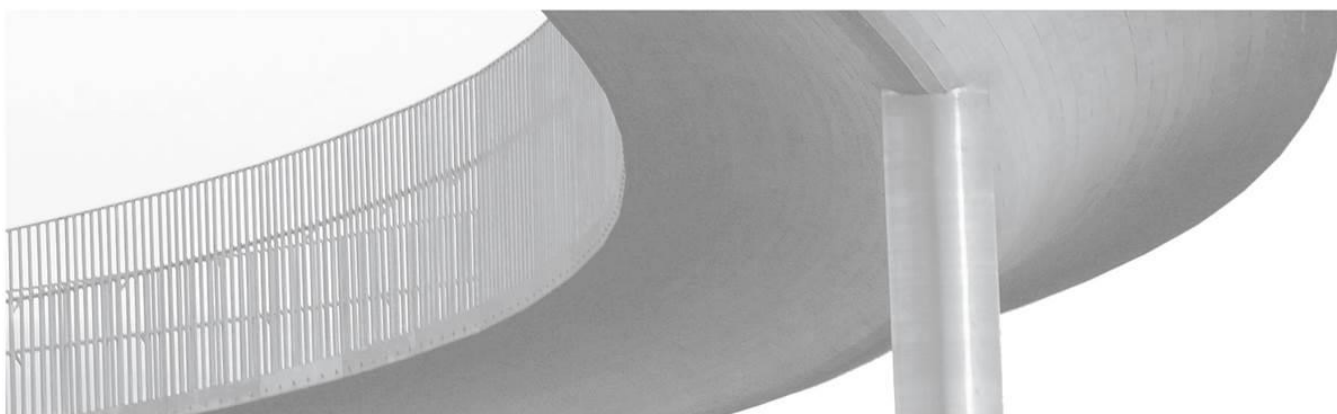




STAURAUNDIRSTÖÐUR FYRIR BRÝR

Áfangaskýrsla 1

21.01.2022



SKÝRSLA – UPPLÝSINGABLAÐ

SKJALALYKILL

2970-414-SKY-001-V01

SKÝRSLUNÚMÉR / SÍÐUFJÖLDI

55

VERKEFNISSTJÓRI / FULLTRÚI VERKKAUPA

Guðrún Þóra Garðarsdóttir og Ólafur Sveinn Haraldsson

VERKEFNISSTJÓRI EFLA

Andri Gunnarsson

LYKILORÐ

Stauraundirstöður
Álagspróf staura
Dýnamísk álagspróf staura
Dynamic pile load testing
PDA load testing

STAÐA SKÝRSLU

- Drög
 Drög til yfirlstrar
 Lokið

DREIFING

- Opin
 Dreifing með leyfi verkkaupa
 Trúnaðarmál

TITILL SKÝRSLU

Stauraundirstöður fyrir brýr, Áfangaskýrsla 1

VERKHEITI

Stauraundirstöður fyrir brýr

VERKKAUPI

Rannsóknarsjóður Vegagerðarinnar

HÖFUNDUR

Andri Gunnarsson, Ólafur Davíð Friðriksson

ÚTDRÁTTUR

Í þessari fyrst áfangaskýrslu um stauraundirstöður fyrir brýr er fjallað um hönnunaraðferðir fyrir staura og þær reglur og leiðbeiningar sem gilda um slíka hönnun á Íslandi.

Það er skoðað hvaða rannsóknir hafa verið gerðar á burðarþoli staura og niðurstöðum úr álagsprófum safnað saman og þær birtar.

Hluti af verkefninu var að framkvæma PDA álagspróf á staura undir nýja brú yfir Núpsvötn og fjallað er um framkvæmdina á álagsprófinu og niðurstöður úr því birtar og bornar saman við þær hönnunaraðferðir sem notaðar hafa verið á Íslandi.

ÚTGÁFUSAGA

<u>NR.</u>	<u>HÖFUNDUR</u>	<u>DAGS.</u>	<u>RÝNT</u>	<u>DAGS.</u>	<u>SAMÞYKKT</u>	<u>DAGS.</u>
01	AG/ÓDF Frumútgáfa	20.01.22	Baldvin Einarsson	21.01.22	Andri Gunnarsson	21.01.22

02

03

04

SAMANTEKT

Í þessari fyrstu áfangaskýrslu um stauraundirstöður fyrir brýr er fjallað um hönnunaraðferðir stauraundirstaðna með viðnámsstaurum og skoðað hvaða aðferðir hafa helst verið notaðar á Íslandi. Hingað til hefur staurahönnun á Íslandi að mestu leyti byggst á niðurstöðum úr höggborunum og reynslugildum frá álagsprófunum sem var safnað saman 1993. Það hefur orðið þróun á jarðtæknirannsóknnum, álagsprófunum og reikniaðferðum síðan þá og það er skoðað hvort það sé hægt að nota nákvæmari og öruggari aðferðir við mat á burðarþoli viðnámsstaura. Undanfarin ár hafa rannsóknir bent til þess að reikniaðferðir sem byggja á niðurstöðum úr þrýstiborunum (CPT) virki best fyrir stauraundirstöður í sendnum jarðvegi (viðnámsefni).

Í 3. kafla eru teknar saman og birtar niðurstöður úr álagsprófunum frá Vegagerðinni sem og rannsóknarverkefnum sem unninn hafa verið um stauraundirstöður. Þessi gögn eru grunnur fyrir því að geta metið hvaða reikniaðferðir henta fyrir mat á burðarþoli þar sem ÍST EN 1997-1 setur þær kröfur að reikniaðferðir sem notaðar eru hafi verið sannreynðar með álagsprófunum.

Í 4. Kafla er fjallað um dýnamísk álagspróf (PDA próf). Hluti af verkefninu var að gera PDA álagspróf á staura undir nýja brú yfir Núpsvötn og er farið yfir framkvæmdina á því auk þess sem niðurstöður úr álagsprófinu eru bornar saman við niðurstöður úr statísku álagsprófi sem og þær reikniaðferðir sem skoðaðar eru í kafla 2. Samanburður á statísku álagsprófi og PDA álagsprófi sýnir aðeins 10% mun á mældu burðarþoli sem gefur til kynna að PDA álagspróf virki og hafi ásættanlega nákvæmni við Íslenskar aðstæður.

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

SAMANTEKT	5
1 INNGANGUR	10
1.1 Bakgrunnur verkefnis	10
1.1 Tilgangur og markmið	11
2 HÖNNUNARAÐFERÐIR STAURAUNDIRSTAÐNA MEÐ VIÐNÁMSSTAURUM	12
2.1 Almennt um hönnunaraðferðir fyrir stauraundirstöður	12
2.2 Reikniaðferðir til að hanna viðnámsstaura í sandi	13
2.2.1 Evrópustaðalinn - IST EN 1997	13
2.2.2 Reglur um hönnun brúa (2018)	14
2.2.3 Håndbok N400 (2022)	14
2.2.4 Peleveiledningen (2019) og Håndbok V220 (2014)	15
2.2.5 Sv – aðferðafræðin, NTH	18
2.2.6 Burðarþol metið skv. niðurstöðum höggborunar	19
2.2.7 Rekjöfnur	21
2.3 Samantekt	23
3 SAMANTEKT MÆLINGA Á BURÐARÞOLI STAURAUNDIRSTAÐNA	24
3.1 Mælingar, Jón Skúlason (1993)	24
3.1.1 Samantekt mælinga	24
3.2 Mælingar, Vegagerðin og Meistaraverkefni Guðmundar (2014)	31
3.2.1 Burðarþol áætlað út frá álagsprófi	31
3.2.2 Burðarþol metið með rekjöfnum	32
3.3 Mælingar, EFLA	40
3.3.1 Álagspróf á Eskifirði	40
3.4 Dýnamísk álagspróf við Núpsvötn	45
3.4.1 Samantekt mælinga	45
4 DÝNAMÍSKT ÁLAGSPRÓF VIÐ MÆLINGAR Á BURÐARÞOLI	46
4.1 PDA álagspróf	46
4.2 PDA álagspróf á staurum undir nýja brú yfir Núpsvötn	47
4.2.1 Jarðtæknilegar forsendur	48
4.2.2 Statískt álagspróf á staurum undir núverandi brú	50
4.2.3 Framkvæmd PDA álagsprófs	50
4.3 Samanburður á reikniaðferðum, PDA álagsprófi og statísku álagsprófi	51
4.3.1 Burðarþol skv. rekjöfnum	51
4.3.2 Burðarþol skv. niðurstöðum höggborana	51
4.3.3 Burðarþol skv. SV - aðferðarfræðinni	52
4.3.4 Burðarþol skv. PV91 aðferðinni	52
4.3.5 Samanburður og umræður	53
5 FREKARI RANNSÓKNIR	54
6 HEIMILDASKRÁ	55

MYNDASKRÁ

MYND 1	Grunnur fyrir útreikninga af burðarþoli í sandi (Eigland, Arne T., 2019).	16
MYND 2	Núningsbreytan S_v sem fall af „mobilisert friksjon“ og „ruhet“. Skýringarmyndin gildir fyrir jákvæða núningsmótstöðu meðfram staur (Janbu, 1976).	18
MYND 3	Burðarþolsstuðullinn N_q sem fall af μ og Ψ (Janbu, 1976).	19
MYND 4	Niðurstaða úr höggborun sem Vegagerðin framkvæmdi við Núpsvötn.	19
MYND 5	Yfirlit yfir staði þar sem álagspróf voru gerð. Lýsing á lengd og gerð staura og jarðlögum (Jón, 1993).	20
MYND 6	Brotálag steyptra staura teiknað upp á móti mældri mótstöðu jarðvegs frá höggborun (Jón, 1993).	20
MYND 7	Viðmiðunargildi sem Jón Skúlason setti fram fyrir burðarþol staura. (Jón, 1993)	20
MYND 8	Niðurrekstrargögn úr hamri Vegagerðarinnar fyrir niðurrekstur á staur undir nýja brú yfir Núpsvötn.	21
MYND 9	Niðurrekstrarhamar Vegagerðarinnar að störfum (ljósmynd Per Grud).	22
MYND 10	Yfirlitsmynd af framkvæmdum og rannsóknum á Eskifirði	40
MYND 11	Langsnið og grunnmynd í nýja brú yfir Núpsvötn (Vegagerðin)	47
MYND 12	Niðurstaða úr höggborun (Vegagerðin).	48
MYND 13	Niðurstaða úr heildarborun (Vegagerðin).	49
MYND 14	Niðurrekstrargögn úr hamri Vegagerðarinnar fyrir niðurrekstur á staur undir nýja brú yfir Núpsvötn.	49
MYND 15	Búið að festa hröðunar- og streitunema á staur.	50
MYND 16	Höggsería keyrð á staur.	50
MYND 17	Nemar festir á staur og tengdir við mælitölvu (mynd: Guðrún Þóra Garðarsdóttir).	50

TÖFLUSKRÁ

TAFLA 1	Niðurstöður mælinga frá brú á Skeiðará, steiptir staurar.	24
TAFLA 2	Niðurstöður mælinga frá brú á Skeiðará, tréstaumar.	24
TAFLA 3	Niðurstöður mælinga frá brú á Sandgígjukvísl, steiptir staurar.	25
TAFLA 4	Niðurstöður mælinga frá brú á Sandgígjukvísl, tréstaumar.	25
TAFLA 5	Niðurstöður mælinga frá brú á Núpsvötn og Súlu, steiptir staurar	25
TAFLA 6	Niðurstöður mælinga frá brú á Núpsvötn og Súlu, tré staur	26
TAFLA 7	Niðurstöður mælinga frá Múlakvísl	26
TAFLA 8	Niðurstöður mælinga frá Búrfellslínu	26
TAFLA 9	Niðurstöður mælinga frá Markarfljóti	27
TAFLA 10	Niðurstöður mælinga frá Hvalfirði	27
TAFLA 11	Niðurstöður mælinga frá Borgarfjarðarbrú, steiptir staurar	27
TAFLA 12	Niðurstöður mælinga frá Borgarfjarðarbrú, tréstaumar	28
TAFLA 13	Niðurstöður mælinga frá Borgarfjarðarbrú, stálstaumar	28
TAFLA 14	Niðurstöður mælinga frá Hnausakvísl í Vatnsdal	28
TAFLA 15	Niðurstöður mælinga frá Héraðsvötnum	28

TAFLA 16	Niðurstöður mælinga frá Svarfaðardalsá _____	29
TAFLA 17	Niðurstöður mælinga frá Akureyrarhöfn _____	29
TAFLA 18	Niðurstöður mælinga frá Eyjafjarðará _____	30
TAFLA 19	Niðurstöður mælinga frá Lagarfljóti _____	30
TAFLA 20	Niðurstöður mælinga frá Jökulsá á Fjöllum _____	31
TAFLA 21	Niðurstöður mælinga frá Jökulsá í Fljótsdal _____	31
TAFLA 22	Niðurstöður mælinga frá Kolgrafarfirði _____	31
TAFLA 23	Niðurstöður mælinga frá Steinavötnum _____	32
TAFLA 24	Niðurstöður mælinga frá Jökulsá á Fjöllum _____	32
TAFLA 25	Niðurstöður mælinga frá Staðará í Steingrímsfirði, Sunnan ár _____	32
TAFLA 26	Niðurstöður mælinga frá Staðará í Steingrímsfirði, Norðan ár _____	33
TAFLA 27	Niðurstöður mælinga frá Múlakvísl _____	34
TAFLA 28	Niðurstöður mælinga frá Jökulsá í Fljótsdal _____	35
TAFLA 29	Niðurstöður mælinga frá Kolgrafarfjörður _____	36
TAFLA 30	Niðurstöður mælinga frá Hvítá við Bræðratungu _____	37
TAFLA 31	Niðurstöður mælinga frá Eyrarteigsá _____	38
TAFLA 32	Niðurstöður mælinga frá Ólafsfjarðarósi _____	39
TAFLA 33	Niðurstöður mælinga úr PDA álagsprófi frá Eskifirði – viðlegukantur. Lengd staura 50,6 m og 47,0 m. _____	41
TAFLA 34	Niðurstöður mælinga úr PDA álagsprófi frá Eskifirði – viðlegukantur. Lengd staura 58,6. _____	41
TAFLA 35	Niðurstöður mælinga úr PDA álagsprófi frá Eskifirði – viðlegukantur. Lengd staura 35 m. _____	42
TAFLA 36	Niðurstöður mælinga úr PDA álagsprófi frá Eskifirði – viðlegukantur. Lengd staura 64-66 m. _____	42
TAFLA 37	Niðurstöður mælinga frá Eskifirði – frystigeymsla, PDA álagspróf (5-12 daga frá niðurrekstri). _____	43
TAFLA 38	Niðurstöður mælinga frá Eskifirði – frystigeymsla, PDA álagspróf (19-22 dagar frá niðurrekstri) _____	43
TAFLA 39	Niðurstöður mælinga frá Eskifirði – frystigeymsla, statískt álagspróf (prófaðir 7-11 daga frá niðurrekstri) _____	44
TAFLA 40	Niðurstöður mælinga við Núpsvötn, PDA álagspróf. _____	45
TAFLA 41	Samanburður á burðarþoli staura með mismunandi álagsprófunum og reikniaðferðum. _____	53

1 INNGANGUR

1.1 Bakgrunnur verkefnis

Hönnun stauraundirstaðna með viðnámsstaurum í sandi er venjulega framkvæmd með útreikningum sem byggja á virkri spennu í jarðveginum og skriðhorni. Þá er oft stuðst við niðurstöður úr höggborunum og þær lesnar saman við reynslugildi frá prófunum á burðarþoli staura sem unnar voru af Jóni Skúlasyni í samvinnu við Vegagerðin um 1990. Sú aðferðarfræði hefur mikið verið notuð á Íslandi en minna í t.d. Skandinavíu.

Í meistaraverkefni við Háskólann í Reykjavík árið 2014 (Guðmundur, 2014) eru skoðaðar hönnunaraðferðir fyrir viðnámsstaura og hvernig hægt sé að nýta betur niðurstöður höggborunar við mat á burðarþoli staura og rekmótstöðu. Þó að mat á burðarþoli staura byggt á niðurstöðunum höggborana hafi verið notað lengi á Íslandi og sé ágætis aðferð, ef hönnuður hefur góða tilfinningu fyrir henni, þá er ein af niðurstöðum meistaraverkefnisins að aðferðin geti verið íhaldssöm og vanmeti stundum styrk í sumum tegundum af jarðvegi. Helsti gallinn við aðferðarfræðina er að tenging á milli tegundar af jarðvegi og burðarþols er að litlu leyti töluleg og meira byggt á mati hönnuðar.

Í nýlegu meistaraverkefni við NTNU (Kolsgaard, 2020) eru skoðaðar mismunandi hönnunaraðferðir til að áætla burðarþol staura í sandi. Niðurstaðan úr því verkefni er að reiknimódel sem byggir á niðurstöðum úr þrýstiborun (CPT) gefi besta nálgun við raunverulegt burðarþol sem mælt er við álagspróf. Í nýjustu útgáfu af Peleveledningen (Eigland, Arne T., 2019) er sama reiknimódel skilgreint og mælt með notkun þess.

Það er þekkt að burðarþol staura sem ber sig með viðnámi milli jarðvegs og sands eykst með tímanum er sandurinn leggst aftur að staurnum og þóruþrýstingur jafnast út í kringum hann eftir niðurrekstur. Nýlegar rannsóknir frá Noregi og fleiri stöðum hafa lagt mat á það hversu mikið burðarþol slíkra staura eykst með tímanum og sýna þær t.a.m. að burðarþol getur meira en tvöfaldast á 2 árum. Í nýjustu útgáfu af Peleveledningen (Eigland, Arne T., 2019) er lagt til hvernig nýta megi þessar rannsóknir til að áætla burðarþol staura m.t.t. þessara tímaáhrifa og breytileika þess álags sem staurarnir verða fyrir. Það sýnir sig að reikningslegur styrkur staura sem reiknaður er með þessari aðferð er meiri en styrkur sem metinn er út frá eldri prófunargildum og borrhóborun.

Besta aðferðin við að mæla burðarþol staura, og staðfesta þar með reikningslegan styrk, er að álagsprófa þá í skalanum 1:1. Slíkar mælingar á Íslandi hafa byggt á statísku álagsprófi sem er umfangsmikið og kostnaðarsamt og því ekki endilega praktískt á byggingartíma. Undanfarin misseri hafa annars konar álagspróf verið að ryðja sér til rúms þó að mörg þeirra hafi verið þekkt lengi. Til dæmis er svokallað PDA álagspróf mikið notað í Skandinavíu en það er einfalt og ódýrt próf á burðarþoli staura. Nákvæmni á slíku álagsprófi er minni samborið við statískt álagspróf en nákvæmni er talin ásættanleg enda er það orðið algengt í Skandinavíu að nota PDA álagspróf á framkvæmdartíma.

Í þess verkefni er verið að skoða möguleikann á því að nota reiknimódel byggt á niðurstöðum þrýstiborunar við mat á burðarþoli staura sem og reikningsleg áhrif tíma á burðarþol staura í sandi. Forsenda fyrir því að geta metið nákvæmni aðferðarinnar er að bera hana saman við álagspróf og því er einnig lagt upp með að framkvæma álagspróf á staura. Álagspróf eru einnig mikilvæg til að staðfesta öryggi hönnunar og safna breiðari gagnagrunni fyrir burðarþol staura og hluti af verkefninu er því líka að fjalla um framkvæmd á slíku prófi og skilgreina verkþátt fyrir dýnamískt álagspróf. Annar mikilvægur hluti við að ákvarða burðarþol staura er þekking á jarðveginum sem rekið er í og æskilegt umfang og tegund jarðtæknilegra rannsókna í tengslum við grundun á staurum er því líka tekið fyrir.

Í þessari fyrstu áfangaskýrslu er fjallað um helstu hönnunaraðferðir sem notaðar eru við hönnun á viðnámsstaurum í sandi og teknar eru saman aðgengilegar niðurstöður úr mælingum/mati á burðarþoli staura á Íslandi. Þá er einnig framkvæmt PDA álagspróf á staurum undir nýja brú yfir Núpsvötn. Þessi atriði hér að ofan eru grunnur fyrir áframhaldandi vinnu við verkefnið sem er lýst hér að ofan.

1.1 Tilgangur og markmið

Verkefninu er ætlað að leggja mat á hve mikinn ávinning má hafa af innleiðingu nýrrar aðferðarfræði við hönnun stauraundirstaða fyrir brýr í sandi eða sendnum jarðvegi. Aðferðin er kynnt og gerð grein fyrir þeim jarðvegsrannsóknum 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 kolefnisspori, 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.

Verkefnið er einnig með það að markmiði að stuðla að innleiðingu á álagsprófum stauraundirstaðna undir brýr og skilgreina betur hvaða jarðrannsóknir eigi að gera á undirbúningsstigi hönnunar.

Þá er verkefninu 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 HÖNNUNARAÐFERÐIR STAURAUNDIRSTÖÐNA MEÐ VIÐNÁMSSTAURUM

2.1 Almennt um hönnunaraðferðir fyrir stauraundirstöður

Á Íslandi er algengast að notaðir séu reknir steinsteyptir staurar þegar mannvirki eru grunduð á stauraundirstöðum. Prófilstál eða stálrör hafa einnig verið notuð í staura í einstökum verkefnum og þá voru tréstaumar einnig algengir áður fyrr.

Í þessum kafla er fjallað um hönnunaraðferðir fyrir stauraundirstöður með viðnámsstaurum í sandi eða sendnum jarðvegi. Helst er stuðst við norskar reglur og leiðbeiningar enda eru leiðbeiningar og handbækur Vegagerðarinnar að mestu byggðar á norskum grunni.

Viðnámsstaumar eru staurar þar sem endi á staur er ekki rekinn niður á fastann botn. Þ.e. álagið er borið af bæði viðnámi meðfram hliðum staurisins og endaburði í lausum jarðvegi. Viðnámsstaumar eru helst notaðir í leir eða sandi og sendnum jarðvegi og einnig möl. Einnig er hægt að nota þá í lífrænum jarðvegi eins og silti eða mýri.

Eins og nefnt er hér að ofan er verið að skoða staura í sandi í þessu verkefni. Sandur er skilgreindur sem viðnámsfni og því er burðarþol staura metið með effektívri spennugreiningu.

Það eru til margar reikniaðferðir til að áætla burðarþol viðnámsstaura og það er oft skilið á milli emperískra aðferða sem byggja á niðurstöðum þrýstiborana (CPT) og annara aðferða sem ekki byggja á slíkum rannsóknum. Á síðustu 20 – 25 árum þá hafa reikniaðferðir, byggðar á niðurstöðum frá CPT, sýnt mun betri samsvörun við niðurstöður úr álagsprófunum á staura heldur en einfaldari reikniaðferðir sem ekki byggja á niðurstöðum úr CPT (Kolsgaard, 2020).

Kolsgaard (2020) fjallar einnig um að það séu til tvær megin nálganir á því hvernig burðarþol staura er metið:

- 1. Reikniaðferðir sem byggja á elastískum- og plastískum líkönum eða emperískum gögnum sem lýsa samvirkni á milli staurisins og jarðvegsins. Inntaksbreytur í þessar reikniaðferðir eru jarðtæknilegir parametrar sem byggjast á jarðkönnunum og prófunum á jarðvegi.
- 2. Reikniaðferðir sem byggja á formbreytingareiginleikum jarðvegs og sveifflugreiningum. Inntaksbreytur í þessar reikniaðferðir eru statísk og dýnamísk álagspróf eða gögn frá niðurrekstri á staurum.

Í þessum kafla er aðalega fjallað um fyrri reikniaðferðirnar auk þess sem fjallað er um rekjöfnur sem falla undir seinni reikniaðferðirnar. Þá er fjallað um dýnamísk álagaspróf í kafla 4 sem fellur einnig undir seinni reikniaðferðirnar.

2.2 Reikniaðferðir til að hanna viðnámsstaura í sandi

Eftirfarandi leiðbeiningar og reikniaðferðir fyrir hönnun á stauraundirstöðum eru skoðaðar en þetta eru helstu leiðbeiningarnar sem notaðar hafa verið við hönnun á stauraundirstöðum á Íslandi.

- Eurocode 7 (EN 1997-1, 2004) „Geotechnical design“
- Reglur um hönnun brúa (2018), frá Vegagerðinni
- Håndbok N400 (2022), „Bruprosjektering“ frá Norsku vegagerðinni
- Pelevedningen (Eigland, Arne T., 2019)
- Håndbok V220 (2014), „Geoteknikk i vegbygging“ frá Norsku vegagerðinni
- Sv – aðferðafræðin, NTH (nú NTNU)
- Burðarþol skv. niðurstöðum höggborunar
- Burðarþol skv. rekjöfnum

Við skilgreiningar á reikniaðferðunum í köflunum hér að neðan er stuðst við meistaraverkefni Kolsgaard (2020) við NTNU.

Í þessu verkefni er fyrst og fremst horft á áslægt burðarþol staura en mikilvægt er að hafa í huga að þol stauraundirstaða þarf að meta gagnvart mun fleiri þáttum. Fyrir viðnámsstaura í sandi er hins vegar áslægt burðarþol oftast ráðandi fyrir stærð, fjölda og útfærslu stauraundirstaðna.

2.2.1 Evrópustaðalinn - IST EN 1997

Evrópustaðalinn er það grunnskjal sem hönnuðum ber að fylgja við hönnun og því er mikilvægt að þeim leiðbeiningum og þeirri aðferðafræði sem þar er lýst sé fylgt.

Evrópustaðalinn fjallar ekki beint um reikniaðferðir til að meta burðarþol staura þó að í ÍST EN 1997-2 birti reikniaðferð sem byggir á niðurstöðum CPT í viðauka. Hann tekur fyrir aðferðafræðina, skilgreinir álags-, hlut-, og efnisstuðla og lýsir þeim álagstílfellum sem hönnuður þarf að skoða og taka tillit til við hönnun á staurum.

Grein 7.4.1 í staðlinum skilgreinir hvaða aðferðafræði megi nota við að hanna stauraundirstöður (Guðmundur, 2014):

- Með niðurstöðum stöðufræðilegra álagsprófa sem hafa verið sannprófaðar með útreikningum úr svipuðum aðstæðum.
- Með útreikningum sem hafa verið sannreynir með stöðufræðilegum álagsprófunum við svipaðar aðstæður.
- Með niðurstöðum úr sveiflufræðilegum álagsprófunum sem hafa verið sannreynar með stöðufræðilegum álagsprófunum við svipaðar aðstæður.
- Með athugun á því hvernig svipaðar stauraundirstöður hafa staðist álagt álag. Með þessari aðferð er nauðsynlegt að framkvæma rannsóknarboranir ásamt nauðsynlegum rannsóknum á jarðlögunum.

Það er þekkt að jarðvegsaðstæður á Íslandi eru ekki alltaf samanburðarhæfar við Skandinavísk nágranalönd okkar en á Íslandi eru að mestu notaðar reikniaðferðir sem þróaðar hafa verið og

sannreyndar í Skandinavíu. Þessi grein í staðlinum segir í raun að ekki megi nota reikniaðferðir nema þær hafi verið sannreyndar með álagsprófunum í sambærilegum aðstæðum, þ.e. á Íslandi.

Skv. staðlinum þarf hönnuður að sýna fram á að staurarnir hafi fullnægjandi þol til að standast áhrif frá álagi m.t.t. möguleika á broti. Einnig þarf að sýna fram á að ekki geti orðið skaðlegar formbreytingar eða niðurbrot í staurunum á skilgreindum líftíma þeirra.

Í staðlinum er sett fram grunnlíking sem hönnuður þarf að uppfylla til að sýna fram á að stauraundirstaða geti þolað áslægt hönnunarálag

$$F_{c;d} \leq R_{c;d}$$

Þar sem:

- $F_{c;d}$ = Áslægt hönnunarálag (þrýstingur) á staur eða stauragruppu
- $R_{c;d}$ = Hönnunarþol staura

2.2.2 Reglur um hönnun brúa (2018)

Í þessum leiðbeiningum er, eins og í Evrópustaðlinum, ekki fjallað beint um reikniaðferðir heldur meira almennt um aðferðarfræði. Auk þess eru ýmsar reglur og leiðbeiningar varðandi tæknilega kröfur og útfærslu staura, s.s. steypuhulur, járnbandingu, fjarlægð milli staura, skerðingar á þoli vegna útfærslna, o.s.fr.

Eftirfarandi málsgrein, sem lýsir því hvernig hanna skal staura undir brýr, er sett fram í kafla 11.3.3.1 í handbókinni:

„Staura og staurasamstæður skal hanna skv. viðurkenndum aðferðum og gr. 11.3 og 11.4. Styðjast má við Peleveiledningen, sem Norsk Geoteknisk Forening gefur út og Håndbok V220 Geoteknikk i vegbygging, útg. af norsku vegagerðinni. Fyrirmæli skv. gr. 11.3 vega þyngra en t.d. Peleveiledningen og aðrar viðurkenndar aðferðir“

Þetta er í raun bein þýðing úr Handbók Norsku vegagerðarinnar, N400, og mælir með því að við þolhönnun staura sé Peleveiledningen eða Handbók V220 notuð.

2.2.3 Håndbok N400 (2022)

Það kom ný útgáfa af Brúarhönnunarhandbók Norsku vegagerðarinnar í janúar 2022. Helsta breytingin frá síðustu útgáfu sem kom út árið 2015 er að umhverfismál eru tekin fastari tókum og þá er skerpt á ýmsum kröfum og þær ýmist hertar eða rýmkaðar m.t.t. praktískrar reynslu.

Það gildir sama um þessar leiðbeiningar eins og um Evrópustaðalinn og Reglur um hönnun brúa. Þ.e. hönnunaraðferðir fyrir staura eru ekki settar beint fram heldur vísað í að nota skuli Peleveiledningen eða Handbók V220 fyrir þolhönnun staura.

Það er samt vert að benda á að leiðbeiningar varðandi tæknilegar kröfur til staura, vali á staurum, niðurrekstur og útfærslum er almennt nokkuð ítarlegri en í Reglum um hönnun brúa og því er mælt með því að hönnuðir lesi yfir Handbók N400 samhliða Reglum um hönnun brúa við hönnun á staurum.

Það er ein málsgrein úr Handbók N400 (2022) sem er talin ástæða til að vekja sérstaka athygli á:

„Fyrir brýr og önnur berandi mannvirki sem eru grunduð á staurum í kvikkleir eða í blautum/mjög blautum jarðvegi (silti/leir), þá er mælt með að meta getu staurana til að þola ófyrirséðar hreyfingar/breytingar í jarðveginum“

Þessi málsgrein er sett fram m.t.t. þeirra óhappa sem Norðmenn hafa lent í undanfarin ár þar sem mannvirki eru grunduð á svokölluðum kvikkleir, sem getur verið mjög óstöðugur jarðvegur. Hún hefur engu að síður nokkuð yfirfærslugildi á Íslenskar aðstæður og þá sérstaklega með hamfaraflóð í jökulám í huga. Það er þekkt að grafið hefur frá stauraundirstöðum og þær sigið þegar eldgos valda flóðum og má t.d. nefna brýr yfir Skeiðará og Gígjukvísl í þessu samhengi. Það er því mælt með því að hönnuðir hafi slíkt álagstíffelli í huga og tryggi a.m.k. að ef grafi frá staurum þá valdi það ekki hruni mannvirkis.

2.2.4 Peleveiledningen (2019) og Håndbok V220 (2014)

Báðar þessar heimildir skilgreina í grunninn sömu aðferðarfræði til að áætla burðarþol staura og er henni lýst hér að neðan. Handbók V220 inniheldur auk þess sýnidæmi sem geta verið nytsamleg.

Í báðum þessum heimildum eru tvær aðferðir til að meta burðarþol út frá jarðtæknirannsóknnum skilgreindar. Önnur aðferðin byggir á mati á jarðtæknilegum parametrum út frá sýnatöku/rannsóknnum (PV91) en hin á CPT (NGI99).

2.2.4.1 PV91-aðferðin

Valið er að kalla fyrri aðferðina PV91 þar sem hún var fyrst kynnt í Peleveiledningen 1991. Þessi aðferð byggir á því að skilgreindur er núningsstuðull, β , sem gildir yfir alla lengd staurisins og núningsmótstaða hans er því mjög háð þessum stuðli.

Burðarþol stauris, $R_{c;k}$, er reiknað skv. eftirfarandi líkingu

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

Þar sem:

$R_{s,cal}$ = $\tau_{s,cal} \cdot A_s$ = *kraftur sem er tekinn upp með núnungi*

A_s = Yfirborðsflatarmál stauris

$\tau_{s,cal}$ = $\beta \cdot \sigma'_{v;0}$

β = Núningsstuðull skv. Mynd 1

$\sigma'_{v;0}$ = Meðalgildi fyrir virka spennu meðfram staur

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

A_b = Þverskurðarflatarmál við enda á staur

$q_{b,cal}$ = $N_q \cdot \sigma'_{v;0b}$ = *reiknuð endamótstaða við enda á staur*

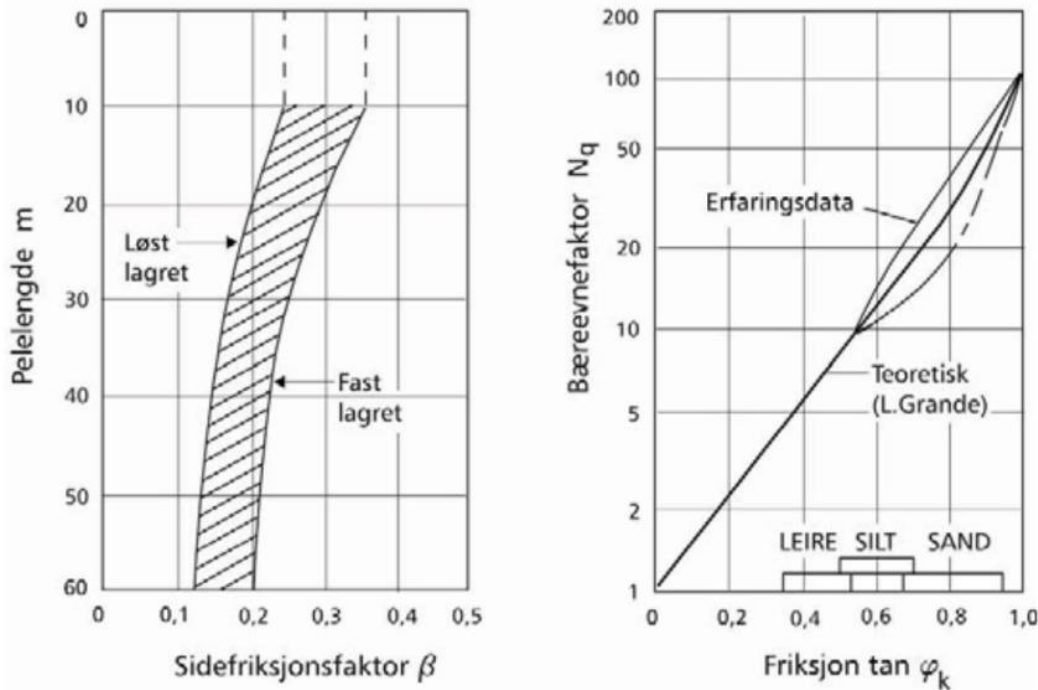
N_q = Burðarþolsstuðull skv. Mynd 1

$\sigma'_{v,0b}$ = Virk spenna við enda á staur

W_p = Þyngd staur

ξ = Leiðréttingarstuðull

β og N_q eru valin skv. skýringarmyndinni hér að neðan



MYND 1 Grunnur fyrir útreikninga af burðarþoli í sandi (Eigland, Arne T., 2019).

Í bæði Peleveiledningen (2019) og Handbók V220 (2014) er það tekið fram að þessi aðferð gefi almennt íhaldssama nálgun á burðarþoli staura þar sem notað er fast gildi fyrir núningstuðull eftir allri lengd staur auk þess sem stuðullinn vanmetur verulega mótstöðu í þéttum sandi (Kolsgaard, 2020). Það er því mælt með að þessi aðferð sé helst notuð á forhönnunarstigi eða við gróft mat á burðarþoli stauraundirstaðna.

2.2.4.2 NGI99-aðferðin

Þetta er hin aðferðin sem er mælt er með að nota í Peleveiledningen (2019) og Handbók V220 (2014) og byggir á að inntaksbreytur frá CPT séu notaðar. Það eru til margar reikniaðferðir sem byggjast á að niðurstöður úr CPT séu notaðar og Kolsgaard (2020) fjallar um þær helstu og kemst m.a. að því að aðrar aðferðir en NGI99 sýni betri samsvörun við álagspróf. Hann er hins vegar ekki að skoða sérstaklega niðurstöður úr álagsprófum í Noregi heldur í alþjóðlegu samhengi.

NGI99 aðferðin er sú sem Peleveiledningen (2019) 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.

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

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 núningsburður 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

$$z = \text{Dýpi undir yfirborði}$$

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

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

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

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

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

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

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

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 þrýstiborun (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

$$q_c = \text{Mæld óleiðrétt endamótstaða við þrýstiborun (CPT)}$$

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

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

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

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

2.2.5 S_v – aðferðafræðin, NTH

Fjallað er um þessa aðferðafræði í Kolsgaard (2020) og er lýsingin á aðferðinni hér að neðan byggð á þeirri umfjöllun.

S_v -aðferðafræðin er í dag kynnt sem fræðilegur grunnur til að áætla burðarþol staura við Jarðfræðideildina í NTNU og var notuð í Peleveledningen fram til 1981. Þessi aðferðafræði er einnig notuð í hugbúnaðinum GeoSuite til að áætla burðarþol staura en sá hugbúnaður er mikið notaður í Noregi við staurahönnun sem og aðra jarðtæknihönnun.

Burðarþol, Q , er reiknað sem samanlögð endamótstaða, Q_p , og núningsmótstaða, Q_f .

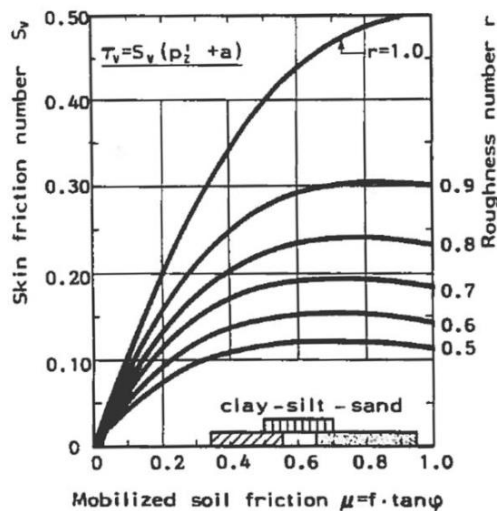
$$Q = Q_p + Q_f$$

$$\text{þar sem } Q_p = q_n \cdot A_p \text{ og } Q_f = \tau_v \cdot A_f$$

Núningsmótstaðan byggir á skerspennunni, τ_v á dýpi z og reiknast sem

$$\tau_v = S_v \cdot (p'_z + a)$$

Þar sem p'_z er lóðrétt virk spenna á dýpi z , a er samloðun jarðvegs og núningsbreytuna, S_v , er hægt að áætla út frá eftirfarandi skýringarmynd.

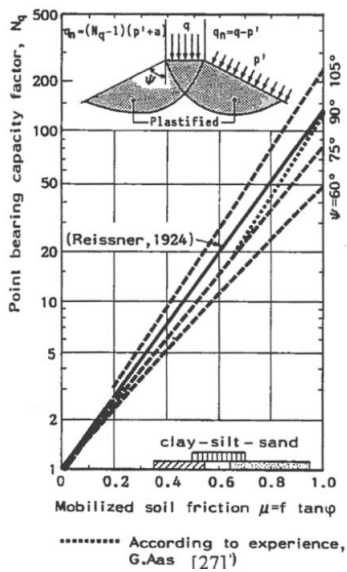


MYND 2 Núningsbreytan S_v sem fall af „mobilisert friksjon“ og „ruhet“. Skýringarmyndin gildir fyrir jákvæða núningsmótstöðu meðfram staur (Janbu, 1976).

Endaburður á flatareiningu er reiknaður skv. eftirfarandi líkingu

$$q_n = (N_q - 1) \cdot (p' + a)$$

Þar sem burðarþolsstuðulinn N_q er áætlaður út frá eftirfarandi skýringarmynd

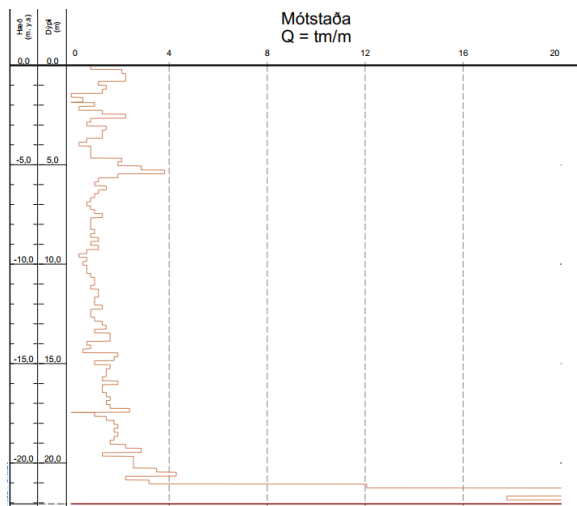


MYND 3 Burðarþolsstuðullinn N_q sem fall af μ og Ψ (Janbu, 1976).

2.2.6 Burðarþol metið skv. niðurstöðum höggborunar

Höggborun hefur verið notuð lengi á Íslandi til að meta burðarþol staura. Nákvæma lýsingu á boraðferðinni sem og aðferðarfræðinni sjálfri má finna í Meistaraverkefni Guðmundar (2014) og lýsingum Haraldar, Jóns og Sverris (2016) á jarðtæknirannsóknum og er því ekki fjallað ítarlega um aðferðarfræðina í þessari skýrslu.

Aðferðin byggir í grunninn á því að höggborun skilgreinir bormótstöðu í einingunni tm/m yfir lengd staura, sjá dæmi á mynd hér fyrir neðan.



MYND 4 Niðurstaða úr höggborun sem Vegagerðin framkvæmdi við Núpsvötn.

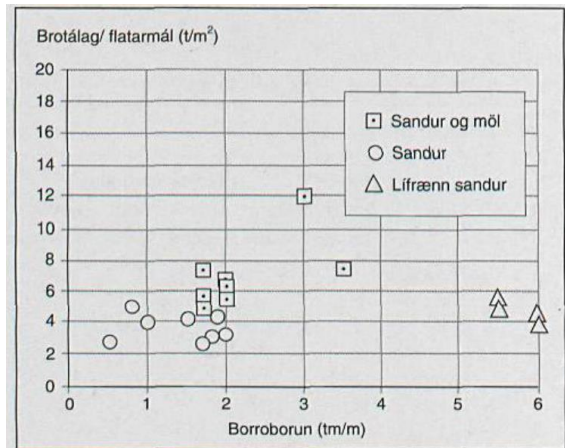
Út frá grafinu á Mynd 4 er skilgreind meðalbormótstaða fyrir jarðlag sem borað er í. Auk þess þarf að skilgreina tegund jarðlaga sem verið er að bora í gegnum sem „sandur og möl“, sandur eða lífrænt silt sem og þökkun.

Út frá þessum gögnum er síðan hægt að lesa út viðmiðunargildi fyrir burðarþol á lengdarmeter af staur sem Jón Skúlason (1993) setti fram.

Staður	Jarðlög	Gerð	Lengd (m)	Fjöldi
Skeiðará	Sandur og mól	Steyptur	11	3
		Tré	10	3
Sandgígjukvísl	Grófur sandur	Steyptur	11	3
		Tré	10	3
Núpsvötn og Súla	Sandur og mól	Steyptur	11	4
		Tré	10	1
Múlakvísl	Sandur og mól	Steyptur	16	4
Markarfjót	Sandur og mól	Steyptur	16	2
Búrfellslína	Finn sandur	Tré	12,5	1
Hvalfjörður	Siltr. lífrænn sandur	Steyptur	20,5	1
		Tré	23,5	1
		Stál	25 og 38	2
Borgarfjörður	Finn sandur	Steyptur	11	2
		Tré	10	2
		Stál	13	3
Hnausakvísl	Lífrænt silt	Tré	10	3
Héraðsvötn	Sandur og mól	Steyptur	12	2
Svarfaðar-dalsá	Grófur sandur	Steyptur	14	1
		Tré	13,5	1
Akureyrarhöfn	Finn sandur	Steyptur	9-15	5
Eyjafjarðará	Siltr. lífrænn sandur	Steyptur	16	4
Lagarfjósbrú	Lífrænt silt	Tré	13,7	2

Tafla 1 Yfirlit yfir aðstæður og gerð og fjölda prófaðra staura.

MYND 5 Yfirlit yfir staði þar sem álagsspróf voru gerð. Lýsing á lengd og gerð staura og jarðlögum (Jón, 1993).



Mynd 5 Brotálag steyptra staura.

MYND 6 Brotálag steyptra staura teiknað upp á móti mældri mótstöðu jarðvegs frá höggborun (Jón, 1993).

Jarðlög	Pökkun	borun tm/m	Brotálag/flatarmál (t/m²)		
			Steyptur	Tré	Stál
Sandur og mól	Lítill	1,5	5	11	
	Mikil	4	10	14	
Sandur	Lítill	1,5	3	8	2,5
	Mikil	4	6	11	3
Lífrænt silt	Lítill	1,5		2,5	
	Mikil	4		3	

Tafla 8 Viðmiðunargildi fyrir 8 til 16 metra langa staka staura.

MYND 7 Viðmiðunargildi sem Jón Skúlason setti fram fyrir burðarþol staura. (Jón, 1993)

Guðmundur (2014) fjallaði ítarlega um aðferðina í Meistaraverkefni sínu og lýsir því hvernig viðmiðunargildin eru ákvörðuð.

„Jón Skúlason bar saman bormótstöðu úr höggborun og niðurstöður úr álagsprófi á 53 staurum sem prófaðir voru víðs vegar um landið. Samtals voru staurarnir 53, flestir stauranna voru steyptir eða 31, 17 tréstaugar voru prófaðir en einungis 5 stálstaugar. Þó nokkur dreifing var í niðurstöðunum og því var ekki hægt að draga fram nákvæmar niðurstöður. Þó voru sett fram viðmiðunargildi fyrir 8 til 16 metra langa staura í lausum jarðlögum“

Guðmundur (2014) skoðar einnig hvort hægt sé að áætla burðarþol staura beint með niðurstöðum höggborunar, þ.e. með því að skala til og setja melda mótstöðu úr höggborun inn í rekjofnur.

„Niðurstöðurnar úr þeim aðferðum sem prófaðar voru til að áætla burðarþol staura með niðurstöðum höggborunar sýndu að hægt er að áætla burðarþol staura gróflega út frá bormótstöðunni. Niðurstöðurnar voru þó eingöngu bornar saman við útreiknuð gildi á burðarþoli stauranna og til að auka áreiðanleika þessara aðferða þarf frekari rannsóknir þar sem niðurstöður þessara aðferða eru bornar saman við niðurstöður álagsprófana á staurum.“

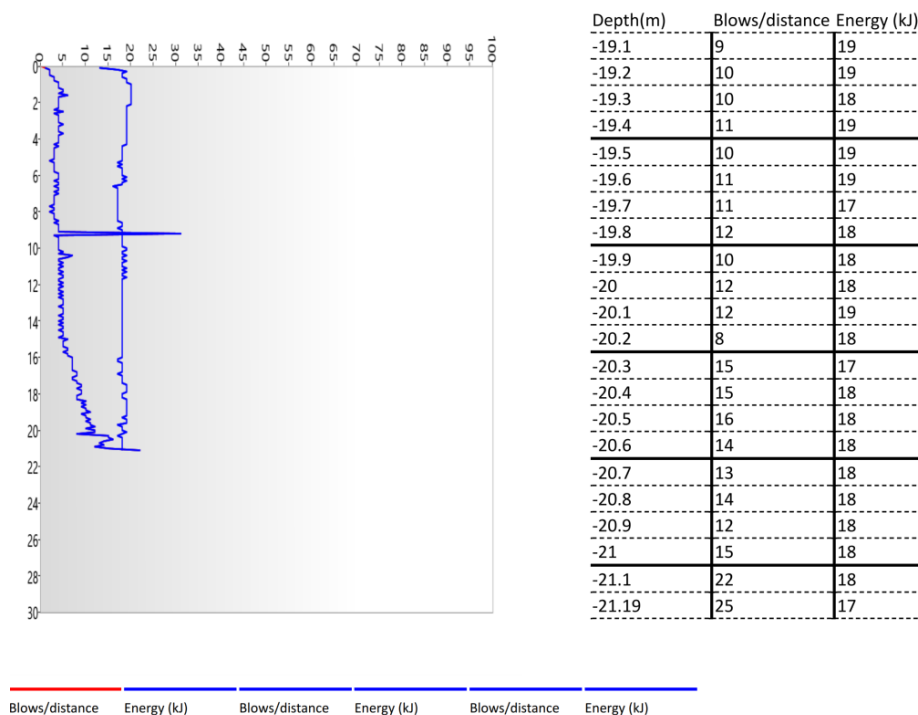
Það er líka mikilvægt að hafa í huga þær takmarkanir og fyrirvara sem höfundur viðmiðunargildanna, Jón Skúlason (1993), setur fram. Viðmiðunargildin á Mynd 7 eiga við 8-16 m langa staka staura í lausum jarðlögum. Þá tekur Jón einnig fram að höggborun sem boraðferð til að mæla mótstöðu sé mjög ónákvæm. Það eigi sérstaklega við í sandríkum efnum sem taka vel þjöppun og við slíkar aðstæður sé bormótstaðan ekki góður mælikvarði á jarðlögin eftir rekstur og geti jafnvel verið misvísandi.

2.2.7 Rekjöfnur

Það er hægt að áætla burðarþol staurs út frá rekmótstöðu með því að nota rekjöfnur. Aðferðin byggir á því að sú orka sem er notuð í lok niðurreksturs sé þekkt auk sig staurs við hvert högg. Einnig þarf að þekkja eiginleika jarðvegsins og virkni niðurrekstrarhamars.

Það eru til margar útfærslur á rekjöfnum og Guðmundur (2014) fjallaði um þær í meistaraverkefni sínu. Niðurstaða hans er að rekjafna Janbu eða „Rammeformelen“ eins og hún heitir í Peleveledningen (2019) gefi einna besta nálgun við mæld gildi fyrir burðarþol staura. Þetta er einnig sú rekjafna sem algengast hefur verið að nota á Íslandi.

Vegagerðin keypti nýlega nýjan niðurrekstrarhamar, Woltman 30 FR, sem er með PVE 3NL vökvadrifinn hamar/falllóð. Þessi hamar skilar niðurrekstrargögnum á ítarlegan hátt og einnig á rafrænu formi. Það er því auðvelt að lesa gögn úr hamrinum inn í rekjöfnur.



MYND 8 Niðurrekstrargögn úr hamri Vegagerðarinnar fyrir niðurrekstur á staur undir nýja brú yfir Núpsvötn.



MYND 9 Niðurrekstrarhamar Vegagerðarinnar að störfum (ljósmynd Per Grud).

Rekjafræðingur er birt hér að neðan (Guðmundur, 2014)

$$R_{c;k} = \frac{2 \cdot \eta \cdot W \cdot h}{s + \sqrt{s^2 + \frac{2 \cdot \eta \cdot \omega \cdot W \cdot h \cdot L}{A_s \cdot E_s}}}$$

Þar sem:

- η = Stuðull fyrir nýtni hamars
- W = Þyngd falllóðs
- h = Fallhæð lóðs
- s = Sig við hvert högg í lok rekstur staurisins
- ω = Deilistuðull fyrir kraftinn í staurnum
- A_s = Þversniðsflatarmál stauris
- E_s = Fjaðurstuðull efnisins í staurnum
- L = Lengd stauris í jörð

Stuðullinn η er breytilegur eftir því hvernig aðstæður eru á verkstað. Stuðullinn er 0,7 fyrir góðar aðstæður, 0,5 fyrir meðal aðstæður og 0,3 fyrir lélegar aðstæður. Þegar 8 til 16 metra langir staurar eru reknir niður í sandi er eðlilegt að gera ráð fyrir meðal til góðum aðstæðum. Deilistuðullinn ω er oft notaður á bilinu 0,5 til 0,9. Mælt er með því að nota 0,7 fyrir 8 til 16 metra langa staura rekna niður í sand.

2.3 Samantekt

Skv. Reglum um hönnun brúa er hönnuðum uppálagt að styðjast við Peleveiledningen og Håndbok V220 við hönnun á stauraundirstöðum undir brýr. Eftir því sem höfundur þessarar skýrslu best veit hafa þær reikniaðferðir sem þar eru kynntar ekki verið bornar ítarlega saman við niðurstöður álagsprófa við íslenskar aðstæður og strangt til tekið er því ekki leyfilegt að nota þær skv. EC7, sjá kafla **Error! Reference source not found.**

Sé miðað við þær kröfur sem EC7 setur fram um reikniaðferðir fyrir stauraundirstöður þá er í raun bara leyfilegt að meta burðarþol staura út frá niðurstöðum höggborana enda hafa verið skilgreind viðmiðunargildi fyrir burðarþol staura fyrir mismunandi gerðir af sendnum jarðvegi, sem byggist á álagsprófum, í þeirri reikniaðferð.

Eins og Guðmundur (2014) fjallar um í meistaraverkefni sínu þá er sú aðferðafræði að byggja burðarþol staura á niðurstöðum höggborana vandmeðfarin og aðferðin nær ekki vel utan um dreifingu burðarþols í mismunandi jarðvegi. Viðmiðunargildin sem eru skilgreind af Jóni Skúlasyni (1993) byggja á 53 álagsprófum og er ætlað að ná yfir 3 skilgreiningar á jarðvegi með mismunandi þéttleika. Auk þess er þessum prófunum ætlað að ná yfir 3 tegundir af staurum. Þetta leiðir af sér að sett eru fram viðmiðunargildi fyrir 12 möguleg tilvik. Það eru því ekki mörg álagspróf sem liggja að baki hverju viðmiðunargildi.

Guðmundur (2014) skoðar einnig hvort hægt sé að áætla burðarþol staura beint með niðurstöðum höggborunar og kemst að þeirri niðurstöðu að það sé hægt að gera það gróflega en nokkur dreifni væri samt m.t.t. tegundar jarðalaga.

Það hefur tíðkast lengi á Íslandi að framkvæma höggborun og nota viðmiðunargildin frá Jóni Skúlasyni (1993) til að áætla burðarþol staura. Það er almennt viðurkennt að sú aðferðarfræði virki ágætlega þó hún sé nokkrum takmörkunum háð eins og fjallað er um í kafla 2.2.6. Hún byggir einnig á því að hönnuður hafi reynslu af notkun aðferðarinnar og skilningi á forsendum viðmiðunargildanna. Þá er helsti gallinn að tenging á milli tegundar af jarðvegi og burðarþols er að litlu leyti töluleg og meira byggt á mati hönnuðar.

Það er því talin full ástæða til að skoða hvort hægt sé að nota í meira mæli reikniaðferðir sem settar eru fram í Peleveiledningen og Håndbok V220, sérstaklega NGI99. Til að uppfylla IST EN 1997-1 við notkun á þessum reikniaðferðum þá þarf að byrja á að sannreyna virkni þeirra við íslenskar aðstæður með því að bera þær saman við niðurstöður álagsprófa.

Önnur leið til að hanna staura er að nota áfram aðferðarfræðina frá Jóni Skúlasyni (1993) með því að gera fleiri álagspróf og stækka þannig gagnagrunninn sem liggur að baki þeim viðmiðunargildum sem hann setti fram. Með því að gera álagspróf er að auki hægt að staðfesta öryggi hönnunar.

3 SAMANTEKT MÆLINGA Á BURÐARÞOLI STAURAUNDIRSTAÐNA

Í gegnum tíðina hafa verið gerðar margar mælingar á burðarþoli staura með því að álagsprófa þá eftir niðurrekstur. Í þessum kafla eru teknar saman niðurstöður frá mælingum sem gerðar hafa verið síðastliðinn 50 ár og eru þær helst sóttar í gagnabanka Vegagerðarinnar.

3.1 Mælingar, Jón Skúlason (1993)

Vegagerð ríkisins fól Almennu verkfræðistofunni að taka saman öll tiltæk gögn um staurapróf í gagnaskýrslu (Jón, Burðargeta staura, 1993) og eru þessi gögn endurbirt hér að neðan.

3.1.1 Samantekt mælinga

3.1.1.1 Skeiðará

TAFLA 1 Niðurstöður mælinga frá brú á Skeiðará, steyptir staurar.

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [tm/m]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [kN/m ²]
Skeiðará	Sandur og möl	Lítill	Steyptur, 29x29 cm, forspenntur, lengd 11 m	2,0	65,7
Skeiðará	Sandur og möl	Lítill	Steyptur, 29x29 cm, forspenntur, lengd 10,6 m	2,0	59,8
Skeiðará	Sandur og möl	Lítill	Steyptur, 29x29 cm, forspenntur, lengd 11 m	1,7	54,9
Meðaltal:					60,1

Staurar reknir niður haustið 1973 og prófaðir 39 dögum eftir rekstur, hamar sem var notaður: Delmag D-12. 90% aðferð notuð til að reikna brotálag, lægsta gildi: 54,9 kN/m².

TAFLA 2 Niðurstöður mælinga frá brú á Skeiðará, tréstaumar.

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [tm/m]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [kN/m ²]
Skeiðará	Sandur og möl	Lítill	Tré, meðalummal 87 cm, lengd 10,3 m	2,0	105,8
Skeiðará	Sandur og möl	Lítill	Tré, meðalummal 77 cm, lengd 10,0 m	2,0	122,5
Skeiðará	Sandur og möl	Lítill	Tré, meðalummal 50 cm, lengd 10,0 m	1,7	180,3
Meðaltal:					136,2

Staurar reknir niður haustið 1973 og prófaðir 39-40 dögum eftir rekstur, hamar sem var notaður: Delmag D-12. 90% aðferð notuð til að reikna brotálag, lægsta gildi: 105,8 kN/m².

3.1.1.2 Sandgígjukvísl

TAFLA 3 Niðurstöður mælinga frá brú á Sandgígjukvísl, steiptir staurar.

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [tm/m]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [kN/m ²]
Sandgígjukvísl	Grófur sandur	Lítill	Steyptur, 29x29 cm, forspenntur, lengd 11,0 m	1,0	41,2
Sandgígjukvísl	Grófur sandur	Lítill	Steyptur, 29x29 cm, forspenntur, lengd 11,0 m	1,0	40,2
Sandgígjukvísl	Grófur sandur	Lítill	Steyptur, 29x29 cm, forspenntur, lengd 11,0 m	0,8	50,0
Meðaltal:					43,8

Staurar prófaðir febrúar 1973, hamar sem var notaður: Delmag D-12. 90% aðferð notuð til að reikna brotálag, lægsta gildi: 40,2 kN/m².

TAFLA 4 Niðurstöður mælinga frá brú á Sandgígjukvísl, tréstaurar.

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [tm/m]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [kN/m ²]
Sandgígjukvísl	Grófur sandur	Lítill	Tré, meðalummal 74 cm, lengd 10,1 m	1,0	115,6
Sandgígjukvísl	Grófur sandur	Lítill	Tré, meðalummal 75 cm, lengd 10,2 m	1,0	68,6
Sandgígjukvísl	Grófur sandur	Lítill	Tré, meðalummal 82 cm, lengd 10,05 m	0,8	85,3
Meðaltal:					89,8

Staurar prófaðir febrúar 1973, hamar sem var notaður: Delmag D-12. 90% aðferð notuð til að reikna brotálag, lægsta gildi: 68,6 kN/m².

3.1.1.3 Núpsvötn og Súla

TAFLA 5 Niðurstöður mælinga frá brú á Núpsvötn og Súlu, steiptir staurar

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [tm/m]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [kN/m ²]
Núpsvötn og Súla	Sandur og mül	Lítill	Steyptur, 29x29 cm, lengd 11,0 m	1,7	48,0
Núpsvötn og Súla	Sandur og mül	Lítill	Steyptur, 29x29 cm, lengd 10,0 m	2,0	51,9
Núpsvötn og Súla*	Sandur og mül	Lítill	Steyptur, 29x29 cm, lengd 11,0 m	1,7	71,5
Núpsvötn og Súla*	Sandur og mül	Lítill	Steyptur, 29x29 cm, lengd 11,0 m	1,7	55,9
Meðaltal:					56,8

Staurar prófaðir haustið 1972, hamar sem var notaður: Delmag D12. 90% aðferð notuð til að reikna brotálag, lægsta gildi: 48,0 kN/m² (*Staur var prófaður í undirstöðu brúar eftir að flestir staurar voru reknir).

TAFLA 6 Niðurstöður mælinga frá brú á Núpsvötn og Súlu, tré staur

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [tm/m]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [kN/m ²]
Núpsvötn og Súla	Sandur og möl	Lítill	Tré, þvermál 32 cm 1 m frá sverari enda, lengd 10 m	1,7	108,8

Staurar prófaðir haustið 1972, hamar sem var notaður: Delmag D12. 90% aðferð notuð til að reikna brotálag.

3.1.1.4 Múlakvísl

TAFLA 7 Niðurstöður mælinga frá Múlakvísl

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [tm/m]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [kN/m ²]
Múlakvísl*	Sandur og möl	Mikil	Steyptur, 27x27 cm, 8+8 m, herkúles skeyti	3,5	73,5
Múlakvísl*	Sandur og möl	Mikil	Steyptur, 27x27 cm, 8+8 m, herkúles skeyti	3,5	>75,5
Múlakvísl*	Sandur og möl	Mikil	Steyptur, 27x27 cm, lengd vantar (8+8 m?), herkúles skeyti	3	>93,1
Múlakvísl*	Sandur og möl	Mikil	Steyptur, 27x27 cm, lengd vantar (8+8 m?), herkúles skeyti	3	>80,4
Meðaltal:					>80,6

Staurar prófaðir 1989, hamar sem var notaður: Delmag D12. 90% aðferð notuð til að reikna brotálag, lægsta gildi: 73,5 kN/m² (*Staur var prófaður í undirstöðu brúar eftir að flestir staurar voru reknir).

3.1.1.5 Búrfellslína

TAFLA 8 Niðurstöður mælinga frá Búrfellslínu

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [tm/m]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [kN/m ²]
Búrfellslína	Finn sandur	Mikil	Tré, meðalummál 90 cm, lengd 12,5 m	10	>50,0

Staur prófaður 1976, hamar sem var notaður: Delmag D12. 90% aðferð notuð til að reikna brotálag

3.1.1.6 Markarfljót

TAFLA 9 Niðurstöður mælinga frá Markarfljóti

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [tm/m]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [kN/m ²]
Markarfljót	Sandur og möl	Mikil	Steyptur, 27x27 cm, lengd vantar, rekdýpt 13 m	4	>104,9
Markarfljót	Sandur og möl	Mikil	Steyptur, 27x27 cm, lengd vantar, rekdýpt 10,5 m	3	117,6
Meðaltal:					>111,3

Staurar prófaðir 1990, hamar sem var notaður: Hera 1250. 90% aðferð notuð til að reikna brotálag, lægsta gildi: 104,9 kN/m².

3.1.1.7 Hvalfjörður

TAFLA 10 Niðurstöður mælinga frá Hvalfirði

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [tm/m]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [kN/m ²]
Olíuhöfn í Hvalfirði	Siltríkur lífrænn sandur	Mikil	Tré, þvermál við rót 33 cm, þvermál við enda 12,7 cm, lengd 12,5 m	4	>15,7
Höfn í Hvalfirði	Siltríkur lífrænn sandur	Mikil	Steyptur, átthyrndur, 16,1 cm á kant, ummál 129 cm, lengd 20,5 m	4	>48,0
Höfn í Hvalfirði	Siltríkur lífrænn sandur	Mikil	12" Stálrör, lengd 25 m	4	25,5
Höfn í Hvalfirði	Siltríkur lífrænn sandur	Mikil	8" Stálrör, lengd 37,9 m	4	>82,3

Tréstauprófaður í Október 1942, hamar vantar. Steyptur stauprófaður 11.09.1979 með Delmag D-12. Stálrör prófuð í Janúar og Febrúar 1980 með fallóði. 90% aðferð notuð fyrir alla staura.

3.1.1.8 Borgarfjarðarbrú

TAFLA 11 Niðurstöður mælinga frá Borgarfjarðarbrú, steyptir staurar

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [tm/m]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [kN/m ²]
Borgarfjarðarbrú*	Finn sandur	Lítill	Steyptur, 29x29 cm, forspenntur, lengd 11 m	Áætlað 0,5	27,4
Borgarfjarðarbrú*	Finn sandur	Lítill	Steyptur, 29x29 cm, forspenntur, lengd 11 m	Áætlað 0,5	28,4
Meðaltal:					27,9

Staurar prófaðir 1979. Hamar sem var notaður: Delmag D-12. 90% aðferð notuð til að reikna brotálag, lægsta gildi: 27,4 kN/m² (*Staur var prófaður í undirstöðu brúar eftir að flestir staurar voru reknir).

TAFLA 12 Niðurstöður mælinga frá Borgarfjarðarbrú, tréstaumar

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [tm/m]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [kN/m ²]
Borgarfjarðarbrú	Finn sandur	Lítill	Tré, meðalummál 80 cm, lengd 10,2 m	2	88,2
Borgarfjarðarbrú	Finn sandur	Lítill	Tré, meðalummál 75 cm, lengd 10 m	2	74,5
Meðaltal:					81,4

Staurar prófaðir 1975. Hamar sem var notaður: Delmag D-5. 90% aðferð notuð til að reikna brotálag, lægsta gildi: 74,5 kN/m².

TAFLA 13 Niðurstöður mælinga frá Borgarfjarðarbrú, stálstaumar

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [tm/m]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [kN/m ²]
Borgarfjarðarbrú	Finn sandur	Lítill	Stál, 22x22 cm, spiss á enda, lengd 13 m	2	20,6
Borgarfjarðarbrú	Finn sandur	Lítill	Stál, 22x22 cm, spiss á enda, lengd 12,7 m	2	32,3
Borgarfjarðarbrú	Finn sandur	Lítill	Stál, 22x22 cm, spiss á enda, lengd 12,7 m	2	29,4
Meðaltal:					27,4

Staurar prófaðir 20.05.1976 og 21.05.1976. Hamar sem var notaður: BSP Lofthamar. 90% aðferð notuð til að reikna brotálag, lægsta gildi: 20,6 kN/m².

3.1.1.9 Hnausakvísl

TAFLA 14 Niðurstöður mælinga frá Hnausakvísl í Vatnsdal

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [tm/m]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [kN/m ²]
Hnausakvísl í Vatnsdal	Lífrænt silt	Lítill	Tré, meðalummál 77 cm, lengd 10,1 m	2,5	28,4
Hnausakvísl í Vatnsdal	Lífrænt silt	Lítill	Tré, meðalummál 81 cm, lengd 10,2	2,5	28,4
Hnausakvísl í Vatnsdal	Lífrænt silt	Lítill	Tré, meðalummál 78 cm, lengd 10,2 m	2,5	30,4
Meðaltal:					29,1

Staurar prófaðir í September 1972. Hamar sem var notaður Delmag D-5. 90% aðferð notuð til að reikna brotálag, lægsta gildi: 28,4 kN/m².

3.1.1.10 Héraðsvötn

TAFLA 15 Niðurstöður mælinga frá Héraðsvötnum

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [tm/m]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [kN/m ²]
Héraðsvötn*	Sandur og möl	Mikil	Steyptur, 30x30 cm, lengd 12 m	3	>62,7

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [tm/m]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [kN/m ²]
Héraðsvötn*	Sandur og möl	Mikil	Steyptur, 30x30 cm, lengd 12 m	3,5	>50,0
Meðaltal:					>56,4

Staurar prófaðir 16.08.1980. Hamar sem var notaður: Delmag D-12. 90% aðferð notuð til að reikna brotálag, lægsta gildi: 50,0 kN/m² (*Staur var prófaður í undirstöðu brúar eftir að flestir staurar voru reknir).

3.1.1.11 Svarfaðardalsá

TAFLA 16 Niðurstöður mælinga frá Svarfaðardalsá

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [tm/m]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [kN/m ²]
Svarfaðardalsá	Grófur sandur	Mikil	Steyptur, 30x30 cm, lengd vantar, rekdýpt 14 m	5	>47,0
Svarfaðardalsá	Grófur sandur	Mikil	Tré, þversnið og lengd vantar, rekdýpt 13,5 m	5	>56,8

Staurar prófaðir 10.11.1980. Hamar sem var notaður: Delmag D-12. 90% aðferð notuð til að reikna brotálag, lægsta gildi: 47,0 kN/m².

3.1.1.12 Akureyrarhöfn

TAFLA 17 Niðurstöður mælinga frá Akureyrarhöfn

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [tm/m]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [kN/m ²]
Akureyrarhöfn	Finn sandur	Lítill	Steyptur, 39x39 cm, lengd 16 m	1,9	43,1
Akureyrarhöfn	Finn sandur	Lítill	Steyptur, 39x39 cm, lengd 16 m	1,5	42,1
Akureyrarhöfn	Finn sandur	Lítill	Steyptur, 39x39 cm, lengd 16 m	1,7	26,5
Akureyrarhöfn	Finn sandur	Lítill	Steyptur, 39x39 cm, lengd 16 m	1,8	31,4
Akureyrarhöfn	Finn sandur	Lítill	Steyptur, 39x39 cm, lengd 16 m	2	32,3
Meðaltal:					35,1

Staurar prófaðir milli desember 1974 og apríl 1975. Falllóð notað við niðurrekstur staura. 90% aðferð notuð til að reikna brotálag, lægsta gildi: 31,4 kN/m².

3.1.1.13 Eyjafjarðará

TAFLA 18 Niðurstöður mælinga frá Eyjafjarðará

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [tm/m]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [kN/m ²]
Eyjafjarðará*	Siltríkur lífrænn sandur	Mikil	Steyptur, sexhyrndur 15 cm á kant, ummál 90 cm, lengd 8+8 m, herkules skeyti	5,5	47,0
Eyjafjarðará*	Siltríkur lífrænn sandur	Mikil	Steyptur, sexhyrndur 15 cm á kant, ummál 90 cm, lengd 8+8 m, herkules skeyti	5,5	53,9
Eyjafjarðará*	Siltríkur lífrænn sandur	Mikil	Steyptur, sexhyrndur 15 cm á kant, ummál 90 cm, lengd 8+8 m, herkules skeyti	6	43,1
Eyjafjarðará*	Siltríkur lífrænn sandur	Mikil	Steyptur, sexhyrndur 15 cm á kant, ummál 90 cm, lengd 8+8 m, herkules skeyti	6	37,2
Meðaltal:					45,3

Staurar prófaðir 14.11.1985 og 19.11.1985, hamar sem notaður var: Delmag D-12. 90% aðferð notuð fyrir alla staura, lægsta gildi: 37,2 kN/m² (*Staur var prófaður í undirstöðu brúar eftir að flestir staurar voru reknir).

3.1.1.14 Lagarfljót

TAFLA 19 Niðurstöður mælinga frá Lagarfljóti

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [tm/m]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [kN/m ²]
Lagarfljót*	Lífrænt silt	Lítill	Tré, meðalummál 72 cm, staurar skeyttir saman með járnhólk, lengd 8.7 + 5 m	Áætlað 0,5	28,4
Lagarfljót*	Lífrænt silt	Lítill	Tré, meðalummál 72 cm, staurar skeyttir saman með járnhólk, lengd 8.7 + 5 m	Áætlað 0,5	25,5
Meðaltal:					27,0

Staurar prófaðir 1953. 450 kg fallhamar notaður við niðurrekstur staura. 90% aðferð notuð til að reikna brotálag, , lægsta gildi: 25,5 kN/m² (*Staur var prófaður í undirstöðu brúar eftir að flestir staurar voru reknir).

3.2 Mælingar, Vegagerðin og Meistaraverkefni Guðmundar (2014)

Guðmundur (2014) safnaði saman niðurstöðum álagsprófa sem og niðurrekstrargögnum frá Vegagerðinni í meistaraverkefni sínu.

3.2.1 Burðarþol áætlað út frá álagsprófi

Fyrst eru birtar mælingar á burðarþoli staura byggðar á álagsprófunum sem Guðmundur (2014) safnaði saman.

3.2.1.1 Jökulsá á Fjöllum

TAFLA 20 Niðurstöður mælinga frá Jökulsá á Fjöllum

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [tm/m]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [kN/m ²]
Jökulsá á Fjöllum	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 11 m	32,7	>67,3

Dagsetningu vantar. Hamar sem notaður var: SC:30. 90% aðferð notuð til að reikna brotálag. Festistaur fór að ganga upp og því var álagsprófi hætt.

3.2.1.2 Jökulsá á Fljótsdal

TAFLA 21 Niðurstöður mælinga frá Jökulsá í Fljótsdal

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [tm/m]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [kN/m ²]
Jökulsá í Fljótsdal*	Sandur	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 29,5 m	11,9	>43,6
Jökulsá í Fljótsdal*	Sandur	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 29,5 m	11,9	>47,1
Jökulsá í Fljótsdal	Sandur	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 29,5 m	11,9	>36,1
Meðaltal:					>42,3

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/m² (* sami staur prófaður tvisvar, 47,1 kN/m² frá 22.05.2001 og 43,6 kN/m² frá 27.05.2001).

3.2.1.3 Kolgrafarfjörður

TAFLA 22 Niðurstöður mælinga frá Kolgrafarfirði

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [tm/m]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [kN/m ²]
Kolgrafarfjörður	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 20,6 m	4,5	>67,6
Kolgrafarfjörður	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 20,6 m	4,5	>67,6
Meðaltal:					>67,6

Staurar prófaðir 08.07.2003. Hamar sem notaður var: SC:30. 90% aðferð notuð til að reikna brotálag.

3.2.1.4 Steinavötn

TAFLA 23 Niðurstöður mælinga frá Steinavötum

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [tm/m]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [kN/m ²]
Steinavötn	Sandur og möl	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 11,5 m	3,5	>80,5

Staur prufaður 25.09.2019. Hamar sem notaður var: SC:30. 90% aðferð notuð til að reikna brotálag.

3.2.2 Burðarþol metið með rekjöfnu

Í meistaraverkefni sínu hafði Guðmundur (2014) takmarkað magn af niðurstöðum álagsprófa til að vinna úr og til að meta burðarþol staura notaði hann því rekjöfnu Janbu. Eins og áður hefur verið fjallað um í kafla 2.2.7 þá hefur reynslan á Íslandi sýnt að sú jafna gefur einna besta nálgun, af þeim rekjöfnum sem hafa verið skoðaðar, við mælt burðarþol úr álagsprófi. Það er því ákveðið að birta mat Guðmundar (2014) á burðarþoli staura byggt á rekjöfnu til að stækka gagnagrunninn í þessu verkefni fyrir „mælt“ burðarþol.

Það er samt mikilvægt að hafa í huga að rekjafna Janbu er ekki óskeikul og getur bæði vanmetið og ofmetið burðarþol staura í sumum tegundum jarðlaga.

3.2.2.1 Jökulsá á Fjöllum

TAFLA 24 Niðurstöður mælinga frá Jökulsá á Fjöllum

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [tm/m]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [kN/m ²]
Jökulsá á Fjöllum	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 11 m	32,7	118
Jökulsá á Fjöllum	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 8,5 m	17,2	178
Jökulsá á Fjöllum	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 9,5 m	15,6	159
Jökulsá á Fjöllum	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 9,5 m	15,6	185
Jökulsá á Fjöllum	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 11 m	32,7	127
Meðaltal:					153,4

Dagsetningu vantar. Hamar sem notaður var: SC:30. Aðferð Janbu notuð til að reikna brotálag, lægsta gildi: 118,0 kN/m².

3.2.2.2 Staðará í Steingrímsfirði

TAFLA 25 Niðurstöður mælinga frá Staðará í Steingrímsfirði, Sunnan ár

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [tm/m]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [kN/m ²]
Staðará í Steingrímsfirði	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 18 m	16,5	65

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [tm/m]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [kN/m ²]
Staðará í Steingrímsfirði	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 18 m	16,5	72
Staðará í Steingrímsfirði	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 18 m	16,5	68
Staðará í Steingrímsfirði	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 18 m	16,5	67
Staðará í Steingrímsfirði	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 18 m	16,5	71
Staðará í Steingrímsfirði	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 18 m	16,5	65
Staðará í Steingrímsfirði	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 18 m	16,5	65
Staðará í Steingrímsfirði	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 18 m	16,5	70
Staðará í Steingrímsfirði	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 18 m	16,5	71
Staðará í Steingrímsfirði	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 18 m	16,5	68
Staðará í Steingrímsfirði	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 18 m	16,5	72
Staðará í Steingrímsfirði	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 18 m	16,5	71
Staðará í Steingrímsfirði	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 18 m	16,5	73
Staðará í Steingrímsfirði	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 18 m	16,5	73
Staðará í Steingrímsfirði	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 18 m	16,5	74
Staðará í Steingrímsfirði	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 18 m	16,5	65
Staðará í Steingrímsfirði	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 18 m	16,5	70
Staðará í Steingrímsfirði	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 18 m	16,5	76
Meðaltal:					69,8

Dagsetningu vantar. Hamar sem notaður var: SC:30. Aðferð Janbu notuð til að reikna brotálag, lægsta gildi: 65,0 kN/m².

TAFLA 26 Niðurstöður mælinga frá Staðará í Steingrímsfirði, Norðan ár

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [tm/m]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [kN/m ²]
Staðará í Steingrímsfirði	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 16,5 m	17	33
Staðará í Steingrímsfirði	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 16,5 m	17	28
Staðará í Steingrímsfirði	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 16,5 m	17	39
Staðará í Steingrímsfirði	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 16,5 m	17	36
Staðará í Steingrímsfirði	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 16,5 m	17	36

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [tm/m]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [kN/m ²]
Staðará í Steingrímsfirði	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 16,5 m	17	36
Staðará í Steingrímsfirði	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 16,5 m	17	27
Staðará í Steingrímsfirði	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 16,5 m	17	24
Staðará í Steingrímsfirði	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 16,5 m	17	36
Staðará í Steingrímsfirði	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 16,5 m	17	50
Staðará í Steingrímsfirði	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 16,5 m	17	8
Staðará í Steingrímsfirði	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 16,5 m	17	22
Staðará í Steingrímsfirði	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 16,5 m	17	15
Staðará í Steingrímsfirði	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 16,5 m	17	25
Staðará í Steingrímsfirði	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 16,5 m	17	38
Staðará í Steingrímsfirði	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 16,5 m	17	40
Staðará í Steingrímsfirði	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 16,5 m	17	29
Staðará í Steingrímsfirði	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 16,5 m	17	28
Meðaltal:					30,6

Dagsetningu vantar. Hamar sem notaður var: SC:30. Aðferð Janbu notuð til að reikna brotálag, lægsta gildi: 8,0 kN/m².

3.2.2.3 Múlavísli

TAFLA 27 Niðurstöður mælinga frá Múlavísli

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [tm/m]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [kN/m ²]
Múlavísli	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 17 m	8,7	87
Múlavísli	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 17 m	8,7	104
Múlavísli	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 17 m	8,7	92
Múlavísli	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 17 m	8,7	107
Múlavísli	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 17 m	8,7	107
Múlavísli	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 17 m	8,7	113
Múlavísli	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 17 m	8,7	88
Múlavísli	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 17 m	8,7	100

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [tm/m]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [kN/m ²]
Múlakvísl	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 17 m	8,7	93
Múlakvísl	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 17 m	8,7	106
Múlakvísl	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 17 m	8,7	108
Múlakvísl	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 17 m	8,7	95
Múlakvísl	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 17 m	8,7	103
Múlakvísl	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 17 m	8,7	89
Múlakvísl	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 17 m	8,7	112
Múlakvísl	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 17 m	8,7	92
Múlakvísl	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 17 m	8,7	103
Múlakvísl	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 17 m	8,7	107
Múlakvísl	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 17 m	8,7	104
Múlakvísl	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 17 m	8,7	86
Múlakvísl	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 17 m	8,7	100
Múlakvísl	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 17 m	8,7	98
Múlakvísl	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 17 m	8,7	89
Múlakvísl	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 17 m	8,7	102
Múlakvísl	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 17 m	8,7	96
Múlakvísl	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 17 m	8,7	105
Meðaltal:					99,5

Dagsetningu vantar. Hamar sem notaður var: SC:30. Aðferð Janbu notuð til að reikna brotálag, lægsta gildi: 86,0 kN/m².

3.2.2.4 Jökulsá á Fljótisdal

TAFLA 28 Niðurstöður mælinga frá Jökulsá í Fljótisdal

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [tm/m]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [kN/m ²]
Jökulsá í Fljótisdal	Sandur	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 29,5 m	11,9	25
Jökulsá í Fljótisdal	Sandur	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 29,5 m	11,9	27
Jökulsá í Fljótisdal	Sandur	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 29,5 m	11,9	21

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [tm/m]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [kN/m ²]
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
Jökulsá í Fljótsdal	Sandur	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 29,5 m	11,9	24
Jökulsá í Fljótsdal	Sandur	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 29 m	12,4	26
Jökulsá í Fljótsdal	Sandur	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 29,5 m	11,9	18
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	22
Jökulsá í Fljótsdal	Sandur	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 29,5 m	11,9	23
Jökulsá í Fljótsdal	Sandur	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 29,5 m	11,9	26
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	26
Jökulsá í Fljótsdal	Sandur	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 29,5 m	11,9	25
Meðaltal:					24

Dagsetningu vantar. Hamar sem notaður var: SC:30. Aðferð Janbu notuð til að reikna brotálag, lægsta gildi: 18,0 kN/m².

3.2.2.5 Kolgrafarfjörður

TAFLA 29 Niðurstöður mælinga frá Kolgrafarfjörður

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [tm/m]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [kN/m ²]
Kolgrafarfjörður	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 21,3 m	4,9	43
Kolgrafarfjörður	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 20,0 m	4,0	56
Kolgrafarfjörður	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 21,3 m	4,9	47
Kolgrafarfjörður	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 20,9 m	9,9	57
Kolgrafarfjörður	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 20,3 m	4,5	40
Kolgrafarfjörður	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 20,9 m	9,9	61
Kolgrafarfjörður	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 20,3 m	4,5	41
Kolgrafarfjörður	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 20,3 m	4,5	56
Kolgrafarfjörður	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 20,3 m	4,5	48

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [tm/m]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [kN/m ²]
Kolgrafarfjörður	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 20,9 m	9,9	61
Kolgrafarfjörður	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 20,3 m	4,5	51
Kolgrafarfjörður	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 21 m	9,9	49
Kolgrafarfjörður	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 20,3 m	4,5	56
Kolgrafarfjörður	Sandur og möl	Lítill	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 20,0 m	4,0	64
Meðaltal:					52,1

Staurar reknir niður í Júlí 2003. Hamar sem notaður var: SC:30. Aðferð Janbu notuð til að reikna brotálag, lægsta gildi: 40,0 kN/m².

3.2.2.6 Hvítá við Bræðratungu

TAFLA 30 Niðurstöður mælinga frá Hvítá við Bræðratungu

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [tm/m]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [kN/m ²]
Hvítá við Bræðratungu	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 15,6 m	8,9	86
Hvítá við Bræðratungu	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 15,6 m	8,9	95
Hvítá við Bræðratungu	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 15,6 m	8,9	83
Hvítá við Bræðratungu	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 15,6 m	8,9	83
Hvítá við Bræðratungu	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 15,6 m	8,9	84
Hvítá við Bræðratungu	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 15,6 m	8,9	87
Hvítá við Bræðratungu	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 15,6 m	8,9	83
Hvítá við Bræðratungu	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 15,6 m	8,9	78
Hvítá við Bræðratungu	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 15,6 m	8,9	87
Hvítá við Bræðratungu	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 15,6 m	8,9	82
Hvítá við Bræðratungu	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 15,6 m	8,9	89
Hvítá við Bræðratungu	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 15,6 m	8,9	93
Hvítá við Bræðratungu	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 15,6 m	8,9	88
Hvítá við Bræðratungu	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 15,6 m	8,9	78
Hvítá við Bræðratungu	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 15,6 m	8,9	88
Hvítá við Bræðratungu	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 15,6 m	8,9	96
Meðaltal:					86,3

Dagsetningu vantar. Hamar sem notaður var: SC:30. Aðferð Janbu notuð til að reikna brotálag, lágsta gildi: 78,0 kN/m².

3.2.2.7 Eyrarteigsá

TAFLA 31 Niðurstöður mælinga frá Eyrarteigsá

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [tm/m]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [kN/m ²]
Eyrarteigsá	Sandur og möl	Meðal	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 15 m	9,9	98
Eyrarteigsá	Sandur og möl	Meðal	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 15,9 m	7,7	82
Eyrarteigsá	Sandur og möl	Meðal	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 15,9 m	7,7	87
Eyrarteigsá	Sandur og möl	Meðal	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 15,6 m	13,5	93
Eyrarteigsá	Sandur og möl	Meðal	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 15,5 m	13,5	88
Eyrarteigsá	Sandur og möl	Meðal	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 15,5 m	13,5	81
Eyrarteigsá	Sandur og möl	Meðal	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 15,5 m	13,5	84
Eyrarteigsá	Sandur og möl	Meðal	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 15,5 m	13,5	92
Eyrarteigsá	Sandur og möl	Meðal	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 15,6 m	13,5	95
Eyrarteigsá	Sandur og möl	Meðal	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 15,5 m	13,5	87
Eyrarteigsá	Sandur og möl	Meðal	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 15,5 m	13,5	77
Eyrarteigsá	Sandur og möl	Meðal	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 15,5 m	13,5	83
Eyrarteigsá	Sandur og möl	Meðal	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 15,5 m	13,5	80
Eyrarteigsá	Sandur og möl	Meðal	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 15,6 m	13,5	91
Eyrarteigsá	Sandur og möl	Meðal	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 15,6 m	13,5	94
Eyrarteigsá	Sandur og möl	Meðal	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 15 m	9,9	92
Eyrarteigsá	Sandur og möl	Meðal	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 15 m	9,9	94
Eyrarteigsá	Sandur og möl	Meðal	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 15 m	9,9	93
Meðaltal:					88,4

Dagsetningu vantar. Hamar sem notaður var: SC:30. Aðferð Janbu notuð til að reikna brotálag, lágsta gildi: 77,0 kN/m².

3.2.2.8 Ólafsfjarðarós

TAFLA 32 Niðurstöður mælinga frá Ólafsfjarðarósi

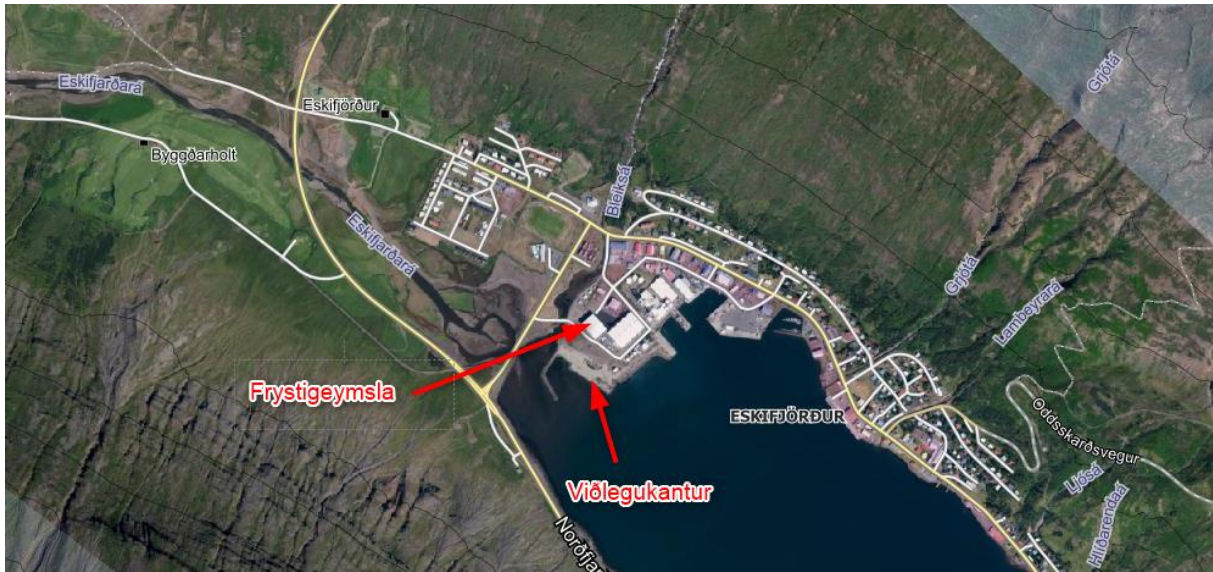
STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [tm/m]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [kN/m ²]
Ólafsfjarðarós	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 13 m	5,7	133
Ólafsfjarðarós	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 21 m	17,4	45
Ólafsfjarðarós	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 21 m	17,4	46
Ólafsfjarðarós	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 21 m	17,4	40
Ólafsfjarðarós	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 12 m	5,2	140
Ólafsfjarðarós	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 20 m	12,4	30
Ólafsfjarðarós	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 21 m	17,4	51
Ólafsfjarðarós	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 9 m	4,2	202
Ólafsfjarðarós	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 15 m	7,1	99
Ólafsfjarðarós	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 21 m	17,4	45
Ólafsfjarðarós	Sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, rekdýpt 21 m	17,4	47
Meðaltal:					79,8

Staur prufaður 25.09.2019. Hamar sem notaður var: SC:30. 90% aðferð notuð til að reikna brotálag, lægsta gildi: 30,0 kN/m².

3.3 Mælingar, EFLA

Á árunum 2019-2021 kom EFLA að hönnun á mannvirkjum fyrir Eskju og Hafnarsjóð Fjarðarbyggðar á Eskifirði. Þau mannvirki sem um ræðir eru

- Nýr 3500 m² frystiklefi fyrir Eskju sem er grundaður á steinsteypum 23 m löngum staurum, 350 x 350 mm. Umfang verkefnisins var um 11.000 m af staurum.
- Nýr 160 m langur viðlegukantur sem er grundaður á steinsteypum 52 m, 60 m og 36 m löngum staurum, 350 x 350 mm. Umfang verkefnisins var um 8.000 m af staurum.



MYND 10 Yfirlitsmynd af framkvæmdum og rannsóknum á Eskifirði

Vegna umfangs verkefnanna og einnig m.t.t. að það eru hugmyndir um áframhaldandi uppbygging á hafnarsvæðinu þá var ákveðið að ráðast í álagsprófanir, bæði til að tryggja öryggi hönnunar en einnig til að útvega betri hönnunarforsendur fyrir mögulega framtíðaruppbyggingu á svæðinu.

Það voru gerðar jarðgrunnsrannsóknir á svæðinu á undirbúningsstigi hönnunar og boraðar voru átta SPT holur. Tekin voru sýni niður á 20-25 m dýpi og fastur botn var skilgreindur á um 60 m dýpi. Efsta lagið er 3-5 m landfylling en neðan við hana er um 10 m lag af sandi með siltlögum. Neðan við það er síðan samfelldur burðarlítið 5-10 m þykkt siltlag ofan á malarlagi. Jarðtæknirannsóknir benda til að jarðlög á svæðinu séu veik, og mjög veik lög finnast niður á mikið dýpi.

3.3.1 Álagspróf á Eskifirði

Valið var að gera bæði statísk álagspróf og PDA álagspróf. Það er ekki mikil reynsla af PDA álagsprófum á Íslandi og því var talið skynsamlegt að skoða þau samhliða statísku álagsprófi og fá þannig mat á nákvæmni þeirra.

Það voru gerð 4 statísk álagspróf og 27 PDA álagspróf í verkefninu.

3.3.1.1 Eskifjörður, viðlegukantur

Á hönnunarstigi og við niðurrekstur á staurum undir nýjan viðlegukant á Eskifirði, fyrir Hafnarsjóð Fjarðarbyggðar, þá voru gerð PDA álagspróf á staurum. Flestir staurarnir voru prófaðir 2-4 dögum eftir niðurrekstur en fjórir staurar þó prófaðir 8-9 dögum eftir niðurrekstur.

Á hönnunarstigi voru reknir niður 4 prufustaurar, TP1, TP2, TP3 og TP4. Þeir voru síðan álagsprófaðir og niðurstöðurnar notaðar til að ákvarða burðarþol stauranna.

Á framkvæmdastigi þá voru einnig álagsprófaðir 10 staurar til að staðfesta að mælt þol staura á hönnunarstigi væri rétt.

Niðurstöður úr álagsprófunum eru birtar hér að neðan og er þeim skipt upp eftir lengd stauranna sem voru prófaðir (Christensen, 2020) og (Pålanalys, 2021)

TAFLA 33 Niðurstöður mælinga úr PDA álagsprófi frá Eskifirði – viðlegukantur. Lengd staura 50,6 m og 47,0 m.

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [tm/m]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [kN/m ²]
Eskifjörður, bryggja – A15	Siltríkur lífrænn sandur	Mikil	Steypa, 35x35 cm, lengd 50,6 m		42,4
Eskifjörður, bryggja – A2	Siltríkur lífrænn sandur	Mikil	Steypa, 35x35 cm, lengd 50,6 m		55,1
Eskifjörður, bryggja – A27	Siltríkur lífrænn sandur	Mikil	Steypa, 35x35 cm, lengd 50,6 m		52,2
Eskifjörður, bryggja – TP2	Siltríkur lífrænn sandur	Mikil	Steypa, 35x35 cm, lengd 47,0		45,0
Meðaltal:					48,7

Staurar prófaðir milli 18.01.2021 og 05.02.2021. Hamar sem notaður var: Junttan 7 ton Shark. PDA álagspróf notað til að reikna brotálag, lægsta gildi: 42,4 kN/m².

TAFLA 34 Niðurstöður mælinga úr PDA álagsprófi frá Eskifirði – viðlegukantur. Lengd staura 58,6 m.

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [tm/m]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [kN/m ²]
Eskifjörður, bryggja – C15	Siltríkur lífrænn sandur	Mikil	Steypa, 35x35 cm, lengd 58,6 m		51,2
Eskifjörður, bryggja – C2	Siltríkur lífrænn sandur	Mikil	Steypa, 35x35 cm, lengd 58,6 m		56,1
Eskifjörður, bryggja – C26	Siltríkur lífrænn sandur	Mikil	Steypa, 35x35 cm, lengd 58,6 m		53,0
Meðaltal:					53,4

Staurar prófaði milli 18.01.2021 og 05.02.2021. Hamar sem notaður var: Junttan 7 ton Shark. PDA álagspróf notað til að reikna brotálag, lægsta gildi: 51,2 kN/m².

TAFLA 35 Niðurstöður mælinga úr PDA álagsprófi frá Eskifirði – viðlegukantur. Lengd staura 35 m.

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [tm/m]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [kN/m ²]
Eskifjörður, bryggja – TP3	Silríkur lífrænn sandur	Mikil	Steypa, 35x35 cm, lengd 35 m		47,8
Eskifjörður, bryggja – E2	Silríkur lífrænn sandur	Mikil	Steypa, 35x35 cm, lengd 34,6 m		43,4
Eskifjörður, bryggja – E15	Silríkur lífrænn sandur	Mikil	Steypa, 35x35 cm, lengd 34,6 m		33,0
Eskifjörður, bryggja – E14	Silríkur lífrænn sandur	Mikil	Steypa, 35x35 cm, lengd 34,6 m		40,3
Eskifjörður, bryggja – E25	Silríkur lífrænn sandur	Mikil	Steypa, 35x35 cm, lengd 34,6 m		34,1
Meðaltal:					39,7

Staurar prófaðir milli 18.01.2021 og 05.02.2021. Hamar sem notaður var: Junttan 7 ton Shark. PDA álagspróf notað til að reikna brotálag, lægsta gildi: 33,0 kN/m².

Tveir af profustaurunum voru reknir alveg niður á fastan botn og síðan prófaðir. Eins og sést mælast þeir með minna burðarþol en styttri staurar og getur það t.d. verið vegna mögulegra skemmda við niðurrekstur auk þess sem þeir voru aðeins prófaðir 2 dögum eftir niðurrekstur. Minni staurinn, 27 x 27 cm á kant, var t.d. farin að skemmast undir lok niðurreksts.

TAFLA 36 Niðurstöður mælinga úr PDA álagsprófi frá Eskifirði – viðlegukantur. Lengd staura 64-66 m.

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [tm/m]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [kN/m ²]
Eskifjörður, bryggja – TP1	Silríkur lífrænn sandur	Mikil	Steypa, 35x35 cm, lengd 63,8 m		46,1
Eskifjörður, bryggja – TP4	Silríkur lífrænn sandur	Mikil	Steypa, 27x27 cm, lengd 65,5 m		43,4
Meðaltal:					44,8

Hamar sem notaður var: Junttan 7 ton Shark. PDA álagspróf notað til að reikna brotálag.

3.3.1.2 Eskifjörður, frystigeymsla Eskju

Við niðurrekstur á staurum undir nýja frystigeymslu á Eskifirði, fyrir Eskju, þá voru gerð PDA álagspróf á 13 staurum. Flestir staurarnir voru prófaðir 5-12 dögum eftir niðurrekstur en fjórir staurar þó prófaðir 19-22 dögum eftir niðurrekstur.

Það voru einnig reknir niður 4 profustaurar, TP1, TP2, TP3 og TP4. Þeir voru síðan álagsprófaðir með statísku álagsprófi og niðurstöðurnar notaðar til að meta nákvæmni PDA álagsprófana.

Niðurstöður úr álagsprófunum eru birtar hér að neðan og er þeim skipt upp eftir lengd stauranna sem voru prófaðir, aldri við niðurrekstur sem og tegund álagsprófa (Christensen, 2020) og (DMT Grundungstechnik, 2020).

Fyrst eru birtar niðurstöður fyrir staura sem voru prófaðir 5-12 dögum eftir niðurrekstur.

TAFLA 37 Niðurstöður mælinga frá Eskifirði – frystigeymsla, PDA álagspróf (5-12 daga frá niðurrekstri).

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

Staurar prufaðir milli 15.05.2020 og 20.05.2020. Hamar sem notaður var: Junttan 60 kN. PDA álagspróf notað til að reikna brotálag, lágsta gildi: 56,2 kN/m².

Eins og nefnt var hér að ofan þá voru 4 af staurunum sem voru prófaðir mældir aftur 12-15 dögum seinna til að skoða hvort það væri mælanleg aukning í burðarþoli eftir því sem lengra líður frá niðurrekstri

TAFLA 38 Niðurstöður mælinga frá Eskifirði – frystigeymsla, PDA álagspróf (19-22 dagar frá niðurrekstri)

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [tm/m]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [kN/m ²]
Eskifjörður, frystigeymsla – P37	Silríkur lífrænn sandur	Mikil	Steypa, 35x35 cm, lengd 23 m		86,6
Eskifjörður, frystigeymsla – P52	Silríkur lífrænn sandur	Mikil	Steypa, 35x35 cm, lengd 23 m		82,3
Eskifjörður, frystigeymsla – P217	Silríkur lífrænn sandur	Mikil	Steypa, 35x35 cm, lengd 23 m		87,3
Eskifjörður, frystigeymsla – P218	Silríkur lífrænn sandur	Mikil	Steypa, 35x35 cm, lengd 23 m		86,6
Meðaltal:					85,7

Staurar prufaðir milli 01.06.2020. Hamar sem notaður var: Junttan 60 kN. PDA álagspróf notað til að reikna brotálag, lágsta gildi: 82,3 kN/m².

Meðaltal brotálags fyrir sömu staura þegar þeir voru mældir 7-10 dögum eftir niðurrekstur var 73,4 kN/m². Þ.e. brotálag mælist um 17% hærra þegar staurar eru prófaðir aftur 12-15 dögum seinna. Þetta er einnig í samræmi við upplifun verktakans sem sá um niðurreksturinn en hann fann mun á mótstöðu staurana við álagsprófanirnar og var augljós aukning í mótstöðu eftir því sem það leið lengri tími á milli niðurreksturs og álagsprófana.

Niðurstöðurnar út statísku álagsprófunum eru síðan birtar hér að neðan.

TAFLA 39 Niðurstöður mælinga frá Eskifirði – frystigeymsla, statískt álagspróf (prófaðir 7-11 daga frá niðurrekstri)

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [tm/m]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [kN/m ²]
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
Meðaltal:					56,8

Staurar prufaðir 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, lægsta gildi: 45,5 kN/m².

Mikilvægt að hafa í huga að ekki náðist að mæla endanlegt burðarþol allra stauranna þar sem ekki var hægt að setja hærra álag á staura en 2000 kN. Það mældist aðeins brot í einum staur áður en 2000 kN álagi var náð. Sá staur hafði aðeins staðið í jörðinni í 6 daga áður en hann var prófaður á meðan hinir staurarnir voru búnir að standa frá 7 og upp í 11 daga í jörð áður en þeir voru prófaðir.

Niðurstaðan er sú að statísku álagsprófunum ber ágætlega saman við PDA álagsprófin sem er í samræmi við niðurstöður frá Skandinavíu.

3.4 Dýnamísk álagspróf við Núpsvötn

Hluti af verkefninu er að skoða framkvæmd og notagildi dýnamískra álagsprófa við Íslenskar aðstæður. Það hentaði því vel að Vegagerðin var að byggja nýja brú yfir Núpsvötn sem er grunduð á viðnámsstaurum og niðurrekstur staura fór fram sumarið og haustið 2021.

3.4.1 Samantekt mælinga

Valið var að prófa 10 staura. Þrjár staurar voru prófaði í undirstöðum 4, 5 og 6 og einn staur í undirstöðu 2. Það voru liðnar um 8 vikur frá niðurrekstri í undirstöðum 4 og 5 þegar þær voru prófaðar en um 4 vikur í undirstöðu 6. Í undirstöðu 2 var aðeins vika liðin frá niðurrekstri þegar staur var prófaður þar.

Niðurstöður úr álagsprófunum eru birtar hér að neðan (Grud, 2021)

TAFLA 40 Niðurstöður mælinga við Núpsvötn, PDA álagspróf.

STAÐSETNING/ VERKEFNI	JARÐLÖG	PÖKKUN	TEGUND AF STAUR OG STÆRÐ	HÖGGBORUN [tm/m]	BROTÁLAG/FLATARMÁL [kN/m ²]
Núpsvötn, P2-12	Sandur og möl	lítil	Steypur, 270x270, 21,1 m langur.	1,4	49,4
Núpsvötn, P4-01	Sandur og möl	lítil	Steypur, 270x270, 21,1 m langur.	1,4	65,6
Núpsvötn, P4-07	Sandur og möl	lítil	Steypur, 270x270, 21,1 m langur.	1,4	54,0
Núpsvötn, P4-31	Sandur og möl	lítil	Steypur, 270x270, 21,1 m langur.	1,4	53,8
Núpsvötn, P5-13	Sandur og möl	lítil	Steypur, 270x270, 21,1 m langur.	1,4	51,6*
Núpsvötn, P5-19	Sandur og möl	lítil	Steypur, 270x270, 21,1 m langur.	1,4	46,5*
Núpsvötn, P5-31	Sandur og möl	lítil	Steypur, 270x270, 21,1 m langur.	1,4	56,2*
Núpsvötn, P6-13	Sandur og möl	lítil	Steypur, 270x270, 21,1 m langur.	1,4	63,0*
Núpsvötn, P6-14	Sandur og möl	lítil	Steypur, 270x270, 21,1 m langur.	1,4	59,0*
Núpsvötn, P6-15	Sandur og möl	lítil	Steypur, 270x270, 21,1 m langur.	1,4	58,4*
Meðaltal:					55,7

*Ekki náðist að hreyfa staura 3 mm og því er mælt álag skilgreint sem virkjað (e. mobilized) burðarþol en ekki hámarks (e. ultimate) burðarþol.

Staurar voru prófaðir 01.09.2021. Hamar sem notaður var: Woltman 30FR með 30 kN lóði. PDA álagspróf var notað til að reikna brotálag, lægsta gildi: 46,5 kN/m² (49,4 kN/m² fyrir hámarks burðarþol).

Það reyndist ekki vera mælanlegur aukning á burðarþoli stauranna eftir því sem þeir hafa staðið lengur í jörðu eftir niðurrekstur.

4 DÝNAMÍSKT ÁLAGSPRÓF VIÐ MÆLINGAR Á BURÐARÞOLI

Dýnamísk álagspróf er þekkt aðferð við að mæla burðarþol og hefur verið notað erlendis í 30-40 ár og er algengt í Skandinavíu að álagsprófa fljóttandi staura með dýnamísku álagsprófi. Virkni þess hefur verið sannreynnd með samanburði við niðurstöður úr statískum álagsprófum.

Höfundur þekkir ekki til þess að dýnamísk álagspróf hafi verið framkvæmd í miklum mæli á Íslandi og því er ekki mikil reynsla af notkun slíkra álagsprófa hérlendis. Hingað til hefur verið algengast að framkvæma statísk álagspróf til að meta burðarþol staura í Íslandi en það eru tímafrek og kostnaðarsöm aðferð við að mæla burðarþol þó aðferðin sé sannarlega sú nákvæmasta sem er í boði.

Algengast er að framkvæma dýnamískt álagspróf með svokölluðu PDA (e. pile driving analyser) álagsprófi. Aðferðin byggir á höggbylgjufræðum, með því að mæla streitu og hröðun í sniði í staurnum rétt neðan við toppinn við högg þá er hægt að áætla burðarþol staurins (Eigland, Arne T., 2019).

4.1 PDA álagspróf

Prófunaraðferðin byggir á því að mæla hve lengi höggsveiflan frá hamrinum er að ferðast niður staurinn og skila sér upp að mælíbúnaðinum aftur ásamt því að hröðun staurins við höggið er mæld. Burðarþol staurins er metið út frá því hversu hátt hlutfall af sveiflunni sem verður við höggið skilar sér aftur upp í mælíbúnaðinn (Guðmundur, 2014).

PDA álagspróf eru nokkuð einföld í framkvæmd. Festir eru tveir hröðunarnemar og tveir streitunemar rétt neðan við toppinn á staurnum. Nemarnir eru síðan tengdir við mælingartölvu og slagsería keyrð á staurinn. Mat á burðarþoli staura úr álagsprófinu er venjulega hægt að fá strax út úr mælingartölvunni á verkstað.

Mælingarnar úr PDA álagsprófinu er síðan venjulega greindar með skráningarforritnu CAPWAP og út frá því er hægt að fá frekari upplýsingar um m.a.:

- Hliðarburð og endaburð staur
- Hvernig hliðarburður deilist eftir lengd staur
- Hugsanlegar skemmdir á staur

Eins og fjallað var um í kafla 2 þá getur burðarþol staur í sandi og sendnum jarðvegi aukist verulega eftir því sem lengra líður frá niðurrekstri. Það er einnig þekkt að það tekur nokkra daga fyrir sendinn jarðveg að jafna sig eftir niðurrekstur á meðan póruþrýstingur er að jafnast út. Það er t.d. þekkt frá árum áður að það var oft erfitt að byrja aftur að reka niður staura ef það var stoppað í miðjum rekstri og beðið 1-2 daga þangað til haldið var áfram með rekstur.

Það er fjallað um þetta í Peleveiledningen (2019) og mælt með því að láta minnst 10 daga líða frá niðurrekstri áður en álagspróf er framkvæmt þannig að jarðvegurinn í kringum staurinn sé búin að jafna sig áður en staurinn er álagsprófaður.

PDA álagspróf henta hins vegar ekki við allar aðstæður auk þess sem ákveðnar grunnupplýsingar verða að liggja fyrir áður en slíkt álagspróf er framkvæmt.

Eftirfarandi upplýsingar þurfa að liggja fyrir til að hægt sé að framkvæma PDA álagspróf:

- Númer, staðsetning og niðurrekstrardagsetning fyrir staur sem á að prófa
- Niðurrekstrargögn og almenn skrásetning frá niðurrekstri staura
- Tegund af staur (efni, þversnið, járnþending, lengd)
- Efniseiginleikar staura (rúmbýngd, fjaðurstuðull, þéttleiki)
- Hæðarkóti fyrir topp og botn á staur sem og hæð á yfirborði
- Jarðtæknilegar forsendur og lýsingar á svæðinu
- Áætlað burðarþol staura frá hönnuði
- Upplýsingar um hamar, s.s. tegund hamars, þýngd á falllóði, fallhæð, o.s.fr.

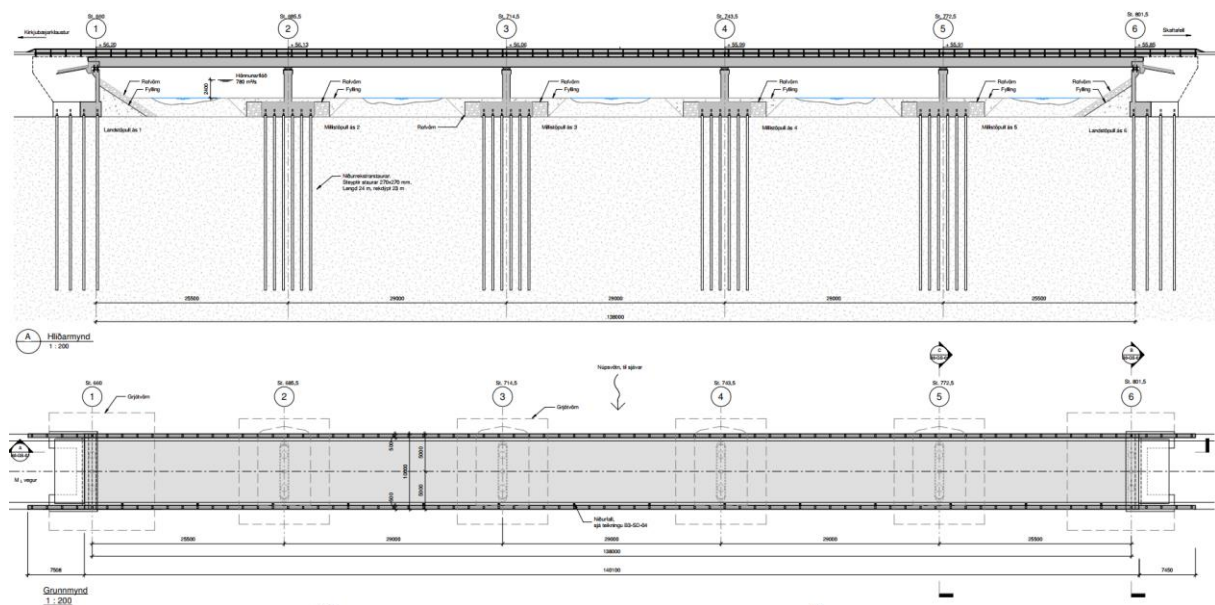
Til þess að geta framkvæmt PDA álagspróf þá þurfa eftirfarandi skilyrði síðan að vera til staðar:

- Það verður að vera niðurrekstrarhamar á staðnum sem er nógu öflugur til að geta hreyft staurinn 3-5 mm niður við hvert slag til að hægt sé að mæla hámarksburðarþol
- Staur verður að standa 3d upp úr jörðinni eða að lágmarki 1,0 m
- Það verður að vera öruggt og þurrt aðgengi að efsta meter af staurnum
- Toppur á staur verður að vera heill og án skemmda

Þó að PDA álagspróf sé að miklu leyti hugsað fyrir viðnámsstaura þá virkar það einnig fyrir staura sem eru reknir niður á fastann botn eða klöpp og er það einnig notað í slíkum aðstæðum.

4.2 PDA álagspróf á staurum undir nýja brú yfir Núpsvötn

Vegagerðin er að byggja nýja brú yfir Núpsvötn sem leysir af hólmi núverandi einbreiða brú sem var byggð 1972. Nýja brúin er grunduð á steinsteyptum staurum, 270 x 270 mm sem eru reknir 23 m niður í þétt jarðlag.



MYND 11 Langsnið og grunnmynd í nýja brú yfir Núpsvötn (Vegagerðin)

Gamla brúin er grunduð á forsteyptum steinsteyptum staurum, 290 x 290 mm sem voru reknir um 10-11 m niður. Við niðurrekstur undir gömlu brúna voru fjórir staurana álagsprófaðir með statísku álagsprófi (Jón, Burðargeta staura, 1993) og eru niðurstöður úr því birtar í kafla 3.1.1.3.

Verkefnið hentar því vel til að framkvæma PDA álagspróf þar sem hægt er að bera niðurstöðurnar saman við statískt álagspróf.

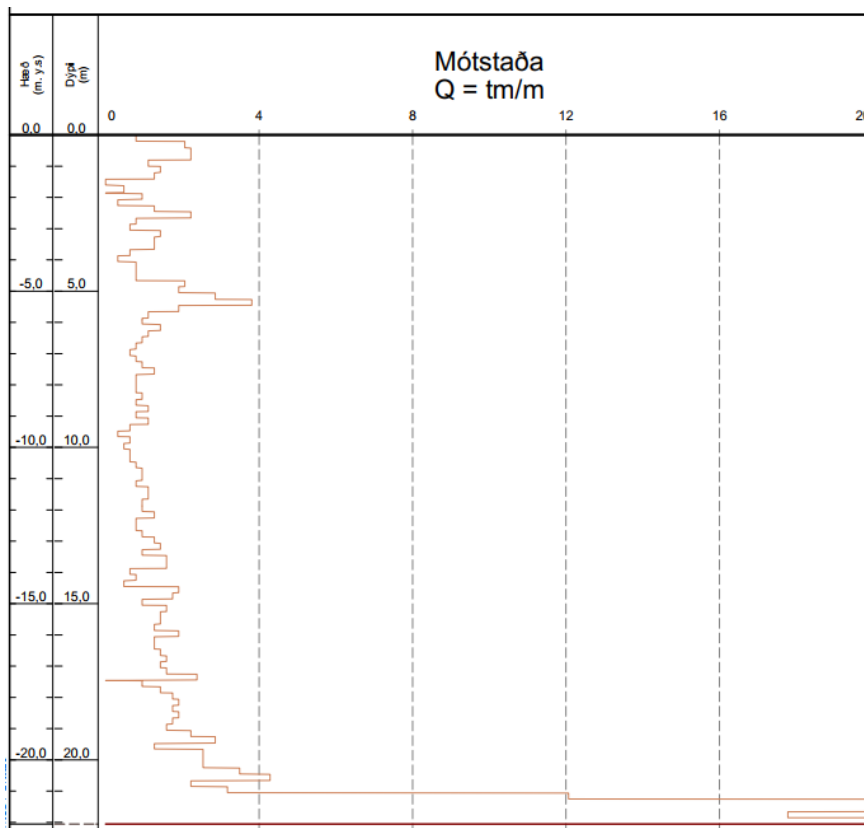
4.2.1 Jarðtæknilegar forsendur

Það var borað á þremur stöðum í fyrirhuguðu brúarstæði og gerðar 3 heildarboranir og 2 höggboranir. Greining á sýnunum sýndu misþétt malar- og sandlög niður á fastan botn/þétt jarðlög á um 20-25 m dýpi.

Rýmþyngd malar- og sandlagsins er skilgreint sem 19 kN/m^3 og viðnámshorn þess sem 35° . Mótstaða úr höggborun er áætluð sem $1,5 \text{ tm/m}$ yfir alla lengd staurins.

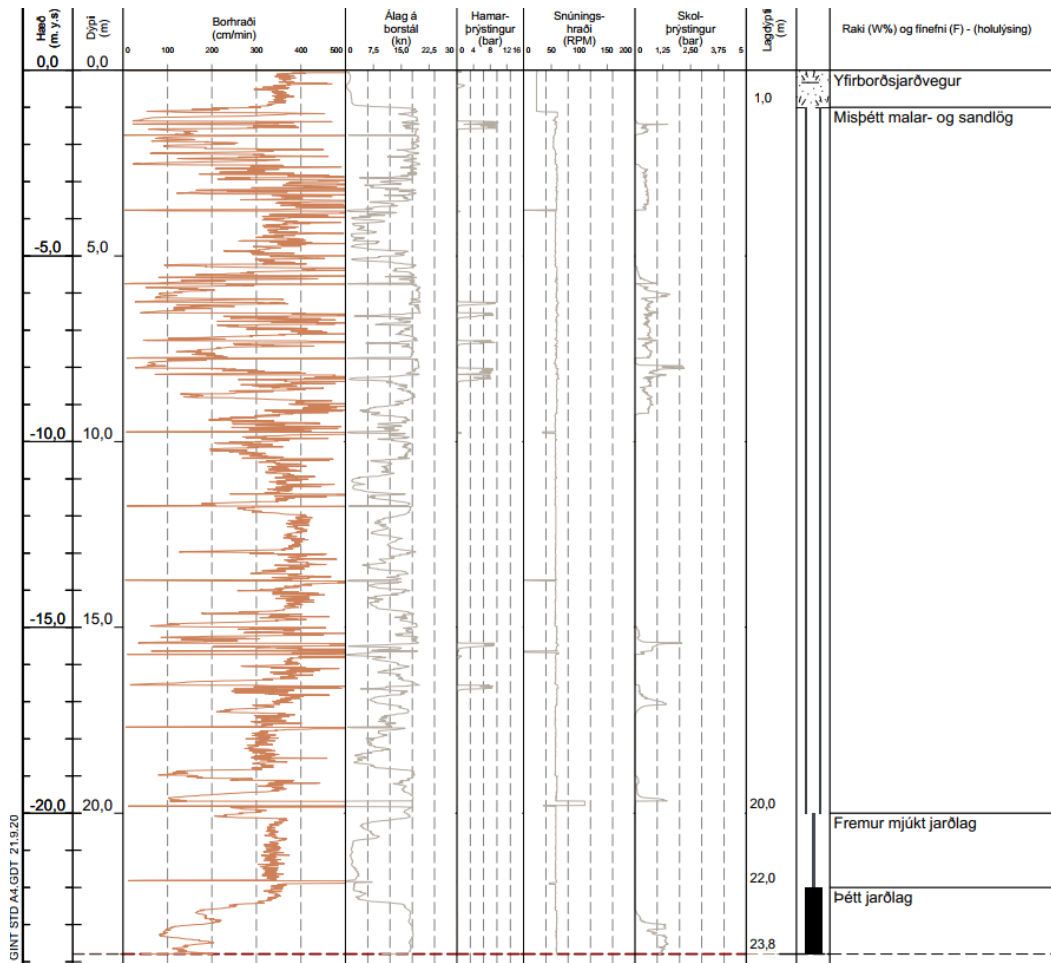
Það er áætlað að staurarnir séu undir grunnvatni m.t.t. að það þurfti að dæla frá staurunum þegar verið var að álagsprófa þá þó.

Niðurstaða úr einni höggborun er sýnd á myndinni hér að neðan.

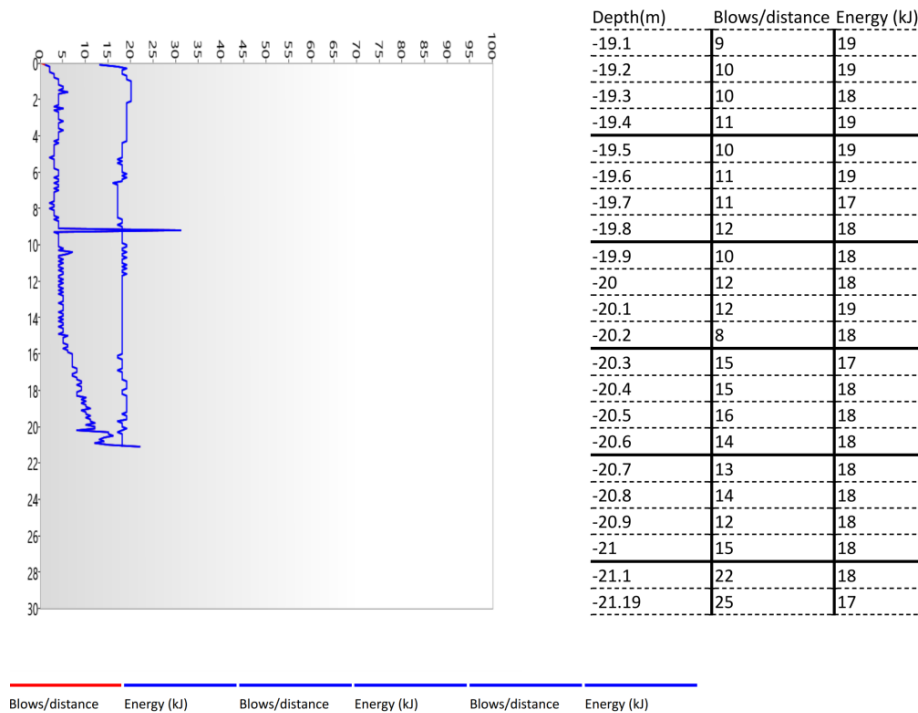


MYND 12 Niðurstaða úr höggborun (Vegagerðin).

Niðurstöður úr heildarborun og niðurrekstrargögn frá hamri Vegagerðarinnar eru síðan birtar á næstu tveimur myndum hér að neðan.



MYND 13 Niðurstaða úr heildarborun (Vegagerðin).



MYND 14 Niðurrekstrargögn úr hamri Vegagerðarinnar fyrir niðurrekstur á staur undir nýja brú yfir Núpsvötn.

4.2.2 Statískt álagspróf á staurum undir núverandi brú

Eins og fjallað var um í kafla 2 er statískt álagspróf besti mælikvarðinn á burðarþol viðnámsstaura og því í raun grunnurinn fyrir því að meta nákvæmni annarra álagsprófa og reikniaðferða.

Í tengslum við álagsprófið voru tekin sýni til að hægt væri að skilgreina gerð jarðlaga og voru þau skilgreind sem sandur og möl. Auk þess var framkvæmd höggborun þar sem meðalmótstaða mældist 1,8 tm/m niður á 15 m dýpi. Það voru prófaðir 4 staurar og burðarþol skilgreint sem mótstaða á fermetra af staur:

- 48 kN/m²
- 52 kN/m²
- 72 kN/m²
- 56 kN/m²

Meðalgildi er 57 kN/m² og lægsta mælda gildi 48 kN/m².

4.2.3 Framkvæmd PDA álagsprófs

Fyrsta september 2021 var framkvæmt PDA álagspróf á 10 staura við Núpsvötn. Það var danskt fyrirtæki, *cp test a/s*, sem sá um álagsprófin en þeir eru sérhæfðir í ýmsum mælingum og m.a. PDA álagsprófum.

Framkvæmd prófsins gekk vel og það tók aðeins um 30 mínútur að prófa hvern staur og gróft mat á burðarþoli staura lág fyrir strax að loknu álagsprófinu. Seinna var síðan skýrslu skilað sem skilgreindi nákvæmar niðurstöður úr mælingunum. Samvinna við niðurrekstrarflokk Vegagerðarinnar gekk vel og allar aðstæður og forsendur fyrir álagsprófið voru uppfylltar.



MYND 15 Búið að festa hröðunar- og streitunema á staur.



MYND 16 Höggsería keyrð á staur.



MYND 17 Nemar festir á staur og tengdir við mælitölvu (mynd: Guðrún Þóra Garðarsdóttir).

Niðurstöðurnar úr PDA álagsprófinu eru birtar í kafla 3.4.1. Meðalgildi fyrir mælt burðarþol var 55,7 kN/m² en lægsta gildi 49,4 kN/m².

4.3 Samanburður á reikniaðferðum, PDA álagsprófi og statísku álagsprófi

Það liggja fyrir niðurstöður úr höggborun og jarðkönnunum í kringum brúarstæðið auk þess sem niðurrekstrargögn voru aðgengileg. Það er því hægt að bera saman niðurstöður úr PDA álagsprófunum við eftirfarandi reikniaðferðir og mælingar.

- Statískt álagspróf
- Burðarþol skv. rekjöfnum, sjá kafla 2.2.7
- Burðarþol skv. niðurstöðum höggborana, sjá kafla 2.2.6
- Burðarþol skv. SV - aðferðarfræðinni, sjá kafla 2.2.5
- Burðarþol skv. PV91 aðferðinn, sjá kafla 2.2.4.1

Það er valið að bera saman kennigildi, $R_{s,k}$, fyrir burðarþol, þ.e. eftir að búið er að setja inn leiðréttingarstuðull á mælt/reiknað gildi sem tekur tillit til nákvæmni aðferðarinnar sem er notuð.

Kennigildi fyrir burðarþol stauris, $R_{c,k}$, er reiknað skv. eftirfarandi líkingu (EN 1997-1, 2004)

$$R_{c,k} = \min\left(\frac{(R_{c,m})_{mean}}{\xi_1}; \frac{(R_{c,m})_{min}}{\xi_2}\right)$$

Þar sem ξ_1 og ξ_2 eru leiðréttingarstuðlar m.t.t. reikni- og mælingaraðferða sem og fjölda rannsókna/mælinga sem eru gerðar. $(R_{c,m})_{mean}$ er meðalgildi úr mælingum/útreikningum og $(R_{c,m})_{min}$ er lægsta gildi úr mælingum/útreikningum.

4.3.1 Burðarþol skv. rekjöfnum

Burðarþol er reiknað skv. rekjöfnum Janbu sem var skilgreind í kafla 2.2.7. Eftirfarandi inntaksbreytur eru skilgreindar:

η	= 0,5
$W \times h$	= 21 kJ
s	= 5 mm
ω	= 0,7
A_s	= 72.900 mm ²
E_s	= 30 GPa
L	= 21 m

Leiðréttingarstuðull skv. EN 1997-1 (2004) er valin sem 1,595 (1,45 x 1,1).

4.3.2 Burðarþol skv. niðurstöðum höggborana

Mótstaða skv. höggborun er áætluð sem 1,5 tm/m. Skv. viðmiðunargildum frá Jóni Skúlasyni (1993) er burðarþol stauris þá um 50 kN/m². Leiðréttingarstuðull skv. EN 1997-1 (2004) er valin sem 1,45.

4.3.3 Burðarþol skv. SV - aðferðarfræðinni

Burðarþol er reiknað skv. SV - aðferðinni sem er skilgreind í kafla 2.2.5. Skriðhorn, ϕ , er skilgreint sem 35° fyrir bæði malar/sandlagið sem og fasta lagið við botninn á staurnum. Það mætti g.r.f. að fasta jarðlagið hefði hærra skriðhorn og þar með hærri burðarþolsstuðull, N_q , en ekki liggja fyrir forsendur til að skilgreina nánar efniseiginleikana á fasta jarðlaginu við botninn á staurnum.

Það er g.r.f. að grunnvatn nái upp að topp af staurnum og eftirfarandi inntaksbreytur eru skilgreindar:

$$\mu = 0,7$$

$$r = 0,9$$

$$p'_z = 95 \text{ kPa}$$

$$S_v = 0,3$$

$$p' = 190 \text{ kPa}$$

$$N_q = 30$$

Almennt er viðloðun, a , ekki notuð við útreikninga á burðarþoli á Íslandi og því er valið að horfa fram hjá þeirri breytu í reikniaðferðinni.

Leiðréttingarstuðull skv. EN 1997-1 (2004) er valin sem 1,45.

4.3.4 Burðarþol skv. PV91 aðferðinn

Burðarþol er reiknað skv. PV91 aðferðinni sem er skilgreind í kafla 2.2.4.1. Skriðhorn, ϕ , er skilgreint sem 35° fyrir bæði malar/sandlagið sem og fasta lagið við botninn á staurnum. Það mætti g.r.f. að fasta lagið hefði hærra skriðhorn og þar með hærri burðarþolsstuðull, N_q , en ekki liggja fyrir forsendur til að skilgreina nánar efniseiginleika á fasta efninu við botninn á staurnum.

Það er g.r.f. að grunnvatn nái upp að topp af staurnum og eftirfarandi inntaksbreytur eru skilgreindar:

$$A_s = 1,08 \text{ m}^2/\text{m}$$

$$\beta = 0,3$$

$$\sigma'_{v;0} = 95 \text{ kPa}$$

$$A_b = 0,073 \text{ m}^2$$

$$N_q = 25$$

$$\sigma'_{v;0b} = 190 \text{ kPa}$$

Leiðréttingarstuðull skv. EN 1997-1 (2004) er valin sem 1,45.

4.3.5 Samanburður og umræður

Burðarþol fyrir 21 m langan staur er reiknað með þeim aðferðum og mælingum sem búið er að skilgreina og niðurstöðurnar birtar í töflunni hér að neðan.

Gengið er út frá því að burðarþol sem er metið skv. statísku álagsprófi sé rétt burðarþol staura og til að meta nákvæmni þeirra reikniaðferða og mælingar sem eru skoðaðar þá er hlutfall af reiknuðu burðarþoli reiknað m.t.t. statísk álagsprófs.

TAFLA 41 Samanburður á burðarþoli staura með mismunandi álagsprófunum og reikniaðferðum.

	STATÍSKT ÁLAGSPRÓF [kN]	REKJAFNA JANBU [kN]	HÖGGBORUN – VIÐMIÐUNARGILDI [kN]	SV – AÐFERÐIN [kN]	PV91 AÐFERÐIN [kN]	PDA ÁLAGSPRÓF [kN]
Mælt/reiknað burðarþol, $R_{c,m}$	1090	1170	1134	1049	987	1125
Leiðréttingarstuðull, ξ	1,0	1,595	1,45	1,45	1,45	1,15
Kennigildi, $R_{c,k}$	1090	734	782	723	681	980
Hlutfall af statísku álagsprófi	-	62%	67%	66%	58%	90%

Eins og sést í töflunni hér að ofan þá eru flestar reikniaðferðirnar að skila sambærilegum niðurstöðum hvað varðar burðarþol, þ.e. það reiknast sem 60-70% af raunverulegu burðarþoli sem er mælt með statísku álagsprófi. Það eru s.s. ekki óvæntar niðurstöður enda þekkt að reikniaðferðir sem byggja á elastískum- og plastískum líkönum eða emperískum gögnum séu íhaldsamar og vanmeti raunverulegt burðarþol staura. Reikniaðferðirnar gefa engu að síður ágætis mat á burðarþoli og eru vel nothæfar á fyrstu stigum verkefna og til viðmiðunar.

Samanburður á milli PDA álagsprófs og statísku álagsprófs kemur vel út og aðeins er um 10% munur á mældum gildum sem höfundur telur vel ásættanlegt og það gefur til kynna að hægt sé að nota PDA álagspróf við íslenskar aðstæður.

5 Frekari rannsóknir

Eins og kemur fram í fyrsta kafla skýrslunnar þá er þetta fyrsta áfangaskýrsla verkefnisins og höfundur mun sækja um framhaldsstyrk til að geta haldið áfram með verkefnið.

Næstu skref í verkefninu eru eftirfarandi:

- Að framkvæma þrýstiboranir í brúarstæðum þar sem liggja fyrir jarðkannanir og gerðar hafa verið álagsprófanir. Þannig er hægt að meta hvort reikniaðferðir sem kynntar eru í kafla 2.2.4.2 henti við íslenskar aðstæður.
- Skoða hvort hægt sé að taka meira tillit til tímaáhrifa á burðarþol staura. Hér er sérstaklega verið að horfa til þess að vinna úr gögnunum frá mælingunum á Eskifirði, sjá kafla 3.3, en þar er líklega í fyrsta sinn á Íslandi mæld aukning í burðarþoli staura eftir því sem lengri tími líður frá niðurrekstri.
- Framkvæma fleiri PDA álagspróf þar sem Vegagerðin er að byggja brýr á fljótandi staurum þannig að hægt sé að stækka gagnagrunn yfir raunverulegt burðarþol staura og fá betri reynslu á notkun og hagnýtingu af PDA álagsprófunum.
- Skilgreina þær jarðvegsprófanir sem æskilegt væri að gera á undirbúningsstigi framkvæmda til að geta hannað stauraundirstöður á sem hagkvæmastan og öruggastan hátt.
- 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.

6 HEIMILDASKRÁ

- Christensen, M. B. (2020). *Dynamic pile load testing - Eskja Iceland*. CP test.
- DMT Grundungstechnik. (2020). *Project Eskja Eskifjörður, Iceland - Static compression pile load testing*. DMT Grundungstechnik.
- Eigland, Arne T. (2012). *Peleveiledningen*. Norsk geoteknisk forlag.
- Eigland, Arne T. (2019). *Peleveiledningen*. Norsk geoteknisk forlag.
- EN 1997-1. (2004). *Eurocode 7: Geotechnical design - Part 1: General rules*. Brussel: European Committee for Standardization.
- Grud, P. (2021). *Dynamic pile load testing - New bridge by Skeidararsandi, Núpsvötn Iceland*. CP test.
- Guðmundur, Þ. B. (2014). *Samanburður bormótstöðu við niðurrekstur og burðarþol staura*. Reykjavík: Háskólinn í Reykjavík.
- Håndbok N400. (2022). *Bruprosjektering*. Oslo: Statens vegvesen Vegdirektoratet.
- Håndbok V220. (2014). *Geoteknik i vegbygging*. Oslo: Statens vegvesen Vegdirektoratet.
- Haraldur, S., Jón, S., & Sverrir, Ö. S. (2016). *Jarðtæknirannsóknir fyrir vega- og brúagerð*. Reykjavík: Vegagerðin.
- Janbu, N. (1976). Static bearing capacity of friction piles. *Ráðstefnugrein frá European Conference on SMFE*. Wien.
- Jón Skúlason. (1993). Álagspróf á staura. *Árbók VFÍ*, 308-317.
- Jón Skúlason. (1993). *Burðargeta staura*. Reykjavík: Vegagerð Ríkisins.
- Kolsgaard, F. (2020). *Evaluering av beregningsmetoder for friksjonspeler i sand*. Trondheim: NTNU.
- Pålanalys. (2021). *High-strength dynamic pile test report, Fjarðarbyggð ports - Piles for new quay*. Pålanalys i Göteborg AB.
- Reglur um hönnun brúa. (2018). *Reglur um hönnun brúa - Útgáfa 2*. Reykjavík: Vegagerðin.