



Skúfstyrkur sendinna jarðefna

Samanburður CPT mælinga og tilraunastofuprófanna

Ástgeir Rúnar Sigmarsson



**Umhverfis- og
byggingarverkfræðideild
Háskóli Íslands
2015**

Skúfstyrkur sendinna jarðefna

Samanburður CPT mælinga og tilraunastofufrófanna

Ástgeir Rúnar Sigmarsson

30 eininga ritgerð sem er hluti af
Magister Scientiarum gráðu í Byggingarverkfræði

Leiðbeinandi
Dr. Sigurður Erlingsson, Háskóli Íslands

Prófdómari
Dr. Þorbjörg Sævarsdóttir, Efla

Umhverfis- og byggingarverkfræðideild
Verkfræði- og náttúruvísindasvið
Háskóli Íslands
Reykjavík, júní 2015

Skúfstyrkur sendinna jarðefna – Samanburður CPT mælinga og tilraunastofuprófanna
Í þessu verkefni verður farið yfir hvernig efniseiginleikar íslenskra jarðefna er ákvarðaður
út frá niðurstöðum CPT mælinga og hvort reynslujöfnur gefi rétta mynd af eiginleikum
íslenskra jarðefna.

30 eininga ritgerð sem er hluti af *Magister Scientiarum* gráðu í Umhverfis- og
byggingaverkfræði

Höfundarréttur © 2015 Ástgeir Rúnar Sigmarsson
Öll réttindi áskilin

Umhverfis- og byggingarverkfræðideild
Verkfræði- og náttúruvísindasvið
Háskóli Íslands
Hjarðarhagi 2-6
107 Reykjavík

Sími: 525 4600

Skráningarupplýsingar:

Ástgeir Rúnar Sigmarsson, 2015, *Skúfstyrkur sendinna jarðefna – Samanburður CPT
mælinga og tilraunastofuprófanna*, meistararitgerð, Umhverfis- og
byggingarverkfræðideild, Háskóli Íslands, 58 bls.

Prentun: Háskólaprent
Reykjavík, júní 2015

Útdráttur

Skúfstyrkur er einn af grunnefniseiginleikum lausra jarðefna og segir hann til um burð viðkomandi jarðvegs. Mat á skúfstyrk er því nauðsynlegt í tengslum við mannvirkjagerð í eða úr jarðvegi. Á Íslandi eru flest laus jarðlög gróf, þ.e. sendin eða malarkennd. Samloðun þeirra er því lítil. Skúfstyrkur slíkra jarðefna er að jafnaði ákvarðaður á tilraunastofu, t.d. í skúfboxprófi eða þríasaprófi. Helstu kostir slíkra prófanna er að ákvörðunin er gerð við vel skilgreind skilyrði og viðkomandi efniseiginleiki er ákvarðaður beint. Á móti kemur er að sýnið sem notað er til ávörðunarinnar er hreyft og því endurbyggt í tilraunastofunni með það að markmiði að endurskapa ástand það sem ríkir á upprunastaðnum. Slíkt er vandasant og ekki sjálfgefið að það takist. Í seinni tíð hefur færst í vöxt að ákvarða efniseiginleika jarðefna í feltprófunum með CPT próf(Cone Penetration Test). Kostur prófunarinnar er að ákvörðunin er gerð við raunaðstæður sem ríkja í felti. Hins vegar er ákvörðunin óbein og þarf að beita reynslulíkingum til að ákvarða skúfstyrkinn.

Í verkefninu er skúfstyrkur, ódreneraður skúfstyrkur og viðnámshorn jarðefna metin með tilraunastofuprófum. Þau próf sem skoðuð eru í þessu verkefni eru skúfbox, kónpróf og þríasapróf. Út frá skúfboxi og þríasaprófi má svo áætla viðnámshorn jarðefnisins og út frá kónprófi má áætla ódreneraðan skúfstyrk. Til samanburðar verða gögn frá CPT prófum túlkuð og borin saman við niðurstöður tilrauna og þar með áætlað hvort reynslujöfnur fyrir CPT aðferðina henti fyrir íslensk jarðefni.

Í þessu verkefni verða þrjár ákvörðunarstaðir skoðaðir, með mismunandi jarðefni, á hverjum stað fyrir sig eru líka ólíkar framkvæmdir og eru framkvæmdunum annaðhvort lokið eða eru á stefnuskráni. Allir staðirnir eiga það sameiginlegt að á staðnum hefur farið fram borun CPT tilraunaholu.

Með samanburði milli feltnælinga og tilraunastofuprófananna fæst að reynslujafna Kulhawy og Mayne var að gefa besta samanburðinn, á meðan niðurstaða annarra aðferða var að það þyrfti að endurskoða jöfnurnar. Dreifing í niðurstöðunum er þó nokkur sem getur verið til komin vegna óvissu um hversu vel hafi tekist við að endurskapa raunaðstæður í felti. Hér er einungis um þrjá staði að ræða og æskilegt að fjölga mælistöðunum til að afla betri vitneskju um áreiðanleika reynslulíkinganna.

Í kónprófinu var ekki gert nægjanlega miklar rannsóknir til að styðjast við þar sem engin óhreyfð sýni voru til staðar. Samt sem áður var sýnt fram á að þörfin á að skoða efniseiginleikan ódreneraðan skúfstyrk er þó nokkur en til þess þarf að fá óhreyfð sýni til meðhöndlunar.

Abstract

Shear strength is a fundamental property in soils. That is the reason why this property is normally examined in connection with construction made with or in soils, there may preferably include infrastructure. In Iceland the soils are mainly sandy and gravelly. The cohesion is then normally low. Many tests were done, both in laboratory and in situ and was it the main goal of this thesis to compare the different type of soil tests which gives us estimated values for the ground materials. The main different in between these two methods of testing is that, the soil tested in laboratory has to be built up to simulate the in situ conditions of the soil, while tests in situ is tested on the untouched soil, where the soil is in its natural form. In this thesis the focus is on shear strength, undrained shear strength and friction angle of ground materials and they are estimated with several different tests. The tests that were examined are shear box test, fall cone test and triaxial test. From the shear box test and triaxial test results the friction angle is estimated and from the fall cone test the undrained shear strength is estimated. The estimated results were then compared to results from CPT (Cone Penetration Test). From those result we can make the assumption if the equations that are used to estimate the material properties of the soil for CPT works for Icelandic ground material.

In this thesis three locations in Iceland were explored, each with different ground material. In each of these locations there is a future construction site or constructions are finished. In all of these locations there has been done CPT drilling.

The results for the material properties of friction angle showed that one method, based on the Kulhawy and Mayne equation, was giving the best comparison, while the outcome of other methods was that the equations were recommended to be revised. Only three locations were examined, so it would be recommended to get results from more locations to examine the comparison of these equations.

For the fall cone test there were not done sufficiently amount of studies, since no undisturbed samples were available. It has been demonstrated that it is needed to do a study on the undrained shear strength is considerable, but it needs to get undisturbed samples for testing.

Efnisyfirlit

Útdráttur	i
Abstract.....	ii
Myndir	v
Töflur.....	vii
Breytur.....	ix
1 Inngangur.....	1
2 Efniseiginleikar jarðefna.....	3
2.1 Kornakúrfa og flokkun jarðefna.....	4
2.2 Skúfstyrkur.....	5
2.3 Viðnámshorn.....	6
2.4 Ódreneraður skúfstyrkur	7
3 Ákvörðun á efniseiginleikum	9
3.1 Á tilraunastofu	9
3.1.1 Kónpróf.....	9
3.1.2 Skúfboxpróf.....	10
3.1.3 Þríasapróf.....	12
3.2 Úti í mörkinni.....	14
3.2.1 Cone Penetration Test (CPT).....	14
3.2.2 Standard Penetration Test (SPT)	18
3.3 Spájöfnur um efniseiginleika út frá CPT	18
3.3.1 Spájöfnur viðnámshorns	19
3.3.2 Spájöfnur ódreneraðs skúfstyrks	21
3.3.3 Flokkun jarðefna með CPT mælingum	22
4 Ákvörðunarstaðir	23
4.1 Hornafjarðarfljót	24
4.2 Landeyjarhöfn.....	25
4.3 Óseyrartangi.....	26
5 Niðurstöður prófana.....	27
5.1 Cone Penetration Test (CPT).....	27
5.1.1 Hornafjarðarfljót.....	27
5.1.2 Landeyjarhöfn.....	28
5.1.3 Óseyrartangi.....	29

5.2	Skúfboxpróf.....	30
5.2.1	Hornafjarðarfljót.....	30
5.2.2	Landeyjarhöfn	31
5.2.3	Óseyrartangi	32
5.3	Kónpróf.....	34
5.4	Flokkun jarðefna.....	35
5.4.1	Hornafjarðarfljót.....	35
5.4.2	Landeyjarhöfn	38
5.4.3	Óseyrartangi	39
6	Samanburður CPT prófa við önnur próf	43
6.1	Viðnámshorn	43
6.2	Ódreneraður skúfkraftur	45
6.3	Túlkun á niðurstöðum.....	47
7	Samantekt.....	49
	Heimildaskrá	51
	Viðauki A	53
	Viðauki B	55
	Viðauki C	57

Myndir

Mynd 1: Virkni skúfkrafta í jarðefnum (Slideshare, án dags.).....	5
Mynd 2: Mohr-Coulomb brotmörk (Das, 2010).....	5
Mynd 3: Myndun viðnámshorns í jarðefna keilu (Johnson, 2008).....	6
Mynd 4: Mohr hringir notaðir til að finna ódreneraðan skúfstyrk jarðefnis (Das, 2010).....	7
Mynd 5: Búnaður kónprófs.....	9
Mynd 6: Einföld uppsetning af skúfboxi með mælinemum (Bardet, 1997).....	10
Mynd 7: Skúfbox saman set og sundur tekið.	11
Mynd 8: Dæmigerðar niðurstöður úr skúfboxprófi (t.v) skúf álag sem fall af færslu og (t.h) breyting í hæð sýnis sem fall af færslu (Das, 2010)	11
Mynd 9: Dæmigerðar niðurstöður fyrir viðnámshorn (Das, 2010)	12
Mynd 10: Virkni spennu á jarðefnasýni (Das, 2010).	12
Mynd 11: Búnaður þríasaprófs.	13
Mynd 12: Dæmigerðar niðurstöður úr þríasaprófi fyrir mismunandi þjöppun (Das, 2010). Niðurstöðurnar eiga við CD próf.....	13
Mynd 13: Niðurstöður þríasaprófs notaðar til að ákvarða viðnámshorna jarðefna (Das, 2010)	14
Mynd 14: Uppbygging CPT búnaðar.	15
Mynd 15: Memocone II frá Envi sem var notaður við CPT prófanir Vegagerðarinnar (Envi, 2013)	16
Mynd 16: Borvagn vegagerðarinnar (Haraldur Sigursteinsson et al., 2015).....	16
Mynd 17: Dæmigerðar niðurstöður CPT prófana.....	17
Mynd 18: Uppbygging SPT búnaðar (Khan, án dags).	18
Mynd 19: Graf fyrir viðnámshorns reynslujöfnu skv. Kulhawy og Mayne	19
Mynd 20: Gröf fyrir viðnámshorns reynslujöfnu skv. Robertson og Campanella	20
Mynd 21: Gröf fyrir endurbætta viðnámshorns reynslujöfnu skv. Mayne.....	21
Mynd 22: Flokkunar aðferð byggð á niðurstöðum úr CPT mælingum (Robertson & Cabal, 2010).....	22
Mynd 23: Staðsetningar ákvörðunarstaða	23
Mynd 24: Fyrirhuguð veglína yfir Hornafjarðarfljót og staðsetning prófhola.	24
Mynd 25: Staðsetning á CPT tilraunarholum við Landeyjarhöfn.	25
Mynd 26: Staðsetning svæðis þar sem CPT tilraunaholur voru gerðar við Óseyrartanga. ..	26
Mynd 27: CPT mæligögn úr mæliholu 13600.....	27
Mynd 28: CPT mæligögn úr mæliholu 5373.....	28
Mynd 29: CPT-mæligögn úr mæliholu 4515	29
Mynd 30: Niðurstöður skúfboxprófs fyrir hólksýni CPT-6860-4, dýpt 3,7-4,4 m.....	30
Mynd 31: Niðurstöður skúfboxprófs, sýni er þjappað vel við lágt rakastig.	31
Mynd 32: Niðurstöður skúfboxprófs, sýni er þjappað vel við hátt rakastig.	31
Mynd 33: Niðurstöður skúfboxprófs, sýni er þjappað vel við lágt rakastig.	32
Mynd 34: Niðurstöður skúfboxprófs, sýni er þjappað lítið við lágt rakastig.	33
Mynd 35: Niðurstöður skúfboxprófs, sýni er þjappað vel við hátt rakastig.	33
Mynd 36: Flokkun jarðefna út frá CPT mælingu úr holu 6860.....	35
Mynd 37: Kornakúrfur fyrir öll hólksýni CPT-6860.....	35
Mynd 38: Flokkun jarðefna út frá CPT mælingu úr holu 13600.....	37

Mynd 39: Kornakúrfur fyrir öll hólksýni CPT-13600.	37
Mynd 40: Flokkun jarðefna út frá CPT mælingu úr holu 5373.	38
Mynd 41: Kornakúrfa jarðefnasýna frá Landeyjarhöfn.	39
Mynd 42: Flokkun jarðefna út frá CPT mælingu úr holu 4515.	40
Mynd 43: Kornakúrfur fyrir sýni frá Óseyratanga.	40
Mynd 44: CPT niðurstöður bornar saman við viðnámshorns reynslujöfnu Kulhawy og Mayne.	43
Mynd 45: CPT niðurstöður bornar saman við viðnámshorns reynslujöfnu Robertson og Campenella.	44
Mynd 46: CPT niðurstöður bornar við endurbætta viðnámshorns reynslujöfnu Mayne.	45
Mynd 47: Ódreneraður skúfstyrkur í jarðlögum CPT borholu 6860.	46
Mynd 48: Ódreneraður skúfstyrkur í jarðlögum CPT borholu 13600.	46
Mynd 49: Flokkun jarðefna út frá CPT mælingu úr holum 5371 (t.v.) og 5376 (t.h.).	53
Mynd 50: Flokkun jarðefna út frá CPT mælingu úr holum 4509 (t.v.) og 4512 (t.h.).	53
Mynd 51: CPT mæligögn úr mæliholu 6860.	55
Mynd 52: CPT mæligögn úr mæliholu 5371.	55
Mynd 53: CPT mæligögn úr mæliholu 5376.	56
Mynd 54: CPT mæligögn úr mæliholu 4509.	56
Mynd 55: CPT mæligögn úr mæliholu 4512.	56
Mynd 56: Fínefnagreiningu bætt við enda kornakúrfu úr hólksýni CPT-6860-2.	57
Mynd 57: Fínefnagreiningu bætt við enda kornakúrfu úr hólksýni CPT-6860-3.	57
Mynd 58: Fínefnagreiningu bætt við enda kornakúrfu úr hólksýni CPT-13600-3.	58

Töflur

Tafla 1: USCS flokkun jarðefna (Das, 2010)	4
Tafla 2: Algeng gildi fyrir viðnámshorn (Das, 2010).....	7
Tafla 3: Algeng gildi fyrir ódreneraðan skúfstyrk jarðefna (Pile info: Geoforum, 2009).....	8
Tafla 4: Helstu stærðir úr CPT mælingum frá Hornafjarðarfljóti	28
Tafla 5: Helstu stærðir úr CPT mælingum frá Landeyjarhöfn.	28
Tafla 6: Helstu stærðir úr CPT mælingum frá Óseyrartanga.	29
Tafla 7: Niðurstöðustærðir skúfboxprófs fyrir hólksýni CPT-6860-4 dýpt 3,7-4,4m.....	30
Tafla 8: Niðurstöðustærðir skúfboxprófs, sýni er þjappað vel við lágt rakastig.	31
Tafla 9: Niðurstöðustærðir skúfboxprófs, sýni er þjappað vel við hátt rakastig.	32
Tafla 10: Niðurstöðustærðir skúfboxprófs, sýni er þjappað vel við lágt rakastig.	32
Tafla 11: Niðurstöðustærðir skúfboxprófs, sýni er þjappað lítið við lágt rakastig.....	33
Tafla 12: Niðurstöðustærðir skúfboxprófs, sýni er þjappað vel við hátt rakastig	34
Tafla 13: Niðurstöður kónprófs fyrir hólksýni 2,8-3,5 borholu 6860.	34
Tafla 14: Niðurstöður kónprófs fyrir hólksýni 4,1-4,8 borholu 13600.	34
Tafla 15: Niðurstöður kornakúrfugreiningar á sýnum CPT-6860.....	36
Tafla 16: Niðurstöður CPT flokkunar á sýnum CPT-6860.	36
Tafla 17: Niðurstöður kornakúrfugreiningar á sýnum CPT-13600.....	38
Tafla 18: Niðurstöður CPT flokkunar á sýnum CPT-13600.	38
Tafla 19: Niðurstöður kornakúrfugreiningar á sýnum frá Landeyjarhöfn.....	39
Tafla 20: Niðurstöður CPT flokkunar frá Landeyjarhöfn.	39
Tafla 21: Niðurstöður kornakúrfugreiningar á sýnum frá Óseyrartanga.....	40
Tafla 22: Niðurstöður CPT flokkunar frá Óseyrartanga.....	41
Tafla 23: Sundurliðun CPT borhola.	43

Breytur

A_c :	Yfirborðsflatarmál keilu
A_s :	Yfirborðsflatarmál hulsu
B_q :	Póruþrýstingshlutfall
C_c :	Ákvörðunarstuðull gæða jarðefna
C_u :	Ákvörðunarstuðull gæða jarðefna
D_{10} :	Kornastærð 10% marka jarðefnis
D_{30} :	Kornastærð 30% marka jarðefnis
D_{60} :	Kornastærð 60% marka jarðefnis
F_s :	Núningskraftur sem verkar á hulsu
$N_{\Delta u}$:	Einingalaust gildi ákvarðað út frá eðli og póruþrýstingshlutfalli jarðefnis
N_{kt} :	Einingalaust gildi ákvarðað út frá eðli jarðefnis
Q_c :	Kraftur sem verkar á keilu
Q_{tn} :	Normal keilumótstaða
R_f :	Núningshlutfall
a :	Leiðréttingarstuðull vegna lektar jarðefnis
c' :	Samloðun
c_u :	Ódreneraður skúfstyrkur
f_s :	Viðnám við hulsu
n :	Spennu stuðull ákvarðast út frá eðli jarðefnis(Sandur: $n=0,5$ og silti $n=1$)
q_c :	Keilumótstaða
q_t :	Keilumótstaða leiðrétt fyrir vatnsþrýsting
u_0 :	Áætlaður vatnsþrýstingur
u_2 :	Vatnsþrýstingur
σ'_{v0} :	Virk spennna
σ' :	Normalspenna
σ_1 :	Stærsta höfuðspenna
σ_3 :	Minnsta höfuðspenna
σ_{atm} :	Loftþrýstingur
σ_{v0} :	Normalspenna
τ_f :	Skúfstyrkur
φ' :	Viðnámshorn

Þakkir

Ég vil þakka þeim fjöl mörgu aðilum sem veitu aðstoð við gerð þessa verkefnis á einn eða annan hátt. Sérstakar þakkir fá Vegagerðin og Nýsköpunarmiðstöð Íslands, þá sérstaklega vil ég þakka Haraldi Sigursteinssyni hjá Vegagerðinni fyrir að veita góðan aðgang að gögnum, ásamt ýmsum leiðbeiningum sem snertu verkefnið, og þeim Hafsteini Hilmarsyni og Oddi Þórðarsyni hjá Nýsköpunarmiðstöð Íslands fyrir aðgang og leiðbeiningar að mælitækjum. Einnig vil ég koma fram þökkum til Björns Jóhanns Björnssonar fyrir þau gögn sem hann veiti mér til vinnslu fyrir verkefnið. Enn fremur vil ég koma fram þökkum til leiðbeinanda mínum Sigurði Erlingssyni fyrir þá leiðsögn sem hann veitti mér við gerð þessa verkefnis.

1 Inngangur

Jarðefni eru mikilvægur þáttur í mannvirkjagerð, ólíkir efniseiginleikar gefur jarðefnum þá mögulegu nýtingu sem jarðefnið býður uppá. Til að ákvarða þessa efniseiginleika eru til fjöldi prófa bæði framkvæmd á tilraunastofu og úti í felti. Hvort sem próf er framkvæmt á tilraunastofu eða úti í felti hefur ekki mikil áhrif á nákvæmni prófana, helsti munurinn er háður prófsýninu, þar sem jarðefni sem prófað er á tilraunastofu kemur allajafna hreyft á tilraunastofuna og hefur því glatað ákveðnum eiginleikum sem þarf að byggja upp aftur til að líkja eftir aðstæðum úti í felti. Próf sem framkvæmd eru úti í felti gefa nákvæma mynd af þeim aðstæðum sem eru til staðar á prófstað, hins vegar eru umhverfisaðstæður ekki eins vel þekktar

Fjölmargar reynslujöfnur hafa verið þróaðar til að meðhöndla hráar niðurstöður prófa úti í felti til að ákvarða efniseiginleika jarðefnanna. En eru þessar reynslujöfnur að gefa raunhæf gildi fyrir efniseiginleika íslenskra jarðefna eða þarf að aðlaga þær að íslenskum aðstæðum.

Markmið þessa verkefnis er að bera saman þær aðferðir sem notaðar eru til að ákvarða efniseiginleika jarðefna á tilraunastofu við þau próf sem gerð eru úti í felti. Efniseiginleikarnir sem eru sérstaklega skoðaðir í verkefninu eru skúfstyrkur, viðnámshorn og ódreneraður skúfstyrkur. Þær upplýsingar eru svo bornar saman við þær reynslujöfnur sem hafa verið settar fram.

Það feltróf sem skoðað er í þessu verkefni er CPT próf. CPT stendur fyrir cone penetration test. Aðferðin og búnaðurinn í stöðugri þróun og verður betri og nákvæmari eftir því sem meiri reynsla hefur komið á hana. Keyrsla búnaðarins fer þannig fram að mælitækjunum(keilu) er þrýst ofaní jarðlögin með sérstökum borvagni og upplýsingum um efniseiginleika safnað með dýpi

Valin voru CPT gögn frá þremur stöðum á Íslandi þar sem sýni voru tekin til að skoða með samanburðaraðferðum. Staðirnir sem urðu fyrir valinu voru við Hornafjarðarfljót, Landeyjarhöfn og Óseyrartanga. Ástæðan fyrir staðarvalinu var að á stöðunum var að það hafa verið gerðar CPT prófanir á. Á sýnunum voru síðan gerðar á tilraunastofu skúfbox-prófanir til að ákvarða viðnámshorn jarðefnanna, einnig voru gerð kónpróf á siltkenndari jarðefnasýnunum frá Hornafjarðarfljóti til að ákvarða ódreneraðan skúfstyrk jarðefnisins. Þá var notast við niðurstöður úr eldri þríasaprófum sem gerð höfðu verið. Við samanburðinn verður svo lagt mat á þær reynslujöfnur sem notaðar voru og hvort þær henti fyrir íslensk jarðefni.

Það getur þó reynst erfitt að ákvarða efniseiginleika jarðefna nákvæmlega og hafa allar aðferðir og próf sína kosti og galla, var það því hluti af þessu verkefni að skoða þann mun sem er á milli aðferða, hvort sem það sé á tilraunastofu eða úti í felti, og athuga hvaða aðferð hentar.

2 Efniseiginleikar jarðefna

Jarðefnin í kringum okkur hafa ólíka eiginleika sem má rekja til uppruna, kornadreifingu, uppbyggingu og rakastigi. Jarðefni eru mikið notuð í alla mannvirkjagerða og því er mikilvægt að vita efniseiginleika þeirra. Þegar efniseiginleikarnir eru skoðaðir er verið að finna þau einkenni jarðefnisins sem þurfa að vera þekkt til nýtingar í tilteknum byggingarluta mannvirkis og hentar ekkert eitt jarðefni best í alla mannvirkjagerð. Þar má dæmi taka um að ekki er notað sama efni í sjóvarnagarða og í undirlag vega eða jafnvel fylliefni í steypu. Alltaf er verið að leita besta efninu fyrir hvern verkþátt sem uppfyllir þær kröfur sem þarf til.

Fyrsta skrefið í leit að öðrum efniseiginleikum er flokkun á jarðefninu. Flokkunin ein getur sagt ótalmargt um jarðefnið, t.a.m. er hægt að ákvarða út frá flokkun hvaða efniseiginleika væri ráðlagt að skoða, einnig er hægt að ákvarða út frá flokkun í hvaða mannvirkjagerð jarðefnið hentar best.

Ákvörðun á skúfstyrkur jarðefna er megin efni þessa verkefnis. Skúfstyrkur getur komið fram á tvenns konar formi í mannvirkjagerð. Ef álagið byggist snögg upp í jarðefninu og vatnsþrýstingur byggist upp er það ódreneraður skúfstyrkur sem lýsir burði jarðefnisins. Ef jarðefnið fær hinsvegar tíma til að jafna út vatnsþrýsting sinn er það dreneraður skúfstyrkur sem lýsir burði jarðefnisins. Þegar talað er um tíma fyrir jarðefnið til að jafna út vatnsþrýsting er ekki verið að tala um fasta tímasetningu heldur ólíkan tíma fyrir hvert og eitt jarðefni. Lektareiginleikar jarðefnisins skipta þar meginmáli. Fínefnarík jarðefni drenerast að jafnaði hægar en þau fínefnasauðu.

Það er þó ekki alltaf auðvelt að ákvarða efniseiginleika jarðefna með þeim prófum sem til eru, þó sérstaklega prófum á tilraunastofum. Alla jafna koma sýni hreyfð á tilraunastofu sem er mjög óhentugt ef nota á jarðefnið við þær aðstæður sem eru til staðar á verkstað. Þá þarf að byggja upp sýnið til að líkja sem mest eftir uppbyggingu þess úti í folti og því má áætla að gildi sem fást séu viðmið en ekki algild. Þessi galli á ekki við prófanir sem gerðar eru úti í folti þar sem mæligögnum er safnað við raunaðstæður.

2.1 Kornakúrfa og flokkun jarðefna

Jarðefni eru gjarnan flokkuð út frá kornakúrfu þeirra. Kornakúrfan gefur ekki beint mat á efniseiginleika jarðefnisins. Kornakúrfur er mjög einfalt próf sem gefur ákveðnar vísbendingar um efniseiginleikana og því er hún gjarnan eitt það fyrsta sem gert er til að kanna efniseiginleika jarðefna.

Aðferðir til samanburðar við flokkun jarðefna út frá niðurstöðum CPT gagna eru ekki jafn nákvæmar og gefa ekki jafn mikið af niðurstöðum, þar sem jarðefnasýni sem eru tekin til skoðunar blandast áður en farið er í mælingar. Samanburðaraðferðir geta þó gefið ákveðið meðalgildi af þeim gildum sem fást með CPT mælingunum.

Flokkun á jarðefnum er yfirleitt gerð út frá USCS flokkunaraðferðinni sem stendur fyrir Unified Soil Classification System. Uppbyggingu aðferðarinnar má sjá í töflu 1.

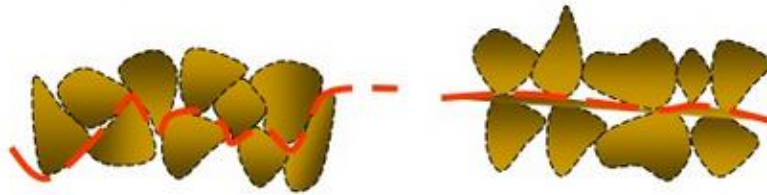
Tafla 1: USCS flokkun jarðefna (Das, 2010)

Jarðefnategund		Heiti	Tákn flokks		
Gróf korna efni: Minna en 50% sáldursins smýgur í gegnum möskvastærð 0,063mm	Möl: <50% sáldursins smýgur í gegnum möskvastærð 2mm	Hrein mól: <5% smýgur í gegnum möskvastærð 0,063	Möl með góða kornakúrfu Möl með slæma kornakúrfu	GW GP	
		Möl: >12% fínefna	Siltrík mól Leirkennd mól	GM GC	
	Sandur: ≥50% sáldursins smýgur í gegnum möskvastærð 2mm	Hreinn sandur: <5% smýgur í gegnum möskvastærð 0,063	Sandur með góða kornakúrfu Sandur með slæma kornakúrfu	SW SP	
		Sandur: >12% fínefna	Siltríkur sandur Leirkenndur sandur	SM SC	
	Fínefni: Meira en 50% sáldursins smýgur í gegnum möskvastærð 0,063mm	Silti og leir: Liquid limit < 50%	Ólífrænt	Silti Leir	ML CL
			Lífrænt	Lífrænt silti eða leir	OL
Silti og leir: Liquid limit ≥ 50%		Ólífrænt	Silti með mikla þjálmi Leir með mikla þjálmi	MH CH	
		Lífrænt	Lífrænt silti eða leir	OH	
Lífrænn jarðvegur		Peat	Pt		

2.2 Skúfstyrkur

Skúfstyrkur jarðefna má skilgreina sem innra þol jarðefnisins til koma í veg fyrir að brestur verði í því og hliðrun eigi sér stað. Á mynd 1 má sjá hvernig virkni skúfkrafta verka í jarðefnum. Skúfstyrk jarðefna má rekja til þriggja grunnþátta (Cernica, 1995):

1. Núningsmótstaða við hliðrun milli tveggja fastra korna.
2. Samheldni og viðloðun milli tveggja korna.
3. Læsing og brúun fastra korna vegna formbreytinga.

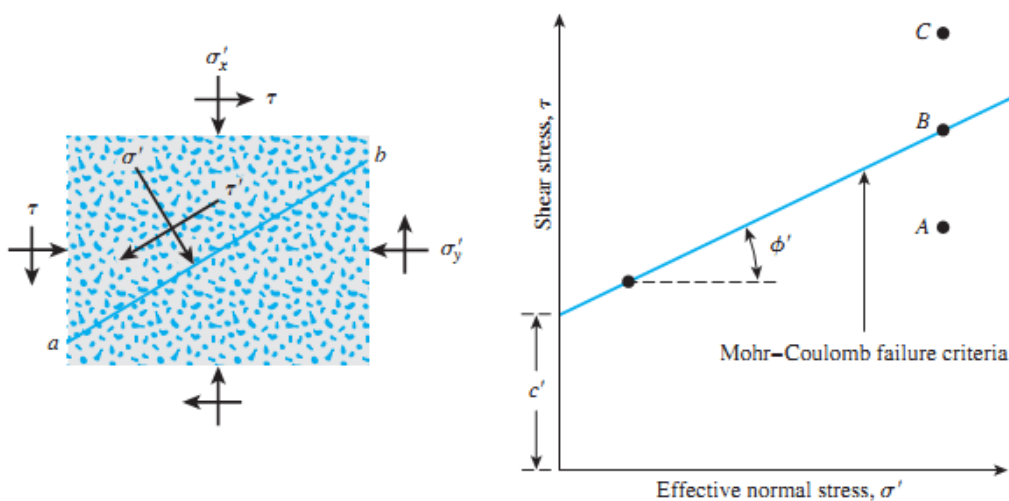


Mynd 1: Virkni skúfkrafta í jarðefnum (Slideshare, án dags.)

Ákvörðun á skúfstyrk jarðefnis er mjög mikilvæg í framkvæmdum og mjög lítið hlutfall mannvirkjaframkvæmda er ekki tengt skúfstyrk jarðefna á einhvern hátt. Mörg verkefni eru háð vitneskju um skúfstyrk jarðefnisins, en þar má til að mynda nefna (Feng, 1991):

- Burður jarðefnis.
- Stöðugleiki jarðefna í halla, notað við uppbyggingu á stíflum.
- Skúfbinding jarðefnis við súluundirstöður.
- Láréttur þrýstingur frá jarðefnum á veggjum sem skorða hreyfingu hans

Christian Otto Mohr setti fram kenningu fyrir brot í jarðefnum í kringum aldamótin 1900, sem var almennt form á kenningu sem kom fram í ritgerð Charles-Augustin de Coulomb árið 1773, en þar er sagt að brot í jarðefnum verði við mikilvægt samspil milli normalspennu og skúfspennu (Das, 2010). Á mynd 2 má sjá tengsl normal- og skúfspennu.



Mynd 2: Mohr-Coulomb brotmörk (Das, 2010)

Fræðileg tengsl milli normalspennu(σ) og skúfspennu(τ) má setja fram samkvæmt kenningunni eins og eftirfarandi jafna sýnir:

$$\tau_f = f(\sigma) \quad (2-3)$$

Brotmörkin sem eru skilgreind með jöfnunni hér á undan er að alla jafna kúrfa. Fyrir flest jarðtækniverkefni er nægjanleg nákvæmni að skilgreina skúfstyrkinn á brotferlinum sem línulegan feril af normalspennu. Jöfnuna má sjá hér fyrir neðan (Azizi, 2000).

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \quad (2-4)$$

Þar sem:

c : Samloðun

φ : Viðnámshorn

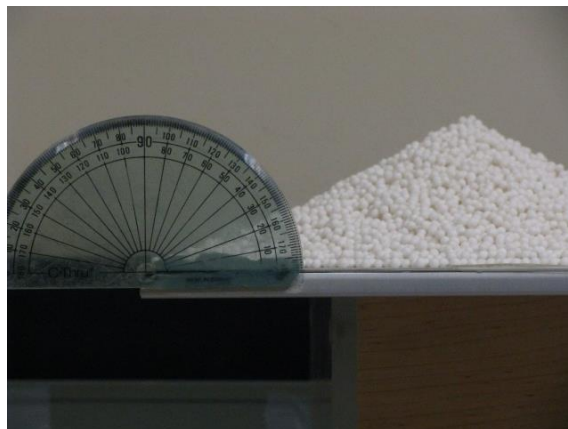
σ : Normalspenna eftir brotplaninu

τ_f : Skúfstyrkur

Ef jarðefnissýnið sem er skoðað er sandríkt eða ólífrænt silti er samloðun alla jafna lág og má því ganga út frá að $c' = 0$ og þar að auki má áætla að samloðun fyrir normal-konsólíðeráðan leir sé um það bil núll. Betur verður farið yfir samloðun í kafla 2.4 um ódreneraðan skúfstyrk.

2.3 Viðnámshorn

Viðnámshorn er einn af þeim efniseiginleikum jarðefna sem skúfstyrkurinn er háður. Út frá viðnámshorni jarðefnis er hægt að áætla skúfstyrks aukninguna með dýpi. Best er að útskýra viðnámshorn út frá mynd 3, en þar hefur jarðefni verið hellt í keilulaga haug og út frá því myndast horn sem má áætla að sé viðnámshorn jarðefnisins. Viðnámshorn er það horn þar sem jarðefnið nær jafnvægi í og skúfbinding milli korna í jarðefninu jafngilda þeim krafti sem verkar á þau. Viðnámshorn er mjög breytilegt eftir jarðefnum þar sem grófari efni mynda alla jafna hærra viðnámshorn en fínefni. Lögum korna hefur áhrif á skúfbindingu á milli þeirra. Einnig getur ástand jarðefnisins haft mikill áhrif á viðnámshornið, en rök jarðefni hafa hærra viðnámshorn en þurr og vel þjöppuð jarðefni hafa hærra viðnámshorn en þau sem eru laus í sér (Holtz, Kovacs, & Sheahan, 2011).



Mynd 3: Myndun viðnámshorns í jarðefna keilu (Johnson, 2008)

Algeng gildi á viðnámshorn í sand- og siltríkum jarðefnum má sjá í töflu 2 (Das, 2010).

Tafla 2: Algeng gildi fyrir viðnámshorn (Das, 2010)

Jarðefni	Viðnámshorn φ' (deg)
<i>Sandur: Rúnnuð korn</i>	
Lítið þjappað	27-30
Meðal þjappað	30-35
Vel þjappað	35-38
<i>Sandur: Hvöss korn</i>	
Lítið þjappað	30-35
Meðal þjappað	35-40
Vel þjappað	40-45
<i>Grýtt jarðefni</i>	34-48
<i>Silti</i>	26-35

2.4 Ódreneraður skúfstyrkur

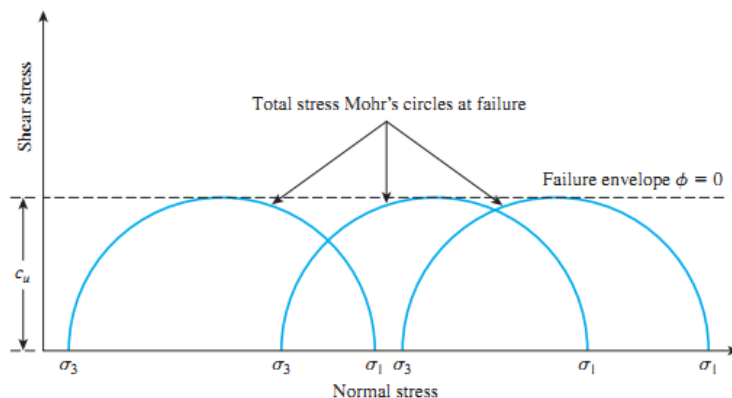
Ódreneraður skúfstyrkur er einn af grundvallar efniseiginleikum fínefnaríkra jarðefna. Breytum í greiningu efniseiginleika. Efniseiginleikinn er sérstaklega mikilvægur til að tryggja öryggi fínefnaríkra jarðefna. Efniseiginleikann má finna með einásaprófi og þríasaprófi, einnig er hægt að áætla gildi fyrir efniseiginleikann með kónprófi (Sigurður Már Valsson, 2011). Ódreneraðan skúfstyrk má ákvarða með eftirfarandi jöfnu:

$$c_u = (\sigma_1 - \sigma_3)/2 \quad (2-5)$$

Þar sem:

- σ_1 : Stærsta höfuðspenna
- σ_3 : Minnsta höfuðspenna
- c_u : Ódreneraður skúfstyrkur

Það er þó ómögulegt að finna aðeins eitt gildi fyrir ódreneraðan skúfstyrk þar sem margir þættir stjórna því hvaða gildi kemur út í hvert skipti, s.s. stefna streitu, hlutfall skúfkrafta og efnisþéttleiki jarðefnisins. Á mynd 4 má sjá hvernig ódreneraði skúfstyrkurinn er fundin með Mohr hringjum.



Mynd 4: Mohr hringir notaðir til að finna ódreneraðan skúfstyrk jarðefnis (Das, 2010)

Samkvæmt kenningu Mohr-Coulomb má taka ódreneraðan skúfstyrk jarðefnis sem samloðun jarðefnisins þar sem viðnámshornið er $\varphi'=0$, þó aðeins í vatnsmettuðum leir og silti (Das, 2010).

Í töflu 3 má sjá það bil sem algengt er að ódreneraður skúfstyrkur er að mælast á (Pile info: Geoforum, 2009).

Tafla 3: Algeng gildi fyrir ódreneraðan skúfstyrk jarðefna (Pile info: Geoforum, 2009)

Jarðefni	Ódreneraður skúfstyrkur c_u (kPa)
<i>Sandur:</i>	0,0
<i>Silti og leir:</i>	
Mjög linur	0,0 – 12,5
Linur	12,5 – 25,0
Meðal stífur	25,0 – 50,0
Stífur	50,0 – 100,0
Mjög stífur	>100,0

3 Ákvörðun á efniseiginleikum

Mörg próf hafa verið þróuð til að ákvarða efniseiginleika jarðefna. Þessi próf eru ýmist unnin á rannsóknarstofum eða úti í mörkinni. Prófin eru oftast gerð á jarðefnum þar sem fyrirhugaðar eru framkvæmdir. Við prófanir úti í felti eru eiginleikarnir fundnir með reynslujöfnum byggðum á mælingum sem prófin gefa og hafa þessar jöfnur þróast í gegnum tímann með nákvæmari mælitækjum og styrkingu grunns sem þær eru byggðar á. Öll þessi tæki og aðferðir hafa sína kosti og takmarkanir og hentar engin einstök aðferð best í hvert skipti og á allar tegundir jarðefna. Í þessu verkefni eru aðferðir á borð við þríasapróf, skúfboxpróf og kónpróf skoðaðar og bornar saman við CPT próf við ákvörðun á bæði ódreneruðum og dreneruðum skúfstyrk og viðnámshorni jarðefna.

3.1 Á tilraunastofu

Nákvæmni prófa sem gerðar eru á tilraunastofu er mismunandi og fer það mikið eftir því í hvaða ástand jarðefnið er í sem á að prófa. Nokkur munur getur myndast á milli jarðefna sem koma óhreyfð af tilraunastað og þeirra sem þarf að byggja sérstaklega inn í prófbúnað. Hér verður lýst stuttlega þremur prófunum sem eru algengar til ákvörðunar á skúfstyrk á tilraunastofu.

3.1.1 Kónpróf

Kónpróf eða keilupróf var fyrst kynnt til sögunar 1915. Aðferðin þykkir mjög hentug til að finna ódreneraðan skúfstyrk í leir og siltrikum jarðefnum og er það fljótlegt í keyrslu. Aðferðin er einföld og gefur niðurstöður sem taka má sem viðmiðunargildi. Einnig er búnaðurinn sem prófinu fylgir mjög meðfærilegur og auðvelt er að flytja hann á prófstað ef frekari rannsókna er krafist. Dæmigerðan búnað má sjá á mynd 5. Búnaðurinn er þannig upp byggður að keilu af sérstakri þyngd og með sérstakan halla á topphorni er komið fyrir alveg við yfirborð jarðefnasýnis og því sleppt í sýnið (Jón Skúlason et al., 1998). Sigið er svo mælt og út frá gildinu sem fæst við aflestur fæst töflugildi fyrir ódreneraðan skúfstyrk. Hver keila hefur sína töflu sem er byggð á reynsluprófum (GeoNar A/S, án árs).

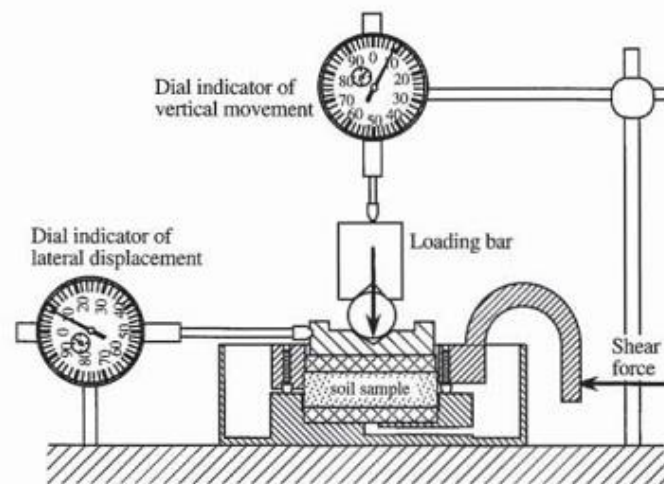


Mynd 5: Búnaður kónprófs.

Prófið getur einnig mælt næmni jarðefna með hátt fínefnainnihald. Til þess þarf óhreyft sýni sem byrjað er á að sigmæla, svo er sýnið hrært upp og mælt aftur. Skúfstyrkstap á milli mælinga segir til um næmni jarðefnisins fyrir breytingum á náttúrulegu ástandi jarðefnisins (Tanaka, Hirabayasi, Matsuoka, & Kaneko, 2012).

3.1.2 Skúfboxpróf

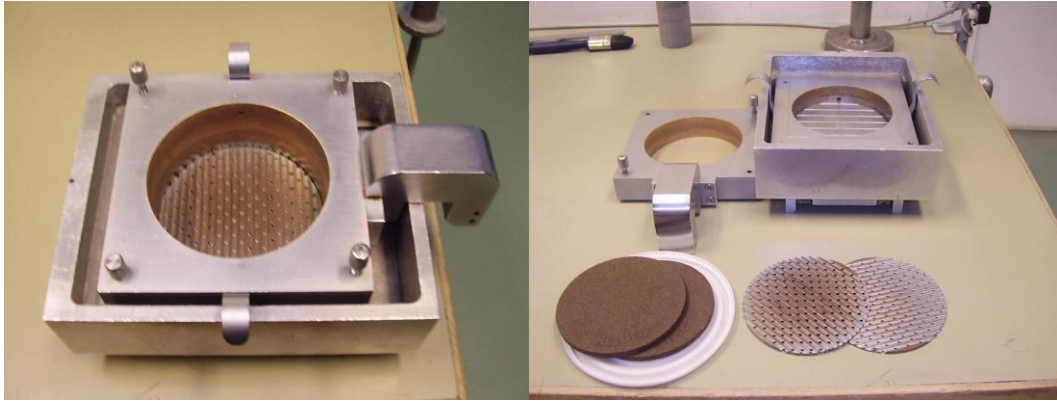
Skúfboxpróf er eitt algengasta prófið sem notað er til að ákvarða skúfstyrk jarðefna. Aðferðin er sett þannig upp að búnaður skúfar sýnið fyrir ákveðinn normalkraft og gefur aflesturinn feril þar sem skúfkrafturinn er fall af keyrsluvegalengd. Hámarks skúfkraftur jarðefnisins fæst strax út úr niðurstöðuferli hvers sýnis. Hámarks skúfstyrkur jarðefnis er háður uppbyggingu jarðefnisins, en þar er þjöppun, rakainnihald og innibýrgð spenna í jarðefninu orsökun af normaláláginu sem verkar á sýnið sem gefur jarðefninu sína eiginleika. Sýnin eru keyrð fyrir þrjú eða fleiri mismunandi normalálög. Viðnámshorn jarðefnisins er svo ákvarðað út frá jöfnu bestu línu þar sem normalkrafturinn er teiknaður sem fall af hámarks skúfkrafti sem verkar á sýnið. Aðferðin hentar best til að fá niðurstöður á jarðefnum með lágt fínefnainnihald. Mynd 6 sýnir einfalda útgáfu af skúfboxi (Bardet, 1997).



Mynd 6: Einföld uppsetning af skúfboxi með mælinemum (Bardet, 1997)

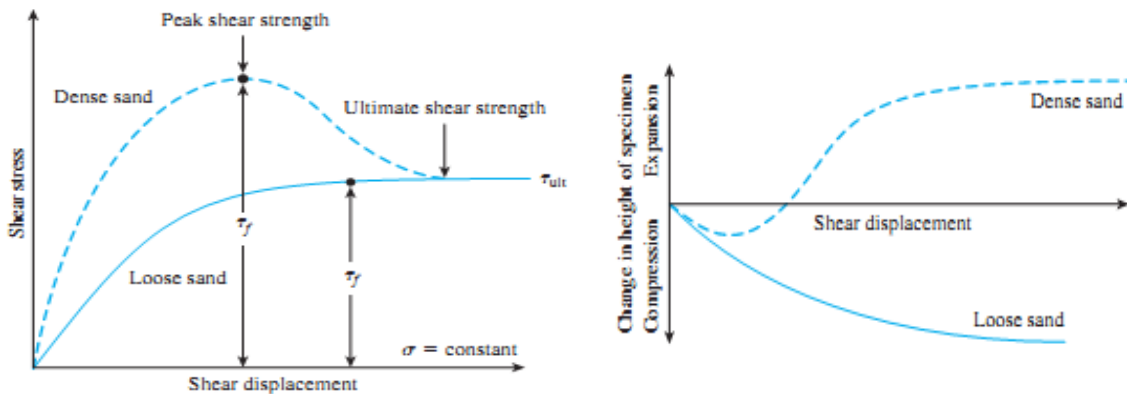
Prófinu má skipta í þrjú hluta (Das, 2010).

1. Uppbygging: Sýni byggt upp í skúfboxið og reynt er að líkja sem mest þeim eiginleikum sem verka á þau út í felti, þyngd sýnisins er ákveðin í upphafi og því þjappað í þremur lögum ofan í boxið. Skúfbox má sjá á mynd 7.
2. Undirbúningur: Boxinu komið fyrir í prófbúnaði, þar er það vatnsmettað og lóðréttri spennu bætt ofan á sýnið.
3. Keyrsla: Prófbúnaður settur í gang þar sem efri hluta skúfboxins er keyrður áfram með ákveðnum hraða skúfkrafturinn sem verkar á sýnið í neðri hluta mældur. Jarðefnið er keyrt áfram þar til það brotnar og missir styrk.



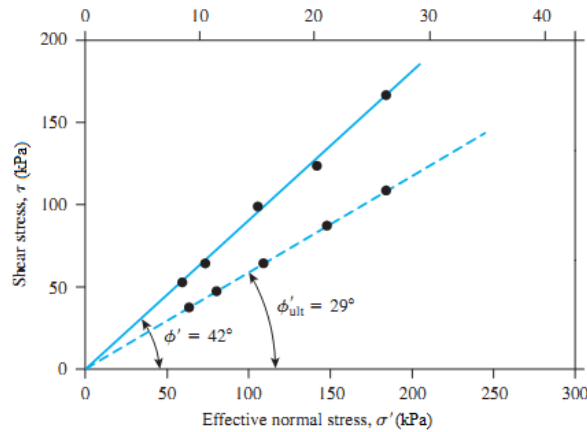
Mynd 7: Skúfbox saman set og sundur tekið.

Eins og allar aðrar aðferðir í jarðtækni þá hefur prófið bæði kosti og galla. Aðferðin gefur gott mat á skúfstyrk jarðefna með lágt fínefnainnihald. Við aukið fínefnainnihald minnkar nákvæmnin og erfiðara verður að keyra jarðefnið að brotmörkum. Prófið sjálft er ódýrt, fljótlegt og einfalt í uppsetningu, borið saman við próf eins og þríasapróf, en gera má ráð fyrir að einn dagur fari í að prófa eitt sýni með þremur prófunum og undirbúningi á meðan eitt sýni í þríasaprófi getur tekið nokkra daga í keyrslu og undirbúningi. Sýnið er sjaldan óhreyft sem gerir það að verkum að byrja þarf að byggja upp sýnið til að það líkist því sem það er úti í feldi. Þetta skapar ákveðna óvissu og ónákvæmni og því er gildið sem fæst notað sem viðmiðunargildi til að bera saman við aðrar niðurstöður sem fást til að mynda með CPT prófi (Das, 2010).



Mynd 8: Dæmigerðar niðurstöður úr skúfboxprófi (t.v) skúf álag sem fall af færslu og (t.h) breyting í hæð sýnis sem fall af færslu (Das, 2010)

Á mynd 8 má sjá dæmigerðar niðurstöður úr skúfboxprófi. Þar má sjá hve mikil munurinn getur verið við mismunandi skilyrði í sama jarðefninu. Jarðefni sem er vel þjappað og því með lága holrýmd reynist vera sterkara en það sem eru laust í sér. Vel þjappað jarðefni þolir skúfkrafta upp að ákveðnu hágildistopp en eftir að toppnum er náð fellur skúfkrafturinn og nær jafnvægi við svipuð mörk og sama jarðefni sem eru laust í sér. Annar munur á sýnunum varðar eftirá þjöppun jarðefnisins í skúfboxinu sjálfu, en þá má búast við að jarðefni sem er vel þjappað þenjist út og lyfti normalálaginu á meðan ætla megi að laust þjappað sýni þjappist meira saman á meðan keyrsla stendur yfir (Mitchell, 1993).



Mynd 9: Dæmigerðar niðurstöður fyrir viðnámshorn (Das, 2010)

Út frá þessum niðurstöðum má áætla viðnámshorn jarðefnisins með að ákvarða jöfnu bestu línu í gegnum niðurstöðu punkta mælisafnsins, þar sem hámarks skúfálag eða gildið þar sem skúfálagið hefur náð jafnvægi fyrir hvert normalálag er teiknað upp líkt og sést á mynd 9. Viðnámshornið má svo finna út frá eftirfarandi jöfnu sem er jafna Mohr-Coulomb án samloðunar, en samloðunina má setja sem 0 fyrir þurr jarðefni með lágt fínefnainnihald.

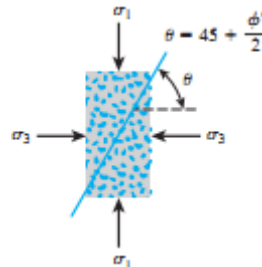
$$\tau_f = \sigma' \tan \varphi' \quad (3-1)$$

Jafnan er svo leidd út fyrir viðnámshornið.

$$\varphi' = \tan^{-1} \left(\frac{\tau_f}{\sigma'} \right) \quad (3-2)$$

3.1.3 Þríasapróf

Þríasapróf er ein áreiðanlegasta aðferð til að ákvarða skúfstyrk jarðefna (Das, 2010). Prófið er notað víða um heim til rannsókna á efniseiginleikum jarðefna og til samanburðar fyrir önnur próf. Prófið er mjög fjölbreytt og býður upp á marga möguleika í uppsetningu, sem gefur prófinu þann eiginleika að geta verið nýtt fyrir mjög vítt svið jarðefna og kannað marga mismunandi efniseiginleika. Prófið líkir eftir spennuaukningum og breytingum á allar hliðar jarðefnisins sem líkir betur eftir þeim aðstæðum sem jarðefnið verður fyrir úti í felti (Bardet, 1997). Á mynd 10 má sjá höfuðspennur á sýni í þríasabúnaði.



Mynd 10: Virkni spennu á jarðefnasýni (Das, 2010).

Uppbygging sýnis og undirbúningur keyrslu fer þannig fram að jarðefnasýni er komið fyrir í þunnri gúmmíhulsu og staðsett inni í sívalningi úr plasti sem er fyllt með vatni sem heldur þrýstingi að hliðum jarðefnisins á meðan álag er keyrt ofan á sýnið. Möguleikarnir á uppstillingu á álagsforsendur eru tvenns konar, annars vegar er mögulegt að vera með stöðuálagspróf þar sem álagi á lárétta ása sýnisins er haldið stöðugu á meðan álagi á

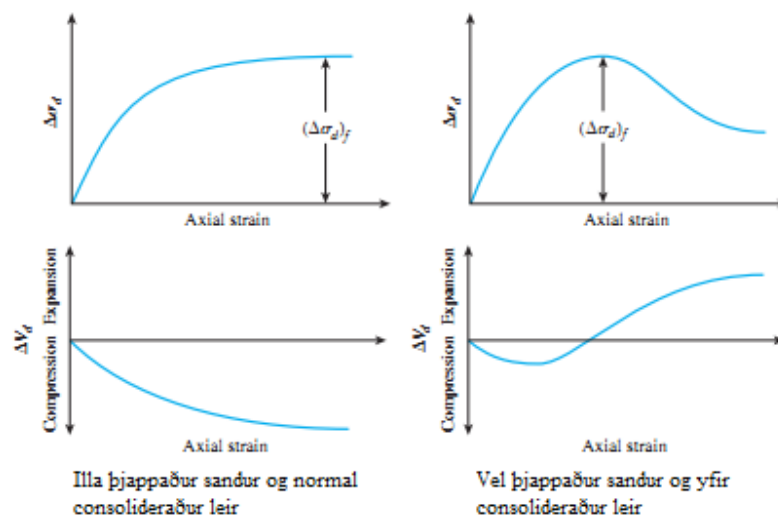
lóðrétta ása er aukið þar til brot á sér stað í jarðefninu. Einnig er mælibúnaðnum stillt þannig upp að upplýsingar fáið fyrir hliðarþrýsting, þóruþrýsting, lóðrétt álag á sýnið og lóðrétta samþjöppun þess undan gefnu álagi. Hins vegar er möguleiki að keyra sveifluálagspróf en þar er reynt að líkja eftir álagsvöldum sem eru ekki stöðugir eins og jarðskjálfa (Das, 2010).



Mynd 11: Búnaður þríasaprófs.

Prófið býður uppá að líkt sé eftir mismunandi ástandi jarðefna, hægt er að stjórna því hvort vatni sé hleypt út úr sýninu á meðan keyrsla stendur yfir allt eftir því hverskonar álagstilviki er verið að líkja eftir. Möguleikarnir eru eftirfarandi (Bardet, 1997).

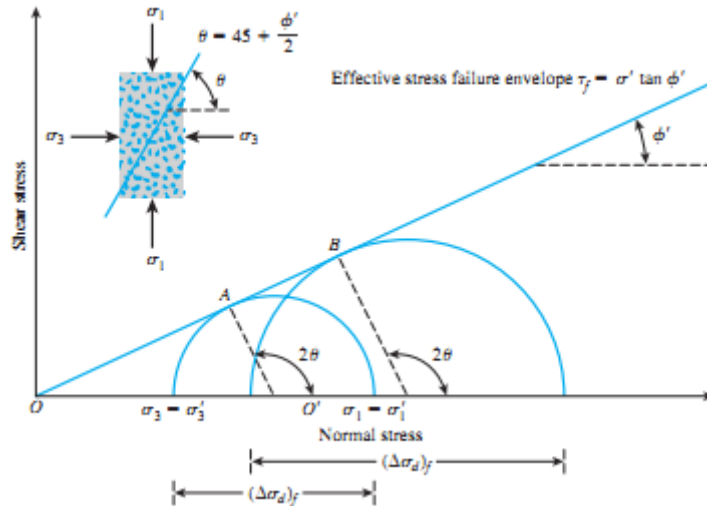
- Konsólíderað-drenerað próf (CD próf)
- Konsólíderað-ódrenerað próf (CU próf)
- Ókonsólíderað-ódrenerað próf (UU próf)



Mynd 12: Dæmigerðar niðurstöður úr þríasaprófi fyrir mismunandi þjöppun (Das, 2010). Niðurstöðurnar eiga við CD próf

Á mynd 12 má sjá dæmigerðar niðurstöður úr þríasaprófi, þar má sjá hve mikil munurinn getur verið við mismunandi skilyrði í sama jarðefninu. Jarðefni sem eru vel þjöppuð og yfirkonsólíderuð reynist vera sterkara en þau sem eru laus í sér og normalkonsólíderuð, vel

Þjöppuðu jarðefnin þola spennur upp að ákveðnu hágildistopp en eftir að toppnum er náð fellur styrkurinn og nær jafnvægi. Aftur á móti leita jarðefnin sem eru laus í sér strax í jafnvægið. Þessar niðurstöður líkjast mjög niðurstöðum skúfboxprófa en þar er aðal áhersluefnið skúfkraftar sem verka á jarðefnið. Sama gildir um þjöppun jarðefnanna við keyrslu en niðurstöðurnar líkjast mjög niðurstöðum skúfboxprófa (Head, 1998).



Mynd 13: Niðurstöður þríasaprófs notaðar til að ákvarða viðnámshorni jarðefna (Das, 2010)

Á mynd 13 má svo sjá hvernig Mohr hringir eru notaðir til að finna brotmörk jarðefnisins. Með eftirfarandi jöfnu má reikna út viðnámshornið jarðefnisins

$$\sin \varphi' = \frac{AO'}{OO'} \quad (3-3)$$

Í þessu verkefni verður notast við gamlar niðurstöður úr þríasaprófum þar sem notast var við jafna álagsaukningu við konsólíderað-drenerað ástand jarðefna.

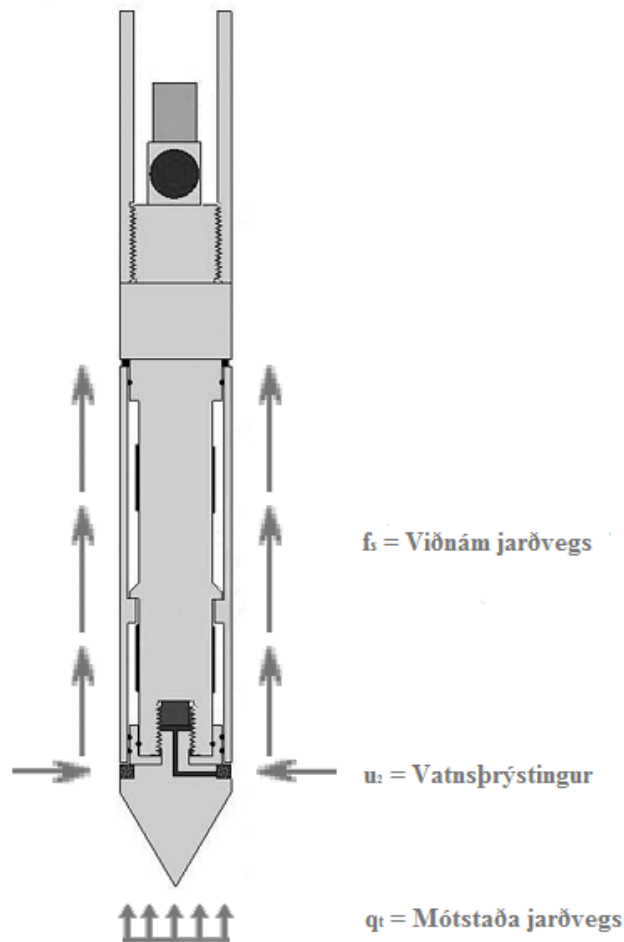
3.2 Úti í mörkinni

Til eru mörg próf til að nálgast gildi fyrir efniseiginleika jarðefna sem framkvæma má úti í mörkinni, þessi próf eiga það sameiginlegt að lýsa betur raunastæðum úti í felti en þau sem fást með prófum á tilraunastofum. Ástæðan fyrir þessu er að jarðefnin eru óhreyfð úti í mörkinni auk þess að upplýsingar sem fást við t.d. borprófanir gefa samfelldar niðurstöður sem fall af dýpi. Helsti ókosturinn við þessi próf, borið saman við þau próf sem gerð eru á tilraunastofu, er að búnaðurinn sem fylgir prófinu er í flestum tilfellum dýrari en prófbúnaður á tilraunastofu.

3.2.1 Cone Penetration Test (CPT)

CPT (e. Cone Penetration Test) er eitt af þeim prófum sem notuð eru til að mæla efniseiginleika jarðefna úti í mörkinni. CPT próf samanstendur af keilu sem þrýst er niður í jarðlögin. CPT prófið hefur verið í þróun í gegnum tímann þar sem fyrstu forverar prófsins komu fram í kringum 1930 og hefur búnaðurinn haldið áfram að þróast fram til 1970 þar sem CPT prófið þróaðist frá prófinu Dutch Cone Penetrometer. Þróunin fól í sér að viðbótarbúnaði var komið fyrir í mælitækjum til að geta ákveðið fleiri þætti. Í upphafi mældi búnaðurinn aðeins mótstöðuna við keiluna, árið 1953 var viðnámsshulsunni bætt við

og svo árið 1974 var í fyrsta skipti bætt vatnsþrýstingsmæli við búnaðinn (Robertson & Cabal, 2010). CPT niðurstöður sem nýttar eru hér koma frá búnaði í eigu Vegagerðarinnar og er að gerðinni Envi Memocone II. Keilu búnaðarins má sjá á mynd 15. Hann er þannig uppbyggður að fremst er keila með 10 cm^2 yfirborðsflatarmál og 60° halla og í framhaldi af keilunni kemur sívalningslaga viðnámshulsa sem er með 150 cm^2 yfirborðsflatarmál. Búnaðinum er svo þrýst niður í jarðlögin með föstum hraða, 2 cm/sek , og samfelldum mæligögnum safnað með dýpi á $1\text{-}5 \text{ cm}$ millibili. Upplýsingarnar sem búnaðurinn safnar er þríþættur. Fyrst má nefna keiluna á enda mælistangarinnar sem nemur mótstöðu jarðefnanna, q_c . Í öðru lagi er svo hulsa utan um stöngina sem nemur og safnar upplýsingum um viðnám jarðefnanna, f_s (NCHRP, 2007).



Mynd 14: Uppbygging CPT búnaðar.

Í þriðja lagi hefur CPT búnaðurinn svo nokkra möguleika við vatnsþrýstingsmælingar. Mælir getur verið staðsettur við odd keilu, en hann mælir u_1 , hann getur verið á milli viðnámshulsunnar og keilunnar og mælt u_2 , og þriðji staðurinn er aftan við viðnámshulsuna sem mælir u_3 . Á þeim búnaði sem Vegagerðin hefur fest kaup á er vatnsþrýstingsmælirinn staðsettur milli keilunnar og viðnámshulsunnar en sú staðsetning er algengust. Þessa mæliþætti má sjá á mynd 14.



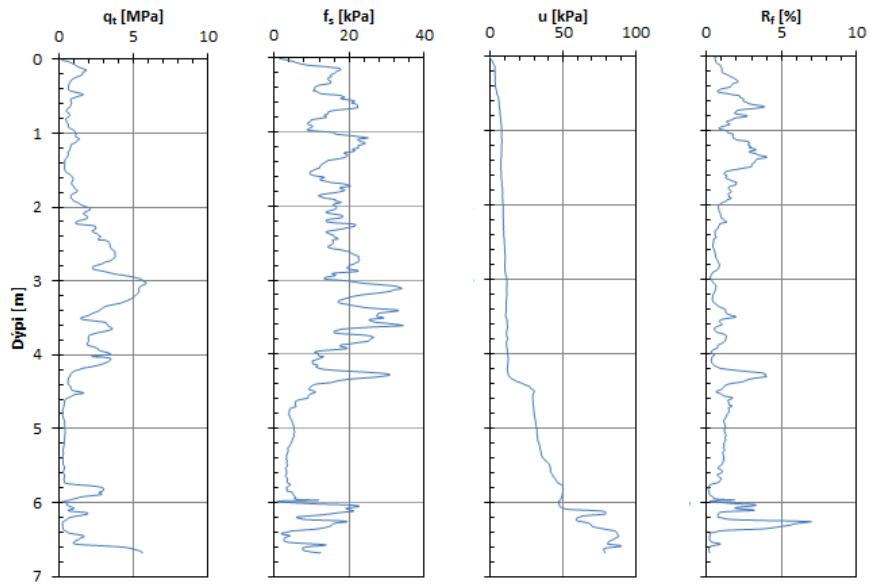
Mynd 15: Memocone II frá Envi sem var notaður við CPT prófanir Vegagerðarinnar (Envi, 2013)

Búnaðinum er svo þrýst niður í jarðlögin með borvögnum á hraðanum 2 cm/sek með vökvatjakk. Tjakkurinn notar allan þunga borvagnsins til að þrýsta mælibúnaðnum niður, en borvagninn má sjá á mynd 16.



Mynd 16: Borvagn vegagerðarinnar (Haraldur Sigursteinsson et al., 2015)

Búnaðurinn hefur þó bæði kosti og takmarkanir ef prófið er borið saman við önnur próf sem eru notuð til að finna sömu efniseiginleika. Kostirnir eru helstir þeir að prófið gengur mjög hratt fyrir sig og auðvelt er að endurtaka mælingar og mæligögnin eru samfelld sem fall af dýpi sem gefur mjög nákvæmar niðurstöður um jarðlög og skiptingu jarðlaga ef það á við. Við þetta bætist að reynslujöfnur sem styrkjast með aukinni reynslu og þróun búnaðarins. Það er einnig mjög mikill kostur að við mælingu er jarðefnið í því ástandi sem reikna má með að það sé í viðvarandi og því fást nákvæmari niðurstöður en úr prófum þar sem þarf að byggja upp sýnið sérstaklega. Það eru þó nokkrar takmarkanir við búnaðinn og það fyrsta sem ber að nefna er að mælibúnaðurinn er mjög dýr og einnig mjög viðkvæmur fyrir stærri aðskotahlutum eins og grjóti. Viðkvæmasti hlutinn af mælibúnaðnum er viðnámshulsan en ekki þarf mikla mótstöðu til að beygla hana. Þetta gerir það að verkum að prófið er dýrt þar sem áhættan er á að skaða búnaðinn í keyrslu. Einnig er búnaðurinn þannig að það þarf mann með reynslu til að keyra hann. Það er einnig mjög takmarkandi að ekki fæst sýni með búnaðinum, það má þó leysa með því að taka sérstaka sýnaholu við hlið CPT prófsholunar ef rannsaka þarf frekar jarðefnið eða jarðlögin (Welsh, 2009).



Mynd 17: Dæmigerðar niðurstöður CPT prófana

Á mynd 17 má svo sjá dæmigerða uppsetningu á niðurstöðum CPT mælinga, þrjú línuritana eru leiðrétt út frá hráum gögnum sem mælíbúnaðurinn les út en það fjórða er reiknað hlutfall milli viðnáms og mótstöðu, núningshlutfall(R_f).

$$R_f = (f_s/q_t) * 100\% \quad (3-4)$$

Eyða þarf út ákveðnum punktum þar sem stökk myndast í línuritinu, þetta gerist þegar bætt er við stöngina sem vökvatjakkur borvagns þrýstir með mælitækjum ofan í jarðlögin. Einnig eru þau gögn sem mælitækin lesa út hrá gögn sem þarf að meðhöndla svo hægt sé að nýta þau til að finna efniseiginleika jarðefnanna.

Leiðréttingajafna til að fá út keilumótstöðuna er eftirfarandi.

$$q_c = Q_c/A_c \quad (3-5)$$

Þar sem kraftur sem verkar á keilu(Q_c) er deilt með yfirborðsflatarmáli keilunnar(A_c) sem er 10cm^2 fyrir keilu Vegagerðarinnar. Í framhaldi af því er keilumótstaðan endurreiknuð með tilliti til mælda vatnsþrýstingsins, þetta er gert með eftirfarandi jöfnu:

$$q_t = q_c + u_2(1 - a) \quad (3-6)$$

Stærðin a lýsir nettó hlutfalli svæðis ákvarðað út frá tilraunastofu kvörðun (Robertson & Cabal, 2010). Í verkefni þessu er $a=0,7$ notað.

Leiðréttingarjafna til að fá út viðnám við hulsu er eftirfarandi:

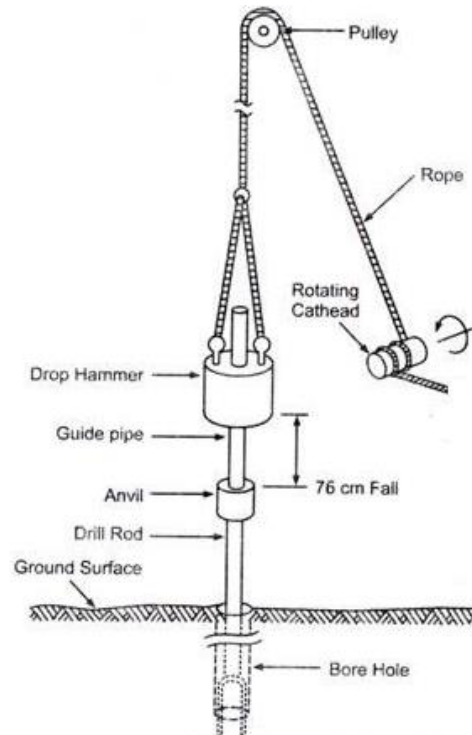
$$f_s = F_s/A_s \quad (3-7)$$

Þar sem núningskraftur sem verkar á viðnámshulsu, F_s , er deilt með yfirborðsflatarmáli hulsunar, A_s , sem er 150cm^2 fyrir hulsu á mælíbúnaði Vegagerðarinnar.

Þessar lagfæringarjöfnur eru innbyggðar í mælitækjum Vegagerðarinnar svo ekki þarf að leggja í þá útreikninga í byrjun.

3.2.2 Standard Penetration Test (SPT)

Annað próf sem er framkvæmt úti í mörkinni er SPT (Standard Penetration Test) borun. Prófið hefur það fram yfir mörg önnur sambærileg próf, eins og CPT, að jarðefnasýni er tekið með búnaðinum, en sýnin eru alla jafna hreyfð. Niðurstöður prófsins meta burðarhæfni jarðefnanna. Framkvæmd borunarinnar fer þannig fram talin eru stöðluð högg á ákveðna lengd, þ.e. á 30 cm. Prófið er notað mjög víða og er helstu ástæðurnar fyrir því að prófið er einfalt og ódýrt. Áreiðanleiki prófsins er þó mjög háður jarðlögum sem prófað er í. Niðurstöður t.a.m. fyrir leir og fínefnarík jarðefni sýna oft ekki rétta mynd jarðefnanna (Ásgrímur G. Björnsson, 2011).



Mynd 18: Uppbygging SPT búnaðar (Khan, án dags).

Uppbygging búnaðarins má sjá á mynd 18. Þar má sjá staðlaðan SPT búnað. Lóðið sem látið er falla á stöng búnaðarins er 63,5 kg og fellur það úr 76 cm hæð. N(höggafjöldi) gildi jarðefnisins er svo ákvarðað sem höggafjöldi á hverja 30 cm, en ef höggafjöldi fer í 50 áður en búnaðurinn nær að fara 15 cm niður er stoppað og lengdin sem náðist með 50 höggum sköluð upp í 30 cm (Sigurður Erlingsson, 2012).

SPT prófið var ekkert notaður í tengslum við verkefnið og var aðeins skoðað í samanburði við CPT prófið.

3.3 Spájöfnur um efniseiginleika út frá CPT

Þau gildi sem CPT prófbúnaður gefur er óbeinn mælikvarði á efniseiginleika viðkomandi jarðefnis, því þarf að vinna úr gögnunum til að ákvarða efniseiginleikana sem verið er að rannsaka. Út frá þessu hafa spájöfnur verið settar fram út frá niðurstöðum samanburðarprófa, eins og þeim sem fjallað er um í þessu verkefni. Spájöfnurnar hafa síðan þróast með aukinni nákvæmni mælitækja og aukinni þekkingu á jarðefnum. Því fleiri samanburðarpróf sem eru gerð því sterkari verður grunnurinn sem spájöfnurnar byggja á.

3.3.1 Spájöfnur viðnáms horns

Viðnáms horn jarðefnisins má finna með nokkrum mismunandi reynslujöfnum sem taka tillit til ólíkra gilda sem fást með keyrslu CPT prófsins. Jöfnurnar henta misvel fyrir ólík jarðefni.

Í einni af þessum reynslujöfnum sem var þróuð af Kulhawy og Mayne árið 1990 var tekið tillit til normal gildi fyrir keilumótstöðu (Q_{tn}). Reynslujafnan var byggð upp út frá niðurstöðum fyrir hreinan, rúnnaðan kvarssand (Robertson & Cabal, 2010).

Normal gildi fyrir keilumótstöðuna má finna með jöfnunni:

$$Q_{tn} = \left(\frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma_{atm}} \right) \left(\frac{\sigma_{atm}}{\sigma'_{v0}} \right)^n \quad (3-8)$$

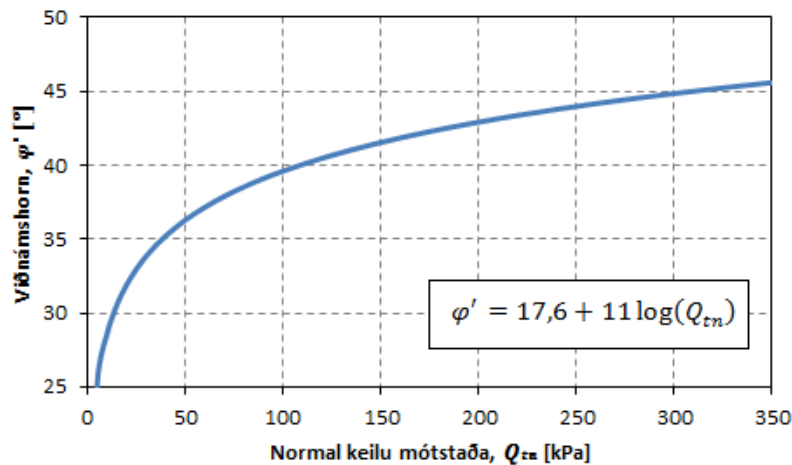
Þar sem:

- q_t : Keilumótstaða
- σ_{v0} : Normal spenna
- σ'_{v0} : Virk spenna
- σ_{atm} : Loftþrýstingu
- n : Stuðull ákvarðaður út frá eðli jarðefnis

Þetta gildi má svo nota til að finna viðnáms hornið, með eftirfarandi jöfnu:

$$\varphi' = 17,6 + 11 \log(Q_{tn}) \quad (3-9)$$

Sem gefur graf eins og á mynd 19.



Mynd 19: Graf fyrir viðnáms horns reynslujöfnu skv. Kulhawy og Mayne

Fleiri reynslujöfnur hafa verið settar fram. Þar má nefna reynslujöfnu Robertson og Campanella árið 1983 sem byggðu sína reynslujöfnu á þeim forsendum að jarðefnið væri án samloðunar og hentar fyrir meðal samþjappalegan kvarssand (Robertson & Cabal, 2010).

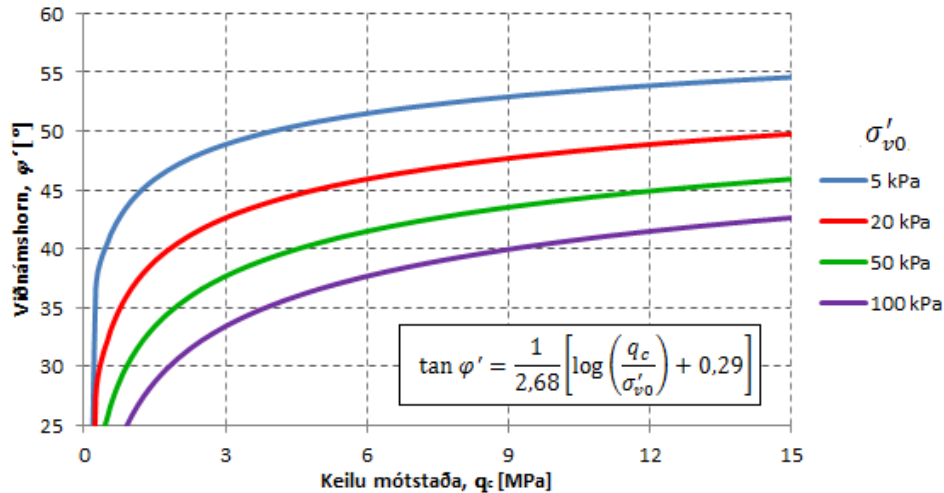
Reynslujafnan er eftirfarandi:

$$\tan \varphi' = \frac{1}{2,68} \left[\log \left(\frac{q_c}{\sigma'_{v0}} \right) + 0,29 \right] \quad (3-10)$$

Þar sem:

q_c : Keilumótstaða
 σ'_{vo} : Virk spenna

Líkingin er háð dýpi sýnisins, þ.e. þeirri virku spennu sem er á viðkomandi dýpi. Á mynd 20 hafa verið teiknað spáferill fyrir fjögur mismunandi gildi á virkri spennu (σ'_{vo}) (Robertson & Cabal, 2010).



Mynd 20: Gröf fyrir viðnáms horns reynslujöfnu skv. Robertson og Campenella

Þegar þessar jöfnur eru þó skoðaðar kemur í ljós að þær eru mikið til ákvarðaðar út frá jarðefnum með lágt fínfnainnihald sem gefur oft mjög lágt viðnáms horn. Það var ekki fyrr en um 2006 þegar Mayne endurbætti jöfnu sína og Kulhawys að jarðefni með hátt fínfnainnihald voru teknar með í reikninginn. Það sem Mayne gerði var að taka með í útreikningum sínum póruþrýstingshlutfallið (B_q).

Póruþrýstingshlutfallið má finna með jöfnunni:

$$B_q = \frac{u_2 - u_0}{q_t - \sigma_{vo}} \quad (3-11)$$

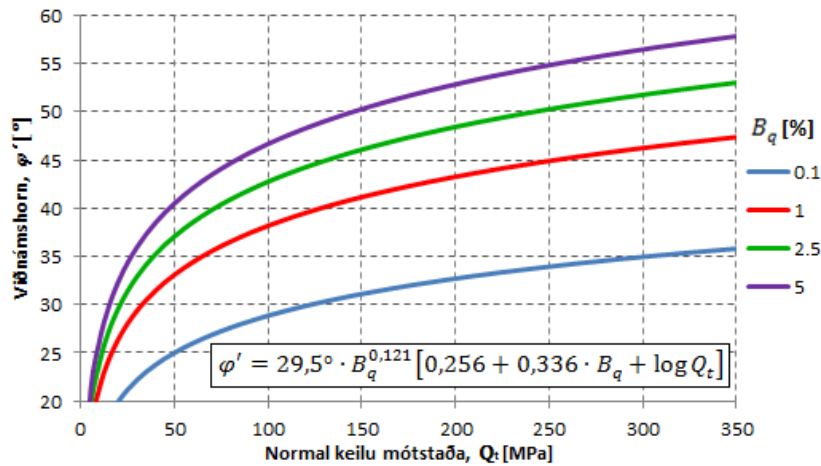
Þar sem:

u_2 : Mældur vatnsþrýstingur
 u_0 : Áætlaður vatnsþrýstingu
 σ_{vo} : Normal spenna
 q_t : Keilumótstaða

Endurbætt reynslujafna Mayne er eftirfarandi:

$$\varphi' = 29,5^\circ \cdot B_q^{0,121} [0,256 + 0,336 \cdot B_q + \log Q_t] \quad (3-12)$$

Líkingin er háð dýpi sýnisins, þ.e. því póruþrýstingshlutfalli sem er á viðkomandi dýpi. Á mynd 21 hafa verið teiknað spáferill fyrir fjögur mismunandi gildi á póruþrýstingshlutfalli (B_q) (Robertson & Cabal, 2010).



Mynd 21: Gröf fyrir endurbætta viðnámshorns reynslujöfnu skv. Mayne

Ferlar reynslujafnanna áttu það allir sameiginlegt að viðnámshornið óx hratt í upphafi en náði svo jafnvægi þegar dýpra var komið í jarðlögin. Niðurstöður mælinganna voru svo settar fram með þeim hætti að miðgildi af reiknuðu viðnámshorni fyrir ákveðið bil var teiknað upp á móti viðnámshorni sem fékkst á tilraunastofu og séð hversu vel gildin féllu að miðlínu milli gildanna.

3.3.2 Spájöfnur ódreneraðs skúfstyrks

Fyrir fínefnarík jarðefni byggist upp mikill vatnsþrýstingur þegar CPT keilunni er þrýst í jarðefnið. Fæst þá mat á ódreneraðum skúfstyrk jarðefnisins. Samloðun jarðefna má síðan finna út frá spájöfnu fyrir ódreneraðan skúfstyrk jarðefnisins.

Eftirfarandi jafna gefur ódreneraðan skúfstyrk jarðefnis:

$$c_u = \frac{q_t - \sigma_v}{N_{kt}} \quad (3-13)$$

Gildi fyrir N_{kt} , sem er einingalaust gildi, er valið á bilinu 10 til 18, með 14 til að finna meðaltalsgildi samloðunar. Gildi N_{kt} á það til að hækka með hækkanði þjálni jarðefnisins og lækkar við aukna næmni jarðefnisins. Árið 1997 sýndi Tom Lunne fram á það að val á N_{kt} væri háð þróun þrýstingshlutfallinu B_q þannig að með hækkanði þróun þrýstings hlutfalli lækkar N_{kt} gildið og svo öfugt, þegar $B_q \sim 1$ getur N_{kt} gildið verið svo lágt sem 6. Fyrir leirkennd jarðefni, þar sem getur verið ónákvæmni í gildum fyrir q_t , er hægt að ákvarða gildi fyrir samloðun út frá vatnsþrýstingsmælingum með eftirfarandi jöfnu (Robertson & Cabal, 2010).

$$c_u = \frac{\Delta u}{N_{\Delta u}} \quad (3-14)$$

Þar er val á $N_{\Delta u}$ á bilinu 4 til 10. Valin eru hærri gildi fyrir íhaldssamari niðurstöður (Robertson & Cabal, 2010). Einnig er hægt að nota eftirfarandi jöfnu til að ákvarða gildi fyrir $N_{\Delta u}$:

$$N_{\Delta u} = B_q N_{kt} \quad (3-15)$$

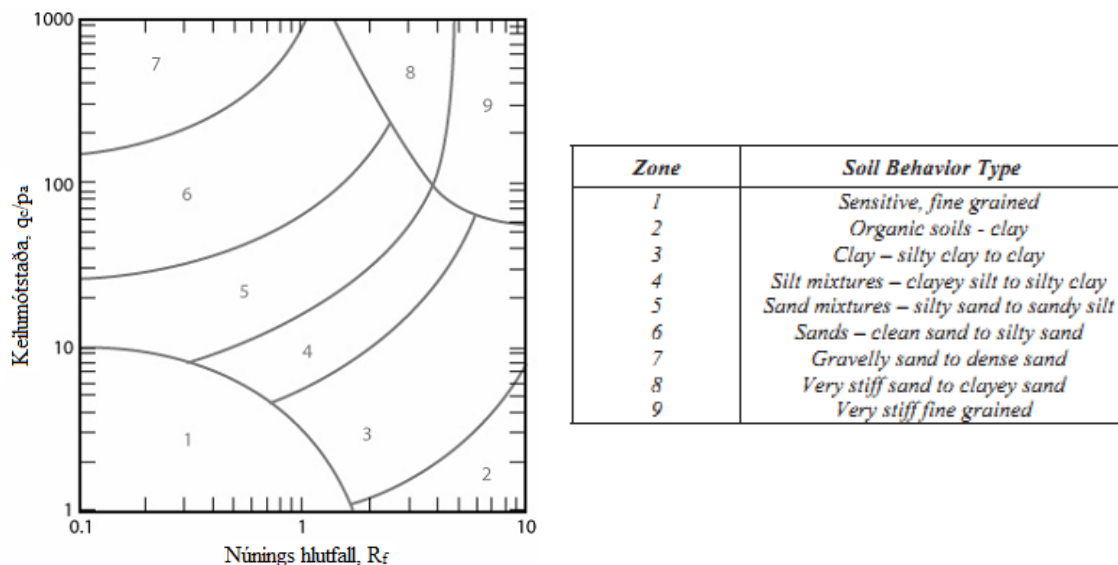
Samloðun er efniseiginleiki sem ávalt ætti að skoða í tengslum við stórar og áhættusamar framkvæmdir, þar sem hann er háður svo mörgum breytilegum þáttum í umhverfinu (Robertson & Cabal, 2010).

3.3.3 Flokkun jarðefna með CPT mælingum

Einn af kostum CPT prófananna er að hægt er að hátt er að hátt er að ákvarða um hverskonar jarðefni er að ræða. Flokkun jarðefna er stór þáttur sem skoðaður er út frá CPT mæligögnum, þar sem gögnin gefa skýra mynd um jarðlögin og skiptingu þeirra. Yfirleitt er keilumótstaðan, q_t , há fyrir sand en lág fyrir leir og siltrík efni á meðan núningshlutfallið, R_f , er lágt fyrir sand en hátt fyrir leir og siltrík efni. Ekki er þó hægt að áætla einkenni jarðefnanna eins og kornastærðir eða kornadreifingu með CPT gögnunum (Robertson & Cabal, 2010).

Við flokkun jarðefna bjóða CPT mæligögnin uppá marga möguleika til flokkunar, þá bæði normaliserað og ónormaliserað. Algengasta flokkunin er SBT flokkun sem var þróuð árið 1986 af Robertson og var svo endurbætt árið 2010 til að verða víddarlaus. Þetta graf verður notað í þessu verkefni til að flokka jarðefnin. Aðrar útgáfur af flokkun jarðefna eru til dæmis, Olsen og Malone þróuð árið 1988 og svo Robertson og Campenella þróuð árið 1988 (Robertson & Cabal, 2010).

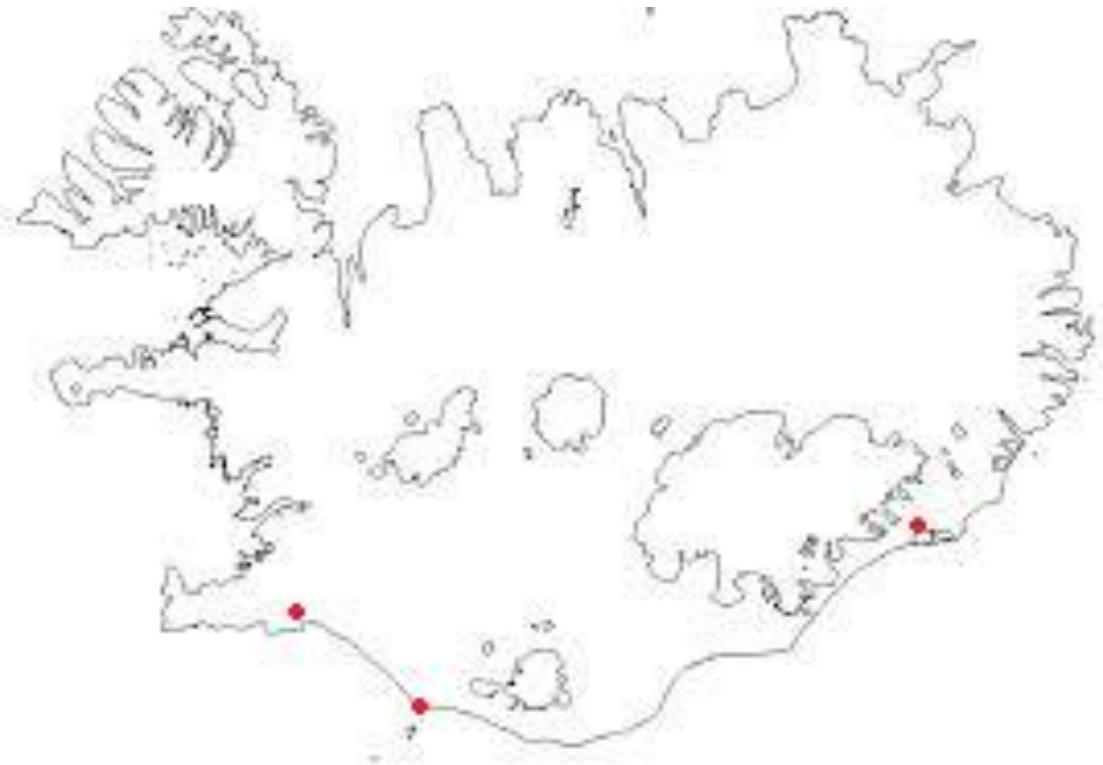
Við flokkun út frá CPT gögnunum fást flokkaðir punktar á hverju 1-2 cm bili eftir því sem mæligögnum er safnað. Aðferðin sem notuð er við ónormaliseraða flokkun og byggir á keilumótstöðu jarðefnisins á móti núnings hlutfalli þess á sama dýpi. Grafið sem notast er við í flokkuninni má sjá á mynd 22 ásamt skýringartöflu fyrir flokkana (Jón Skúlason et al., 1999).



Mynd 22: Flokkunar aðferð byggð á niðurstöðum úr CPT mælingum (Robertson & Cabal, 2010)

4 Ákvörðunarstaðir

Í þessari samanburðarrannsókn voru skoðuð sýni frá þremur stöðum. Staðirnir áttu það sameiginlegt að til voru CPT mælingar frá þeim og auðvelt var að nálgast jarðefnasýni. Staðirnir voru valdir út frá niðurstöðum CPT gagna og flokkun jarðefnanna sem þar voru. Reynt var að velja staði þar sem mismunandi fínefnainnihald og grófleiki. Staðirnir sem skoðaðir voru eru Óseyrartangi, sandarnir við Hornafjarðarfljót og fjaran við Landeyjarhöfn. Staðirnir hafa það sameiginlegt að stórar framkvæmir hafa verið framkvæmdar eða eru á stefnuskránni.

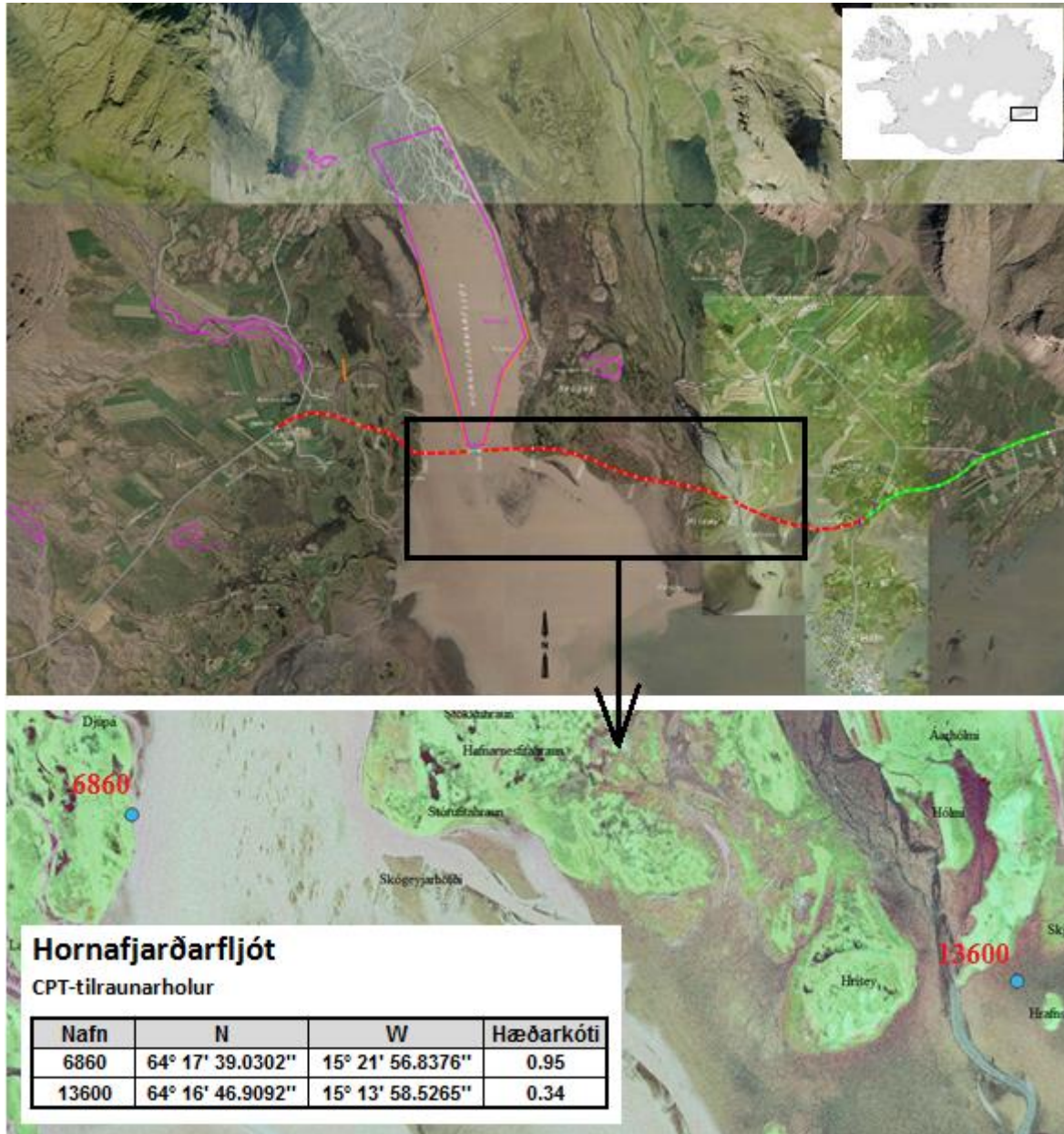


Mynd 23: Staðsetningar ákvörðunarstaða

Sýni voru tekin frá ákvörðunarstöðunum og framkvæmd á þeim kornakúrfugreining til að sjá augljósan mun á uppbyggingu jarðefna frá hverjum stað fyrir sig.

4.1 Hornafjarðarfljót

Tvær CPT tilraunaholur voru teknar í fyrirhugaðri veglínu hringvegarins við Hornafjarðarfljóts (mynd 24). Holurnar eru merktar út frá stöðvum þeirra í veglínunni. Úr hvorri holu voru tekin fjögur sýni vegna þess hve hátt fínefnainnihald jarðefnisins er á svæðinu, en sýnin voru á bilinu 30-75% fínefni og voru sýnin flokkuð sem siltríkur sandur með hátt rakainnihald.

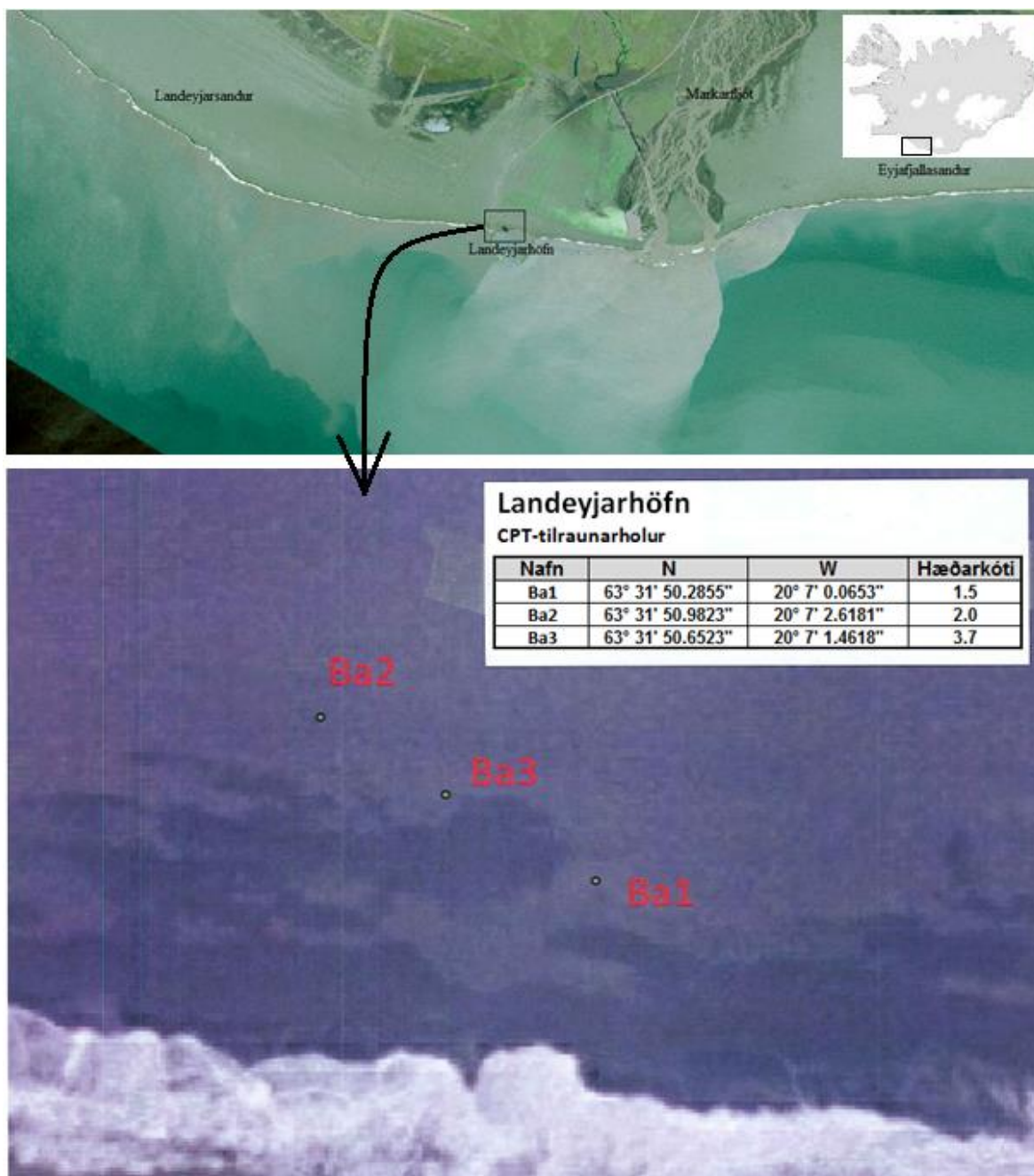


Mynd 24: Fyrirhuguð veglína yfir Hornafjarðarfljót og staðsetning prófhola.

Hólksýnin voru tekin meðfram CPT prófinu vegna þess hve breytilegar dreifingarnar verða með dýpi eins og sést á myndunum 27 og 51.

4.2 Landeyjarhöfn

Þrjár CPT tilraunaholur voru gerðar í tengslum við uppbyggingu Landeyjarhafnar (mynd 25). Við sjónrænt mat á staðarhátum reyndist jarðefnið vera mjög einsleitur sandur með lágt fínefnainnihald. Gert var ráð fyrir að jarðefnið í fjörunni væri með áþekka kornadreifingu og því voru samanburðarsýni tekin úr fjörunni nálægt CPT borholunum sem nú eru undir höfninni. Tekin voru tvö sýni á mismunandi stöðum til samanburðar á kornakúrfudreifingunni.



Mynd 25: Staðsetning á CPT tilraunaholum við Landeyjarhöfn.

4.3 Óseyrartangi

Þrjár CPT tilraunaholur voru gerðar í tengslum við framkvæmd á hugsanlegri uppbyggingu gólfvallar í fjörunni á Óseyrartanga í grennd við Þorlákshöfn. Ekki fengust nákvæm GPS hnit á staðsetningu prófholanna en prófsvæðið má sjá á mynd 26. Líkt og í fjörunni við Landeyjarhöfn var jarðefni á Óseyrartanga mjög einsleitt og út frá því áætlað að kornadreifing væri svipuð fyrir mismunandi dýpi.



Mynd 26: Staðsetning svæðis þar sem CPT tilraunaholur voru gerðar við Óseyrartanga.

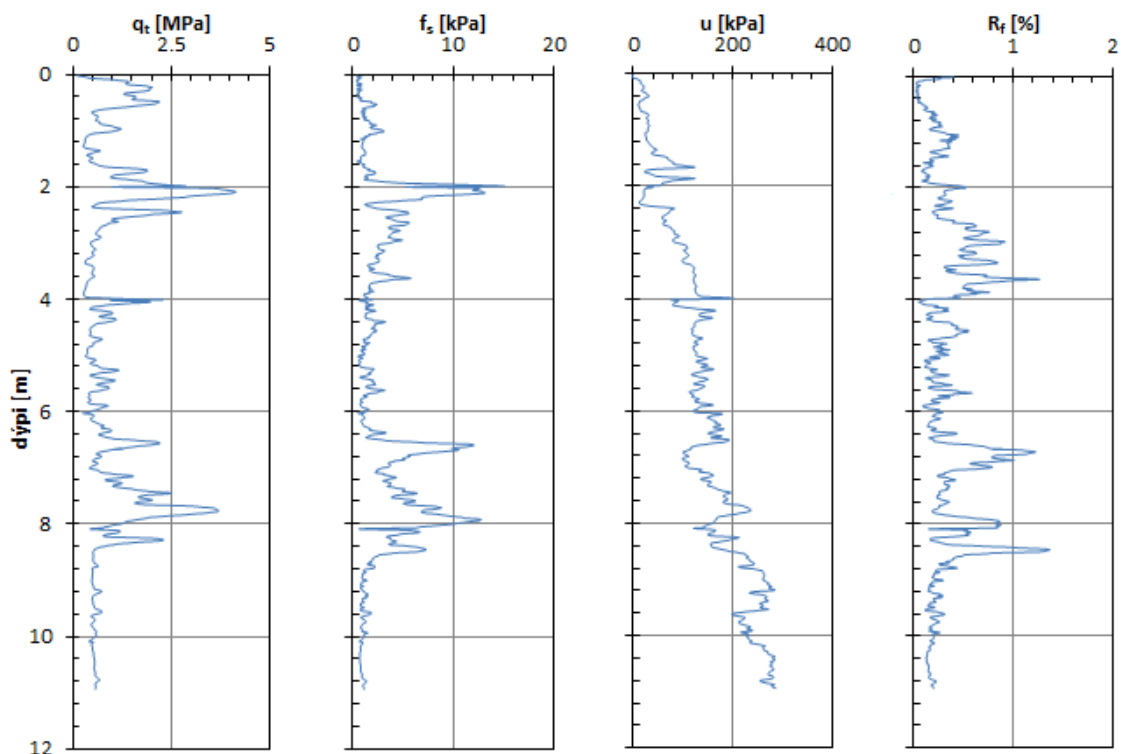
5 Niðurstöður prófana

5.1 Cone Penetration Test (CPT)

Þau gögn sem fást út við CPT boranir eru lesin og sett leiðrétt inn á þrjú gróf með fjórða grafinu sem sýnir reiknað núningshlutfall (R_f) milli viðnáms (f_s) og keilumótstöðu (q_t). Niðurstöðurnar eru ritaðar sem fall af dýpi þar sem upplýsingum er safnað á 1-2 cm millibili sem gefur nákvæm gögn sem lýsa raunaðstæðum á staðnum vel. Gögnunum sem fást er safnað með þeim þremur nemum sem nefndir hafa verið í kafla um CPT prófið. Gögnin eru mótstaða við keilu, viðnám við hulsu og vatnsþrýstingur. Út frá gögnunum má svo reikna marga efniseiginleika jarðefnanna, þó mis áreiðanlegar. Lagfærðar niðurstöður CPT mælinganna má sjá hér að neðan fyrir ákvörðunarstaðina þrjá.

5.1.1 Hornafjarðarfljót

CPT gögn frá Hornafjarðarfljót má sjá á mynd 27, þar má sjá greinilegan mun á jarðlögunum sem fall af dýpi á söndunum í kringum ána. Niðurstöður úr báðum CPT holum sýndu þessar miklu sviptingar í jarðlögunum, þó með ólíkum hætti. Muninn má sjá á aukningu á vatnsþrýstingi í holunum þar sem hann vex jafnt í holu 13600 en kemur í stökum í holu 6860 (mynd 51 í Viðauka B).



Mynd 27: CPT mæligögn úr mæliholu 13600.

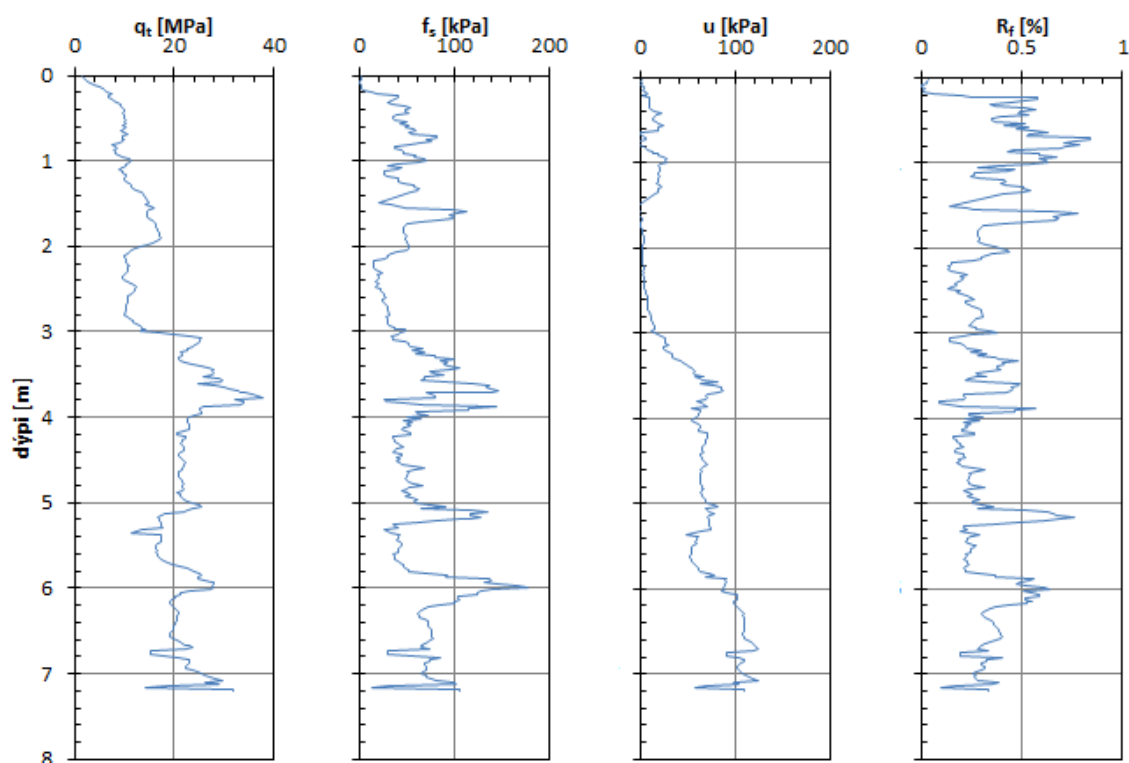
Í töflu 4 má svo sjá á hvaða bili niðurstöður mælinga voru að raðast við Hornafjarðarfljót.

Tafla 4: Helstu stærðir úr CPT mælingum frá Hornafjarðarfljóti

CPT hola	Dýpi holu [m]	Bil q_t gilda [MPa]	Bil f_s gilda [kPa]	Bil u gilda [kPa]	Bil R_f gilda [%]
6860	6,68	0,22 – 5,88	0,75 – 34,50	-0,62 – 90,25	0,11 – 6,97
13600	10,94	0,10 – 4,16	0,40 – 15,00	-3,90 – 286,91	0,02 – 1,37

5.1.2 Landeyjarhöfn

Niðurstöður CPT mælinga við Landeyjarhöfn komu svolítið á óvart þar sem á yfirborðinu lítur jarðefnið út fyrir að vera einsleitt, en samkvæmt CPT mælingum (sjá mynd 28) þá er eitthvað um mismunandi jarðlög. Niðurstöður mæliholu 5371 og 5376 má sjá á myndum 52 og 53 í Viðauka B.



Mynd 28: CPT mæligögn úr mæliholu 5373.

Í töflu 5 má svo sjá á hvaða bili niðurstöður mælinga voru að raðast við Landeyjarhöfn.

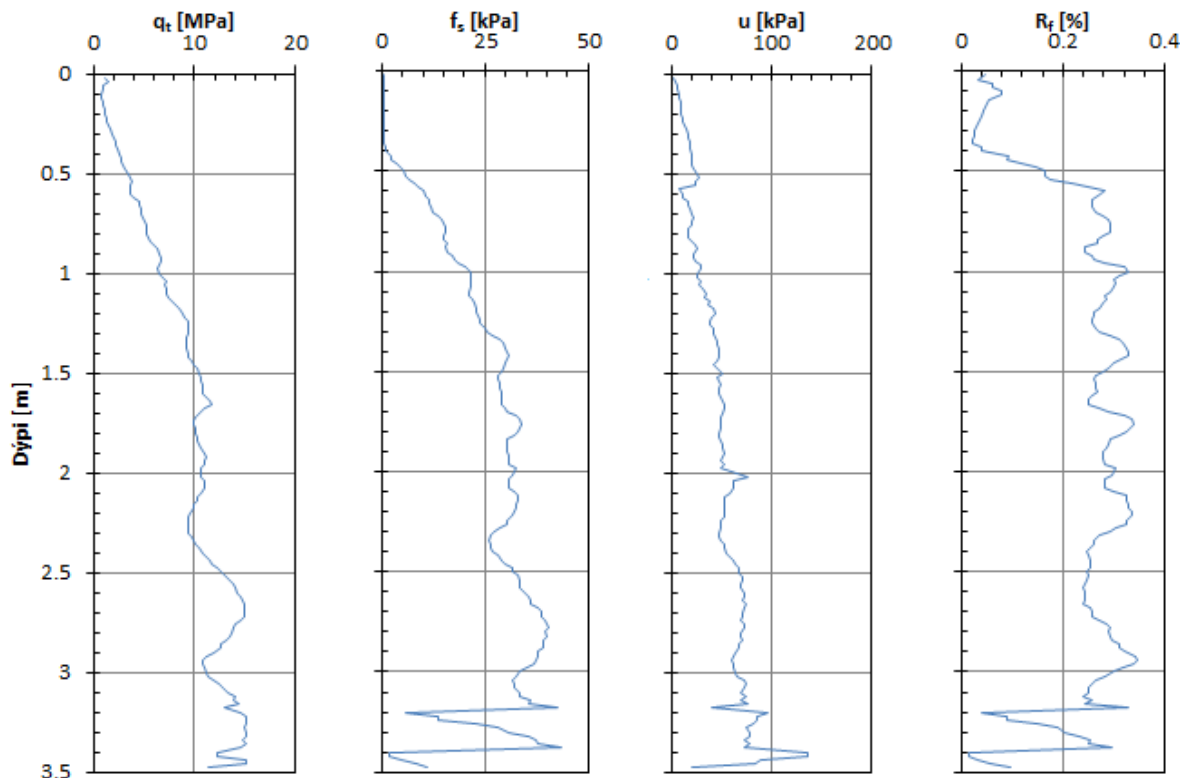
Tafla 5: Helstu stærðir úr CPT mælingum frá Landeyjarhöfn.

CPT hola	Dýpi holu [m]	Bil q_t gilda [MPa]	Bil f_s gilda [kPa]	Bil u gilda [kPa]	Bil R_f gilda [%]
5371	4,44	0,38 – 33,34	0,00 – 139,50	0,00 – 116,50	0,00 – 0,76
5373	7,20	1,48 – 37,74	0,00 – 177,50	-4,00 – 124,00	0,00 – 0,84
5376	4,14	1,41 – 36,16	0,00 – 241,00	-12,50 – 93,00	0,08 – 1,67

Það sem kemur mest á óvart er hversu mikill munur er á mæliholum þrátt fyrir að CPT mæliholurnar voru teknar með minna en 25 metra millibili. Flokkun jarðefnanna gefur þó til kynna að jarðefnið er það sama en á það verkar mismunandi kraftar, sem gæti orsakast af því hversu nálægt sjó borholurnar eru teknar.

5.1.3 Óseyrartangi

Út frá niðurstöðum CPT mælinga frá Óseyrartanga sást skýrt að efnið á svæðinu er einsleitt eins og sést á mynd 29. Núningshlutfallið helst nokkuð stöðugt og vatnsþrýstingur vex jafnt í öllum mæliholum. Niðurstöður mæliholna 4509 og 4512 má sjá á myndum 54 og 55 í Viðauka B.



Mynd 29: CPT-mæligögn úr mæliholu 4515

Í töflu 6 má svo sjá á hvaða bili niðurstöður mælinga á Óseyrartanga voru að raðast.

Tafla 6: Helstu stærðir úr CPT mælingum frá Óseyrartanga.

CPT hola	Dýpi holu [m]	Bil q_t gilda [MPa]	Bil f_s gilda [kPa]	Bil u gilda [kPa]	Bil R_f gilda [%]
4509	3,24	0,53 – 17,81	0,50 – 48,50	21,5 – 108,50	0,02 – 0,34
4512	6,92	0,03 – 13,34	0,00 – 42,50	0,50 – 114,50	0,00 – 0,96
4515	3,48	0,63 – 15,22	0,50 – 43,50	3,00 – 136,50	0,01 – 0,35

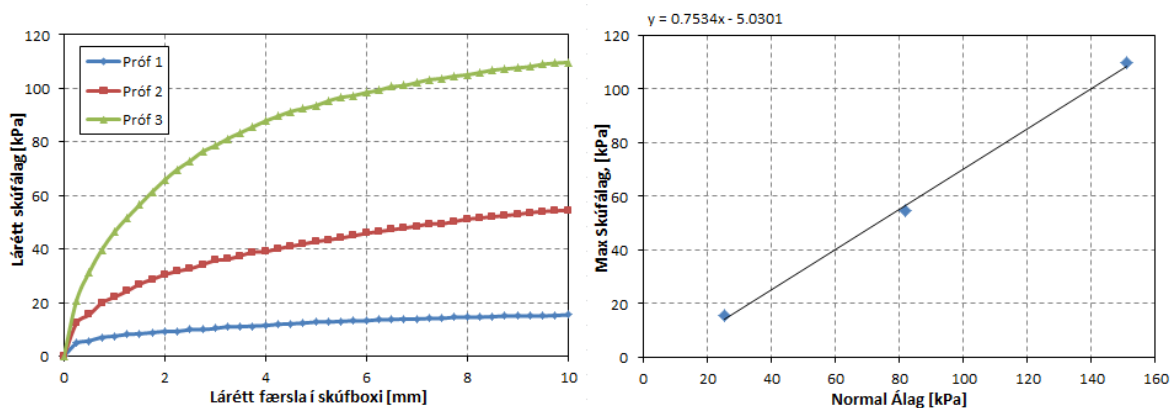
CPT mæligögnin fyrir borholurnar á Óseyrartanga sýna mikla einsleitni í hverri holu fyrir sig. Vatnsþrýstingurinn virðist vaxa nokkuð jafnt í þeim öllum og núningshlutfallið helst jafnt í gegnum prófið. Eina frávikkið virðist vera að í holu 4512, en núningshlutfallið þar er töluvert hærra en í hinum borholunum sem gæti verið orsakað af staðsetningu á þeirri holu. Þar sem nákvæmar staðsetningar borholanna liggja ekki fyrir er ekki hægt að ráða í það hvort staðsetning þeirra hafi áhrif á niðurstöður mælinga.

5.2 Skúfboxpróf

Tekin voru hreyfð sýni á öllum þremur mælistöðunum og framkvæmd á þeim tilrauna- stofupróf. Við ákvörðun um hvernig próf skal notað til að kanna skúfstyrk er fínefna- innhaldið stærsti þátturinn í ákvörðunartökunni um hvort eigi að nota kónpróf, skúfboxpróf eða þríasapróf. Flest sýnin voru sendin og því þótti heppilegt að framkvæma skúfboxpróf á þeim. Viðnámshorn jarðefnisins var svo ákvarðað út frá hámarksskúfálagi sem verkaði á sýnið á móti normalkrafti sama sýnis, viðnámshornið er svo reiknað út frá jöfnu bestu línu í gegnum punktana.

5.2.1 Hornafjarðarfljót

Þau sýni sem tekin voru við CPT tilraunarholurnar voru öll með mjög hátt fínefnainnihald, annars vegar 55-75% í tilraunaholu 13600 og hins vegar 25-75% í tilraunaholu 6860. Ákvörðun var tekin um að gera skúfboxpróf á því hólksýni sem var með lægsta fínefna- innihaldið, hólksýni 4 í holu 6860. Sýnið var þjappað í skúfboxið með 10,5% raka. Jarðefnasýnið þjappaðist á meðan keyrslu stóð sem einkennir fínefnarík jarðefni.



Mynd 30: Niðurstöður skúfboxprófs fyrir hólksýni CPT-6860-4, dýpt 3,7-4,4 m.

Þrátt fyrir að sýnið sem valið var væri með lægsta fínefnainnihaldið (25%) af sýnunum frá Hornafjarðarfljóti reyndist erfitt að fá góðar niðurstöður. Þetta orsakaðist af því að hámarksskúfstyrkur fannst ekki nákvæmlega þar sem sýnið var ennþá að taka á sig álag þegar hámarkskeyrslu var lokið eins og sjá má á mynd 30. Í töflu 7 má svo sjá helstu gildi sem fengust úr skúfboxprófunum frá Hornafjarðarfljóti.

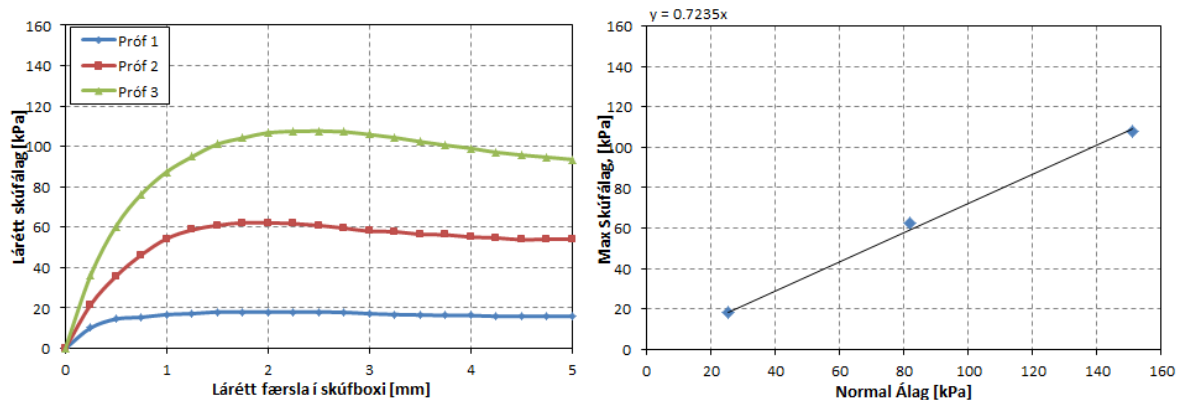
Tafla 7: Niðurstöðustærðir skúfboxprófs fyrir hólksýni CPT-6860-4 dýpt 3,7-4,4m

	Max skúfálag [kPa]	Normalálag [kPa]	Rakainnihald [%]	Viðnámshorn [°]	Samloðun [kPa]
Próf 1	15,45	25,56	10,62		
Próf 2	54,52	82,02	10,57	37,0	5,03
Próf 3	109,72	150,97	10,30		

5.2.2 Landeyjarhöfn

Jarðefnin við Landeyjarhöfn eru frekar einsleit samkvæmt niðurstöðum CPT mæligagna fyrir mæliholumnar þrjár sem gerðar voru í fjörunni. Sýni voru tekin af 0,5-1,0 m dýpi og gerð voru tvö skúfboxpróf, þar sem rakastigið við þjöppun var mismunandi. Jarðefnasýnin þjöppuðust lítillega saman í byrjun keyrslu, þó aldrei meira en 0,01 mm, en eftir það snérist það yfir í að þenjast út og vann gegn normalálaginu, en útþenslan mældist mest 0,41 mm. Öll sýnin sýndu þessa hegðun þrátt fyrir mismunandi þjöppun. Ekki fundust nein tengsl á milli útþenslu sýnisins og þess normalálags sem lagt var á það.

Fyrsta sýnið sem var skoðað var vel þjappað þurrt sýni, rakainnihaldið reyndist vera á bilinu 7,8-8,9%. Skúfstyrkurinn hækkaði að brotmörkum og fann svo jafnvægi við minna álag, eins og við mátti búast (mynd 31).



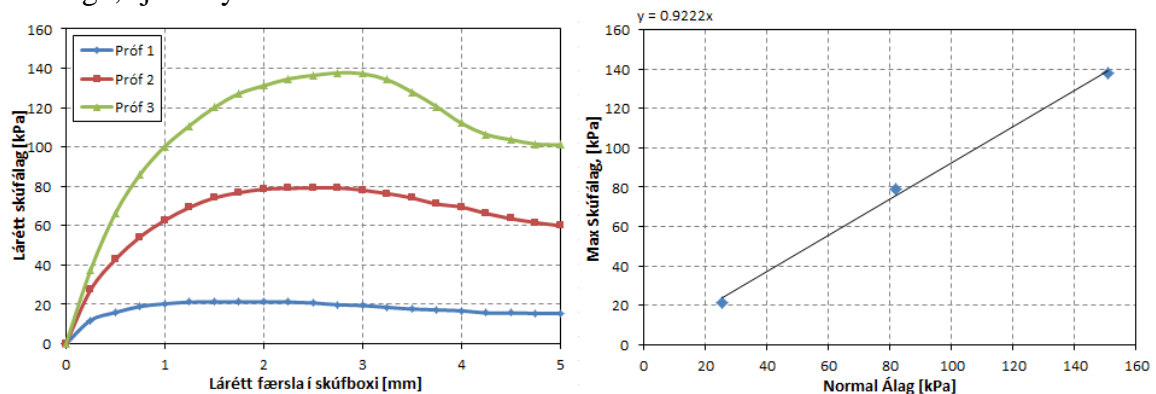
Mynd 31: Niðurstöður skúfboxprófs, sýni er þjappað vel við lágt rakastig.

Í töflu 8 má svo sjá helstu gildi sem fengust úr skúfboxprófunum þar sem sýnið var þjappað við lágt rakainnihald.

Tafla 8: Niðurstöðustærðir skúfboxprófs, sýni er þjappað vel við lágt rakastig.

	Max skúfálag [kPa]	Normalálag [kPa]	Rakainnihald [%]	Viðnámshorn [°]	Samloðun [kPa]
Próf 1	18,10	25,59	7,8		
Próf 2	62,25	82,04	8,3	35,9	0,0
Próf 3	107,73	150,99	8,9		

Sýni tvö var þjappað vel við hátt rakastig, rakainnihald á bilinu 26,4-26,8%. Prófið sýndi sömu hegðun og fyrri próf en sýndi töluverða hækkun á skúfstyrk eða allt að 27% aukningu, sjá á mynd 32.



Mynd 32: Niðurstöður skúfboxprófs, sýni er þjappað vel við hátt rakastig.

Í töflu 9 má svo sjá helstu gildin sem fengust úr skúfboxprófunum þar sem sýnið var þjappað við hátt rakainnihald.

Tafla 9: Niðurstöðustærðir skúfboxprófs, sýni er þjappað vel við hátt rakastig.

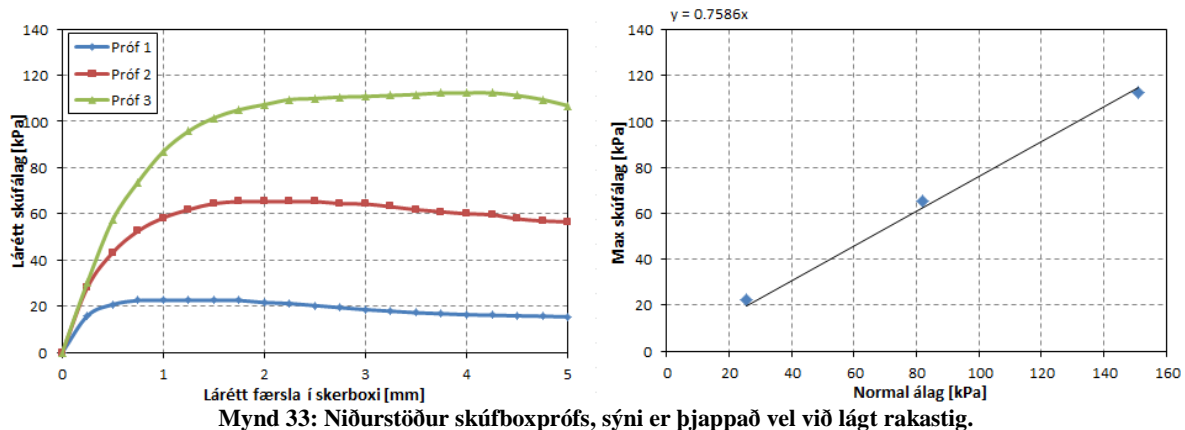
	Max skúfálag [kPa]	Normalálag [kPa]	Rakainnihald [%]	Viðnámshorn [°]	Samloðun [kPa]
Próf 1	21,19	25,64	26,78		
Próf 2	79,25	82,06	26,35	42,68	0,0
Próf 3	137,76	151,03	26,75		

Það sem kom mest á óvart þegar rakainnihald jarðefnisins var aukið þá hækkaði viðnámshorn jarðefnisins til muna. Þetta gefur til kynna hversu mörgum efniseiginleikum og jarðefnaeinkennum viðnámshornið er háð.

5.2.3 Óseyrartangi

Jarðefnin á Óseyrartanga er mjög einsleit samkvæmt niðurstöðum CPT mæligagna fyrir mæliholurnar þrjár sem gerðar voru á söndunum. Sýni voru tekin af 0,5-1,0 m dýpi og gerð voru þrjú skúfboxpróf með mismikilli þjöppun og þjappað við mishátt rakastig. Jarðefnasýnin þjöppuðust annað hvort lítillega saman í byrjun keyrslu eða héldu jafnvægi, þó aldrei meira en 0,03 mm, en eftir það snérist það yfir í að þenjast út og vann gegn normalálaginu. Útþenslan mældist mest 0,68 mm. Öll sýnin sýndu þessa hegðun þrátt fyrir mismunandi þjöppun. Ekki fundust nein tengsl á milli útþenslu sýnisins og þess normalálags sem lagt var á það.

Fyrsta sýnið sem var skoðað var vel þjappað þurrt sýni, rakainnihaldið reyndist vera um 3,9%. Keyrslan gekk eins og búist var við, skúfstyrkurinn hækkaði að brotmörkum og fann svo jafnvægi við minna álag, sjá mynd 33.

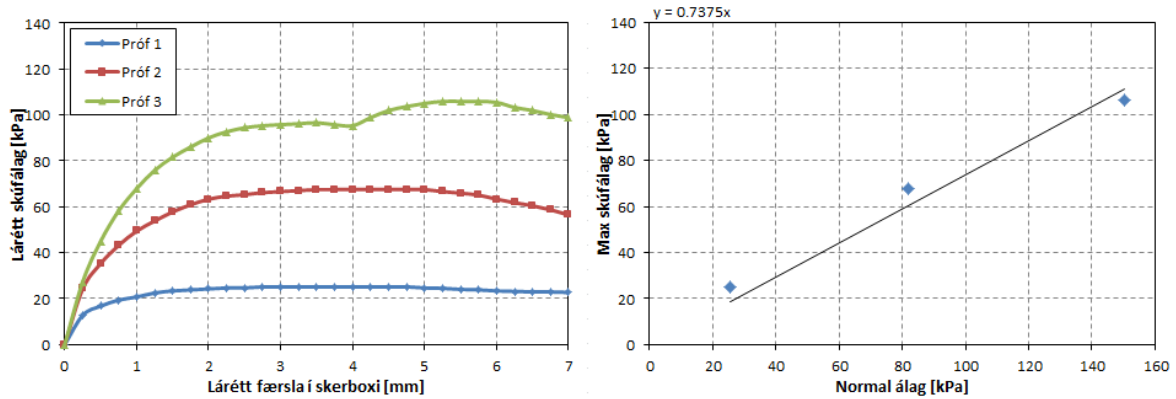


Í töflu 10 má svo sjá helstu gildi sem fengust úr skúfboxprófunum þar sem sýnið var vel þjappað við lágt rakainnihald.

Tafla 10: Niðurstöðustærðir skúfboxprófs, sýni er þjappað vel við lágt rakastig.

	Max skúfálag [kPa]	Normalálag [kPa]	Rakainnihald [%]	Viðnámshorn [°]	Samloðun [kPa]
Próf 1	22,51	25,60	3,9		
Próf 2	65,34	82,08	3,9	35,5	0,0
Próf 3	112,37	151,02	3,9		

Annað sýnið hegðaði sér svipað og það fyrsta, fyrir utan að þriðja prófið náði tveimur hágildum áður en það fann jafnvægi. Sýni tvö var þjappað lítið við lágt rakastig, rakainnihald á bilinu 2,9-3,8%, sem gæti hafa orsakað að skúfálagið var byrjað að falla áður en það reis aftur og fann hámarksildi, sjá mynd 34.



Mynd 34: Niðurstöður skúfboxprófs, sýni er þjappað lítið við lágt rakastig.

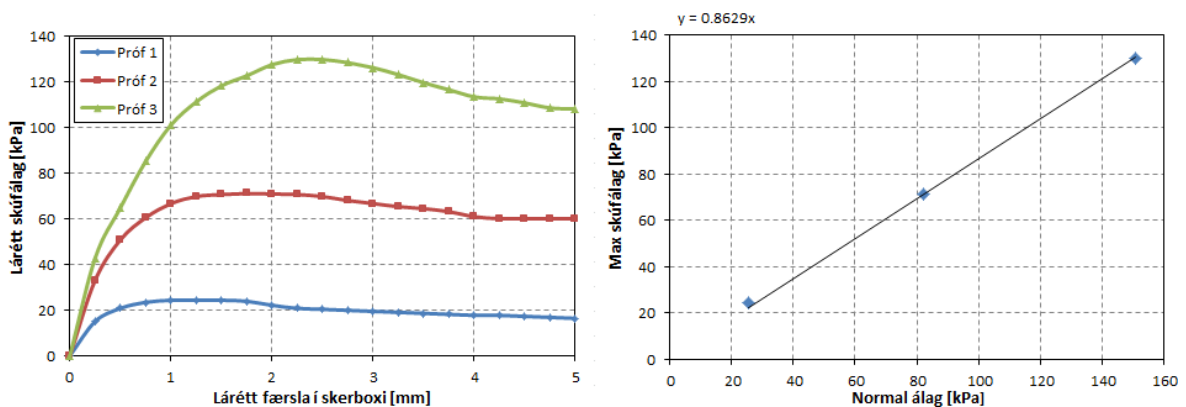
Í töflu 11 má svo sjá helstu gildi sem fengust úr skúfboxprófunum þar sem sýnið var lítið þjappað við lágt rakainnihald.

Tafla 11: Niðurstöðustærðir skúfboxprófs, sýni er þjappað lítið við lágt rakastig.

	Max skúfálag [kPa]	Normalálag [kPa]	Rakainnihald [%]	Viðnámshorn [°]	Samloðun [kPa]
Próf 1	25,17	25,56	3,8		
Próf 2	67,55	82,02	2,9	32,8	0,0
Próf 3	105,97	150,36	3,0		

Við samanburð á viðnámshorni og þjöppunaraðferð er ljós að því betur sem jarðefnin eru þjöppuð myndast betri skúfbinding á milli jarðefniskorna og út frá því má áætla að viðnámshorn jarðefnis hækki með dýpi vegna aukinnar þjöppunar.

Þriðja sýnið var þjappað vel með hærra rakainnihaldi en fyrri próf en rakainnihaldið var á bilinu 23,69-27,26%. Prófið sýndi sömu hegðun og fyrri próf en sýndi töluverða hækkun á skúfstyrk eða allt að 16% aukningu, sjá mynd 35.



Mynd 35: Niðurstöður skúfboxprófs, sýni er þjappað vel við hátt rakastig.

Í töflu 12 má svo sjá helstu gildi sem fengust úr skúfboxprófunum þar sem sýnið var vel þjappað við hátt rakainnihald.

Tafla 12: Niðurstöðustærðir skúfboxprófs, sýni er þjappað vel við hátt rakastig

	Max skúfálag [kPa]	Normalálag [kPa]	Rakainnihald [%]	Viðnámshorn [°]	Samloðun [kPa]
Próf 1	18,10	25,62	27,26		
Próf 2	62,25	82,08	25,17	42,9	0,0
Próf 3	107,73	151,03	23,69		

Við samanburð á viðnámshorni og rakainnihaldi jarðefnis er ljóst að því hærra rakainnihald sem jarðefnin eru þjöppuð við myndast betri skúfbinding á milli jarðefniskorna. Trúlega fæst þá betri þjöppun í jarðefninu sem skilar hærra viðnámshorni.

5.3 Kónpróf

Gerð voru nokkur kónpróf á hólksýnum frá Hornafjarðarfljóti til samanburðar við önnur próf bæði á tilraunstofu og úti í mörkinni. Markmið prófsins er að finna ódreneraðan skúfstyrk jarðefnisins sem má taka sem samloðun jarðefnisins. Aðeins var hægt að gera kónprófið á tveimur sýnum af þeim þremur sem voru ákveðin í upphafi, þetta orsakaðist vegna hversu hátt rakainnihald var í einu sýninu, sem gerði það ómögulegt að undirbúa sýnið við sömu aðstæður og jarðefnasýnið var mælt við úti í mörkinni.

Gert var kónpróf á hólksýni af 2,8-3,5m dýpi úr borholu 6860, mælt rakainnihald sýnis frá prófstað reyndist vera 38% og fínefnainnihald 41,7%. Við prófun var næst léttasti kóninn notaður. Það reyndist erfitt að mæla ódreneraða skúfstyrkinn með búnaðnum, í hvert skipti sem kóninum var sleppt í miðju sýnis þrýstist sýnið upp með hliðum prófglassins, þar sem ekki var nein fyrirstaða þar til að koma í veg fyrir slíka breytingu. Þetta gerði það að verkum að það leit út fyrir að kóninn færi mun dýpra í sýnið en í raun og veru. Við þetta varð aflesturinn erfiður og ónákvæmur. Niðurstöður mælinga má sjá í töflu 13.

Tafla 13: Niðurstöður kónprófs fyrir hólksýni 2,8-3,5 borholu 6860.

	Próf 1	Próf 2	Próf 3
Þyngd kóns (g)	60	60	60
Horn kóns (°)	60	60	60
Aflestur (mm)	15,4	14,5	14,2
Ódreneraður skúfstyrkur (kPa)	0,98	1,08	1,18

Gert var kónpróf á hólksýni af 4,1-4,8 m dýpi úr borholu 13600. Mælt rakainnihald sýnis frá prófstað reyndist vera 41,5% og fínefnainnihald 69,6 %. Við prófun var léttasti kóninn notaður. Mun auðveldara reyndist að mæla ódreneraða skúfstyrkinn í sýni frá holu 13600 en úr 6860, þar sem ekki komu upp sömu vandamál með að sýnið væri að þrýstast upp úr mótinu. Niðurstöður mælinga má sjá í töflu 14.

Tafla 14: Niðurstöður kónprófs fyrir hólksýni 4,1-4,8 borholu 13600.

	Próf 1	Próf 2	Próf 3
Þyngd kóns (g)	10	10	10
Horn kóns (°)	60	60	60
Aflestur (mm)	6,4	6,2	6,3
Ódreneraður skúfstyrkur (kPa)	0,98	0,98	0,98

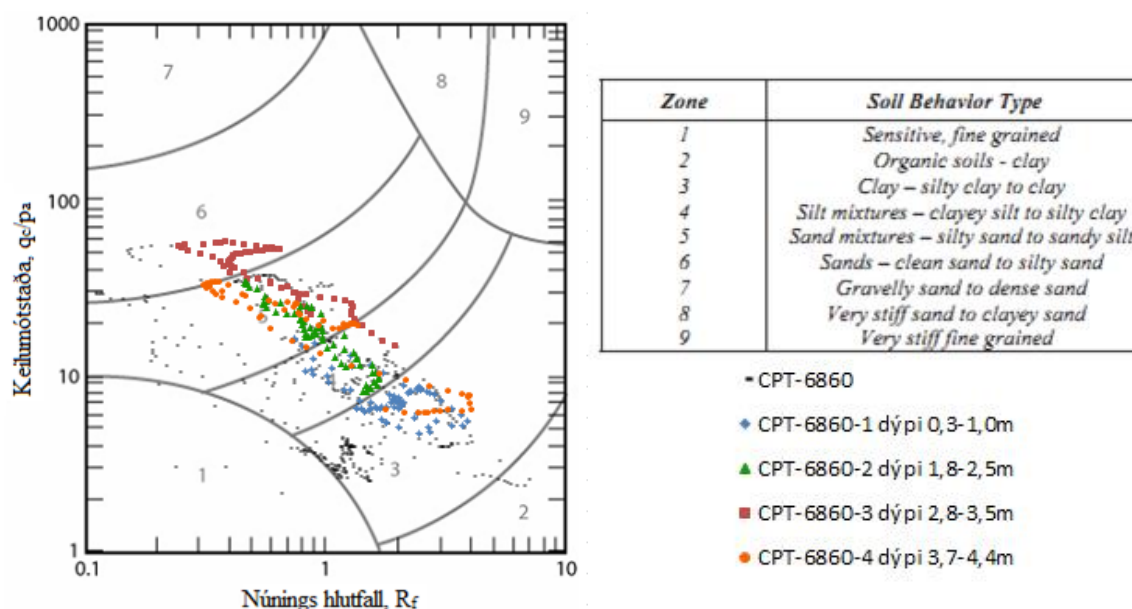
Þriðja sýnið sem átti að gera kónpróf á var hólksýni af 1,8-2,5m úr borholu 6860. Mælt rakainnihald sýnis frá prófstað reyndist vera 60,6% og fínefnainnihaldið 56,9%. Án álagsins sem verkar á sýnið á prófstað var ekki hægt að undirbúa sýnið fyrir kónprófið, þar sem sýnið var rakametað og tók ekki við meiri raka án álagsins.

5.4 Flokkun jarðefna

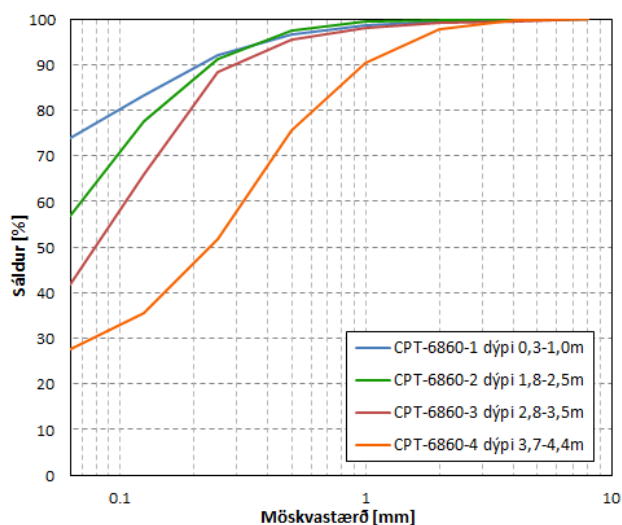
Við flokkun jarðefna út frá CPT mælingum eru punktar teiknaðir upp innan flokkunargrafs (Das, 2010). Til er fjöldinn allur af flokkunargröfum fyrir CPT mælingar, en munurinn á þeim er háður þeim breytum sem notaðar eru til að staðsetja punktana. Val á grafi getur verið háð þeim efniseiginleikum sem skoðaðar eru, en í þessu verkefni var valið eftirfarandi graf vegna þess hversu nálægt breyturnar eru hráum aflestrargögnum og tapast þá minna út í reikniskekkjum. Til samanburðar var USCS aðferðin notuð en þar var áætlaður einn flokkur fyrir ákveðið bil og kannað hvort flokkurinn væri innan sambærilegs bils með CPT mælingum.

5.4.1 Hornafjarðarfljót

Flokkun jarðefna úr borholunum sem tekin voru við Hornafjarðarfljót sýndi fram á mikla lagsskipting jarðefna.



Mynd 36: Flokkun jarðefna út frá CPT mælingu úr holu 6860.



Mynd 37: Kornakúrfur fyrir öll hólksýni CPT-6860.

Þegar niðurstöður kornakúrfana ú borholu 6860 á mynd 37 eru skoðaðar sést að nægjanleg gögn fást ekki til að ákvarða gæði kornakúrfunar vegna þess hversu hátt fínefnainnihald sýnanna er. Til að ákvarða flokk kornakúrfanna var gerð leysimæling á fínefnum á tveimur sýnum úr CPT tilraunaholu 6860. Leysimæling til að ákvarðar fínefnastærðina. Niðurstöður fínefnagreiningarinnar má sjá á myndum 56 og 57 í Viðauka C.

Mynd 36 sýnir hvernig jarðefnin flokkast úr CPT borholu 6860. Sérstaklega er gerð grein fyrir hólksýnum sem voru tekin til að sýna samanburð við USCS aðferðina. Töflur 15 og 16 sýna greiningu á gæðum dreifingarinnar og flokkun jarðefnisins út frá báðum aðferðum til samanburðar. Í töflu 15 má sjá að það vantar mikið af gildum sem notuð eru til að ákvarða gæði kornakúrfunar, þetta gerist þegar fínefnainnihald fer yfir 10%. Þegar þessum mörkum í jarðefni með samloðunareiginleika er náð er Atterbergmörk fundin til að flokka jarðefnin. Í borholu 6860 voru öll hólksýnin með fínefnainnihald á bilinu 25-75%.

Tafla 15: Niðurstöður kornakúrfugreiningar á sýnum CPT-6860.

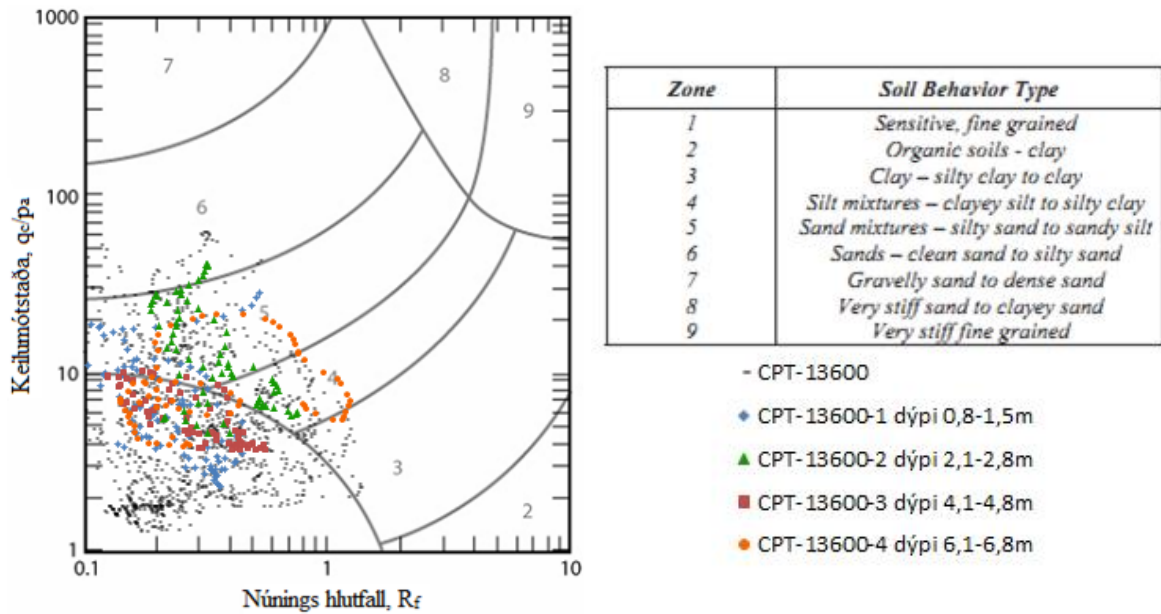
Sýni	Dýpi [m]	D ₁₀ [mm]	D ₃₀ [mm]	D ₆₀ [mm]	C _u	C _c	USCS Flokkun
CPT-6860-1	0,3-1,0	x	x	x	x	x	ML – Silti
CPT-6860-2	1,8-2,5	x	x	0,07	x	x	ML – Silti
CPT-6860-3	2,8-3,5	x	x	0,11	x	x	SM – Siltríkur sandur
CPT-6860-4	3,7-4,4	x	0,08	0,34	x	x	SM – Siltríkur sandur

Í töflu 16 má sjá samanburðar flokkun út frá CPT niðurstöðum.

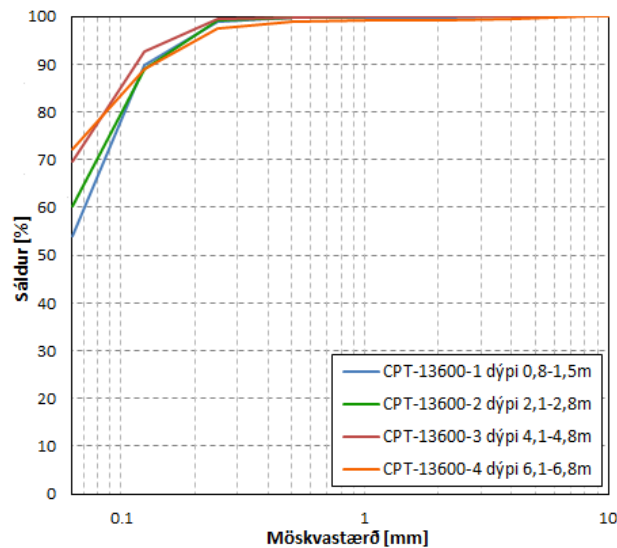
Tafla 16: Niðurstöður CPT flokkunar á sýnum CPT-6860.

Sýni	Dýpi [m]	Flokkur	CPT Flokkun
CPT-6860-1	0,3-1,0	3-5	Sandblöndur - silti með leir
CPT-6860-2	1,8-2,5	4-5	Sandblöndur - siltblöndur
CPT-6860-3	2,8-3,5	4-6	Siltríkur sandur - siltblöndur
CPT-6860-4	3,7-4,4	3-5	Sandblöndur - silti með leir

Niðurstöður beggja aðferða eru að flokka jarðefnin í svipaða flokka og þar af auki er flokkun kornakúrfugreiningarinnar innan þess ramma sem CPT-flokkunin hefur sett fyrir hvert sýni, út frá því má áætla að um ákveðið meðalgildi flokkunar sé að ræða þegar USCS flokkunin er skoðuð. Flokkunin breytist ört með dýpi eins og sést í flokkun í töflu 16. Út frá flokkun má áætla að fínefnainnihald jarðefna á svæðinu sé mjög hátt og jarðefnið alls ekki einsleitt.



Mynd 38: Flokkun jarðefna út frá CPT mælingu úr holu 13600.



Mynd 39: Kornakúrfur fyrir öll hólksýni CPT-13600.

Mynd 38 sýnir hvernig jarðefnin flokkast úr CPT borholu 13600, sérstaklega er gert grein fyrir hólksýnum sem voru tekin til að sýna samanburð við USCS aðferðina, Á mynd 39 eru kornakúrfuferlar CPT borholu 13600 við Hornafjarðafliót. Tölur 17 og 18 sýna greiningu á gæðum dreifingarinnar og flokkun jarðefnisins út frá báðum aðferðunum til samanburðar.

Eins og fyrir CPT tilraunaholu 6860 þurfti að gera fínefnamælingu fyrir CPT tilraunaholu 13600. Eitt sýni úr holu 13600 var tekið og gerð á því leysimæling til að ákvarða fínefnastærðina, (mynd 58 í Viðauka C).

Í töflu 17 má sjá að það vantar mikið af gildum sem notuð eru til að ákvarða gæði kornakúrfunar, en það er óþarfi að skoða það þegar fínefnainnihald fer yfir 10%. Þegar þessum mörkum er náð er Atterbergmörk notuð til að flokka jarðefnin sem eru með hærri fínefnainnihald. Öll hólksýnin voru á bilinu 55-75% og vegna þess detta öll gildin út.

Tafla 17: Niðurstöður kornakúrfugreiningar á sýnum CPT-13600.

Sýni	Dýpi [m]	D ₁₀ [mm]	D ₃₀ [mm]	D ₆₀ [mm]	C _u	C _c	USCS Flokkun
CPT-13600-1	0,8-1,5	x	x	0,07	x	x	ML – Silti
CPT-13600-2	2,1-2,8	x	x	x	x	x	ML – Silti
CPT-13600-3	4,1-4,8	x	x	x	x	x	ML – Silti
CPT-13600-4	6,1-6,8	x	x	x	x	x	ML – Silti

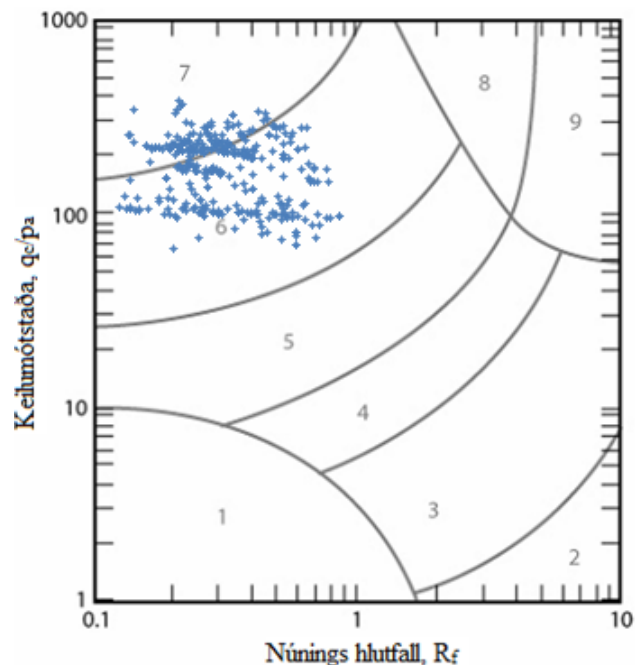
Í töflu 18 má sjá samanburðar flokkun út frá CPT niðurstöðum.

Tafla 18: Niðurstöður CPT flokkunar á sýnum CPT-13600.

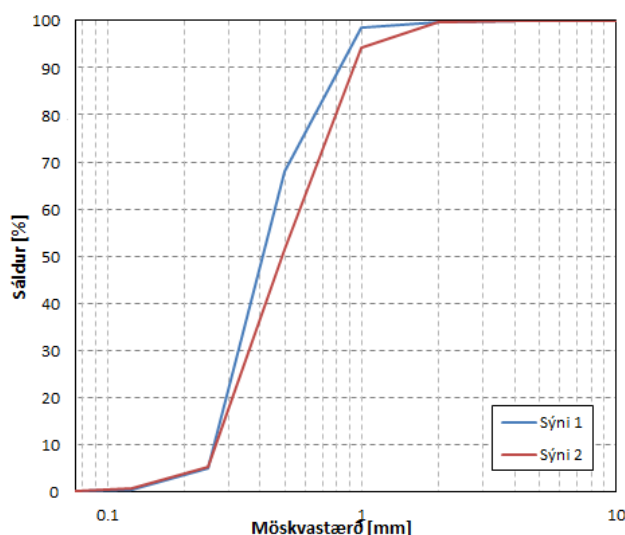
Sýni	Dýpi [m]	Flokkar	CPT Flokkun
CPT-13600-1	0,8-1,5	1 og 5	Fínefni og siltríkur sandur
CPT-13600-2	2,1-2,8	1 og 4-6	Fínefni og siltríkur leir - siltríkur sandur
CPT-13600-3	4,1-4,8	1 og 5	Fínefni og siltríkur sandur
CPT-13600-4	6,1-6,8	1 og 4-5	Fínefni og siltríkur leir - siltríkur sandur

5.4.2 Landeyjarhöfn

Við flokkun jarðefna úr tilraunaholunum frá Landeyjarhöfn var sá grunur staðfestur að jarðefnin í fjörunni væru mjög einsleit. Mynd 40 sýnir hvernig hver punktur er að raðast innan flokka 6 og 7, sem segir það að sandur er í miklum meirihluta með mismiklu magni af grófari jarðefnum. Á mynd 49 í viðauka A má svo sjá aðrar tilraunaholur af svæðinu flokkast að stærstum hluta í sömu flokka þó að eitthver frávik hafi myndast.



Mynd 40: Flokkun jarðefna út frá CPT mælingu úr holu 5373.



Mynd 41: Kornakúrfra jarðefnasýna frá Landeyjarhöfn.

Á mynd 41 eru sýndar kornakúrfur úr tveimur mismunandi sýnum teknum af mismunandi stöðum við Landeyjarhöfn, en sýnin voru tekin af 0,5-1,0 metra dýpi. Eins og sjá má á mynd 41 er fínefnainnihaldið mjög lágt, eða í kringum 0,5-1,0%, og jarðefnið sem um ræðir er einsleitur sandur eða sandur með slæma kornakúrfu samkvæmt flokkun í töflu 19, sem má áætla að sé ríkjandi á staðnum af kornakúrfunum tveimur að dæma.

Tafla 19: Niðurstöður kornakúrfugreiningar á sýnum frá Landeyjarhöfn.

Sýni	Dýpi [m]	D ₁₀ [mm]	D ₃₀ [mm]	D ₆₀ [mm]	C _u	C _c	USCS Flokkun
Sýni 1	0,5-1,0	0,26	0,35	0,47	1,8	1,0	SP – Sandur með slæma kornakúrfu
Sýni 2	0,5-1,0	0,27	0,39	0,6	2,2	0,9	SP – Sandur með slæma kornakúrfu

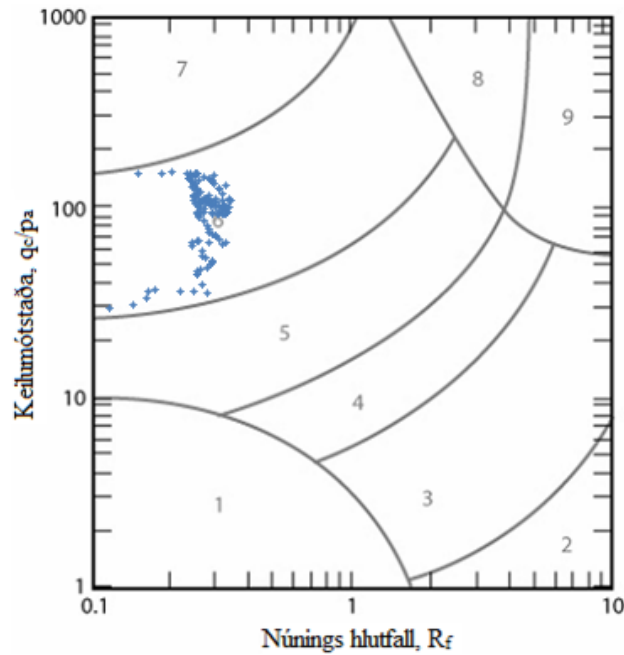
Ólíkt sýnum frá Hornafjarðarfljóti fengust gildi til að ákvarða gæði kornakúrfunar. Kornakúrfan reyndist vera einkorna sem má rekja til þess að sama kornastærðin er ríkjandi á svæðinu. Í töflu 20 má sjá samanburðar flokkun út frá CPT niðurstöðum.

Tafla 20: Niðurstöður CPT flokkunar frá Landeyjarhöfn.

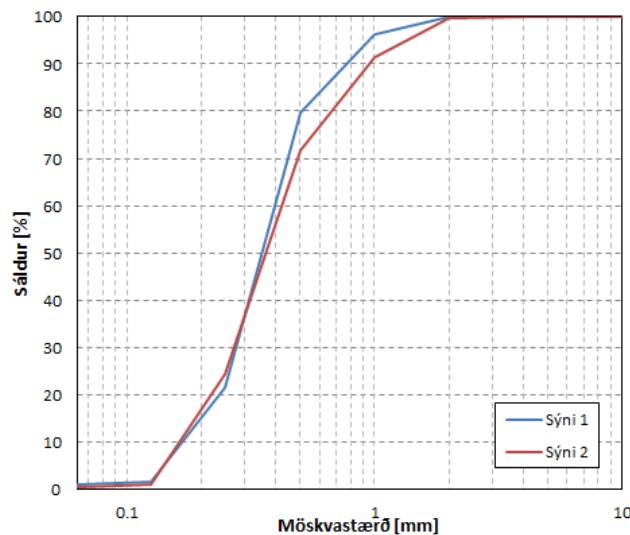
Sýni	Dýpi [m]	Flokkur	CPT Flokkun
5371	0-4,44	5-7	Þéttur sandur - sandblanda
5373	0-7,2	6-7	Þéttur sandur - hreinn sandur
5376	0-4,14	5-7	Þéttur sandur - sandblanda

5.4.3 Óseyrartangi

Líkt og í tilraunaholunum við Landeyjarhöfn var gert ráð fyrir að jarðefni á Óseyrartanga væri mjög einsleitur, sem var svo staðfest með flokkun út frá CPT gögnum. Mynd 42 sýnir hvernig allir punktarnir hafa raðast innan flokks 6, sem segir það að jarðefnið er flokkað sem sandur eða hreinn sandur til siltkennds sands. Á mynd 51 í viðauka A má svo sjá aðrar tilraunaholur af svæðinu sem flokkast að mestu leyti í flokk 6. Efni úr holu 4512 eru þó að hluta til í flokki 5, sem gefur til kynna að meira fínefni er í borholunni en í hinum tilraunaholunum.



Mynd 42: Flokkun jarðefna út frá CPT mælingu úr holu 4515.



Mynd 43: Kornakúrfur fyrir sýni frá Óseyratanga.

Á mynd 43 eru sýndar kornakúrfur úr tveimur mismunandi sýnum teknum af mismunandi stöðum á Óseyratanga. Sýnin voru tekin af 0,5-1,0 metra dýpi. Eins og sjá má á mynd 43 er fínefnainnihaldið mjög lágt eða í kringum 0,5-1,0% og jarðefnið sem um ræðir er einsleitur sandur eða sandur með slæma kornakúrfu samkvæmt flokkun í töflu 21, sem má áætla að sé ríkjandi á staðnum af kornakúrfunum tveimur að dæma.

Tafla 21: Niðurstöður kornakúrfugreiningar á sýnum frá Óseyratanga.

Sýni	Dýpi [m]	D ₁₀ [mm]	D ₃₀ [mm]	D ₆₀ [mm]	C _u	C _c	USCS Flokkun
Sýni 1	0,5-1,0	0,18	0,29	0,42	2,3	1,1	SP – Sandur með slæma kornakúrfu
Sýni 2	0,5-1,0	0,17	0,28	0,44	2,5	1,0	SP – Sandur með slæma kornakúrfu

Kornakúrfan reyndist vera mjög einskorna, sem má rekja til þess að sama kornastærðin er mjög ríkjandi á svæðinu. Í töflu 22 má sjá samanburðar flokkun út frá CPT niðurstöðum.

Tafla 22: Niðurstöður CPT flokkunar frá Óseyrartanga.

Sýni	Dýpi [m]	Flokkur	CPT Flokkun
4509	0-3,24	6	Hreinn sandur
4512	0-6,92	5-6	Hreinn sandur - sandblanda
4515	0-3,48	6	Hreinn sandur

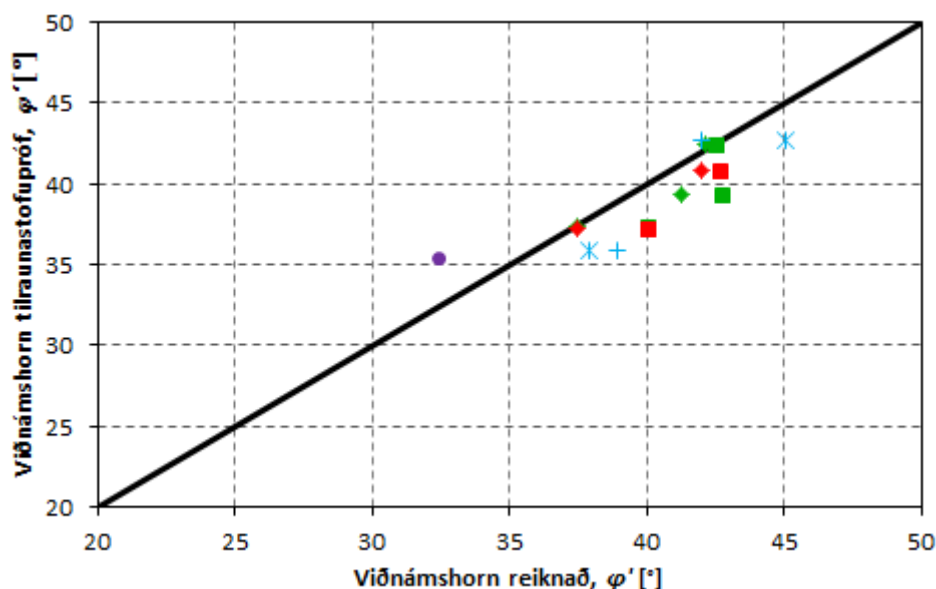
Báðar aðferðir eru að gefa nánast sömu niðurstöður og út frá því má áætla að sandurinn á Óseyrartanga sé mjög einsleitur þar sem sömu kornastærðirnar eru mjög ráðandi.

6 Samanburður CPT prófa við önnur próf

6.1 Viðnámshorn

Skoðaðar voru þrjár aðferðir til að ákvarða viðnámshorn jarðefnis út frá niðurstöðum CPT prófa. Aðferðirnar notast við ólíka þætti úr niðurstöðum CPT prófana til að ákvarða efniseiginleikana. Þá var notast við gömul þríásapróf sem gerð voru á stöðunum til að tryggja betri samanburð (Almenna Verkfræðistofan hf, 1980).

Á mynd 41 má sjá fyrstu aðferðina sett upp út frá reynslujöfnu Kulhawy og Mayne (jafna 3-9). Þessi reynslujafna er sú einfaldasta af þeim þremur sem skoðaðar eru í þessu verkefni, þar sem hún er aðeins háð einni breytu.



Mynd 44: CPT niðurstöður bornar saman við viðnámshorns reynslujöfnu Kulhawy og Mayne.

Punktarnir á mynd 44 voru ákvarðaðir út frá tveimur mismunandi tilraunum. Sundurliðun punktanna, uppruna og notuð samanburðaraðferð má sjá í töflu 23.

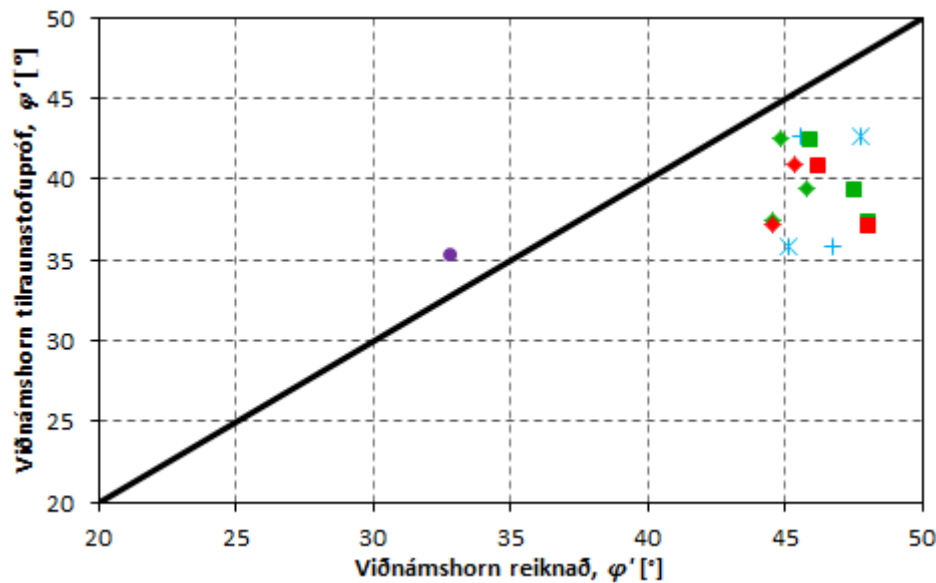
Tafla 23: Sundurliðun CPT borhola.

Staður	Borhola	Punktur	Samanburðaraðferð
Hornafjarðarfliót	6860	●	Skúfboxpróf
Óseyrartangi	4509	■	Skúfboxpróf
Óseyrartangi	4515	◆	Skúfboxpróf
Óseyrartangi	4509	■	Þríásapróf
Óseyrartangi	4515	◆	Þríásapróf
Landeyjarhöfn	5371	+	Skúfboxpróf
Landeyjarhöfn	5376	*	Skúfboxpróf

Hver borhola gaf eitt til þrjú gildi sem voru felld að ferli reynslujöfnunar. Viðnáms horns gildin voru sett upp út frá mismunandi rakainnihaldi. Grunnvatnsyfirborð var áætlað á um 0,5m dýpi þar sem allir ákvörðunarstaðirnir voru nálægt sjó eða á, rakainnihald á því bili var áætlað 0-30%. Önnur skipti milli flokka voru sett föst í 1,5m, áætlað rakainnihaldið á því bili var 30-80%. Reiknað var svo með því að rakainnihald myndi aukast jafnt og þétt þar til 100% væri náð.

Á mynd 44 má sjá að fylgni við miðlínu og voru punktar að staðsetjast jafnt báðum megin við miðlínu, en reiknað R^2 reyndist vera 0,6848 fyrir reynslujöfnuna. Niðurstöður CPT prófana gefur mjög svipað viðnáms horn og viðnáms hornin sem fengust úr samanburða prófum á tilraunastofu.

Á mynd 45 er viðnáms hornið áætlað með jöfnu Robertson og Campenella (jafna 3-10). Þessi reynslujafna er mjög háð mótstöðu jarðefnisins. Jafnan er háð tveimur breytum svo farin var sú leið að festa aðra breytuna og greina í sundur CPT niðurstöðurnar sem fylgja hverri línu.

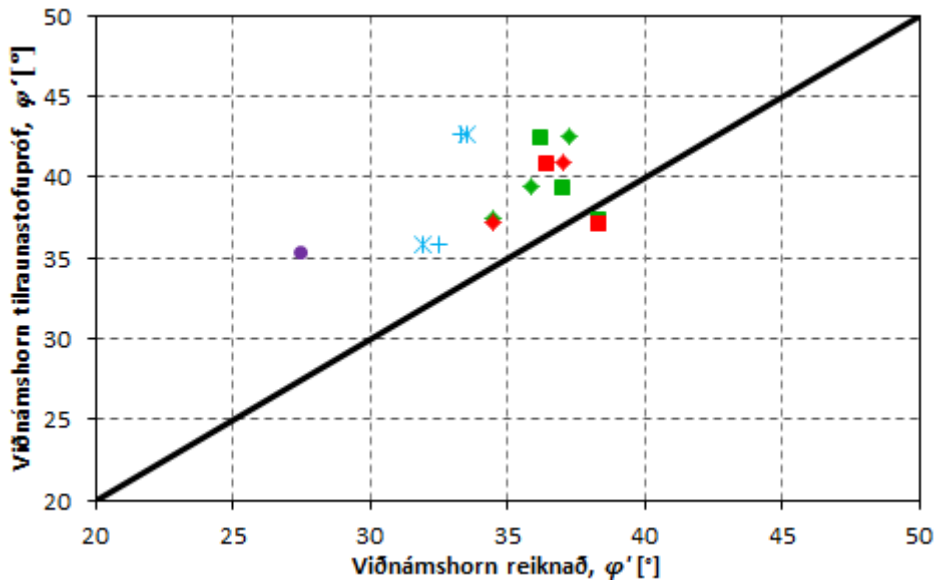


Mynd 45: CPT niðurstöður bornar saman við viðnáms horns reynslujöfnu Robertson og Campenella.

Punktarnir á mynd 45 voru ákvarðaðir út frá tveimur mismunandi tilraunum. Sundurliðun punktanna, uppruna og notuð samanburðaraðferð má sjá í töflu 23. Hver borhola gaf eitt til þrjú gildi sem voru felld að ferli reynslujöfnunar. Viðnáms horns gildin voru sett upp út frá mismunandi rakainnihaldi. Grunnvatnsyfirborð var áætlað á um 0,5m dýpi þar sem allir ákvörðunarstaðirnir voru nálægt sjó eða á, rakainnihald á því bili var áætlað 0-30%. Önnur skipti milli flokka voru sett föst í 1,5m, áætlað rakainnihald á því bili var 30-80%. Reiknað var svo með því að rakainnihald myndi aukast jafnt og þétt þar til 100% væri náð.

Punktarnir féllu illa að ferlinum og erfitt reyndist að ná góðri fylgni, en reiknað R^2 reyndist vera 0,1183 fyrir reynslujöfnuna. Voru niðurstöður CPT prófana að gefa mun hærri viðnáms horn en viðnáms horn sem fengust úr samanburðarprófum á tilraunastofu.

Á mynd 46 er svo þriðja aðferðin sett upp, en hún er sett upp út frá endurbættri reynslujöfnu Maynes fyrir viðnáms horn(jafna 3-12). Þessi reynslujafna er mjög háð rakainnihaldi jarðefnisins, jafnan er háð tveimur breytum svo farin var sú leið að festa aðra breytuna og greina í sundur CPT niðurstöðurnar sem fylgja hverri línu.



Mynd 46: CPT niðurstöður bornar við endurbætta viðnámshorns reynslujöfnu Mayne.

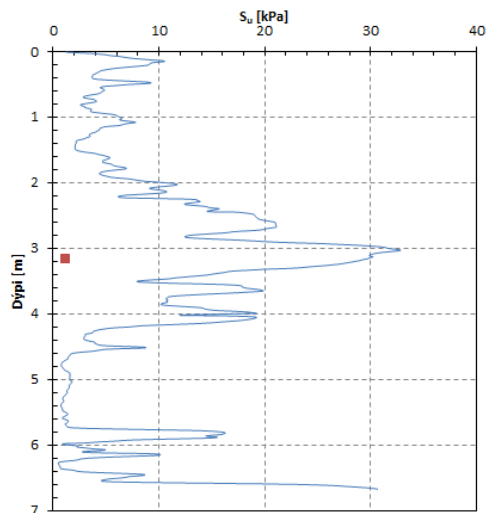
Punktarnir á mynd 46 voru ákvarðaðir út frá tveimur mismunandi tilraunum. Sundurliðun punktanna, uppruna og notuð samanburðaraðferð má sjá í töflu 23. Hver borhola gaf eitt til þrjú gildi sem voru felld að ferli reynslujöfnunar. Viðnámshorns gildin voru sett upp út frá mismunandi rakainnihaldi. Grunnvatnsyfirborð var áætlað í um 0,5m þar sem allir ákvörðunarstaðirnir voru nálægt sjó eða á, rakainnihald á því bili var áætlað 0-30%. Önnur skipti milli flokka voru sett föst í 1,5m, áætlað rakainnihald á því bili var 30-80%. Reiknað var svo með því að rakainnihald myndi aukast jafnt og þétt þar til 100% væri náð.

Punktarnir féllu illa að ferlinum og erfitt reyndist að ná góðri fylgni, en reiknað R^2 reyndist vera 0,1529 fyrir reynslujöfnuna. Voru niðurstöður CPT prófana að gefa mun lægri viðnámshorn en viðnámshorn sem fékkst úr samanburðarprófum á tilraunastofu.

6.2 Ódreneraður skúfkraftur

Við skoðun á samanburðaraðferðum fyrir ódreneraðan skúfstyrk var aðeins ein aðferð skoðuð. Ekki var mikið um upplýsingar til að bera saman við niðurstöður CPT prófanna, en gerð voru tvö kónpróf til samanburðar.

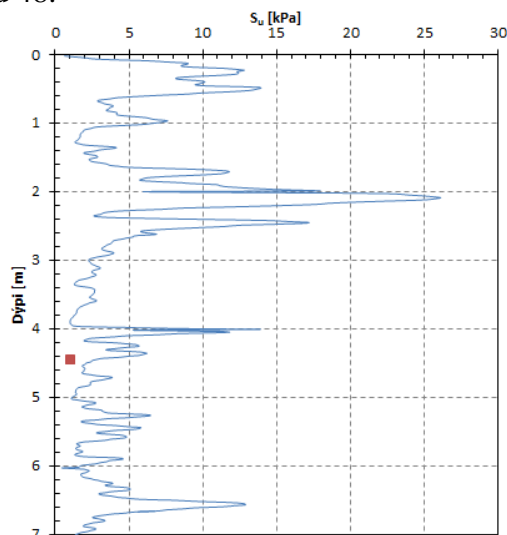
Gert var kónpróf á sýni sem var tekið á bilinu 2,8 til 3,5 metra dýpi úr CPT borholu 6860 frá Hornafjarðafljóti. Sýnið kom blandað á tilraunastofu og var því prófið gert á hreyfðu sýni. Gerðar voru þrjár prófanir á sýninu og meðaltal tekið á stífninni sem var svo bætt inn á graf með ódreneruðum skúfstyrk efnisins í borholunni, en samanburð punktsins við graf borholunar má sjá á mynd 47.



Mynd 47: Ódreneraður skúfstyrkur í jarðlögum CPT borholu 6860.

Punkturinn sem fékkst við kónprófið passaði sérstaklega illa við feril ódreneraða skúfstyrksins. Það eru nokkrar ástæður sem gætu orsakað þessa miklu skekkju. Þar má fyrst nefna reynsluleysi skoðunarmanns. Blöndun sýnisins getur haft áhrif þar sem greinilega er mikill mismunur á jarðefnum á því bili sem sýnið var tekið. Einnig getur það sett strik í reikninginn að jarðefnasýnið er ekki nákvæmlega undir sömu áhrifum og á prófstað og svo getur verið að kónprófið henti einungis til að gefa grófa mynd hvað gildið getur verið. Í hvert skipti sem keilunni var sleppt í jarðefnið þrýstist jarðefnið upp með hliðum prófsívalningsins sem gerði það að verkum að við aflestur leit út fyrir að keilan hafi farið dýpra í sýnið en í raun og veru.

Gert var kónpróf á sýni sem var tekið á bilinu 4,1 til 4,8 metra dýpi úr CPT borholu 13600 frá Hornafjarðafljóti. Sýnið kom blandað á tilraunastofu og var því prófið gert á hreyfðu sýni. Gerðar voru þrjár prófanir á sýninu og meðaltal tekið á stífninni sem var svo bætt inn á graf með ódreneruðum skúfstyrk efnisins í borholunni, en samanburð punktsins við graf borholunar má sjá á mynd 48.



Mynd 48: Ódreneraður skúfstyrkur í jarðlögum CPT borholu 13600.

Punkturinn sem fékkst úr kónprófinu passaði ágætlega við þann hluta ferilsins sem hólksýnið var tekið. Ekki komu upp sömu vandamál og í fyrra prófinu þar sem sýnið þrýstist upp með hliðum prófsívalningsins.

6.3 Túlkun á niðurstöðum

Eins og reiknað var með þá voru íslensk jarðefni ekki frábrugðin öðrum þegar ákvarðað hvaða próf hentudu best til að tryggja sem mesta nákvæmni og hagkvæmni í ákvörðun á efniseiginleikum jarðefna. Skúfboxpróf voru að gefa góða nákvæmni á meðan fínefnainnihald jarðefnisins var lágt, en um leið og það hækkaði byrjaði nákvæmni prófsins að minnka, en það er vegna þess að búnaðurinn nær ekki að keyra jarðefnið að brotmörkum. Við hækkaði fínefnainnihald eykst hagkvæmni þess að nota þríasapróf sem gefur mun betri niðurstöður fyrir fínefnarík jarðefni, en prófið er mun dýrara í framkvæmd.

Eftir að hafa skoðað prófin (skúfboxpróf, þríasapróf og kónpróf) og borið þau saman við niðurstöður úr CPT prófunum var hægt að gera sér ákveðna hugmynd hverjar niðurstöðurnar séu. Í verkefninu voru aðeins skoðaðar niðurstöður frá þremur prófstöðum sem er ákveðin takmörkun. Niðurstöðurnar gefa þó til kynna að æskilegt sé að halda áfram rannsóknum á þessu sviði til að geta svarað því hvort reynslujöfnurnar henti fyrir íslenskar aðstæður eða hvort þurfi að endurskoða og aðlaga þær að íslenskum jarðefnum.

Jarðefni frá prófstöðunum þremur voru flokkuð út frá grunnmælingum CPT prófsins. Niðurstöðurnar voru bornar saman við flokkun jarðefnisins út frá USCS flokkun og voru niðurstöðurnar að koma vel út. Öll sýnin flokkuðust undir sömu jarðefnaflokkana með báðum flokkunaraðferðunum. Munurinn var þó að CPT flokkunin flokkar jarðefnið fyrir marga punkta með dýpi í borholunum á meðan USCS aðferðin flokkar eitt sýni í einn jarðefnaflokk.

Byrjað var á að skoða reynslujöfnur fyrir viðnámshorn, þar voru þrjár aðferðir skoðaðar og bornar saman við samanburðaraðferðir sem voru skúfboxpróf og þríasapróf. Af aðferðunum þremur var aðeins ein sem hafði góða fylgni við miðlínu á milli aðferðanna tveggja. Aðferðin sem kom best út var reynslujafna Kulhawy og Mayne, en aðrar aðferðir sem voru skoðaðar voru reynslujafna Robertson og Campenella, en sú reynslujafna var að gefa mun hærri viðnámshorn en samanburðaraðferðir, og endurbætt reynslujafna Mayne, en sú reynslujafna var að gefa mun lægri viðnámshorn en samanburðaraðferðir. Reiknaðir voru R^2 stuðull punktana fyrir hverja aðferð og styrku þær niðurstöður sem fengust hér á undan, en þar kom reynslujafna Kulhawy og Mayne best út með $R^2=0,6848$, á meðan reynslujafna Robertson og Campenella var með $R^2=0,1183$ og endurbætt reynslujafna Mayne var með $R^2=0,1529$

Frávik sem áætlað er að hafi áhrif á niðurstöður mælinga, samanburðaraðferðir ekki nægjanlega nákvæmar, staðsetningar borhola lágu ekki fyrir, engin gögn voru til um grunnvatnsstöðu þar sem borholurnar voru gerðar og gildi efniseiginleika sem fengin er á tilraunastofu er borin saman við mjög breið bil gilda, þar sem meðalgildi allra gildanna er borið saman við eitt tilraunastofu gildi. Til að tryggja meiri nákvæmni mæti taka styttri dýptarbil til skoðunar og taka jafnfram jarðefnasýni af því bili til samanburðarprófa, með því minnkar talsvert möguleikinn á að sé verið að skoða efniseiginleika í mörgum mismunandi jarðlögum. Með þess væri einnig hægt að finna nákvæmt rakainnihald sýnisins við mælingu og þar með er hægt að þjappa sýni við sömu skilyrði og úti í felti, en út frá niðurstöðunum sást vel að sýni með hátt rakainnihald við þjöppun voru sterkari en þau sem þjöppuðust þurr. Þar að auki voru jarðefnasýni ekki í öllum tilfellum tekin samhliða CPT prófi og ósamræmi var milli niðurstöðna CPT borholna á sömu stöðum, sem gefur til kynna að um mismunandi jarðefni var að ræða, en í upphafi var reiknað með því

að jarðefni bæði í fjörunni við Landeyjarhöfn og í fjörunni á Óseyrartanga væru mjög einsleit og því voru ekki tekin jarðefnasýni meðfram CPT borholunum. Sýni voru svo tekin nokkrum árum síðar á svipuðum stað í fjörunni. Borholurnar sjálfar sýna fram á töluverða einsleitni, en bæði í Landeyjarhöfn og á Óseyrartanga var ein af borholunum þremur sem voru teknar töluvert frábrugðin hinum. En eitt frávikið kom þegar jarðefnasýnin frá Hornafjarðafljóti voru skoðuð, en þar var skúfboxpróf notað á jarðefnasýni með 25% fínefnainnihald, þó svo að niðurstöður hafi fengist var ekki talið að aðferðin væri nægjanlega nákvæm fyrir svo há fínefnainnihald.

Niðurstöður prófanna gefa ákveðna mynd af notagildi reynslujafna fyrir íslensk jarðefni, en það ber að hafa það í huga að aðeins voru kannaðar þrjár mismunandi staðsetningar og voru viðnámshorn á þeim stöðum að raðast á mjög stuttu bili, en þar mæti finna fleiri staði með jarðefni sem flokkast sitthvoru megin við bilið.

Annar efniseiginleiki sem var skoðaður var ódreneraður skúfstyrkur jarðefna. Aðeins ein aðferð var skoðuð og borin saman við samanburðarprófið sem var kónpróf. Niðurstöðurnar fyrir ódreneraðan skúfstyrk voru að koma sérstaklega illa út. Vandamálið var að sýni sem voru tekin voru hreyfð sýni. Ódreneraður skúfstyrkur í óhreyfðu sýni getur verið allt að sextíu og fjórum sinnum hærri en ódreneraður skúfstyrkur í sama jarðefni þegar því hefur verið hrært upp (Das, 2010). Nauðsynlegt er að kynna sér þennan efniseiginleika betur og bera saman við CPT gögn. Til þess að geta fengið sem besta samanburðinn þarf að ná óhreyfðum sýnum meðfram CPT borholum og gera á þeim mismunandi próf.

Ákveðið var að fara ekki í frekari rannsóknir á efniseiginleikanum þar sem ekki var nema einn af ákvörðunarstöðunum sem hafði jarðefni með nægjanlega hátt fínefnainnihald svo hægt væri að kanna ódreneraða skúfstyrkinn og voru öll sýnin þaðan hreyfð. En ein helsta forsenda þess að fá marktækar niðurstöður úr prófunum er að sýnin séu óhreyfð, tekin af mismunandi dýpi meðfram CPT borholum, og að kannaðir séu eiginleikar efnanna með fleiri en einni prófunaraðferð.

7 Samantekt

Jarðefni er viðfangsefni sem erfitt getur reynst að leysa. Fjölbreytar aðstæður gefa jarðefnunum sín einkenni og eiginleika og því er mikilvægt að efniseiginleikar þar sé ákvarðaðir við þau skilyrði sem ríkir á upprunastaðnum. Í þessu verkefni eru efniseiginleikar jarðefna skoðað út frá ýmsum prófum. Verkefnið sjálft skiptist í tvo hluta í kringum rannsóknaspurningar þess og markmið. Markmið þessa verkefnis er að bera saman þær aðferðir sem notaðar eru til að ákvarða efniseiginleika jarðefna á tilraunastofu við þau próf sem gerð eru úti í folti. Niðurstöður mælinga voru svo notaðar til að leggja mat á það hvort reynslujöfnur sem þróaðar hafa verið fyrir CPT próf henti fyrir íslensk jarðefni eða hvort þurfi að endurskoða þær og aðlaga að íslenskum aðstæðum.

Skoðuð voru nokkur próf til að ákvarða gildi fyrir efniseiginleika jarðefna. Gerðar voru tilraunir á jarðefnum frá öllum ákvörðunarstöðum til að finna skúfstyrk þeirra og var mest notast við skúfboxpróf til að ákvarða þann efniseiginleika, sem reyndist vel á meðan jarðefnið hafði lágt fínefnainnihald. Við aukið fínefnainnihald minnkaði nákvæmni prófsins og í þeim tilfellum reyndist betra að beita þríasaprófi. Ódreneraður skúfstyrkur var einnig kannaður með kónprófi sem gaf mjög misjafnar niðurstöður. Það má því áætla að kónpróf sé ekki að gefa nákvæmar niðurstöður, sem gæti orsakast af því að sýni sem var notað var hreyft og blandað saman, sem gefur ekki sömu niðurstöðu og óhreyft sýni.

Aðalefni þessa verkefnis var að kanna hvort þyrfti að endurskoða þær reynslujöfnur sem byggðar hafa verið upp til að ákvarða gildi fyrir ýmsa efniseiginleika jarðefna út frá niðurstöðum sem fást við CPT borun. Til að meta þörfina á endurskoðun voru reiknuð reynslujöfnugildi teiknuð upp á mótí tilraunastofugildum fyrir viðnámshorn og fylgni skoðuð. Sá efniseiginleiki sem var skoðaður helst var viðnámshorn jarðefnis, en þar að auki var ódreneraður skúfstyrkur skoðaður. Þrjár mismunandi aðferðir voru skoðaðar í tengslum við ákvörðun á gildum fyrir viðnámshorn. Aðferðirnar voru að koma mis vel út, sú aðferð sem kom hvað best út var aðferð kennd við Kulhawy og Mayne, sem var jafnframt einfaldasta reynslujafnan sem skoðuð var, þar sem hún tók aðeins eina breytu inni útreikninga sína. Aðrar reynslujöfnur voru að annaðhvort of hátt gildi eða of lágt sem gefur til kynna að það þarf að endurskoða þær aðferðir þegar viðnámshorn jarðefna er ákvarðað eða nota reynslujöfnu Kulhawy og Mayne þegar hún er ákvörðuð.

Það voru þó að koma nokkur frávik. Frávik þessi voru iðulega tengd sömu borholunum þar sem reikna má með að jarðefni sem notað var til að finna samanburð var ekki það sama og í þeim borholum. Reiknuð viðnámshorn út frá reynslujöfnum voru oft á tíðum ákvörðuð á mjög breiðu bili án þess að hafa vitneskju um rakainnihald sem mæti minnka með að taka sýni á stuttum bilum meðfram borholum og gera á þeim próf á tilraunastofu. Ódreneraður skúfstyrkur jarðefnis var einnig kannaður en niðurstöðurnar þar ætti frekar að skoða sem tilgátu um efniseiginleika sem mæti skoða frekar út frá fleiri prófum.

Með verkefni þessi tel ég að sýnt sé fram á mikilvægi þess að koma upp sterkum grunn fyrir reynslujöfnur CPT boranna, sem og aðrar prófanir sem framkvæmdar eru úti í folti. Ég tel æskilegt að haldið sé áfram að skoða samanburð ólíkra aðferða til að sína fram á það

að þær reynslujöfnur sem til eru fyrir CPT búnaðinn virki fyrir alla efniseiginleika hvort sem það þurfi að aðlaga þær að íslenskum aðstæðum eða halda þeim óbreyttum.

Heimildaskrá

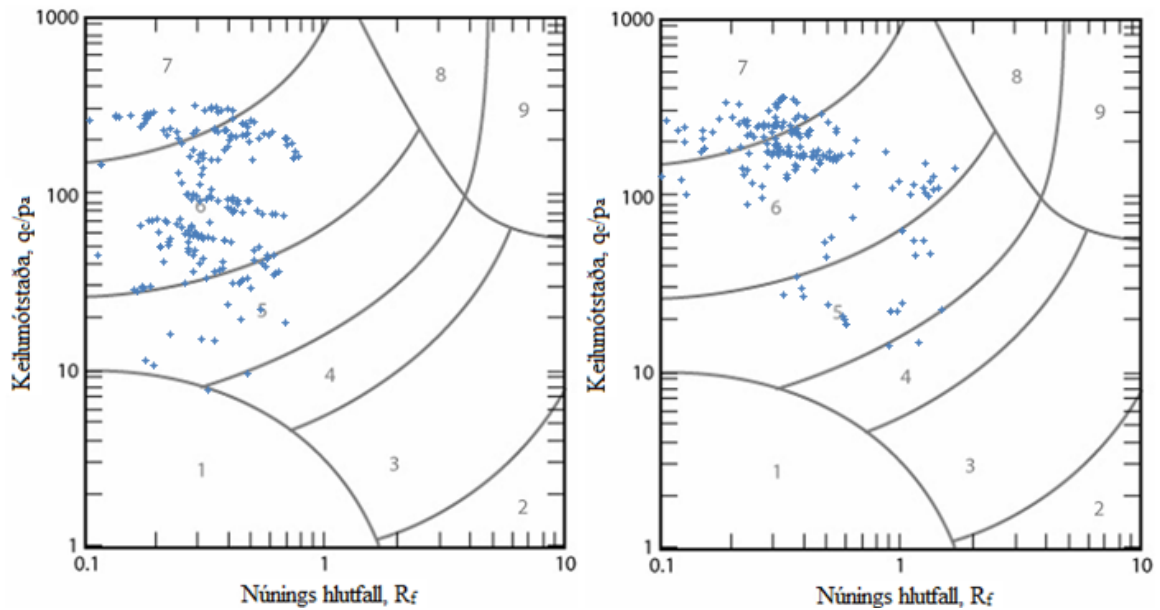
- Almenna Verkfræðistofan hf. (1980). *Athuganir á viðnámshorni sands mældu í þríasatæki*. Reykjavík: Vegagerðin.
- Ásgrímur G. Björnsson. (2011). *Stíflni lausra jarðlaga við stíflustæði Hólmsárvirkjunar/meistaraverkefni*. Reykjavík: Háskóli Íslands.
- Azizi, F. (2000). *Applied analyses in geotechnics*. Abingdon: Taylor & Francis.
- Bardet, J.-P. (1997). *Experimental soil mechanics*. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall.
- Cernica, J. N. (1995). *Geotechnical engineerin soil machanics*. New York: john Wiley & Sons, Inc .
- Das, B. M. (2010). *Principles og Geotechnical Engineering 7th edition*. Stamford: Cengage Learning.
- Envi. (2013). *Products: Envi - Environmental mechanics AB*. Sótt 15. mars 2015 frá Envi - Environmental mechanics AB: <http://www.envi.se/Products-Cone-Penetration-Test-CPTu.html>
- Feng, H.-Y. (1991). *Foundation engineering handbook 2nd edition*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- GeoNar A/S. (án árs). *Bruksanvisning for g-200 konusapparat*.
- Haraldur Sigursteinsson, Jón Skúlason, & Sverrir Örvar Sverrisson. (2015). *Jarðtækni rannsóknir fyrir vega og brúagerð(mynd)*. Reykjavík: Vegagerðin.
- Head, K. H. (1998). *Manual of soil laboratory testing - Volume 3, Effective stess tests*. West Sussex, England: John Wiley & Sons.
- Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C. (2011). *An introduction to geotechnical engineering 2nd edition*. Upper Saddle River: Pearson Education, Inc.
- Johnson, A. (2008). *Analog model(vefmynd)*. Sótt 12. janúar 2015 frá The University of Maine:
<http://www.geology.um.maine.edu/geodynamics/AnalogWebsite/UndergradProject%20s2008/Austin%20final%20website/Analog.html>
- Jón Skúlason, Bjarni Bessason, Eyjólfur Árni Rafnsson, Haraldur Sigursteinsson, & Sigfinnur Snorrason. (1998). *CPT borun og SASW mæling á Kjalarnesi og Óseyrartanga*. Reykjavík: Vegagerðin.

- Jón Skúlason, Bjarni Bessason, Eyjólfur Árni Rafnsson, Haraldur Sigursteinsson, & Sigfinnur Snorrason. (1999). *Túlkun CPT borana og SASW mælinga við íslenskar aðstæður*. Reykjavík: Vegagerðin.
- Khan, Z. (án dags). *Your Article Library*(vefmynd). Sótt 17. maí 2015 frá <http://www.yourarticlelibrary.com/soil/experiment-on-standard-penetration-with-diagram/45884/>
- Mitchell, J. K. (1993). *Fundamentals of soil behavior 2nd edition*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- NCHRP. (2007). *NCHRP Synthesis 368 – Cone Penetration Testing*. Washington D.C.: Transportation Research Board.
- Pile info: Geoforum*. (2009). Sótt 3. maí 2015 frá Geoforum: <http://www.geoforum.com/info/pileinfo/cpt.asp>
- Robertson, P. K., & Cabal, K. L. (2010). *Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering*. California: Gregg Drilling & Testing, Inc.
- Sigurður Erlingsson. (2012). *Soil mechanics and foundation engineering 2 - Lecture notes*. Reykjavík: Háskóli Íslands.
- Sigurður Már Valsson. (2011). *Earth pressures against- and stability of retaining structures/meistaraverkefni*. Reykjavík: Háskóli Íslands.
- Slideshare*. (án dags.). Sótt 3. maí 2015 frá Texas Tech University: <http://www.slideshare.net/hronaldo10/class-6-shear-strength-direct-shear-test-geotechnical-engineering>
- Tanaka, H., Hirabayasi, H., Matsuoka, T., & Kaneko, H. (2012). Use of fall cone test as measurement of shear strength for soft clay materials. *Soils and foundations*, 590-599.
- Welsh, H. K. (2009). *Liquefaction potential at a proposed hydroelectric site in Iceland - Urridafoss case study using cone penetration data/meistaraverkefni*. Reykjavík, Ísland: Háskóli Íslands.

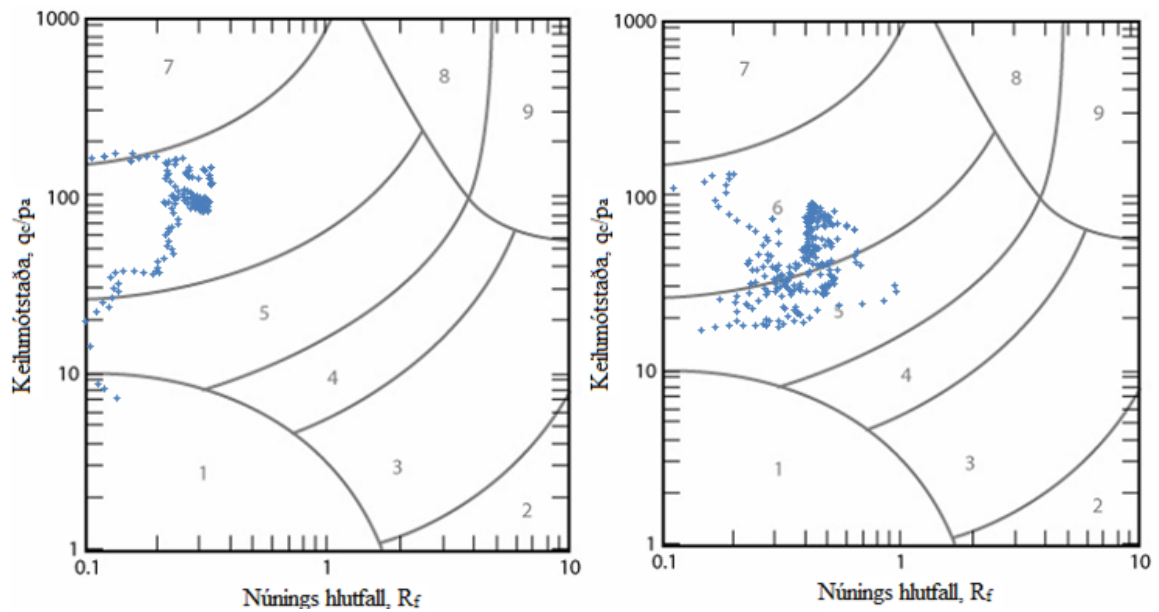
Viðauki A

Flokkun jarðefna út frá CPT mælingum

Landeyjarhöfn



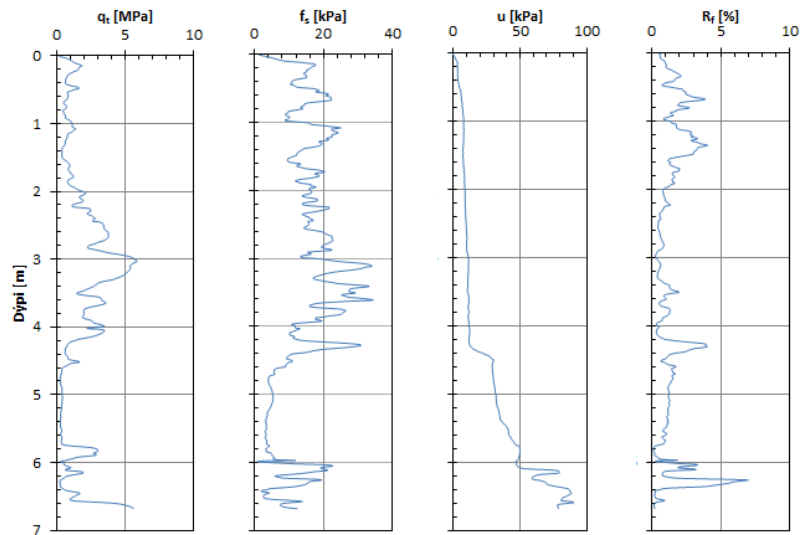
Óseyrartangi



Viðauki B

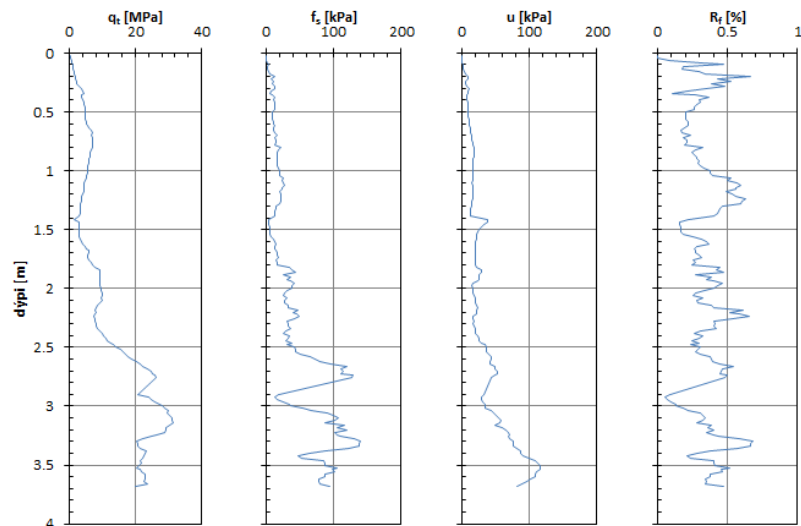
Niðurstöður CPT mælinga.

Hornafjarðarfljót

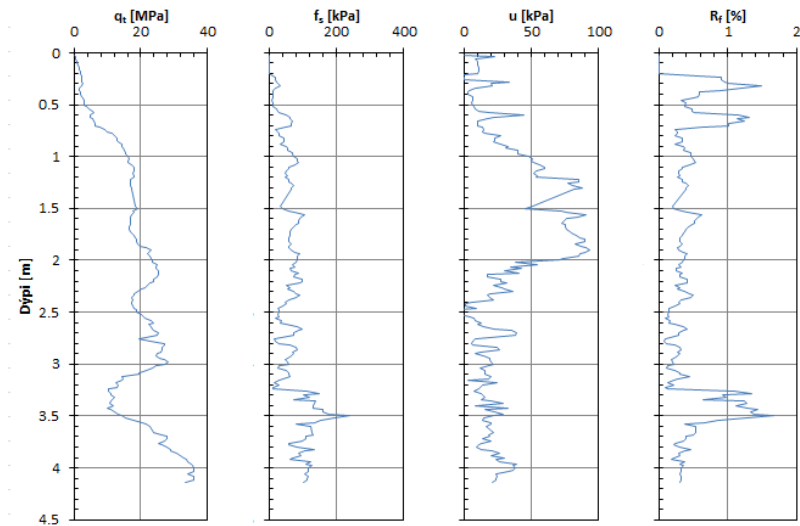


Mynd 51: CPT mæligögn úr mæliholu 6860.

Landeyjarhöfn

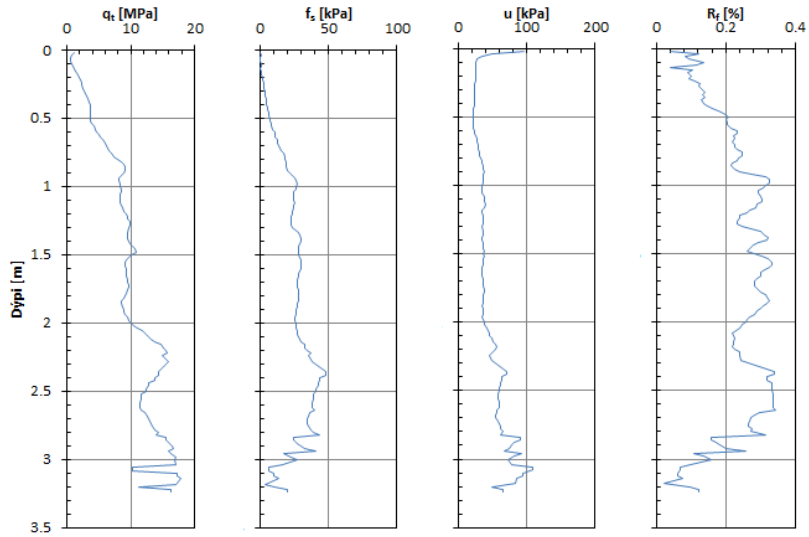


Mynd 52: CPT mæligögn úr mæliholu 5371.

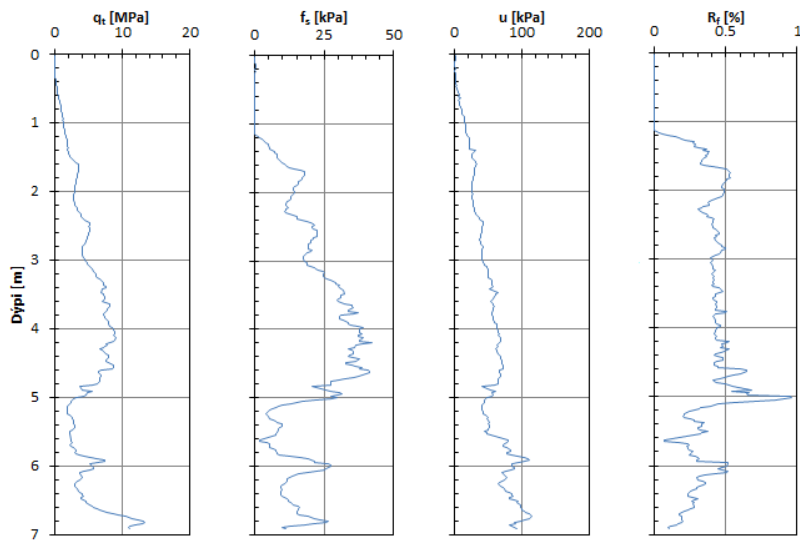


Mynd 53: CPT mæligögn úr mæliholu 5376.

Óseyrartangi



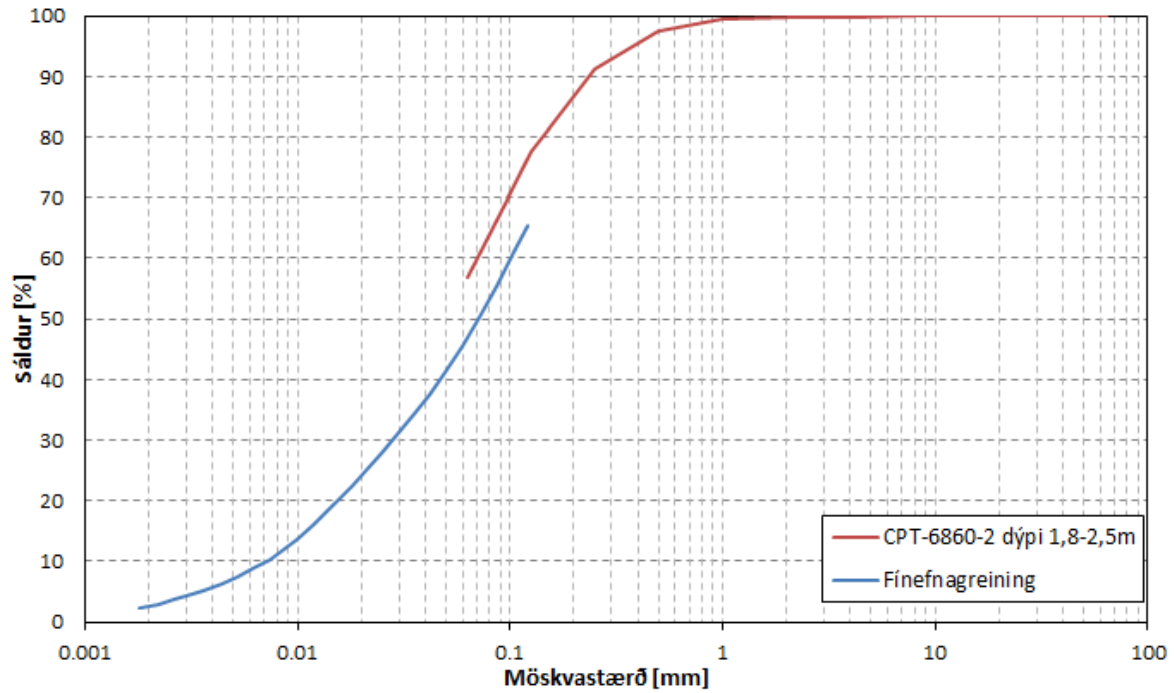
Mynd 54: CPT mæligögn úr mæliholu 4509.



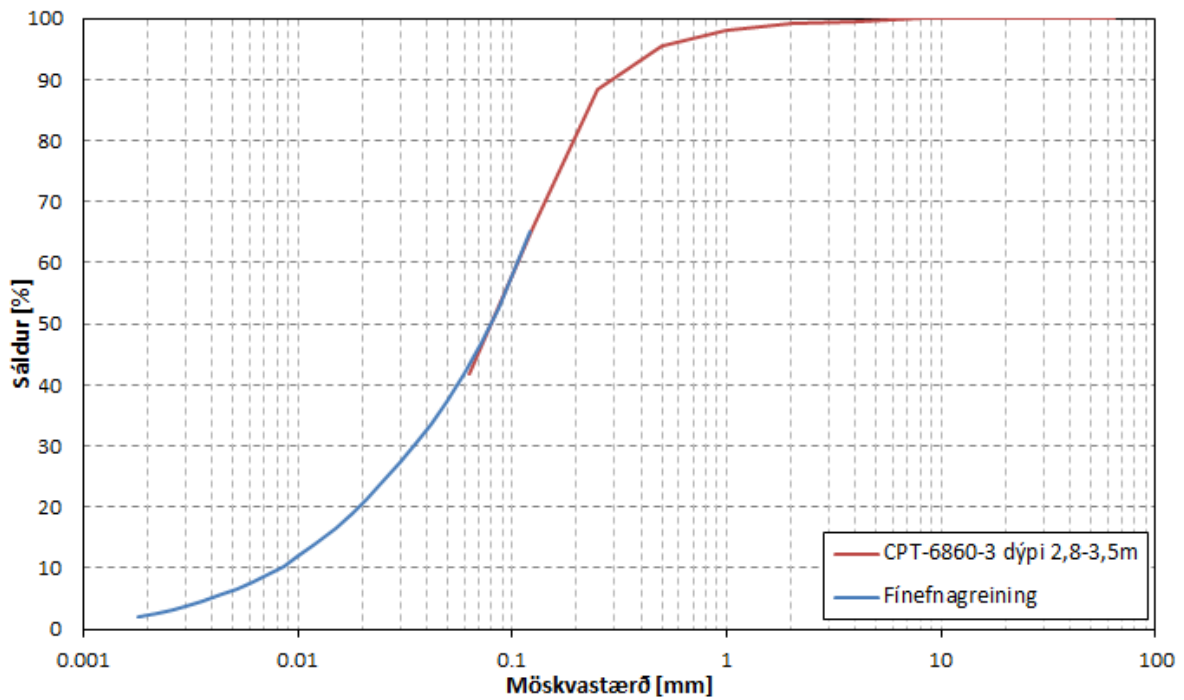
Mynd 55: CPT mæligögn úr mæliholu 4512.

Viðauki C

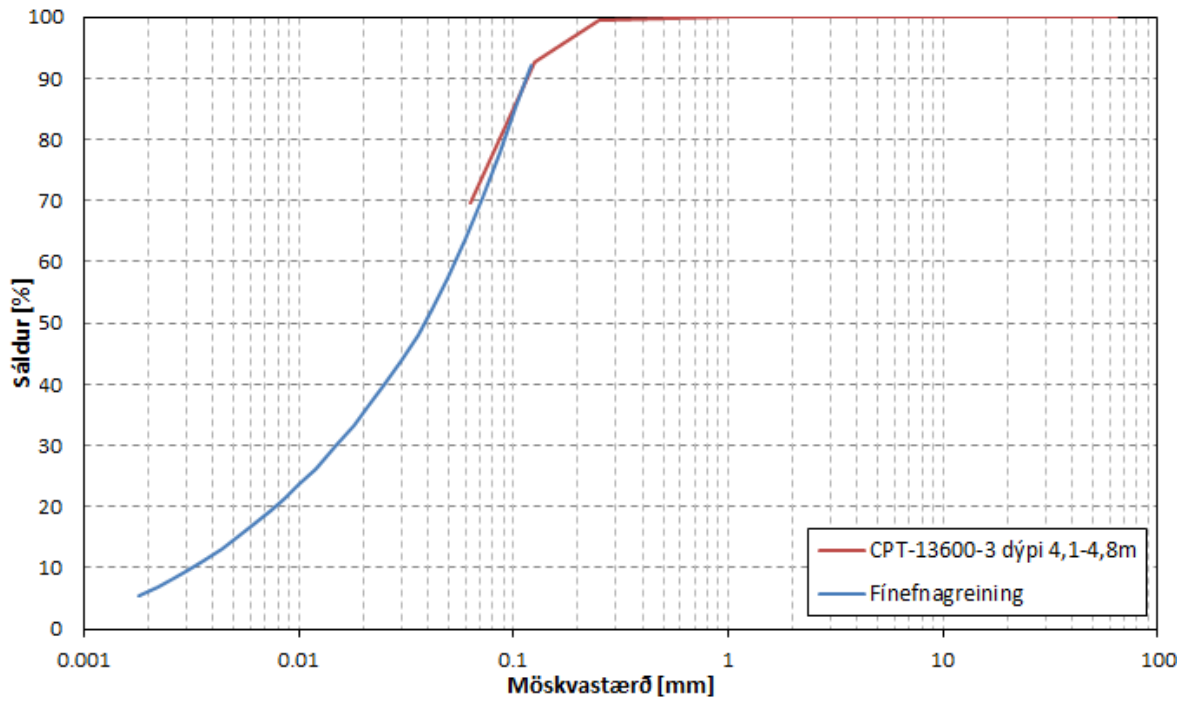
Fínefnagreiningar jarðefnasýna.



Mynd 56: Fínefnagreiningu bætt við enda kornakúrfu úr hólksýni CPT-6860-2.



Mynd 57: Fínefnagreiningu bætt við enda kornakúrfu úr hólksýni CPT-6860-3.



Mynd 58: Fínefnagreiningu bætt við enda kornakúrfu úr hólksýni CPT-13600-3.