkan sem fæst úr þessu er 2682 kJ/ m^3. Taflan hér fyrir neðan sýnir helstu stærðir við báðar aðferðirnar.

Aðferð	Standard Proctor	Modified Proctor
Þyngd á hamri	2,27 kg	4,54
Fallhæð hamars	30,5 sm	45,7 sm
Fjöldi högga á lag	25	25
Fjöldi laga	3	5
Heildarþjöppunarorka	596 kJ/m^3	2682 kJ/m^3

Tafla 18. Samanburður á helstu stærðum „Standard Proctor“ og „Modified Proctor“ aðferða.

Til þess að ákvarða hagstæðasta vatnsinnihald efnisins þarf að búa til línurit sem sýnir rúmþyngdina sem fall af rakainnihaldi. Til þess að það sé unnt þarf að þjappa efnið samkvæmt aðferð „Proctors“ við þrjú til fimm mismunandi

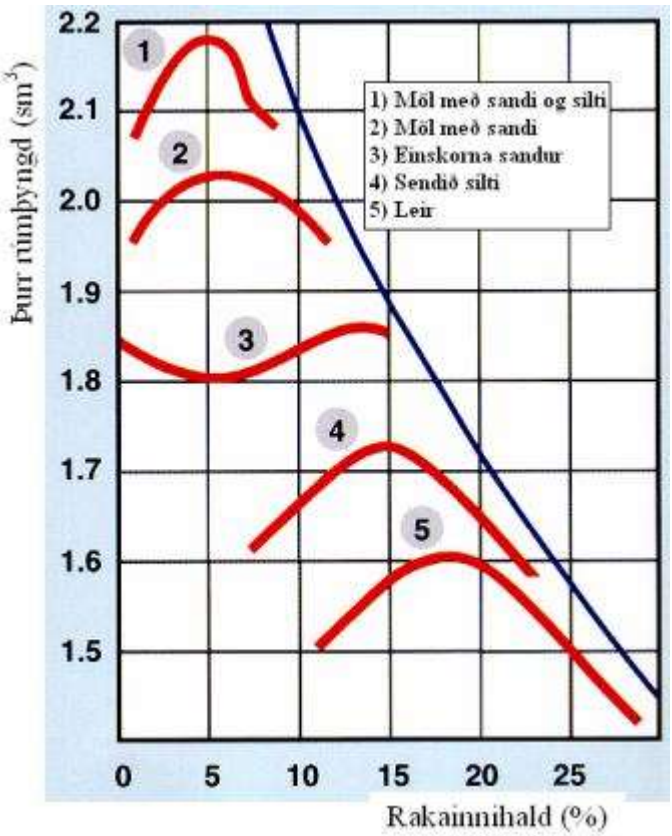
[59] Bowles, Josep E. 1985
[60] Coduto, Donald P.1999

rakastig. Efnismagn í rannsóknina þarf að vera um 15-18 kg alls af þurru efni og má það vera hreyft.[61] Korn stærri en 19 mm þarf að skilja frá til þess að prófið virki eðlilega. Úr heildarsýninu eru síðan tekin minni prófsýni sem skulu vera um 3 kg hvert. Skiptinguna þarf að gera í sérstöku tæki sem nefnist deilir (splittari). Prófsýnin eru sett í plastbakka með þekktri þyngd, hvert fyrir sig og síðan eru bakkarnir vigtaðir og nákvæmt efnismagn hvers sýnis ákvarðað. Næst er vatni blandað í sýnin þannig að þrjú til fimm sýni fáist með rakainnihald beggja vegna við áætlað hagstæðasta rakastig. 2-3% rakamunur er hafður á milli sýna og er reynt að jafna vatninu vel um sýnið.

Áður en þjöppun hefst er sívalningsmótið vigtað tómt og þyngd þess skráð. Prófsýnin eru síðan þjöppuð í því, eitt af öðru, með annaðhvort „Standard“ eða „Modified“ aðferð. Þegar sýnin eru þjöppuð er settur kragi á sívalningsmótið til þess að hægt sé að fylla mótin upp á barma. Eftir þjöppun er kraginn fjarlægður og yfirborð efnisins jafnað vandlega við efri brún mótsins. Þetta er vigtað og vot rúmþyngd efnisins ákvörðuð. Hluti af sýninu er síðan losaður úr mótinu í bakka með þekktri þyngd og vigtað. Síðan er það þurrkað í ofni við 105°C, vigtað aftur að því loknu og vatnsinnihald sýnisins ákvarðað.

Niðurstöður mælinganna eru færðar inn á línurit, þurr rúmþyngd á móti rakainnihaldi. Á línuritinu má finna hagstæðasta rakainnihaldið þar sem þurra rúmþyngdin er mest. Oft er einnig teiknuð upp fullmettislína sem sýnir mörkin þar sem allar holur jarðefnisins mettast af vatni. Til ákvörðunar mettilínu þarf að ákvarða kornarúmþyngd efnisins með svokallaðri „pyknometer“ aðferð.

[61] Oddur Þórðarson. (munnleg heimild 4. nóvember 2004)



Mynd 30. Raka-þéttleika línurit, sýnir samband milli hagstæðasta rakainnihalds (γ_d), þurrar rúmþyngdar (w) nokkurra mismunandi jarðefna og 100% mettunarlínu.

„Proctor“ prófið er notað til þess að kynnast þjöppunareiginleikum jarðefna sem síðan nýtist við eftirlit með þjöppun þess í vegum, stíflugörðum, húsgrunnum og hvar sem þau kunna að vera nýtt. Þar er það notað til grundvöllunar niðurstaðna rúmþyngdaprófanna sem gerðar eru á úti í mörkinni. Í því tilliti er reiknuð út svokölluð þjöppunargráða (táknuð hér með D_p) en hún gefur upp í prósentum hversu góð þjöppunin er úti í mörkinni miðað við það sem hún best getur orðið miðað við hagstæðasta rakastigið (jafna 5-1).

$$D_p = \frac{\gamma_d}{\gamma_{eOpt}} \cdot 100 \qquad (5\text{-}1)$$

þar sem:

γ_d = þurr rúmþyngd, mæld með rúmþyngdarprófi úti í mörkinni.
γ_{dOpt} = hámarks þurr rúmþyngd, mæld með „Proctor“.

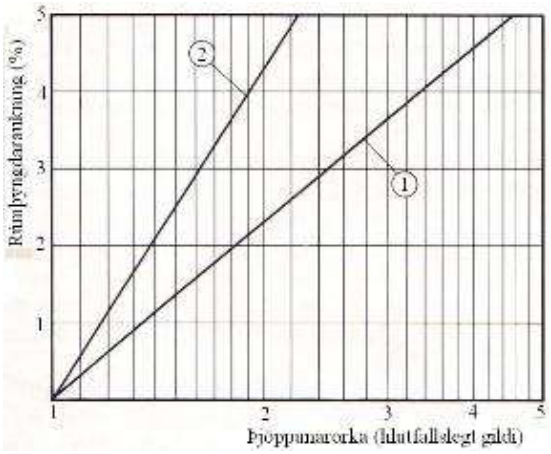
Mismunandi kröfur eru gerðar um niðurstöður á þjöppunargráðunni og til hliðsjónar þarf að hafa ýmis atriði. Þar skipta máli atriði eins og hvor „Proctor“ aðferðin er notuð („Standard“ eða „Modified“), tegund efnis í fyllingunni og eiginleikar þess og hvaða álag mun koma á fyllinguna. Finna þarf svör á þessum atriðum áður en niðurstöðurnar eru túlkaðar og þar kemur fyrri reynsla að mjög góðum notum. Í mörgum löndum er venjulega miðað við eftirfarandi gildi á þjöppunargráðu fyrir viðeigandi mannvirkjategund:

Fyllingar undir hús	90-95% "Modified Proctor"
Burðarlag vega, gatna og flugbrauta.	95-100% "Modified Proctor"
Vegfyllingar	95-100% "Standard Proctor" eða 90-95% "Modified Proctor"
Jarðstíflur	95-100% "Standard Proctor"

Tafla 19. Algengar alþjóðlegar kröfur á þjöppunargráðu.[62]

Mestar eru kröfurnar í vegaframkvæmdum þar sem umferð hefur stöðugt aukist og mun aukast mikið í nánustu framtíð. Hærri þjöppunargráða er gjarnan tilgreind fyrir efri lög fyllinga (300-400 mm dýpi) heldur en þeirra sem neðar eru vegna spennudreifingar jarðefnanna.

Í „Modified Proctor“ er beitt 4,5 sinnum meiri þjöppunarorku en í „Standard Proctor“ aðferðinni. Aukning á þjöppunarorku sem þarf til þess að auka rúmþyngd og þar með þjöppunargráðu jarðefna um nokkur prósentustig er mjög háð jarðefnunum og eiginleikum þeirra. Miðað við orkuaukninguna milli „Standard“ og „Modified“ eykst rúmþyngd núningsefna um u.þ.b. 5% og samloðunarefna um u.þ.b. 10%.



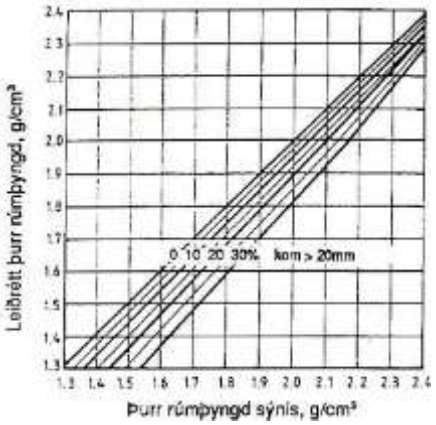
Mynd 31. Samband milli rúmþyngdaraukningar og nauðsynlegrar þjöppunarorku.[63]
(1) Núningsefni, (2) Samloðunarefni.

„Proctor“ prófið er mjög nákvæmt og geta niðurstöður úr því legið fyrir eftir rúman sólarhring. Prófið er mikið notað hérlendis, sérstaklega „Standard“ útfærslan. Rannsóknin líkir hinsvegar ekki nægilega vel eftir raunverulegum aðstæðum á notkunarstað jarðefnis. Sýnið getur ekki verið með meira en 19 mm kornastærð og þjöppun er án titrings en um hvortveggja er oftast að ræða í raun. Það að öll korn stærri en 19 mm skuli vera skilin frá veldur oftast því að þurr rúmþyngd mælist lægri en hún raunverulega er fyrir jarðefnið í heild sinni. Þetta

[62] Forssblad, Lars. 1981
[63] Forssblad, Lars. 1981

er vegna þess að korn stærri en 19 mm hafa hærri rúmþyngd en efnið sem er minna en 19 mm og kemur í stað þeirra.[64]

Vegna þessa hafa menn komið sér upp gagnabanka með niðurstöðum úr svona prófunum og út frá honum búið til línurit sem notað er til þess að leiðrétta þurru rúmþyngdina. Þetta á þó bara við efni sem innihalda minna en 30% korna stærri en 19 mm. Ef jarðefnið er mjög grófkornótt verður að nota aðrar tegundir þjöppumælinga, t.d. hristiborðspróf eða plötupróf. Eftirfarandi mynd sýnir hvernig áðurnefnt leiðréttingarlínurit lítur út:



Mynd 32. Leiðréttingarlínurit á þurri rúmþyngd jarðefnis vegna steina sem eru stærri en 19mm.

„Proctor“ prófið er mjög mikið notað hérlendis og meira í „Standard“ útfærslunni heldur en „Modified“, en ástæðan fyrir því er sú að þjöppunarkröfur í íslenskum verklýsingum miðað við „Standard“ útfærsluna. Niðurstöður verða þá viðmiðun sem notuð er fyrir rúmþyngdarmælingar í framkvæmdum, en kröfur fara alfarið eftir tegund verks hverju sinni og ákveða hönnuðir þær. Þar sem um er að ræða staðlað próf á rannsóknarstofu er helsti skekkjuvaldur einungis skekkjur aðferðarinnar, þ.e. aðskilnaður getur orðið í efninu.

5.2.2 Hristiborðspróf

Hristiborðspróf (e.relative density) er líkt og „Proctor“ prófið framkvæmt á rannsóknarstofu og notað til þess að meta þjöppunareiginleika jarðefnis. Notað er hugtak sem kallast hlutfallslegur þéttleiki, hlutfallsrúmþyngd eða þjöppunargráða, til að lýsa hlutfalli raunþyngdar tveggja efna, annarsvegar efnis sem verið er að meta og hinsvegar viðmiðunarefnis, sem getur verið loft eða vatn við ákveðin hita og þrýsting. Þjöppunargráða jarðefnis er samband milli holrýmishlutfalls í lausasta ástandi efnisins, þéttasta ástandi þess og því ástandi sem það kemur fyrir úti í mörkinni.

Prófið fer þannig fram[65] að jarðefnissýnið er sett í sérstakt mót og álag látið ofan á sýnið. Síðan er mótið hrist í ákveðinn tíma. Með mæliúrum sem sett eru svo á mótið má lesa sig efnisins (lesið er einnig af úrunum áður en hristun hefst). Í

[64] Rannsóknarstofnun Byggingariðnaðarins. 1991
[65] Forssblad, Lars. 1981

upphafi er efnið vegið og eftir mælinguna er það svo ofnþurrkað og vegið á ný. Út frá þessu er síðan rúmþyngd, rakastig og rúmmál sýnis reiknað og í framhaldinu er þjöppunargráðan (D_r) ákvörðuð (jafna 5-2).

$$Dr = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \qquad (5\text{-}2)$$

þar sem:

e = holrými prufunar, mælt úti í mörkinni
e_{max} = holrými efnis í sínu lausasta ástandi
e_{min} = holrými efnis í sínu þéttasta ástandi

Það þykir samt hentugra að reikna þjöppunargráðuna út frá rúmþyngd jarðefnisins því að vitneskja um kornarúmþyngd efnisins liggur ekki alltaf fyrir. Þá er nauðsynlegt að búið sé að ákvarða fyrir jarðefnið rúmþyngd þess í sínu lausasta ástandi, rúmþyngd og rúmmál þess í fullþjöppuðu ástandi og þyngd sýnis. Líkingin umbreytist þá í:

$$Dr = \frac{\gamma_f - \gamma_1}{\gamma_2 - \gamma_1} \cdot \frac{\gamma_2}{\gamma_f} \qquad (5\text{-}3)$$

þar sem:

γ_f = rúmþyngd jarðefnis í náttúrulegu ástandi (úti í mörkinni)
γ_1 = gildi fyrir þéttasta ástand á einingu þyngdar (rannsóknarstofa)
γ_2 = gildi fyrir lausasta ástand á einingu þyngdar (rannsóknarstofa)

Eftirfarandi flokkun sýnir gróflega þjöppunargildin miðað við hlutfallsrúmþyngdina (D_r):

Léleg þjöppun:	$0 < D_r < 0{,}3$
Sæmileg þjöppun:	$0{,}3 < D_r < 0{,}7$
Góð þjöppun:	$0{,}8 < D_r < 1{,}0$

Við þessa mælingu þarf að vanda vel til efnistöku þannig að sýnið sem holrýmdin er reiknað út frá sé lýsandi fyrir heildarjarðefnið á svæðinu sem verið er að skoða. Einnig er vandasamt að meta hvað sé lausasta ástand efnisins og hvað sé það þéttasta. Fyrir hverja prófun þarf a.m.k. 60 kg af jarðefni og má það hvorki innihalda meira en 12% fínefni né vera of gróft. Með þessari aðferð er þó hægt að mæla grófara efni en með „Proctor“ prófun, þar sem stærð korna getur, með vissu skilyrði, farið allt upp í 75 mm. Skilyrðið er það að þá má einungis 30% af efninu fara í gegnum sigti með möskvastærðina 37,5 mm.

Stöðluð stærð er á mótunum sem jarðefnið er prófað í við hristiborðsprófunina, það minna er 2830 sm^3 og það stærra 14200 sm^3. Í sumum mjög stórum og sérstökum mannvirkisframkvæmdum hafa verið búin til stærri mót og í þeim hefur verið hægt að gera mælingar á jarðefnum sem innihalda grófari korn en 75 mm. Áreiðanleiki mælingarinnar er nokkuð góður og misheppnast hún mjög sjaldan en ef það gerist er ástæðan oftast röng ákvörðun á holrýmd efnisins.

Einungis eru nokkur hristiborðspróf gerð á ári hverju og þá einkum þegar ekki er hægt að nota „Proctor“ prófið, vegna of stórra korna í jarðefninu. Niðurstöður verða þá viðmiðun sem notuð er fyrir rúmþyngdarmælingar í framkvæmdum, en kröfur fara alfarið eftir tegund verks hverju sinni og ákveða hönnuðir þær. Þar sem um er að ræða staðlað próf á rannsóknarstofu er helsti skekkjuvaldur einungis skekkjur aðferðarinnar, þ.e. vandasamt getur verið að ákvarða hvað sé lausasta ástand efnisins og hvað sé það þéttasta.

5.3 Rúmþyngdarmælingar

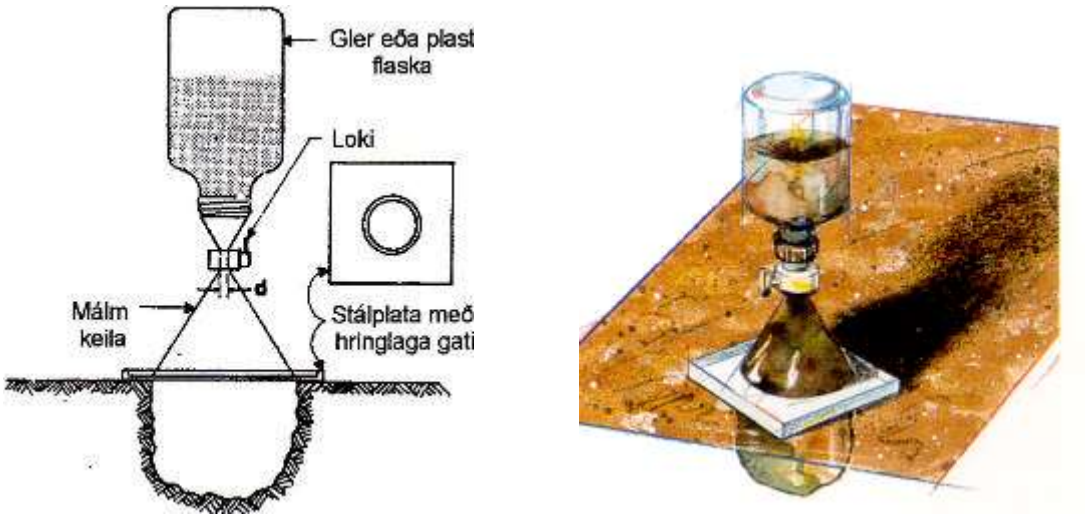
Eins og fyrirsögnin gefur til kynna er í þessum tegundum af prófunum verið að mæla rúmþyngd þjappaða jarðefnisins til þess að meta þjöppunina þegar niðurstöður „Proctors“ prófs eða hristiborðsprófs eru til viðmiðunar. Almennt gildir að því meiri sem rúmþyngdin er því betri telst þjöppunin. Prófin henta ekki vel til daglegs eftirlits nema búið sé að framkvæma áðurnefnd rannsóknarstofupróf á jarðefninu sem unnið er með.

5.3.1 Sandkeilupróf

Nafn prófsins vísar til þess hvernig rúmþyngd í þjappaðri jarðvegsfyllingu er mæld. Í stuttu máli er grafin hola ofan í lagið sem á að kanna og efninu úr henni safnað saman. Rúmmál holunnar er síðan ákvarðað með sandi og efnið úr henni er þurrkað og vigtað á tilraunastofu og þar með er hægt að reikna þurra rúmþyngd viðkomandi efnis.

Framkvæmd prófsins er þannig háttað[66] að stálplata með hringlaga gati, um 150 mm í þvermál, er sett ofan á fyllinguna. Síðan er grafin hola í gegnum gatið og öllu efninu safnað saman í fötu eða poka. Holan er oftast höfð u.þ.b. 150 mm á dýpt. Þá er stærð holunnar mæld. Það er gert með því að sandkeilu er komið fyrir ofan á gatinu á stálplötunni og holan og keilan fyllt af þurrum sandi með þekkta rúmþyngd. Rúmmál holunnar er reiknað út frá sandmagninu sem þarf til að fylla hana (þungi sands í holu/rúmmál sands). Efnið sem kom úr holunni og var safnað saman er tekið á rannsóknarstofu og þurrkað og vigtað. Þá er þurr þungi efnisins úr holunni þekktur ásamt rúmmáli hennar og auðvelt að reikna út þurra rúmþyngd fyllingarinnar. Vatninnihald er einnig ákvarðað.

[66] Rannsóknarstofnun Byggingariðnaðarins. 1991



Mynd 33. Skýringarmyndir af sandkeiluprófi.

Um leið og sandkeiluaðferðin er framkvæmd er annað sýni tekið úr fyllingunni. Á rannsóknarstofu er það þjappað við mismunandi rakastig með „Standard Proctor“ eða „Modified Proctor” aðferð og þar fundin mesta þurra rúmþyngd efnisins. Þurr rúmþyngd efnisins úr holunni, eins og það kemur fyrir í fyllingunni, er síðan borin saman við þessa mestu þurra rúmþyngd sem „Proctor“ prófið gaf. „Niðurstöðurnar eru gefnar upp sem hundraðshluti þurrar rúmþyngdar í fyllingu af hámarks þurri rúmþyngd á rannsóknarstofu og er það mælikvarði á þjöppun fyllingar“.[67]

Sandkeilupróf er frekar einfalt, auðvelt í framkvæmd og gefur nákvæmar niðurstöður ef vel er til þess vandað. Prófið hefur þó þær takmarkanir að ekki er hægt að nota það á fyllingar úr efni með hámarks kornastærð yfir 50 mm. Ef fyllingin inniheldur svo gróf korn verður að nota önnur próf. Niðurstöður prófsins koma eftir u.þ.b. tvo til þrjá daga sem er ekki hentugt í daglegu eftirliti. Einnig er í hverju tilviki fyrir sig óvíst hversu góð myndin er sem sýnið gefur af raunverulegum aðstæðum. Vegna smæðar þess getur það verið ólíkt allri restinni af fyllingunni eða gefið einungis upplýsingar um efsta lag hennar.

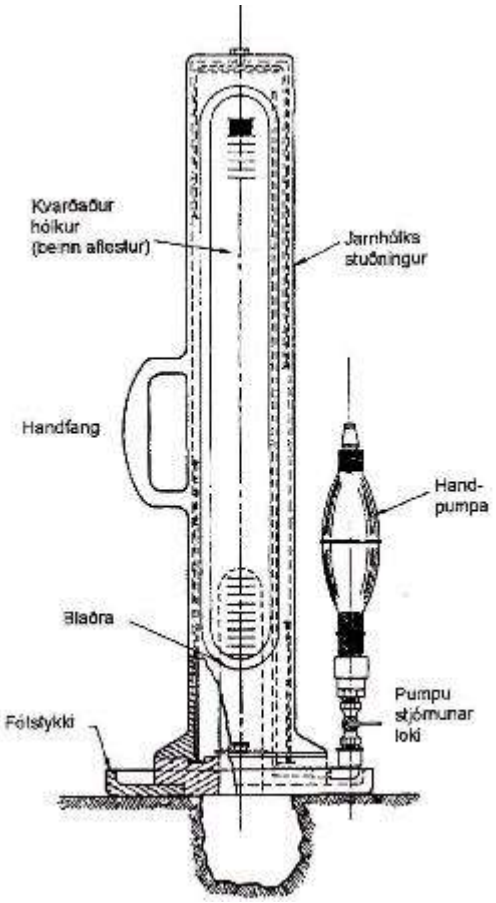
Prófið er ekki mikið notað hérlendis nú á dögum, einungis nokkrum sinnum á ári og þá aðallega þar sem plötuprófi er ekki hægt að koma við, t.d. í mjóum skurðum og innan sökkla.[68] Venjulegasta krafan er að þurr rúmþyngd þurfi að vera 90-100% af hámarks þurri rúmþyngd úr „Standard Proctor“, þó eru til stífari kröfur. Helsti skekkjuvaldar eru mjög gróf korn í jarðefni og mikil holrýmd.

[67] Rannsóknarstofnun Byggingariðnaðarins. 1991
[68] Haraldur Haraldsson. 2004 (tölvupóstur 18.nóvember)

5.3.2 Vatnsblöðrupróf

Prófið er náskylt sandkeiluprófinu og byggir á því sama. Eins og nafnið gefur til kynna er notuð blaðra í stað sandsins og er hún fyllt vatni til þess að ákvarða rúmmál gröfnu holunnar. Vatnsmagnið sem fer í blöðruna er mælt og þar sem að rúmþyngd þess er þekkt stærð er auðvelt að reikna rúmmálið.

Öll úrvinnsla er eins og í sandkeiluprófinu og annmarkar prófanna þeir sömu. Vatnsblöðrupróf er nánast ekkert notað hérlendis, einkum vegna þess að sandkeiluprófið er aðgengilegra. Það hentar þó sérstaklega vel í fyllingum úr mjög grófu og opnu efni þar sem hætta er á að sandurinn í sandkeiluprófinu leki inn í glufur og skekki þannig niðurstöður. Það þykir hinsvegar ekki jafn gott að meðhöndla vatn í mikilum kulda, eins en sand og einnig er alltaf smá hætta á því að blaðran geti lekið.



Mynd 34. Skýringarmynd af vatnskeiluprófi.

5.3.3 Sívalningsrúmmálsmæling

Nafn prófsins vísar til þess hvernig rúmþyngd í þjappaðri jarðvegsfyllingu er mæld. Framvæmd prófsins er þannig háttað[69] að sívalningur, með þekkt rúmmál, er rekinn niður í fyllinguna sem mæla skal og efni safnað saman í hann. Sýnið er tekið á rannsóknarstofu þar sem það er þurrkað og vegið. Rúmþyngd

[69] Þórir Ingason og Bjarni Bessason, BUSL Burðarlaganefnd. 1997

fyllingarinnar er svo reiknað út frá þurri þyngd sýnisins og þekktu rúmmáli sívalningsins.

Sívalningsprófið er mjög einfalt, krefst lítils búnaðar og tekur mun minni tíma en sandkeilu- og vatnsblöðruprófið, þó gefur það svipað nákvæmar niðurstöður.[70] Það er ekki notað hérlendis við mælingar á þjöppuðu jarðefni. Hinsvegar er það notað til að meta óhreyfðan jarðveg sem er til staðar úti í mörkinni sem fyrirhugað er að grunda mannvirki á. Prófið er mjög takmarkað af því efni sem er í fyllingunni. Það er einungis nothæft í silti, sandi og leir, efnum sem eru án grófra korna. Einnig verður efnið að vera samloðandi til þess að það tolli inni í sívalningnum. Niðurstöður úr prófinu fást ekki strax.

5.3.4 Ísótópamælingar

Sérstakt tæki, sem inniheldur geislavirk efni, er notað til þess að mæla rúmþyngd jarðefnis í fyllingu. Aðferðin er vel þekkt enda þróuð strax á 6. áratugnum.[71] Ásamt því að mæla rúmþyngdina, ákvarðar tækið einnig vatns innihaldið í fyllingunni.

Framkvæmd prófsins er þannig háttað[72] að tækinu er komið fyrir ofan á fyllingunni. Á tækinu er sendir og móttakari (geigerteljari). Á þekktri útfærslu á ísótópamælingu, svokölluðu Troxler tæki, er sendirinn ýmist látinn vera á yfirborðinu eða framlengdur með járnteini, sem rekinn er niður í fyllinguna. Án teins mælir tækið rúmþyngd efnis niður á u.þ.b.7,5-10 sm dýpi en með teini niður á u.þ.b. 25 sm.

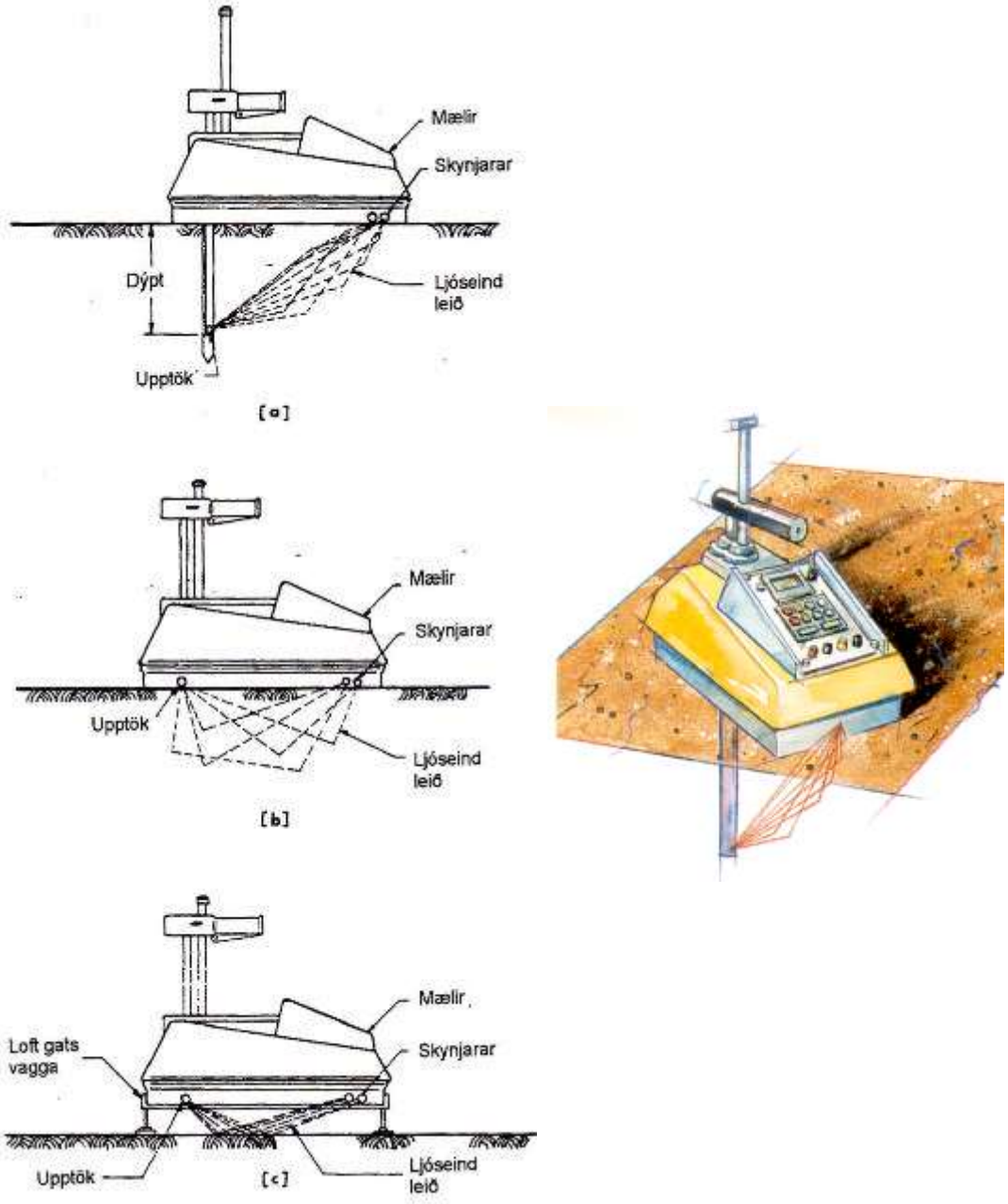
Við mælingarnar sendir tækið frá sér gammageisla og háhraða nifteindir, sem fara í gegnum jarðefnið. Geigerteljarinn nemur síðan geislana og nifteindirnar sem farið hafa í gegnum efnið og tækið ákvarðar dempun og tíma. Rúmþyngdin er ákvörðuð út frá því hversu mikið jarðefnið dempar gammageislana og gildir þar að því meiri sem dempunin er því meiri rúmþyngd hefur efnið. Rakinn ákvarðast út frá hraða nifteindanna í gegnum efnið og gildir þar að því hægar sem þær eru á leiðinni því meiri er rakinn.

Tækið þarf að kvarða fyrir efnið sem unnið er með. Hámarks þurr rúmþyngd efnisins er fundin með „Proctor“ prófi á rannsóknarstofu og hún slegin inn í litla tölvu sem er í tækinu. Þegar tölvan hefur fengið þessar upplýsingar og tekið á móti mæliniðurstöðum getur hún reiknað út bæði rúmþyngdina og rakainnihaldið og sýnt þær á litlum rafrænum tölvuskjá.

Mælingin er afar fljótvirk, t.a.m. er hægt að gera tíu slíkar mælingar á sama tíma og ein mæling með sandkeilu tekur. Tækið hefur því að miklu leyti komið í stað sandkeiluprófsins, allavegana á þeim jarðefnum sem tækið hentar vel fyrir, þ.e.

[70] Coduto, Donald P. 1999
[71] Þórir Ingason og Bjarni Bessason, BUSL Burðarlaganefnd. 1997
[72] Coduto, Donald P. 1999

þétt og fínkornótt efni sem innihalda ekki stóra steina.[73] Þrátt fyrir alla hátæknina gefur sandkeiluprófið líka nákvæmari niðurstöður vegna þess að tækið byggir á yfirflutningi á geislavirku efni, á meðan sandkeiluprófið notar beinar mælingar á þyngd og rúmmáli. Troxlerinn mun því sennilega aldrei koma alveg í stað sandkeiluprófsins.



Mynd 35. Skýringarmyndir af ísótópamælingum: (a) Beinsendingar aðferðin, (b) Afturábak dreifing, (c) Loftbils aðferðin.

Tækið er viðkvæmt og þess vegna fylgir því svokallaður „standard“ kubbur sem notaður er í hvert skipti sem kveikt er á tækinu. Kubburinn gefur tölvunni allar staðaltölur sem hún notar við útreikningana og sýnir fram á hvort tækið starfar rétt og eðlilega. Gæta þarf að túlka niðurstöðurnar rétt þar sem tækið ofáætlar þær smám saman með tímanum. Þetta er vegna þess að í tækinu er geislavirkt

[73] Albert Skarphéðinsson. (munnleg heimild, 26. nóvember 2004)

efni sem helmingar sig á einhverjum tíma og því þarf að senda það með vissu millibili til framleiðanda sem stillir það á ný.

Tækið er fremur dýrt í innkaupum og rekstri þar sem stöðugt þarf að leiðrétta það. Ekki er hægt að senda það með hefðbundnum hætti í pósti vegna geislavirkninnar og því er flutningskostnaður hár. Að auki þurfa þeir sem koma til með að nota tækið að fara á sérstakt námskeið og læra þar hvernig á að meðhöndla það rétt. Tækið ber að umgangast með varúð en við rétta meðhöndlun er geislunin langt innan hættumarka.[74] Geislavarnir ríkisins eru með strangt eftirlit með tækinu og hafa sett fram notkunarleiðbeiningar á því.

Hérlendis hefur tækið mest verið notað við mælingar á þjöppun malbiks enda hentar það vel til þess. Einnig hefur það verið notað við mælingar á styrkingum í burðarlögum með malbiki og sementi ásamt því sem Landsvirkjun hefur notað það við mælingar á þéttikjarna í stíflum. Niðurstöðurnar eru gefnar sem hlutfall af „Proctor“ gildi og er algengasta viðmiðið það sama og fyrir sandkeiluprófið, þ.e. 90-100% „Standard Proctor“.

Grófir steinar í fyllingu geta skekkt niðurstöðurnar, sérstaklega ef þeir dreifast ójafnt. Nóg er að einn stór steinn sé beint fyrir neðan tækið og þá gefur það rangar niðurstöður. Það er því gott að gera nokkrar mælingar á mismunandi stöðum og er það er yfirleitt gert og meðaltal þeirra reiknað. Mælingin er háð því að jarðefnisyfirborð sé mjög slétt og einnig er talið að ýmis sölt og málmar í jarðefninu geti haft áhrif á niðurstöður, en það hefur þó ekki verið sannreynt.[75]

5.4 Sigmælingar

Eins og fyrirsögnin gefur til kynna er í þessum tegundum af prófunum verið að mæla sig þjappaða jarðefnisins undan álagi til þess að meta mótstöðuna eða þjöppunina. Fyrir langflest jarðefni gildir að því minna sem efnið sígur undan álaginu þeim mun meiri burð telst það hafa og þar með betri þjöppun. Í flestum tilvikum liggja niðurstöður fyrir mjög fljótt og henta þessi próf því vel til daglegs eftirlits.

5.4.1 Plötupróf

Gæði fyllinga úr sandi og möl ræðst oftast af sigi en ekki af hættu á broti. Sig ákvarðast af tegund jarðefnis, þjöppun, álagi og álagsfleti. Sig var að jafnaði einungis metið út frá niðurstöðum sigprófs á rannsóknarstofu en í efnum eins og sandi og möl er erfitt að taka sýni til mælinga í sigtækjum á tilraunastofu. Því hafa þróast ýmsar aðferðir til að mæla sig fyllinga á staðnum og er plötupróf eitt þeirra.

[74] Vegagerðin. 1985
[75] Sigurjón Árnason (munnleg heimild, 1. desember 2004)

Plötuprófið mælir sig hringlaga stálplötu sem fall af álagi. Við framkvæmd prófsins í húsgrunnum og á vegfyllingum er algengast að platan sé 450 mm í þvermál[76] en þó eru stundum notaðar aðrar stærðir, allt frá 300 mm til 1000 mm. Á þessa plötu er yfirfært farg í nokkrum þrepum með vökvatjakki sem er tengdur við dælu. Á dælunni er mæliúr og af því má lesa álagið. Í hefðbundnu plötuprófi er farið í gegnum þessi þrep tvisvar við hvern mælipunkt en álagið tekið af plötunni á milli. Þrjú mæliúr eru síðan notuð til að mæla sig plötunnar undan álaginu. Mæliúrin eru fest við langar, sívalar stangir sem hafa ásetu á fyllingunni langt fyrir utan þann punkt sem mæla skal. Þetta er gert til þess að mæliúrin gefi sem réttastar niðurstöður á siginu.

Mynd 36. Plötupróf í framkvæmd.

Í stórum dráttum er mælingin framkvæmd á eftirfarandi hátt:[77]

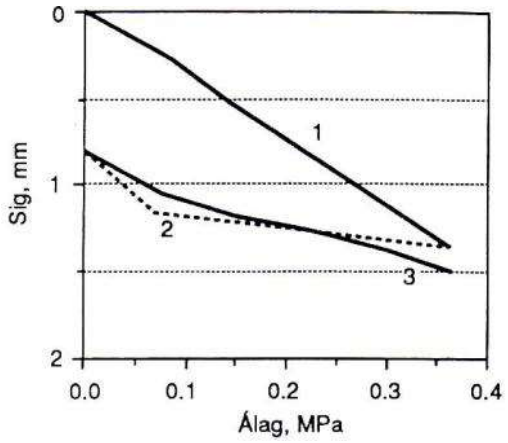
1. Fyrst er settur sandur, með góðri kornadeifingu, ofan á fyllinguna og hann jafnaður út. Plötunni, tjakkinum og mæliúrunum er komið fyrir og ákveðið forálag sett á plötuna sem svarar til um 0,08 MPa. Þetta er gert bæði til þess að þjappa sandinn og til að eyða öllum áhrifum af ójöfnum í yfirborði fyllingarinnar undir plötunni. Álagið er síðan tekið aftur af og mæliúrin núllstillt.

2. Nú er allt tilbúið og þá hefst eiginleg mæling. Álag er sett á plötuna í fimm þrepum og er hvert þrep u.þ.b 0,07 MPa. Hæsta álagið er því nálægt 0,35 MPa. Álaginu er haldið stöðugu við hvert þrep og sigið lesið af mæliúrunum þegar þau hafa stöðvast. Gildin á mæliúrunum eru skráð jafnóðum niður á blað.

[76] Rannsóknarstofnun Byggingariðnaðarins. 1989
[77] Rannsóknarstofnun Byggingariðnaðarins. 1989

3. Þegar hæsta álaginu er náð er það minnkað aftur niður í u.þ.b. 0,07 MPa og sigið mælt. Álagið er síðan alveg tekið af og sigið enn mælt.

4. Nú er liður 2 endurtekinn, þ.e. sama álag er sett aftur á plötuna í sömu þrepum. Þegar þeirri endurtekningu er lokið hefst úrvinnsla og skráðar mæliniðurstöður af mæliúrunum eru settar inn í tölvuforrit og það notað til þess að teikna upp línurit sem sýnir sig sem fall af álagi.



Mynd 37. Niðurstöður plötuprófs dregnar upp á línurit sem sýnir sig sem fall af álagi.[78]

Myndin hér að ofan sýnir hvernig línuritið lítur út. Á því má finna þrjá ferla. Ferill númer 1 á myndinni fæst þegar álagið er sett á í þrepum í fyrra skiptið (sbr. liður 2), ferill númer 2 fæst þegar álagið er aftur tekið af (sbr. liður 3) og ferill númer 3 fæst þegar álagið er sett á í þrepum í seinna skiptið (sbr. liður 4). Túlka má niðurstöður mælinganna á ýmsan hátt en algengast er að reikna út spennumótstöðu þjappaða jarðefnisins, E-stuðla.

Útreikningar fara fram í tölvu en hún notast við líkingar Boussinesq.[79] Frá þeim leiddi Odemark[80] út eftirfarandi samband, miðað við að „Poisson“ hlutfall sé 0,5 og er þetta sú líking sem leggur grunninn að þeirri sem notuð er til þess að reikna út E-stuðlana.

$$E = 0{,}75 \cdot d \cdot \frac{\sigma_0}{d_0} \qquad (5\text{-}4)$$

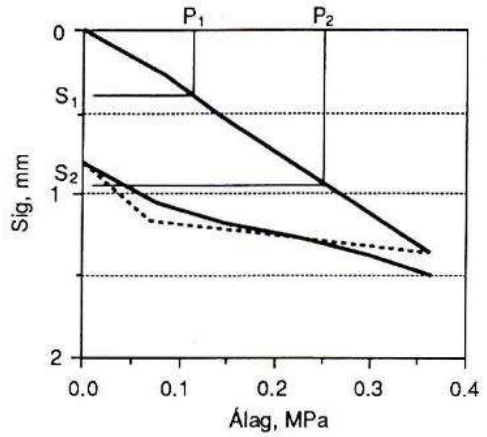
d = þvermál stálplötu
σ_0 = lóðrétt spenna á yfirborð
d_0 = sig við yfirborð

Reiknaðir eru tveir stuðlar, E_1 út frá hallatölu fyrri álagsraðarinnar og E_2 út frá þeirri seinni. Þegar E_1 er fundinn eru skoðaðir punktar sem samsvara 30% (P_1= 0,11 MPa) og 70% (P_2= 0,25 MPa) af heildarálaginu (0,35 MPa). Þá eru

[78] Rannsóknarstofnun Byggingariðnaðarins. 1989
[79] Yoder og Witczak. 1975
[80] Forssblad, Lars. 1981

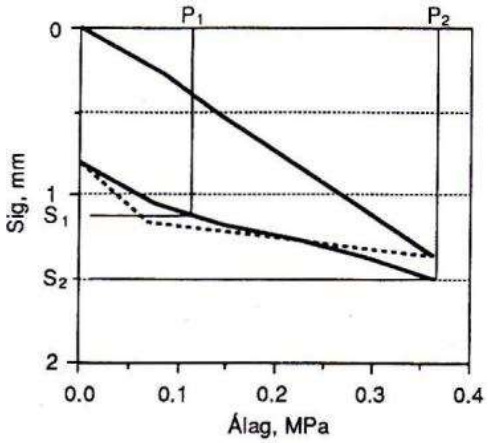
tilheyrandi sigpunktar (S_1 og S_2) fundnir af línuritinu. Punktarnir P_1, P_2, S_1 og S_2 eru síðan settir inn í áðurnefnda líkingu sem lítur þá svona út:

$$E_1 = 0{,}75 \cdot d \cdot \frac{P_2 - P_1}{S_2 - S_1} \qquad (5\text{-}5)$$



Mynd 38. Valin gildi á S_1, S_2, P_1 og P_2 við útreikning á E_1[81]

E_2 er reiknaður út á hliðstæðan hátt og með sömu líkingu. Gildin á P_1 og S_1 eru þau sömu og áður en gildið og P_2, og þar með á S_2, eru valin á annan hátt. P_2 er valið hæsta álagsþrep þar sem línan frá punktinum (P_1, S_1) er nálægt því að vera bein. Það hittir því oftast þannig á að P_2 er sama og heildarálagið. Í sumum tilvikum getur þó komið fyrir að endi ferilsins taki óeðlilega stefnu og í þeim tilvikum er P_2 valið lægra. Einingin á E-stuðlunum er kg/sm^2 eða MPa. Þegar búið er að reikna bæði E_1 og E_2 út, er hlutfallið E_2/E_1 reiknað.



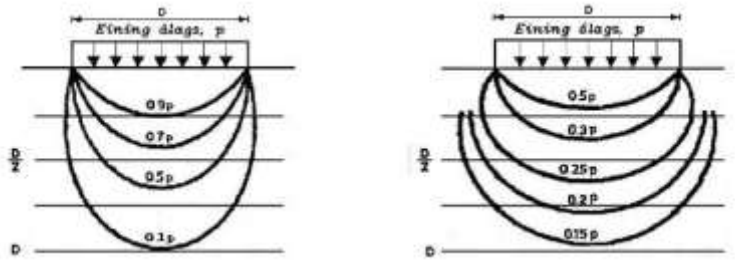
Mynd 39. Valin gildi á S_1, S_2, P_1 og P_2 við útreikning á E_2[82]

Við túlkun á niðurstöðum plötuprófa er litið á tvennt, annarsvegar hversu hátt gildið er á E_2 og í hinsvegar hvert hlufallið er á milli E_2 og E_1. E_2 er notað sem mælikvarði á burðarþol fyllingarinnar og því hærra sem gildið er, því betra telst burðarþol. Misjafnar kröfur eru gerðar til E_2 stuðulsins eftir framkvæmd en

[81] Rannsóknarstofnun Byggingariðnaðarins.1989
[82] Rannsóknarstofnun Byggingariðnaðarins. 1989

algengt er að þær séu á bilinu 80-120 MPa á fyllingum undir einbýlishús og 100-150 MPa á vegfyllingum. Þetta er þó að sjálfsögðu háð aðstæðum hverju sinni. Hlutfallið E_2/E_1 er notað sem mælikvarði á þjöppun fyllingar. Því lægra sem hlutfallið er því betri telst þjöppunin. Algeng krafa til hlutfallsins er að það sé lægra en 2,3 en það er einnig háð aðstæðum hverju sinni.

Ýmsar rannsóknir hafa verið gerðar á sigi undirstaðna í sandi og möl og eru aðalniðurstöður þeirra þær að annarsvegar vex sig með auknu álagi og hinsvegar með stækkun álagsflatar við sama álag.[83] Þvermál stálplötu og stærð álags hefur því mikil áhrif á niðurstöður prófsins og því þarf að skilgreina þessa hluti þegar kröfur eru settar um niðurstöður. Miðað við að platan sé 45 sm í þvermál verður fargið að vera a.m.k. 6 tonn. Áhrifasvæði platna er mismunandi eftir stærð þeirra. Algengt er að tala um að plötuprófið mæli ástandið niður í dýpt sem svarar tvöföldu þvermáli plötunnar.[84]



Mynd 40. Spennudreifing í jarðefni undir hringlaga álagi. Myndin til vinstri sýnir lóðréttar þrýstispennur og myndin til hægri sýnir hámarks skerspennur.[85]

Flestallar líkingar sem settar hafa verið fram eiga við eitthvað sem er mikið einfaldað og mjög vel skilgreint. Þetta á við um líkingar Boussinesq. Þegar hann kom með þær fram á sjónarsviðið gekk hann út frá því að efnið, sem verið var að skoða, væri línulega fjaðrandi (elastískt), einsleitt (homogen), einsátta (ísótrópískt) og í óendanlegu hálfrúmi. Séu þessi skilyrði ekki uppfyllt, þó ekki nema eitt þeirra, er hætt við verulegum skekkjum á E-gildunum.

Niðurstöðum plötuprófa verður því að taka með miklum fyrirvara þar sem jarðefni í fyllingum eru í langflestum tilvikum hvorki einsleit né línulega fjaðrandi. Það er því ekki hægt að líta á niðurstöðurnar sem nákvæmar upplýsingar um gæði þjöppunar á efninu í fyllingunni. Þær gefa þó ákveðna hugmynd um burðarþol hennar og hvort þjöppun er nægjanleg, sem er svo studd af mikilli uppsafnaðri reynslu.
Plötuprófið hefur lengi verið algengasta þjöppunarprófið hérlendis og einmitt þess vegna er komin talsverð reynsla á það en það eru u.þ.b. 40 ár liðin frá því að það var fyrst notað á Íslandi.[86] Á höfuðborgarsvæðinu og í nágrannasveitarfélögum er það nánast eingöngu notað en víða á landsbyggðinni er það lítið notað vegna mikils kostnaðar sökum fjarlægða. Þó er það notað úti á

[83] Almenna Verkfræðistofan. 1986
[84] Þórir Ingason og Bjarni Bessason, BUSL Burðarlaganefnd. 1997
[85] Forssblad, Lars. 1981
[86] Gunnar Bjarnason og Elísabet S. Urbancic, BUSL Burðarlaganefnd. 1996

landi ef um opinberar byggingar eða mjög stórar byggingar (háar blokkir) er að ræða. Þegar plötuprófið er ekki notað eru stuðst við önnur próf, t.d. sandkeilupróf eða Troxler.

Plötuprófið er frekar seinlegt og er þeim takmörkum sett að það segir einungis til um eiginleika efstu laga fyllingar en ekki þeirra sem neðar eru. Einnig er hún ekki talin henta á fínefnasnauð efni (minna en 4% efnis fínna en 0,075mm).[87] Helstu skekkjuvaldar mæliaðferðarinnar eru frost í fyllingu og stórir steinar undir plötu.

Plötuprófsniðurstöðum hefur verið safnað saman hérlendis og þær bornar saman við og tengdar upplýsingum um berggerð steinefnanna. Þessi samantekt hentar vel til að spá fyrir um E-gildi mismunandi jarðefna og er í raun grundvöllur fyrir því að hægt sé að nota plötuprófið án þess að kvarða niðurstöðurnar eða gera ítarlegri mælingar á þjöppuninni.

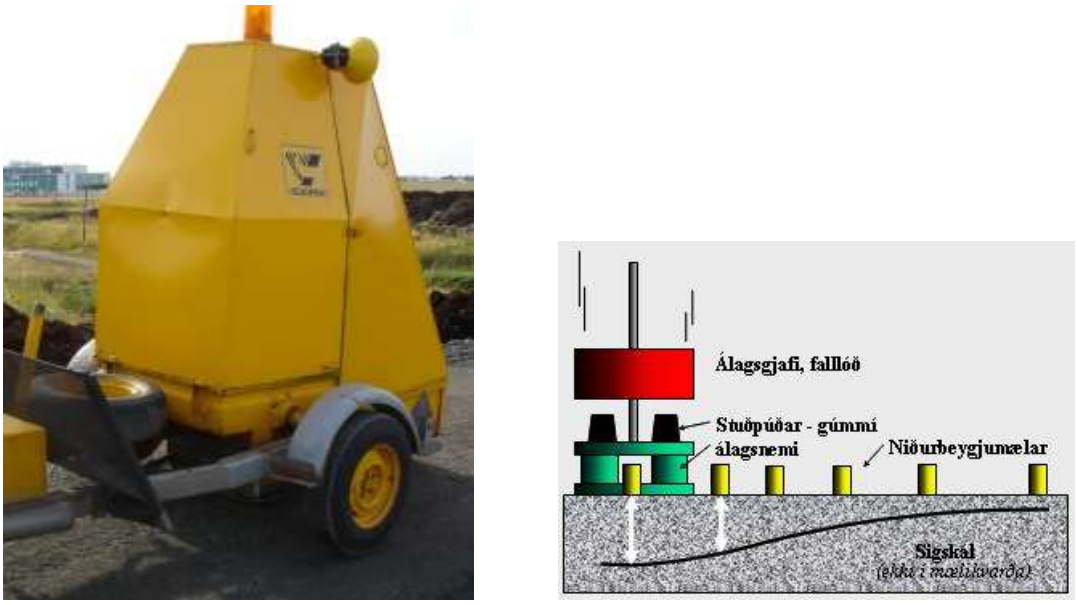
5.4.2 Falllóðspróf (plötupróf með sveifluálagi)

Í grófum dráttum byggir falllóðspróf á því að sig fyllingar er mælt undan höggálagi sem beitt er á fyllinguna. Það svipar því mjög til plötuprófs, nema að því leyti að hér er um sveifluálag að ræða sem á að líkja betur eftir álagi ökutækis á veg. Aðferðirnar tvær byggja líka á sömu líkingunni, þ.e. líkingu Boussinesq, sem lýsir sambandi milli sigs og álags.

Framkvæmd prófsins hérlendis (KUAB) er þannig[88] að lóð er látið falla á annað lóð sem flytur álagið niður á hringlaga stálplötu sem liggur á fyllingunni. Algengast er að platan sé 300 mm í þvermál en þó eru stundum notaðar aðrar stærðir. Fallhæð lóðsins er stillanleg og þar með álagið, meiri fallhæð gefur meira álag. Oftast eru fleiri en eitt högg slegin yfir hverjum punkti og er þá stundum litið á fyrsta höggið sem einskonar forþjöppun á jarðvegsyfirborðinu, til þess að loka því vel svo eftirfarandi mælingar verði marktækari. Álagið er þá haft minna í fyrsta högginu til þess að forþjöppunin verði ekki of mikil en í öðrum höggum er oftast er mælt með 50 kN álagi. Álagstíminn er um 25-30 millisekúndur í hverju höggi. Þetta álag í þennan tíma á að líkja eftir fimm tonna þungu tvíburahjóli á vörubíl sem keyrir á hraðanum 40-60 km/klst.[89]
Sigið eða niðurbeygjan undan högginu er síðan mæld með nokkrum hröðunarmælum, svipuðum og notaðir eru við jarðskjálftamælingar. Þeim er komið fyrir undir álagsmiðjunni og í mismunandi fjarlægð frá henni, eftir beinni línu, þannig að vitneskja fáist um lögun sigskálarinnar undan álaginu. Algengar fjarlægðir mælanna frá miðjunni eru 200, 300, 450, 600, 900, og 1200 mm og er hægt að meta ástandið á u.þ.b. því dýpi sem svarar til fjarlægðar þess hröðunarmælis sem er fjærst miðjunni. Hægt er að mæla allt að 5 mm niðurbeygju með góðri nákvæmni.

---

[87] Jón Skúlason. 1993
[88] Gunnar Bjarnason og Elísabet S. Urbancic, BUSL Burðarlaganefnd. 1996
[89] Hildebrand, Gregers og Baltzer, Susanne. 2003



Mynd 41. Falllóðspróf í framkvæmd og skematísk mynd af því hvernig það vinnur.

Á myndinni hér að ofan má sjá hvernig falllóðið, sem notað er hérlendis, lítur út. Það kom til landsins 1985 og er dregið af bifreið sem í eru öll stjórntæki fyrir það, s.s. tölva, lengdarmælir, ljósahnappar o.fl. Byrja þarf að mata tölvuna á grunnupplýsingum, t.d. gefa mælipunktum nafn og skilgreina mælisvæðið. Þegar því er lokið má hefja mælingar og stjórnar tölvan þeim að öllu leyti og skráir niðurstöðurnar jafnóðum. Lengdarmælirinn gefur til kynna hvenær falllóðið hefur lokið við mælingu á tilteknum punkti og sýnir jafnframt fjarlægð á milli punkta. Á falllóðinu er búnaður sem lyftir hjólunum sjálfvirkt upp þannig að lóðið sest á fasta ásetu sem er utan við mælipunktinn. Þetta er til þess að mælarnir séu stöðugir og hafi ásetu á yfirborði sem ekki sígur undan höggálaginu.

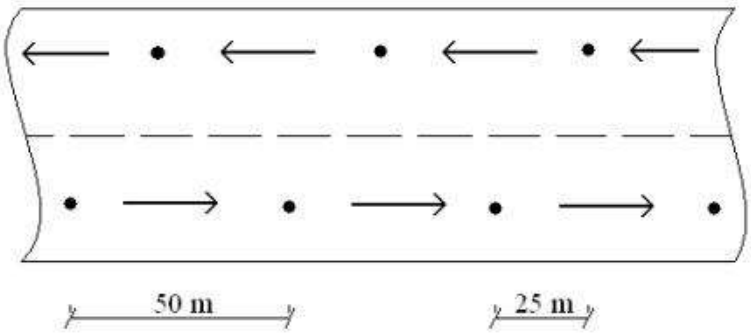
Tölvuforrit er notað til þess að stjórna falllóðinu á mælingarstað og er uppsetning þess í Windows umhverfi PC tölvu. Niðurstöður eru vistaðar í lok mælinga og teknar til úrvinnslu í annað forrit sem inniheldur nokkra reiknimöguleika, sem hægt er að nota m.a. til þess að meta þjöppun fyllinga og til þess að burðarþolshanna veg. Eins og staðan er í dag er úrvinnsluforritið í DOS umhverfi en til stendur að færa það yfir í Windows, sem er mikill kostur.
Allir reiknimöguleikarnir nota sömu mæligildin, þ.e. sigmálið frá hröðunarmælunum og upplýsingar um álag. Reiknimöguleikarnir byggja allir á einn eða annan hátt á líkingu Boussinesq en innan sumra eru fleiri líkingar sem ekki verður farið nánar í hér. Það er síðan misjafnt hvernig þeir stilla þessu upp og nýta við útreikningana. Einnig er misjafnt hversu mörg högg eru talin æskileg fyrir einn og sérhvern reiknimöguleika. Fyrir flestar aðgerðirnar er algengt að slá tvö högg á hverjum punkti en þegar verið er að meta þjöppun eru oftast slegin fjögur.

Forritið reiknar út spennumótstöðu jarðefnisins í hverju höggi og er þá sú spennumótstaða sem fæst úr fjórða högginu notuð ásamt hlutfallinu milli þriðja og fjórða höggs, til þess að meta þjöppunina. Þetta svipar því að nokkru leyti til niðurstaðna plötuprófs. Hægt er að prenta út ýmsar upplýsingar um niðurstöður og sjá þannig myndrænt ýmis gildi sem varða mælinguna.

Reyndar hefur það einnig tíðkast að lögun sigskálarinnar, sem mælarnir sjö ákvarða, hafi verið notuð til þess að meta þjöppunina. Ef skálin er mjög djúp og brött, þ.e.a.s. mælirinn í miðri álagsplötunni mælir mikla niðurbeygju en allir hinir litla og krappi skálarinnar er mikill, gefur það vísbendingu um mjúkt jarðefnisyfirborð og lélega þjöppun þar. Ef niðurbeygjan er mikil en samt tiltölulega jöfn hjá öllum sigmælum og krappi því lítill, gefur það merki um að yfirborðið sé hart, en jarðefni neðar í fyllingu mjúkt og því þjöppun lélég þar. Ef allir mælarnir mæla litla niðurbeygju gefur það upplýsingar um að undirlagið sé hart og þar með þjöppun góð í gegnum alla fyllinguna.

Algengast er að láta forritið reikna út „empíríska“ samband álags og sigs til þess að meta burð vega og er þá veginum skipt í kafla með sama burðarþoli. Burðarþolsflokkarnir eru sex og ræður niðurbeygjan undan álaginu og krappi hennar í hvaða burðarþolsflokki mælingin lendir. Krappinn er reiknaður sem mismunur niðurbeygju í álagsmiðju og í 200 mm fjarlægð frá henni.

Þegar burður er metinn á þennan hátt er algengt að punktar séu mældir, á 50 metra millibili, á annarri akrein á einhverjum vegkafla í aðra átt. Síðan er bílnum og falllóðinu snúið við og mælt, á 50 metra millibili, á hinni akreininni og eru þeir mælipunktar látnir skarast um 25 metra við þá sem teknir voru á fyrri akreininni. Eftirfarandi mynd útskýrir þetta betur. Við þessa mælingu eru einungis slegin tvö högg yfir hverjum mælipunkti.



Mynd 42. Algengt munstur falllóðsmælinga á vegkafla.

Vegagerðin hefur umsjón með falllóðinu og sér um allar prófanir sem gerðar eru með því. Falllóðið er orðið frekar gamalt og því hefur margt varðandi það verið

endurnýjað, s.s. rafkerfi, gaummælar o.fl.[90] Helstu skekkjuvaldar mæliaðferðarinnar eru frost í jörðu, gróf jarðefniskorn og óslétt og opið jarðefnisyfirborð.

Undanfarin ár hefur falllóðið markvisst verið notað til þess að burðarþolsákvarða vegi landsins. Hringvegurinn hefur verið mikið mældur, samhliða öðrum minni og fáfarnari vegum með og án bundins slitlags. Með þessu móti er Vegagerðin að reyna að kortleggja hjá sér burðargetu veganna og meta viðhaldsþörf. Einnig er mjög algengt að falllóðið sé notað til þess að mæla burðarþol nýrra vega einu ári eftir að þeir hafa verið teknir í notkun, til þess að athuga hvort vegurinn sé í samræmi við hönnunarforsendur og standist þær kröfur sem til hans eru gerðar. Það er því notað sem einskonar gæðaeftirlitstæki til þess að móta hönnunarforsendur og forsendur um viðhald. Fallóðið hefur, aftur á móti, lítið verið notað til þess að meta þjöppun fyllinga og burðarlaga vega sem eru í framkvæmd, enda er ekki gerð krafa til þess í Alverk´95.

Byggt er á norskri aðferð við mat á burðarþoli veganna. Samkvæmt henni eru niðurbeygjur í álagsmiðju og í 200 mm fjarlægð frá miðju, eftir annað högg, skoðaðar og þær notaðar til útreikninga á fjaðurstuðli. Út frá þeim fjaðurstuðli er síðan burðarþolið reiknað, gengið er út frá viðmiðunargildinu 200 MPa fyrir 10 tonna ásþunga.

5.4.3 Lítil falllóðspróf[91]

5.4.3.1 Almennt

Falllóðið sem lýst hefur verið hér að framan er víða vel þekkt enda langt síðan það kom fyrst fram á sjónarsviðið. Vegna stærðar þess og fyrirferðar hafa menn freistast til þess að útfæra það á annan hátt í mun minna formi. Er í þessu samhengi talað um lítil falllóð og eiga þau það sammerkt að tækjabúnaður er handhægur og léttur. Almennt virka þau á nákvæmlega sama hátt og stóra falllóðið, þannig að álagspúls fæst með því að láta massa falla á stálplötu. Með litlu falllóði er, í flestum tilfellum, sig einungis mælt undir miðju plötunnar þannig að ekki fást upplýsingar um lögun sigskálarinnar eins og hjá stóra falllóðinu. Stærð plötunnar er mismunandi eftir útfærslum, allt frá 50 mm og upp í 300 mm. Einnig er þyngd lóðsins og fallhæðin mismunandi. Hér á eftir verður nokkrum útfærslum af litlu falllóði gerð betri skil.

5.4.3.2 Clegg hamar

Tækið er afar einfalt og handhægt. 4,5 kg lóð er látið falla úr 450 mm hæð ofan á plötu sem er 50 mm í þvermál. Hámarkshraðaminnkun við höggið er mæld og gefið upp sem svokallað CIV (Clegg Impact Value), þar sem eitt CIV er 10 sinnum þyngdarhröðunin.[92] Niðurstöður liggja fyrir jafnharðan og á mælingum stendur og hentar það vel við daglegt eftirlit. Helsti ókosturinn við þetta falllóð

[90] Haraldur Sigursteinsson. (munnleg heimild, 5. nóvember 2004)
[91] Hildebrand, Gregers og Baltzer, Susanne. 2003
[92] Þórir Ingason og Bjarni Bessason, BUSL Burðarlaganefnd. 1997

er að spennan er mjög há undir plötunni vegna smæðar hennar, þannig að hætta er á broti í yfirborði jarðvegsins. Engin reynsla er af tækinu við þjöppunareftirlit hérlendis.

5.4.3.3 Loadman

Tækið er framleitt af finnska fyrirtækinu AL-Engineering Oy og er heildarþyngd þess 16 kg. Um er að ræða sívalt rör sem inniheldur lóð og hröðunarmæli. Hægt er að hafa þrjár plötustærðir, 132, 200 og 300 mm í þvermál. Falllóðið getur verið 6 til 10 kg að þyngd og er fallhæð þess 800 mm. Hröðunarmælirinn er notaður til þess að mæla sig plötunnar undan högginu og niðurstöður birtast jafnharðan á litlum skjá sem er efst á tækinu. Lóðið er látið falla fimm til sex sinnum á hvern mælipunkt og í tækinu er lyftibúnaður sem lyftir lóðinu aftur upp í hæstu stöðu. Niðurstöðurnar eru upplýsingar um niðurbeygju undir plötunni og spennumótstöðu jarðvegsins, E-gildi. Talað er um E_1 og E_2 stuðla eins og í plötuprófinu. Er E_1 stuðullinn ákvarðaður út frá fyrsta höggi og E_2 út frá tveimur til þremur síðustu höggunum sem ná stöðugri niðurbeygju. Hægt er að reikna hlutfallið á E_2/E_1 og er það kallað þjöppunargráða. Engin reynsla er af tækinu við þjöppunareftirlit hérlendis.

5.4.3.4 ODIN

Tækið var hannað til að koma sem millistig milli Clegg hamars og stóra falllóðsins. Hvatinn að því var af tvennum toga, í fyrsta lagi vegna allt of hárrar spennu sem verður við högg á litlar plötur eins og notaðar eru í Clegg hamrinum og í öðru lagi allt of mikils kostnaðar og fyrirhafnar sem fylgir stóra falllóðinu. Tækið er þannig að lóðið er á armi sem stýrir því þegar það fellur á plötuna. Þetta er talið tryggja betur að platan sé flöt á yfirborðinu þegar höggið kemur á hana. Plötustærðin er á bilinu 100 til 300 mm í þvermál, lóðið 5 til 15 kg og fallhæð allt að 600 mm. Engin reynsla er af tækinu við þjöppunareftirlit hérlendis.

5.4.3.5 Zorn ZFG 2000

Tækið er framleitt af þýska fyrirtækinu Zorn Stendal er heildarþyngd þess um 30 kg. Tækið er svipað útsett og ODIN falllóðið, þ.e.a.s. lóðið er á armi sem tryggir nákvæmt og gott högg á plötuna. Hægt er að nota plötustærðir 150 og 300 mm. Falllóðið getur verið ýmist 10 eða 15 kg og fallhæð þess allt að 800 mm. Hröðunarmælir, staðsettur á miðri plötunni, mælir mestu niðurbeygju undan álaginu. Mæliniðurstöðurnar safnast í smátölvu (d.kontrolboks) sem er tengd við falllóðið. Á smátölvunni er lítill skjár og prentari sem prentar mæliniðurstöður út jafnóðum. Einnig er hægt að flytja gögnin yfir í PC tölvu. Niðurstöður gefa upplýsingar um sig (s), sighraða (v), þjöppunarstig (s/v) og spennumótstöðu jarðefnis (E_{vd}). Engin reynsla er af tækinu við þjöppunareftirlit hérlendis.

5.4.3.6 Prima 100

Tækið er framleitt af dönsku fyrirtækjunum Carl Bro og Dynatest og er heildarþyngd þess 17 kg. Tækið er svipað útsett og Zorn og ODIN falllóðin,

þ.e.a.s. lóðið er á armi sem tryggir nákvæmt og gott högg á plötuna. Hægt er að nota plötustærðir 100, 200 og 300 mm. Falllóðið getur verið 10, 15 eða 20 kg og fallhæðin 10 til 850 mm. Í tækinu er búnaður sem mælir nákvæmlega hvaða álag er að verka á plötuna. Þennan búnað er ekki að finna í neinum öðrum gerðum lítilla falllóða. Hröðunarmælir, staðsettur á miðri plötunni, mælir síðan mestu niðurbeygju undan álaginu.

Einnig er hægt að fá með tækinu tvo aðra hröðunarmæla á grind sem má að staðsetja að vild til hliðar við tækið. Þannig má fá mynd af sigskálinni í kringum plötuna eins og fæst í stóra falllóðinu. Hægt er að fá tvær útgáfur af tækinu, önnur útgáfan skráir mælisniðurstöður í smátölvu, svipað og Zorn falllóðið gerir og hin skráir mæliniðurstöður beint í PC tölvu sem tengd er við tækið. Niðurstöður gefa upplýsingar um raunverulegt álag, snertiþrýsting, höggtíma, hámarksniðurbeygju allra mælanna og spennumótstöðu jarðefnisins E_1, E_2 og E_3, frá öllum þremur mælunum.

Prima 100 virðist vera fullkomnasta og best útfærða gerðin af slíkum handhægum falllóðum enda líkir það mjög vel eftir því sem stóra falllóðið gerir og gefur svipaðar upplýsingar. Engin reynsla er af tækinu við þjöppunareftirlit hérlendis en Vegagerðin í Reykjavík hefur fest kaup á einu slíku og því er ekki langt í að það verði tekið í notkun til þjöppumælinga og að möguleikarnir sem það hefur upp á að bjóða nýtist við íslenskar jarðvegsframkvæmdir. Erlendis hefur tækið verið borið saman m.a. við plötuprófið og stóra falllóðið og hefur sá samanburður leitt í ljós áhugaverðar niðurstöður sem fjallað er um í kafla 6.

5.4.4 Hallamæling

Hæðarkíkir er notaður ásamt hæðarstiku (latta) til þess að meta þjöppunina. Hæðarkíkirinn er settur upp á föstum punkti, rétt utan við svæðið sem skal þjappa og stilltur þar réttur. Tvær manneskjur þarf í mælinguna, eina sem kíkir í kíkinn og skráir mæligildi og aðra sem gengur um með hæðarstikuna og heldur henni kyrri, lóðréttri. Nokkrir punktar á þjöppunarsvæðinu eru teknir og gildin skráð. Svæðið er síðan þjappað og sig mælt með því að hæðarmæla sömu punkta á ný.

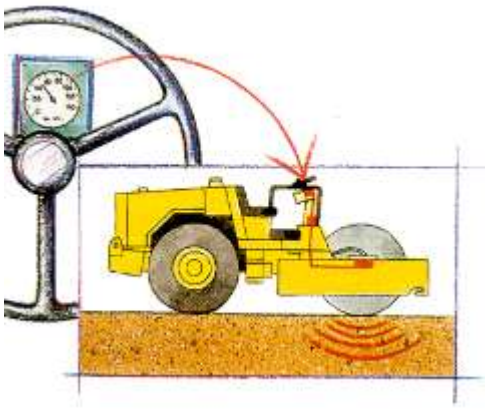
Millibil mældra punkta er oft haft á bilinu 5-10 metrar. Mismunurinn á mæligildunum milli hæðarmælinganna er þá mælikvarði á gæði þjöppunarinnar. Gerðar eru kröfur um að meðaltals sig burðarlagsyfirborðs, frá næstsíðustu til síðustu yfirferðar valtara, skuli vera innan við 10-12% af heildarsigi orsökuðu af þjöppun.[93] Aðferðin er einföld og ódýr og krefst ekki mikilla útreikninga eða reynslu þeirra sem hana framkvæma. Hún hefur verið notuð eitthvað hérlendis, sérstaklega úti á landi og í minni verkum. Á höfuborgarsvæðinu er hún lítið sem ekkert notuð. Helsti skekkjuvaldur er sennilega mannleg mistök.

[93] Alverk. 1995

5.5 Aðrar mælingar

5.5.1 Þjöppumælar í völturum

Í stuttu máli er um að ræða nema eða mæla sem staðsettir eru í tromlu valtarans og gefa þeir frá sér einingalaust viðmiðunargildi fyrir svörun undirlagsins við titringsálaginu sem valtinn veldur. Gildin eru lesin jafnóðum af mæli sem staðsettur er inni í stjórnunarhúsinu.



Mynd 43. Skýringarmynd af einföldustu gerð þjöppumælis.

Lengi vel var einungis hægt er að fá valtarana ýmist bara með mælinum eða stakan mæli auk búnaðs sem skráir gildin jafnóðum niður á útprentaðan strimil. En síðan þá hefur þetta þróast og í dag er hægt að fá með völturunum lítið skráningartæki með tölvuskjá sem hjálpar til við alla skilgreiningu og skráningu mæligilda. Tækið er tekin með í stjórnhúsið, hengt þar upp og tengt við mælana. Skjárinn á tækinu sýnir myndrænt öll mæligildi á hverjum stað í fyllingunni. Einnig safnar tækið öllum mæligildunum saman á minniskort sem síðan er hægt að flytja yfir í PC-tölvu og meta þau nánar í þar til gerðum forritum. G.P.S. tæknin hefur einnig verið nýtt með þessu og gerir hún þennan búnað ennþá sjálfvirkari og markvissari.

Mæligildin eru einingalaus og því þarf að kvarða þau. Til þess þarf annaðhvort þurr rúmþyngd eða spennumótstaða efnisins, eins og það kemur fyrir í fyllingunni, að vera þekkt. Hægt er að nota í þessum tilgangi niðurstöður úr öðrum prófum sem framkvæmd eru á jarðefninu, t.d. úr sandkeiluprófi eða plötuprófi. Mæligildin eru mjög háð jarðefnisgerð, þjöppunartæki og staðaraðstæðum.

Búnaðurinn kom á markaðinn skömmu fyrir 1980 en hefur ekki verið mikið notaður við þjöppunarmælingar almennt, nema í stærri verkum. Hann er þó í auknum mæli að ryðja sér til rúms og sjá menn þessa aðferð vel fyrir sér í framtíðinni. Hægt er að prófa alla fyllinguna með búnaðinum í stað nokkurra punkta og liggja niðurstöður fyrir nánast jafnharðan. Einnig er með þessu hægt að tryggja mun jafnari þjöppun og koma í veg fyrir ofþjöppun. Talið er að helsti

skekkjuvaldur sé mjög krófkornótt og óslétt jarðefnisyfirborð. Nánar er fjallað um þjöppumæla í völturum í kafla 7.

5.5.2 Prófvöltun

Þessi aðferð við þjöppumælingar felur í sér að þungum valtara eða fullhlöðnum vörubíl er ekið yfir svæðið sem hefur verið þjappað og þannig reynt að finna veikustu blettina á því svæði. Þyngd tækisins verður að vera 50-100 tonn og verður einhver að ganga með því til þess að fylgjast með hversu mikið jarðefnið gefur eftir. Menn verða að hafa talsverða reynslu og þekkingu af þjöppun til þess að geta metið þetta rétt. En þar sem hér er einungis um sjónmat að ræða, en engar eiginlegar mælingar, kemur þetta aldrei til með að vera ýkja nákvæmt. Aðferðin var dálítið notuð hér á árum áður þegar aðrar aðferðir voru ekki komnar fram. En með nútímatækni og þekkingu kemur tæpast til greina að nota aðferðina, nema í algerum undantekningum og þá einungis í vegagerð.

5.5.3 Þrýstimælir (pressometer)

Sívalningslaga mælitæki er sett ofan í fyllinguna og það látið þenjast út í allar áttir (radíalt). Út frá þrýstiaukningu og hve mikið fyllingin gefur eftir, er hægt að meta styrk og burðareiginleika fyllingarinnar. Út frá þeim niðurstöðum er þjöppunin ákvörðuð. Fjölmargar svipaðar tegundir og útfærslur af tækinu eru til en þau byggja flest á því sama. Ekki verður nánar fjallað um það hér. Slík tæki eru ekkert notuð við þjöppumælingar hérlendis.

6. Samanburður á plötuprófi og falllóðsprófi

6.1 Inngangur

Af þeim prófunum sem fjallað hefur verið um hér á undan er plötuprófið lang mest notað hérlendis við almennt eftirlit með þjöppun úti í mörkinni. Það góð reynsla er komin á prófið að niðurstöður liggja jafn harðan fyrir þegar prófinu er lokið á byggingarstað. Falllóðið hefur hinsvegar nánast ekkert verið notað á þennan hátt, heldur aðallega til þess að meta burðargetu vega á vorin eftir leysingar og í seinni tíð til þess að meta viðhaldsþörf vega landsins.

Prófin eru ekki ýkja ólík, í báðum tilfellum er verið að mæla sig jarðvegsyfirborðs undan ásettu álagi og út frá því reiknaður fjaðurstuðull (mótsstaða) jarðvegsins samkvæmt sömu jöfnunni. Helsti munurinn er, eins og áður hefur komið fram, tegund álagsins, í plötuprófinu er það kyrrstætt (statískt) en í falllóðsprófinu í formi höggs (dýnamískt). Vegna þess hve prófin eru lík hefur lengi verið áhugi fyrir hendi að skoða hvort einhver tengsl séu á milli aðferðanna, þ.e. hvort þau gefa svipaðar niðurstöður. Helsti hvatinn að því hefur án efa verið tíminn sem það tekur að gera prófin, en það má gera 10-15 falllóðsmælingar á meðan eitt plötupróf er framkvæmt. Það væri því viss ávinningur fólgin í því að geta notað falllóðið í stað plötuprófsins, þar sem hægt

yrði að gera fleiri mælingar á hverjum stað og ná þannig betri mynd af gæðum þjöppunar. Einnig er talið að falllóðið líki betur eftir því álagi sem akandi ökutæki beitir á veg og sé því ákjósanlegri kostur til þjöppumælinga á vegum.

Eins og kom fram í umfjölluninni um plötuprófið, gefa niðurstöður þess ekki nákvæma mynd af gæðum þjöppunar, heldur einungis hugmynd, sem síðan er studd af mikilli uppsafnaðri reynslu mæliaðferðarinnar. Án reynslunnar stendur plötuprófið jafnfætis falllóðinu og einhvern tíman hefur sú reynslusöfnun hafist. Þegar notkun á plötuprófinu hófst fyrir um 40 árum síðan, stóð það líkt og falllóðið stendur í dag, (og reyndar einnig þjöppumælarnir í völturunum; sjá umfjöllun í 7. kafla), þannig að niðurstöður þess gáfu litla sem enga hugmynd um gæði þjöppunar. En með stöðugri notkun og reglulegum samanburði, við ákvarðaða þjöppunargráðu út frá rúmþyngdarmælingum, hefur fengist nægileg reynsla á það, sem stuðlar að allri notkun þess í dag.

Á sama hátt er mögulegt að byggja upp samskonar reynslubanka fyrir falllóðið og einmitt í þeim tilgangi m.a. er verið að bera það við plötuprófið, til þess að athuga hvort einhver fylgni sé þar á milli, þannig að yfirfæra megi einhvern hluta uppsafnaðrar reynslu plötuprófsins yfir á falllóðið.

6.2 Eldri íslenskur samanburður

6.2.1 Samanburður BUSL samstarfsins

6.2.1.1 Lýsing á samanburði

Í janúar 1996 gaf burðarlaganefnd BUSL samstarfsins (samstarf um rannsókna- og þróunarverkefni í vega- og gatnagerð) út skýrslu sem heitir: „Samanburður falllóðs og plötuprófs“. Í skýrslunni eru birtar niðurstöður sigmælinga á vegum með falllóði og plötuprófi, þar sem mælt hefur verið með báðum aðferðum á sömu stöðum og á sama tíma.

Um var að ræða samansafnaðar eldri mælingar á tilraunaköflum á Vesturlandsvegi í Kjós, Botnsvogi og Hvalfjarðarströnd og á Þingvallavegi auk vegkafla á Reykjanesbraut, Arnarnesvegi, Þykkvabæjarvegi og Suðurlandsvegi. Einnig eru í skýrslunni mæliniðurstöður úr götunni Fjörgyn í Grafarvogi, en þær mælingar misheppnuðust og voru því ekki notaðar til samanburðar. Markmið verkefnisins var að reyna að bera saman niðurstöður frá þessum tveimur mæliaðferðum, með því að kanna tölfræðilega fylgni þeirra.

Skýrslunni er skipt í nokkra kafla og fremst er verkefnið skilgreint og mæliaðferðunum tveimur lýst. Að því loknu er samanburðurinn tekinn fyrir, fyrst innbyrðis samanburður milli einstakra högga í falllóðinu en síðan samanburður milli mæliaðferðanna. Milli aðferðanna er í fyrsta lagi borið saman hlutfallið E_2/E_1 úr plötuprófinu og hlutfall niðurbeygja í falllóðinu eftir fyrsta og annað högg (D_{01}/D_{02}), í öðru lagi fjaðurmótstaða (E_2) úr plötuprófi við niðubeygju í falllóðsmælingu í öðru höggi (D_{02}) og í þriðja lagi niðurbeygja í

plötuprófi (S_1) og niðurbeygja í falllóðsprófi, ýmist eftir fyrsta eða annað högg (D_{01} eða D_{02}).

Áður en eiginlegur samanburður milli aðferðanna hófst fór fyrst fram innbyrðis samanburður á niðurbeygju falllóðs undir miðri stálplötunni, eftir fyrsta högg annarsvegar og annað, þriðja og fjórða högg hinsvegar. Þetta var gert til þess að leggja grunn að því með hvaða hætti mætti nota gildin úr falllóðsprófinu í samanburðinn við plötuprófið.

Plötuprófin voru gerð með breytilegum forsendum, þ.e. með breytilegu hámarksálagi og mismunandi plötustærðum, auk þess sem nokkrir mælikaflar voru mældir með svokölluðu hraðprófi, sem er frábrugðið hefðbundnu plötuprófi að því leyti að þar eru engin milliþrep notuð í álagsþrepunum tveimur, þ.e.a.s. keyrt er beint úr engu álagi í hámarksálag. Þessi breytileiki í forsendum plötuprófsins gerði allan samanburð milli mæliaðferðanna erfiðari þar sem niðurbeygja í plötuprófi og stuðlarnir E_1 og E_2 eru mjög háðir bæði plötustærð og hámarksálagi.

Allar niðurstöður mælinganna voru bornar saman með hjálp línurita, þar sem sýnd er jafna fyrir bestu beinu línu og gildið R^2 en gildið R er fylgnistuðull fyrir aðhvarfslíkingunnni. Gildið R^2 segir til um það hversu hátt hlutfall af breytileika annarrar breytunnar skýrist með breytileika hinnar. Því fleiri mælingar sem liggja til grundvallar þegar fylgnistuðull er reiknaður, þeim mun meiri líkur eru á að ályktun um fylgni sé rétt. Sem dæmi má nefna að fyrir samanburð milli 30 mælinga tveggja mæliaðferða, þá þyrfti fylgnistuðullinn R að vera 0,463 eða hærri til þess að 99% líkur séu á því að eitthvað samband sé milli mæliaðferðanna. Í skýrslunni eru í öllum tilfellum bornar saman mun fleiri en 30 mælingar og miðað er við að fylgnin sé nokkuð mikil ef $R > 0,7$ og mjög mikil ef $R > 0,9$. Forritið Excel 5,0 var notað til þess að reikna út þessi gildi.

6.2.1.2 Helstu niðurstöður

Helstu niðurstöður skýrslunnar um fylgni eru eftirfarandi, en tekið er fram að í henni eru gerðir fyrirvarar við margar af niðurstöðunum af áðurnefndum ástæðum, þ.e. vegna mikils breytileika í plötuprófsmælingum.

Innbyrðis samanburður falllóðs: Fyrir mælingar á malarvegum er nokkuð mikil fylgni milli niðurbeygju falllóðs undir miðju álags, eftir fyrsta högg annarsvegar og annað, þriðja og fjórða högg hinsvegar. Fylgnin er mjög mikil fyrir mælingar á vegum sem lagðir eru klæðningu. Mestur hluti þjöppunar verður í fyrsta höggi í falllóðsmælingu og virðist því vera nauðsynlegt að nota niðurbeygju í fyrsta höggi til viðmiðunar ef mæla á þjöppun með falllóði. Mæling á niðurbeygju í fyrsta höggi getur hinsvegar verið fremur ónákvæm á malarvegum.

Samanburður á E_2/E_1 og D_{01}/D_{02}: Fremur léleg fylgni virðist vera milli hlutfalls niðurbeygju í falllóðsmælingu eftir fyrsta og annað högg (D_{01}/D_{02}) annarsvegar

og hlutfallsins E_2/E_1 hinsvegar. Ein af ástæðunum fyrir þessu getur verið hin breytilega mæliaðferð í plötuprófi. Einnig er sett fram sú tillaga, að slá létt högg til forþjöppunar í falllóðsmælingu ef mæla á þjöppun þar sem mæling á niðurbeygju eftir fyrsta högg getur verið ónákvæm, en gæta verður þess að þjappa mælipunktinn ekki of mikið áður en eiginleg mæling hefst.

Samanburður á E_2 og D_{02}: Ef gert er ráð fyrir lógaritmasambandi milli niðurbeygju í falllóðsmælingu eftir annað högg (D_{02}) annarsvegar og fjaðurmótstöðu (E_2) hinsvegar, virðist vera nokkuð mikil fylgni þar á milli. Um þetta gilda áðurnefndir fyrirvarar.

Samanburður á S_1 við D_{01} og D_{02}: Gerður var samanburður á niðurbeygju vegar eftir fyrsta og annað högg í falllóðsmælingu (D_{01} og D_{02}) annarsvegar og eftir fyrri álagsröð (S_1) í plötuprófi hinsvegar. Aðeins voru bornar saman mælingar þar sem notaðar voru sömu mæliaðferðir í hvoru prófi fyrir sig. Talsverð fylgni virðist vera milli D_{02} og S_1 en síðri milli D_{01} og S_1 og stafar þessi mismunur líklega m.a. af því að mæling á D_{01} getur verið ónákvæm.

Helsta almenna niðurstaða skýrslunnar er sú að mjög lítið sé hægt að nota þessar gömlu mælingar á vegum, með plötuprófi og falllóði, til samanburðar, fyrst og fremst vegna þess hve plötuprófin voru framkvæmd með breytilegum forsendum, ekki bara á hinum ýmsu mæliköflum, heldur einnig stundum innan hvers mælikafla. Ástæðan fyrir þessum breytileika var sú að tilgangur þessara mælinga var ekki sá að nýta þær til samanburðar, heldur að ýmist rannsaka burð þessara vegkafla á mismunandi byggingarstigum eða að rannsaka plötuprófið sjálft með breytilegu álagi og plötustærðum.

Bent er á að ef gera á marktækan samanburð milli aðferðanna tveggja sé nauðsynlegt að nota sambærilegar, staðlaðar mæliaðferðir, þ.e. að vera með sama hámarksálag og sömu plötustærðir. Einnig er bent á að nauðsynlegt geti verið að breyta falllóðsprófsaðferðinni örlítið frá því sem hún var í áðurnefndum mælingum, á þann veg að slá eitt létt upphafshögg til þess að minnka ójöfnur í yfirborði án þess þó að þjappa jarðvegin með því. Slíkt gefi marktækari samanburð, þar sem mæling á sigi í fyrsta höggi falllóðsins sé ónákvæm.

Í lokin er komið með þá tillögu að gerð verði samanburðarpróf með falllóðinu og plötuprófinu á sérstökum tilraunaköflum, með þekktum breytilegum uppbyggingum og að þá þyrfti einnig að bera burðarþolsmælingarnar við rannsóknir á þeim jarðefnum sem kaflarnir verða byggðir úr. Slík rannsókn hefur reyndar verið framkvæmd í Danmörku og niðurstöður þess verkefnis verið gefnar út. Í kaflanum hér á eftir er fjallað um það verkefni og helstu niðurstöður þess skoðaðar.

6.3 Eldri erlendir samanburðir

6.3.1 Samanburður dönsku Vegagerðarinnar

6.3.1.1 Lýsing á samanburði

Árið 2003 gaf Vegagerð Danmerkur út skýrslu sem ber heitið „Statisk pladebelastning, faldlod og minifaldlod - resultater af sammenlignende målinger“ en það yfirfærist á íslensku sem „Plötupróf, falllóð og lítil falllóð - niðurstöður af samanburðarmælingum“. Skýrslan segir frá afar vandaðri og vel skilgreindri samanburðartilraun, þar sem mæliaðferðirnar sem tilgreindar eru í titli skýrslunnar eru til skoðunar. Helsta markmið tilraunarinnar var að athuga hvort falllóðið getur komið í stað plötuprófsins við sigmælingar úti í mörkinni. Að auki var verið að skoða hvernig niðurstöður þrjár mismunandi tegundir lítilla falllóða, Loadman, Zorn ZFG 2000 og Prima 100, gefa miðað við hinar tvær aðferðirnar.

Tilraunin var gerð á um 400 metra löngum og 7 metra breiðum vegkafla rétt vestan við Árhus. Undirlag vegarins er mjög grófkornóttur jökulruðningur sem var ýtt upp og notað í fyllingar. Ofan á því er svo u.þ.b. 30 sm þykkt neðra burðarlag úr meðalgrófum sandi og þar fyrir ofan u.þ.b. 25 sm þykkt efra burðarlag úr möl með góðri kornastærðardreifingu. Mælingarnar voru teknar á þjöppuðu yfirborði efra burðarlagsins.

Vegkaflanum var skipt upp í 40 þversnið með u.þ.b. 7,5 meters millibili, að því undanskildu að milli þversniðs 8 , 9 og 10 var helmingi minna millibil. Á hverju þversniði voru síðan skilgreindir 4-5 mælipunktar með u.þ.b. 1 meters bili á milli. Mælingar með falllóði og litlum falllóðum eru fljótlegar og því voru mælingar með þeim gerðar í öllum 40 þversniðum, en plötuprófið einungis gert í öðru hverju þversniði til þess að klára mætti allar mælingarnar samdægurs. Áður en mælingar hófust var niðurröðun mæliaðferðanna á vegkaflanum ákveðin. Aðferðunum var raðað mismunandi í þversniðin til þess að fá úrvals dreifingu og áreiðanleika og var hver mælipunktur merktur með nafni viðkomandi mæliaðferðar, til þess að þær rötuðu á rétta staði. Í töflu 21 má sjá hvernig þessi skipting var.

Allar mælingarnar fóru fram 4. október 2001 og samhliða þeim voru einnig framkvæmdar rúmþyngdarmælingar með Troxler. Eftir að öllum mælingum var lokið, voru síðan grafnir fjórir skurðir þvert í veginn með u.þ.b. 75 metra millibili, til þess að hægt væri að meta lagþykktir nákvæmlega og taka sýnishorn á rannsóknarstofu. Á rannsóknarstofu var gert sigpróf, Proctor próf og svokallað CBR próf á öllum jarðefnunum úr öllum skurðunum. Þessi próf voru notuð m.a. til þess að ákvarða vatnsinnihald og þjöppnargráður vegarins.

Í almennum verklýsingum fyrir vegaframkvæmdir í Danmörku er einungis gerð krafa um ákveðna þjöppunargráðu, en ekki ákveðið fjaðurmótstöðugildi (E-gildi), til að lýsa gæðum þjöppunar. Þjöppunargráðan var því einnig ákvörðuð til

þess að fá samanburð við hana í leiðinni. Hér verður einungis fjallað um samanburðinn milli plötuprófsins og falllóðsins og örlítið minnst á hvaða niðurstöður litlu falllóðin gáfu, en annar samanburður úr skýrslunni er ekki tekinn fyrir hér. Þó er vert að minnast á það að vatnsinnihald vegkaflans mældist á bilinu 5-6% og þjöppunargráðan, 96-101%.

	Röð í þversniði				
Þversnið	**A**	**B**	**C**	**D**	**E**
1		4	2	1	3
2	4	5	1	3	2
3	1	2	3	4	
4	2	3	4	5	1
5	3	1		2	4
6	5	3	1	2	4
7	4	2	3		1
8	3	4	5	1	2
9	1		2	4	3
10	2	1	4	3	5
11		4	2	1	3
12	4	5	1	3	2
13	1	2	3	4	
14	2	3	4	5	1
15	3	1		2	4
16	5	3	1	2	4
17	4	2	3		1
18	3	4	5	1	2
19	1		2	4	3
20	2	1	4	3	5
21		4	2	1	3
22	4	5	1	3	2
23	1	2	3	4	
24	2	3	4	5	1
25	3	1		2	4
26	5	3	1	2	4
27	4	2	3		1
28	3	4	5	1	2
29	1		2	4	3
30	2	1	4	3	5
31		4	2	1	3
32	4	5	1	3	2
33	1	2	3	4	
34	2	3	4	5	1
35	3	1		2	4
36	5	3	1	2	4
37	4	2	3		1

Útskýringar:

1	**Loadman**
2	**Zorn**
3	**Prima**
4	**Falllóð**
5	**Plötupróf**

Troxler-mæling

Skurðgröftur

38	3	4	5	1	2
39	1		2	4	3
40	2	1	4	3	5

Tafla 20. Niðurröðun mæliaðferða á vegkaflanum.[94]

Í upphafi tilraunar voru mismunandi álagsmöguleikar hverrar mæliaðferðar skoðaðir, til þess að athuga hvort hægt væri að samræma álag milli aðferða. Það reyndist að nokkru leyti mögulegt, þó svo að kraftarnir frá litlu falllóðunum séu ekki ýkja stórir. Eftirfarandi tafla sýnir möguleika hverrar aðferðar:

Mæliaðferð	**Þvermál plötu (mm)**	**Kraftur (kN)**	**Heildar spenna (kPa)**
Loadman	300	20	280
	132	20	1460
Zorn ZFG 2000	300	7,1	100
Prima 100	300	6,4	90
	300	14,1	200
Falllóð	300	14,1	200
	300	21,2	300
	300	32,5	450
Plötupróf	600	32,5	115
	450	32,5	200
	300	14,1	200
	300	32,5	460

Tafla 21. Álagsmöguleikar hverrar aðferðar.[95]

Ekki er nógu nákvæmlega tekið fram í skýrslunni hvernig hver mæliaðferð er framkvæmd, t.d. hvort álagið sé sett á í þrepum í plötuprófinu og fjaðurstuðullinn reiknaður samkvæmt því, líkt og hérlendis er gert. Einnig hvort slegin eru fleiri en eitt högg í falllóðsprófinu og þá hvert af þeim er notað í útreikninga. Það getur verið að útreikningum sé stillt upp öðruvísi en vani er til hérlendis, en eitt er þó víst að þeir eru mjög líklega hafðir sambærilegir milli aðferða. Allavegana er einungis ein eftirfarandi líking tilgreind í skýrslunni fyrir útreikning á E_0 gildi:

$$E_0 = \frac{2 \cdot (1 - \nu^2) \cdot \sigma_0 \cdot a}{d_o} \qquad (6\text{-}1)$$

[94] Hildebrand, Gregers og Baltzer, Susanne. 2003
[95] Hildebrand, Gregers og Baltzer, Susanne. 2003

þar sem:

E_0 = fjaðurmótstaða vegar undir miðri álagsplötu.
v = Possions hlutfall.
a = radíus álagsplötu.
σ_0 = heildar álagsspenna.
d_0 = niðurbeygja undir miðri álagsplötu.

Í samanburðinn var valið að nota 200 kPa spennuálag og 300 mm stóra álagsplötu í þvermál. Þetta var möguleiki með plötuprófið, falllóðið og Prima 100, en Loadman þurfti að prófa við 280 kPa og Zorn við 100 kPa, (sbr. tafla 21). Við útreikningana var miðað við Possions hlutfallið 0,5, af því að sumar aðferðanna nota þetta gildi sjálfvirkt til þess að reikna út E_0 gildið. Fyrir núningsefni eins og sand og möl er algengt að Possions hlutfallið liggi á bilinu 0,35-0,45, en þar sem markmiðið var að bera saman mismunandi tegundir mæliaðferða, hefur gildið á Possions hlutfallinu enga sérstaka þýðingu, svo lengi sem það sama er notað í öllum aðferðunum.

Í tilrauninni komu upp smávægilegir erfiðleikar með litla Prima falllóðið. Fyrir það fyrsta voru mæliniðurstöður í punktum 10, 18 og 37 óstöðugar og var því sleppt úr samanburðinum. Síðan tilkynnti þáverandi danska fyrirtækið Keros Technology, eftir að niðurstöður allra mæliaðferða lágu fyrir, að nýrri og betri kvörðun væri komin á tækið. Nýja kvörðunin sýndi fram á það að tækið, sem var notað við tilraunina, gaf niðurstöður á E_0 stuðlinum sem voru að meðaltali um 18% lægri. Í skýrslunni er þetta ekki leiðrétt og því eru allar niðurstöður litla Prima falllóðsins aðeins of lágar.

6.3.1.2 Helstu niðurstöður

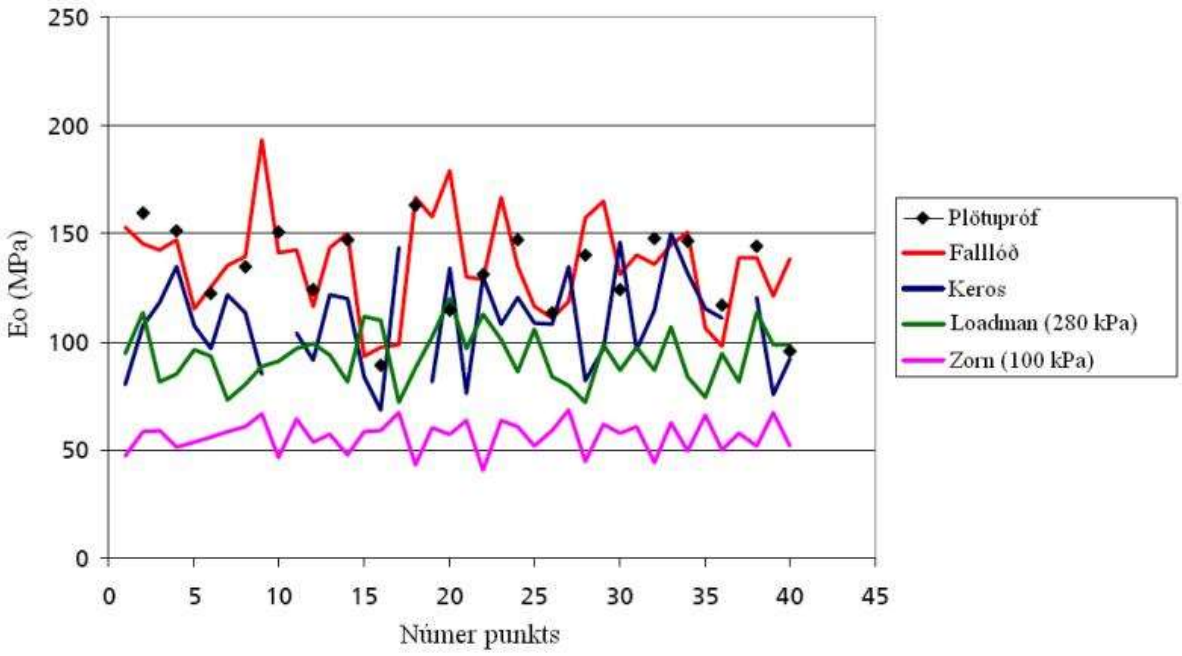
Helsta markmið tilraunarinnar var að athuga hvort falllóðið gæti komið í stað plötuprófsins, þar sem mælingar með falllóðinu taka talsvert skemmri tíma en með plötuprófinu. Miðað við ákvarðaðan fjaðurstuðul (E_0) út frá báðum aðferðum í hverju þversniði, virtist vera beint samband milli niðurstaðna mæliaðferðanna tveggja. En til þess að endanlega megi ákveða hvort falllóðið geti tekið við af plötuprófinu, er mælt með því að fleiri slíkar samanburðar tilraunir séu framkvæmdar og þá ekki einungis á efra burðarlagi, heldur einnig á neðra burðarlagi og fyllingu. Því er skorað á Vegagerðina í Danmörku að gera fleiri slíkar tilraunir til þess að endanlega megi ákveða hvort hægt sé að skipta plötuprófinu út fyrir falllóðið.

Minna samband virtist vera milli litlu falllóðanna og plötuprófsins, en ástæðan fyrir því er annarsvegar talinn liggja í mismunandi álagsforsendum aðferðanna, þ.e. Loadman var með 280 kPa spennuálag og Zorn 100 kPa, í stað 200 kPa og hinsvegar í röngum niðurstöðum litla Prima falllóðsins. Af þeim þremur voru niðurstöður Prima og Loadman þó að sýna meiri samsvörun við plötuprófið, en niðurstöður Zorn, sem voru talsvert lægri. Tekið er fram í skýrslunni að sennilega sé hægt að ákvarða einhverja leiðréttingarstuðla milli litlu falllóðanna

og plötuprófsins (eða falllóðsins), en það myndi þá eingöngu gilda fyrir nákvæmlega eins aðstæður og þessar mælingar voru gerðar við.

Þrátt fyrir að samband litlu falllóðanna við hinar aðferðirnar sé í lágmarki, er samt mælt með því að litlu falllóðin skuli vera kynnt sem fljótleg eftirlitstæki til að meta þjöppun fyllinga og burðarlaga, sérstaklega á stöðum þar sem plötuprófinu og falllóðinu er ekki við komið. Til lengri tíma litið skal það einnig íhugað að reyna að innleiða litlu falllóðin sem hefðbundna eftirlitsaðferð, sem notuð yrði á fyllingum og burðarlögum til þess að búa til kröfur um þjöppun og burðargetu þessara efnislaga.

Mynd 44 sýnir vel niðurstöður samanburðarins. Á henni má sjá ákvörðuð gildi á fjaðurmótstöðu (E_0) allra mæliaðferðanna og hversu vel niðurstöðum plötuprófsins og falllóðsins ber saman annarsvegar og litlu falllóðanna við hinar tvær aðferðirnar hinsvegar. Eins og sjá má lenda punktar plötuprófsins nánast allsstaðar inn á falllóðsferlinum.



Mynd 44. Samanburður á fjaðurmótstöðu (E_0) mismunandi mæliaðferða.[96]

Frávik hverrar mæliaðferðar var einnig skoðað til þess að meta áreiðanleika þeirra. Í þeirri athugun voru einungis mæliniðurstöður úr langsniðum B, C og D notaðar, en ekki úr langsniðum A og E (sbr.tafla 20), þar sem mæliniðurstöður á þeim sýndu almennt talsvert lægri gildi en hin þrjú. Þetta er talið eðlilegt þar sem sjaldan næst eins góð þjöppun á köntum, fyllinga og burðarlaga, eins og í miðju. Tafla 22 sýnir þessi frávik, en þau er reiknuð sem prósenta dreifingar af meðatalsgildi á fjaðurmótstöðu (E_0). Af töflunni má sjá að mæliniðurstöður Prima falllóðsins eru að gefa mesta frávikið og því telst það vera viðkvæmast í

[96] Hildebrand, Gregers og Baltzer, Susanne. 2003

almennri notkun. Þetta getur þó stafað af rangri kvörðun tækisins eins og áður greinir frá.

Mæliaðferð	Meðaltalsgildi fjaðurmótstöðu (MPa)	Dreifing (MPa)	Frávik (%)
Loadman	97	12,8	13,2
Zorn ZFG 2000	60	5,7	9,4
Prima 100	118	19,9	17,0
Falllóð	149	16,4	11,0
Plötupróf	145	11,0	7,6

Tafla 22. Meðaltalsgildi og dreifing fjaðurmótstöðu í langsniðum B, C og D.

Einnig kemur fram í niðurstöðum, í þeim mæliaðferðum þar sem mælt var með fleiri en einni álagsspennu, að E_0 stuðullinn hækkar með auknu álagi.

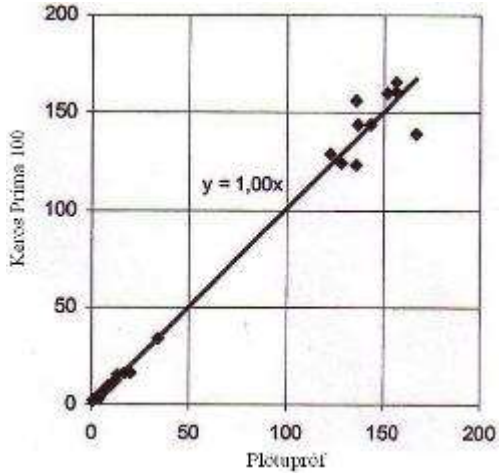
6.3.2 Samanburður Keros Technology

6.3.2.1 Lýsing á samanburði

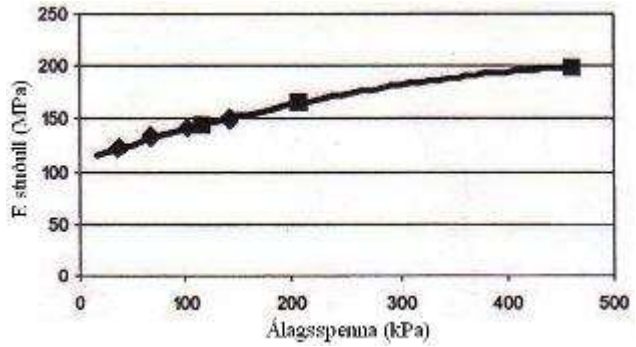
Litla falllóðið Prima 100 var upphaflega framleitt af danska fyrirtækinu Carl Bro. Starfsmaðurinn sem vann hvað mest við gerð tækisins hætti þar störfum og stofnaði Keros Technology, sem síðar sameinaðist stærri samsteypu sem heitir Dynatest. Áður en þessi sameining átti sér stað, gerði Keros Technology smá samanburð á Prima 100 og plötuprófinu. Samanburðurinn var gerður í samstarfi við önnur jarðtækni fyrirtæki, háskóla, og dönsku Vegagerðina. Mæliaðferðirnar tvær voru bornar saman út frá niðurstöðum mælinga sem fyrirtækið Franck Geoteknik og danska Vegagerðin framkvæmdu. Markmið samanburðarins var að skoða hvort einhver samhljómur væri á milli niðurstaðna aðferðanna og að meta hvaða áhrif aukið álag hefur á E_0 stuðulinn. Ekki er tekið fram hvernig mælitilhögunum var háttað, né hversu margar mælingar voru framkvæmdar.

6.3.2.2 Helstu niðurstöður

Niðurstöður mælinganna tveggja voru settar upp í fjögur línurit og sýnir það fyrsta samanburð á ákvörðuðu E_0 gildi hvorrar aðferðar. Þar kemur fram að það er 1:1 samband milli niðurstaðna prófanna. Í hinum línuritunum er verið að skoða hvaða áhrif aukin álagsspenna hefur á E_0 stuðulinn, fyrir þrenn mismunandi jarðefni, þ.e. óþjappaðan jökulleir, þjappaðan jökulleir og þjappaða möl. Fyrir jökulleirinn minnkar E_0 stuðullinn með auknu álagi, en eykst fyrir mölina. Hér fyrir neðan eru sýnd tvenn þessara línurita, þ.e. samanburðarlínuritið milli aðferðanna og álagsaukningin fyrir möl.



Mynd 45. Fylgni milli E_0 stuðla frá Prima 100 (y ás) og plötuprófi (x ás).[97]



Mynd 46. Gildi á E_0 stuðlum aðferðanna miðað við breytilega álagsspennu á þjappaðri möl. Ferningar tákna niðurstöður plötuprófs en tíglar niðurstöður Prima 100.[98]

Óvíst er hvernig lesa megi út úr þessum niðurstöðum, því eins og áður hefur komið fram sýndi samanburður dönsku Vegagerðarinnar, sem fjallað var um hér á undan, ekki nægileg tengsl milli Prima 100 og plötuprófsins. Reyndar var þar tekið sérstaklega fram að viss vandræði hefðu komið upp með Prima 100 falllóðið, þar sem kvörðun tækisins var röng. E.t.v. hefur kvörðun tækisins sem var notað í þessum samanburði, þ.e. Keros Techology, verið réttari og niðurstöður þess því gefið svona sterk tengsl við plötuprófið.

Í skýrslunni er, í niðurstöðum, einnig minnst á mikilvægi þess að nota sömu álagsforsendur í öllum aðferðum þegar verið er að meta og bera saman tvær eða fleiri mismunandi mæliaðferðir til ákvörðunar á fjaðurmótstöðu (E_0) jarðefnis.

[97] Christensen, Ole Rahbek.
[98] Christensen, Ole Rahbek.

6.4 Núverandi samanburður

6.4.1 Tilgangur

Tilgangur þessa verkefnis var að fylgjast með framkvæmd plötuprófs og falllóðsprófs og að reyna koma auga á kosti og galla hvorrar mæliaðferðar fyrir sig. Einnig að skoða niðurstöður prófanna og athuga hvort einhver fylgni sé milli þeirra eða samband sem hægt er að setja fram. Út frá því að reyna síðan að meta hvort falllóðið geti í einhverjum tilfellum komið í stað plötuprófsins.

6.4.2 Tæki

KUAB falllóð Vegagerðarinnar ásamt bíl sem dregur það og inniheldur öll stjórntæki þess. Einnig útbúnaður Rannsóknarstofnunar Byggingariðnaðarins til þess að framkvæma plötuprófið, þ.e. vökvatjakkur, sigmælar, sendibíll með stjórnunartækjum og vörubíll sem farg.

6.4.3 Framkvæmd

6.4.3.1 Almennt

Til samanburðarins eru notaðar niðurstöður mælinga úr þremur, ýmist nýlega yfirstöðnum eða núverandi vegframkvæmdum á höfuðborgarsvæðinu með plötuprófi og falllóði, þar sem mælt var með báðum aðferðum í sömu punktum og á sama tíma. Um er að ræða framkvæmdir í tengslum við færslu Hringbrautar, breikkun Vesturlandsvegar milli Reykjavíkur og Mosfellsbæjar og stækkun Reykjanesbrautar. Haft var samband við eftirlitsaðila hverrar framkvæmdar og mælingar gerðar í samráði við þá.

Mælingarnar voru framkvæmdar í september og október 2004, að undanskildum mælingum sem gerðar voru á Reykjanesbrautinni, en þær voru gerðar í mars 2004. Höfundur þessarar skýrslu tók þátt í öllum mælingum á Hringbrautinni og Vesturlandsveginum, en átti engan hlut í þeim sem framkvæmdar voru á Reykjanesbrautinni. Mælingarferlið gekk þannig fyrir sig að eftirlitsaðilar höfðu samband við skýrsluhöfund og létu vita hvenær von væri á tilbúnu, frágengnu og þjöppuðu, jarðvegsyfirborði til mælinga og jafnframt hvenær von væri á aðilum frá R.B. til að framkvæma plötupróf, því reynt var að stilla inn á að bæði prófin væru gerð á svipuðum tíma. Skýrsluhöfundur hafði svo samband við Harald Sigursteinsson hjá Vegagerðinni, sem hefur yfirumsjón með falllóðinu.

Mælingar með báðum aðferðum voru framkvæmdar á mjög hefðbundinn hátt eins og lýst er í 5. kafla. Í plötuprófunum var álagið sett á plötuna í tveimur álagsþrepum og í falllóðsmælingunum voru slegin fjögur högg. Eftirfarandi tafla sýnir hvaða plötustærðir og álag var notað á hverjum stað:

	Plötupróf			**Falllóðspróf**		
	Þvermál	**Kraftur**	**Heildar-**	**Þvermál**	**Meðal**	**Heildar-**

	plötu (mm)	(kN)	spenna (kPa)	plötu (mm)	kraftur (kN)	spenna (kPa)
Hringbr. burðarl.	300	36,5	517	300	50	707
Hringbr. fylling	300	60,0	849	300	50	707
	600	60,0	248	////	////	////
	1000	60,0	76	////	////	////
Vesturlandsv.	300	36,5	517	300	50	707
Reykjanesbraut	450	54,2	341	300	50	707

Tafla 23. Álagsforsendur plötuprófs og falllóðs í samanburðarmælingum.

6.4.3.2 Hringbraut

Fyrirtækið Háfell sér um framkvæmdir á verkinu: „Nesbraut (49), færsla Hringbrautar“. Verkið felur í sér að gera nýja Hringbraut í Reykjavík sunnan við núverandi Hringbraut (gömlu Hringbraut), neðan við lóð Landsspítalans og BSÍ. Nýja Hringbrautin verður lögð undir núverandi Bústaðarvegabrú að austanverðu og tengd nýjum gatnamótum Njarðargötu vestanmegin. Innifalið er allur frágangur á aðlögun við aðliggjandi götur, breytingar á gömlu Hringbraut og gerð göngustíga um svæðið.

Samkvæmt sérverklýsingu skal notaður skeljasandur í fyllingar. Lekt efnisins eftir þjöppun með titurvaltara skal vera lægri en 10^{-2} sm/sek. Í neðra burðarlag skal notað frostþolið efni, án lífrænna efna. Efni telst frostþolið ef hlutfall efniskorna minni en 0,063 mm í námu er lægra en 5% af þurri þyngd. Þykkt neðra burðarlags skal vera 600 mm og er heimilt er að nota sprengda/fleygaða klöpp úr verkinu í það. Þykkt efra burðarlags skal vera 200 mm og efnið má ekki vera rakaviðkvæmt, þ.e. rúmþyngd og burðarþol er lítið háð raka. Í efra burðarlag skal notaður púkkmulningur, þ.e. efni unnið úr gropnu, bæði lausu og föstu, gosefni.

	Vegfyllingar	Neðra burðalag	Efra burðarlag
Jarðefnistegund	Skeljasandur	Ótilgreint	Púkkmulningur
Grófleikatala efnis (Cu)	Ótilgreint	≥ 10	> 10
Völtunarþykkt laga (mm)	500	500	200
Fjöldi yfirferða m.v. 6-8 tonna titringsvaltara	4-6	4-6	4-6
Hraði valtara (km/klst)	3-6	3-6	3-6
E_2	≥ 50MPa	≥ 100MPa	≥ 150MPa
Hallamæling (%)	5-10	5-10	5-10

Tafla 24. Þjöppunarkröfur fyllinga og burðarlaga í nýrri Hringbraut.[99]

Fyrir samanburðinn voru alls gerðar mælingar á 14 punktum með báðum mæliaðferðum í þessari framkvæmd, 9 á fyllingu og 5 á efra burðarlagi og gengu þær allar mjög vel fyrir sig. Mikil umferð þungra ökutækja var reyndar um

[99] Sérverklýsing; Nesbraut (49), færsla Hringbrautar. 2004

mælingarsvæðið á efra burðarlaginu og getur það haft einhver áhrif á mæliniðurstöður. Valgeir Bergmann, innri eftirlitsmaður hjá Háfelli, fylgdist með samanburðinum og aðstoðaði við hann. Mælingarnar á fyllingunni voru einnig unnar í samvinnu við Jón Skúlason, sem var þar að skoða hvaða áhrif mismunandi plötustærðir hafa á niðurstöður plötuprófsins á skeljasandinum. Í þeim tilgangi lét hann framkvæma alls áðurnefnd 9 plötupróf á fyllingunni, 3 með hverri plötustærð, 300, 600 og 1000mm.

6.4.3.3 Vesturlandsvegur

Fyrirtækið Jarðvélar hf. sér um framkvæmdir á verkinu „Hringvegur (1), Víkurvegur-Skarhólabraut“. Verkið felur í sér tvöföldun á hringvegi milli Víkurvegar í Reykjavík og Skarhólabrautar í Mosfellsbæ, gerð tveggja hringtorga á gatnamótum við Úlfarfellsveg og Korpúlfstaðaveg og einnig byggingu á tveimur nýjum vegbrúm og einni göngubrú á Úlfarsá.

Samkvæmt sérverklýsingu má í fyllingar nota efni úr jarðvegs- og bergskeringum og einnig upprifið steypt slitlag af eldri Vesturlandsvegi. Efstu 300 mm útlagðar fyllingar skal vera frostfrítt efni. Uppfylla skal þjöppunarkröfu 1 í kafla 33 c) í Alverk´95 (sjá töflu 17 í kafla 4.5.3.). Í neðra burðarlag skal nota sand- og malarefni eða gosefni sem uppfylla kröfur til steinefnis 2 skv. Alverk´95 og heimilt er að nota sprengda/fleygaða klöpp úr verkinu, ef það uppfyllir kröfurnar. Í efra burðarlag skal nota 200 mm þykkt púkk sem uppfyllir kröfur Alverks´95 um unnin efni. Uppfylla skal þjöppunarkröfu 1 skv. Alverk´95 fyrir bæði burðarlögin.

Í þessari framkvæmd voru fyrir samanburðinn alls gerðar mælingar á 13 punktum með báðum mæliaðferðum, 8 á neðra burðarlagi og 5 á efra burðarlagi. Mælingar gengu vel, yfirborð neðra burðarlagsins var reyndar sums staðar mjög gróft og opið, en sigmælar falllóðsins eru mjög viðkvæmir fyrir slíku og geta í slíkum tilfellum gefið rangar upplýsingar. Á efra burðarlagi fóru mælingar, með aðferðunum tveimur, ekki fram samdægurs, fyrst var plötuprófið gert á völdum punktum en þegar falllóðsmælingarar fóru fram daginn eftir, var búið að bæta við jöfnunarlagi og þjappa betur á sumum punktum. Einnig var umferð ökutækja um svæðið talsverð og að sjálfsögðu getur það haft áhrif á mælingarnar. Mikael J. Traustason hjá Fjölhönnun, eftirlitsmaður verksins, fylgdist með samanburðinum og aðstoðaði við hann.

6.4.3.4 Reykjanesbraut

Stækkun Reykjanesbrautarinnar hefur staðið yfir um nokkurt skeið og er nú að mestu lokið, en Háfell sá um framkvæmd verksins. Um var að ræða tvöföldun akbrauta á hættulegasta vegkafla þessarar leiðar. Þjöppunarkröfur voru samkvæmt Alverk´95, fyrir fyllingar, neðra- og efra burðarlag.

Skýrsluhöfundur kom hvergi nálægt mælingum sem gerðar voru á kaflanum, en fékk niðurstöður úr öllum plötuprófs- og falllóðsmælingum, hjá Haraldi

Haraldssyni hjá R.B. og Haraldi Sigursteinssyni hjá Vegagerðinni. Talsvert margir punktar voru mældir með plötuprófinu en heldur færri með falllóðinu. Þegar gögn yfir niðurstöður voru skoðaðar kom í ljós að um einungis 3 sameiginlega punkta var að ræða, þ.e. punkta sem bæði prófin höfðu verið gerð á. Þar að auki voru plötuprófin gerð með 450 mm plötu á meðan falllóðin voru gerð með 300 mm plötu, sem gerir samanburð alltaf erfiðari.

6.4.4 Úrvinnsla

Hægt er að bera mæliaðferðirnar saman á ýmsan hátt. Í samanburðinum sem BUSL samstarfið stóð fyrir og fjallað var um í kafla 6.2.1, var mikið verið að bera saman fjaðurstuðul plötuprófsins við mælt sig frá falllóðsprófinu og fylgni skoðuð þar á milli. Undarlegt er að þessi gildi skyldu verða fyrir valinu, vegna þess hversu ólík þau eru og einnig þar sem sigið er breyta í líkingunni fyrir útreiknaðan fjaðurstuðul hjá báðum mæliaðferðum. Hugsanlega hefði verið betra að bera annaðhvort saman mælt sig frá báðum mæliaðferðum eða, eins og gert var í erlendu samanburðunum tveimur, að bera saman fjaðurstuðul beggja aðferða.

Ef bera skal fjaðurstuðlana saman kemur upp sú spurning hvaða fjaðurstuðla úr prófunum tveimur er best að bera saman, fyrri eða seinni í plötuprófinu (E_1 eða E_2) við fyrsta, annan, þriðja eða fjórða í falllóðsmælingunni (E_{m1}, E_{m2}, E_{m3} eða E_{m4}). Í hefðbundnu plötuprófi hérlendis er ætíð tvennt metið, annarsvegar gildið á E_2 og hinsvegar gildið á hlutfallinu E_2/E_1 og þar sem markmiðið er m.a. að athuga hvort yfirfæra megi reynslu plötuprófsins yfir á falllóðsprófið er líklega. best að reyna stilla upp svipuðum gildum frá falllóðinu til samanburðar.

Í falllóðsmælingum hefur hefð myndast fyrir því að skoða niðurstöður á fjaðurstuðli í höggi fjögur (E_{m4}) og hlutfalli reiknuðu milli fjaðurstuðla í þriðja og fjórða höggi (E_{m4}/E_{m3}), þegar verið er að meta gæði þjöppunar. Í fyrstu virðist þetta líkja vel eftir gildum plötuprófsins, en þegar betur er að gáð má sjá að hlutfallið E_{m4}/E_{m3} líkir ekki nægilega eftir E_2/E_1, einfaldlega vegna þess hversu miklu lægra það er. Í samanburðarskýrslu BUSL samstarfsins er bent á að best sé að nota hlutfallið milli fyrsta og annars höggs í falllóðinu (E_{m2}/E_{m1}) til þess að bera saman við þjöppunarhlutfallið E_2/E_1 úr plötuprófinu.

Við það að skoða niðurstöður falllóðsmælinga á efra burðarlagi frá Hringbraut (22 mælingar) og Vesturlandsvegi (28 mælingar) og reikna meðalgildi fjaðurstuðuls úr þeim, eftir hvert högg, má sjá að hlutfallslega er lang mesta aukningin á fjaðurstuðlinum milli fyrsta og annars höggs. Aukningin milli þriðja og fjórða höggs er miklu minni. Þetta gefur því þær vísbendingar að hlutfallið E_{m2}/E_{m1} líki betur eftir E_2/E_1 frá plötuprófinu, heldur en E_{m4}/E_{m3}. Eftirfarandi tafla sýnir útreiknuð meðaltöl fjaðurstuðla frá falllóðsmælingunum og hlutfallslega aukningu á þeim milli högga:

Högg	Vesturl.v.	Aukning	Hringbraut	Aukning	Allar mælingar	Aukning

númer	meðalg. Emod	Emod (%)	meðalg. Emod	Emod (%)	meðalg. Emod	Emod (%)
1	80	////	111	////	95	////
2	192	58,5%	186	40,2%	189	49,5%
3	207	7,4%	194	3,9%	200	5,7%
4	214	3,3%	195	0,8%	205	2,1%

Tafla 25. Meðalgildi Emod stuðuls í falllóðsmælingum og hlutfallsleg aukning milli högga.

Í þessum samanburði er því valið að bera saman hlutfallið á ákvörðuðum fjaðurstuðlum milli fyrsta og annars höggs falllóðsins (E_{m2}/E_{m1}) við hlutfallið á ákvörðuðum fjaðurstuðlum milli álagsraðanna tveggja í plötuprófinu (E_2/E_1). Einnig að nota frekar fjaðurstuðul úr öðru höggi falllóðsins (E_{m2}) í stað fjórða höggs (E_{m4}) við samanburð á E_2 stuðlinum í plötuprófinu, til þess að samræmi sé milli samanburðs hlutfallanna og samanburðar E stuðlanna.

6.4.5 Niðurstöður mælinga

Þær mælingar sem nothæfar eru til samanburðar, þ.e. á punktum sem báðar aðferðirnar voru gerðar, eru alls 30 talsins og niðurstöður á ákvörðuðum fjaðurstuðlum beggja aðferða eru teknar saman í eftirfarandi töflu:

		Plötupróf				Fallóðspróf			
	Pkt. nr.	**Álag (kPa)**	**E_1 (MPa)**	**E_2 (MPa)**	**E_2/E_1 (MPa)**	**Álag (kPa)**	**E_{m1} (MPa)**	**E_{m2} (MPa)**	**E_{m2}/E_{m1} (MPa)**
Hringbr.	1	849	41	143	3,49	707	62	147	2,38
Fylling	2	849	45	138	3,07	707	63	147	2,33
	3	849	33	119	3,61	707	63	141	2,23
Meðalgildi		////	40	133	3,36	////	63	145	2,31
Staðalfrávik		////	6,1	12,7	0,28	////	0,9	3,6	0,08
	4	248	31	114	3,68	707	60	136	2,29

	5	248	27	96	3,56	707	55	119	2,16
	6	248	25	95	3,80	707	58	123	2,12
Meðalgildi		////	28	102	3,67	////	58	126	2,19
Staðalfrávik		////	3,1	10,7	0,12	////	2,3	8,9	0,09
	7	76	17	87	5,12	707	57	124	2,19
	8	76	20	90	4,50	707	63	128	2,05
	9	76	33	121	3,67	707	59	127	2,16
Meðalgildi		////	23	99	4,26	////	59	126	2,13
Staðalfrávik		////	8,5	18,8	0,73	////	3,1	2,0	0,08
Hringbr.	1	517	90	160	1,78	707	136	205	1,51
Efra b.lag	2	517	85	150	1,76	707	134	204	1,52
	3	517	70	130	1,86	707	72	140	1,94
	4	517	110	170	1,55	707	103	171	1,66
	5	517	100	170	1,70	707	115	187	1,63
Meðalgildi		////	91	156	1,71	////	112	181	1,62
Staðalfrávik		////	15,2	16,7	0,12	////	26,2	27,0	0,18
Vesturl.v.	1	517	95	180	1,89	707	174	186	1,07
Neðra b.lag	2	517	85	160	1,88	707	145	188	1,30
	3	517	120	200	1,67	707	139	222	1,60
	4	517	100	200	2,00	707	165	170	1,03
	5	517	100	180	1,80	707	112	184	1,64
	6	517	120	190	1,58	707	90	208	2,31
	7	517	95	160	1,68	707	103	173	1,68
	8	517	100	160	1,60	707	215	225	1,05
Meðalgildi		////	102	179	1,75	////	143	195	1,36
Staðalfrávik		////	12,2	17,3	0,15	////	41,4	21,2	0,44
Vesturl.v.	1	517	65	160	2,46	707	57	164	2,88
Efra b.lag	2	517	50	120	2,40	707	122	220	1,80
	3	517	95	190	2,00	707	73	207	2,84
	4	517	100	170	1,70	707	79	182	2,30
	5	517	110	200	1,82	707	82	190	2,32
Meðalgildi		////	84	168	2,00	////	83	193	2,33
Staðalfrávik		////	25,3	31,1	0,34	////	24,0	21,8	0,44
Reykjan.br.	1	341	75	120	1,60	707	92	106	1,15
Efra b.lag.	2	341	70	110	1,57	707	83	202	2,43
	3	341	60	120	2,00	707	99	135	1,36
Meðalgildi		////	68	117	1,71	////	91	148	1,62
Staðalfrávik		////	7,6	5,8	0,24	////	8,0	49,2	0,69
Meðalgildi allra mælinga		////	72	147	2,43	////	98	169	1,90
Staðalfrávik allra mælinga		////	32,6	34,9	1,01	////	41,1	35,2	0,51

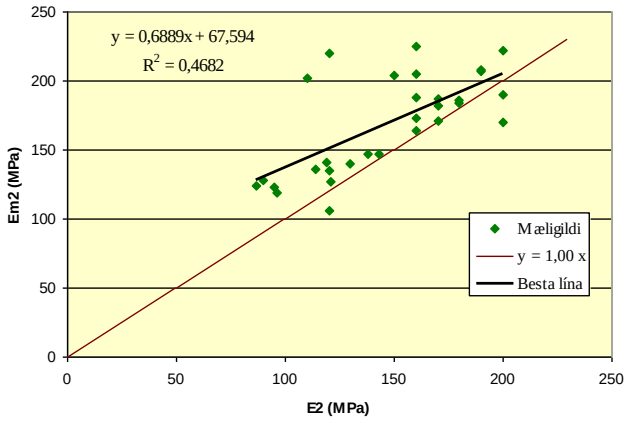
Tafla 26. Niðurstöður mælinga ásamt meðalgildi og staðalfráviki.

6.4.6 Samanburður á E_2 og E_{m2}

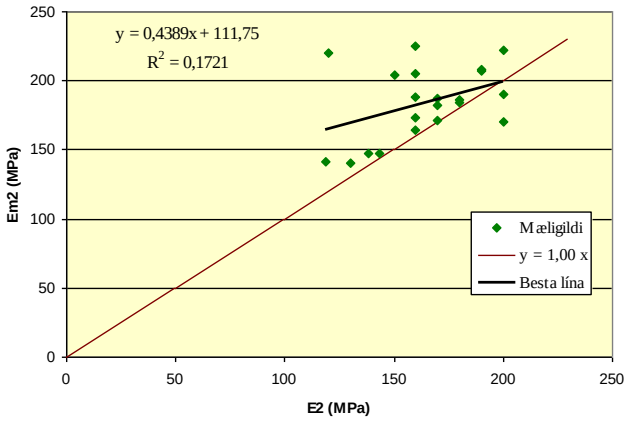
Í þessum kafla eru niðurstöður nothæfra mælinga á ákvörðuðum E_2 stuðli plötuprófs bornar saman við E_{m2} stuðul falllóðsprófs. Líkt og í samanburðinum sem BUSL samstarfið stóð fyrir, eru línurit notuð við þennan samanburð og á þeim er sýnd jafna fyrir bestu beinu línu mælipunktanna og gildið R^2, en gildið R er fylgnistuðullinn fyrir aðhvarfslíkingunni. Í kafla 6.2.1.1. var þessi líking útskýrð og þar fjallað um að fylgnistuðullinn (R) þarf að vera 0,463 eða hærri, í samanburði 30 mælinga, til þess að 99% líkur séu á að eitthvað samband sé milli mæliaðferðanna.

Alls er að finna þrjú línurit í þessum kafla þar sem mismunandi fjöldi nothæfra mælinga var notaður til samanburðar. Í fyrsta línuritinu eru allar nothæfar mælingar notaðar (30), í öðru einungis nothæfar mælingar sem gerðar voru með 300 mm plötu (21) og í því þriðja nothæfar mælingar sem gerðar voru með 300 mm plötu, þar sem hámarksálag plötuprófsins var 517 kPa og falllóðsprófsins 707 kPa (18). Eins og sjá má er ekki verið að bera saman mikinn fjölda mælinga (mest 30) og því má gera ráð fyrir að ekki mikið sé að marka fylgnistuðulinn. Hann er þó settur fram til þess að gefa smá hugmynd um hver fylgni mæliniðurstaðnanna er. Hér er miðað við að fylgni sé nokkuð mikil ef R > 0,7 og mjög mikil ef R > 0,9. Ljóst er af fyrsta línuritinu að nokkuð góðri fylgni er næstum því náð milli gilda úr öllum 30 mælingunum, R = 0,68. En á tveimur seinni línuritunum er fylgni léleg, á því fyrra er R = 0,41 og því seinna R = 0,13.

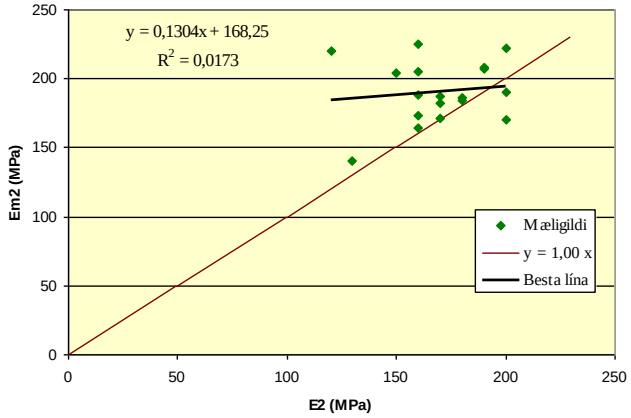
Á línuritunum má einnig finna beina viðmiðunarlínu þar sem öll gildi á E_2 eru jöfn E_{m2}, (y = 1,00 x). Sjá má að mælipunktarnir liggja að mestu leyti ofan við þessa línu; falllóðið virðist því gefa alltaf örlítið hærri gildi en plötuprófið, sem stuðlar að lélegri fylgni.



Mynd 47. Em2 sem fall af E2 fyrir allar nothæfar mælingar.



Mynd 48. Em2 sem fall af E2 fyrir allar nothæfar mælingar teknar með 300 mm plötu.



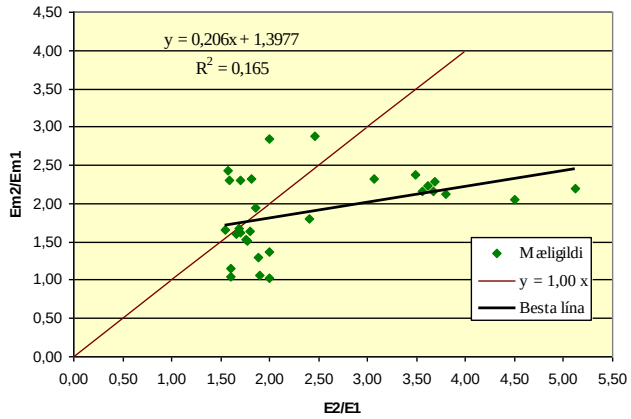
Mynd 49. Em2 sem fall af E2 fyrir allar nothæfar mælingar teknar með 300 mm plötu, þar sem álag í plötuprófi er 517 kPa og í falllóðsprófi 707 kPa.

6.4.7 Samanburður á E_2/E_1 og E_{m2}/E_{m1}

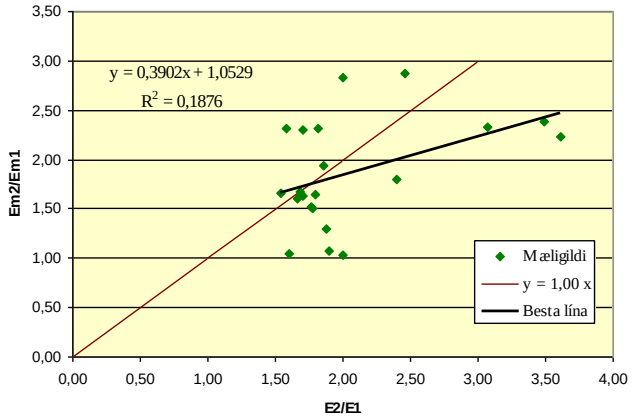
Í þessum kafla er ákvarðað hlutfall E_2/E_1 úr plötuprófi borið saman við hlutfallið E_{m2}/E_{m1} úr falllóðsprófi. Það er gert á sama hátt og áður, þ.e. með hjálp línurita sem sýna jöfnu fyrir bestu beinu línu mælipunktanna og gildið R^2.

Eins og áður eru þrjú línurit í þessum kafla, þar sem mismunandi fjöldi nothæfra mælinga var notaður til samanburðar. Í fyrsta línuritinu eru allar nothæfar mælingar notaðar (30), í öðru einungis nothæfar mælingar sem gerðar voru með 300 mm plötu (21) og í því þriðja nothæfar mælingar sem gerðar voru með 300 mm plötu þar sem hámarksálag plötuprófsins var 517 kPa og falllóðsprófsins 707 kPa (18). Miðað er við að fylgni sé nokkuð mikil ef R > 0,7 og mjög mikil ef R > 0,9. Ljóst er af öllum línuritunum að lélég fylgni er milli hlutfallanna tveggja. Í því fyrsta er R = 0,41, í öðru er R = 0,43 og í þriðja er R = 0,33.

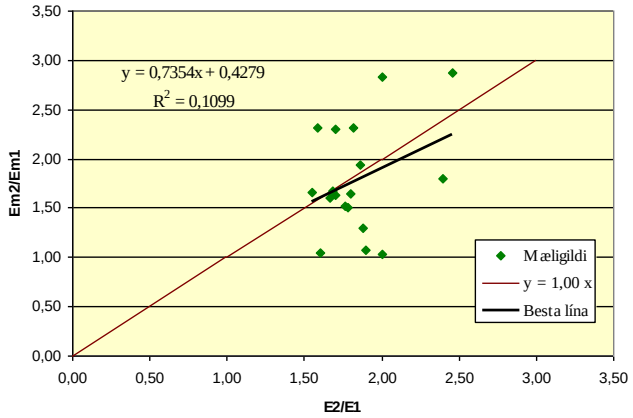
Á línuritunum má einnig finna beina viðmiðunarlínu þar sem öll gildi á E_2 eru jöfn E_{m2}, (y = 1,00 x). Sjá má að mælipunktarnir liggja nokkuð jafnt við þessa línu, en þeir eru bara svo dreifðir að fylgni milli aðferðanna er ekki mikil.



Mynd 50. Em2/Em1 sem fall af E2 /E1 fyrir allar nothæfar mælingar.



Mynd 51. Em2/Em1 sem fall af E2 /E1 fyrir allar nothæfar mælingar teknar með 300 mm plötu.



Mynd 52. Em2/Em1 sem fall af E2 /E1 fyrir allar nothæfar mælingar teknar með 300 mm plötu, þar sem álag í plötuprófi er 517 kPa og í falllóðsprófi 707 kPa.

6.4.8 Umræður

6.4.7.1 Athugasemdir um samanburðinn

Ef tafla 26 er skoðuð vel má sjá að á sumum punktanna eru aðferðirnar að gefa mjög svipuð gildi á E stuðlunum og hlutföllunum, en á öðrum eru þau mjög ólík. Svo virðist sem falllóðið gefi að jafnaði hærra gildi á fjaðurstuðlunum og getur það að nokkru leyti verið af því að hámarksálagið í því prófi er oftast hærra en í plötuprófinu.

Af línuritunum sex hér að framan má sjá að niðurstöður mæliaðferðanna tveggja eru frekar dreifðar og fylgni milli þeirra afar lítil. Ástæðurnar fyrir því geta verið margar. Fyrir það fyrsta er um mjög fáar mælingar að ræða og í öðru lagi eru þær gerðar með dálítið mismunandi forsendum, þ.e.a.s. þær eru gerðar á mismunandi jarðefnum, með mismunandi plötustærðum og álagi en allt þetta getur haft mikið að segja.

Í mælingum á skeljasandsfyllingunni á Hringbraut áttu sigmælar falllóðsins það dálítið til að sökkva ofan í sandinn og á neðra burðarlagi á Vesturlandsveginum

var yfirborðið gróft og opið, en við slíkar aðstæður er hætt við að sumir sigmælarnir lendi á steinum meðan aðrir falla ofan í glufur milli steinanna. Falllóðið reyndist af þesssum sökum frekar viðkvæmt við mælingar á þessum jarðefnum og getur það einnig haft sitt að segja um niðurstöðurnar.

6.4.7.2 Kostir og gallar aðferðanna

Við það að fylgjast með framkvæmd mæliaðferðanna í nokkur skipti koma kostir þeirra og gallar tiltölulega fljótt í ljós. Aðferðirnar hafa það sameiginlegt að talsverð fyrirferð fylgir þeim, mikill búnaður og stór tæki eru nauðsynleg og þ.a.l. er mikið umfang í kringum mælingar. Helstu kostir og gallar aðferðanna eru eftirfarandi:

Plötuprófið – til þjöppunarmælinga í nýbyggingum

Helstu kostir:	Mikil og góð reynsla komin á það.
	Mjög nákvæmar mælingar á sigi undan álagi.
	Niðurstöður liggja fyrir strax eftir mælingu.
Helstu gallar:	Seinlegt í framkvæmd
	Þarf tvö ökutæki (og tvo starfsmenn) til að framkvæma það.
	Er tiltölulega dýrt.

Falllóðið – til þjöppunarmælinga í nýbyggingum

Helstu kostir:	Fljótlegt í framkvæmd
	Hægt að kortleggja stór svæði á skömmum tíma.
	Niðurstöður liggja fyrir strax eftir mælingu.
	Er tiltölulega ódýrt.
Helstu gallar:	Skortir reynslu.
	Viðkvæmt fyrir kulda og raka.
	Sigmælar viðkvæmir fyrir hrjúfu og opnu jarðvegsyfirborði.
	Sigmælar viðkvæmir fyrir mjúku sandyfirborði.

6.4.7.3 Hliðstæðar forsendur í samanburði

Í öllum samanburði er mjög mikilvægt að viðfangsefnið sé vel skilgreint og forsendur skýrar. Þetta á ekki síst við þegar verið er að bera saman eitthvað sem byggir á mælingum og útreikningum þeim tengdum. Framar í þessum kafla var fjallað um eina íslenska og tvær erlendar samanburðarprófanir sem allar eru nokkuð ólíkar innbyrðis en hafa það þó sammerkt að endurspegla einmitt mikilvægi þessa, að skilgreiningar og forsendur séu fastákvarðaðar.

Ef verið er að bera saman plötupróf og falllóðspróf með ólíkum og breytilegum forsendum er ekki hægt að ætlast til þess að niðurstöðurnar verði sambærilegar. Ákvarðaður fjaðurstuðull (E stuðull) í prófunum tveimur er háður fjórum breytum, þ.e. Possions hlutfalli (v), radíusi álagsplötu (a), heildar álagsspennu (σ) og niðurbeygju undir miðri álagsplötunni (d), (sbr jafna 6-2). Ef gildi þessara breyta er mismunandi við ákvörðun á E gildi úr plötuprófi samanborið við falllóðspróf, þá fást mismunandi niðurstöður úr prófunum tveimur. Það er því mikilvægt að reyna að koma auga á hvaða breytur er hægt að samræma, þ.e. gera að fasta. Eftirfarandi jafna er notuð til þess að reikna út fjaðurstuðulinn út frá mæliniðurstöðum aðferðanna tveggja:

$$E = \frac{2 \cdot (1 - v^2) \cdot \sigma \cdot a}{d} \qquad (6\text{-}2)$$

þar sem:

E = fjaðurmótstaða jarðefnis.
v = Possions hlutfall.
a = radíus álagsplötu.
σ = heildar álagsspenna.
d = niðurbeygja undan álagsplötu.

Possions hlutfallið er háð gerð jarðefnis þannig að ef plötupróf og falllóðspróf er gert á sama stað, á sama jarðefninu er tryggt að þessi breyta sé fasti. Gildi Possion hlutfalls jarðefna liggur á bilinu 0-0.5 og í raun er óþarfi að vita nákvæmt gildi þess, því í þessu samhengi er einungis mikilvægt að það sé haft eins milli aðferðanna. Auðvelt er að tryggja að radíus álagsplötu sé sá sami í báðum aðferðum með því að velja er sömu stærð á stálplötu. Að sama skapi á einnig að vera auðvelt að tryggja það að sama álag sé sett á plöturnar í báðum aðferðum. Eftir liggur því einungis niðurbeygjan eða sigið undan álagsplötunni, en þessa breytu er ekki hægt að fastákveða, þar sem að þetta er sú breyta sem aðferðirnar tvær eru að mæla.

Þannig liggur það því í hlutarins eðli að ef góður samanburður á að fást milli plötuprófs og falllóðsprófs, þar sem niðurstöður mælinga á ákvörðuðum E stuðli eru svipaðar, þá þurfa allar breytur jöfnu 6-2 að vera fastar nema gildið á siginu. Eins og sjá má í töflu 23 hér að ofan var þetta ekki gert í þessum samanburði sem hér er fjallað um. Plötustærðir voru misstórar milli mælistaða; 300, 600 og 1000 mm á Hringbraut, 300 mm á Vesturlandsvegi og 450 mm á Reykjanesbraut og álagsspennan ekki sú sama milli aðferða, allt frá 76 til 849 kPa í plötuprófinu og 707 kPa í falllóðsmælingunum. Niðurstöðurnar eru því samkvæmt því.

6.4.7.4 Framkvæmd mæliaðferðanna

Til þess að fá sambærilegar niðurstöður úr mæliaðferðunum tveimur væri einnig gott að samræma framkvæmd þeirra betur. Í plötuprófinu er álagið sett á plötuna

í fimm þrepum, tekið af aftur og sett síðan aftur á í öðrum fimm þrepum. Síðan er E stuðullinn reiknaður út frá völdum álags- og sigpunktum á sérstöku línuriti. Hægt væri að gera þetta öðruvísi, á þann hátt að setja strax hámarksálag á plötuna og mæla sigið undan því, taka svo álagið af aftur og keyra síðan í annað skipti, aftur beint í hámarksálag og mæla samsvarandi sig. Þetta hefur verið prófað hérlendis af Jóni Skúlasyni og í skýrslunni hans, „Athugun á plötuprófi“, gefur hann þessari aðferð góða raun og kallar þetta hratt plötupróf. Hann talar um að niðurstöður slíks hraðprófs séu svipaðar niðurstöðum úr venjulegu plötuprófi (hægu prófi) og að litlar líkur séu á að hratt próf gefi lægra en 90% af mældu gildi við hægt próf.[100]

Falllóðsprófið mætti einnig framkvæma örlítið öðruvísi, á þann hátt að reyna að líkja betur eftir þessu hraða plötuprófi og í því samhengi væri hægt að slá einungis tvö högg. Í hefðbundnu plötuprófi er alltaf settur smá sandur undir plötuna og forálag (80kPa) sett á til þess að jafna undirlagið undir plötunni. Þetta væri einnig gott að gera í falllóðsprófinu til þess að tryggja enn betri samanburð milli aðferðanna. Í niðurstöðum samanburðar BUSL samstarfsins er mælt með því að slíkt forálag sé notað í falllóðsmælingum, til þess að tryggja meiri nákvæmni.

6.4.9 Samantekt

Af framansögðu ætti að vera orðið ljóst hvaða þættir hafa áhrif á niðurstöður hvorrar mæliaðferðar fyrir sig og þar með á allan samanburð sem kann að vera gerður á milli þeirra. Ef með nokkru móti á að vera hægt að yfirfæra uppsafnaða reynslu plötuprófsins yfir á falllóðið þá þarf að gera virkilega vandaðan samanburð, þar sem forsendur og skilgreiningar eru skýrar og nákvæmlega eins milli aðferða. Öðruvísi verður ekkert samband eða fylgni fundin þarna á milli. Einnig er mikilvægt að framkvæmd prófanna sé sem líkust. Ef þær yrðu samrýmdar á þann hátt sem lýst var framar gæfu þær án efa líkari niðurstöður.

Mikill munur er á því að gera samanburðarmælingar inn í verkframkvæmd miðað við að gera þær á lokuðum tilraunarvegkafla. Mikill hraði og læti eru einkennandi fyrir jarðvegsframkvæmdir, sérstaklega í stærri verkum þar sem hagur verktaka er að ljúka verkinu sem fyrst. Því vinnst þar lítill tími til þess að hugsa um eða prófa einhverjar nýjungar í þjöppunarmælingum. Lítið er hægt að skipuleggja mælingar fyrirfram, þar sem ekki er vitað nákvæmlega hvenær ákveðinn verkhluti er tilbúinn og þegar hann er síðan loks tilbúinn þarf að drífa mælingar af svo að næsti verkhluti geti hafist. Einnig er erfitt að stilla forsendum mæliaðferða svipað upp, þegar mælingar eru gerðar í verkframkvæmd, þar sem tilgangur mælinga er ekki fyrst og fremst að nota þær til samanburðar, heldur við þjöppunareftirlit og því eru notaðar þær forsendur sem góð reynsla er fyrir.

[100] Jón Skúlason. 1986

Það er því ljóst að ef góður samanburður á að nást milli plötuprófs og falllóðsprófs er best að mælingar þess samanburðar fari fram á lokuðum vegkafla, þar sem nákvæm vitneskja liggur fyrir um þjöppun hvers lags og þar sem öll óviðkomandi umferð hefur ekki áhrif á mælingar. Þar væri einnig hægt að hafa forsendur mæliaðferða svipaðar og skipuleggja mælingar vel, með það í huga að þær nýtist sem best til samanburðar. Gjarnan mætti taka samanburð dönsku Vegagerðarinnar til fyrirmyndar og eftirbreytni. Þar var vel vandað til verks, forsendur skýrar, framkvæmd prófa svipuð, mælingar framkvæmdar á lokuðum kafla og allar mælingar framkvæmdar samdægurs.

Talsverður ávinningur væri fólginn í því að geta skipt plötuprófinu út fyrir falllóðið, þar sem það er fljótlegra og kortleggur þannig stærra svæði á fyllingunni og burðarlögunum, sem verið er að þjöppumæla, á sama tíma. En til þess að það geti átt sér stað, þarf fyrst að gera áðurnefndan samanburð eða jafnvel nokkra samanburði. Slíkt tekur að sjálfsögðu tíma og kostar peninga og því er það spurning hvort æskilegt sé að einbeita sér að þessu, þar sem jafnvel hentugri og enn ákjósanlegri mæliaðferð er komin á markaðinn, þ.e. þjöppumælar í völturum.

7. Þjöppumælar í völturum

7.1 Þjöppumælar í völturum

7.1.1 Almennt

Nútímakröfur um þjöppun jarðvegs og um eftirlit með þjöppun eru miklar og eins og þróunin hefur verið, er líklegt að þær aukist enn frekar á næstu árum, sérstaklega í stórum og yfirgripsmiklum verkum. Því hafa menn stöðugt verið á höttunum eftir nýrri og betri mæliaðferðum, til þess að svara þessum kröfum. Fjallað hefur verið um ýmsar mishentugar aðferðir til þess að meta þjöppun jarðvegs, sumar vel þekktar og rótgrónar, á meðan aðrar eru tiltölulega nýjar og lítt þekktar.

Í flestum tilvikum er um er að ræða aðferðir, þar sem þjöppun er metin annaðhvort út frá mældri rúmþyngd efnis eða ákvörðuðum fjaðurstuðli þess, sem byggir á sigmælingum og eru þær flestar framkvæmdar á nokkrum punktum, sem valdir eru af handahófi á þeirri fyllingu eða því burðarlagi sem um ræðir. Undantekningin á þessu eru þjöppunarmælar í völturum.

Þjöppumælarnir byggja á svörun jarðefnis gagnvart titurálagi og með þeim er hægt að mæla allt jarðvegssvæðið sem um ræðir, í stað einungis nokkurra punkta. Rannsóknir hafa leitt í ljós að slík samfelld athugun á þjöppun með þjöppumælum er mun áhrifaríkari og einnig, þegar öllu er á botninn hvolft, ódýrari en eldri punktaðferðir.[101]

[101] Hamm. Applied Technology

Sænska Vegagerðin hefur gert samanburð á kostnaði við þjöppunareftirlit, ýmist með eða án þjöppumælanna í völturunum, í samræmi við viðkomandi staðla og verklýsingar. Sú athugun leiddi í ljós að þjöppumælarnir hafa borgað sig strax upp, eftir notkun á einu jarðefnislagi, á kafla sem er 13 m breiður og 10 km langur. Þá á eftir að taka með í reikninginn tímaávinning og betri gæði sem þjöppumælirinn gefur. Þetta staðfestir áunnin þýsk reynsla.

Hingað til hefur þótt nægilegt að taka einungis nokkrar mælingar með eldri aðferðum, á einhverjum völdum punktum hér og þar á jarðefninu til þess að lýsa gæðum þjöppunar. Algengt viðmið er að ein slík punktmæling sé gerð á einhverjum vissum fjölda rúmmetra sem lagðir eru út. T.a.m. er í verklýsingum framkvæmdanna á Hringbrautinni og Vesturlandsveginum, sem fjallað var um í samanburðinum í kafla 6.4, talað um eina slíka eftirlitsmælingu á hverjum 2000 m^3. Með öðrum orðum, ef miðað er við að sandkeilupróf er gert á 500 mm þykku lagi þar sem rúmmál sýnis er um 2 lítrar, þá er hlutfallið á milli rúmmáls sýnis og rúmmáls þjappaðs efnis; 1:500.000, eða litlu meira en nálargat miðað við alla vinnuna sem stóru tækin hafa innt af hendi.

Umfang allrar jarðvinnu, sérstaklega í nýbyggingum, er stöðugt að aukast og í stærri verkum er verið að flytja og leggja út allt að 20.000 m^3 á degi hverjum. Þetta er stærðargráða sem eldri, hefðbundnari mælingaaðferðir ráða hreinlega ekki við. Einnig eru nútíma jarðvinnuvélar mjög öflug tæki sem afkasta miklu, þannig að hraðinn er orðinn mun meiri í allri jarðvinnu. Tíminn sem þjöppumælingunum er gefinn er þess vegna alltaf að minnka og því þykja eldri aðferðir, sem sumar eru talsvert tímafrekar, alls ekki henta. Hinsvegar koma þjöppumælarnir þar sterkir inn, þar sem þeir mæla þjöppunina jafnóðum og þjöppun fer fram og því tefja þeir ekki fyrir áframhaldandi framkvæmdum.

Þjöppunarmælarnir eru afar einfaldir í notkun og krefjast engrar sérstakra kunnáttu af ökumanni valtarans, þar sem þeir fara sjálfkrafa í gang um leið og titringur er settur á tromluna. Það hefur sýnt sig að jafnvel óreyndir valtarastjórnendur tileinka sér þessa tækni afar fljótt þannig að öll vinna verður mun markvissari og vandaðri.

Þjöppumælarnir hafa marga kosti umfram eldri aðferðir, þeir helstu eru:

- Gefa samfelldar upplýsingar um þjöppun á öllu framkvæmdarsvæðinu, í stað einungis nokkurra punkta, sem valdir eru af handahófi.

- Mikið öryggi fyrir ökumann valtara og eftirlitsaðila, við að ná fram nauðsynlegri þjöppunargráðu með samfelldu og stöðugu upplýsingastreymi frá þjöppumælinum.

- Auðvelt að koma auga á efnislega veik svæði og þjappa þau betur.

- Tryggir lágmarksfjölda yfirferða valtara yfir efnið og kemur í veg fyrir ónauðsynlega þjöppun, þannig að sparnaður fæst í tíma og peningum.

- Kemur í veg fyrir yfirþjöppun, þannig að engin hætta er á að yfirborðið losni upp aftur eða að jarðefniskorn brotni niður.

- Tryggja jafna þjöppun, jafnvel þar sem efnið er lagt út í mörgum lögum.

Í keðjunni eru þrír hlekkir, þ.e. tiringsvaltari, þjöppumælir og skráningartæki. Þjöppumælir er algerlega háður titringi tromlunnar og því er ekki hægt að nota valtara sem eru ekki með titring. Hægt er að setja búnaðinn, þ.e. mælirinn og skráningartækið í hvaða titringsvaltara sem er á markaðinum, hversu gamall sem hann kann að vera, svo lengi sem allt virkar í honum sem skildi. Skráningartækið er ekki nauðsyn, en gefur góða niðurskráningu mæligilda og þannig betri yfirsýn yfir allt verkið. Saman mynda þessir þrír þættir árangursríka aðferð til þjöppumælinga, en sú aðferð er gjarnan kölluð þjöppunarstjórnun eða samfelld þjöppunarstjórnun.

7.1.2 Samfelld þjöppunarstjórnun

Samfelld þjöppunarstjórnun (e. Continuous Compacting Control; CCC) er frekar ný aðferð við þjöppumælingar og skipulegar skráningar mæligilda í grundunarverkum. Aðferðin var þróuð í Svíðþjóð en fyrst prófuð í stærri framkvæmdum í Þýskalandi af grundunar- og jarðverkfræðideild Tækniháskólans í Műnchen. Til stærri verka teljast jarðvegsundirstöður undir stórar verksmiðjur, járnbrautastöðvar og flugvelli.

CCC var þróuð til að tryggja skilvirkari þjöppun og nákvæmara þjöppunareftirlit og er fyrst og fremst ætlað til eftirlits á laus lög núningsefna, þ.e. sand og blandaða möl með litlu fínefnainnihaldi. Aðal ástæðan fyrir því að aðferðin er í auknum mæli notuð í Þýskalandi og víðar í heiminum er sú, að það telst ekki lengur einungis mikilvægt að einhverri lágmarksþjöppun sé náð, heldur einnig að hún sé jöfn yfir allt svæðið. Ójöfn þjöppun og veik svæði á nokkrum stöðum, innan annars vel þjappaðrar fyllingar, leiða fyrr en seinna til missigs, sem getur skemmt mannvirkið sem er grunduð á henni, s.s yfirborð vega, byggingar, flugbrautir o.fl. Einnig tryggir jöfn og góð þjöppun betri gæði, lengri líftíma og lægri viðhaldskostnað á bundu slitlagi.

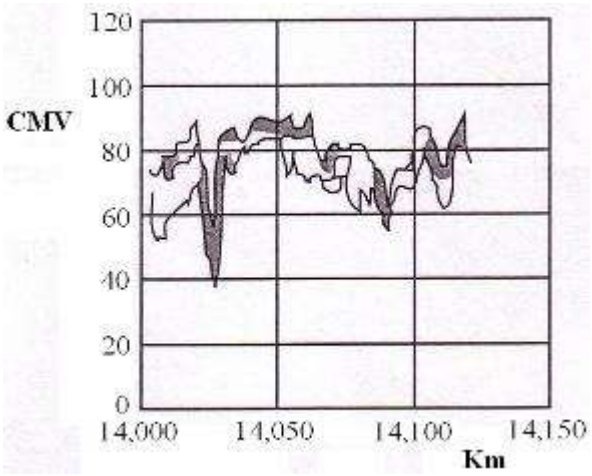
Ef aðferðin er borin saman við eldri, hefðbundnar þjöppunaraðferðir og eftirlit, þá hefur CCC eftirfarandi kosti fram yfir þær:

- Mælingar gerðar samhliða þjöppun.
  Hefðbundnar eldri aðferðir við þjöppumælingar torvelda oft áframhaldandi þjöppun, meðan að á þeim stendur, einkum vegna þess að þjöppun getur haft truflandi áhrif á mæliniðurstöður. Þær

geta því tímabundið stöðvað verkið eða í það minnsta tafið fyrir því. Á hinn bóginn, með CCC, eru mælingar gerðar samhliða allri þjöppun, þ.e. á meðan á henni stendur og því tefja þær ekki fyrir neinu.

- Stærð mælingarsvæðis.
  Ólíkt eldri aðferðum mælir CCC gæði þjöppunar á hverjum einasta fermetra þjappaða yfirborðsins, í stað einungis nokkurra punkta, og skráir þær hjá sér jafnóðum.

- Niðurstöður þjöppumælinganna eru í samræmi.
  Samræmi milli mældra gilda er óvenjulega góð eins og sjá má af mynd 53, sem sýnir niðurstöður mælinga eftir þrjár samfelldar yfirferðir á sama svæði. Greinilega má sjá að ferlarnir þrír eru mjög svipaðir, m.ö.o. toppar og botnar eru á sömu stöðum.



Mynd 53. Ferlar þjöppunargildis þriggja yfirferða yfir sama svæðið.[102]

- Niðurstöður er ekki hægt að falsa.
  Niðurstöður hefðbundinna eldri aðferða eru háðar ýmsum þáttum, eins og mælingartækjum, vandvirkni mælingarmanns og veðri. Hægt er, hvort sem er óviljandi eða viljandi, að hagræða og breyta þessum niðurstöðum, án þess að nokkur möguleiki sé fyrir því að athuga það seinna og leiðrétta það. Hinsvegar eru allar niðurstöður frá CCC alltaf vistaðar í þeirra upphaflega formi og því er ekki hægt að hafa áhrif á þær á nokkurn hátt, hvort sem það er óvart eða með fullum ráðum gert.

- Myndræn framsetning niðurstaðna.

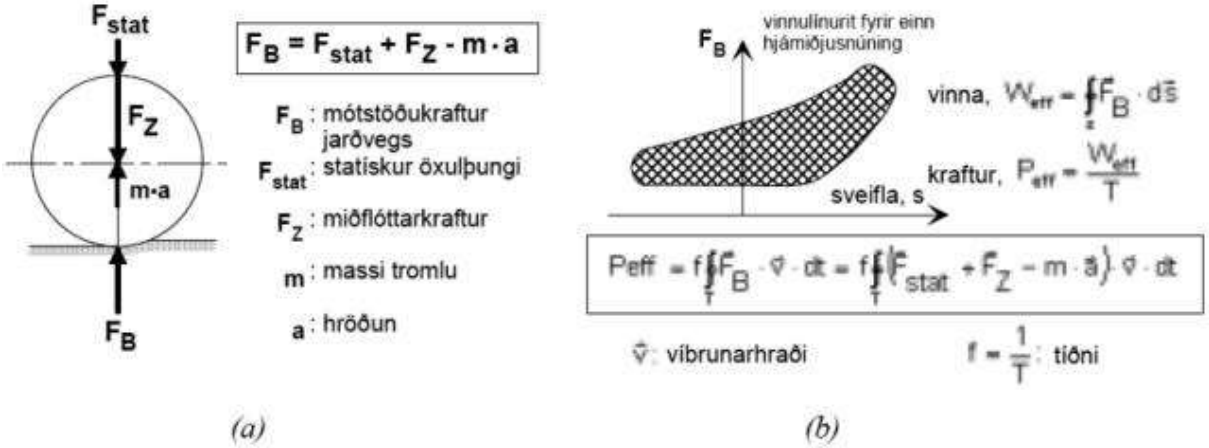
[102] Hamm. Applied Technology

Niðurstöður CCC, þjöppunarstjórnunar, er hægt með auðveldum hætti að setja fram myndrænt, þar sem mismunandi þjöppunargráða er tilgreind ýmist með mismunandi grátón eða lit (breytilegt milli valtaraframleiðanda). Þannig getur ökumaður valtara, eftirlitsaðili og framkvæmdastjóri fengið góða yfirsýn yfir þjöppunina, strax eftir síðustu yfirferð hverrar raðar.

Af þessu má sjá að þjöppunarstjórnun með þjöppunarmæli og skráningartæki er afar ákjósanleg aðferð til þjöppueftirlits og þá sérstaklega í stórum og mjög umfangsmiklum framkvæmdum. Í miklum vegagerðarverkefnum þar sem verið er að byggja upp nýjan veg á löngum kafla er hægt að kortleggja gæði þjöppunar á hverjum einasta metra og vista þær upplýsingar í einu samfelldu skjali.

7.2 Fræðilegur grunnur

Þjöppumæling með þjöppumæli nýtir sér þá samverkun sem er á milli tromluhröðunar og hreyfifræðilegs stífleika jarðefnisins, sem breytist með aukinni rúmþyngd. Út frá kröftunum sem virka á milli tromlunar og jarðefnisins er hægt að ákvarða þjöppunarorkuna sem er yfirfærð í efnið við þjöppun (mynd 54a). Mótstöðukraftur jarðefnisins er í beinu hlutfalli við kyrrstæðan öxulþunga valtans annarsvegar og miðflóttarkraft hinsvegar, mynduðum af hjámiðju- og tregðukröftum sem eru háðir hröðun tromlunar. Mynd 54b sýnir hvernig virkur orkuflutningur verður frá tromlu niður í jarðefni og hvert sambandið er á milli mótstöðukrafts jarðefnis og sveifluhæð titrandi tromlu, yfir einn snúning hjámiðjuþyngdar. Orkufærsla milli tromlu og jarðefnis eykst með aukinni þjöppun og stífleika jarðefnis.



Mynd 54. (a) Kraftajafnvægi fyrir lóðrétt titrandi tromlu; (b) Útreikningar orkufærslu tromlu.[103]

Hefðbundinn þjöppunarmælir í völturum samanstendur af hröðunarskynjurum, örgjörva eða tölvu, gaummælum, köplum og tengimöguleika fyrir skráningartæki. Hröðunarskynjararnir eru samsettir af orkubreyti og tilheyrandi rafeindabúnaði og eru þeir staðsettir við öxul tromlunnar. Þeir mæla svörun jarðvegsins, þ.e. hreyfifræðilegan stífleika hans, á þann hátt að lóðrétt hröðun

[103] Oddur Sigurðsson. 2001

tromlunar er metin og henni breytt í flaumræn (e.analog) boð sem berast svo til tölvunnar. Tölvan, sem er staðsett undir sæti ökumanns, tekur á móti nokkrum mismunandi mælingum á sama tíma, flokkar þau og reiknar út frá þeim tíðni titrunar (f), þjöppunargildi (CMV hjá Hamm og ω (omega) hjá Bomag) og stífleikagildi (hoppmörk valtara). Mælingarnar koma frá hröðunarskynjurunum á tromlunni.

Þjöppunargildið er birt á gaummæli, svipuðum hraðamæli í bíl, en stífleikagildið er einungis tilgreint með tveimur ljósum, þ.e. grænt ljós gefur til kynna að þjöppun skuli haldið áfram og rautt ljós gefur til kynna að þjöppun er nægjanleg. Þegar skráningartæki er notað með mælinum er munur mæligilda milli yfirferða einnig notaður með í útreikningana til þess að ákvarða hvenær nægjanlegri þjöppun er náð og gefur það aukna nákvæmni. Þegar munur gilda milli ferða er minni en 10% er talið að frekari þjöppun sé óraunhæf og rauða ljósið í stjórnborðinu lýsir. Þessi prósentumunur á milli yfirferða er valinn m.t.t. reynslu, sem sýnt hefur að þegar aukning þjöppunargildis er orðin þetta lítil þá er rúmþyngdaraukning í jarðefninu orðin ómælanleg með hefðbundnum, eldri mæliaðferðum.

Mynd 55. Algeng þjöppunargildi (Omega) frá þjöppumæli í Bomag valtara.

Þjöppunargildið er hlutfallslegt, einingarlaust gildi. Í völturum frá Hamm er gildið á bilinu 0-120 (CMV) en frá Bomag á bilinu 0-1000 (ω). Á mjúku undirlagi nálgast gildin 0, en því meira sem undirlagið harðnar því meira aukast gildin. Þjöppunargildin eru háð ýmsum kennistærðum jarðvegs, eins og efnistegund, rakainnihaldi o.fl. Gerð og stærð valtara hefur einnig sitt að segja og er mikilvægt að mælingar séu gerðar á stöðugum keyrsluhraða og fastri tíðni og sveifluhæð, því þessar stærðir tækja hafa áhrif á þjöppunargildið. Þegar t.d. tíðni er hækkuð (lægri sveifluhæð) lækkar mælt þjöppunargildi jafnvel þótt allar aðstæður séu þær sömu.

Ekki er vitað nákvæmlega hversu djúpt í jarðefnið þjöppumælingarnar ná, en uppsöfnuð reynsla sýnir að það er talsvert djúpt[104] og að jafnaði ná stærri og þyngri valtarar að mæla dýpra en þeir sem eru minni og léttari. Þegar þunnt lag er þjappað með mikilli dýptarvirkni eru hætt við að þjöppumælirinn mæli að nokkru eða jafnvel öllu leyti stífleika næsta lags fyrir neðan. Þessara áhrifa gætir minna eftir því sem lagþykkt er aukinn og ekki neitt ef lagþykkt er 1,5 m eða meira.

Þjöppumæling byggir nákvæmlega á því sama í öllum völturum og skiptir engu máli af hvaða gerð hann er. Hinsvegar eru skráningartækin við þjöppumælanna misjafnlega útfærð milli framleiðanda og mun því vera fjallað sérstaklega um misjafnar tegundir, þ.e. frá Hamm og Bomag. Ástæðan fyrir því að þessar tegundir eru valdar frekar en aðrar, er sú að þær eru algengar og því mjög mikið notaðar. Einnig vegna þess að í framkvæmdunum á Hringbraut og á Reykjanesbraut, þar sem samaburðarmælingar á plötuprófi og falllóðsprófi fóru fram, voru notaðir Hamm valtari annarsvegar og Bomag valtari hinsvegar, báðir með skráningartækjum.

7.3 Skráningarkerfi Hamm

7.3.1 CDS 012 J

Skráningarkerfi Hamm er kallað CDS (Compaction Documentation System) og var fyrst framleitt um 1985. Frumgerðin var prófuð af sænsku Vegagerðinni á árunum 1986-87 og upp frá því hófst fjöldaframleiðsla á kerfinu og í dag er það víða notað í heiminum. Á þessum tíma hefur kerfið smám saman verið að þróast og safna að sér reynslu. Núverandi kerfi CDS 012 J er því talsvert breytt frá því sem var í upphafi.

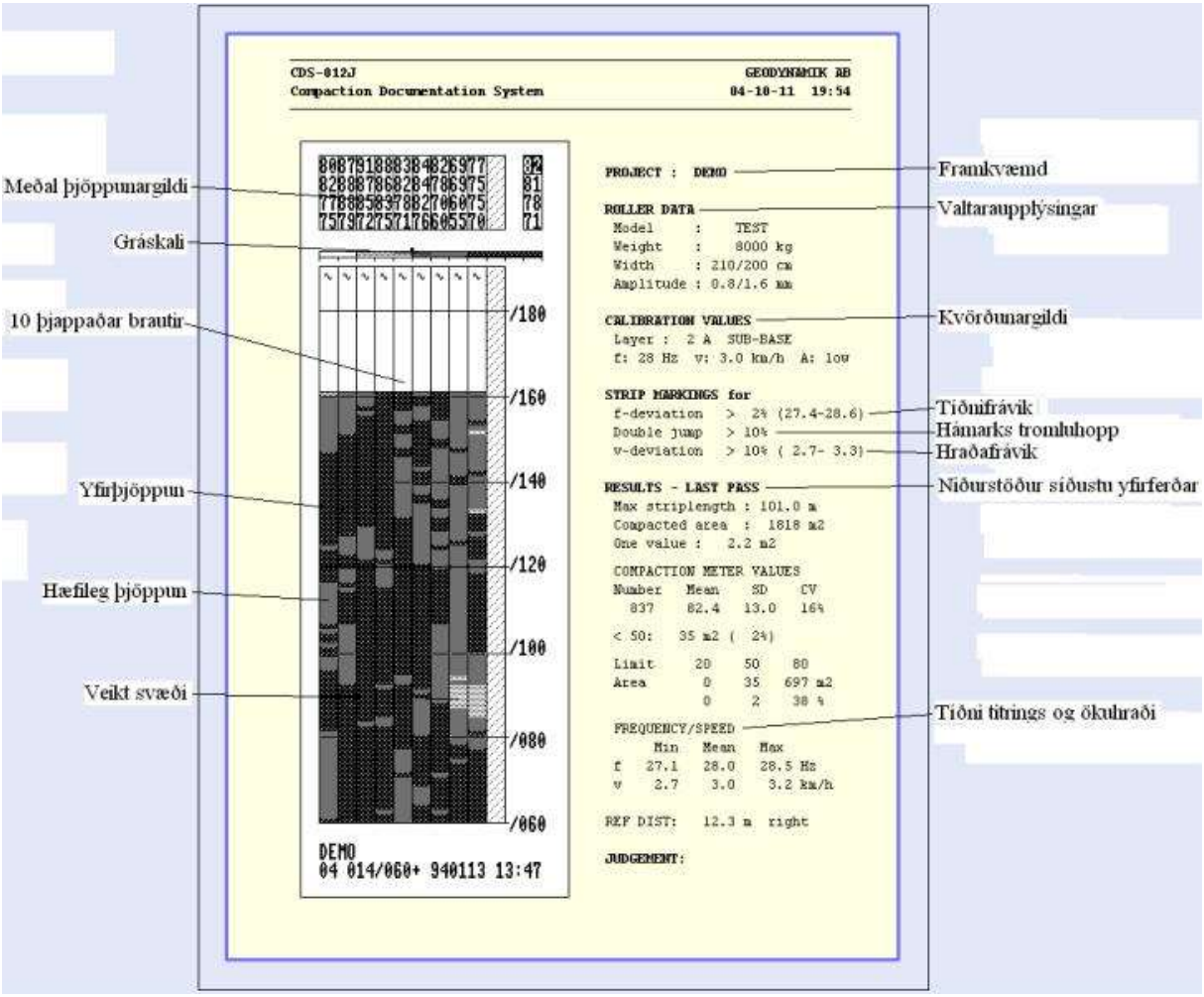
Kerfið samanstendur af skráningartæki með svart/hvítum tölvuskjá og færslu-/hraðaskynjara, en þetta er allt tengt við tölvuna undir sæti ökumannsins. Tækið inniheldur lítinn tölvuörgjörva, sem tekur á móti flokkuðum og útreiknuðum upplýsingum frá aðaltölvunni, skráir þær og birtir á tölvuskjánum sem niðurstöður. Um er að ræða bæði ýmsar upplýsingar sem varða þjöppunarmælinguna og einnig upplýsingar um staðsetningu valtara, sem færslu-/hraðaskynjara gefur frá sér, en hann er tengdur við drifhluta valtarans, annaðhvort afturhjól eða gírkassa. Hægt er að vista niðurstöður á innbyggt geymslukort í CDS og prenta út eða færa yfir í PC tölvu, til frekari úrvinnslu í þar til gerðu forriti sem heitir CDSView.

[104] Vilhjálmur Baldursson (munnleg heimild, 26.nóvember 2004)

Mynd 56. Skráningartæki Hamm, CDS-012J.

Eins og sjá má á myndunum hér fyrir ofan er skráningartækið fyrirferðarlítið og auðvelt að taka það með sér hvert sem er. Í valtaranum er því komið fyrir á sérstakri festingu í augnhæð ökumanns og tengt við tölvuna undir sætinu sem og orkugjafa. Eins og sjá má eru 13 þrýstihnappar við hliðina á skjánum og með þeim er tækinu stjórnað á allan hátt, t.d. til þess að setja inn forsendur mælinga og skipulagningu mælinga.

Á tölvuskjánum birtast niðurstöður, bæði á myndrænan máta og sem tölugildi. Myndin sýnir brautirnar á því svæði sem verið er að þjappa, hver braut er jöfn breidd tomlunnar og getur skráningartækið sýnt mest 13 brautir í einu. Tölugildin sýna meðaltal þjöppunargilda eftir hverja yfirferð á hverri braut. Meðan á þjöppumælingu stendur getur ökumaður því séð allar nauðsynlegar upplýsingar og fyrirmæli, til þess að þjöppun verði sem árángursríkust.



Mynd 57. Þjöppunarskýrsla prentuð út beint frá skráningartæki.

Meðaltalsgildi þjöppumælinga hvers lags birtast ofarlega á skjánum, annarsvegar meðaltal úr hverri röð og hinsvegar meðaltal heildarsvæðisins. Fyrir miðju, á stórum hluta skjásins birtist svo myndin af svæðinu sem verið er að þjappa og gefur hún ökumanni góða yfirsýn sem auðvelt er að skilja. Á henni táknar dökkgrár litur velþjöppuð svæði og ljósari gráir litir sýna hvar þörf er á frekari þjöppun eða að betri þjöppun fáist ekki á jarðefninu með þessum valtara. Á skjánum má einnig sjá staðsetningu, hraða og þjöpputíðni valtarans, allar breytingar á kennistærðum valtarans og ýmsar aðrar upplýsingar sem tengdar eru mælingunni.

Hægt er að prenta út, beint frá tækinu, niðurstöður þjöppunar á svæði sem er allt að 600 metra langt, með mest 10 röðum á eitt blað í stærðinni A4, sem þjöppunarskýrslu (mynd 57). Inn á skýrsluna má setja ýmsar upplýsingar um mælinguna, eins og nafn fyrirtækis, dagssetningu o.fl. Á vinstri helmingi blaðsins má sjá grátóna myndina af öllum röðunum og í fljótu bragði má einnig greina af henni hver gæði þjöppunar eru á hverjum stað, eftir síðustu yfirferð valtarans. Á hægri helmingnum má sjá nafn mælingarinnar, ýmsar kennistærðir valtara, kvörðunarupplýsingar, upplýsingar um áreiðanleika mælingar, talnagildi

á þjöppun síðustu yfirferðar og lágmarks-, meðal- og hámarksgildi á hraða valtara og tíðni titrings.

Einnig má nota forritið CDSView til þess að flytja þjöppunarniðurstöðurnar inn í PC tölvu, þar sem þau er skoðuð betur, sett skipulega upp og vistuð til frambúðar. Í forritinu er hægt að stilla upp góðu þjöppunaryfirliti á heilli framkvæmd, þ.e. nokkura km löngum vegi og af því lesa gæði þjöppunar. Litur er notaður til þess að lýsa þjöppuninni og táknar blár vel þjöppuð svæði og bleikur illa þjöppuð svæði, miðað við þá kvörðun sem slegin er inn. Hægt er að breyta skala og þannig stækka einhvern valinn vegkafla, til þess að skoða hann nánar.

Í forritinu er hægt að velja einhverja ákveðna röð í veginum og skoða langsnið af þjöppuninni á henni, á línuriti sem sýnir lengd í vegi á x-ás og þjöppunargildið á y-ás. Með því má nákvæmlega greina lélega þjöppun og um leið sjá viðeigandi tölugildi.

Í forritinu er einnig aðgerð sem notuð er til þess að kvarða mælingar við hefðbundið, þekktara próf. Fyrst þarf velja hvaða próf er notað til kvörðunar, síðan slá niðurstöður þess inn í forritið og svo viðeigandi niðurstöður þjöppumælis. Kvörðun verður nákvæmari eftir því sem fleiri punktar eru settir inn. Út frá gefnum upplýsingum teiknar forritið síðan kvörðunarlínurit, þar sem gildi þjöppunarmælis er á x-ás og gildi hefðbundnari, eldri mæliaðferðar er á y-ás. Af því má lesa hvaða gildi þjöppunmælirinn er að gefa miðað við kvörðunarprófið.

7.4 Skráningarkerfi Bomag

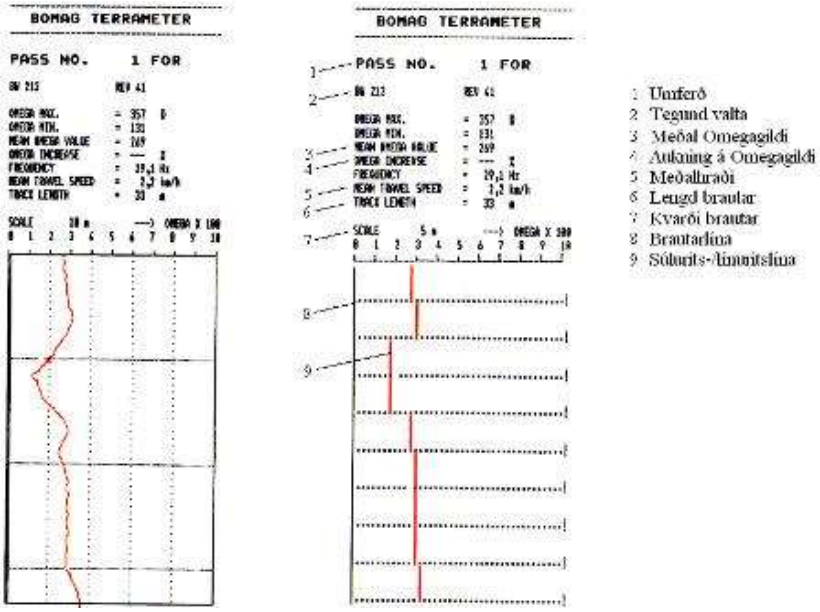
Bomag hefur sett á markað tvenn skráningarkerfi, annarsvegar BTM (Bomag Terrameter), sem var framleitt um 1980 og hinsvegar BCM (Bomag Compaction Management), sem er mikið þróuð útgáfa af BTM. Terrameter kerfið hefur verið mjög mikið notað víða í veröldinni, enda var þetta með fyrstu skráningarkerfum sem komu á markaðinn. Notkun BCM kerfisins hefur verið að færast í vöxt og hefur það að nokkru leyst Terrameter kerfið af hólmi, vegna þess hversu miklu betri og nákvæmari upplýsingar það gefur.

7.4.1 Terrameter BTM plus/BTM prof

Kerfið er afar einfalt og samanstendur í raun einungis af litlum prentara sem prentar í sífellu út niðurstöður mælinga á þunnan strimil. Mæligildin koma frá tölvunni sem er undir sæti ökumannsins. Við kerfið er einnig tengdur færslu-/ hraðaskynjari, sem gefur upplýsingar um staðsetningu valtarans og lítið stjórnborð.

Stjórnborðið er staðsett við hægri hönd ökumanns valtarans og með því er mælingum stjórnað. Á því eru allir viðeigandi takkar til þess að setja mælingu og skráningu í gang, ásamt ljósum sem tilgreina hvenær nægilegri þjöppun er

náð. Einnig er þar að finna þrjá gaummæla sem sýna ökuhraða valtarans og tíðni titrunar og nýjasta skráða þjöppunargildið af mældri braut.



Mynd 58. Útprentað þjöppunaryfirlit í formi línurits og súlurits frá Terrameter kerfinu.

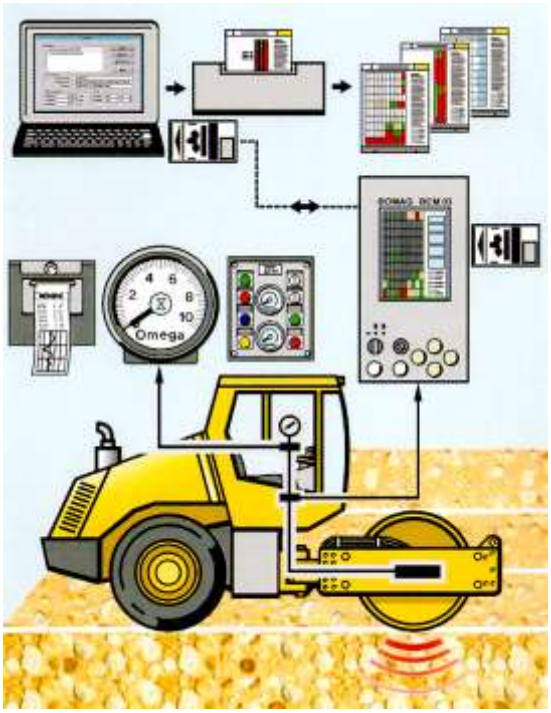
Prentarinn er staðsettur við hægri hlið ökumanns og prentar hann stöðugt út nýjasta þjöppunargildi þeirrar mælibrautar sem verið er að vinna á. Einnig er hægt að prenta út lítið yfirlit yfir þjöppun, annaðhvort eftir hverja yfirferð eða með ákveðnu millibili (sem er frekar stutt) og hægt er að velja á milli þess að prenta út línurit eða súlurit, til þess að lýsa þjöppun. Á mynd 58 má sjá hvernig slíkt yfirlit lítur út, en það hefur þá að geyma upplýsingar um þjöppun viðeigandi svæðis, ásamt upplýsingum um tegund valtara, ökuhraða, tíðni titrunar, lengd valtaðrar brautar og aukningu á meðalgildi þjöppunar miðað við fyrri yfirferðir í sömu átt.

Terrameter kerfið hét upphafleg einungis BTM, en var þróað mjög hratt og hét síðar BTM 04 og síðan BTM 05. Það nýjasta heitir hinsvegar BTM plus/BTM prof og með því fylgir talsvert þróaðra stjórnunarborð. Á því er lítill tölvuskjár þar sem hægt er að fá yfirsýn yfir lítið mælingarsvæði en auk þess birtir hann mæld þjöppunargildi og fleiri hluti tengda þjöppuninni. Þessari útgáfu kerfisins fylgir, eftir sem áður, prentari og er hann helsta útgönguleið mæligildanna, frá kerfinu til eftirlitsaðila og þeirra sem láta sig þetta varða.

7.4.2 BCM 03

BCM 03 kerfið frá Bomag er talsvert þróaðra og tæknilegra en Terrameter kerfið. Það svipar að nokkru til CDS kerfisins frá Hamm. Kerfið samanstendur af skráningartæki með tölvuskjá í lit og færslu-/hraðaskynjara og er þetta allt tengt við tölvuna undir sæti ökumannsins. Tækið inniheldur lítinn tölvuörgjörva, sem tekur á móti flokkuðum og útreiknuðum upplýsingum frá aðaltölvunni, skráir þær og birtir á tölvuskjánum sem niðurstöður. Um er að ræða bæði, ýmsar

upplýsingar sem varða þjöppunarmælinguna og einnig upplýsingar um staðsetningu valtara, sem færslu-/hraðaskynjari gefur, en hann er tengdur við drifhluta valtarans, annaðhvort afturhjól eða gírkassa.



Mynd 59. Skematísk mynd af BCM 03 þjöppumælingarkerfinu frá Bomag.

BCM 03 býður því upp á eftirfarandi möguleika:

- Grafíska myndræna framsetningu á gæðum þjöppunar, sem er auðveld í allri notkun fyrir ökumann valtarans.
- Skilar nákvæmum og yfirgripsmiklum upplýsingum sem staðfesta gæði þjöppunar fyrir eftirlitsaðila, verktaka og verkkaupa.
- Þjöppunarmælingum stjórnað á einum miðlægum stað.
- Upplýsingar um þjöppun skráðar nákvæmlega og vistaðar.
- Aðstoð við samanburð mæligilda við niðurstöður hefðbundinna mæliaðferða og kvörðun.
- Háa tíðni mælinga, þ.e. 1 mæling á hverjum 10 sm.
- Sjónræna viðvörun á minnkandi þjöppun og greiningu og skráningu á tromluhoppi.

Hægt er að vista niðurstöður á geymslukort, sem er á stærð við kreditkort en geymsluminni á einu slíku korti er nógu mikið til þess að vista upplýsingar um

40.000 m^2 af þjöppuðu svæði. Hægt er að taka kortið úr skráningartækinu og setja það í sérstakan kortalesara sem tengdur er við PC tölvu og færa mæligildin yfir, til frekari úrvinnslu í þar til gerðu forriti sem heitir BCM WIN.

Skráningartækið er fyrirferðarlítið, svipað á stærð og skráningartæki CDS kerfisins og má taka það með sér hvert sem er. Í valtaranum er það hengt upp á sérstaka festingu, í augnhæð ökumanns og tengt við tölvuna undir sætinu og orkugjafa. Á tækinu eru 6 þrýstihnappar undir skjánum og með þeim er tækinu stjórnað á allan hátt, t.d. til þess að setja inn forsendur og skipuleggja mælingar.

Á tölvuskjánum birtast niðurstöður á myndrænan máta á því svæði sem verið er að þjappa sem brautir jafnar breidd tomlunnar og getur skráningartækið sýnt mest 10 brautir í einu. Myndin gefur ökumanni góða yfirsýn yfir allt svæðið, sem auðvelt er að skilja. Á skjánum má einnig sjá staðsetningu, hraða og þjöpputíðni valtarans, allar breytingar á kennistærðum valtarans og ýmsar aðrar upplýsingar sem tengdar eru mælingunni. Meðan á þjöppumælingu stendur, getur ökumaður því séð allar nauðsynlegar upplýsingar og fyrirmæli, til þess að þjöppun verði sem árángursríkust.

Skjárinn í tækinu er í lit og eru því mismunandi litir notaðir til þess tilgreina gæði þjöppunar, í hverri rás á hverjum stað. Þrír litir eru einkum notaðir, blár sem tilgreinir yfirþjöppuð svæði, grænn sem tilgreinir hæfilega þjöppuð svæði og rauður sem tilgreinir undirþjöppuð svæði. Fyrst þarf að velja á hvaða talnamörkum hæfileg þjöppun telst vera á, t.a.m ef valið er að þjöppun sé hæfileg þegar omegagildið er á bilinum 400-600, þá birtist græni liturinn á þeim svæðum sem eru innan þessara marka. Ef þjöppunargildið fer yfir mörkin verður tilheyrandi svæði blátt og ef það fer undir mörkin, tilgreinir rauði liturinn það. Einnig er hægt að fá enn nákvæmari upplýsingar með því að láta mismunandi litatón af grænum tákna smá mun innan hæfilega svæðisins.

Í forritinu BCM WIN er hægt að skoða mæligildin nánar og vinna betur úr þeim. Eins og nafnið gefur til kynna, vinnur forritið í Windows umhverfi PC tölvanna og hagnýtir sér alla kosti þess. Það er afar auðvelt í uppsetningu og gefur skýra myndræna framsetningu, sem auðvelt er að meðtaka og vinna með. Ýmsir valmöguleikar eru í forritinu og má m.a. velja ýmist tví- eða þrívídd til þess að lýsa gæðum þjöppunar.

Forritið tekur sjálfkrafa á móti mæligildum og getur notandi síðan sett upplýsingarnar skipulega upp og vistað þau til frambúðar. Í forritinu er hægt að stilla upp góðu þjöppunaryfirliti á heilli framkvæmd, þ.e. nokkurra km löngum vegi og af yfirlitinu er hægt að sjá gæði þjöppunar, en sömu litir og í skráningartækinu eru notaðir í þeim tilgangi. Hægt er að breyta skala og þannig stækka einhvern valinn vegkafla, til þess að skoða hann nánar. Einnig er hægt að

velja einhverja ákveðna röð í veginum og skoða langsnið af þjöppuninni á henni, á línuriti sem sýnir lengd í vegi á x-ás og þjöppunargildið á y-ás. Með því má nákvæmlega greina lélega þjöppun og um leið sjá viðeigandi tölugildi.

Í forritinu er einnig aðgerð til þess að kvarða mælingar við hefðbundið, þekktara próf. Fyrst þarf velja hvaða próf er notað til kvörðunar, síðan slá niðurstöður þess inn í forritið og svo viðeigandi niðurstöður þjöppumælis. Kvörðun verður nákvæmari eftir því sem fleiri punktar eru settir inn. Út frá gefnum upplýsingum teiknar forritið síðan kvörðunarlínurit, þar sem gildi þjöppunarmælis er á x-ás og gildi hefðbundnari, eldri mæliaðferðar er á y-ás. Af línuritinu má síðan lesa hvaða gildi þjöppunarmælirinn er að gefa miðað við kvörðunarprófið. Allar niðurstöður er hægt að prenta út, ýmist kvörðunarlínurit eða nokkrar mismunandi tegundir af þjöppunarskýrslum, sem nýtast sem fullgild gæðavottorð.

7.4.3 Variocontrol

Árið 1996 kom fram nýr tæknibúnaður í Bomag völturunum sem stuðlar að sjálfvirkri hagkvæmni við þjöppun. Enska heiti búnaðarins er Variocontrol sem samkvæmt lauslegri þýðingu yfirfærist á íslensku sem „Mismunastjórnun“, en búnaðurinn byggir á samverkun þjöppumælis og sjálfstillandi titringsstefnu tromlu.

Þjöppumælirinn nemur, líkt og áður greinir frá, hreyfifræðilegan stífleika jarðefnisins og gefur frá sér á hverjum stað þjöppunargildi og tilgreinir þannig vel þjöppuð svæði frá illa þjöppuðum. Terrameter BTM prof skráningartæki fylgir sem staðalbúnaður í völturum sem hafa Variocontrol búnaðinn.

Í kafla 4.2.3.2 kom fram að í nútíma völturum er hægt að stilla titringsstefnu tromlunnar, þ.e. hvort hún titrar lóðrétt, lárétt eða undir einhverju horni á jarðefnisyfirborðið, þ.e. blanda lóð- og lárétts. Mismunandi þjöppunarorka flyst niður í jarðefnið eftir titringsstefnu og er orkan mest þegar titringur er alveg lóðréttur en minnst þegar titringur er alveg láréttur.

Í Bomag völturum, sem hafa búnaðinn, stillist stefna titrings sjálfvirkt miðað við þau gildi sem þjöppumælirinn er að mæla, þ.e.a.s. ef léleg þjöppun mælist þá nálgast titringsstefnan lóðrétt og ef góð þjöppun mælist þá nálgast titiringsstefna lárétt. Þannig nýtir búnaðurinn, á hverjum stað, mælt þjöppunargildi frá þjöppunarmæli og stillir sjálfvirkt út frá því titringsstefnu tromlunnar. Með þessum hætti er hámarks þjöppunarorka tryggð á hverjum stað, án þess að að tromlan fari að hoppa eða yfirþjöppun eigi sér stað sem getur skemmt jarðefnið.

Búnaðurinn einfaldar alla þjöppunarvinnu og gerir hana mun sjálfvirkari og skilmerkilegri. Með búnaðinum er auðvelt að tryggja jafna þjöppun á stórum svæðum og mæta þannig nýjum og hertari kröfum.

7.5 Kvörðun þjöppumæla í völturum

7.5.1 Almennt

Þar sem þjöppunargildið er einingalaus stærð og engin uppsöfnuð reynsla er komin á það hérlendis (og reyndar víðar), er nauðsynlegt að kvarða gildin miðað við niðurstöður vel þekktrar prófunaraðferðar, t.d. plötupróf eða sandkeilupróf. Rúmmálspróf eru mjög tímafrek og henta því illa til daglegs eftirlits, þess vegna er betra að nota plötuprófið til kvörðunar.

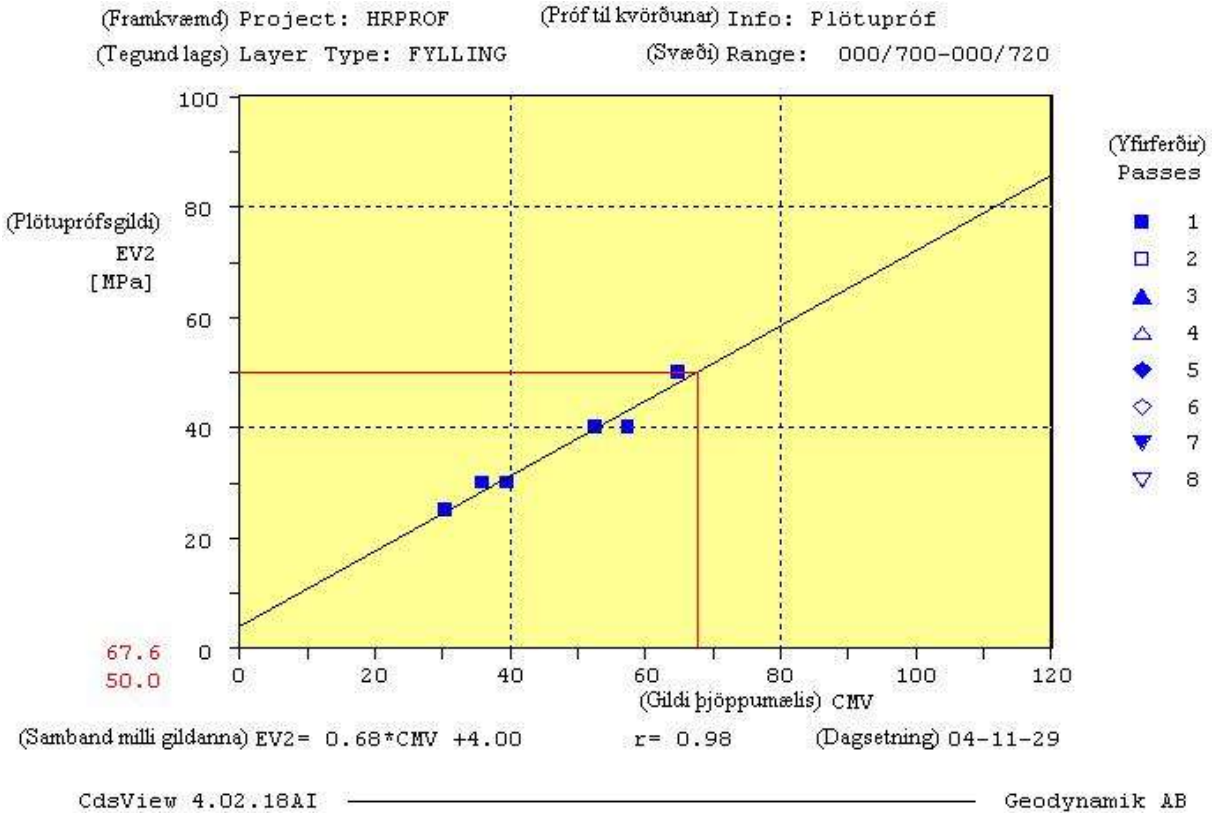
Eins og áður hefur fram komið fylgir öllum skráningartækjum sérstakt forrit, sem inniheldur valmöguleika þar sem auðvelt er að kvarða mælingarnar frá þjöppumælinum við hefðbundin, þekkt próf. Í leiðbeiningarbæklingi skráningartækjanna (e.users manual) er þetta útskýrt afar vel og ætti því ekki að vera vandamál í mælingum.

Í leiðbeiningarbæklingnum er mælt með því að hefðbundin kvörðun sé unnin út frá mælingum sem gerðar eru á sérstöku tilraunarsvæði, þ.e. á lokuðu svæði þar sem truflun er í lágmarki og hægt er að vanda vel til verks. Jarðefnið á svæðinu þarf að vera af sömu gerð og lagt út í sömu lagþykktum og efnið sem nota á í þeirri framkvæmd sem verið er að kvarða prófið fyrir. Einnig þarf tíðni titrunar og hraði valtara að vera eins og tilgreint er í viðeigandi leiðbeiningarbæklingi valtara, algengt er að tíðni sé höfð há og hraði u.þ.b. 2.0 km/klst.

Æskilegt er að breidd tilraunarsvæðis svari til þrisvar sinnum breiddar tromlunar, þ.e. að þrjár brautir séu þjappaðar og að brautirnar skarist um u.þ.b. 20 sm. Hæfileg lengd svæðis er u.þ.b. 150 m. Svæðið skal þjappað með valtaranum og þjöppun mæld með þjöppunarmælinum og skráð jafnóðum með

skráningartækinu. Eftir tvær yfirferðir á brautunum þremur skal svo framkvæma hefðbundið viðurkennt próf til kvörðunar, með u.þ.b. 25 m millibili á miðri miðbrautinni, þ.e. á miðlínu tilraunarsvæðisins.

Mælt er með að 5 próf séu gerð með kvörðunarprófinu, plötupróf eða rúmþyngdarmælingu, á miðlínunni. Þegar þeim er lokið er farið með valtarann aftur yfir svæðið, tvisvar sinnum og eftir það aftur tekin kvörðunarpróf. Þetta skal síðan endurtekið á þennan máta, þar til annaðhvort lágmarksgildum kvörðunarprófanna er náð eða tromla valtarans byrjar að hoppa. Þá eru komnar nægilegar upplýsingar til þess að hægt sé að útbúa kvörðunarlínurit fyrir viðeigandi valtara á viðeigandi jarðefni. Eftirfarandi mynd sýnir hvernig það lítur út:



Mynd 60. Kvörðunarlínurit í forritinu CDSView. Gildi þjöppunarmælis kvörðuð við E_2 stuðul plötuprófs. Texti innan sviga er settur inn af höfundi til útskýringa.

7.5.2 Áhrif jarðefna á kvörðun

Eins og fram hefur komið eru mæligildin frá þjöppumælunum byggð á lóðréttri hröðun tromlunnar, með hliðsjón af stífleika jarðvegsins og því er það augljóst að mæligildin eru m.a. háð eiginleikum jarðefnisgerðar. Þeir eiginleikar lýsa stífleika jarðvegs, s.s. styrk- og formbreytingareiginleikum hans og hafa þar einkum kornarstærðardreifing, þjálni, rakainnihald og rúmþyngd mest að segja. Því er vert að fjalla um hvernig kvörðun er háttað fyrir helstu tegundir jarðefna.

7.5.2.1. Samloðunarefni

Kvörðun með hefðbundnum mæliaðferðum er yfirleitt óframkvæmanleg í samloðunarefnum. Eftir því sem rakainnihald í efninu eykst, hefur það sívaxandi áhrif á fjaðurmótstöðu þess. Nákvæm kvörðun þjöppunargilda er því erfið þar sem samloðunarefni innihalda vanalega mikið af raka. Við þessar aðstæður er þó hægt að nota þjöppunargildin til ákvörðunar á gæðum þjöppunar, þ.e. til þess að segja til um hversu jöfn þjöppunin er og hvar veik svæði er að finna.

7.5.3 Fínefnarík malarefni

Eftir því sem fínefnainnihaldið eykst í jarðefnum verða áhrif vatnsinnihalds á þjöppun meiri. Þegar rakastig er undir hagstæðasta gildi efnisins eru áhrifin ekki ýkja mikil og því er þá hægt að nota plötu- eða rúmþyngdarpróf til kvörðunar á þjöppunargildunum. En þegar rakastigið er yfir hagstæðasta rakainnihaldi, gildir það sama um þessi efni og samloðunarefni, kvörðun er ekki möguleg en hægt er að nota þjöppunargildin til þess að sýna hversu jöfn þjöppunin er.

7.5.4 Hrein núningsefni

Núningsefni sýna beint samband á milli rúmþyngdar og stífleika. Vegna aukins stífleika hækkar þjöppunargildið með aukinni rúmþyngd. Rannsóknir hafa sýnt að ákveðið línulegt samband er á milli mæligilda þjöppunarmæla og fjaðurmótstöðu jarðefnis annarsvegar og rúmþyngdar hinsvegar.[105] Þá hefur einnig verið sýnt fram á að ekki sé þörf að taka tillit til annarra breyta, s.s. rakainnihalds. Það er því hægt að kvarða þjöppunarmælingar á núningsefnum með plötuprófi eða rúmþyngarákvörðun úti í mörkinni, s.s. með sandkeilu.

7.5.3 Reynslubanki þjöppumæla í völturum

Áður hefur verið minnst á plötuprófið og hvernig uppsöfnuð reynsla þess stuðlar að því að hægt er að nota það og fá úr því niðurstöður sem eru marktækar. Í raun þyrfti að kvarða plötuprófið við hefðbundnar rúmþyngdarmælingar ef þessi reynsla væri ekki til staðar og það var gert áður fyrr. Þjöppumælarnir í völturunum og plötuprófið (og reyndar einnig falllóðsprófið) mæla ekki alveg nákvæmlega sama hlutinn í jarðefninu, en hann er þó mjög svipaður.

Niðurstöður beggja þessarra prófa eru skilgreind sem hlutfallsleg gildi, jafnt hjá plötuprófinu sem þjöppumælunum, sem þýðir að þær gefa hvorugar nákvæmar upplýsingar um gæði þjöppunar. Hinsvegar er hægt að styðjast við þær þegar mikil, uppsöfnuð reynsla hefur fengist á þær. Þar sem notkun á þjöppumælum í völturum hefur verið að aukast og mun sennilega aukast mikið á næstu árum, m.a. eru komin fyrirmæli um þá í íslenskar verklýsingar (sjá kafla 7.6), er mjög líklegt að reynslubanki fyrir þá muni vaxa mjög hratt. Einnig er mælingin það sjálfvirk og fljótleg að það á eftir að hjálpa enn meira til í framtíðinni. Reynslubankinn mun þá vonandi gefa góða mynd af því hvernig tæki skuli nota, við mismunandi aðstæður, lagþykktir og efnisgerðir.

[105] Oddur Sigurðsson. 2001

Þessi framþróun er hinsvegar að sjálfsögðu háð því að menn verði, á komandi árum, duglegir að tileinka sér aðferðina, safna niðurstöðum skipulega og kvarða þær við hefðbundið próf, með það að markmiði að byggja upp reynslubanka, því ef það tekst mun þessi aðferð án efa taka alveg við af plötuprófinu.

7.6 Þjöppumælar í verklýsingum

7.6.1 Íslenskar verklýsingar

Margt bendir til þess að notkun þjöppumælanna í völturunum, eigi eftir að aukast mikið á næstu árum. Eitt er sú staðreynd, að fyrirmæli um þá eru farin að birtast í íslenskum sérverk- og útboðslýsingum og þá einkum í stærri framkvæmdum. Dæmi um þetta eru framkvæmdirnar á Hringbrautinni og Vesturlandsveginum, en þar er að finna eftirfarandi ákvæði um þjöppumælana:

7.6.1.1. Hringbraut

Fyllingar:

> „Allir valtar skulu vera útbúnir með þjöppumæli og skal hann notast við alla völtun og skal skrá mæliaflestur. Hraði valta skal vera milli 3 og 6 km/klst. Stjórnandi valta skal halda dagbækur um völtun, þar sem fram kemur dagsetning, gerð og stærð valta, þyngd og breidd tromlu, hvaða vegstæði var valtað, hvaða lag í vegi, lagþykkt, hraði valta og fjöldi yfirferða. Við notkun þjöppumælis (Bomag, Dynapac eða tilsvarandi) skal fylgt reglum í staðli TB BF-StB Teil E3 (1994). Mælingar sýna þjöppunarstig og hve mikið þjöppun eykst í % fyrir eina viðbótarumferð. Völtun telst fullnægjandi þegar viðbótarþjöppun við eina viðbótarumferð er undir þeim gildum sem mælast við tilraunarþjöppunina. Viðmiðunargildi þjöppumælis skal ákveða út frá niðurstöðum plötuprófsmælinga á tilraunafyllingu við upphaf verks og skal miða við $E_2 \geq 100$ MPa. Halda skal skrá yfir lokaþjöppun þar sem er skráð stöð og hvaða lag er valtað. Gera má ráð fyrir að 5-10% viðbótarþjöppun mælist milli síðustu yfirferða á fyllingu. Endurtaka skal mælingu á tilraunafyllingu á minnst 2 mánaða fresti eða 30.000 m^3 hvort sem verður á undan.“[106]

Neðra- og efra burðarlag:

Fyrir neðra- og efra burðarlag gildir nákvæmlega það sama og fyrir fyllingarnar, að undanskildu því að mælingu á tilraunarfyllingu skal endurtaka á minnst 2 mánaða fresti eða 20.000 m^3, í stað 30.000m^3.

7.6.1.2. Vesturlandsvegur

Fyllingar:

> „Mæla skal þjöppun fyllinga með þjöppumæli í valta. Mælingar skulu vera rekjanlegar. Við upphaf verks skal þjöppumælir stilltur af við niðurstöður mælinga með plötuprófi.“[107]

Neðra- og efra burðarlag:

[106] Nesbraut (49), færsla Hringbrautar. 2004
[107] Hringvegur (1), Víkurvegur-Skarhólabraut. 2004

„Allir valtar skulu vera útbúnir með þjöppumæli sem í upphafi verks skal stilltur af við niðurstöður mælinga með plötuprófi samhliða því að fastleggja lagþykktir, fjölda yfirferða, hraða valta o.s.fr. Stjórnandi valta skal halda dagbækur um völtun, þar sem fram kemur dagsetning, gerð og stærð valta, þyngd og breidd tromlu, hvaða vegstæði er valtað, hvaða lag í vegi, lagþykkt, hraði valta og fjöldi yfirferða. Við notkun þjöppumælis skal fylgt reglum í staðli TB BF-StB Teil E3 (1994). Endurtaka skal afstillingu þjöppumæla á minnst 2 mánaða fresti eða 20.000 m^3.“[108]

7.6.1.3. Hnökrar

Höfundur þessa rits hefur fylgst með á framkvæmdarstað og gert mælinga og hefur því komið auga á hvernig stöðu mála er háttað, við notkun þjöppumælanna. Svo virðist sem að smá hnökrar eða byrjunarörðugleikar séu fyrir hendi, við að fara eftir áðurnefndum fyrirmælum sem verklýsingarnar hafa að geyma um þjöppunarmælana.

Í báðum framkvæmdunum er notaður einnar tromlu valtari frá Hamm, með þjöppumælum. Í valtaranum á Hringbrautinni er CDS 012 J skráningartæki en í valtaranum á Vesturlandsveginum er ekkert slíkt tæki að finna.

Skráningartækið í valtaranum á Hringbrautinni hefur verið notað talsvert við þjöppunarmælingar, en frekar ómarkvisst og ekki eftir neinu ákveðnu skipulagi. Þegar þetta er skrifað er ekki enn búið að kvaðra tækið út frá samanburðarmælingum þjöppumælis og plötuprófs, á sérstökum tilraunarkafla. Það er því notað í talsverðri blindni eins og komið er, en hjálpar þó ökumanni valtara að koma auga á efnislega veik svæði og tryggja jafnari þjöppun. Þetta stendur þó allt til bóta þar sem markmiðið er að gera samfelldar mælingar með þjöppumælunum á burðarlögunum tveimur og skrá niðurstöður með kvörðuðu tæki. Þegar þetta er skrifað hefur nær einungis verið unnið að fyllingum vegarins og þær mælingar sem þar hafa verið gerðar ætti að vera hægt að kvarða eftir á, við niðurstöður plötuprófsmælinga.
Þar sem skráningartæki vantar við þjöppumælana í valtaranum á Vesturlandsveginum, er líklegt að skráning mæligilda þar sé ekki mjög ítarleg og nákvæm. Einnig er erfitt að tryggja jafna þjöppun yfir allt jarðefnið án skráningartækis. Reyndar hefur ökumaður valtara haldið utan um dagbók um völtunina, eins og kveðið er um í verklýsingu. Höfundur þessa rits hefur ekki séð þessa dagbók og veit því ekki nákvæmlega hvernig hún er útfærð, þó er heimild fyrir því, að ökumaður valtarans sé mjög samviskusamur og nákvæmur við gerð hennar og að hann setji þar inn einhver gildi frá þjöppunarmælinum.[109] Það ætti því að vera hægt að kvarða eitthvað af gildunum frá þjöppumælinum við plötupróf síðar.

[108] Hringvegur (1), Víkurvegur-Skarhólabraut. 2004
[109] Mikael J. Traustason (munnleg heimild, 11.október 2004)

Engin ákvæði um mælingar með þjöppumæli í völturum og skráningu gilda með skráningartæki eru komin í Alverk´95 og verklýsingar Rb enn sem komið er. Líklegt er þó að það breytist á komandi árum.

7.6.2 Erlendar verklýsingar

Sum lönd hafa gert yfirgripsmiklar verklýsingar og reglur um notkun þjöppumælanna í völturunum, þar sem kveðið er á um hvernig staðið skuli að mælingum með þessum búnaði og samfelldri þjöppunarstjórnun. Þjóðverjar og Svíar standa sennilega fremstir í þessu samhengi og hér skal því lítillega tekin fyrir þýsk verklýsing, sú sama og íslensku sérverk- og útboðslýsingarnar vísa í, TB BF-StB Teil E3 (1994).

7.6.2.1. TP BF-StB

Verklýsingin gefur tæknilegar leiðbeiningar á framkvæmd ýmissa prófa fyrir jarðefni og berg í vegaframkvæmdum. Samkvæmt henni teljast þjöppumælarnir í völturunum og skráningartæki þeirra fullgild prófunaraðferð til að mæla og kortleggja gæði þjöppunar. Talað er um að niðurstöður mælinganna þurfi að kvarða við, annaðhvort lágmarksgildi á þjöppunargráðu eða E_2 stuðli í plötuprófi og að tryggja verði að þessum lágmarksgildum sé náð, á meðan á þjöppun í framkvæmdinni stendur. Einnig er þess krafist að sú kvörðun fari fram á sérstöku svæði, þar sem öll randskilyrði, þ.e. gerð jarðefnis, rakainnihald o.fl., eru þau sömu og á framkvæmdarsvæðinu.

Eftirfarandi hugtök eru m.a. notuð í verklýsingunni:

Titringsvaltarar (e.vibratory roller) eru notaðir til mælingar á hreyfifræðilegum formbreytingareiginleikum jarðefnis.

Valtarar með þjöppumæli (e.measuring rollers) eru titringsvaltarar, útbúnir með viðeigandi mælingartæki sem notað er til að meta gæði þjöppunar.
Prófunarvaltarar (e.testing rollers) eru titringsvaltarar með þjöppumæli sem hafa verið kvarðaðir til þjöppumælinga á tilteknum stað og uppfylla sérstakar kröfur er varða stjórnun.

Þjöppunardýpi (e.compaction depth) er það dýpi, frá jarðefnisyfirborði, sem valtari nær þjöppunarálagi niður á.

Mælingardýpi (e.measuring depth) er það dýpi, frá jarðefnisyfirborði, sem þjöppunarmælingar valtara eru marktækar niður á.

Þjöppunarstjórnun yfirborðs með þjöppunarmæli í valtara, SCCC (e.surface covering dynamic compaction control) er það hugtak þegar hver ein og einasta eining framkvæmdarsvæðis er mæld með þjöppumæli og skráð með viðeigandi skráningartæki, þannig að heildarmynd fáist um gæði þjöppunar á svæðinu.

Svæðiseining (e.area unit) er það svæði sem afmarkað er af breidd tromlu og þeirri vegalengd sem tromlan fer á þeim tíma sem mælingin tekur.
Prófunarsvæði (e.testing lot) er það svæði sem prófa skal.

Kvörðunarsvæði (e.calibration area) er það svæði sem kvörðunarmælingar fara fram á.

Prófunarferðir (e.test drives) eru allar mældar umferðir.

Tromluhopp (e.jump operation) á sér stað þegar vissri þjöppun er náð, á þann hátt að tromlan missir snertisamband við jarðefni meðan á öðrum hvorum snúningi titringsskafts stendur yfir.

Helstu skilyrðin sem verklýsingin setur um mælingaraðferðina eru:

- Titringsvaltarar sem notaðir eru til mælinga verða að vera í mjög góðu ástandi og búnir þeim eiginleikum að bæði tíðni titrings og ökuhraða sé hægt að halda stöðugum.

- Hröðunarskynjarana, sem nema hreyfifræðilegu þjöppunargildin, verður að festa með réttum hætti fyrir ofan öxul tromlunnar, samkvæmt leiðbeiningum framleiðanda. Og til þess að geta stjórnað þjöppuninni verða viðeigandi gaummælar að virka eðlilega, þ.e. tíðni-, hraða- og þjöppunarmælar.

- Mjög æskilegt er að ökumaður valtara, eftirlitsaðili og verkstjóri séu vel kunnugir þjöppunarmælunum, skráningarkerfinu og viðeigandi forritum til úrvinnslu, til þess að þeir geti áreynslulaust haft yfirumsjón með þjöppunarstjórnuninni (CCC).

- Mælingar- og skráningartæki þarf að yfirfara áður en mælingar hefjast, þannig að gengið er úr skugga um að allt virki eðlilega.

- Framkvæmdaraðilar, þ.e. verkkaupi og verktaki, þurfa í upphafi verks að koma sér saman um með hvaða hætti allar niðurstöður á þjöppunargildum og viðeigandi upplýsingar um kennistærðir, hraða, tíðni, tromluhopp, lengd brauta o.fl. eru skráðar niður. Samkomulag verður að vera fyrir hendi, um úrvinnslu niðurstaðna og framsetningu skýrslna.

- Samfara skráningu niðurstaðna verður að skrá nákvæmlega hvar viðkomandi mæling er tekin á framkvæmdarsvæðinu, á hvaða lagi, í hvaða braut og í hvaða yfirferð valtara. Í þessum tilgangi þarf því að merkja svæðið vel og setja þær inn í skráningartækið, til þess að allar upplýsingar sé með góðu móti hægt að rekja í skýrslum.

- Yfirborð lagsins, sem mælingar fara fram á, þarf að vera slétt, svo að tromlan sé hvarvetna í góðri snertingu við jarðefnið. Oft er ekki hægt að uppfylla þetta, sérstaklega á mjög grófkornóttum jarðvegi. Það ætti samt ekkert að vera því til fyrirstöðu að framkvæma þjöppunarstjórnun á þessum jarðefnum, ef nægileg reynsla er fyrir hendi hjá ökumanni valtara, eftirlitsaðila eða verkstjóra.

- Kvörðunarsvæði verður að vera nákvæmlega eins og það framkvæmdarsvæði sem verið er að kvarða mælingartækin fyrir. Ef kvörðunarupplýsingar eru fáanlegar frá öðru keimlíku framkvæmdarsvæði, má yfirfæra þær yfir á viðeigandi framkvæmd, svo lengi sem samþykki eftirlitsaðila verkkaupa liggi til hliðsjónar.

- Við kvörðun þarf að huga vel að öllum kennistærðum prófunarvaltarans og að þær haldist stöðugar í gegnum mælingarnar. Einnig verður að passa að mælingar með þjöppumælunum séu gerðar í sömu átt yfir brautirnar á kvörðunar- og framkvæmdarsvæðinu, þ.e. frá hægri til vinstri. Mjög óæskilegt er að vatnspollar séu á svæðunum tveimur, meðan á þjöppumælingum stendur.

Mörg fleiri atriði eru tilgreind í verklýsingunni, sem ekki verður farið betur í hér. Það eru m.a. atriði sem varða það hvernig niðurstöður mælinganna eru metnar og skýrslur eru framsettar.

8. Niðurstöður

8.1 Almennt

Fjallað hefur verið um jarðefni, myndun þess og helstu eiginleika til grundunar. Einnig um þjöppun jarðefnis og hvað staðlar og verklýsingar hafa að segja um þau mál. Bornar hafa verið saman mismunandi aðferðir við þjöppumælingar og reynt að meta notkunarsvið þeirra. Niðurstöður plötuprófs og falllóðsprófs voru bornar saman og fylgni skoðuð þar á milli, bæði í núverandi samanburði og eldri samanburðum. Að lokum var fjallað um þjöppumæla í völturum og tilheyrandi skráningartæki þeirra og lagt mat á notagildi þeirra, sérstaklega til lengri tíma litið.

8.2 Jarðefni

Tæknileg skilgreining á jarðefni segir að það sé einfaldlega allur efsti hluti jarðskorpunnar, þ.e. laus jarðlög sem liggja ofan á berggrunni. Myndun þess á sér einkum stað með veðrun og svörfun á berggrunni landsins, flutningi þess efnis sem þannig losnar og við setlagamyndun, þ.e. þegar efnið staðnæmist og hleðst upp. Auk þess myndast laus jarðefni við eldsumbrot (gjóska), rof og endurupphleðslu eldri setlaga. Á Íslandi gengur myndun lausra jarðefna hraðar fyrir sig heldur en í nágrannalöndum okkar, vegna þess hversu jarðfræðilega yngra landið er og mótun þess ör.

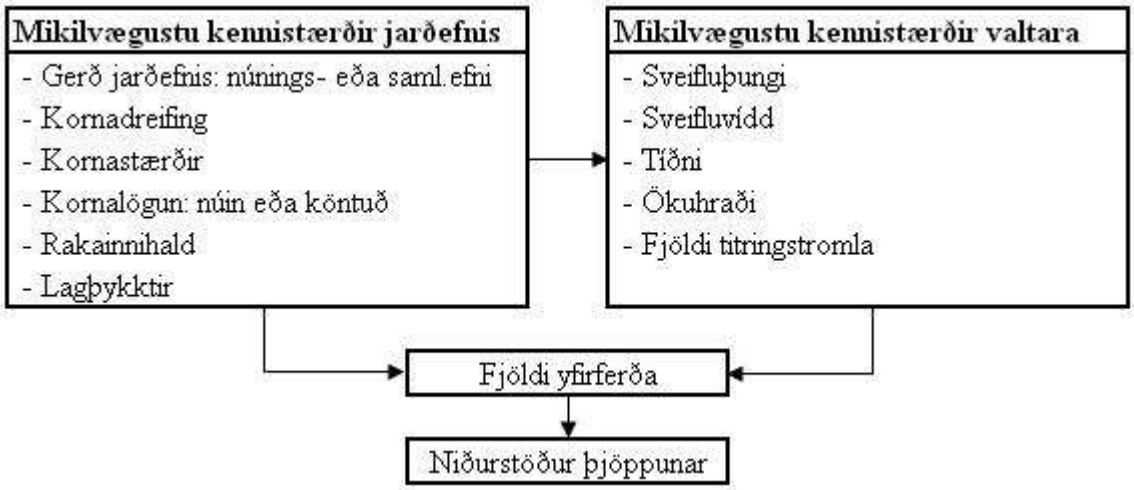
Laus jarðefni sem notuð eru í mannvirki og til grundunar þeirra eru gjarnan kölluð byggingarefni og er notkun þeirra mest við framkvæmdir tengdar vegagerð, húsbyggingum og stíflugerð. Mjög mismunandi kröfur eru gerðar til byggingarefna í sérhverri framkvæmd og er það því breytilegt hvaða eiginleika efnin verða að hafa. Þessir eiginleikar eru ýmist metnir eða mældir með tæknilegum eða jarðfræðilegum aðferðir og lokaniðurstaða slíks mats segir þá til um gæði byggingarefnisins með tilliti til fyrirhugaðrar notkunar þess.

Tæknimenn eru stöðugt á höttunum eftir einföldum prófunum sem gefa nægilegar upplýsingar um byggingarefnið, án þess að vera of ítarlegar, tímafrekar og dýrar. Hafa þeir því þróað með sér slík próf, sem gefa óbeinar upplýsingar um eiginleika jarðefnisins og það látið nægja til þess að draga ályktanir um eiginleika þess. Þessi próf er kölluð almenn próf og eru eftirtaldir eiginleikar metnir í þeim: kornastærðardreifing, flæði- og þjálnimark, þjálni, rúmþyngd, kornarúmþyngd, rakagildi, samband rúmþyngdar og raka og glæðitap.

Eftir fínefnainnihaldi er jarðefnum skipt í núningsefni, þar sem eiginleikar ráðast einkum af viðnámi milli korna og samloðunarefni, þar sem eiginleikar ráðast af yfirborðskröftum milli korna og vatns. Rakainnihald hefur því mun meiri áhrif á eiginleika samloðunarefna heldur en núningsefna og því henta núningsefni almennt betur til grundunar. Helstu þættir sem hafa annars áhrif á

grundunarhæfni jarðefna eru kornastærðardreifing, lögun korna og rakainnihald. Ákjósanlegast er að mikil dreifing sé á stærðum korna, að efniskorn séu köntuð og að efnið sé þjappað við það rakastig sem gefur hámarks rúmþyngd.

Tilgangur þjöppunar á lausum jarðefnum er fyrst og fremst að minnka loft- og vatnsrými í jarðveginum og þannig auka rúmþyngd, styrk og burðargetu. Góð þjöppun er því ein grunnforsenda þess að jarðvegur geti tekið við því álagi sem á hann er lagt, án þess að hann sígi eða verði fyrir varanlegum formbreytingum. Áhrifsþættir þjöppunar eru jarðefnisgerð, rakainnihald, þjöppunaraðferð og stífni undirlags, en eftirfarandi tafla sýnir þetta betur:



Tafla 27. Áhrifsþættir þjöppunar

Árið 2002 tóku tveir jarðtækni- og grundunarstaðlar gildi hér á landi, annarsvegar Eurocode 7 með viðeigandi þjóðarskjölum og hinsvegar DS 415 með íslenskum sérákvæðum, ÍST 15, og geta hönnuðir valið hvorn þeir nota, í báðum tilfellum teljast kröfur Byggingarreglugerðar uppfylltar. Hugsunin með stöðlum hefur verið að breytast, frá því að vera strangir hönnunarskilmálar, yfir í það að vera rit sem gefur lágmarkskröfur, en þetta er talið gefa hönnuðum aukið frelsi, til þess að velja ávallt það sem þeir telja best. Líklegt að þessir staðlar verði notaðir áfram í allnokkur ár.

Þrjár tegundir verklýsinga eru notaðar fyrir þjöppun jarðefna, aðferðar-, lokaárangursverklýsing og sambland þessara tveggja. Í aðferðarverklýsingu er um að ræða forskrift um lagþykktir og fjölda yfirferða valtara af ákveðinni lágmarksþyngd. Aðferðin er góð og gild en krefst þó mikillar viðveru eftirlits, til þess að fylgja ákvæðum hennar eftir, en þó svo að það sé gert er það ekki trygging fyrir nægilegri þjöppun. Þegar lokaárangursverklýsing er notuð, er þjöppun mæld á nokkrum stöðum með viðeigandi aðferð, eftir að þjöppun er lokið. Stærsti ókostur þessarar aðferðar er sá að lítil vitneskja liggur fyrir um þjöppun neðri laga og þjöppun getur verið ójöfn. Sambland þessarra tveggja er því að jafnaði talið henta best, enda er það mest notað í dag.

Tvær verklýsingar eru til hérlendis um þjöppun jarðefna og eru þær báðar blanda af aðferðar- og lokaárangursverklýsingu. Þær eru annarsvegar verklýsing Vegagerðarinnar, Alverk´95, sem fjallar einkum um vegagerð og hinsvegar verklýsingar Rannsóknarstofnunar byggingariðnaðarins, ýmis Rb blöð, sem notaðar eru við almennar byggingaframkvæmdir.

8.3 Samantekt aðferða við þjöppunarmælingar

Teknar hafa verið saman nokkrar aðferðir sem notaðar eru við þjöppumælingar í heiminum í dag og fjallað sérstaklega um þær sem eru algengar hérlendis. Skipta má aðferðunum í eftirfarandi fjóra flokka:

1. Kvörðunarpróf á rannsóknarstofu
    - „Proctor“ próf
    - Hristiborðspróf
2. Rúmþyngdarmælingar
    - Sandkeilupróf
    - Vatnsblöðrupróf
    - Sívalningsrúmmálsmæling
    - Ísótópamælingar (Troxler)
3. Sigmælingar
    - Plötupróf
    - Falllóðspróf
    - Lítil falllóðspróf
    - Hallamæling
4. Aðrar mælingar
    - Þjöppumælar í völturum
    - Prófvöltun
    - Þrýstimælir

Af þessum prófum er vatnsblöðrupróf, sívalningsrúmmálsmæling, lítil falllóðpróf, hallamæling, prófvöltun og þrýstimælir lítið sem ekkert notuð hér á landi við þjöppumælingar. Sumar þeirra hafa einhverntíma verið notaðar en eru það ekki lengur, allavegana ekki í neinum mæli.

Hinar sem eftir standa, þ.e. „Proctor“ próf, hristiborðspróf, sandkeilupróf, ísatópamælingar, plötupróf, falllóðspróf og þjöppumælar í völturum, eru hinsvegar notaðar, mismikið eins og gefur að skilja og var því ítarlegar fjallað um þær. Hér á eftir er fjallað um upplýsingargildi og áreiðanleika þeirra, helstu kostir og ókostir dregnir fram og notkunarsvið þeirra skoðað.

8.3.1 „Proctor próf“

Upplýsinga- og notagildi: Prófið er rannsóknarstofupróf og er notað til þess að ákvarða hámarks þurra rúmþyngd jarðefnis, miðað við hagstæðasta vatnsinnihald og gefur þannig upplýsingar um þjöppunareiginleika efnisins, t.d. við hvaða rakastig efnið þjappast best. Prófið er notað til þess að búa til viðmið

fyrir rúmþyngdarmælingar, gerðar úti í mörkinni, sem kröfur um þjöppun eru stilltar eftir. Í þessu samhengi er talað um þjöppunargráðu og segir hún til um hversu há mæld þurr rúmþyngd úti í mörkinni er, í prósentum talið, miðað við hámarks þurra rúmþyngd á rannsóknarstofu.

Prófið er mjög mikið notað hérlendis. Rannsóknin líkir þó ekki fyllilega eftir raunverulegum aðstæðum, þar sem sýni má ekki innihalda meira en 30% af grófari kornum en 19 mm og þjöppun er án titrings, en um hvortveggja er oftast að ræða í raun. Til eru tvær útfærslur af prófinu, „Standard“ og „Modified“ og er munurinn fólginn í þjöppunarorkunni sem beitt er á efnið. Hérlendis er „Standard“ útfærslan mun meira notuð og því eru kröfur í íslenskum verklýsingum miðaðar við hana.

Áreiðanleiki: Þar sem um er að ræða staðlað próf á rannsóknarstofu, gefur það afar nákvæmar og góðar niðurstöður. Helsti skekkjuvaldur er einkum fólginn í skekkjum aðferðarinnar, þ.e. ef jarðefnið inniheldur mikið af kornum stærri en 19 mm, ef aðskilnaður verður á efninu og splittun er ekki nægjanleg.

Próftími: Niðurstöður fást eftir tvo og hálfan dag.

Kostnaður: Eitt „Proctor“ próf á 15-18 kg sýni kostar 31.125 kr með vsk.

Helstu kostir: Mjög nákvæmt próf

Helstu gallar: Tímafrekt próf, líkir ekki fyllilega eftir aðstæðum úti í mörkinni, tiltölulega dýrt próf.

8.3.2 Hristiborðspróf

Upplýsinga- og notagildi: Prófið er rannsóknarstofupróf og er notað til þess að meta þjöppunareiginleika jarðefnis. Þjöppunargráða er ákvörðuð út frá samanburði á rúmþyngd efnis í lausasta ástandi, þéttasta ástandi og eins og það kemur fyrir úti í mörkinni. Prófið er notað til þess að búa til viðmið fyrir rúmþyngdarmælingar, gerðar úti í mörkinni, sem kröfur um þjöppun eru stilltar eftir. Þjöppunargráðan segir til um hver holrýmd efnis úti í mörkinni er, í samanburði við það sem holrýmd getur mest og minnst orðið.

Prófið er ekki mikið notað hérlendis, einungis eru nokkur slík gerð á ári hverju og þá einkum þegar „Proctor“ prófi er ekki komið við, vegna of grófra efniskorna. Prófið líkir betur eftir raunaðstæðum heldur en „Proctor“ próf, þar sem sýnið inniheldur grófari korn og þjöppun er með titringi. Stærð korna getur farið allt upp í 75 mm með því skilyrði að 30% af efninu fari í gegnum sigti með möskvastærðina 37,5 mm við sigtun. Einnig hafa verið smíðuð hristiborðspróf sem geta tekið við ennþá stærri kornum, en slíkt er ekki til hérlendis.

Áreiðanleiki: Þar sem um er að ræða staðlað próf á rannsóknarstofu, gefur það afar nákvæmar og góðar niðurstöður. Helsti skekkjuvaldur er einkum fólginn í skekkjum aðferðarinnar, þ.e. vandasamt getur verið að ákvarða hvað sé lausasta ástand efnisins og hvað sé það þéttasta, ef aðskilnaður verður á efninu og splittun er ekki nægjanleg.

Próftími: Niðurstöður fást eftir tvo daga.

Kostnaður: Eitt hristiborðspróf á 60 kg sýni kostar 27.390 kr með vsk.

Helstu kostir: Nákvæmt próf, líkir ágætlega eftir aðstæðum úti í mörkinni.

Helstu gallar: Tímafrekt próf, stórt jarðefnissýni, tiltölulega dýrt próf, vandasamt að ákvarða forsendur, þ.e. lausasta og þéttasta ástand

8.3.3 Sandkeilupróf

Upplýsinga- og notagildi: Prófið er gert úti í mörkinni og er notað til þess að ákvarða þurra rúmþyngd jarðefnis, ásamt vatnsinnihaldi þess. Niðurstöður eru bornar saman við niðurstöður „Proctors“ prófs eða hristiborðsprófs (hérlendis aðallega notað„Proctor próf“) og þjöppunargráða metin. Algengustu kröfur eru 90-100% „Standard Proctor“, en geta þó verið stífari í sumum tilfellum.

Prófið var mjög mikið notað hérlendis áður fyrr, en er lítið notað í dag, þó einstaka sinnum á stöðum sem erfitt er að framkvæma önnur próf (plötupróf). Ísatópamælingar og plötupróf hafa leyst sandkeiluprófið af hólmi.

Áreiðanleiki: Gefur mjög nákvæmar niðurstöður ef vel er til þess vandað og jarðefnisgerð hæfir því, en helstu skekkjuvaldar eru mjög gróf jarðefniskorn og mikil holrýmd í jarðefninu.

Próftími: Framkvæmd sandkeiluprófs á einum punkti úti í mörkinni tekur á bilinu 30-60 mín, en niðurstöður á þjöppunargráðu fást ekki fyrr en eftir tvo og hálfan dag, þar sem bíða þarf eftir niðurstöðum „Proctor“ prófs til samanburðar.

Kostnaður: Oftast eru tekin 2-3 próf á mælingarstað, en annars ræður stærð og breytileiki fyllingar því. Meðalverð á punkti er u.þ.b. 21.000 kr með vsk. og því er meðalverð á mælingarstað á bilinu 42.000-63.000 kr með vsk.

Helstu kostir: Nákvæmt próf við kjöraðstæður.

Helstu gallar: Tímafrekt próf, mjög dýrt, vegna smæðar sýnis er óvíst að það sé dæmigert fyrir fyllinguna alla.

8.3.4 Ísatópamælingar (Troxler)

Upplýsinga- og notagildi: Prófið er gert úti í mörkinni og er notað til þess að ákvarða þurra rúmþyngd jarðefnis, ásamt vatnsinnihaldi þess. Niðurstöður eru bornar saman við niðurstöður „Proctors“ prófs eða hristiborðsprófs (hérlendis aðallega notað„Proctor próf“) og þjöppunargráða metin. Algengustu kröfur eru 90-100% „Standard Proctor“, en geta þó verið stífari í sumum tilfellum.

Prófið er mikið notað hérlendis og hentar best á þéttum og fínkornóttum efnum, eins og við þjöppunarmælingar á malbiki og mælingar á styrkingum í burðarlögum með malbiki og sementi, ásamt því sem það hefur verið notað við mælingar á þéttikjarna í stíflum. Prófið hentar illa á grófkornótt og opin efni og

er því ekki notað neitt af ráði við þjöppumælingar á jarðefnum í fyllingum undir sökkla og burðarlögum í vegagerð.

Áreiðanleiki: Nákvæmt próf ef tækið virkar eðlilega, en það er mjög viðkvæmt og þarf stöðugt viðhald, þar sem það ofáætlar niðurstöður með tímanum. Þrátt fyrir hátæknina er tækið ekki eins nákvæmt og sandkeiluprófið. Helstu skekkjuvaldar eru gróf jarðefniskorn í fyllingu og óslétt jarðefnisyfirborð. Einnig er talið að ýmis sölt og málmar í efninu geti haft áhrif á niðurstöður, en það hefur þó ekki verið sannreynt.

Próftími: Mælingin er afar fljótleg, t.a.m. er hægt að gera tíu slíkar á sama tíma og ein mæling með sandkeilu tekur. Niðurstöður í kvörðuðu tæki, þ.e. tæki sem niðurstöður „Proctor“ prófs á jarðefninu hafa verið slegnar inn í, fást samstundis og mælingar eru gerðar.

Kostnaður: Hægt er að leigja tækið annarsvegar á tímagjaldi og hinsvegar á dagsgjaldi og er miðað við að fimm tímar myndi einn dag. Tímagjaldið er 2.000 kr með vsk. en dagsgjaldið 9.500 kr með vsk. Mjög mismunandi er hversu margar mælingar eru gerðar á hverjum stað og því leigutíminn mislangur. Að meðaltali má þó miða við að leigutíminn sé einn dagur, í framvæmdum á höfuðborgarsvæðinu, og því meðalverð u.þ.b. 9.500 kr með vsk.

Helstu kostir: Ódýrt próf, gefur nákvæmar niðurstöður ef tæki virkar eðlilega, afar fljótlegt próf, hægt að gera margar mælingar á hverjum stað.

Helstu gallar: Tækið inniheldur geislavirk efni og því þurfa þeir sem nota það að fara á sérstakt námskeið, tækið þarf mikið viðhald, hentar einungis á þétt og fínkornótt jarðefni.

8.3.5 Plötupróf

Upplýsinga- og notagildi: Prófið er gert úti í mörkinni og er notað til þess að ákvarða fjaðurstuðul (E stuðul) jarðefnis út frá mælingum á sigi, undan ásettu álagi (statískt). Álag er sett í tvígang á hringlaga plötu og tekið af á milli og tilsvarandi sig mælt, þannig að tveir fjaðurstuðlar fást (E_1 og E_2). Við túlkun á niðurstöðum er litið á tvennt, annarsvegar hversu hátt gildið á E_2 er og hinsvegar hvert gildið er á hlutfallinu E_2/E_1. E_2 er notað sem mælikvarði á burði fyllingar og því hærra sem gildið er því meiri burður er til staðar, en hlutfallið E_2/E_1 er notað sem mælikvarði á þjöppun og því minna sem það er því betri telst þjöppunin. Algengar kröfur á E_2 eru 80-100 MPa á fyllingum undir sökkla og 100-150 MPa á vegum, en algeng krafa á E_2/E_1, er að það sé minna en 2,3.

Plötuprófið er gríðarlega mikið notað hérlendis, í raun er það alltaf valið ef því er komið við á því jarðefni sem er til skoðunar. Á höfuðborgarsvæðinu er það því einsráðandi í þjöppumælingum á fyllingum og burðarlögum. Úti á landi er það minna notað vegna mikilli fjarlægða, þó hefur það verið að færast í vöxt þar.

Áreiðanleiki: Niðurstöður gefa ekki nákvæmar upplýsingar um gæði þjöppunar, heldur einungis ákveðna hugmynd, sem er svo studd af reynslu prófsins hérlendis. Helstu skekkjuvaldar eru frost í jarðefni og mjög gróf korn (> 75 mm) undir mæliplötu. Einnig hentar prófið ekki á fínefnasnauð efni, á slíkum tilfellum er hætt við skekkju í niðurstöðum.

Próftími: Mæling á einum punkti tekur að jafnaði 30-60 mín, en það fer allt eftir plötustærð og í hvað mörgum þrepum álag er sett á plötuna.

Kostnaður: Oftast eru tekin 2 próf á fyllingum undir hús, en annars ræðst það af stærð fyllingar, en nauðsynlegur punktfjöldi er metinn af byggingafulltrúa eða eftirlitsmanni. Meðalverð á punkti er u.þ.b. 13.000 kr og er ekki rukkaður vsk., lágmarksverð á mælingarstað er því u.þ.b. 26.000 kr.

Helstu kostir: Mikil og góð reynsla komin á það, mjög nákvæm mæling á sigi undan álagi, gefur niðurstöður strax eftir mælingu.

Helstu gallar: Mæling er seinleg, tiltölulega dýr, útbúnaður aðferðar hérlendis krefst þess að tvö ökutæki séu notuð við framkvæmd prófsins og því þarf einnig tvö starfsmenn, mikill tækjabúnaður.

8.3.6 Falllóðspróf

Upplýsinga- og notagildi: Prófið er gert úti í mörkinni og er notað til þess að ákvarða fjaðurstuðul (E_{mod} stuðul) jarðefnis út frá mælingum á sigi, undan ásettu höggálagi (dýnamískt). Ýmist eru slegin 2 eða 4 högg og er fjaðurstuðull reiknaður eftir hvert högg, (E_{m1}, E_{m2}, E_{m3} og E_{m4}). Við þjöppumælingar hefur gildið á E_{m4} verið valið, ásamt hlutfallinu á E_{m4}/E_{m3} og er það talið líkja eftir niðurstöðum plötuprófsins. E_{m4} er þá mælikvarði á burði fyllingar og E_{m4}/E_{m3} mælikvarði á þjöppun. Vegna lítillar notkunar við þjöppumælingar hérlendis er engin krafa til um þessi tvö gildi. Aftar í niðurstöðum, í kafla 8.4.4, er fjallað um að betra sé að nota gildið á E_{m2} og hlutfallið E_{m2}/E_{m1} við þjöppmælingar, þar sem þetta líkir betur eftir plötuprófinu.

Falllóðsprófið hefur næstum ekkert verið notað hérlendis við þjöppunarmælingar og skortir því alla reynslu á því sviði. Hinsvegar hefur það

markvisst verið notað til þess að burðarþolsákvarða vegi landsins, þ.e. fullbúna vegi ýmist með eða án bundins slitlags, til þess að meta endingatíma og viðhaldsþörf. Einnig hefur það að einhverju leyti verið notað til þess að athuga hvort nýr fullbúinn vegur standist hönnunarkröfur, einu ári eftir að hann var tekinn í notkun og virkar þar sem einskonar gæðaeftirlitstæki.

Áreiðanleiki: Niðurstöður gefa ekki nákvæmar upplýsingar um gæði þjöppunar, heldur einungis ákveðna hugmynd, sem þyrfti svo að vera studd af uppsafnaðri reynslu, en þar sem reynslan er ekki fyrir hendi, allavegana ekki í þjöppunarmælingum, er erfitt að lesa út úr niðurstöðum þess, án kvörðunar. Helstu skekkjuvaldar eru frost í jarðefni, gróf jarðefniskorn og óslétt yfirborð.

Próftími: Mælingin er afar fljótleg, mæling á einum punkti tekur u.þ.b.2-3 mín.

Kostnaður: Vegagerðin hefur rukkað 8.500 kr með vsk. fyrir hvern mældan km á vegi við burðarþolsmat. Ef aðferðin væri notuð við þjöppumælingar á fyllingum og burðarlögum, yrði sennilega rukkuð sama upphæð fyrir hverja klst og það væri þá lágmarkseiningin, þ.e. ekki væri hægt að leigja það í minna en eina klst. Mælingar eru fljótlegar og því er líklegt að í flestum tilfellum, á höfuðborgarsvæðinu, þyrfti einungis eina klst. Lágmarksverðið er því 8.500 kr með vsk.

Helstu kostir: Mælingin er fljótleg, hægt að kortleggja stór svæði á skömmum tíma, niðurstöður liggja fyrir strax eftir mælingu, ódýrt próf.

Helstu gallar: Skortir reynslu við þjöppumælingar fyllinga og burðarlaga, niðurstöður er ekki hægt að túlka án kvörðunar við plötupróf eða þjöppunargráðu, sigmælingar ekki eins nákvæmar og í plötuprófi, er viðkvæmt fyrir kulda og raka, mikill tækjabúnaður.

8.3.7 Þjöppumælar í völturum

Upplýsinga- og notagildi: Mælingar fara fram úti í mörkinni og eru notaðar til ákvörðunar á hreyfifræðilegum stífleika jarðefnis, út frá svörun þess gagnvart titringsálagi. Niðurstöður eru einingalaus mæligildi (misjafn skali eftir framleiðanda valtara) sem ekki er hægt að túlka gæði þjöppunar út frá, án þess að til komi kvörðun við plötupróf eða þjöppunargráðu. Niðurstöður gefa þó upplýsingar um misjafna þjöppun og tilgreina efnislega veik svæði. Hægt er að nota þessar upplýsingar til að þjappa betur þau svæði sem þurfa á því að halda og tryggja þannig jafnari þjöppun.

Með skráningartæki og úrvinnsluforriti er hægt að stilla upp upplýsingum um þjöppun á stóru samfelldu svæði, útbúa viðeigandi kvörðunargögn við þekktari próf og vista allar upplýsingar eða prenta út sem eftirlitsskýrslur.

Áreiðanleiki: Niðurstöður gefa ekki nákvæmar upplýsingar um gæði þjöppunar, heldur einungis ákveðna hugmynd, sem þyrfti svo að vera studd af uppsafnaðri reynslu, en þar sem reynslan er ekki fyrir hendi er erfitt að lesa út úr niðurstöðum þess, án kvörðunar. Helstu skekkjuvaldar eru frost í jörðu, mjög gróf jarðefniskorn og óslétt yfirborð. Einnig geta vatnspollar á yfirborði fyllingar skekkt niðurstöður

Próftími: Er ekki um neinn eiginlegan próftíma að ræða, þar sem þjöppumæling fer fram samhliða lokayfirferð þjöppunar. Mæld þjöppunargildi koma strax og ef skráningartækið er kvarðað, fyrir jarðefnið í viðeigandi framkvæmd, fást niðurstöður strax.

Kostnaður: Enginn aðili hérlendis tekur að sér þjöppumælingar með þessum hætti og rukkar fyrir það, heldur kaupa verktakar mælingarbúnaðinn í valtarana hjá sér og nota hann samhliða þjöppun. Verð yrði því að reiknast inn í kostnað við þjöppun, þ.e. kostnað á valtara og tímakaup ökumanns.

Ef borið er saman lán á valtara með búnaðinum, við lán á valtara án búnaðar, útreiknað af reiknivélum Glitnis, með 5,0% vöxtum og lánstíma upp á fimm ár, þá er munurinn á mánaðarlegri meðalgreiðslu u.þ.b. 25.000 kr. Ef smá ágóða er bætt við má t.d. segja að 30.000 kr sé sú greiðsla sem eigandi valtara verður að fá inn mánaðarlega fyrir mælingarbúnaðinn. Ef valtarinn er notaður 20 daga í mánuði þýðir þetta greiðslu upp á 1500 kr á dag. Þetta dæmi er ómerkilegur slumpureikningur, en gefur þó smá mynd af því að hér er ekki um miklar fjárhæðir að ræða, fyrir mælingar með búnaðinum. Inn í þetta vantar síðan reyndar kostnað vegna kvörðunar og úrvinnslu.

Helstu kostir: Þjöppunarmælingar er hægt að gera samhliða þjöppun, hægt er að mæla allt svæði fyllingar í stað einungis nokkurra punkta, niðurstöður er ekki hægt að falsa, niðurstöður fást myndrænt og er auðvelt að túlka, ódýrt próf.

Helstu gallar: Skortir reynslu við þjöppumælingar, niðurstöður er ekki hægt að túlka án kvörðunar við plötupróf eða þjöppunargráðu, borgar sig einungis í stórum framkvæmdum, tekur tíma að læra á búnaðinn og viðeigandi úrvinnsluforrit.

8.3.8 Samantekt helstu aðferða

Aðferð	Helstu kröfur	Lágmarksverð	Niðurst. fást eftir
Proctor	90-100% Proctor	31.125 kr.	2,5 daga
Hristiborð	0,8 < Dr < 1,0	27.390 kr.	2 daga
Sandkeila	90-100% Proctor	42.000 kr.	2,5 daga
Troxler	90-100% Proctor	9.500 kr.	0-2,5 daga
Plötupróf	E2=100-120 MPa og E2/E1<2,3	26.000 kr.	Strax
Falllóðspróf	Í burðarþolsmati: Em2 >200 MPa	8.500 kr.	Strax

Þjöppumælar	Möl og sandur: Omega=250-600	(< 5000 kr.)	Strax

Aðferð	Helstu skekkjuvaldar	Notkun hérlendis við þjöppumælingar
Proctor	Gróf korn og aðskilnaður efnis	Mjög mikil
Hristiborð	Holrýmisákvörðun	Frekar lítil
Sandkeila	Gróf korn og mikil holrýmd	Mjög lítil
Troxler	Gróf korn og óslétt yfirborð	Frekar mikil
Plötupróf	Mjög gróf korn og frost	Mjög mikil
Falllóðspróf	Mjög gróf korn og frost	Frekar lítil
Þjöppumælar	Mjög gróf korn og frost	Talsverð

Tafla 28. Nokkrar upplýsingar um helstu aðferðir sem notaðar eru við þjöppunmælingar.

8.4 Samanburður plötuprófs og falllóðsprófs

Áður en niðurstöður mælinga frá plötuprófum og falllóðsprófum, sem gerðar voru á Hringbraut, Vesturlandsvegi og Reykjanesbraut, voru skoðaðar og bornar saman, var fyrst litið til eldri samanburða milli aðferðanna, einn innlendan og tvo erlenda, til þess að fá þaðan fyrirmyndir og sjá hvaða niðurstöður þeir sýndu. Um er að ræða samanburð sem BUSL samstarfið stóð fyrir, samanburð sem danska Vegagerðin gerði og samanburð sem var gerður á vegum Keros Technology, framleiðandi Prima 100, litla falllóðsins. Framkvæmd þeirra var mismunandi og misvel staðið að vali mælinga til samanburðar.

8.4.1 Samanburður BUSL samstarfsins

Mælingar til samanburðar: Teknar voru gamlar plötuprófs- og falllóðsmælingar á ýmsum vegum landsins, en upphaflega markmið þeirra var ekki að nýta þær til samanburðar, heldur ýmist að rannsaka burð, meta þjöppun eða skoða mæliaðferðina sjálfa innbyrðis.

Framkvæmd: Mælingum var safnað saman, þær flokkaðar og settar upp í samanburðarlínurit þar sem ýmsir þættir mælinganna voru skoðaðir, t.d. fjaðurstuðull plötuprófs við sigmælingar falllóðsprófs. Fylgni var skoðuð og jafna fyrir bestu beinu línu mælipunktanna höfð til hliðsjónar.

Helstu niðurstöður: Almennt lítil fylgni milli niðurstaðna mælinga með aðferðunum tveimur. Lítið hægt að nota þessar gömlu mælingar til samanburðar, vegna breytilegra forsendra. Bent á að gera þurfi samanburð þar sem forsendur, þ.e. plötustærð, hámarksálag og framkvæmd, eru eins í báðum aðferðum. Sjá kafla 6.2.1.2. til frekari glöggvunar.

8.4.2 Samanburður dönsku Vegagerðarinnar

Mælingar til samanburðar: Sérstakur tilraunarvegkafli, um 400 m langur, var notaður og mælingar framkvæmdar á þjöppuðu yfirborði efra burðarlags hans, eftir ákveðnu skipulagi, með plötuprófi, falllóðsprófi og litlum falllóðum. Mælingar voru gerðar með það í huga að nota þær til samanburðar. Einnig var þjöppunargráða mæld og rakainnihald vegkaflans kannað, til frekari samanburðar. Helsta markmið tilraunarinnar var að athuga hvort falllóðið gæti komið í stað plötuprófs við þjöppumælingar og í leiðinni að skoða hvernig niðurstöður litlu falllóðin gefa miðað við hinar tvær aðferðirnar.

Framkvæmd: Búið var að skipuleggja framkvæmdina til hins ítrasta, áður en mælingar fóru fram, en þær hófust að morgni dags og voru framkvæmdar allar samdægurs, vítt og breytt á kaflanum, eftir fyrirfram ákveðnu kerfi. Álagsmöguleikar og plötustærðir hverrar aðferðar voru skoðaðir og reynt að stilla upp sambærilegu við úrvinnslu niðurstaðna. Miðað var við 200 kPa álag og 300 mm plötustærð, þar sem því var komið við, en ekki er tekið nægilega fram hvernig hver aðferð er nákvæmlega framkvæmd. Í samaburðinum var fjaðurstuðull aðferðanna einkum til athugunar og voru notuð línurit, til þess að stilla upp niðurstöðum.

Helstu niðurstöður: Beint samband virðist vera milli niðurstaðna aðferðanna tveggja og til þess að endanlega megi ákveða hvort falllóðið geti tekið við af plötuprófinu, verður að gera fleiri hliðstæðar rannsóknir og þá einnig á fyllingum og neðri burðarlögum. Litlu falllóðin gefa ekki eins hliðstæðar niðurstöður við hinar tvær aðferðirnar, en samt er mælt með að þau skuli kynnt sem fljótleg eftirlitstæki við þjöppumælingar, á stöðum þar sem ekki er hægt að framkvæma hinar mælingarnar. Sjá kafla 6.3.1.2. til frekari glöggvunar.

8.4.3 Samanburður Keros Technology

Mælingar til samanburðar: Mælingar sem voru framkvæmdar af danska fyrirtækinu Franck Geoteknik og dönsku Vegagerðinni og ekkert meira sagt um það. Því er ekki vitað hvernig staðið var að þeim, hversu margar mælingar var um að ræða, né hver tilgangur þeirra var. Hér er um að ræða samanburð á plötuprófinu og litla falllóðinu, Prima 100 og markmiðið að athuga hversu líkar niðurstöður þeirra á fjaðurstuðli eru.

Framkvæmd: Mælingum var safnað saman, þær flokkaðar og settar upp í samanburðarlínurit þar sem tvennt var skoðað, annarsvegar hversu líkar

niðurstöður á ákvörðuðum fjaðurstuðli voru og hinsvegar hvaða áhrif aukin álagsspenna hefur á fjaðurstuðulinn, í mismunandi jarðefnum.

Helstu niðurstöður: Línulegt samband er fengið milli niðurstaðna prófanna og minnst er á að mikilvægt sé að nota sömu álagsforsendur, í samanburði sem þessum. Sjá kafla 6.3.2.2. til frekari glöggvunar.

8.4.4 Núverandi samanburður

Almennt: Höfundur tók eftir því að í niðurstöðum eldri samanburðanna þriggja, var alls staðar talað um mikilvægi þess að hafa forsendur sambærilegar milli mælingaaðferða, sem eru til skoðunar. Hann fór því að skoða betur, þær mælingar sem hann hafði til úrvinnslu og komst fljótt að því að þar vantaði talsvert upp á samhljóm í forsendum, þ.e. mismunandi stærðir voru á álagsplötum og álag mismunandi, en með þessa vitneskju var lagt upp í samanburðinn.

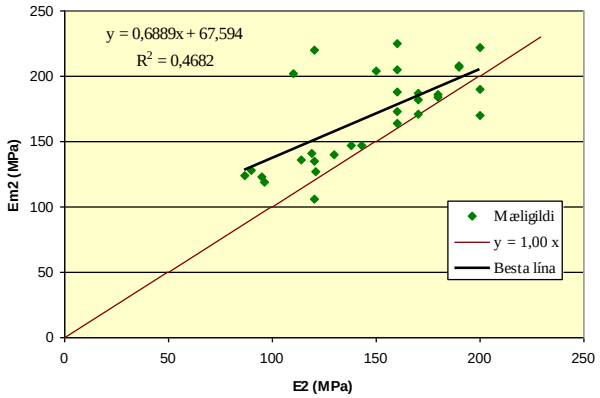
Ákveðið var að bera saman ákvarðaða fjaðurstuðla milli aðferðanna tveggja, líkt og gert var í samanburðum dönsku Vegagerðarinnar og Keros Technology, en ekki fjaðurstuðul við sigmælingar, eins gert var í samanburði BUSL samstarfsins. Ákveðið var þó að nota framsetningu síðastnefnda samanburðarins og stilla niðurstöðum upp í línurit, þar sem fylgni er skoðuð og jafna bestu beinu línu ákvörðuð.

Einnig var ákveðið að nota ákvarðaða fjaðurstuðla úr fyrsta og öðru höggi (E_{m1} og E_{m2}) falllóðsins, í stað fjaðurstuðla þriðja og fjórða höggs (E_{m3} og E_{m4}). Ástæðan var sú, að við nánari skoðun, var hlutfallslega mestur munur á þjöppun milli fyrsta og annars höggs, en minnstur milli þriðja og fjórða. E_{m1} og E_{m2} og hlutfallið milli þeirra, er því talið líkja betur eftir stuðlum plötuprófsins og hvernig þeir eru fengnir. E_{m2} stuðull falllóðsprófs var því borinn saman við E_2 stuðul plötuprófs og hlutfallið E_{m2}/E_{m1} í falllóðsprófi var borið saman við hlutfallið E_2/E_1 í plötprófi.

Mælingar til samanburðar: Bornar voru saman nothæfar niðurstöður plötuprófs og falllóðsprófs, alls 30 mælingar, sem teknar voru á sömu mælipunktum, að hluta til á Hringbraut, hluta til á Vesturlandsvegi og hluta til á Reykjanesbraut. Mælingarnar voru gerðar bæði, með samanburð í huga og til þess að athuga gæði þjöppunar í tilheyrandi framkvæmdum. Í upphafi var ekki hugsað nægilega fyrir því, að stilla forsendum svipað upp og mælingar fóru ekki allar fram samdægurs.

Framkvæmd: Mælingum var safnað saman, þær flokkaðar og settar upp í samanburðarlínurit, þar sem ákvarðaðir fjaðurstuðlar plötuprófs og falllóðsprófs voru til skoðunar annarsvegar og áðurnefnd hlutföll aðferðanna hinsvegar. Fylgni var athuguð og jafna fyrir bestu beinu línu mælipunktanna, höfð til hliðsjónar.

Helstu niðurstöður: Niðurstöður mælinga voru frekar dreifðar og því var fylgni milli þeirra almennt mjög léleg, eins og mynd 61 sýnir. Helstu ástæðurnar fyrir því eru, í fyrsta lagi afar fáar mælingar sem notaðar voru til samanburðarins og í öðru lagi of mismunandi forsendur, margar plötustærðir og mismunandi álag.



Mynd 61. Em2 sem fall af E2 fyrir allar nothæfar mælingar.

Á línuritinu á mynd 61 er verið að bera saman stuðlana E_2 og E_{m2} og eins og sjá má eru mæligildin afar dreifð. Fylgni þeirra sést einnig, R = 0,4682, en miðað við fjölda mælinga telst fylgni nokkuð góð ef, R = 0,7. Hér er því ekki um mikla fylgni að ræða.

Bent er á að ef með nokkru móti á að vera hægt að yfirfæra uppsafnaða reynslu plötuprófsins yfir á falllóðið, þurfi að gera vandaðan samanburð, þar sem forsendur og skilgreiningar eru skýrar og nákvæmlega eins milli aðferða. Einnig er bent á að í slíkum samanburði, þyrfti að hagræða framkvæmd prófanna þannig að þau líkjast betur hvort öðru. Í þessu samhengi væri gott að nota svokallað hratt plötupróf, þar sem hámarksálag er sett þrepalaust á plötuna í tvígang og tekið af á milli. Og í falllóðsprófinu að slá einungis tvo högg, til að líkja þá eftir hraða plötuprófinu. Einnig að setja smá sand undir plötuna í falllóðsprófinu og forálag á hana (80 kPa), líkt og gert er í plötuprófinu til þess að jafna yfirborðið. Sjá kafla 6.4.5. til frekari glöggvunar.

Gjarnan mætti taka samanburð dönsku Vegagerðarinnar til fyrirmyndar að öllu leyti og gera þá allar mælingar samdægurs á lokuðum vegkafla, þar sem ekkert væri til truflunar. Einnig að vinna úr niðurstöðum á svipaðan hátt og áætla þá einnig þjöppunargráðuna og rakainnihaldið á hverjum stað. Fróðlegt væri að sjá hvað kæmi út úr þeim samanburði.

8.5 Þjöppumælar í völturum

Umfang allrar jarðvinnu er stöðugt að aukast og hraði er að verða meiri, þannig að tíminn sem þjöppumælingum er gefinn er stöðugt að minnka. Samhliða þessu er alltaf verið að auka þjöppunarkröfur og í dag þykir það ekki síður mikilvægt að tryggja jafna þjöppun yfir alla fyllinguna, rétt eins og að tryggja að einhverju lágmarksgildi á þjöppun sé náð.

Hefðbundnar eldri aðferðir ráða illa við þessa breyttu tíma, þar sem þær geta ekki mætt þessum kröfum og eru flestar tímafrekar, en hér er verið að tala um mælingar í stórframkvæmdum en ekki í minniháttar fyllingum undir hús. Menn sáu því brýna nauðsyn í því að leita nýrra leiða og varð úr, að þjöppumælarnir í völturunum voru fundnir upp.
Þjöppumælarnir og skráningartæki þeirra eru tvímælalaust bylting í þjöppunarmælingum, þar sem þeir gefa svo auðskiljanlegar niðurstöður, á svo sniðugan máta, á svo stórum svæðum, á svo skömmum tíma. Mælingar með þjöppumælunum og skráning með skráningartæki er afar einfalt ferli, sem lærist mjög fljótt og jafnframt hefur þessi búnaður svo marga kosti fram yfir eldri, hefðbundnari aðferðir, en þeir helstu eru eftirfarandi:

- Gefa samfelldar upplýsingar um þjöppun á öllu framkvæmdarsvæðinu, í stað einungis nokkurra punkta, sem valdir eru af handahófi.

- Tryggir mikið öryggi fyrir ökumann valtara og eftirlitsaðila, við að ná fram nauðsynlegri þjöppunargráðu með samfelldu og stöðugu upplýsingastreymi frá þjöppumælinum.

- Auðvelt að koma auga á efnislega veik svæði og þjappa þau betur.

- Tryggir lágmarksfjölda yfirferða valtara yfir efnið og kemur í veg fyrir ónauðsynlega þjöppun, þannig að sparnaður fæst í tíma og peningum.

- Kemur í veg fyrir yfirþjöppun, þannig að engin hætta er á að yfirborðið losni upp aftur eða að jarðefniskorn brotni niður.

- Tryggir jafna þjöppun, jafnvel þar sem efnið er lagt út í mörgum lögum

Helstu ókostir þeirra eru eftirfarandi:

- Hérlendis er lítil sem engin reynsla er komin á þjöppunargildin frá mælunum og því þarf að bera þau saman við hefðbundnari próf, t.d. plötupróf og kvarða niðurstöður við þau, en kvörðun getur verið tímafrek.

- Valtarar eru fyrirferðarmikil tæki og því hentar ekki að nota mæliaðferðina í litlum verkum, eins og t.d. fyllingum undir sökkla.

- Þrátt fyrir að einfalt sé að temja sér aðferðina, tekur það alltaf smá tíma að læra á búnaðinn og skilja hvernig best er að stilla mælingum upp. Því er nauðsynlegt að þeir sem koma til með að nota tækið fari á námskeið.

- Erfitt að nota aðferðina á mjög grófkornóttu og ósléttu jarðefnisyfirborði.

Kvarða þarf mæligildi þjöppunarmælanna miðað við hefðbundin próf og í þeim tilgangi má nota plötupróf, upplýsingar um þjöppunargráðu o.fl. Í raun má nota öll þau próf sem mikið hafa verið notuð og mikil uppsöfnuð reynsla er komin á. Í löndum þar sem falllóðið er mikið notað við þjöppumælingar, er það einnig notað til kvörðunar þjöppunargildanna í völturunum.

Æskilegt er að mælingar til kvörðunar fari fram á sérstöku tilraunarsvæði, áður en þjöppumælingar á eiginlegu framkvæmdarsvæði hefjast. Þar verður að stilla öllu upp eins og það kemur til með að vera í framkvæmdinni, þ.e. prófa á sama jarðefninu, með sem líkast rakainnihald, hafa sömu lagþykktir o.s.frv. Þegar kvörðun fer með þessum hætti fram, þ.e. áður en þjöppumælingar hefjast, er hægt að setja upplýsingarnar frá henni, inn í skráningartækin og þegar mælingar svo hefjast á framkvæmdinni sjálfri, er hægt að túlka gildi þannig að niðurstöður fást jafnóðum. Vissulega er hægt að kvarða niðurstöður eftir að allar mælingar hafa farið fram, en það er ekki talið gefa eins góða raun.

Kvörðun mælinga á ákveðnu jarðefni, gildir einungis fyrir það jarðefni, með tilheyrandi rakainnihaldi og í viðeigandi lagþykktum og ekkert út fyrir það. Í hverri framkvæmd þarf því að framkvæma margar kvarðanir, eða á öllum þeim lögum sem lögð eru út, þ.e. fyllingu og neðri- og efri burðarlögum.

Til þess að þjöppumælarnir geti komið í stað plötuprófs við þjöppumælingar, þarf að safna saman kvörðuðum niðurstöðum mælinga, í óákveðinn tíma og búa til reynslubanka, svipaðan þeim sem plötuprófið hefur nú þegar. Mjög líklegt er að slíkur reynslubanki muni vaxa mjög hratt, þar sem mæliaðferðin er fljótleg og sjálfvirk (þegar menn hafa tamið sér hana). Miklar upplýsingar um niðurstöður safnast því á stuttum tíma.

Mæliaðferðin í völturunum gefur, líkt og plötuprófið, niðurstöður sem eru hlutfallsleg gildi og því má, þegar uppsöfnuð reynsla er komin, taka jafnmikið mark á þeim og tekið er af niðurstöðum plötuprófsins í dag. Það er því mikill möguleiki á því að eftir einhver ár komi mæliaðferðin í völturunum alveg í stað plötuprófs, a.m.k. í stærri framkvæmdum.

8.6 Ályktanir og tillögur

Rannsóknarstofuprófin tvö, „Proctor“ próf og hristiborðspróf eru notuð til þess að kynnast þjöppunareiginleikum jarðefna. Þau munu vera notuð til þess áfram og þá „Proctor“ prófið meira en hristiborðsprófið, eins og verið hefur. Prófin eru nákvæm og gefa mikilvægar upplýsingar, sem nauðsynlegt er að afla.

Sandkeiluprófið er mjög lítið notað hérlendis og mun það sennilega ekkert breytast á næstu árum, þar sem aðrar mæliaðferðir hafa komið í stað þess sem henta betur. Notkun verður einkum úti á landi, á minni fyllingum undir sökkla, þar sem öðrum prófum er ekki við komið. Í vegagerð verður það lítið sem ekkert notað.

Ísatópamælingin er mikið notuð hérlendis, sérstaklega við þjöppumælingar á malbiki, en einnig á kjarnaefni í stíflur. Aðferðin hentar vel, þar sem hún er fljótleg og getur gefið niðurstöður strax. Hinsvegar er hún takmörkuð við vissar gerðir jarðefna, þ.e. þétt og fínkornótt og af þeim sökum er hún ekki mikið notuð við þjöppumælingar á almennum fyllingum og burðarlögum. Notkun mun líklega lítið breytast á næstu árum.

Plötupróf er mest notaða mæliaðferðin á þjöppun á Íslandi í dag. Frá því að það var tekin upp á Íslandi, fyrir um 40 árum síðan, hefur reynsla þess stöðugt verið að aukast og menn vanist því vel. Það hentar almennt vel við þjöppumælingar, á allaskonar fyllingar og burðarlög, sérstaklega þar sem það gefur túlkunarhæfar niðurstöður strax eftir mælingu.

Hinsvegar í stórum framkvæmdum, eins og vegagerð, grundun flugbrauta og sambærilegu, er það ekki nægilega hentugt lengur, þar sem nýjar kröfur kveða á um, að þjöppun skuli vera jöfn yfir allt framkvæmdarsvæðið. Mælingar með plötuprófinu gefa allt of takmarkaða mynd, af stórum fyllingum, til þess að hægt sé að mæta þessari kröfu. Einnig þykir prófið tímafrekt og frekar dýrt. Því hafa augu manna verið að opnast fyrir þörf á annarri mæliaðferð hérlendis, sem mætir þessu betur og líta þeir mjög til þjöppumælanna í völturunum.

Á næstu árum mun notkun plötuprófsins líklega minnka og þá einkum í stærri verkum. Það mun þó ekki gerast alveg strax, þar sem prófið verður notað til þess að kvarða niðurstöður þjöppunarmælanna í völturunum, heldur seinna, þegar reynslubanki þjöppumælanna er orðinn nægilegur. Plötuprófið mun áfram vera notað á minni svæði, eins og á fyllingar undir hús og götur í íbúðahverfum og sennilega hverfur það aldrei af markaðinum, allavegana ekki í nánustu framtíð.

Falllóðsprófið er mikið notað hérlendis til þess að burðarþolsmeta og -flokka vegi landsins og hefur það reynst vel í þeim tilgangi. Hinsvegar hefur það mjög lítið verið notað við þjöppunarmælingar fyllinga og burðarlaga í nýbyggingum og því er ekki hægt að túlka niðurstöður þess, að svo stöddu, á slíkum efnum nema til kvörðunar á niðurstöðum komi við þekktari aðferðir, t.d. plötupróf.

Höfundur er sannfærður um að hægt sé að yfirfæra uppsafnaða reynslu plötuprófsins yfir á falllóðsprófið, en til þess að skera megi endanlega úr því þarf að gera margar, vandaðar samanburðarmælingar milli aðferðanna. Auðvitað er viss hagur í því að fá falllóðið í stað plötuprófs þar sem mælingartími þess er mun styttri, en líkt og plötuprófið mætir falllóðið ekki hertari þjöppunarkröfum á stórum svæðum. Það er því spurning hvort ekki sé hagkvæmara að einbeita sér að því að yfirfæra reynslu plötuprófsins yfir á þjöppumælanna í völturunum, þar sem þeir mæta þessum kröfum.

Þjöppumælarnir og skráningartæki þeirra eru nýjung í þjöppumælingum, sem kom fram fyrir um 20 árum í Þýskalandi og Svíþjóð, en er í dag orðin viðurkennd aðferð þar við þjöppunarmælingar. Hérlendis hefur búnaðurinn ekki mikið verið notaður, t.a.m. var einungis einn valtari hér, kominn með hann, árið 1998. Síðan þá hefur þeim fjölgað, enda eru fyrirmæli um þá farnar að birtast í sérverklýsingum og útboðsgögnum.

Ávinningurinn við notkun búnaðarins er margþættur, fyrir utan að mæta nýjum kröfum, tryggir hann aukin gæði í verkum og um leið sparnað í tíma og peningum. Kostnaður þessarra tækja í valtarana er á bilinu 600.000 – 1.300.000 krónur, sem er ekki mikið miðað við hvað allur útbúnaður plötuprófsins og falllóðsins kostar eða kostaði upphaflega.

Framkvæmd þjöppumælinga með þjöppumæli í valtara og skráning gilda með skráningartæki krefst mikillar skipulagningar, ef vel skal að verki staðið. Sérstaklega í upphafi þegar þegar menn eru að læra á búnaðinn, átta sig á hvernig best skuli staðið að mælingum og eru að kvarða niðurstöður þess við þekktari próf. Þetta byrjunarferli getur verið tímafrekt og því þarf enn að bíða nokkuð, þar til aðferðin fær að njóta sín til fullnustu hérlendis.

Á næstu árum er því mikilvægt að menn reyni að tileinka sér aðferðina og séu duglegir að safna kvörðuðum niðurstöðum saman, með það í huga að útbúa reynslu- eða gagnabanka, sem gæti síðar orðið til þess að niðurstöður mætti túlka án kvörðunar. Til kvörðunar er án efa best að nota plötuprófið þar sem það gefur, líkt og þjöppunarmælarnir, niðurstöður sem hlutfallslegt gildi og hefur mikla uppsafnaða reynslu, sem mætti þá með tímanum yfirfæra á búnaðinn í völturunum. Ef þetta verður gert, kemur notkun þjöppumæla og skráningartækja í völturum til með að aukast á kostnað plötuprófsins, á komandi árum.

Heimildaskrá

Bækur og skýrslur

Alverk´95. (1995). *Almenn verklýsing fyrir vega og brúargerð.* Reykjavík: Vegagerðin.

Bomag. *Bomag Compaction Management System BCM 03*. Þýskaland: Bomag, United Dominion Company.

Bomag. *Bomag Compaction Q.A. on Rail and Airport Construction Projects*. Þýskaland: Bomag, United Dominion Company.

Bomag. *Bomag Terrameter BTM 05*. Þýskaland: Bomag, United Dominion Company.

Bomag. *Variocontrol*. Þýskaland: Bomag, United Dominion Company.

Bowles, Josep E. (1985). *Physical and Geotechnical Properties of Soils* (2. útgáfa). USA: McGraw-Hill Book Company.

Christensen, Ole Rahbek. *Comparing results from the Keros Prima 100 and from the traditional Plate bearing test equipment.* Keros Technology.

Coduto, Donald P. (1999). *Geotechnical Engineering – Principles and Practices.* New Jersey: Prentice-Hall, Inc.

Forssblad, Lars (1981). *Vibratory soil and rock fill compaction.* Svíþjóð: Dynapac Maskin AB.

Friðrik Þór Snæbjörnsson (1998). *Þjöppun og þjöppunarmælingar fyllinga og burðarlaga.* Lokaverkefni til B.Sc. prófs í Byggingartæknifræði.

Geodynamik. (2003) *CdsView – Computer Programme for the treatment and analysis of CDS data*. Þýskaland: Geodynamik AG.

German Specifications and regulations. *Surface Covering Dynamic Compaction Control Methods.*

Guðmundur Arason (2003). *Umhverfisskýrsla 2002*. Reykjavík: Vegagerðin.

Gunnar Bjarnason og Elísabet S. Urbancic. (1996). *Samanburður falllóðs og plötuprófs.* Reykjavík: BUSL-Burðarlaganefnd.

Hamm. *Applied Technology – Compaction in Earthwork and Asphalt*. Þýskaland: Hamm AG.

Hamm. *CDS Manual - Application Compaction Documentation System*. Þýskaland: Hamm AG.

Haraldur Sigursteinsson (1983). *Flokkun jarðefna og helstu próf á burðarlagsefnum.* Ráðstefna „Jarðefni til vega- og gatnagerðar“. Reykjavík: Mannvirkjajarðfræðafélag Íslands.

Hildebrand, Gregers og Baltzer, Susanne. (2003). *Statisk pladebelastning, faldlod og minifaldlod – Resultater af sammenlignende målinger.* Danmörk: Vejdirektoratet, Vejteknisk Institut.

Hreggviður Norðdahl (1992). *Hagnýt laus jarðlög á Íslandi.* Reykjavík: Rannsóknarstofnun Byggingariðnaðarins.

Hreinn Haraldsson (1983). *Jarðefni til vega- og gatnagerðar*. Ráðstefna: „Jarðefni til vega- og gatnagerðar“. Reykjavík: Mannvirkjajarðfræðifélag Íslands.

Ingunn Sæmundsdóttir (2002). *Forsaga staðlamála og staðan í dag & Kynning á Eurocode 7 og ÍST/DS 415*. Námskeið hjá EHÍ: „Grundun mannvirkja- nýjustu staðlar“. Reykjavík: ENSÍM (Endur- og símenntunarnefndir VFÍ, TFÍ og SV) og menntamálanefnd Arkitektafélags Íslands.

ÍST 15 (2002). *Grundun.* Reykjavík: Iðntæknistofnun Íslands.

Jón Skúlason (1993). *Plötupróf á þjappaðri fyllingu úr bögglabergi og sjávarmöl*. Reykjavík: Verkfræðingafélags Íslands, Árbók 1993.

Jón Skúlason (1986). *Vegagerð. Athuganir á plötuprófi*. Reykjavík: Almenna Verkfræðistofan.

KUAB. *KUAB´S analysis programs for fwd data – Users manual.* Notandahandbók fyrir reikniforrit falllóðs.

Oddur Sigurðssons (2001). *Þjöppun og þjöppumælingar*. Reykjavík: BUSL Ráðstefna 6. apríl 2001.

Oddur Sigurðssons (2002). *Proctor, þjöppunarpróf.* Kennsluefni í jarðtækniáfanga við Tækniháskóla Íslands.

Oddur Sigurðssons (2002). *Jarðtækni, Eiginleikar lausra jarðlaga.* Kennsluefni í jarðtækniáfanga við Tækniháskóla Íslands.

Rannsóknarstofnun Byggingariðnaðarins (1976). *Jarðvegsflokkunarkerfi.* Reykjavík: Rannsóknarstofnun Byggingariðnaðarins. Rb.(L_4).101.

Rannsóknarstofnun Byggingariðnaðarins (1980). *Grundun Húsa.* Reykjavík: Rannsóknarstofnun Byggingariðnaðarins. Rb.(L_4).102.

Rannsóknarstofnun Byggingariðnaðarins (1980). *Grundun Húsa - Dæmi.* Reykjavík: Rannsóknarstofnun Byggingariðnaðarins. Rb.(L_4).103.

Rannsóknarstofnun Byggingariðnaðarins (1989). *Plötupróf - til mælinga á þjöppun og burðarþoli jarðvegsfyllinga.* Reykjavík: Rannsóknarstofnun Byggingariðnaðarins. Rb.(L_4).104.

Rannsóknarstofnun Byggingariðnaðarins (1991). *Sandkeilupróf - til mælinga á þjöppun jarðvegsfyllinga.* Reykjavík: Rannsóknarstofnun Byggingariðnaðarins. Rb.(L_4).105.

Rump, Thomas. (1986). *Teknisk Ståbi* (18.útgáfa). Danmörk: Ingenioren boger, Ingenioren A/S.

Sérverklýsing (2004). *Nesbraut (49), færsla Hringbrautar*. Reykjavík: Vegagerðin

Terzaghi, Karl og Peck, Ralph B. (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice* (2.útgáfa). New York: John Wiley & sons.
Útboðslýsing (2004). *Hringvegur (1), Víkurvegur-Skarhólabraut 1.hefti* Reykjavík: Vegagerðin
Vegagerðin. (1985). *Stuttar leiðbeiningar um notkun Troxler 3411-B, ísótópamælis.* Reykjavík: Vegagerðin.
Viktor A. Ingólfsson (2004). *Framkvæmdafréttir 5.tbl. 12.árg. nr.362.* Reykjavík: Vegagerðin.
Whitlow, Roy. (1983). *Basic soil mechanics* (3.útgáfa). England: Longman Group Limited.
Þorleifur Einarsson (1991). *Myndun og mótun lands* (3.útgáfa). Reykjavík: Mál og menning.
Þórir Ingason og Bjarni Bessason. (1997). *Þjöppunarpróf fyrir burðarlög vega – Heimildakönnun.* Reykjavík: BUSL-Burðarlaganefnd.
Yoder og Witczak. (1975). *Principles of Pavement Degsign.* USA: John Wiley and Sons.
Örn og Örlygur. (1990). *Íslenska Alfræðiorðabókin* (2.útgáfa). Reykjavík: Örn og Örlygur.

Veraldarvefurinn og tölvupóstur

http://www.biblian.is
Heimasíða: Biblían á netinu

http://biosystems.okstate.edu/darcy/
Heimasíða: Henry Darcy and his law

http://www.bomag.com
Heimasíða: Bomag þjöppunartækja

http://www.dynapac.com
Heimasíða: Dynapac þjöppunartækja

http://www.hammag.com
Heimasíða: Hamm þjöppunartækja

http://www.hi.is/nam/jarverk/index.php
Heimasíða: Námskeiðsins „Jarð- og jarðeðlisfræði fyrir verkfræðinga“

http://www.merkur.is
Heimasíða: Fyrirtækisins Merkúr

http://62.242.229.98/fog/fwd/eufwd2004/presentations/presentations.htm
Gögn af ráðstefnu um vegagerð og viðhald vega sem haldin var í Danmörku

http://www.reglugerd.is/interpro/dkm/WebGuard.nsf/lookByNumer/1771992?OpenDocument
Byggingarreglugerð númer 177 frá 1992

http://www.vegagerdin.is
Heimasíða: Vegagerðarinnar

Haraldur Haraldsson (2004), (tölvupóstur 18.nóvember).

Haraldur Sigursteinsson (2004), (tölvupóstur 1.desember).

Myndaskrá

Mynd 1. Þrjár helstu berggrunnsmyndanir Íslands. 11
Mynd 2. Dæmi um algenga kornadreifingu efna úr jökulruðningi. 18
Mynd 3. Dæmi um kornadreifingu efnis úr jökuláraurum. 18
Mynd 4. Dæmi um kornadreifingu efnis úr áreyrum dragár. 19
Mynd 5. Dæmi um kornadreifingu skriðuefnis. 20
Mynd 6. Dæmi um kornadreifingu malarhjalla. 21
Mynd 7. Dæmi um kornadreifingu foksands. 21
Mynd 8. Steinefnanotkun á Íslandi 1998. 22
Mynd 9. Hlutfallsleg skipting náma á Íslandi eftir meginflokkum jarðmyndanna. 23
Mynd 10. Stærðarmörk jarðefnis samkvæmt evrópska flokkunarkerfinu. 27
Mynd 11. Þjálnikort. 28
Mynd 12. Þrjú einkennandi form á kornadreifingarlínum. 29
Mynd 13. Tæki Attenbergs og línurit til ákvörðunar flæðimarks jarðefna. 30
Mynd 14. Samband rúmmáls og þyngdar. 32
Mynd 15. Líking fyrir útreikningi á lektarstuðli. 39
Mynd 16. Spennuögn jarðvegs. 41
Mynd 17. Skilgreindar spennur í jarðefnisögn. 42
Mynd 18. Samband normalspennu (σ), póruþrýstings (u) og virkrar normalspennu (σ´) 43
Mynd 19. Normal- og skerstreitur jarðefnisagna. 43
Mynd 20. Skilgreining á Possions-hlutfalli. 44
Mynd 21. Gormur og vökvabulla til útskýringar á sigi. 46
Mynd 22. Eiginleikar helstu jarðvegsflokka. 49
Mynd 23. U.S.C.S. kerfið. 50
Mynd 24. Áhrifaþættir jarðefnisgerðar á þjöppun. 52
Mynd 25. Áhrif kornadreifingar á þjöppunarhæfni. 53
Mynd 26. Áhrif rakainnihalds á þjöppunareiginleika jarðefnis. 54
Mynd 27. Kraftayfirfæslur milli snertiflata jarðefniskorna. 55
Mynd 28. Áhrif tiringsþjöppunar á jarðefniskorn. 55
Mynd 29. Helstu kennistærðir titringsvaltara. 56
Mynd 30. Raka-þéttleika línurit 68
Mynd 31. Samband milli rúmþyngdaraukningar og nauðsynlegrar þjöppunarorku. 69
Mynd 32. Leiðréttingarlínurit á þurri rúmþyngd jarðefnis 70
Mynd 33. Skýringarmyndir af sandkeiluprófi. 73
Mynd 34. Skýringarmynd af vatnskeiluprófi. 74
Mynd 35. Skýringarmyndir af ísótópamælingum 76
Mynd 36. Plötupróf í framkvæmd. 78
Mynd 37. Niðurstöður plötuprófs dregnar upp á línurit sem sýnir sig sem fall af álagi. 79
Mynd 38. Valin gildi á S_1, S_2, P_1 og P_2 við útreikning á E_1 80
Mynd 39. Valin gildi á S_1, S_2, P_1 og P_2 við útreikning á E_2 80
Mynd 40. Spennudreifing í jarðefni undir hringlaga álagi 81
Mynd 41. Falllóðspróf í framkvæmd og skematísk mynd af því hvernig það vinnur. 83
Mynd 42. Algengt munstur falllóðsmælinga á vegkafla. 84
Mynd 43. Skýringarmynd af einföldustu gerð þjöppumælis. 88
Mynd 44. Samanburður á fjaðurmótstöðu (E_0) mismunandi mæliaðferða. 97
Mynd 45. Fylgni milli E_0 stuðla frá Prima 100 (y ás) og plötuprófi (x ás). 99
Mynd 46. Gildi á E_0 stuðlum aðferða. 99
Mynd 47. Em2 sem fall af E2 106

Mynd 48. Em2 sem fall af E2 106
Mynd 49. Em2 sem fall af E2 107
Mynd 50. Em2/Em1 sem fall af E2 /E1 107
Mynd 51. Em2/Em1 sem fall af E2 /E1 108
Mynd 52. Em2/Em1 sem fall af E2 /E1 108
Mynd 53. Ferlar þjöppunargildis þriggja yfirferða yfir sama svæðið. 115
Mynd 54. Kraftajafnvægi fyrir lóðrétt titrandi tromlu og orkufærsla. 116
Mynd 55. Algeng þjöppunargildi (Omega) frá þjöppumæli í Bomag valtara. 117
Mynd 56. Skráningartæki Hamm, CDS-012J. 119
Mynd 57. Þjöppunarskýrsla prentuð út beint frá skráningartæki. 120
Mynd 58. Útprentað þjöppunaryfirlit í formi línurits og súlurits frá Terrameter kerfinu. 122
Mynd 59. Skematísk mynd af BCM 03 þjöppumælingarkerfinu frá Bomag. 123
Mynd 60. Kvörðunarlínurit í forritinu CDSView 127
Mynd 61. Em2 sem fall af E2 fyrir allar nothæfar mælingar. 147

Töfluskrá

Tafla 1. Íslenskar storkubergstegundir. 10
Tafla 2. Helstu áfangar berggreiningar. 12
Tafla 3. Berggreining og gæðaflokkun korna lausra jarðlaga. 14
Tafla 4. Helsta notkun byggingarefna. 22
Tafla 5. Hæfni helstu setlagamyndana í framkvæmdir. 24
Tafla 6. Helstu eiginleikar byggingarefna. 25
Tafla 7. Náttúrulegt rakagildi íslenskra jarðefna. 33
Tafla 8. Rúmþyngd jarðefna. 37
Tafla 9. Rúmþyngd, holrými, holrýmistala og vatnsinnihald nokkurra jarðefna. 38
Tafla 10. Lektarstuðlar mismunandi jarðefna. 39
Tafla 11. Kornastærðarflokkun samkvæmt U.S.C.S. kerfi. 47
Tafla 12. Bókstafatákn jarðvegsflokkunarkerfis U.S.C.S. 48
Tafla 13. Helstu áhrifaþættir þjöppunar. 57
Tafla 14. Leiðbeinandi gildi á þyngd þjöppunartækis, lagþykkt o.fl. 61
Tafla 15. Leiðbeinandi gildi á þyngd þjöppunartækis, lagþykkt o.fl. 62
Tafla 16. Leiðbeinandi gildi á þyngd þjöppunartækis, lagþykkt o.fl. 63
Tafla 17. Helstu þjöppunarkröfur Alverks´95 og Rb blaða. 63
Tafla 18. Helstu stærðir „Standard Proctor“ og „Modified Proctor“ aðferða. 66
Tafla 19. Algengar alþjóðlegar kröfur á þjöppunargráðu. 69
Tafla 20. Niðurröðun mæliaðferða á vegkaflanum. 95
Tafla 21. Álagsmöguleikar hverrar aðferðar. 95
Tafla 22. Meðaltalsgildi og dreifing fjaðurmótstöðu í langsniðum B, C og D. 98
Tafla 23. Álagsforsendur plötuprófs og falllóðs í samanburðarmælingum. 101
Tafla 24. Þjöppunarkröfur fyllinga og burðarlaga í nýrri Hringbraut. 101
Tafla 25. Meðalgildi Emod stuðuls í falllóðsmælingum og hlutfallsleg aukning 104
Tafla 26. Niðurstöður mælinga ásamt meðalgildi og staðalfráviki. 105
Tafla 27. Áhrifsþættir þjöppunar 135
Tafla 28. Nokkrar upplýsingar um helstu aðferðir sem notaðar eru við þjöppunmælingar. 144

Formáli

Verkefni þetta er unnið sem lokaverkefni í byggingatæknifræði við Tækniháskóla Íslands á haustönn 2004. Verkefnið heitir **Jarðefni, þjöppun og samanburður aðferða við þjöppunarmælingar.**

Segja má að áhugi minn á jarðfræði hafi fæðst í jarðfræðiáföngum sem ég sótti í Menntaskólanum við Sund. Sá áhugi jókst síðan enn frekar í jarðtækniáföngum sem kenndir voru í byggingatæknifræði og lá því beinast við að lokaverkefnið mitt lægi einhverstaðar á þessu sviði. Hugmyndin að verkefninu er komin frá öðrum leiðbeinanda mínum, Haraldi Sigursteinssyni, sem starfar hjá Vegagerðinni.

Helsti tilgangur og kostur svona verkefnis er sá að mikil og góð þjálfun í sjálfstæðum og skipulögðum vinnubrögðum fæst út úr því. Við gerð þessa verkefnis hefur þekking mín á jarðvegsfræðum og grundunarmálum aukist umtalsvert og einnig skilningur minn á því hversu margþætt og flókin þessi fræði eru.

Við upplýsingaöflun til gerðar verkefnisins var leitað til ýmissa aðila og vil ég þakka öllum þeim sem veittu mér aðstoð við gerð þessa verkefnis kærlega fyrir. Mjög sérstakar þakkir fær konan mín, Björg Ragnheiður Pálsdóttir, fyrir mikla þolinmæði og ómetanlegan stuðning í gegnum allt námið og sérstaklega lokaverkefnið. Sérstakar þakkir fá svo leiðbeinendur mínir, Ingunn Sæmundsdóttir, deildarstjóri byggingardeildar við Tækniháskóla Íslands og fyrrnefndur, Haraldur Sigursteinsson, fyrir góða leiðsögn og úrvals ráð.

Reykjavík 8.desember 2004

_____

Benjamín Ingi Böðvarsson

„Næstum öll mannvirki eru grunduð á jarðvegi eða á bergi. Þau sem eru það ekki annað hvort fljúga, fljóta eða munu falla.“

(Richard L. Handy)

Efnisyfirlit

1. INNGANGUR 5

1.1 ALMENNT 5
1.2 MARKMIÐ VERKEFNIS 6

2. HELSTU NIÐURSTÖÐUR 7

3. JARÐVEGUR 8

3.1 ALMENNT UM JARÐVEG 9
3.2 BERGGRUNNUR ÍSLANDS 9
3.2.1 Almennt 9
3.2.2 Eiginleikar íslenskra bergtegunda 11
3.2.3 Berggreining 12
3.3 MYNDUN LAUSRA JARÐLAGA 14
3.3.1 Veðrun 14
3.3.2 Svörfun 15
3.3.3 Nýmyndun 15
3.3.4 Flutningur 16
3.3.5 Upphleðsla 16
3.3.6 Gerð lausra jarðlaga 17
3.3.7 Notkun lausra jarðlaga á Íslandi 21
3.4 JARÐTÆKNILEGIR EIGINLEIKAR JARÐEFNA 24
3.4.1 Rannsóknir á byggingarefnum 24
3.4.2 Kornastærðardreifing 26
3.4.3 Flæðimark 30
3.4.4 Þjálnimark 30
3.4.5 Þjálni 31
3.4.6 Rúmþyngd 31
3.4.7 Kornarúmþyngd 32
3.4.8 Rakagildi 33
3.4.9 Samband rúmþyngdar og raka 33
3.4.10 Glæðitap 38
3.5 VERKFRÆÐILEGIR EIGINLEIKAR JARÐEFNIS 38
3.5.1 Almennt 38
3.5.2 Lekt 38
3.5.3 Spennur og streitur í jarðefni 40
3.5.4 Skerstyrkur 44
3.5.5 Sig í jarðvegi 45
3.6 JARÐVEGSFLOKKUNARKERFI U.S.C.S. 47

4. ÞJÖPPUN JARÐEFNIS 51

4.1 TILGANGUR ÞJÖPPUNAR 51
4.2 ÁHRIFSÞÆTTIR ÞJÖPPUNAR 51
4.2.1 Jarðefnisgerð 51
4.2.2 Rakainnihald 54
4.2.3 Þjöppunaraðferð 54
4.2.4 Undirlag 56
4.2.5 Samantekt 57
4.3 STAÐLAR UM GRUNDUN OG JARÐTÆKNI 57
4.4 VERKLÝSINGAR FYRIR ÞJÖPPUN 59
4.4.1 Aðferðarverklýsing 59
4.4.2 Lokaárangursverklýsing 59
4.4.3 Aðferðar- og lokaárangursverklýsing 59
4.5 ÍSLENSKAR VERKLÝSINGAR 59
4.5.1 Alverk ´95 59
4.5.2 Rb blöð 62
4.5.3 Þjöppunarkröfur Alverks´95 og Rb blaða. 63

5. HELSTU MÆLIAÐFERÐIR Á ÞJÖPPUN 64

5.1 ALMENNT 64
5.2 KVÖRÐUNARPRÓF Á RANNSÓKNARSTOFU 65
5.2.1 „Proctor“ próf 65
5.2.2 Hristiborðspróf 70
5.3 RÚMÞYNGDARMÆLINGAR 72
5.3.1 Sandkeilupróf 72
5.3.2 Vatnsblöðrupróf 74
5.3.3 Sívalningsrúmmálsmæling 74
5.3.4 Ísótópamælingar 75

5.4 SIGMÆLINGAR ... 77
5.4.1 Plötupróf ... 77
5.4.2 Falllóðspróf (plötupróf með sveifluálagi) ... 82
5.4.3 Lítil falllóðspróf ... 85
5.4.4 Hallamæling ... 87
5.5 AÐRAR MÆLINGAR ... 88
5.5.1 Þjöppumælar í völturum ... 88
5.5.2 Prófvöltun ... 89
5.5.3 Þrýstimælir (pressometer) ... 89

6. SAMANBURÐUR Á PLÖTUPRÓFI OG FALLLÓÐSPRÓFI ... 89

6.1 INNGANGUR ... 89
6.2 ELDRI ÍSLENSKUR SAMANBURÐUR ... 90
6.2.1 Samanburður BUSL samstarfsins ... 90
6.3 ELDRI ERLENDIR SAMANBURÐIR ... 93
6.3.1 Samanburður dönsku Vegagerðarinnar ... 93
6.3.2 Samanburður Keros Technology ... 98
6.4 NÚVERANDI SAMANBURÐUR ... 100
6.4.1 Tilgangur ... 100
6.4.2 Tæki ... 100
6.4.3 Framkvæmd ... 100
6.4.4 Úrvinnsla ... 103
6.4.5 Niðurstöður mælinga ... 104
6.4.6 Samanburður á E_2 og E_{m2} ... 105
6.4.7 Samanburður á E_2/E_1 og E_{m2}/E_{m1} ... 107
6.4.8 Umræður ... 108
6.4.9 Samantekt ... 111

7. ÞJÖPPUMÆLAR Í VÖLTURUM ... 112

7.1 ÞJÖPPUMÆLAR Í VÖLTURUM ... 112
7.1.1 Almennt ... 112
7.1.2 Samfelld þjöppunarstjórnun ... 114
7.2 FRÆÐILEGUR GRUNNUR ... 116
7.3 SKRÁNINGARKERFI HAMM ... 118
7.3.1 CDS 012 J ... 118
7.4 SKRÁNINGARKERFI BOMAG ... 121
7.4.1 Terrameter BTM plus/BTM prof ... 121
7.4.2 BCM 03 ... 122
7.4.3 Variocontrol ... 125
7.5 KVÖRÐUN ÞJÖPPUMÆLA Í VÖLTURUM ... 126
7.5.1 Almennt ... 126
7.5.2 Áhrif jarðefna á kvörðun ... 127
7.5.3 Reynslubanki þjöppumæla í völturum ... 128
7.6 ÞJÖPPUMÆLAR Í VERKLÝSINGUM ... 129
7.6.1 Íslenskar verklýsingar ... 129
7.6.2 Erlendar verklýsingar ... 131

8. NIÐURSTÖÐUR ... 134

8.1 ALMENNT ... 134
8.2 JARÐEFNI ... 134
8.3 SAMANTEKT AÐFERÐA VIÐ ÞJÖPPUNARMÆLINGAR ... 136
8.3.1 „Proctor próf“ ... 136
8.3.2 Hristiborðspróf ... 137
8.3.3 Sandkeilupróf ... 138
8.3.4 Ísatópamælingar (Troxler) ... 139
8.3.5 Plötupróf ... 140
8.3.6 Falllóðspróf ... 141
8.3.7 Þjöppumælar í völturum ... 142
8.3.8 Samantekt helstu aðferða ... 143
8.4 SAMANBURÐUR PLÖTUPRÓFS OG FALLLÓÐSPRÓFS ... 144
8.4.1 Samanburður BUSL samstarfsins ... 144
8.4.2 Samanburður dönsku Vegagerðarinnar ... 145
8.4.3 Samanburður Keros Technology ... 145

8.4.4 Núverandi samanburður *146*
8.5 ÞJÖPPUMÆLAR Í VÖLTURUM 147
8.6 ÁLYKTANIR OG TILLÖGUR 150
HEIMILDASKRÁ 152
MYNDASKRÁ 156
TÖFLUSKRÁ 157