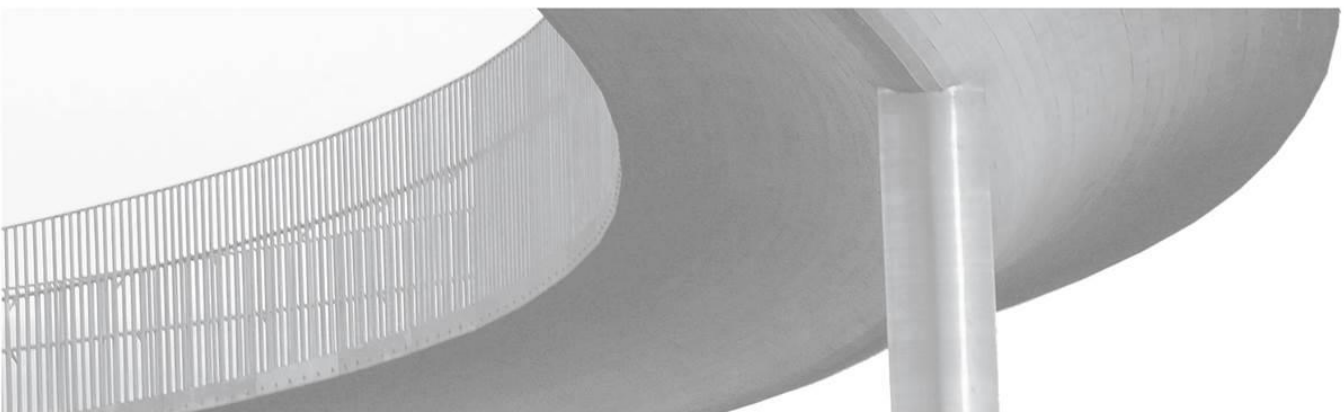




## STAURAUNDIRSTÖÐUR FYRIR BRÝR

Áfangaskýrsla 2

28.06.2023





## SKÝRSLA – UPPLÝSINGABLAÐ

### SKJALALYKILL

2970-414-SKY-002-V01

### SKÝRSLUNÚMÉR / SÍÐUFJÖLDI

40

### VERKEFNISSTJÓRI / FULLTRÚI VERKKAUPA

Guðrún Þóra Garðarsdóttir og Ólafur Sveinn Haraldsson

### VERKEFNISSTJÓRI EFLA

Andri Gunnarsson

### LYKILORÐ

Stauraundirstöður  
Álagspróf staura  
Þrýstiborun  
Höggborun

### STAÐA SKÝRSLU

- Drög  
 Drög til yfirlstrar  
 Lokið

### DREIFING

- Opin  
 Dreifing með leyfi verkkaupa  
 Trúnaðarmál

### TITILL SKÝRSLU

Stauraundirstöður fyrir brýr, Áfangaskýrsla 2

### VERKHEITI

Stauraundirstöður fyrir brýr

### VERKKAUPI

Rannsóknarsjóður Vegagerðarinnar

### HÖFUNDUR

Andri Gunnarsson, Ólafur Davíð Friðriksson

### ÚTDRÁTTUR

Í þessari annari áfangaskýrslu um stauraundirstöður fyrir brýr er skoðað hvort hægt sé að nota Þrýstiborun (CPT) við hönnun á stauraundirstöðum.

Skoðaðar eru reikniaðferðir sem byggja á niðurstöðum CPT borana. Þá eru framkvæmdar boranir á 2 stöðum, burðarþol staura reiknað og bornar saman við niðurstöður úr álagsprófunum sem og hefðbundnum reikniaðferðum.

Þá er einnig fjallað um tímaáhrif á burðarþol staura sem og jarðvegsrannsóknir sem framkvæma ætti á undirbúningsstigi framkvæmda.

**ÚTGÁFUSAGA**

---

<b>NR.</b>	<b>HÖFUNDUR</b>	<b>DAGS.</b>	<b>RÝNT</b>	<b>DAGS.</b>	<b>SAMÞYKKT</b>	<b>DAGS.</b>
01	Andri Gunnarsson Ólafur D. Friðriksson Frumútgáfa	15.06.23	Baldvin Einarsson	20.06.23	Andri Gunnarsson	28.06.23

---

---

---

## SAMANTEKT

Þetta er önnur áfangaskýrsla um stauraundirstöður fyrir brýr og er framhald á fyrri skýrslu [1]. Í þessari skýrslu er skoðað hvort hægt sé að nota þrýstiborun (CPT) til að meta burðarþol stauraundirstaðna í sandi eða sendnum jarðvegi. Þá er metið hvort hægt sé að taka meira tillit til tímaáhrifa á burðarþol staura og skilgreindar þær jarðvegsprófanir sem æskilegt væri að gera á undirbúningsstigi framkvæmda til að geta hannað stauraundirstöður á sem hagkvæmastan og öruggastan hátt.

Undanfarin ár hafa rannsóknir bent til þess að reikniaðferðir sem byggja á niðurstöðum úr þrýstiborunum (CPT) virki best fyrir stauraundirstöður í sendnum jarðvegi (viðnámsefni). Það voru því framkvæmdar þrýstiboranir á tveim stöðum og niðurstöður úr þeim bornar saman við álagspróf.

Staðirnir sem urðu fyrir valinu voru:

- Eskifjörður: Hér hafa verið gerð mörg álagspróf (bæði statísk og dýnamísk), umfangsmiklar jarðvegsrannsóknir (SPT og Shelby) og þá er jarðvegurinn úr siltríkum sandi og ætti því að henta vel til að framkvæma þrýstiborun.
- Jökulsá í Fljótsdal. Hér eru til 3 statísk álagspróf til samanburðar og jarðvegurinn á svæðinu er talin vera úr hreinum sandi sem hentar vel fyrir þrýstiborun.

Í kafla 3 eru niðurstöður úr þrýstiborunum bornar saman við álagspróf og hefðbundar reikniaðferðir.

Tímaáhrif á burðargetu staura er viðfangsefni sem hefur verið rannsakað erlendis, það er hins vegar ekki kominn fullur skilningur á þessari virkni og þetta hefur ekki verið rannsakað hérlendis. Þegar framkvæmd voru dýnamísk álagspróf á Eskifirði þá voru nokkrir staurar prófaðir tvisvar með 10-20 daga millibili og þar mældist marktæk aukning í burðarþoli. Í kafla 4 eru niðurstöðurnar frá Eskifirði skoðaðar nánar og metið hvort hægt sé að yfirfæra erlendar niðurstöður yfir á íslenskar aðstæður.

Til að geta hannað staura á öruggan og hagkvæman hátt, þá er þekking á jarðlögum sem þeir eru reknir niður í lyklatríði. Í kafla 5 er fjallað um þær jarðvegsrannsóknir sem æskilegt væri að fara í þegar hanna á staura. Sérstaklega er horft til fljótandi staura.

Eitt af markmiðum þessa rannsóknarverkefnis er að skoða og hvetja til notkunar PDA álagsprófunum fyrir stauraundirstöður. Það er gert bæði með það í huga að safna gögnum um burðarþol staura í mismunandi jarðlögum og einnig til að staðfesta öryggi hönnunar. Í kafla 6 er gerð tillaga að verkþætti fyrir framkvæmd á dýnamísku álagsprófi sem væri hægt að setja inn í verklýsingu.

Niðurstaðan varðandi notagildi þrýstiborunnar er að aðferðin virðist gefa betri nálgun við raunverulegt burðarþol staura samanborið við aðrar hefðbundnar reikniaðferðir. Ályktunin er með þeim fyrirvara að ekki tókst að bora eins langt niður og þörf var á. Þrýstiborun hentar misvel fyrir þær jarðlagagerðir sem finnast á Íslandi, þ.e. þessi rannsókn hentar í nokkuð einsleitum sandi, silti, sendum jarðvegi eða leir. Á Íslandi eru oft mörg mismunandi jarðlög í hverju jarðlagasniði og ekki óalgengt að það séu grófari lög á milli. Það getur því verið krefjandi að gera CPT próf að jafnaði til að meta burðarþol stauraundirstaðna.

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



## EFNISYFIRLIT

<b>1</b>	<b>INNGANGUR</b>	<b>9</b>
1.1	Bakgrunnur verkefnis	9
1.1	Tilgangur og markmið	9
<b>2</b>	<b>FRÆÐILEGUR BAKGRUNNUR</b>	<b>11</b>
2.1	Þrýstiborun (CPT)	11
2.2	Höggborun – Borroborun og SPT	13
2.3	Reikniaðferðir	14
2.3.1	NGI99 aðferðin	15
2.3.2	Fugro-05 aðferðin	16
2.3.3	SPT aðferð Briaud et al.	17
<b>3</b>	<b>SAMANBURÐUR REIKNIAÐFERÐA</b>	<b>19</b>
3.1	Eskifjörður	19
3.1.1	Útreikningar NGI99, Fugro-05, PV91 og Briaud et al.	20
3.1.2	Niðurstöður úr álagsprófunum	21
3.1.3	Samanburður við álagspróf	22
3.2	Jökulsá í Fljótsdal	23
3.2.1	Útreikningar NGI99, Fugro-05, PV91 og rekjöfnu Janbu	23
3.2.2	Samanburður við álagspróf	25
3.2.3	Samanburður við álagspróf	26
3.3	Umfjöllun um niðurstöður	27
3.3.1	Eskifjörður	27
3.3.2	Jökulsá í Fljótsdal	27
3.3.3	CPT rannsóknir á Íslandi	28
<b>4</b>	<b>TÍMAÁHRIF Á BURÐARÞOL</b>	<b>29</b>
<b>5</b>	<b>JARÐVEGSRANNSÓKNIR</b>	<b>33</b>
5.1	Heildarborun (totalsondering)	33
5.2	Höggborun (borro)	33
5.3	Þrýstiborun (CPT)	34
5.4	Sýnataka	34
5.5	Prufurekstur og álagsprófun	35
5.6	Samantekt	35
<b>6</b>	<b>DÝNAMÍSK ÁLAGSPRÓF (PDA)</b>	<b>36</b>
<b>7</b>	<b>FREKARI RANNSÓKNIR</b>	<b>38</b>
<b>8</b>	<b>HEIMILDASKRÁ</b>	<b>39</b>

## MYNDASKRÁ

MYND 1 Skýringarmynd CPT búnaður [6]	12
MYND 2 Flokkunarkerfi Robertson's, notað til að flokka jarðveg út frá niðurstöðum CPT borana [7]	13
MYND 3 Staðsetning SPT borhola á Eskifirði [12]	21
MYND 4 Samanburður reikniaðferða við álagspróf á Eskifirði	23
MYND 5 Samanburður reikniaðferða við álagspróf við Jökulsá í Fljótsdal	26
MYND 6 Skýringarmynd af því hvernig burðargeta eykst í fínkornaefni vegna öldrunar [13]	29
MYND 7 Mæld aukning á burðarþoli staura sem verða fyrir togálagi með tíma, $t_0 = 10$ dagar [2]	30
MYND 8 Niðurstöður mælinga frá Larvik og reiknilíkön aðlöguð að gögnum [9]	31
MYND 9 Burðargeta staura sem fall af tíma með áætlaðri burðargetu frá Eskifirði	32

## TÖFLUSKRÁ

TAFLA 1 Tegund jarðvegs eftir á hvaða svæði það lendir í flokkunarkerfi Robertson's [7]	13
TAFLA 2 Niðurstöður útreikninga frá Eskifirði með NGI99, Fugro-05 og PV91	20
TAFLA 3 Niðurstöður útreikninga frá Eskifirði með SPT aðferð Briaud et al.	20
TAFLA 4 Niðurstöður mælinga úr PDA frá Eskifirði - Frystigeymsla	21
TAFLA 5 Niðurstöður mælinga frá Eskifirði - frystigeymsla, statísk álagspróf	22
TAFLA 6 Samanburður á burðarþoli staura áætluðum með reikniaðferðum og álagsprófunum, meðaltal frá álagsprófunum er notað	22
TAFLA 7 Niðurstöður útreikninga frá Jökulsá í Fljótsdal með NGI99	24
TAFLA 8 Niðurstöður útreikninga frá Jökulsá í Fljótsdal með Fugro-05	24
TAFLA 9 Niðurstöður útreikninga við Jökulsá í Fljótsdal með PV91, $\beta = 0,35$ og $N_q = 32$	24
TAFLA 10 Niðurstöður frá rekjöfnu Janbu frá Jökulsá í Fljótsdal	24
TAFLA 11 Niðurstöður mælinga frá Jökulsá í Fljótsdal, statísk álagspróf	25
TAFLA 12 Samanburður á burðarþoli staura fenginn með reikniaðferðum og álagsprófum, meðaltal mælinga notað	26
TAFLA 13 Eiginleikar jarðvegs sem voru til skoðunar, mælingar frá Eskifirði innifaldar [2]	29
TAFLA 14 Mælingar á tímaáhrifum á Eskifirði	30
TAFLA 15 Breytur sem notaðar eru til reikna burðargetu staura með tíma [9]	31



## 1 INNGANGUR

### 1.1 Bakgrunnur verkefnis

Í fyrstu áfangaskýrslunni [1] er fjallað um bakgrunn verkefnisins í heild sinni og það er vísað til hennar varðandi það.

Í þeirri skýrslu [1] var fjallað um mismunandi reikniaðferðir sem eru í boði til að hanna staura og þær bornar saman við niðurstöður úr bæði statískum álagsprófunum og PDA álagsprófunum. Þá var einnig sérstaklega skoðað hvernig PDA álagspróf kæmi út í samanburði við statískt álagspróf. Niðurstöðurnar voru að þær reikniaðferðir sem voru skoðaðar voru að áætla burðarþol á bilinu 55% - 70% af mældu burðarþoli með statísku álagsprófi. PDA álagspróf áætlaði hins vegar burðarþol sem 90% af mældu burðarþoli með statísku álagsprófi.

Í þessari áfangaskýrslu er næstu þættir í verkefninu skoðaðir sem eru:

- Að framkvæma þrýstiboranir í brúarstæðum þar sem jarðkannanir liggja fyrir og gerðar hafa verið álagsprófanir. Niðurstöður úr því eru svo notaðar til að reikna burðarþol og aðferðin borin saman við aðrar reikniaðferðir og álagspróf
- Metið hvort hægt sé að taka meira tillit til tímaáhrifa á burðarþol staura
- Skilgreina þær jarðvegsprófanir sem æskilegt væri að gera á undirbúningsstigi framkvæmda til að geta hannað stauraundirstöður á sem hagkvæmastan og öruggastan hátt
- Skipuleggja fleiri PDA álagspróf og safna þannig áfram raungögnum um burðarþol staura

### 1.1 Tilgangur og markmið

Verkefninu er ætlað að leggja mat á hve mikinn ávinning má hafa af innleiðingu uppfærða aðferða við hönnun stauraundirstaða fyrir brýr í sandi eða sendnum jarðvegi. Aðferðin er kynnt og gerð grein fyrir þeim jarðvegsrannsóknnum sem eru nauðsynleg forsenda fyrir beitingu hennar. Niðurstöður verkefnisins verða settar fram sem hlutfallslegur samanburður á kostnaði og kolefnisspori undirstaða sem hannaðar eru með þessari nýju aðferð annars vegar og aðferðum sem algengast er að beitt sé nú um stundir hérlendis hins vegar. Þennan mun og mögulegan sparnað má heimfæra á brýr sem fyrirhugaðar eru og líkur standa til að grundaðar muni verða á staurum. Markmiðið er þannig að benda á leið til að auka sjálfbærni í brúarhönnun í íslenska þjóðvegakerfinu.

Með aukinni áherslu á sjálfbærni mannvirkja, ekki síst kolefnisspor, er ætlunin með þessu verkefni að beina sjónum að því hvernig mögulega má auka sjálfbærni undirstöðuhönnunar fyrir brýr. Með sjálfbærni er hér bæði átt við efnahagsleg og umhverfisleg áhrif. Það myndi nást ef innleiða mætti hönnunaraðferðir sem lýsa hærra burðarþoli staura en það sem miðað er við í dag, án þess að það komi niður á öryggi.

Þá er einnig markmiðið að stuðla að því að öryggi hönnunar á stauraundirstöðum sé staðfest á verktíma með því að gera álagspróf.

Verkefninu er einnig ætlað að nýtast sem hluti af framlagi Íslands í NVF samstarfið, en þar veitir Ísland brúarnefnd forstöðu árin 2020-2024. Vistferilsgreiningar brúa eru eitt meginþemað í áherslum brúarnefndarinnar fyrir árið 2021, en þær eru á sviði loftslagsmála fyrir það starfsár

## 2 FRÆÐILEGUR BAKGRUNNUR

Í þessum kafla er fjallað um reikniaðferðir fyrir stauraundirstöður í sandi eða sendnum jarðvegi sem byggja á niðurstöðum úr jarðvegsborunum sem gefa upplýsingar og inntaksbreytur í reikniaðferðirnar. Helst er stuðst við norskar reglur og leiðbeiningar enda eru leiðbeiningar og handbækur Vegagerðarinnar byggðar að mestu á norskum grunni.

Almennar reikniaðferðir til að meta burðarþol staura byggja oft á jarðvegsrannsóknnum þar sem skriðhorn, rúmþyngd og virk spenna eru lykilmælingar. Þá hefur oft verið stuðst við niðurstöður úr höggborun og burðarþol áætlað byggt á viðmiðunargildum hér á Íslandi. Þessar aðferðir eiga það hins vegar flestar sameiginlegt að vera nokkuð íhaldssamar eins og kemur fram í hinum ýmsu heimildum, sjá t.d. [1], [2], [3], [4], [5].

Nákvæmasta aðferðin við að áætla burðargetu staura er með því að framkvæma statísk álagspróf, þau eru hins vegar umfangsmikil, tímafrek og kostnaðarsöm [3]. Einnig er PDA álagspróf nokkuð nákvæmt samanborið við statísk álagspróf [1], [2], en ef nota á þau á hönnunarstigi þarf að reka niður prufustaura og álagsprófa þá. Það er einnig nokkuð kostnaðarsamt og líklega ekki hagkvæmt nema fyrir stærri verkefni.

Ef hægt væri að áætla burðargetu staura snemma á hönnunarstigi með upplýsingum frá jarðvegsborunum með ásættanlegri nákvæmni er því til mikils að vinna. Í þessu verkefni er fjallað um tvær útfærslur á jarðvegsborunum.

- Þrýstiborun, CPT (e. Cone penetration test) sem veitir samfelldar upplýsingar um jarðveginn. Þá eru skoðaðar tvær reikniaðferðir sem nýta gögn úr þrýstiborun til að áætla burðarþol, NGI99 og Fugro-5
- Höggborun: Borrobörun og SPT (e. Standard penetration test) eru skoðaðar sem og reikniaðferð sem ákvarðar burðargetu staura út frá SPT borun.

### 2.1 Þrýstiborun (CPT)

CPT er borunaraðferð mælir efniseiginleika jarðefnis beint við borun. Aðferðin felur í sér að keilu með sérstakri viðnáms-hulsu er þrýst niður í jarðveg með jöfnum hraða og viðnám við keilu, viðnám við hulsu og vatnsþrýstingur er mældur. Borunaraðferðin hefur verið notuð lengi eða frá árinu 1930 og var í stöðugri þróun til ársins 1970 þegar CPT skildi sig frá prófinu „Dutch Cone Penetrator“. Þessi þróun fól í sér að þar sem upphaflega var aðeins mæld mótstaðan við keiluna var bætt við viðnáms-hulsu sem mældi hliðarviðnám. Árið 1974 varð svo önnur breyting gerð og vatnsþrýstingsmæli bætt við búnaðinn [6].

Viðnáms-hulsan er viðkvæmasti hluti búnaðarins og getur orðið fyrir skemmdum ef borað er í gróf jarðefni eins og mól eða rekist er á grjótt. Takmarkar það mælingar við fínni jarðveg eins og sendin eða siltríkan jarðveg. Búnaðurinn er einnig dýr og því fylgir ákveðin áhætta við að framkvæma boranirnar, reynsla er því mikilvæg við framkvæmdir á CPT til að borað sé eins langt og hægt er án þess að skemma búnaðinn. CPT hefur hins vegar marga kosti þegar afla þarf upplýsinga í fínni jarðvegi. Prófið er hægt

að framkvæma hratt og er því auðvelt að endurtaka mælingar, mæligögn eru samfelld og það fást upplýsingar um hvern sentimetra af jarðvegi. Það gefur þess vegna mjög nákvæma mynd af lagskiptingu og ástandi jarðefnis [6]. Þessi gögn nýtast við útreikninga á öllum þeim breytum sem þarf til að áætla burðargetu stauranna með reikniaðferðum sem skoðaðar verða seinna í þessum kafla.

Þegar keilunni er þrýst niður í jarðveginn er þrýstikrafturinn sem mælist á keiluna ( $F_c$ ) deilt á flatarmál hennar ( $A_c$ ) sem er  $10 \text{ cm}^2$  og fæst þá keilumótstaðan:

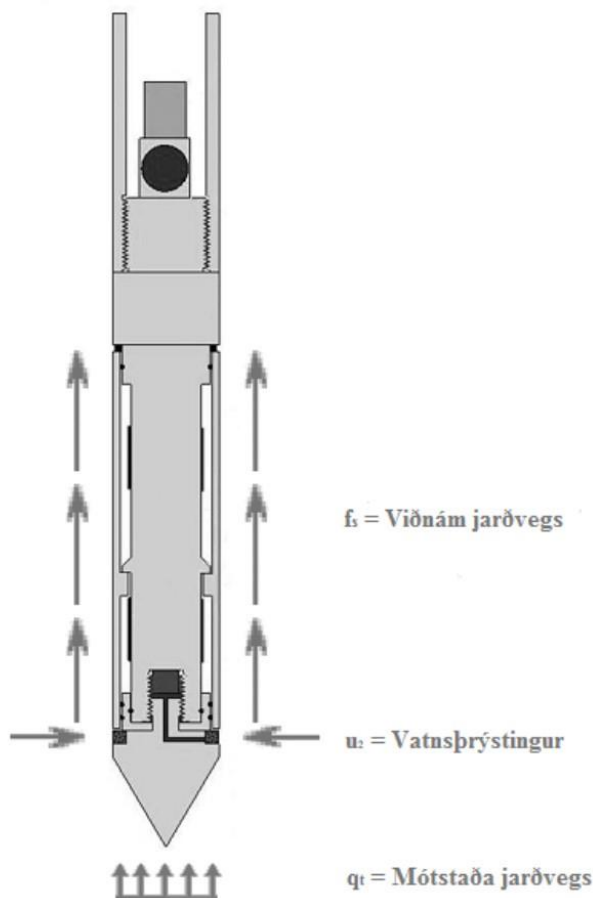
$$q_c = \frac{F_c}{A_c}$$

Leiðréttta þarf þessa spennu til að tillit sé tekið til vatnsþrýstings sem verkar á yfirborð keilunnar, í mjúkum eða stífum leir og í silti getur þessi leiðrétting haft talsverð áhrif (frá 20% upp í 70%) en í hreinum sandi og þéttum jarðvegi hefur hún lítil sem enginn áhrif.

Krafturinn sem verkar á viðnáms-hulsuna ( $F_s$ ) er deilt með yfirborðsflatamáli hennar ( $A_s$ ) sem er í flestum tilfellum  $150 \text{ cm}^2$ . Gefur þetta viðnámið við hulsuna [5]:

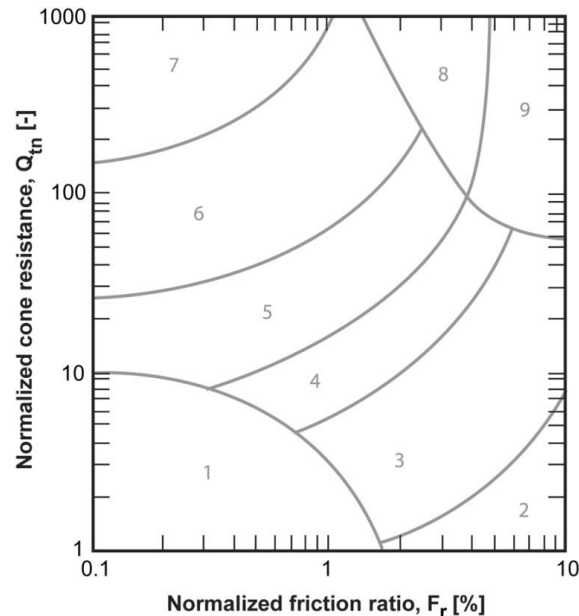
$$f_s = \frac{F_s}{A_s}$$

Þær reikniaðferðir eru skoðaðar hér nota keilumótstöðuna  $q_c$  til að reikna burðargetu staura.



**MYND 1** Skýringarmynd CPT búnaður [6]

Robertson's flokkunarkerfið var þróað til að hægt væri að kortleggja jarðveginn eftir niðurstöðum úr CPT. Þannig er hægt að kortleggja öll jarðlögin og fá upplýsingar um lagskiptingu og þéttleika.



**MYND 2** Flokkunarkerfi Robertson's, notað til að flokka jarðveg út frá niðurstöðum CPT borana [7]

**TAFLA 1** Tegund jarðvegs eftir á hvaða svæði það lendir í flokkunarkerfi Robertson's [7]

SVÆÐI	TEGUND JARÐVEGS
1	Viðkvæmt fínkorna efni
2	Lifrænt efni - leir
3	Leir – siltkenndur leir til leirs
4	Silt blanda – leirkennt silt til siltkennds leirs
5	Sand blanda – siltrikur sandur til sandríks silts
6	Sandur – hreinn sandur til siltríks sands
7	Malarkenndur sandur til þétts sands
8	Mjög stífur sandur til leirkennds sands*
9	Mjög stíft fínkorna efni*

\*OCR eða sementskenndur jarðvegur

## 2.2 Höggborun – Borroborun og SPT

Höggborun hefur verið mikið notuð til að meta rekstrarhæfni staura þegar kemur að undirstöðum fyrir brúargerð og hefur samband milli „Borro“ mótstöðu og reksturs staura verið rannsökuð hérlandis. Mismunandi staðlar hafa verið í notkun við höggborun. Hérlandis er unnið með afbrigði af sænskum staðli, 63,5 kg lóð er látið falla 500 mm. Munurinn á því íslenska og því sænska er að sænski staðallinn gerir ráð fyrir lausum oddi sem er komið fyrir utan á borstönginni og er því með 13 mm stærra þvermál en borstöngin hefði verið án oddsins. Verður þetta til þess að núningsviðnámið mælist hærra á Íslandi. Aðferðin hefur gefið ágætis niðurstöður þegar borið er saman við niðurrekstur staura [8].

Við borro höggborun er 32 mm stálstöng rekin niður með 63,5 kg lóði sem er látið falla 0,5 m. Þegar höggfjöldi sem þarf til að reka stöngina niður 200 mm er tekin saman fæst bormótstaðan  $Q$  og hægt er að ákvarða þéttleika jarðlaganna [8].

$$Q = \frac{\text{fallhæð lóðsins} \times \text{þyngd lóðsins}}{\text{sig}} \times \text{fjöldi högga}$$

$$Q = \frac{0,5 \times 0,0635}{0,2} \times \text{fjöldi högga} = 0,15875 \times \text{högg} \left(\frac{\text{kNm}}{\text{m}}\right)$$

SPT borun er annarskonar höggborun þar sem sýnatöku sívalningur, 50 mm í þvermál er rekinn niður með 63,5 kg lóði sem er látið falla 760 mm og mælt er hversu mörg högg þarf til að reka sívalninginn niður hverja 150 mm á 450 mm bili. Þessi högg athugun er svo endurtekin á um 1,5 metra millibili í borholunni. Samanlagður höggfjöldi síðustu 300 mm kallast N-gildi (standard penetration resistance)

SPT borun hefur verið vinsæl í gegnum tíðina og er því til mikið af gögnum úr eldri verkefnum. Voru þess vegna gerð reiknilíkön sem umbreyta SPT niðurstöðum í spísmótstöðu svo hægt er að nýta þau til samanburðar [9].

### 2.3 Reikniaðferðir

Margar reikniaðferðir hafa verið þróaðar í gegnum tíðina til að áætla burðargetu staura. Á síðustu áratugum hafa aðferðir sem nota gögn frá CPT sýnt fram á tölfræðilegri betri samsvörun við burðargetu staura þegar þau eru borin saman við álagspróf samanborið við aðrar reikniaðferðir. CPT gefur nákvæmari og samfelldar upplýsingar um jarðveg og jarðlagaskiptingu [4].

Fyrsta áfangaskýrslan [1] fjallaði stuttlega um NGI99 aðferðina sem notuð hefur verið í Noregi. Hún notar gögn frá CPT og hefur gefið góðar niðurstöður við ákvörðun á burðargetu staura. Kolsgaard [4] talar um aðrar reikniaðferðir í meistaraverkefni sínu sem byggja á CPT gögnum og er Fugro-05 ein af þeim sem hann mælir með. Það er því valið að skoða NGI99 og Fugro-05 reikniaðferðirnar fyrir gögn frá Eskafirði og Jökulsá í Fljótssdal.

Til eru gögn frá SPT sem framkvæmdar voru á Eskafirði. Reikniaðferð Briaud et al. áætla burðargetu staura með N-gildum frá SPT og því er hægt að áætla burðarþol staura á Eskafirði byggt á niðurstöðum úr SPT.

Niðurstöður úr þessum reikniaðferðum eru síðan bornar saman við niðurstöður úr álagsprófunum og þannig er hægt að leggja mat á virkni þeirra.

Niðurstöðurnar eru einnig bornar saman við „hefðbundnar“ reikniaðferðir en það var fjallað ítarlega um þér í áfangaskýrslu 1 [1]

- PV91 aðferðin
- Burðarþol reiknað með rekjöfnum
- Burðarþol metið með niðurstöðum höggborana

Markmiðið hér er að reyna að leggja mat á það hvort reikniaðferðir byggðar á CPT gefi betri nálgun við burðarþol en hefðbundnara reikniaðferðir.

### 2.3.1 NGI99 aðferðin

Fjallað var um þessa aðferð í fyrri áfangaskýrslu [1], aðferðin byggir á að inntaksbreytur frá CPT séu notaðar til að reikna burðarþol með því að lagskipta jarðveginum í mörg smá lög.

NGI99 aðferðin er sú sem Peleveledningin [2] mælir með og metur að gefi besta nálgun við samanburð álagsprófa í þeim gagnagrunnum sem þeir styðjast við. Það er því talið eðlilegast að byrja á að skoða virkni þessarar aðferðar á Íslandi.

Grunnjafnan fyrir burðarþol er sú sama og fyrir PV91-aðferðina, þ.e.

$$R_{c;k} = \frac{R_{s,cal} + R_{b,cal}}{\xi}$$

Þar sem:

$$R_{s,cal} = \sum \tau_{s;cal} \cdot A_s = \text{kraftur sem er tekinn upp með núningi}$$

$$R_{b,cal} = q_{b;k} \cdot A_b = \text{reiknuð endamótstaða við enda á staur}$$

Hins vegar eru hliðarburður og endaburður áætlað út frá niðurstöðum úr CPT þar sem núningsmótstaða er ekki skilgreind sem fasti yfir staurinn heldur mismunandi eftir dýpi og mældri mótstöðu úr CPT.

Núningsmótstaða er reiknuð skv. eftirfarandi líkingu

$$\tau_{s;cal} = \frac{z}{z_t} \cdot \sigma_a \cdot F_{Dr} \cdot F_{last} \cdot F_{spiss} \cdot F_{mat} \cdot F_{\sigma}$$

Þar sem

$$z = \text{Dýpi undir yfirborði}$$

$$z_t = \text{Endanlegt dýpi við enda staura}$$

$$p_a = \text{Viðmiðunarþrýstingur (100 kPa)}$$

$$F_{Dr} = 2,1 \cdot (D_r - 0,1)^{1,7}$$

$$F_{last} = 1,0 \text{ fyrir togáraun og } 1,3 \text{ fyrir þrýstiáraun}$$

$$F_{spiss} = 1,6 \text{ fyrir staura með lokuðum enda}$$

$$F_{mat} = 1,0 \text{ fyrir stál og timbur en } 1,2 \text{ fyrir steinsteypu}$$

$$F_{\sigma} = \left( \frac{\sigma'_{v;0}}{\sigma_a} \right)^{0,25}$$

Núningsmótstaða er þó aldrei reiknuð lægri en

$$\tau_{s;k} = 0,1 \cdot \sigma'_{v;0}$$

Sá jarðtæknistuðull sem skiptir mestu máli í þessari aðferð er þéttleikastuðull jarðvegs,  $D_r$ , sem út frá CPT er hægt að reikna sem

$$D_r = 0,4 \cdot \ln \left[ \frac{q_c}{22 \cdot (\sigma'_{v;0} \cdot \sigma_a)^{0,5}} \right]$$

Þar sem

$q_c$  = Mæld óleiðrétt endamótstaða við þrýstiborun (CPT)

$\sigma'_{v;0}$  = Reiknuð virk spenna í jarðlagi

$p_a$  = Viðmiðunarþrýstingur (100 kPa)

Endamótstaðan er síðan reiknuð á eftirfarandi hátt fyrir staur sem er með lokaðan enda

$$q_{b,cal} = 0,8 \cdot \frac{q_c}{(1 + D_r^2)}$$

### 2.3.2 Fugro-05 aðferðin

Fugro-05 er reikniaðferð sem byggir á gögnum frá CPT, þróuð af verkfræðingum hjá hollenska fyrirtækinu Fugro og birtist hún fyrst opinberlega árið 2014. Burðargeta frá hliðarviðnámi staurisins við jarðefni er reiknað beint með keilumótstöðunni  $q_c$  frá CPT gögnum. Burðargetan fer einnig eftir rásstærni staurisins og rekdýpt. Aðferðin gerir greinarmun á tog- og þrýstílagi [4].

Hliðarviðnám, þrýstingur:

$$\tau_f = 0,08 \cdot q_c \cdot \left( \frac{\sigma'_{v0}}{p_a} \right)^{0,05} \cdot \left( \frac{h}{R^*} \right)^{-0,9}, \quad \text{fyrir } \frac{h}{R^*} \geq 4$$

$$\tau_f = 0,08 \cdot q_c \cdot \left( \frac{\sigma'_{v0}}{p_a} \right)^{0,05} \cdot (4)^{-0,9} \cdot \left( \frac{h}{4R^*} \right), \quad \text{fyrir } \frac{h}{R^*} < 4$$

Hliðarviðnám, tog

$$\tau_f = 0,045 \cdot q_c \cdot \left( \frac{\sigma'_{v0}}{p_a} \right)^{0,15} \cdot \left[ \max \left( \frac{h}{R^*}, 4 \right) \right]^{-0,85}$$

Þar sem:

$q_c$  = Keilumótstaða

$\sigma'_{v0}$  = Lóðrétta virka spennan á dýpi  $z$

$p_a$  = Viðmiðunarþrýstingur andrúmslofts (100 kPa)

$h$  = Fjarlægð handan stauraenda = lengd staur – dýpt  $z$

$R$  = Ytri rásstærni staur ( $D/2$ )

$R_i$  = Innri rásstærni staur ( $D_i/2$ )

$R^*$  = Samsvarandi rásstærni =  $(R^2 - R_i^2)^{0,5}$ , Jafnt  $R$  fyrir staura með lokaðan enda



Endaviðnám:

Endaviðnámið er fall af meðalkeilumótstöðunni  $q_c$  frá CPT yfir dýpt  $\pm 1,5$  þvermál stauris við enda staurisins. Jafnan fyrir endaviðnám stauris skv. Fugro-05 er [4]:

$$\frac{q_{b0.1}}{p_a} = 8,5 \cdot \left(\frac{\bar{q}_c}{p_a}\right)^{0,5} \cdot A_r^{0,5}$$

Þar sem:

$q_{b0.1}$  = Endamótstaða

$\bar{q}_c$  = Meðalkeilumótstaðan  $q_c$  yfir dýptina  $\pm 1,5$  þvermál stauris kringum stauraenda

$A_r$  = Flatarmálshlutfall,  $1 - \left(\frac{D_i}{D}\right)^2$

Verður þá heildarburðurinn:

$$R_{c;k} = \frac{R_{s,cal} + R_{b,cal}}{\xi}$$

Þar sem:

$R_{s,cal}$  =  $\sum \tau_f \cdot A_s$  = kraftur sem er tekinn upp með núningi

$R_{b,cal}$  =  $q_{b0.1} \cdot A_p$  = reiknuð endamótstaða við enda á staur

$\xi$  = Leiðréttingarstuðull

$A_s$  = Yfirborðsflatarmál stauris

$A_p$  = Þverskurðarflatarmál við enda á staur

### 2.3.3 SPT aðferð Briaud et al.

Fyrir grófkornóttan jarðveg skilgreindi Briaud et al. eftirfarandi reikniaðferð til að ákvarða endaburð staura út frá gögnum úr SPT borunum [10].

$$q_p = 19,7 \cdot p_a \cdot (N_{60})^{0,36}$$

Þar sem:

$N_{60}$  = meðalhöggfjöldi úr SPT borun við stauraenda (um 10D fyrir ofan og 4D fyrir neðan)

Endaburður verður þá:

$$Q_p = A_p \cdot q_p$$

Fyrir hliðarburðinn notar aðferðin meðalhöggafjöldann yfir alla lengd staurisins  $\overline{N}_{60}$

$$f_{av} \approx 0,224 \cdot p_a \cdot (\overline{N}_{60})^{0,29}$$

Heildar hliðarburður er þá:

$$Q_s = p \cdot L \cdot f_{av}$$

Þar sem:

p = ummál staurs

L = Lengd staurs

### 3 SAMANBURÐUR REIKNIAÐFERÐA

Til að skoða reikniaðferðirnar sem er fjallað um í kafla 2, þá eru niðurstöður frá þeim bornar saman við statísk álagspróf, PDA álagspróf sem og hefðbundnar reikniaðferðir. Því var valið að framkvæma CPT boranir á stöðum þar sem til voru gögn úr statískum álagsprófum svo hægt væri að gera samanburð við reikniaðferðirnar. Þeir staðir sem urðu fyrir valinu eru:

- Eskifjörður
- Jökulsá í Fljótsdal

#### 3.1 Eskifjörður

Valið var að gera CPT borun á Eskifirði þar sem jarðlög á svæðinu er úr siltrikum lífrænum sandi og gögn úr statískum álagsprófum, fjölmörgum PDA álagsprófum og SPT borunum voru aðgengileg. Þannig er hægt að bera niðurstöður reikniaðferða saman við hinar ýmsu prófanir á svæðinu. Ein CPT borun var framkvæmd á Eskifirði í júní 2022.

Aðeins tókst á bora niður á 8,4 metra dýpi, þá stoppaði borinn. Staurar á svæðinu eru með rekdýpt frá 34,6 metrum upp í 58,6 metra við nýjan viðlegukant og þá er 23 metra rekdýpt við frystigeymslu þar sem CPT var framkvæmt. Æskilegt væri að vera með fleiri boranir sem ná a.m.k. niður á 23 metra dýpi svo hægt væri að gera góðan samanburð á reikniaðferðum sem nota upplýsingar um jarðlög úr CPT til að meta burðargetu stauranna.

Til að geta gert samanburð var valið að reikna burðargetu stauris sem hefði rekdýpt sem samsvarar dýpt borunnar, þ.e. 8,4 metra. Það er síðan borið saman við skalaða niðurstöður úr álagsprófunum þar sem burðarþol er umreiknað á fermeter af staur. Þannig er ekki verið að bera saman heildarburðargetu heldur burðargetu á fermetra. Þetta felur í sér nokkra óvissu þar sem mikið af jarðlögum er sleppt og gæti staur sem væri rekin dýpra lent í mjög veikum eða mjög þéttum jarðlögum sem gætu haft veruleg áhrif á hliðarburð staurisins. Einnig er endaburðurinn ekki rétt metinn, hann er eingöngu háður þeim aðstæðum sem eru við enda staurisins og stjórnað af því jarðlagi sem hann stoppar í.

Þannig var haldið áfram og reiknuð burðargetu á fermetra fyrir bæði NGI99 aðferðina og Fugro-05 aðferðina sem báðar nota niðurstöður úr CPT við útreikninga. Þar sem gögn úr SPT borunum eru aðgengilegar frá jarðtæknirannsóknnum sem gerðar voru fyrir Eskju og Fjarðabyggð á svæðinu er einnig hægt að gera samanburð við reikniaðferð Briaud et al. sem notar gögn frá SPT.

Niðurstöður úr CPT er einnig bornar saman við PV91 aðferðina [2] og mat á burðarþoli byggt á höggborun (borro).

### 3.1.1 Útreikningar NGI99, Fugro-05, PV91 og Briaud et al.

Gert er ráð fyrir að grunnvatn sé við yfirborð.

Bæði NGI99 aðferð og Fugro-05 nota keilumótstöðu sem fæst beint frá CPT borun til að meta burðargetu. Valið var að nota rúmpýngd grundunarefnis  $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$  [11]. Fyrir NGI99 aðferð eru eftirfarandi breytur valdar:

$$F_{\text{last}} = 1,3 \text{ fyrir þrýstiáraun}$$

$$F_{\text{spiss}} = 1,6 \text{ fyrir staura með lokuðum enda}$$

$$F_{\text{mat}} = 1,2 \text{ fyrir steiptan staur}$$

Fyrir PV91 var valin núningsstuðull  $\beta \approx 0,3$  og burðarþolsstuðull  $N_q \approx 20$ .

**TAFLA 2** Niðurstöður útreikninga frá Eskifirði með NGI99, Fugro-05 og PV91

AÐFERÐ	LENGD STAURS [M]	HLIÐARBURÐUR $Q_s$ [KN]	ENDABURÐUR $Q_p$ [KN]	HEILDARBURÐUR $Q_u$ [KN]	BURÐARGETA/FLATAR- MÁL [KN/ M <sup>2</sup> ]
NGI99	8,4	350,5	572,2	922,7	77,8
Fugro-05	8,4	302,7	547,7	850,4	71,7
PV91	23,0	1132,0	574,2	1706,2	52,8

Tafla 2 sýnir reiknaða burðargetu fyrir staur með lengd 8,4 metrar út frá NGI99 og Fugro-05 aðferð. Yfirborðsflatarmál stauris með hliðarlengdir 35x35cm og lengd 8,4 metrar er  $A \approx 11,9 \text{ m}^2$ . Fyrir styttri staura getur endaburður verið talsvert hlutfall af heildarburðinum og gefur því hærri burðargetu á flatarmál.

Fyrir PV91 er burðarþol reiknað fyrir staur sem er 23 metra langur og  $A \approx 32,3 \text{ m}^2$ .

**TAFLA 3** Niðurstöður útreikninga frá Eskifirði með SPT aðferð Briaud et al.

BORHOLA	LENGD STAURS [M]	HLIÐARBURÐUR $Q_s$ [KN]	ENDABURÐUR $Q_p$ [KN]	HEILDARBURÐUR $Q_u$ [KN]	BURÐARGETA/FLATAR- MÁL [KN/ M <sup>2</sup> ]
SPT01	21,2	1240,8	430,8	1671,6	56,1
SPT02	27,2	1663,2	607,6	2270,8	59,4
SPT03	24,2	1262,6	335,6	1598,2	47,0
SPT04	21,2	1268,2	486,2	1754,4	58,9
SPT05	27,3	1750,8	607,6	2359,4	61,5
SPT10	28,7	1429,8	615,9	2045,7	50,8
SPT11	24,3	1431,8	358,4	1790,2	52,4
SPT12	24,3	1315,5	309,7	1625,2	47,6
<b>Meðaltal:</b>					<b>54,2</b>

Í Tafla 3 eru útreikningar fyrir burðargetu með aðferð Briaud et al. sem notar gögn úr SPT borunum. Lengd stauranna var skilgreind sem sú sama og dýpi borholanna, sem ná frá 21,2 metrum niður í 28,7 metra fyrir dýpstu holuna. Þannig að heildarflatarmál stauranna er einnig breytilegt, hliðarlengdir eru skilgreindar sem 35x35cm.



MYND 3 Staðsetning SPT borhola á Eskifirði [12]

### 3.1.2 Niðurstöður úr álagsprófunum

Gerð hafa verið fjölmörg dýnamísk álagspróf á staurum á Eskifirði, bæði fyrir viðlegukant þar sem framkvæmd voru 14 PDA álagspróf árið 2020 og fyrir frystigeymslu þar sem framkvæmd voru 13 PDA álagspróf og 4 statísk álagspróf. Fjallað var um þessar prófanir í fyrstu áfangaskýrslunni [1].

Þar sem staurarnir við viðlegukantinn ná talsverðu dýpi (allt að 65,5 metrum) var ákveðið að nota aðeins samanburð við staura sem reknir voru við frystigeymslu, rekdýpt þeirra er um 23 metrar.

TAFLA 4 Niðurstöður mælinga úr PDA frá Eskifirði - Frystigeymsla

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [TM/M]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [KN/M <sup>2</sup> ]
Eskifjörður, frystigeymsla – P37	Siltríkur lífrænn sandur	Mikil	Steypa, 35x35 cm, lengd 23 m		68,0
Eskifjörður, frystigeymsla – P10	Siltríkur lífrænn sandur	Mikil	Steypa, 35x35 cm, lengd 23 m		81,7
Eskifjörður, frystigeymsla – P52	Siltríkur lífrænn sandur	Mikil	Steypa, 35x35 cm, lengd 23 m		63,7
Eskifjörður, frystigeymsla – P218	Siltríkur lífrænn sandur	Mikil	Steypa, 35x35 cm, lengd 23 m		79,2
Eskifjörður, frystigeymsla – P207	Siltríkur lífrænn sandur	Mikil	Steypa, 35x35 cm, lengd 23 m		56,2
Eskifjörður, frystigeymsla – P217	Siltríkur lífrænn sandur	Mikil	Steypa, 35x35 cm, lengd 23 m		82,9
Eskifjörður, frystigeymsla – P383	Siltríkur lífrænn sandur	Mikil	Steypa, 35x35 cm, lengd 23 m		61,8
Eskifjörður, frystigeymsla – P425	Siltríkur lífrænn sandur	Mikil	Steypa, 35x35 cm, lengd 23 m		68,6
Eskifjörður, frystigeymsla – P398	Siltríkur lífrænn sandur	Mikil	Steypa, 35x35 cm, lengd 23 m		64,0
<b>Meðaltal:</b>					<b>69,6</b>

Staurar voru prófaðir milli 15.05.2020 og 20.05.2020. Hamar sem notaður var: Junttan 60 kN. PDA álagspróf notað til að reikna brotálag.

Einnig voru framkvæmd 4 statísk álagspróf við frystigeymsluna.

**TAFLA 5** Niðurstöður mælinga frá Eskifirði - frystigeymsla, statísk álagspróf

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [TM/M]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [KN/M <sup>2</sup> ]
Eskifjörður, frystigeymsla, TP1	Siltríkur lífrænn sandur	Mikil	Steypa, 35x35 cm, lengd 23,6 m		>60,6
Eskifjörður, frystigeymsla, TP2	Siltríkur lífrænn sandur	Mikil	Steypa, 35x35 cm, lengd 23,6 m		>45,5
Eskifjörður, frystigeymsla, TP3	Siltríkur lífrænn sandur	Mikil	Steypa, 35x35 cm, lengd 23,6 m		>60,6
Eskifjörður, frystigeymsla, TP4	Siltríkur lífrænn sandur	Mikil	Steypa, 35x35 cm, lengd 23,6 m		>60,6
<b>Meðaltal:</b>					<b>56,8</b>

Staurar voru prófaðir 01.06.2020 og 02.06.2020. Hamar sem notaður var: Junttan 60 kN. 90% aðferð notuð til að reikna brotálag. Lengd skilgreind sem fjarlægð milli skynjara og táar.

Hafa þarf í huga að ekki tókst að mæla endanlegt burðarþol allra stauranna þar sem ekki náðist að leggja meira en 2000 kN álag á þá. Aðeins einn staurinn náði brotálagi sínu, var það staur TP2 sem náði upp í 1500 kN.

### 3.1.3 Samanburður við álagspróf

Í töflunni hér að neðan eru reikniaðferðir úr kafla 3.1.1 bornar saman við niðurstöður úr álagsprófunum í kafla 3.1.2. Þar sem aðeins einn staur úr statísku álagsprófunum var keyrður í brot því var talið betra að gera samanburð milli reikniaðferðanna og dýnamísku álagsprófana.

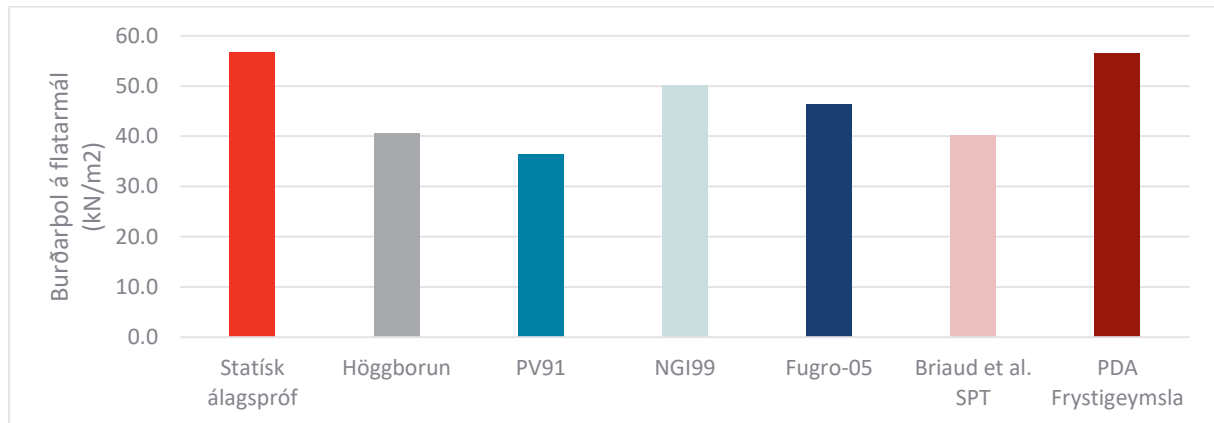
Fyrir áætlaða burðargetu út frá höggborun var notast við sand og mikla pökkun.

**TAFLA 6** Samanburður á burðarþoli staura áætluðum með reikniaðferðum og álagsprófunum, meðaltal frá álagsprófunum er notað

	PV91 [KN/M <sup>2</sup> ]	HÖGGBORUN [KN/M <sup>2</sup> ]	NGI99 [KN/M <sup>2</sup> ]	FUGRO-05 [KN/M <sup>2</sup> ]	BRIAUD ET AL. SPT AÐFERÐ [KN/M <sup>2</sup> ]	PDA ÁLAGSPRÓF [KN/M <sup>2</sup> ]
Mælt/reiknað meðaltal burðarþols, $R_{c,m}$	52,8	58,8	77,8	71,7	54,2	69,6
Leiðréttingarstuðull, $\xi$	1,45	1,45	1,55	1,55	1,35	1,23
Kennigildi, $R_{c,k}$	<b>36,4</b>	<b>40,6</b>	<b>50,2</b>	<b>46,3</b>	<b>40,2</b>	<b>56,6</b>
Hlutfall af PDA álagsprófi	64%	72%	89%	82%	71%	-

Niðurstöður úr Tafla 6 sýna að þessar reikniaðferðir sem nota CPT gögn virðast gefa nokkuð nákvæma hugmynd um endanlega burðargetu stauranna. Það er hins vegar erfitt að bera gildin beint saman. Reikniaðferðirnar eru fyrir staura sem eru 8,4 metrar þar sem CPT borunin náði ekki dýpra. Bæði statísku og dýnamísku álagsprófin voru hins vegar gerð á staurum sem eru um 23 metra langir.

Leiðréttingarstuðull er valin skv. gildum í Peleveildningun [2] og fer eftir fjölda prófanna og tegund reikniáðferðar, við meiri þekkingu á jarðvegsaðstæðum lækkar leiðréttingarstuðullinn.



**MYND 4** Samanburður reikniáðferða við álagspróf á Eskifirði

### 3.2 Jökulsá í Fljótsdal

Þegar G. Þ. Bergsson [3] tók saman gögn fyrir lokaverkefnið sitt voru til gögn úr statískum álagsprófum og niðurrekstrargögn fyrir 18 staura. Niðurrekstrargögnin voru svo notuð til að áætla burðargetu stauranna með rekjöfnu Janbu [2]. Tveir staurar voru prófaðir með statísku álagsprófi í maí 2001 og var einn þeirra prófaður tvisvar með 5 daga millibili, samanlagt þrjár prófanir. Brotálag þeirra var áætlað með 90% aðferðinni.

Með þessi tiltæku gögn og jarðveg sem talin var samanstanda úr hreinum sandi var ákveðið að framkvæma CPT svo hægt væri að gera samanburð við reikniáðferðir sem kynntar voru í kafla 3. Gerðar voru tvær CPT mælingar við Jökulsá í Fljótsdal 25.05.2022.

Borholurnar sem voru boraðar náðu aðeins niður á 5,9 og 10,0 metra dýpi og oddurinn stoppaði þar. Staurarnir á svæðinu voru hins vegar reknir niður á 29,0 til 29,5 metra dýpi. Niðurstaðan hér er því sú sama og á Eskifirði, þ.e. þar sem borholurnar ná ekki niður á sama dýpi og staurarnir þarf aftur að bera saman burðargetu á flatarmáli stauris en ekki heildarburðargetu. Staurarnir sem voru prófaðir eru allir 27x27cm á kant.

#### 3.2.1 Útreikningar NGI99, Fugro-05, PV91 og rekjöfnu Janbu

Gert er ráð fyrir að grunnvatn sé við yfirborð.

Bæði NGI99 aðferð og Fugro-05 nota keilumótstöðu sem fæst beint frá CPT borun til að meta burðargetu stauranna. Valið var að nota rúmpýngd grundunarefnis  $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$  þar sem jarðlög eru talin samanstanda úr hreinum sandi. Fyrir NGI99 aðferð eru eftirfarandi breytur valdar:

$$F_{\text{last}} = 1,3 \text{ fyrir þrýstiáraun}$$

$$F_{\text{spiss}} = 1,6 \text{ fyrir staura með lokuðum enda}$$

$$F_{\text{mat}} = 1,2 \text{ fyrir steiptan staur}$$

Gerðar voru tvær boranir CPT1 og CPT2 og því hægt að reikna burðargetu fyrir þær báðar.

**TAFLA 7** Niðurstöður útreikninga frá Jökulsá í Fljótsdal með NGI99

BORHOLA	LENGD STAURS [M]	HLIÐARBURÐUR Q <sub>s</sub> [KN]	ENDABURÐUR Q <sub>p</sub> [KN]	HEILDARBURÐUR Q <sub>u</sub> [KN]	BURÐARGETA/FLATAR MÁL [KN/ M <sup>2</sup> ]
CPT1	5,9	278,6	286,0	564,6	87,5
CPT2	10,0	339,3	196,1	535,4	49,2

**TAFLA 8** Niðurstöður útreikninga frá Jökulsá í Fljótsdal með Fugro-05

BORHOLA	LENGD STAURS [M]	HLIÐARBURÐUR Q <sub>s</sub> [KN]	ENDABURÐUR Q <sub>p</sub> [KN]	HEILDARBURÐUR Q <sub>u</sub> [KN]	BURÐARGETA/FLATAR MÁL [KN/ M <sup>2</sup> ]
CPT1	5,9	315,4	482,0	797,4	123,5
CPT2	10,0	255,4	325,0	580,4	53,3

**TAFLA 9** Niðurstöður útreikninga við Jökulsá í Fljótsdal með PV91,  $\beta = 0,35$  og  $N_q = 32$

LENGD STAURS [M]	HLIÐARBURÐUR Q <sub>s</sub> [KN]	ENDABURÐUR Q <sub>p</sub> [KN]	HEILDARBURÐUR Q <sub>u</sub> [KN]	BURÐARGETA/FLATAR MÁL [KN/ M <sup>2</sup> ]
29,5	1151,5	632,4	1783,9	41,6

Þrátt fyrir að vera að áætla burðarþol fyrir aðeins 5,9 metra langan staur fyrir borholu CPT1 er hann með meiri burðargetu en áætlað burðarþol fyrir 10,0 m langan staur fyrir borholu CPT2. Endaburðurinn er mun hærri í borholu CPT1 og er borinn líklega að lenda í mjög stífum sandi eða malarkenndum sandi sem útskýrir þá líka af hverju borinn stoppaði. Það sýnir líka helsta vandamálið við CPT, þ.e. aðferðin hentar illa í malarkenndum jarðvegi þar sem keilan eða viðnámshulsan gætu skaðast.

Þar sem gildin úr CPT1 eru svo há og borholan svo grunn var valið að bera bara saman niðurstöður úr álagsprófunum við reikniaðferðir með gögnum úr borholu CPT2.

Hluti af mastersverkefni G. Þ. Bergsson [3] var að reikna brotálag stauranna út frá niðurrekstrargögnum með rekjöfnum. Þessar niðurstöður eru teknar beint úr því verkefni og eru birtar hér að neðan.

**TAFLA 10** Niðurstöður frá rekjöfnum Janbu frá Jökulsá í Fljótsdal

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [TM/M]	BURÐARGETA/FLATARMÁL [KN/M <sup>2</sup> ]
Jökulsá í Fljótsdal	Sandur	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 29,5 m	11,9	25
Jökulsá í Fljótsdal	Sandur	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 29,5 m	11,9	27
Jökulsá í Fljótsdal	Sandur	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 29,5 m	11,9	21
Jökulsá í Fljótsdal	Sandur	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 29 m	12,4	25
Jökulsá í Fljótsdal	Sandur	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 29,5 m	11,9	22



STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STÁUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [TM/M]	BURÐARGETA/FLATARMÁL [KN/M <sup>2</sup> ]
Jökulsá í Fljótsdal	Sandur	Lítil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 29,5 m	11,9	24
Jökulsá í Fljótsdal	Sandur	Lítil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 29 m	12,4	26
Jökulsá í Fljótsdal	Sandur	Lítil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 29,5 m	11,9	18
Jökulsá í Fljótsdal	Sandur	Lítil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 29,5 m	11,9	25
Jökulsá í Fljótsdal	Sandur	Lítil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 29,5 m	11,9	22
Jökulsá í Fljótsdal	Sandur	Lítil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 29,5 m	11,9	23
Jökulsá í Fljótsdal	Sandur	Lítil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 29,5 m	11,9	26
Jökulsá í Fljótsdal	Sandur	Lítil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 29,5 m	11,9	25
Jökulsá í Fljótsdal	Sandur	Lítil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 29,5 m	11,9	26
Jökulsá í Fljótsdal	Sandur	Lítil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 29,5 m	11,9	25
<b>Meðaltal:</b>					<b>24</b>

Dagsetningu vantar. Hamar sem notaður var: SC:30. Aðferð Janbu notuð til að reikna brotálag, lægsta gildi: 18,0 kN/m<sup>2</sup>.

### 3.2.2 Samanburður við álagspróf

Ein aðalástæða fyrir því að valið var að framkvæma CPT boranir við Jökulsá í Fljótsdal var að þar eru til gögn frá statískum álagsprófum sem voru framkvæmd í maí 2001. Til eru gögn frá þremur statískum álagsprófunum sem framkvæmd voru á tveimur staurum, einn staurinn (staur 8) var prófaður tvisvar. Staurarnir sem prófaðir voru með álagsprófum standa í stöpli 4.

**TAFLA 11** Niðurstöður mælinga frá Jökulsá í Fljótsdal, statísk álagspróf

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STÁUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [TM/M]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [KN/M <sup>2</sup> ]
Jökulsá í Fljótsdal*	Sandur	Lítil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 29,5 m	11,9	>43,6
Jökulsá í Fljótsdal*	Sandur	Lítil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 29,5 m	11,9	>47,1
Jökulsá í Fljótsdal	Sandur	Lítil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 29,5 m	11,9	>36,1
<b>Meðaltal:</b>					<b>&gt;42,3</b>

Staurar prófaðir 22.05.2001 og 27.05.2001. Hamar sem notaður var: SC:30. 90% aðferð notuð til að reikna brotálag, lægsta gildi: 36,1 kN/m<sup>2</sup> (\* sami staur prófaður tvisvar, 47,1 kN/m<sup>2</sup> frá 22.05.2001 og 43,6 kN/m<sup>2</sup> frá 27.05.2001).

### 3.2.3 Samanburður við álagspróf

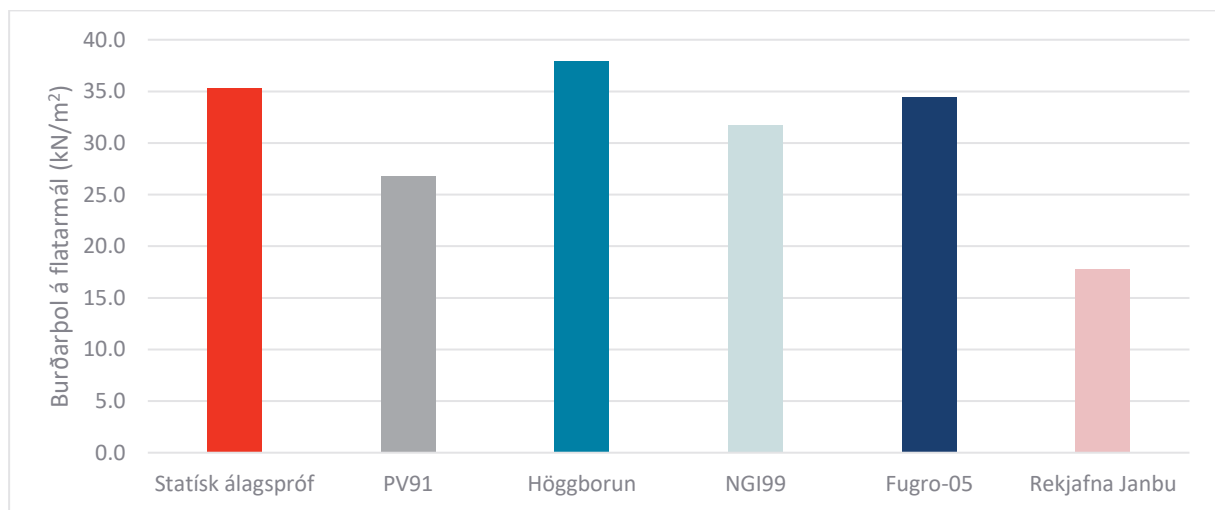
Í töflunni hér að neðan eru reikniaðferðir úr kafla 3.2.1 bornar saman við niðurstöður úr álagsprófunum í kafla 3.2.2.

Fyrir áætlaða burðargetu út frá höggborun var notast við sand og mikla pökkun.

**TAFLA 12** Samanburður á burðarþoli staura fenginn með reikniaðferðum og álagsprófum, meðaltal mælinga notað

	STATÍSKT ÁLAGSPRÓF [KN/M <sup>2</sup> ]	NGI99 [KN/M <sup>2</sup> ]	FUGRO-05 [KN/M <sup>2</sup> ]	JANBU [KN/M <sup>2</sup> ]	PV91 [KN/M <sup>2</sup> ]	HÖGGBORUN [KN/M <sup>2</sup> ]
Mælt/reiknað meðaltal burðarþols, $R_{c,m}$	42,3	49,2	53,3	24	41,6	58,8
Leiðréttingarstuðull, $\xi$	1,20	1,55	1,55	1,35	1,55	1,55
Kennigildi, $R_{c,k}$	<b>35,3</b>	<b>31,7</b>	<b>34,4</b>	<b>17,8</b>	<b>26,8</b>	<b>37,9</b>
Hlutfall af statísku álagsprófi	-	75%	81%	42%	76%	108%

Reikniaðferðirnar NGI99 og Fugro-05 virðast gefa ágætis samanburð við statísku álagsprófin. Hér er þó aftur sama vandamál og við samanburðinn á Eskifirði, borholurnar voru einfaldlega ekki nógu djúpar til að hægt sé að gera beinan samanburð á burðargetu. Það þarf því að gera samanburð á burðargetu á flatarmálseiningu og getur það gefið villandi niðurstöður.



**MYND 5** Samanburður reikniaðferða við álagspróf við Jökulsá í Fljótssdal

### 3.3 Umfjöllun um niðurstöður

Þó að NGI99 og Fugro-05 séu oft að gefa samsvarandi niðurstöður á heildarburði er oft þónokkur munur á samsetningu hliðarburðar og endaburðar. Það vakna því spurningar hvernig reiknuð burðargeta væri skv. reikniðferðum ef gögn væru til fyrir nægilega djúpa borholu. Þegar dýpi á staur eykst lækkar yfirleitt hlutfall endaburðs af heildarburði hratt, sérstaklega ef rekið er í mjög þétt jarðlög.

Báðar aðferðirnar sem voru til skoðunar, sem nota gögn frá CPT, gefa sambærilegar niðurstöður. Æskilegt væri að gera fleiri CPT mælingar svo hægt yrði að gera betri tölfræðilegan samanburð við álagspróf.

#### 3.3.1 Eskifjörður

Útreikningar byggðir á SPT gefa lægra burðarþol en aðrar aðferðir, enda gengur hún út á að finna meðalhliðarviðnámið  $f_{av}$  fyrir allan staurinn út frá meðalhöggfjöldanum. Gefur aðferðin hins vegar ágætis niðurstöður ef borið er saman við álagspróf, ein ástæða er að það eru til 8 borholur og lækkar því leiðréttingarstuðullinn úr 1,55 fyrir eina holu niður í 1,35 fyrir 7 eða fleiri borholur.

Reikniðferðir sem nota CPT gögn virðast vera nær niðurstöðum sem fást úr dýnamískum álagsprófum. Ef reikniðferðir sem nýta CPT gögn eru borin saman við dýnamísku álagsprófin gefur NGI99 um 92% og Fugro-05 um 85% af mældu burðarþoli sem áætlað var með PDA álagsprófi. Virðast þetta í fyrstu vera mjög góðar niðurstöður en það mætti búast við því að burðargetan fyrir staur í fullri lengd væri lægri þar sem endaburður er stórt hlutfall af heildarburðargetunni fyrir stuttan staur en lækkar svo fyrir lengri staur. Hefur það í för með sér að burðargeta á flatareiningu lækkar. PV91 og aðferð sem notar mótstöðu frá höggborun gefa gildin sem eru hvað lengst frá álagsprófum, enda eru báðar aðferðir hugsaðar til að gefa gróft mat á burðargetu.

Á Eskifirði var aðeins boruð ein CPT borhola og náði hún ekki niður á nægilegt dýpi svo hægt yrði að gera beinan samanburð við álagspróf. Með fleiri borholum væri hægt að fá betri tölfræðilegri nálgun og taka út mæligögn sem geta gefið villandi útreikninga, t.d. ef ein borholan væri talsvert grynnri en hinar. Einnig myndu fleiri borholur lækka leiðréttingarstuðulinn og gefa áreiðanlegri mat á burðargetu staura á svæðinu.

Einn ókostur CPT borana er að ef farið er í gegnum mjög þéttan eða malarkennd jarðlög getur búnaðurinn/oddurinn skemmst eða stoppað. Ef það væri t.d. þunnt malarlag gæti það stöðvað borunina. Jarðveginum við Eskifjörð er lýst í grófum dráttum sem siltrikum lífrænum sandi en samt má finna þar malarkenndan sand og malarlög [11].

#### 3.3.2 Jökulsá í Fljótsdal

Við Jökulsá í Fljótsdal voru boraðar tvær CPT borholur, aðeins ein nýttist við útreikninga þar sem hin þótti of grunn og hefur líklega stoppað í hörðu jarðlagi eða á grjóti. Eins og fyrir staurana á Eskifirði þá virðast reikniðferðirnar sem nýta sér CPT gefa góðar niðurstöður samanborið við álagspróf. Ein borhola er hins vegar ekki nægileg til að hægt sé að ákvarða með vissu áreiðanleika útreikninga, þar að auki var ekki farið á nægilegt dýpi. Hér hefði því þurft fleiri gögn svo hægt væri að mæla áreiðanleika

reikniaðferðanna. Þær niðurstöður sem fengust fyrir reikniaðferðirnar NGI99 og Fugro-05 eru þó að gefa góðar niðurstöður samanborið við eldri aðferðir eins og PV91 og rekjöfnu Janbu. Með fleiri borunum væri einnig hægt að lækka leiðréttingarstuðulinn meira og fengust þá mögulega betri niðurstöður.

Gerð voru þrjú statísk álagspróf á staura við Jökulsá í Fljótsdal þar af voru tvö gerð á sama staur með fimm daga millibili. Í ljós kom að seinna álagsprófið gaf lægri burðargetu en það fyrra, þetta er ekki reynslan af sendnum jarðvegi þar sem burðargeta ætti að hækka við lengri tíma frá niðurrekstri þar til ákveðnu hámarki er náð. Gæti þetta bent til að malarlög leynist á meira dýpi en CPT borunin náði til.

### 3.3.3 CPT rannsóknir á Íslandi

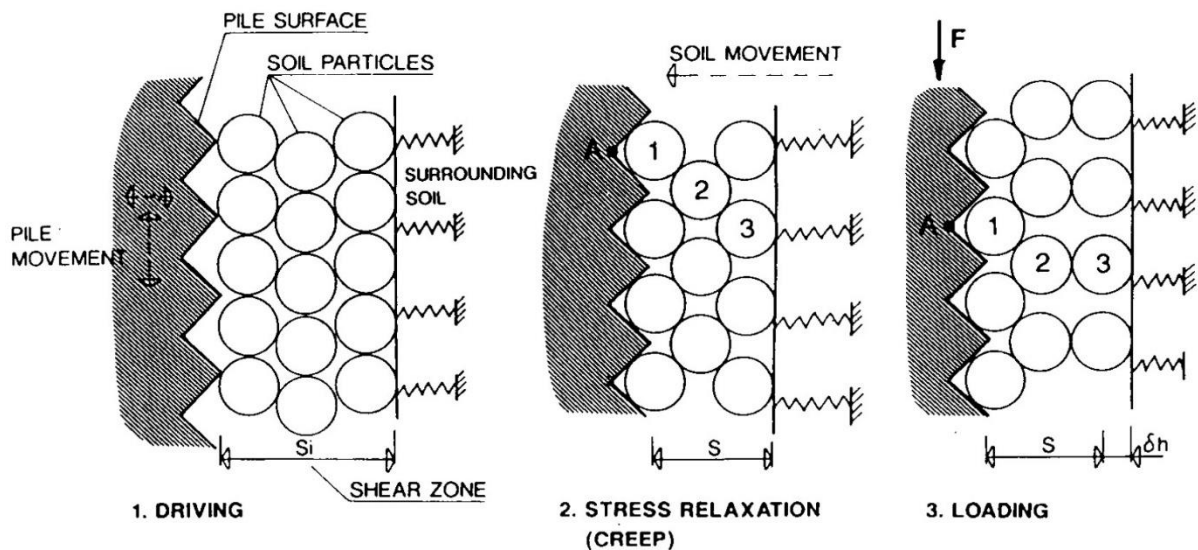
Útreikningar á burðarþoli fljóttandi staura byggðir á niðurstöðum úr CPT gefa betri nálgun við mælt burðarþol staura í álagsprófi en aðrar hefðbundnar reikniaðferðir, með þeim fyrirvara að ekki tókst að bora nógu langt niður með CPT eins og æskilegt hefði verið. Það kemur s.s. ekki á óvart enda hafa rannsóknir erlendis sýnt fram á að aðferðin er nákvæmari en aðrar aðferðir sem almennt eru notaðar.

Það er talin full ástæða til að halda áfram með CPT prófanir til að fá inntaksbreytur í hönnun á stauraundirstöðum og reyna að meta betur virkni þeirrar hönnunaraðferðar við Íslenskar aðstæður. Það þarf hins vegar að skoða betur hvernig hægt er að standa að CPT þannig að hægt sé að bora nógu djúpt til að gögnin nýtist við hönnun.

Val á CPT prófun ætti t.d. að vera framkvæmt að undangenginni heildarborun sem staðfestir þá að hægt sé að gera CPT og þá væri einnig hægt að fóðra í gegnum harðari eða grófari jarðlög.

## 4 TÍMAÁHRIF Á BURÐARÞOL

Langtímaáhrif á staura í sendnum jarðvegi lýsa sér sem aukinni burðargetu yfir ákveðið tímabil vegna losunar póruvatnsþrýstings sem myndast þegar staurinn er rekin niður. Nokkrar rannsóknir sem hafa verið gerðar á þessum áhrifum sýna að aukningin getur orðið talsverð í jarðefnum með enga samloðun. Þrátt fyrir fjölda rannsókna á þessum tímaáhrifum hefur ekki enn náðst fullur skilningur á fyrirbærinu. Þessi áhrif sem valda aukinni burðargetu staura í sandi sem fylgja því þegar jarðvegurinn verður fyrir truflunum vegna samþjöppunar er kallað „öldrun“ (e. Soil aging) [13].



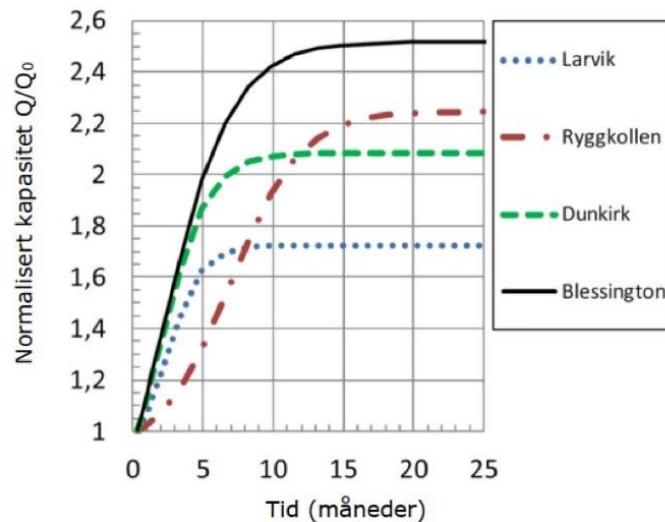
**MYND 6** Skýringarmynd af því hvernig burðargeta eykst í fínkornaefni vegna öldrunar [13]

Ein rannsókn á tímaáhrifum á burðargetu staura var tekin saman af Karlsrud et al. [9] þar sem gögn fengust fyrir staura á fjórum stöðum með sendnum jarðvegi og tímaáhrif voru mæld yfir 10 – 12 mánaða tímabil. Þar er keilumótstaða frá CPT notuð til að skilgreina tegund/eiginleika sands samanber töflunni hér að neðan.

**TAFLA 13** Eiginleikar jarðvegs sem voru til skoðunar, mælingar frá Eskifirði innifaldar [2]

STAÐUR	GERÐ SANDS	KEILUMÓTSTAÐA FRÁ CPT, $Q_c$ (MPa)
Larvík	Laust pakkaður sandur með einstaka lagi af leirríku silti	1-10
Ryggkollen	Þétt pakkaður jökulruðningur með millilögum af sandi og steinum	20-35
Dunkirk	Mjög þéttur millisandur	10-25
Blessington	Meðal þéttur sandur	10-20
Eskifjörður	Siltríkur lífrænn sandur	1-15

Mynd 7 sýnir hversu veruleg þessi tímaáhrif á burðargetu geta verið, hækkunin á burðargetunni á þeim stöðum sem skoðaðir voru eru frá 1,75 upp í 2,5 sinnum meiri en við upphaflega mælingu.



**MYND 7** Mæld aukning á burðarþoli staura sem verða fyrir togálagi með tíma,  $t_0 = 10$  dagar [2]

Miðað er við að fyrsta álagsprófið sé gert 10 dögum eftir niðurrekstur þegar þórúprýstingur er búin að jafna sig. Það er þekkt að það tekur tíma fyrir staura í leir og sandi að „jafna“ sig eftir niðurrekstur og því er raunveruleg upphafsmæling á burðarþoli metin eftir 10 daga frá niðurrekstri.

Með gögnum frá Eskifirði þar sem gerðar voru dýnamískar álagsprófanir á staurum með nokkurra daga millibili er hægt að gera samanburð við niðurstöður frá Karlsrud et al [9].

Þegar gerð voru álagspróf við frystigeymslu á Eskifirði voru fjórir staurar prufaðir tvisvar með nokkurra daga millibili og hækkaði burðargeta þeirra allra á milli mælinga. Með því að skoða þessi tímaáhrif og aukningu á burðargetu stauranna á Eskifirði og bera þau saman við niðurstöður útreikninga frá Karlsrud et al. [9] er hægt að reyna að áætla burðargetu staura í jarðvegi á Eskifirði, breytingu með tíma og hvar líklegt hámark liggur.

**TAFLA 14** Mælingar á tímaáhrifum á Eskifirði

STAUR	TÍMI FRÁ NIÐURREKSTRI AÐ FYRSTA ÁLAGSPRÓFI T <sub>0</sub> (DAGAR)	BURÐARGETA, FYRSTA ÁLAGSPRÓF Q <sub>0</sub> (KN)	TÍMI FRÁ NIÐURREKSTRI AÐ SEINNA ÁLAGSPRÓFI T <sub>1</sub> (DAGAR)	BURÐARGETA, SEINNA ÁLAGSPRÓF Q <sub>1</sub> (KN)
P037	7	2190	24	2790
P052	9	2050	21	2650
P217	10	2550	24	2810
P218	12	2670	24	2790
<b>Meðaltal</b>	<b>9,5</b>	<b>2365</b>	<b>23,3</b>	<b>2760</b>

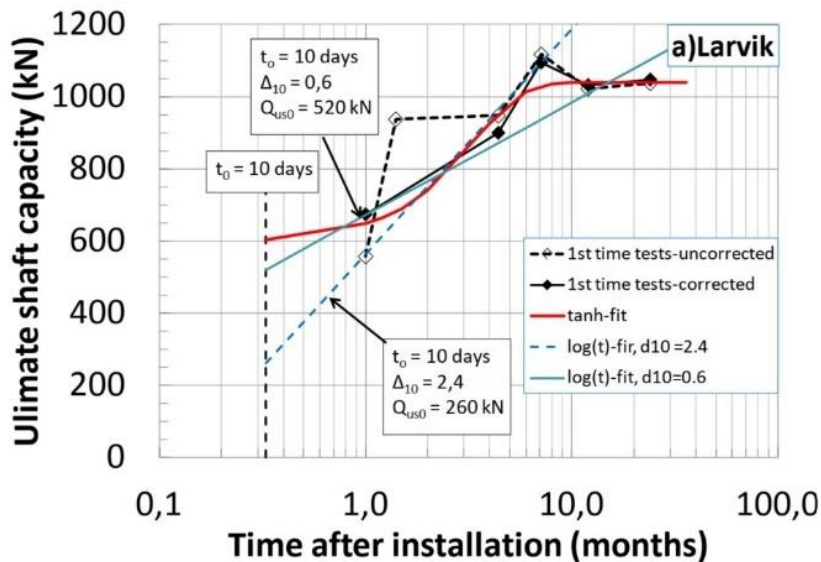
Fyrstu reiknimódel sem reyndu að spá fyrir um tímahrif á burðargetu staura í sandi gerðu ráð fyrir að þau fylgdu lógaritmískri jöfnu. Erfitt reyndist hins vegar að fá gögnin til að passa við lógaritmísku jöfnurnar. Að hluta var það vegna þess að burðargetan hættir að aukast eftir u.þ.b. 12 mánuði og þá gaf aðferðin alltof lága burðargetu eftir viðmiðunartíman  $t_0 = 10$  dagar.

Þannig var reynt að aðlaga gögnin að meira S-laga kúrvu, valið var að nota tanh jöfnu og hún aðlöguð að gögnum frá þessum fjórum stöðum:

$$Q_{us} = Q_{usref} + a \cdot \tanh[b \cdot (t - t_{ref})]$$

Þar sem:

- a = breyta sem samsvarar ( $Q_{USmax} - Q_{USref}$ )
- b = mátunar breyta, eining 1/tíma
- t = tími eftir niðurrekstur
- $t_{ref}$  = metið út frá grafi, tími þar sem hallatala log-tíma er hæst
- $Q_{US}$  = öldruð burðargeta á tíma t
- $Q_{USref}$  = viðmiðunar burðargeta á tíma t = tef
- $Q_{US0}$  = burðargeta á tíma  $t_0 = 10$  dagar
- $Q_{USmax}$  = hámarks burðargeta

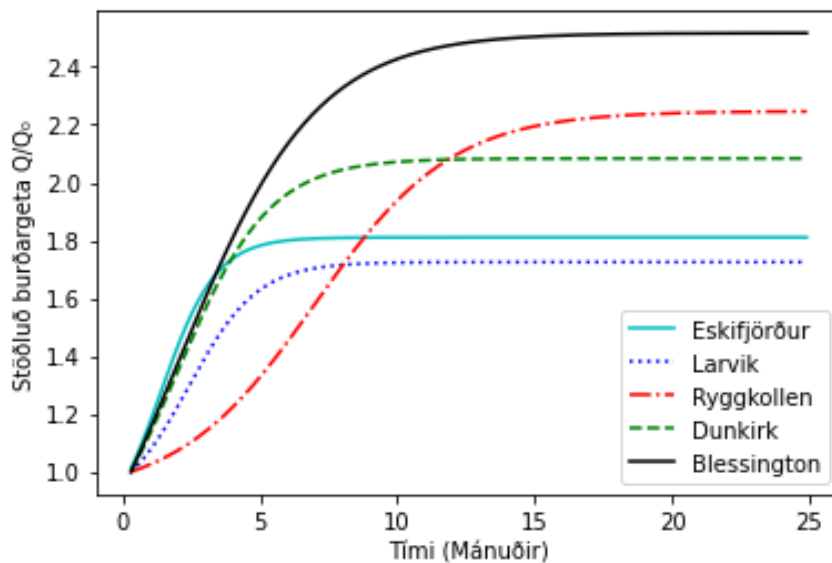


**MYND 8** Niðurstöður mælinga frá Larvik og reiknilíkön aðlöguð að gögnum [9]

Þannig er hægt að nota gögnin frá Eskfirði og þeim staurum sem prófaðir voru aftur með nokkurra daga millibili og aðlaga stuðla svo punktar passi við reiknuð gildi. Það liggja þó aðeins fyrir tvær mælingar og seinni mælingin var tekin 24 dögum eftir niðurrekstur á meðan búast má við að burðargetan geti haldið áfram að aukast í allt að tvö ár eftir niðurrekstur. Því liggja ekki fyrir gögn um endanlegt burðarþol stauranna og þarf því að áætla það.

**TAFLA 15** Breytur sem notaðar eru til reikna burðargetu staura með tíma [9]

STAÐUR	A (KN)	B (1/MÁNUÐIR)	$T_{REF}$ (MÁNUÐIR)	$Q_{USREF}$ (KN)	$Q_{US0}$ (KN)	$Q_{USMAX}$ (KN)
Eskifjörður	1261	0,5	1,4	3020	2365	4281
Larvik	260	0,4	2,4	780	603	1040
Ryggkollen	540	0,2	7	1280	810	1820
Dunkirk	1150	0,3	2,0	2100	1560	3250
Blessington	500	0,2	2,0	600	437	1100



**MYND 9** Burðargeta staura sem fall af tíma með áætlaðri burðargetu frá Eskifirði

Mynd 9 virðist benda til að staurar grundaðir við frystigeymsluna á Eskifirði auki burðargetu sína hratt fyrstu 5 mánuði sína þar til þeir ná ákveðnu hámarki sem er um 1,8 sinnum hærra en burðargetan mæld um 10 dögum frá niðurrekstri. Larvik nær svipuðu hámarki en hækkar þó ekki jafn hratt, báðir þessir staðir hafa frekar lága keilumótstöðu og innihalda siltríkan sand. Það vantar þó frekari mælingar og þyrftu að vera til mælingar á burðarþoli 12 mánuðum eftir niðurrekstur til að hægt væri að sannreyna hámarks burðargetu. Þá þarf að hafa í huga að gögn frá staurum sem skoðaðir voru af Karlsrud et al. [9] sýna að þeir voru prófaðir með togálagi en staurar á Eskifirði voru allir prófaðir með þrýstiálagi.

Þessi aukna burðargeta vegna tímaáhrifa sem má búast við í sandi opnar nýja möguleika fyrir staura sem munu verða fyrir auknu álagi á undirstöður á líftíma sínum. Ef þessi öldrunaráhrif eru skoðuð alveg frá upphafi verkefnis getur burðargetan verið mun hærra eftir nokkra mánuði en stuttu eftir niðurrekstur. Þá er mikilvægt að hafa í huga að staurar verða oft ekki fyrir „hönnunarálagi“ fyrr en nokkrum mánuðum ef ekki hátt í tveim árum eftir niðurrekstur [9].

Þegar tímaáhrif eru skoðuð í grófari jarðvegi en sandi eða leir þá virðast þau ekki koma fram. Sem dæmi má nefna prófanir við Jökulsá í Fljótsdal, þar sem staurar voru prófaðar með nokkurra daga millibili en burðargetan lækkaði í seinna álagsprófi. Bendir þetta til þess að jarðvegurinn gæti innihaldið malarkennt efni/lög og að hann sé ekki úr hreinum sandi eins og honum var lýst í fyrstu.

Einnig má nefna mælingar á staurum við Núpsvötn þar sem jarðvegurinn er nokkuð malarkenndur. Þar mældist engin mismunur í burðarþoli milli staura sem nýlega var búið að reka niður samanborið við staura sem voru jafnvel búnir að standa í mánuð.



## 5 JARÐVEGSRANNSÓKNIR

Mikilvægur þáttur í því að ákvarða burðarþol staura á öruggan og hagkvæman hátt er að hafa nægjanlegar upplýsingar um gerð og eiginleika þess jarðvegs sem reka á staurana í.

Þær jarðvegsrannsóknir sem algengast er að gera í tengslum við hönnun á staurum eru:

- Heildarborun (norska: „totalsondering“)
- Borroborun/höggborun
- Þrýstiborun (CPT)
- Sýnataka
- Prufurekstur og PDA álagspróf

Hér að neðan er fjallað stuttlega um þessar rannsóknir og hvenær þær eiga við eða henta.

### 5.1 Heildarborun (totalsondering)

Þessi aðferð gefur almennt góða hugmynd um lagskiptingu á jarðvegi og er góður grunnur til að taka ákvörðun um frekari rannsóknir. Ef það eru stíf eða veik jarðlög þá t.d. kemur það fram á borprófilnum og þá finnur borunin einnig klöpp og getur staðfest það með innborun.

Þetta er sú rannsókn sem ætti að byrja á í fyrsta fasa verkefna, á forhönnunar- eða frumdragastigi, til að fá grófa hugmynd um jarðvegsaðstæður og til að geta tekið ákvörðun um næstu skref í rannsóknarvinnu.

### 5.2 Höggborun (borro)

Þessi rannsókn gefur grófa hugmynd um jarðlagaskiptingu en það er hins vegar ekki hægt að skilgreina efniseiginleika jarðvegs byggt á höggborun.

Helsti kosturinn við þessa aðferð er sú að hún hefur oftast verið notuð til að áætla burðarþol staura á Íslandi og því er hægt að tengja saman viðmiðunar- og reynslugildi fyrir burðarþol með niðurstöðum úr höggborun.

Ef heildarborun sýnir að ekki sé raunhæft að reka niður staura á fastann botn þá væri hægt að framkvæma höggborun. Þannig er hægt að mæla viðmiðunarmótstöðu og áætla gróflega burðarþol á fljóttandi staurum.

### 5.3 Þrýstiborun (CPT)

Byggt á niðurstöðum úr heildarborun er hægt að meta hvort raunhæft sé að gera CPT. Ef jarðvegur er of stífur eða grófur þá er það yfirleitt ekki talið raunhæft.

Það er hægt að nota mælingar úr CPT sem inntaksbreytur í reikniaðferðir, eins og fjallað er um í kafla 3, til að áætla burðarþol fljótandi staura.

Eins og kemur fram við skoðun á reikniaðferðum, sem byggja á CPT, í verkefninu þá virðast þær gefa betri nálgun við burðarþol samanborið við hefðbundnar reikniaðferðir og það er í samræmi við niðurstöður erlendis frá.

Gallinn við þessa aðferð er hins vegar sá að hún hentar helst fyrir hönnun á staurum í hreinum sandi, silti eða fínkornóttum jarðvegi. Eins og kemur fram í kafla 3 þá var reynt að gera CPT á tveimur stöðum, Jökulsá á Fljótsdal og Eskifirði, en á hvorugum staðnum tókst að bora nógu langt niður þar sem borinn stoppaði líklega í stífari jarðlögum. Einnig stóð til að gera CPT við hönnun á staurum undir nýja brú við Núpsvötn en þar var jarðvegur of grófur/malarkenndur til að hægt væri að gera slíkt próf.

Á Íslandi er jarðvegur oft lagskiptur og oft einhver grófari eða grýttari jarðlög á milli fínni laga sem gerir það að verkum að það getur verið krefjandi eða erfitt að nota CPT og koma bornum niður á það dýpi sem æskilegt er.

Það má hins vegar líka benda á að það er hægt að fóðra í gegnum grófari jarðlög sem finnast á milli fínni laga og það hefði t.d. verið hægt á Eskifirði þar sem aðeins er um þunn malarlög að ræða. Með því að gera heildarborun fyrst er hægt að kortleggja hugsanleg stífari eða gróf jarðlög og þannig skipuleggja CPT borun m.t.t. þess sem og fóðrun í gegnum viðeigandi jarðlög. Varðandi fóðrun þá verður að hafa í huga að vinna með það getur verið seinleg og tímafrek og kostar meira heldur en hrein CPT borun.

Það eru líklega ekki margir staðir á Íslandi þar sem það væri raunhæft að framkvæma CPT niður á nægjanlegt dýpi án þess að þurfa að fóðra í gegnum einhver jarðlög. Engu að síður er talin ástæða til að framkvæma CPT ef það er metið framkvæmanlegt byggt á niðurstöðum heildarborunar.

### 5.4 Sýnataka

Í framhaldi af heildarborun ætti alltaf að skipuleggja sýnatöku. Þannig er hægt að gera rannsóknir á jarðveginum og skilgreina inntaksbreytur í þær reikniaðferðir sem nota á við hönnun á staurum.

Skipuleggja þarf sýnatökuna m.t.t. þess hvaða reikniaðferðum eigi að beita við hönnun á staurum og skilgreina þá jarðvegsparametra sem óskað er eftir að séu skilgreindir.

Sýnataka er einnig mikilvæg til að skilgreina almennt þau jarðlög sem eru á svæðinu.

## 5.5 Prufurekstur og álagsprófun

Eins og fram hefur komið í rannsóknarverkefninu þá eru hefðbundnar reikniaðferðir yfirleitt að vanmeta raunverulegt burðarþol staura verulega. Þetta er einnig þekkt vandamál erlendis og þrátt fyrir margar tilraunir hefur ekki tekist að útfæra nákvæmar reikniaðferðir til að meta burðarþol byggt á niðurstöðum úr jarðvegsrannsóknnum, þó að sumar nálgist raunverulegt burðarþol nokkuð.

Í Skandinavíu er það þekkt að reka niður prufustaura og álagsprófa þá á undirbúningstigi framkvæmda, hönnunarstigi, ef um er að ræða stærri og kostnaðarsöm verkefni.

Fyrir stærri verkefni þar sem umfang af staurum er mikið og kostnaður og mikilvægi þeirra mannvirkja sem þeir eiga að bera hár þá ætti alltaf að reyna að reka niður prufustaura og álagsprófa þá með PDA álagsprófi. Þannig er hægt að hanna staurana á sem hagkvæmastan og umhverfisvænstan hátt sem og tryggja öryggi mannvirkisins.

## 5.6 Samantekt

Það ætti alltaf að byrja á því að gera heildarboranir á fyrstu stigum hönnunarfasa fyrir stauraundirstöður. Byggt á niðurstöðum slíkra borana er hægt að skilgreina gróflega lengd staura og tæknilega útfærslu.

Það þarf síðan að byggja ofan á heildarborun með sýnatöku sem þarf þá að taka mið af þeirri reikniaðferð sem nota á til að hanna staurana.

Ef hægt er ætti einnig að framkvæma CPT en ef það er ekki mögulegt væri það valkostur að framkvæma höggborun.

## 6 DÝNAMÍSK ÁLAGSPRÓF (PDA)

Dýnamísk álagspróf hafa ekki verið mikið notuð hérlandis til að ákvarða burðargetu staura en hafa reynst vel í Noregi. Ef það ætti að fara innleiða þessar prófanir hérlandis væri því nauðsynlegt að bæta við verkþætti fyrir það inn í staðlaðar verklýsingar Vegagerðarinnar. Hér að neðan er sett fram tillaga að verkþætti sem byggir á verklýsingarstaðli norsku vegagerðarinnar.

### 83.213 Steyptir staurar, Dýnamískt álagspróf (PDA mælingar)

- a) Um er að ræða allan kostnað, efni, vinnu og skrásetningu/skýrslugerð vegna dýnamísku álagsprófs.
- b) Framkvæmd eru dýnamísk álagspróf á þeim fjölda staura sem tilgreindir eru í verklýsingu og almennt skal framkvæma álagsprófin á fyrstu staura sem eru reknir niður. Tilgangur mælinga er fyrst og fremst samfelld gagnasöfnun um fallhæð, spennur í staurum, elastískar formbreytingar o.fl. fyrir viðkomandi niðurrekstarbúnað (gerð hamars/stauragerð/jarðvegsskilyrði).

Mælingarniðurstöður eru notaðar til að framkvæma frekari stauraniðurrekstur á sem skilvirkastan hátt með tilliti til ofangreindra þátta og annarra krafna. Álagsprófin þarf að skipuleggja og framkvæma þannig að verktaki geti nýtt sér niðurstöður. Skipulag álagsprófana þarf að leggja fyrir fulltrúa verkkaupa til samþykktar.

Einnig er hægt að áætla burðargetu stauranna með mæligögnum.

Ef umtalsverðar breytingar verða á niðurrekstarbúnaði, gerð staura, jarðvegsskilyrðum eða upp koma aðrar sérstakar aðstæður skal framkvæma fleiri dýnamísk álagspróf. Þörfin á fleiri dýnamískum álagsprófum er ákveðin af fulltrúa verkkaupa á grundvelli þess hvernig niðurrekstur gengur.

- c) Dýnamískar mælingar skulu framkvæmdar skv. leiðbeiningum í kafla 17.3 í Peleveledningunni (2019) svo fremi sem það sé praktískt mögulegt.

Það skal mæla lóðrétta færslu á staur á nægilega mörgum höggseríum á meðan á dýnamísku álagsprófunum stendur þannig að hægt sé að samræma og leiðrétta mæliniðurstöður úr álagsprófinu sé þess þörf.

Það skal fylgjast vel með staurum sem á að álagsprófa við niðurrekstur, innrekstur í klöpp og/eða við lok niðurekstrar, með aðaláherslu á lokahluta niðurreksturs. Gera skal mælingar með mismunandi útfærslu á fallhæð (höggorku) svo hægt sé að fá heildstætt mat og skráningu á niðurrekstrarferlinum.

Gera skal grein fyrir niðurstöðum mælinga í niðurrekstrarskýrslu þar sem fram kemur m.a.:

- Auðkenni staura
- Gerð niðurrekstrartækja
- Fallhæð (Höggorka)
- Niðurrekstrarspennur

- Elastísk formbreyting
- Sig
- Áætluð burðargeta
- Línurit af áslægum krafti – tíma
- Línurit af hraða – tíma
- Línurit af dýnamísku viðnámi – varanlegri færslu

f) Uppgjör miðast við fjölda álagsprófana.

Mælieining: stk.

## 7 FREKARI RANNSÓKNIR

Þetta er önnur áfangaskýrsla verkefnisins og höfundur mun sækja um framhaldsstyrk til að geta haldið áfram með verkefnið.

Næstu skref í verkefninu eru eftirfarandi

- Framkvæma PDA álagspróf á staurum undir nýja brú á Djúpa og vinna úr niðurstöðunum
- Byggt á þeirri vinnu sem unnin hefur verið í fyrstu tveim áfangskýrslunum þá þarf að skoða hvort hægt sé að mæla með einhverri ákveðinni reikni- eða hönnunaraðferð fyrir staura
- Skoða hvort hægt sé að mæla með því að nota tímaáhrif skv. leiðbeiningum í Peleveiledningen og fyrir hverskonar jarðvegsgerðir það kæmi til greina.
- Gera fleiri CPT próf og bera saman við álagspróf
- Bera saman hönnun á undirstöðu sem hönnuð er skv. þeim aðferðum sem almennt hefur verið beitt fyrir stauraundirstöður í sandi eða sendnum jarðvegi á Íslandi undanfarin ár, og undirstöðu sem hönnuð er með nýlegri aðferðarfræði sem byggir á ýtarlegri jarðkönnunum og PDA álagsprófunum staura.

## 8 HEIMILDASKRÁ

- [1] A. Gunnarsson og Ó. D. Friðriksson, „2970-414-SKY-001-V01\_Stauraundirstöður fyrir brýr áfangi 1,“ EFLA, Reykjavík, 2022.
- [2] Eigland, Arne T., Peleveiledningen, Norsk geoteknisk forlag, 2019.
- [3] G. Þ. Bergsson, „Samanburður bormótstöðu við niðurrekstur og burðarþol staura,“ Háskólinn í Reykjavík, Reykjavík, 2014.
- [4] F. Kolsgaard, „Evaluering av beregningsmetoder for friksjonspeler i sand,“ NTNU, Trondheim, 2020.
- [5] Ó. D. Friðriksson, „Burðargeta staura metin út frá borholumælingum - samanburður við álagsprófanir,“ Háskóli Íslands, Reykjavík, 2022.
- [6] Á. R. Sigmarsson, „Skúfstyrkur sendinna jarðefna; Smanburður CPT mælinga og tilraunastofuprófanna,“ Háskóli Íslands, Reykjavík, 2015.
- [7] P. K. Robertson, „Soil behaviour type from the CPT: an update,“ *International symposium on cone penetration testing*, b. 2, p. 8, 2010.
- [8] H. Sigursteinsson, J. Skúlason og S. Ö. Sverrisson, „Jarðtæknirannsóknir fyrir vega- og brúargerð,“ Vegagerðin, Reykjavík, 2016.
- [9] K. Karlsrud, T. G. Jensen, E. K. W. Lied, F. Nowacki og A. S. Simonsen, „Significant ageing effects for axially loaded piles in sand and clay verified by new field load test,“ í *Offshore technology conference*, Houston, 2014.
- [10] B. Das, Principles of foundation engineering, Stamford: Cengage Learning, 2011.
- [11] MANNVIT, „Eskja uppsjávarfrystihús, Leirubakki 4 jarðtækniskýrsla,“ MANNVIT, Kópavogur, 2016.

- [12] J. Halldórsdóttir, „Minnisblað: Grundunarkostir frystigeymslu við Leirubakka 4, Eskifirði,“ MANNVIT, Kópavogur, 2018.
- [13] G. Axelsson, „Long-term set-up of driven piles in sand,“ Royal institute of technology, Stockholm, 2000.
- [14] EN 1997-1, „Eurocode 7: Geotechnical design - Part 1: General rules,“ European Committee for Standardization, Brussel, 2004.
- [15] Håndbok V220, Geoteknik i vegbygging, Oslo: Statens vegvesen Vegdirektoratet, 2022.