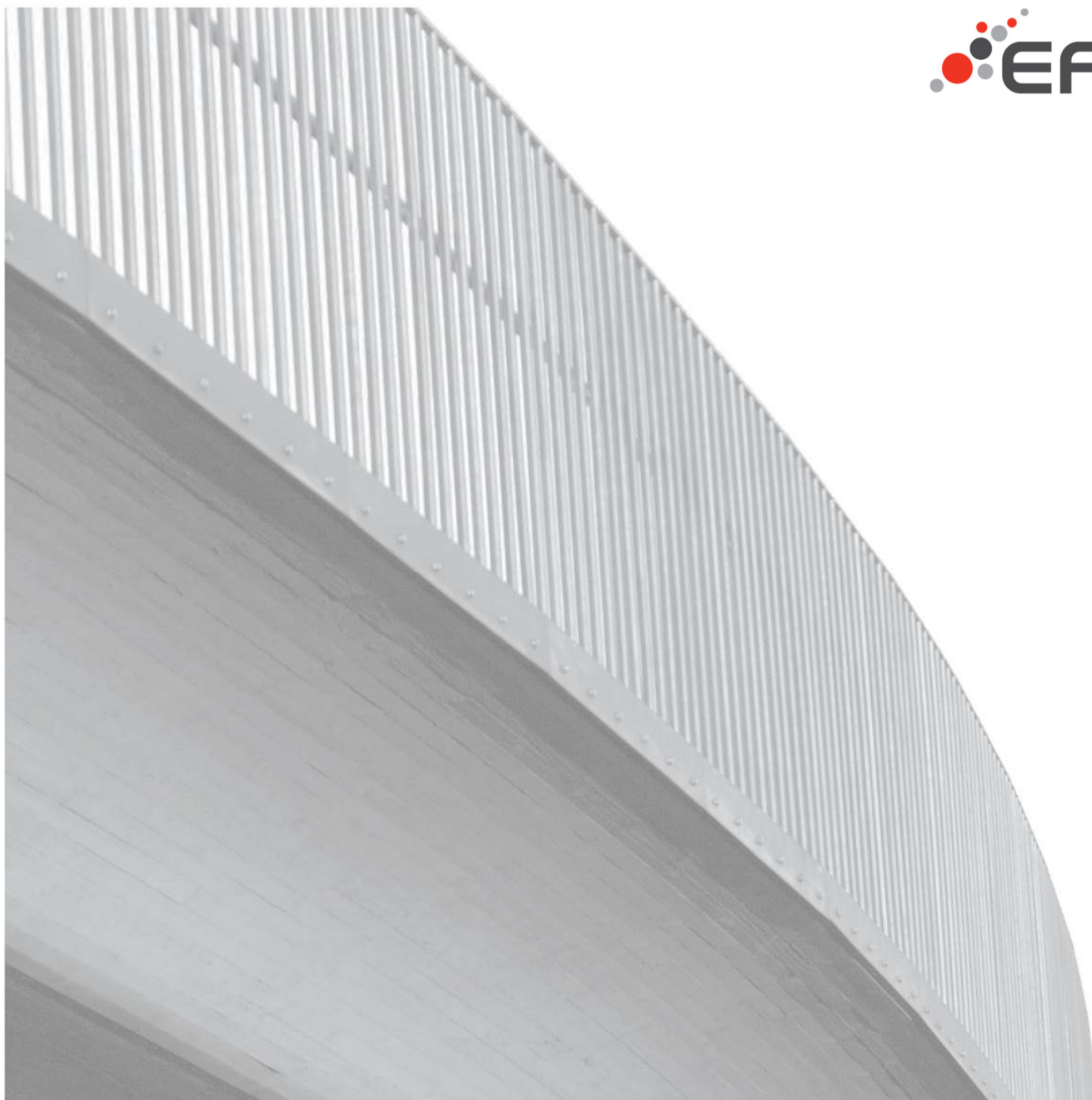
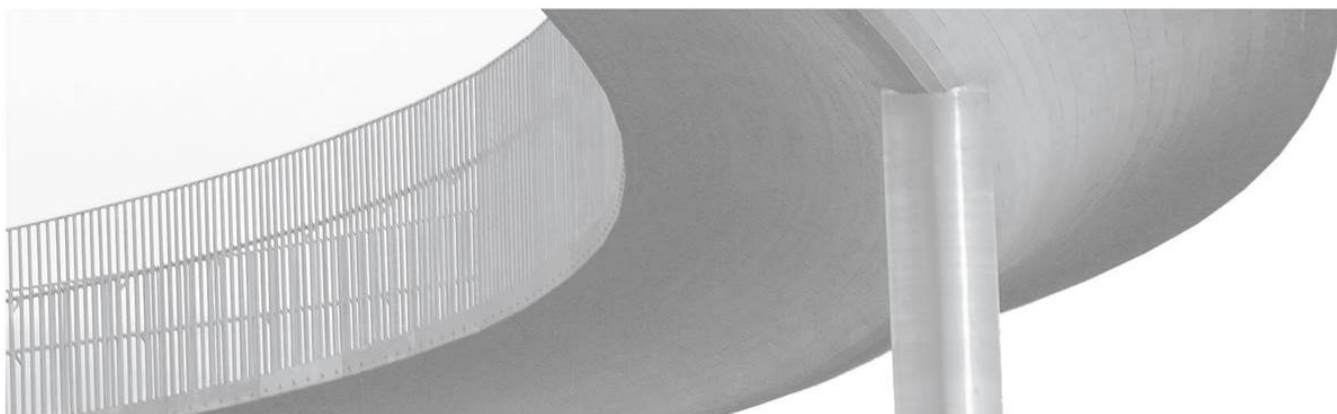




ÁSTAND SPENNIKAPLA Í STEYPTUM BRÚM

Áfangaskýrsla 5 – klórmælingar og áhættuflokkun

14.01.2025



SKÝRSLA – UPPLÝSINGABLAÐ

SKJALALYKILL

2970-160-SKY-005-V02

SKÝRSLUNÚMÉR / SÍÐUFJÖLDI

2970-160-SKY-005 /48

VERKEFNISSTJÓRI / FULLTRÚI VERKKAUPA

Valur Birgisson

VERKEFNISSTJÓRI EFLA

Baldvin Einarsson

LYKILORD

Uppspenntar brýr, Ending á brúm, klórmælingar í steypu

STAÐA SKÝRSLU

- ☐ Drög
- ☐ Drög til yfirlstrar
- ☐ Lokið

DREIFING

- ☐ Opin
- ☒ Dreifing með leyfi verkkaupa
- ☐ Trúnaðarmál

TITILL SKÝRSLU

Ástand spennikapla í steypum brúm – klórmælingar og áhættuflokkun

VERKHEITI

Ástand spennikapla í steypum brúm

VERKKAUPI

Vegagerðin, Rannsóknarsjóður

HÖFUNDUR

Baldvin Einarsson

ÚTDRÁTTUR

Í skýrslunni eru birtar frekari niðurstöður mælinga á klór í yfirbyggingum brúa. Skýrslan er framhald á klórmælingum síðasta árs. Einnig mælingar á steypuhulu á þeim stöðum sem sýni til klórmælinga voru tekin.

Valdar voru eingöngu brýr sem standa í sjávarumhverfi þar af tvær úr fyrri rannsókn. Í fyrri rannsókn reyndist ekki nægilegt að taka sýni ú ystu 30 mm steypunnar þannig að nú voru tekin sýni úr ystu 50 mm.

Niðurstöður sýna að klór er mikið í bitahliðum á brúm sem standa í sjávarumhverfi. Klór er meiri á þeim bitahliðum sem eru í skjóli fyrir úrkomu. Lagt er til að fylgjast með brúm sem eru sérstaklega útsettar fyrir sjávarseltu.

Gerð er tilraun til að flokka íslenskar uppspenntar brýr í áhættuflokka eftir gerð burðarvirkis og viðkvæmum deilum.

ÚTGÁFUSAGA

NR.	HÖFUNDUR	DAGS.	RÝNT	DAGS.	SAMÞYKKT	DAGS.
01	Baldvin Einarsson	13.1.25	Brynja Arnardóttir Guðni Jónsson	14.1.25	Baldvin Einarsson	14.1.25
	Frumútgáfa					
02	Höfundur útgáfu	29.12.16	Nafn rýnis	30.12.16	Nafn samþykktaraðlila	31.12.16
	Lýsing					
03	Höfundur útgáfu	29.12.16	Nafn rýnis	30.12.16	Nafn samþykktaraðlila	31.12.16
	Lýsing					
04	Höfundur útgáfu	29.12.16	Nafn rýnis	30.12.16	Nafn samþykktaraðlila	31.12.16
	Lýsing					

SAMANTEKT

Í þessari skýrslu, sem er hin fimmta í röðinni í rannsóknarverkefni um ástand spennikapla í steypum brúm, er haldið áfram umfjöllun um mælingar á klórflæði í steypu og steypuhulu á nokkrum brúm með áherslu á brýr í sjó. Tveimur brúm var bætt við fyrri mælingar og athyglinni beint að klórmagni í bitahliðum brúanna. En ein af meginniðurstöðum úr fyrri mælingum var að klórmagn í bitahliðum reyndist óþægilega hátt þar sem um uppennukapla er að ræða auk slakbendingar.

Talið er að klórflæði inn í steypu sé helsta hættu sem að þessum brúm steðjar. Tekin voru sýni úr bitahliðum á fjórum brúm. Úr tveimur þeirra, Borgarfirði og Kolgrafarfirði, voru tekin sýni aftur þar sem í fyrri rannsókn var ekki farið nógu djúpt í steypuna við sýnatökuna. Tveimur brúm sem standa í sjó var síðan bætt við, brú á Ölfusárós á Óseyrarnesi og Gullinbrú í Reykjavík.

Niðurstöður mælinga á klóri í brúnum eru þær helstar:

- Mikið klór er í bitahliðum á þremur af þeim brúm sem sýni voru tekin úr; Borgarfjarðarbrúnni, Kolgrafarfirði og Óseyrarnesi. Klórmagn á dýpi bendistáls er það mikið að hættu getur talist á að tæring eigi sér stað.
- Mun minni klór reyndist í þeim bita sem sýni voru tekin úr á Gullinbrú. Magnið er vel innan við þau mörk sem talin eru geta valdið tæringu á bendistáli.
- Meiri klór er í þeim bitahliðum sem snúa frá sjó eða eru í skjóli en hinum sem eru áveðurs.
- Allmikill breytileiki kom fram í endurteknum mælingum á brúnum á Borgarfirði og Kolgrafarfirði sem bendir til að klór sé mjög breytilegur í bitahliðunum eftir staðsetningu.

Gerð er tilraun til að flokka íslenskar brýr í áhættuflokka eftir breskum matslykli í ljósi niðurstaðna mælinga á klór í brúarbitum og brúargólfum. Þörf er á að vinna hættumat betur og gera lista yfir þau atriði sem fylgjast þarf með til að tryggja að skyndilegt brot verði ekki í spennum brúm vegna tæringar á köplum eins og dæmi eru um víða um heim.

Í ljósi þess að notkun salts til hálkuvarna hefur farið hratt vaxandi hér á landi með bættri vetrarþjónustu er ástæða til að skoða betur hvernig verja má steypu fyrir innflæði klórs í steypuna.

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
MYNDASKRÁ	8
TÖFLUSKRÁ	9
1 INNGANGUR	12
2 FYRRI RANNSÓKNIR	14
2.1 Fyrsti hluti rannsóknar	14
2.2 Rannsóknir á aðferðafræði	15
3 SKIPULAG RANNSÓKNAR	17
3.1 Markmið	17
3.2 Val á brúm	17
4 SÝNATAKA	19
4.1 Almennt	19
4.2 Söfnun á borsvarfi	19
4.3 Greining á klór í steypu	21
4.4 Steypuhula	21
5 NIÐURSTÖÐUR MÆLINGA	22
5.1 Yfirlit yfir sýnatöku	22
5.2 Brú á Borgarfjörð	22
5.3 Brú á Kolgrafarfjörð	25
5.4 Óseyrarbrú	27
5.5 Gullinbrú	29
6 UMRÆÐUR	32
6.1 Hætta sem steðjar að spenntum brúm.	32
6.1.1 Inngangur	32
6.1.2 Klór í steypu, tæring á stáli, vitna í rannsókn	32
6.1.3 Frost-þýðuáhrif	34
6.2 Matslykillinn í áfangaskýrslu 2	36
6.3 Flokkun á brúarstofninum eftir matslykli	38
6.3.1 Almennt	38
6.3.2 Brýr með forsteyptum strengjasteypubitum	39
6.3.3 Brýr með forsteyptum en eftirspenntum samverkandi bitum	40
6.3.4 Brýr með heilu þversniði í einu hafi	42
6.3.5 Samfelldar brýr með heilu þversniði án áfangaskiptingar	43
6.3.6 Samfelldar brýr með heilu þversniði en áfangaskiptar	44
6.3.7 Brýr með tjóðraða enda	46
7 HELSTU NIÐURSTÖÐUR OG NÆSTU SKREF	48

MYNDASKRÁ

MYND 2.1	Niðurstöður klórmælinga á brúm í Norðurárdal í Borgarfirði. Mælingar Hönnunar (Cowi) frá 2005 og Eflu frá 2022.	14
MYND 3.1	Brú á Ölfusárós, Óseyrarbrú.	18
MYND 3.2	Brú yfir Grafarvog, Gullinbrú.	18
MYND 4.1	Sýnataka úr brúnum á Kolgrafarfjörð og Borgarfjörð. Ummerki um fyrri sýnatöku sjáanleg.	20
MYND 4.2	Sýnataka úr Óseyrarbrú.	20
MYND 4.3	Sýnataka úr Gullinbrú.	20
MYND 4.4	Steypuhula á járn mælt með járnaskanna. Mynd frá mælingu á brúargólfi á brú á Norðurá.	21
MYND 5.1	Brú á Borgarfjörð.	23
MYND 5.2	Sýni tekin úr norðurenda Borgarfjarðarbrúar. För eftir fyrri sýnatöku á sama stað.	23
MYND 5.3	Steypuhula mæld, ytri hlið til vinstri, innri hlið til hægri. Mæling frá fyrri sýnatöku.	23
MYND 5.4	Klórmælingar í bitum Borgarfjarðarbrúar.	24
MYND 5.5	Brú yfir Kolgrafarfjörð. Sýni tekin á sama stað og á fyrra ári.	25
MYND 5.6	Lykkjur í bitahlið. Mæling frá fyrra ári.	25
MYND 5.7	Kolgrafarfjörður, niðurstöður mælinga á klór í steypu.	26
MYND 5.8	Brú á Ölfusárósi á Óseyrarnesi.	27
MYND 5.9	Hliðarmynd og grunnmynd af Óseyrarbrú.	27
MYND 5.10	Þversnið brúar, á hafi vinstra megin en við ásetur hægra megin.	28
MYND 5.11	Niðurstöður mælinga á klór í steypu.	29
MYND 5.12	Gullinbrú.	29
MYND 5.13	Gullinbrú, þversnið.	30
MYND 5.14	Niðurstöður mælinga á klór í steypu.	30
MYND 6.1	Niðurstöður rannsókna á tæringu í bendistáli og algeng viðmið um líkur á tæringu.	34
MYND 6.2	Steypuskemmdir í útkanti brúar yfir Norðurá hjá Sveinatungu (byggð 1983). Mynd frá 2022.	35
MYND 6.3	Brú á Norðurá hjá Fornahvammi. Skemmdir á brík og stöpli með útfellingum. Bitar óskemmdir.	35
MYND 6.4	Skemmdir í brúargólfum á brúnum í Norðurárdal. Brú við Sveinatungu til vinstri en Sanddalsá til hægri.	36
MYND 6.5	Brú á Hornafjarðarfljót frá 1960-61, mynd frá 2022.	39
MYND 6.6	Brú á Suðurá í Heiðmörk úr forsteyptum bitum.	40
MYND 6.7	Göngubrú á Elliðaár (Dimmu) í Víðidal. Gerð úr forsteyptum þakbitum.	40
MYND 6.8	Nærmyndir af brú á Elliðaár í Víðidal. Það rignir í gegnum neðri flanga bitanna.	40
MYND 6.9	Þversnið í Borgarfjarðarbrú. Til hægri er þversnið í forsteyptan bita.	41
MYND 6.10	Þversnið í brú á Sog hjá Prastarlundi. Til hægri eru þversnið í forsteypta bita í Sogsbrú og Laxárbrú.	42
MYND 6.11	Dæmigert þversnið brúar með heilt þversnið. Sanddalsá í Norðurárdal (1983).	42
MYND 6.12	Kapallega í brú yfir Sanddalsá.	42
MYND 6.13	Staðsetning kapla í þversniði og frágangur akkera í endum.	42
MYND 6.14	Brú á Gilsfjörð, hliðarmynd.	43

MYND 6.15	Brú á Gilsfjörð, þversnið í brúarhafi og yfir millistöpli.	43
MYND 6.16	Brú á Gilsfjörð, mynd frá 2024.	43
MYND 6.17	Lega kapla í brúarhafi til vinstri og yfir millistöpli til hægri.	44
MYND 6.18	Brú yfir Kolgrafarfjörð. Þversnið og kapallega.	44
MYND 6.19	Brú yfir kolgrafarfjörð. Úrtök yfir millistöplum með viðgerðarefni.	45
MYND 6.20	Brú yfir Ölfusárós á Óseyrarnesi. Þversnið.	45
MYND 6.21	Brú yfir Hafnarfjarðarveg á Arnarneshæð í skammdegismyrkrinu 2025.	46
MYND 6.22	Göngubrú á Korpu við Korpúlfsstaðaveg.	47
MYND 6.23	Göngubrú á Korpu við Korpúlfsstaðaveg. Hliðarmynd og þversnið.	47

TÖFLUSKRÁ

TAFLA 2.1	Niðurstöður mælinga á nákvæmni sýnatöku.	16
TAFLA 5.1	Yfirlit yfir sýnatöku.	22
TAFLA 5.2	Niðurstöður klórmælinga í bitahliðum Borgarfjarðarbrúar 2022 og 2023.	24
TAFLA 5.3	Mæling á klór í steypu, Kolgrafarfjörður.	25
TAFLA 5.4	Mæling á klór í steypu, Óseyrarbrú.	28
TAFLA 5.5	Mæling á klór í steypu, Gullinbrú.	30
TAFLA 6-1	Líkur á mismunandi áhættuatburðum	37
TAFLA 6-2	Afleiðingar mismunandi áhættuatburða	37
TAFLA 6-3	Áhættustig miðað við líkur og afleiðingar.	37

1 INNGANGUR

Árið 2012 sótti Efla um styrk úr Rannsóknarsjóði Vegagerðarinnar til að leggja mat á ástand spennikapla í steiptum brúm. Markmið rannsóknarinnar voru metnaðarfull og fékkst styrkur til að vinna hluta hennar.

Í verkefnalýsingu verkefnisins eru eftirfarandi markmið tiltekin við vinnu verkefnisins:

- 1) Taka saman mögulegar aðferðir við mat á ástandi spennikapla í steiptum brúm.
- 2) Safna saman gögnum frá hönnun og framkvæmd varðandi grautun og uppspennu eftirspenntra brúa.
- 3) Greina brýr sem gætu verið orðnar viðkvæmar gagnvart tæringu.
- 4) Gera drög að leiðbeiningum varðandi framkvæmdaefirlit fyrir eftirspenntrar brýr.
- 5) Gera sjónskoðun/prófanir á völdum brúm.

Fyrsta hluta verkefnisins var skilað í skýrslu árið 2015¹. Í henni er gerð tæmandi úttekt á mögulegum aðferðum við mat á ástandi spennikapla í steiptum brúm.

Árið 2016 var sótt um styrk til að halda rannsókninni áfram og var áfangaskýrslu 2 skilað árið 2017².

Í þeirri skýrslu voru valdar 12 brýr úr íslenska vegakerfinu sem allar eru uppspennnar og byggðar á 30 ára tímabili frá 1980-2010. Breskur matslykill til að meta ástand uppspenntra brúa á líftíma þeirra var kynntur og staðfærður á íslenskar aðstæður og honum beitt til að meta brýrnar 12 sem valdar voru. Stærsti lærdómurinn sem draga má af þeirri vinnu er sú að skortur er á gögnum um brýrnar frá framkvæmdatíma þeirra, hvort sem gögnin eru til og hafa ekki fundist eða hvort þau séu hreinlega ekki til.

Sótt var um þriðja styrkinn fyrir verkefnið árið 2018 til þess að endurskoða verklýsingar Vegagerðarinnar fyrir uppspennu og grautun. Áfangaskýrslu 3 var skilað í mars 2021.³ Í þeirri skýrslu er gert tillaga að nýjum verklýsingum og viðamiklir gátlistar unnir sem taka á hönnun og framkvæmd uppspennu og

¹ Ástand spennikapla í steiptum brúm. Rannsóknarskýrsla fyrir Rannsóknarsjóð Vegagerðarinnar. Efla, nóvember 2015.

² Ástand spennikapla í steiptum brúm. Áfangaskýrslu 2 – Ástandsmat á völdum brúm í íslensku vegakerfi. Efla, desember 2017

³ Ástand spennikapla í steiptum brúm. Áfangaskýrslu 3 – Verklýsingar og gátlistar. Efla, mars 2021.

grautunar. Gátlistarnir voru tilbúnir allnokkru fyrr og voru þeir notaðir við eftirlit á nokkrum eftirspenntum brúm þegar á árinu 2020. Í skýrslunni er einnig að finna almennar athugasemdir um verkþættina og mögulegar breytingar á þeim til framtíðar.

Í fjórðu áfangaskýrslu voru niðurstöður úr klórmælingum í völdum brúm birtar.⁴ Þar voru tekin sýni úr brúargólfum og bitahliðum á 5 brúm, þremur í Norðurárdal fjarri sjó og svo tveimur brúm í sjó, Borgarfjarðarbrúnni og brú yfir Kolgrafarfjörð. Þar kom sérstaklega á óvart hversu hátt klórmagnið er í bitahliðunum á þeim tveimur brúm sem standa í sjó.

Í þessari skýrslu er markmiðið að skoða betur klórmagn í brúm sem standa í sjó. Ákveðið var að mæla aftur klór í brúnum yfir Borgarfjörð og Kolgrafarfjörð þar sem í ljós kom að nauðsynlegt er að bora dýpra en gert var í fyrri rannsókn, þar sem klórprófillinn nær lengra inn en áður var talið. Þá var bætt við tveimur brúm sem einnig standa í sjó en við mjög mismunandi aðstæður. Valdar voru brýrnar yfir Ölfusárós á Óseyrarnesi og Gullinbrú í Reykjavík.

Verkefnisstjóri rannsóknar á spennnum brúm er Baldvin Einarsson. Guðni Jónsson, verkfræðingur og sérfræðingur EFLU í steinsteypu, skipulagði og stjórnaði þessari rannsókn. Ólafur Davíð Friðriksson, verkfræðingur, Brynja Arnardóttir, jarðfræðingur, og Franz Sigurjónsson, verkfræðingur, sáu um sýnatöku úr brúnum.

Í skýrslunni er gerð tilraun til að flokka íslenskar brýr eftir áhættuflokkum í breskum matslykli sem kynntur var í Áfangaskýrslu 2 í þessari rannsókn á spennnum brúm. Þar er enn mikil vinna óunnin til þess að ná utan um eftirlitsþörf og aðgerðarþörf fyrir íslenskar brýr.

⁴ Ástand spennikapla í steypnum brúm. Áfangaskýrsla 2 – Klórmælingar. Efla, mars 2003.

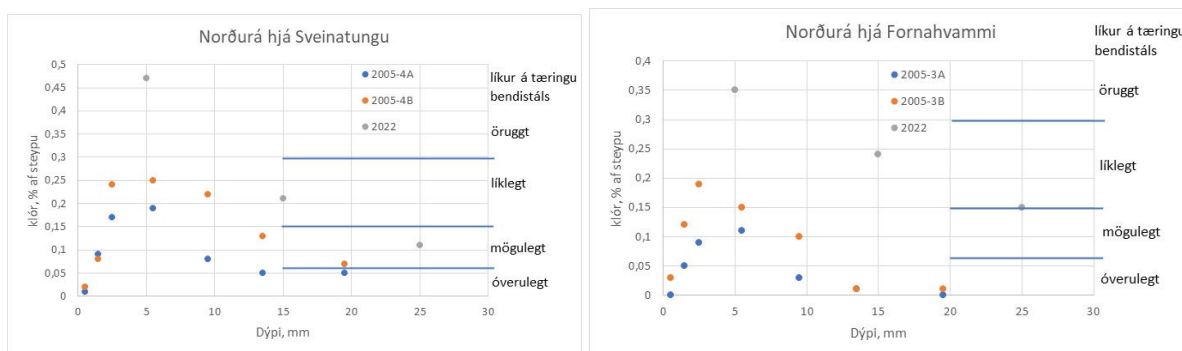
2 FYRRI RANNSÓKNIR

2.1 Fyrsti hluti rannsókna

Í fyrri skýrslu (áfangaskýrslu 4 í þessu verkefni) um klórmælingar í brúm⁵ var markmiðið að skoða valdar brýr í vegakerfinu með tilliti til mögulegrar endingar. Sjónum var beint að þeim brúm þar sem til eru niðurstöður um þéttleika steypunnar í yfirbyggingu brúarinnar. Skoðaðar voru brýr í nálægð við höfuðborgarsvæðið til að minnka ferðakostnað. Ákveðið var að skoða fimm brýr. Tvær brýrnar eru í sjó (Borgarfjörður og Kolgrafarfjörður). Þar var áhersla lögð á að taka sýni úr steypu í bitahliðum sem snúa að sjó og hliðum sem eru í skjóli og salt nær ekki að skolast af. Þrjár brýr eru fjarri sjó á Hringvegi í Norðurárdal í Borgarfirði (40 ára) þar sem salt er notað í hálkuvarnir. Þar var áhersla lögð á að taka sýni úr brúargólfi. Úr brúnni yfir Kolgrafarfjörð voru sýni tekin bæði úr brúargólfi og bitahliðum. Á öllum brúnum var steypuhula á járn mæld með járnaskanna.

Þrjú atriði í niðurstöðum úr fyrri klórmælingum í rannsókninni voru sérstaklega alvarleg:

1. Í brúm fjarri sjó hafði klór í brúargólfum í Norðurárdal hækkað mjög mikið frá því að klór var mældur í sömu brúm árið 2005. Fer það saman við stórauðna notkun á salti til hálkuvarna á síðari árum.



MYND 2.1 Niðurstöður klórmælinga á brúm í Norðurárdal í Borgarfirði. Mælingar Hönnunar (Cowi) frá 2005 og Eflu frá 2022. Á myndunum er merkt inn með bláum línu hversu miklar líkur eru á að bendistál tærist.

⁵ Ástand spennikapla í steiptum brúm. Áfangaskýrslu 4 – Klórmælingar. Efla, mars 2023.

Klórstyrkurinn í steypunni sem líklegt er að valdi tæringu á bendistálinu (0,15%) reyndist á um 25 mm dýpi. Hann hafði færst inn um 10-20 mm á síðastliðnum 17 árum. Í þessum tveimur brúm, sem voru byggðar á árunum 1981-2, reyndist steypuhulan í brúardekkinu vera 45-50 mm samkvæmt mælingu. Með sama hraða er hætta á að tæring á bendistáli í efri grindinni byrji eftir um 20-30 ár. Þá er ekki tekið tillit til hjólfaramyndunar, en sléttleiki brúardekksins var ekki mældur sérstaklega.

2. Fyrir brýr í sjó, brýr yfir Kolgrafarfjörð (2004) og Borgarfjörð (1976-80), reyndist klór í bitahliðum vera óþægilega hátt. Í báðum brúnum var klórmagnið yfir mörkum fyrir líklega tæringu í 25 mm dýpi í steypunni, en dýpstu sýnin voru tekin í dýpinu 20-30 mm. Steypuhula mældist 55 mm í Kolgrafarfirði en 45 mm í Borgarfirði. Hér er því nauðsynlegt að mæla klór á meira dýpi í steypunni til að sjá hver styrkurinn er við bitalykkjurnar.
3. Mikill klór mældist í brúardekkinu á brú yfir Kolgrafarfjörð eftir aðeins 20 ár. Í 25 mm dýpi var klór þegar orðinn það hár að tæring á stáli þar var orðin mjög líkleg. Hér er því líka nauðsynlegt að bora dýpra til að fá mælingu í dýpi bendistálsins. Ennþá alvarlegri niðurstöður fengust þegar sýni voru tekin úr viðgerðarefninu sem notað var til að steypa í úrtökin við loftunarstútana yfir millistöplunum. Þar mældist klór yfir 0,5% af steypu niður á 25 mm dýpi. En þess ber að geta að greiningartækin sem notuð voru við klórmælinguna nema ekki hærri mæligildi en 0,5%. Þarna þarf því líka að taka til hendinni og líklega brjóta upp viðgerðarefnið og setja annað betra í staðinn í úrtökin.

2.2 Rannsóknir á aðferðafræði

Söfnun á borsvarfi í rannsóknum Eflu voru gerðar í samræmi við aðferð sem lýst er í handbók norsku Vegagerðarinnar (Statens vegvesen).⁶

Boraðar voru 5 holur með 18 mm bor. Holurnar eru boraðar í hnapp með innan við 100 mm bili þannig að ekki væru stór fylliefnakorn í yfirborði. Borað var í áföngum í hverri holu, 10 mm í hverjum, og var svarfi safnað úr öllum 5 holunum eftir hvern áfanga. Svarfi úr holunum var blandað í eitt sýni fyrir hverja dýpt. Aðferðin gefur því meðalklórmagn í hverja 10 mm í steypunni. Það var niðurstaða rannsóknar þar sem þessi aðferðafræði var borin saman við að taka borkjarna úr steypunni að þessi einfalda aðferð gæfi nægilega áreiðanlegar mælingar á klórmagni í steypunni. Þessum niðurstöðum er lýst í fyrri skýrslu um klórmælingar (áfangaskýrslu 4).

Við framkvæmdina komu hins vegar upp efasemdir um nákvæmnina í sýnatökunni, þ.e. hversu nákvæmlega sýnin voru tekin í dýptina þar sem dýptin var ákvörðuð með tilfinningu en ekki mælingu fyrir fram. Þess vega var ákveðið að gera mælingar á nákvæmni í sýnatöku með því að mæla dýpið í öllum borholum á fjórum stöðum eftir hverja 10 mm með skífmáli.

⁶ Feltundersøkelser. Handbok R211. Statens vegvesen, 2021.

TAFLA 2.1 Niðurstöður mælinga á nákvæmni sýnatöku.

Nr.	Brú	Bitahlið	Meðaltal [mm]	Staðalfrávik [mm]	Hæsta frávik [mm]
1	Borgarfjörður	Ytri hlið	0,53	0,85	2,51
2		Innri hlið	0,84	1,08	3,68
3	Gullinbrú	Ytri hlið	0,61	0,85	2,62
4		Innri hlið	0,26	0,51	0,79

Fyrir hvern stað voru boraðar 4 holur og dýpið mælt eftir hverja 10 mm þannig á bak við hvern mælistað eru 20 mælingar á dýpi. Séu allar mælingarnar 80 teknar saman sem eitt þýði þá er meðalskekkjan 0,55 mm og staðalfrávik 0,87 mm.

Á grundvelli þessa er ályktað að nákvæmni sýnatökunnar sé nægileg og langt innan við þá óvissu sem búast má við í sýnatöku úr steypu.

3 SKIPULAG RANNSÓKNAR

3.1 Markmið

Markmiðið með þessari rannsókn er að athuga klórmagn í steypu í spenntum brúm í sjávarumhverfi. Rannsóknin er framhald rannsóknar árin 2022-3 þar sem skoðaðar voru brýr bæði langt frá sjó og einnig í sjávarumhverfi. Í fyrri rannsókn voru sýni úr brúnum tekin með því að bora 30 mm inn í steypuna í þremur áföngum og fá meðaltalsmælingu á klór á hverju 10 mm bili. Það kom í ljós að klór náði víðast lengra inn í steypuna þannig að ákveðið var að ná sýnum dýpra, þ.e. allt að því sem næmi steypuhulu á bendistálið.

Í fyrri rannsókn kom á óvart hversu mikill klór mældist í bitahliðum á brúm í sjó. Þá kom einnig á óvart hversu mikill klór við í innhliðum bita, þ.e. þeirri hlið sem sneri frá sjó. Því var ákveðið að einbeita sér að því að ná betri sýnum úr slíkum brúm. Það er einnig kostur að einbeita sér að bitahliðum þar sem auðveldara er að taka sýni þar sem ekki þarf að loka brúnni á meðan á sýnatöku stendur.

3.2 Val á brúm

Í fyrri rannsókn voru tekin sýni úr tveimur brúm í sjó, brúm yfir Kolgrafarfjörð og Borgarfjörð. Ákveðið var að taka betri sýni úr þeim aftur þar sem mikill klór kom í ljós í fyrri mælingum. Þar er því áhugi á að skoða klórdreifinguna dýpra en gert var í fyrri rannsókn.

Þá var tveimur brúm sem standa líka í sjó bætt við. Það voru Gullinbrú í Reykjavík og brú á Ölfusárós, Óseyrarbrú. Þær eru báðar komnar á fertugsaldur. Gullinbrú stendur hins vegar í Grafarvogi sem er inn af Sundunum í Kollafirði og því í vari við úthafsöldunni. Skildir úr Cortenstáli sem settir voru utan á brúna þegar seinni brúin var byggð árið 1999 eru allmikið tærðir, en slíkt stál er ekki heppilegt í saltumhverfi. Óseyrarbrú stendur hins vegar fyrir opnu hafi og útsett fyrir suðvestanáttinni sem þekkt er fyrir að bera með sér mikið salt á land upp.

Ákveðið var að taka eins og áður sýni úr báðum hliðum bita þar sem bitahliðarnar verða fyrir mismunandi áreiti. Ytri hliðarnar verða fyrir miklu saltálagi frá sjógangi og sjávarroki en saltið skolast reglulega af í rigningu, sérstaklega í slagviðri. Innri hliðarnar verða fyrir minna saltálagi þar sem þær

eru í skjóli en þar skolest saltið ekki af, svo saltáraunin er langvarandi. Í fyrri mælingum kom í ljós að klór var almennt meiri í innhliðum en í úthliðum bita.



MYND 3.1 Brú á Ölfusárós, Óseyrarbrú.



MYND 3.2 Brú yfir Grafarvog, Gullinbrú.

4 SÝNATAKA

4.1 Almenn

Sýnataka úr brú á Kolgrafarfirði fór fram 18. júlí 2023, Ölfusárósi 17. júlí 2023, en í Borgarfirði ekki fyrr en 2. nóvember 2023 og úr Gullinbrú 28. nóvember 2023.

Sýni voru tekin úr vesturenda brúar yfir Kolgrafarfjörð, úr báðu úthliðum bita á sama stað og árið áður en bætt við sýnum úr innhlið á nyrðri bita.

Sýni voru tekin úr vesturenda Óseyrarbrúar, úr báðum ytri hliðum bita og innhlið syðri bita.

Sýni voru tekin úr norðurenda Borgarfjarðarbrúar, úr báðum hliðum á vestasta burðarbita. Sýni voru tekin á sömu stöðum og árið áður.

Úr Gullinbrú voru sýni tekin úr norðurenda á öðrum bita að vestan úr báðum hliðum. Það var ekki hægt að komast að ytri hlið á ysta bita að vestan vegna Cortenskjaldanna sem þá voru enn uppi.

Brynja Arnardóttir, jarðfræðingur, Ólafur Davíð Friðriksson, verkfræðingur, og Franz Sigurjónsson, verkfræðingur sáu um sýnatöku úr brúnum.

4.2 Söfnun á borsvarfi

Söfnun á borsvarfi var gerð í samræmi við aðferð sem lýst er í handbók norsku Vegagerðarinnar (Statens vegvesen).⁷ Sýnatöku er annars lýst í fyrri skýrslu.

⁷ Feltundersøkelser. Handbok R211. Statens vegvesen, 2021.



MYND 4.1 Sýnataka úr brúnum yfir Kolgrafarfjörð og Borgarfjörð. Ummerki um fyrri sýnatöku sjáanleg.



MYND 4.2 Sýnataka úr Óseyrarbrú.



MYND 4.3 Sýnataka úr Gullinbrú.

4.3 Greining á klór í steypu

Saltmagn í steypu var mælt hjá Kiwa AS í Osló. Þau nota spennutítrun (potensiometric titration) við ákvörðun á klórmagni í samræmi við Evrópustaðal ÍST EN 14629:2007.⁸ Umreikningur á klórmagni í steypu yfir í klórmagn í sementi miðast við að magn sements í steypu sé 350 kg/m³.

Aðferðin er kvörðuð til að geta mælt klór upp að 0,5% af þyngd steypu. Öll gildi stærri en það eru merkt >0,50 sem gefur >3,4% af þyngd sements. Þó er gefið gildi sem er hærra í síðustu greiningu frá Kiwa, sem er þá fengið með extrapólasjón (bryggjun) á kvörðun mæliaðferðarinnar. Þetta gildi er úr Borgarfjarðarbrú og er gulmerkt í töflu með niðurstöðum. Það gildi fellur hins vegar mjög fallega að öðrum niðurstöðum.

Niðurstöður úr öllum klórmælingunum er að finna í viðauka A.

4.4 Steypuhula

Steypuhula á járn var mæld með járnaskanna. Notaður var járnaskanni Hilti PS 200 Ferroskan. Hann getur numið staðsetningu járna niður á 100 mm dýpi í steypunni.

Skannað var á svipuðum slóðum og borsýni voru tekin og niðurstöður notaðar til að staðsetja sýnatökustað fyrir borsýni.



MYND 4.4 Steypuhula á járn mælt með járnaskanna. Mynd frá mælingu á brúargólfi á brú á Norðurá.

⁸ ÍST EN 14629:2007. Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test methods – Determination of chloride content in hardened concrete.

5 NIÐURSTÖÐUR MÆLINGA

5.1 Yfirlit yfir sýnatöku

TAFLA 5.1 Yfirlit yfir sýnatöku.

BRÚ	YTRI BITI				INNRI BITI	
	ytri bitahlið		innri bitahlið		ytri bitahlið	
	Bora	Járnaskann	Bora	Járnaskann	Bora	Járnaskann
Borgarfjörður	X		X	X		
Kolgrafarfjörður	X		X	X	X	X
Óseyrarbrú	X		X		X	
Gullinbrú					X	X

Ytri biti er bitinn sem er næst sjó eða opnu hafi.

Ytri bitahlið er bitahlið sem snýr út á opið haf.

Innri bitahlið er innri bitahliðin á sama bita og sýni var tekið úr á ytri hlið.

Í Gullinbrú var borað í báðar hliðar á öðrum bita að vestan.

5.2 Brú á Borgarfjörð

Brú yfir Borgarfjörð var byggð árin 1975 til 1980. Yfirbygging brúarinnar er úr forsteyptum bitum, 40 m löngum, með staðsteyptri plötu. Eru fjórir bitar í þversniði brúar, en brúarhöfin eru 13 talsins. Bitarnir voru eftirspenntir. Þeir voru steptir í skemmu á Seleyri og fluttir út á sinn stað með sérþúnu ökutæki og pramma. Steypan í bitana var framleidd í sérstakri steypustöð á staðnum. Steypuefnið kom frá Stafholtsey og úr Hafnarmelum. Þar sem bitarnir eru 52 talsins voru þeir steptir yfir alllangt tímabil, þeir síðustu árið 1979.

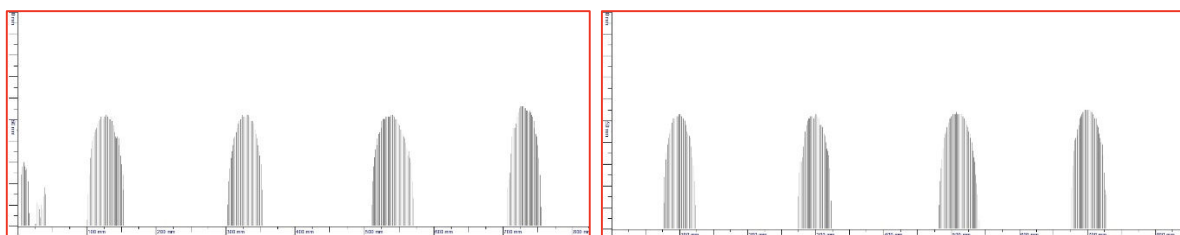
Sýni voru tekin úr brúarenda að norðan einungis úr bitahliðum ysta bita sem snýr á haf út, bæði að utan og innan. Sýnataka fór fram 2. nóvember 2023. Sýni voru tekin úr þykkingu í miðri hæð við bitaenda. Steypuhula var mæld á sama svæði.



MYND 5.1 Brú yfir Borgarfjörð.



MYND 5.2 Sýni tekin úr norðurenda Borgarfjarðarbrúar. För eftir fyrri sýnatöku á sama stað.



MYND 5.3 Steypuhula mæld, ytri hlið til vinstri, innri hlið til hægri. Mæling frá fyrri sýnatöku.

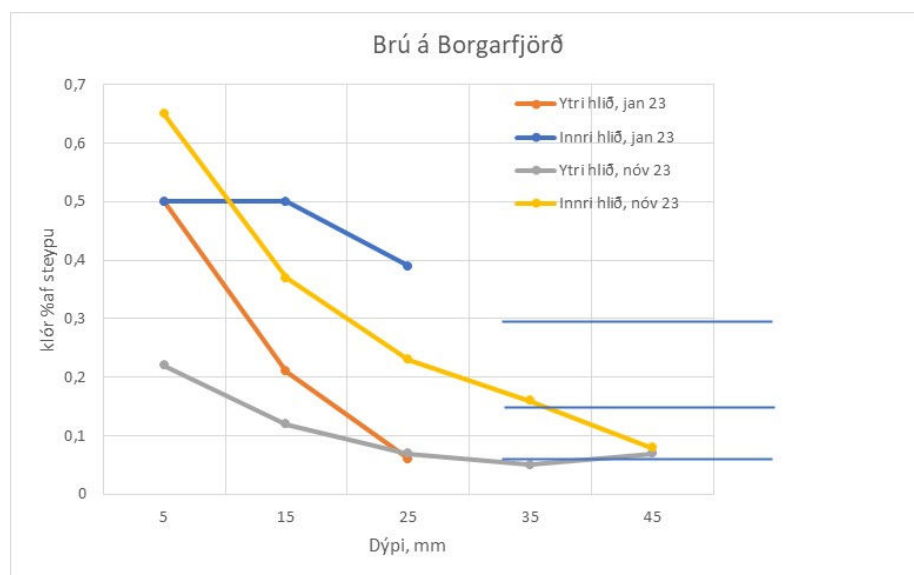
Eins og við er að búast er steypuhula mjög jöfn 45 mm og millibil milli járna jafnt eða 200 mm.

TAFLA 5.2 Niðurstöður klórmælinga í bitahliðum Borgarfjarðarbrúar 2022 og 2023.

Staðsetning	Dýpi, [mm]	2022	2023
		Klór sem % af steypu	Klór sem % af steypu
Ytri bitahlið	0 - 10	0,50	0,22
	10 - 20	0,21	0,12
	20 - 30	0,06	0,07
	30 - 40		0,05
	40 - 50		0,07
Innri bitahlið	0 - 10	> 0,50	0,65
	10 - 20	> 0,50	0,37
	20 - 30	0,39	0,23
	30 - 40		0,16
	40 - 50		0,08

Í mælingunni frá árinu 2022 gaf greiningartæknin ekki möguleika á að mæla klór yfir 0,5%. Meira klórmagn var þá gefið sem > 0,5% í töflunni.

Niðurstöðurnar sýna að klórmagn er mikið í burðarbitum Borgarfjarðarbrúar. Þá vekur einnig athygli að það mælist mun meiri klór á innanverðum bita en á þeirri hlið sem snýr út á haf. Á þeirri hlið gefa mælingar til kynna að líkur séu á tæringu bendistáls sem er með 45 mm steypuhulu eins og mældist í brúarbitunum. Það er óþægilegt hversu mikið ósamræmi er milli mælinganna 2022 og 2023 með hliðsjón af því að sýnin eru tekin nánast á sama stað bæði árin.



MYND 5.4 Klórmælingar í bitum Borgarfjarðarbrúar.

Nauðsynlegt er að gera frekari mælingar á klór í bitunum; í fyrsta lagi til að ná utan um muninn á þeim niðurstöðum sem eru á milli þessara mælinga og einnig til að skoða útbreiðslu vandans. Báðar mælingarnar voru gerðar á ysta bita vestan megin. Nauðsynlegt er að mæla einnig í hinum þremur bitunum í þversniðinu og ekki síður á fleiri höfum brúarinnar.

5.3 Brú á Kolgrafarfjörð

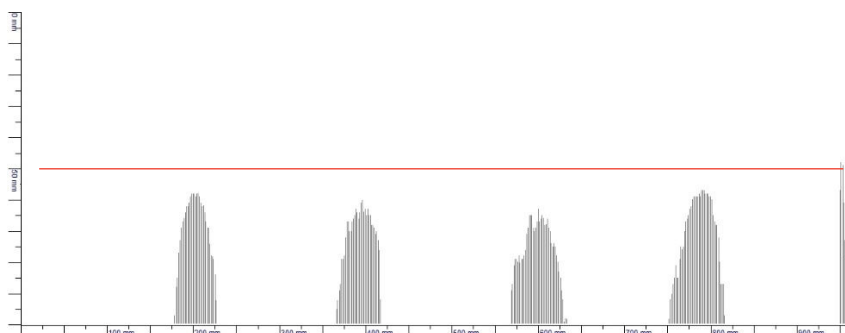
Brú yfir Kolgrafarfjörð var byggð árið 2004 og er 230 m löng í fimm höfum ($43+3\times 48+43=230$ m). Bitahæðin er 1,85 m.

Sýnataka úr brúnni fór fram 18. júlí 2023. Tekin voru sýni úr bitahliðum, bæði að utanverðu á báðum og inn á milli bita úr ytri bitanum.



MYND 5.5 Brú yfir Kolgrafarfjörð. Sýni tekin á sama stað og á fyrra ári.

Þekjulag á járn var skilgreint 50 mm alls staðar, líka í akbraut.



MYND 5.6 Lykkjur í bitahlið. Mæling frá fyrra ári.

Steypuhula á járn í ytri bitahlið reyndist um 55 mm og það eru 200 mm milli járna eins og tilskilið er.

TAFLA 5.3 Mæling á klór í steypu, Kolgrafarfjörður.

Staðsetning	Dýpi, [mm]	2022	2023
		Klór sem % af steypu	Klór sem % af steypu
Ytri biti	0 – 10	> 0,50	0,5
Ytri bitahlið	10 – 20	> 0,50	0,17
	20 - 30	0.21	0,04
			0,04
			0,03
Ytri biti	0 – 10	< 0,01	0,5
Innri bitahlið	10 – 20	> 0,50	0,40

	20 - 30	0.18	0,09
			0,06
			0,06
Innri biti (syðri)	0 – 10	> 0,50	0,5
Ytri bitahlið	10 – 20	> 0,50	0,24
	20 - 30	0,24	0,08

Eins og sést í töflunni og á línuritinu þá er líklega eitthvað bogið við mælingu á einu sýni úr innri bitahlið. Klórmælingin er ekki marktæk fyrir gildi yfir 0,5 þannig að þar er mæligildið sett í það hámark. Þá er ótrúlegur munur á mælingum frá 2022 og 2023. Seinna árið kemur fram verulegur munur á klórmagni á ytri og innri hlið bita eins og í Borgarfjarðarbrúnni. Þótt mikill klór sé í yfirborði þá fellur magnið mjög hratt með dýpi þannig að langt er í að klórmagn nái líklegum mörkum á tæringu bendistáls. En við ætlumst til að brúin standi án mikilla viðhaldsaðgerða í 80 ár til viðbótar.

Niðurstöðurnar sýna að full ástæða er til mæla klór reglulega á komandi áratugum. Með því móti er hægt að áætla hvenær krítísku klórmagni er náð við bendistálið í yfirbyggingunni.



MYND 5.7 Kolgrafarfjörður, niðurstöður mælinga á klór í steypu.

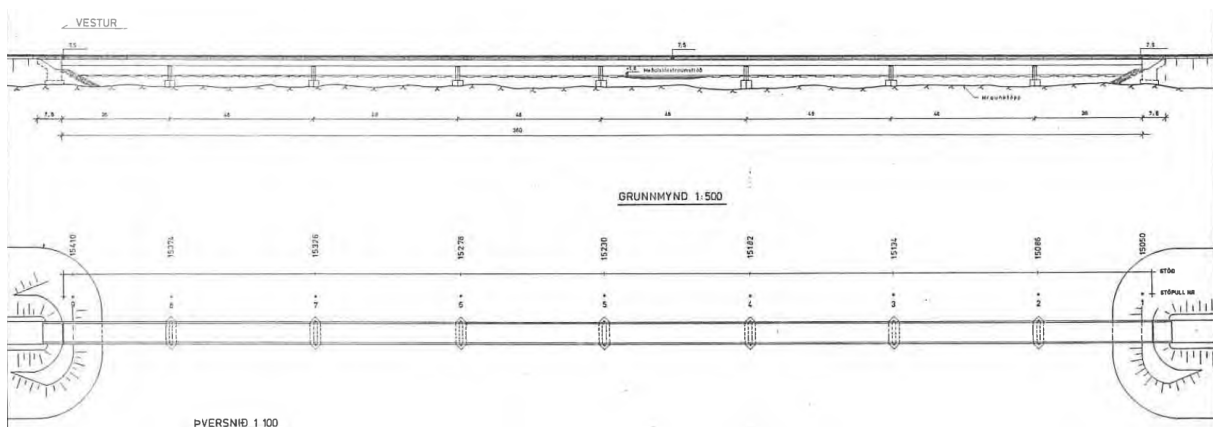
5.4 Óseyrarbrú



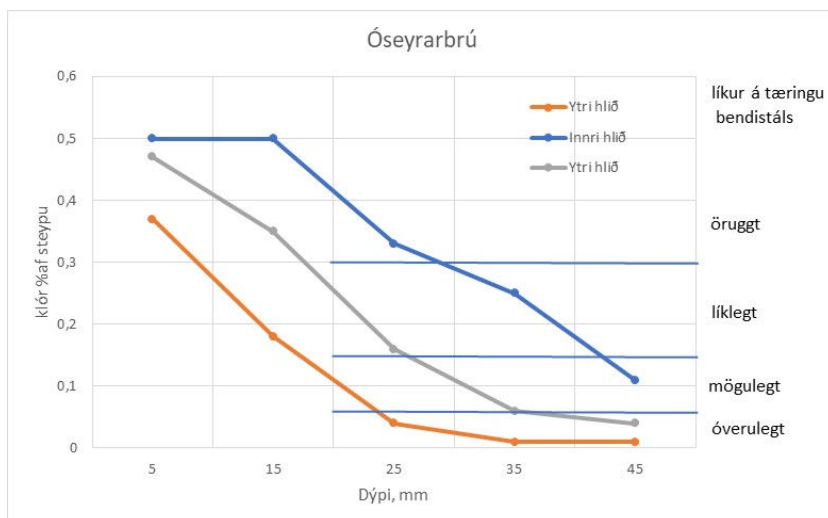
MYND 5.8 Brú á Ölfusárósi á Óseyrarnesi.

Brúin yfir Ölfusárós á Óseyrarnesi var byggð árið 1988. Hún er 360 m löng í 8 höfum, þau lengri 48 m löng. Hún hefur 2 burðarbita sem eru um 2,2 m á hæð.

Brúin virðist í góðu ástandi. Hún varð fyrir skemmdum í jarðskjálftanum austan við Hveragerði árið 2008, en þá brotnuðu hliðarveggir landstöpla og jarðskjálftafestingar á millistöplum brotnuðu.



MYND 5.9 Hliðarmynd og grunnmynd af Óseyrarbrú.



MYND 5.11 Niðurstöður mælinga á klór í steypu.

Niðurstöður mælinganna sýna að klórmagn í steypu er það hátt að mögulega er tæring nú þegar byrjuð á bitalykkjum á innanverðum syðri bita brúarinnar. Niðurstöðurnar eru sambærilegar við mælingar á Borgarfjarðarbrúnni, enda eru þær svipaðar í aldri.

Hér er veruleg ástæða til að kortleggja vandann betur og setja upp áætlun um vöktun á klórflæði í brúarbitunum. Einnig er ástæða til að skoða klór í brúargólfinu því að vegurinn er saltaður á vetrum og saltdreifina leggur yfir brúna, sérstaklega í suðvestanveðrum.

5.5 Gullinbrú

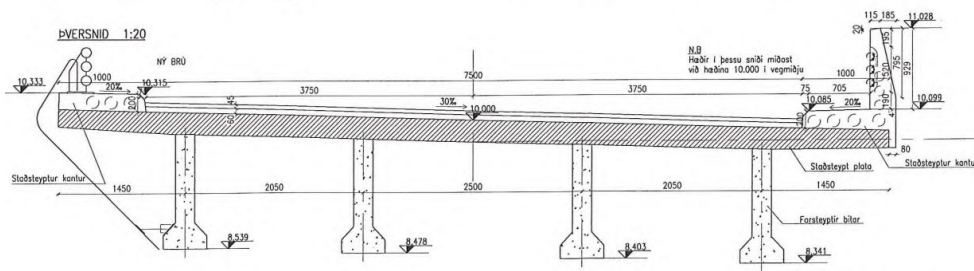
Gullinbrú yfir Grafarvog í Reykjavík eru í reynd tvær brýr sem byggðar voru hvor í sínu lagi. Sú eystri var byggð árið 1984 en sú vestari árið 1999. Það ár voru settir skildir á báðar brýrnar úr Cortenstáli (sem nú er búið að fjarlægja).



MYND 5.12 Gullinbrú.

Sýni voru tekin úr brúnni 28. nóvember 2023 úr vestari brúnni, þeirri sem var byggð 1999. Þau voru tekin úr norðurenda þar sem göngustígurinn fer undir brúna, úr öðrum bita frá vesturkanti. Þegar sýnin

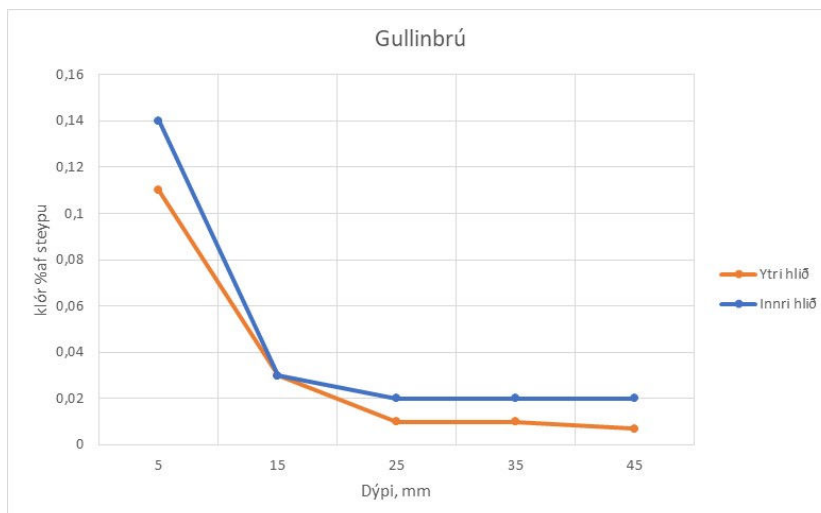
voru tekin voru stálskildirnir enn þá á brúnni og kom það í veg fyrir að hægt væri að komast að úthlið ysta bitans. Æskilegt hefði verið að komast að ysta bitanum sem veit að opnu hafi (Sundunum í Reykjavík) og taka sýni úr honum. Einnig að taka sýni úr eystri brúnni þar sem hún er eldri eða frá 1984.



MYND 5.13 Gullinbrú, þversnið.

TAFLA 5.5 Mæling á klór í steypu, Gullinbrú.

Staðsetning	Dýpi, [mm]	2023
		Klór sem % af steypu
Biti nr. 2 að vestan	0 – 10	0,11
Ytri bitahlið	10 – 20	0,03
	20 – 30	0,01
	30 – 40	0,01
	40 – 50	0,007
Biti nr. 2 að vestan	0 – 10	0,14
Innri bitahlið	10 – 20	0,03
	20 – 30	0,02
	30 – 40	0,02
	40 – 50	0,02



MYND 5.14 Niðurstöður mælinga á klór í steypu.

Samkvæmt teikningum á steypuhula að vera 50 mm í bitahliðum.

Niðurstöður mælinga sýna að engin hættu virðist á tæringu á bendistáli í brúarbitunum að svo stöddu. En eins og áður er sagt er æskilegt að kortleggja klór í brúnni betur. Einnig er rétt að taka sýni eftir 10-20 ár til að fylgjast með framvindunni.

6 UMRÆÐUR

6.1 Hætta sem steðjar að spenntum brúm.

6.1.1 Inngangur

Almennt má segja að eftirspenntar brýr úr steinsteypu hafi reynst endingargóðar og viðhaldslitlar. Hins vegar eru spennikaplarnir mjög viðkvæmir fyrir tæringu ef að grautun kapalröra misferst og raki og mengað vatn kemst inn í kapalrörin. Reynslan hefur sýnt að léleg verkæði, slakt eftirlit og viðhald eru meginástæðan fyrir skemmdum í eftirspenntum brúm. Fyrir flest burðarkerfi steyptra brúa er auðvelt að greina skemmdir á burðarvirkinu og brotformið er yfirleitt seigt og leiðir því sjaldan til alvarlegra slysa. Hins vegar eru skemmdir í burðarkerfi spenntra brúa yfirleitt faldar, erfitt er að greina þær og brotformið er oftast ekki stökkt og gerir því ekki boð á undan sér. Vandamálið við slíkar brýr, sem er í grundvallaratriðum öðruvísi en við aðrar steinsteypdar brýr, er að það er erfitt að fylgjast með ástandi kaplanna þar sem ekki er hægt að reiða sig á ytri merki eða útlit. Þess vegna er mikilvægt að greina útsettar brýr úr brúarstofninum og fylgjast náið með ástandi þeirra með reglubundnum hætti þar sem óvissa um ástand spennikerfisins vex með aldri. Útlitsskoðun ein og sér dugar ekki til að greina skaða og vara við mögulegu broti; en hins vegar eru innri skoðanir á ástandi kapla mjög dýrar og tímafrekar og geta sumar stefnt mannvirkinu í hættu. Þær er því ekki ráðlegt að nota nema í undantekningatilvikum.

Í þessum kafla er fjallað um hvernig gera má áhættugreiningu á spenntum brúm og reyna að vinsa úr þær brýr sem taldar eru í meiri hættu en almennt gerist og fylgjast þarf með til framtíðar. Það er nauðsynlegt að tryggja með öllum ráðum að þessar brýr brotni ekki með stökku ófyrirsjáanlegu broti. Samkvæmt nýjustu hönnunarstöðlum fyrir brýr er ein forsenda að brýr sinni sínu hlutverki í 100 ár með hæfilegu viðhaldi. Elsta eftirspennta brú vegakerfisins er brúin á Blöndu á Blönduósi sem er nú um 60 ára.

6.1.2 Klór í steypu, tæring á stáli, vitna í rannsókn

Þegar stál er í alkalísku umhverfi með pH um og yfir 10,5 þá myndast þunn oxíðhúð á yfirborði stálsins. Húðin er mjög þunn en hefur þau áhrif að stálið færist ofar í spennuröðinni sem hindrar frekari tæringu

á stálinu. Steypa úr Portlandsementi er með pH gildi almennt á bilinu 12,5 til 13,5 því hún er rík af kalsíumhýdroxíði, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, og fleiri söltum með svipaða virkni. Með aldrinum getur hins vegar koldíoxíð (CO_2) gengið inn í pórukerfi steypunnar og hún kolsýrist, súrnar og pH gildið lækkað. Þetta er þó mjög háð þéttleika steypunnar og því umhverfi sem hún er í. Ef pórukerfi steypunnar er meira og minna fullt af vatni er þessi þróun mjög hæg. Í því umhverfi sem brýr eru í hér á landi ætti þetta ekki að vera hættulegt.

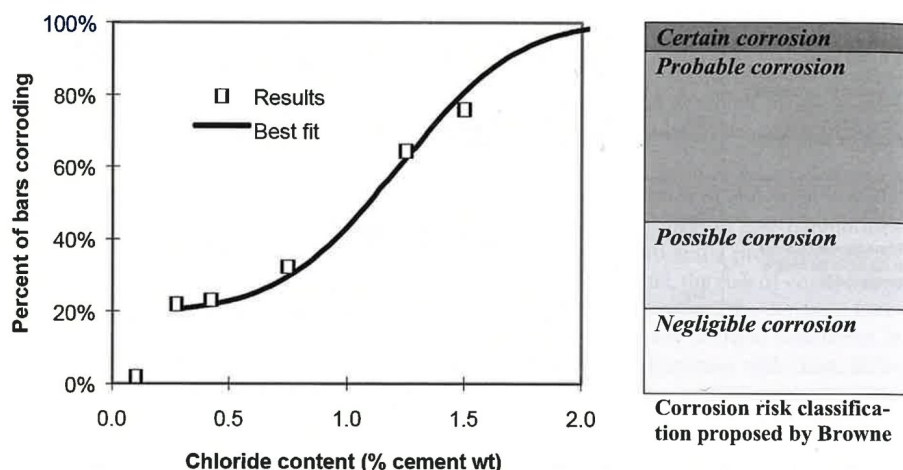
Bendistál í steypu er því vel varið á meðan að verndarlagið getur myndast á stálinu. Það er tvennt sem getur komið í veg fyrir að það gerist:

Lækkun á pH gildinu vegna kolsýrnigar steypunnar vegna innflæðis á koltvísýringi, CO_2 .
Innflæði á klóri úr umhverfinu.

Kolsýring verður við efnahvörf á milli $\text{Ca}(\text{OH})_2$ og CO_2 sem veldur lækkun á pH gildinu niður í u.þ.b. 9. Það veldur niðurbroti á hinni verndandi himnu á stálinu og það getur valdið tæringu á stálinu ef nægilegt súrefni og raki eru fyrir hendi. Kolsýring er nánast óþekkt í íslenskum brúm sem og öðrum mannvirkjum utandyra á landinu.

Í saltríku umhverfi geta klórjónir borist með póruvatni inn í steypuna og valdið tæringu í bendistáli. Hér á landi berst klór í yfirbyggingu brúa annað hvort með vindi á strandsvæðum eða með salti frá hálkuvörnum. Allmargar brýr sem eru við eða í sjó verða fyrir saltágangi bæði frá sjó og frá hálkuvörnum.

Klór berst inn í steypuna annað hvort með efnaflæði (diffusion) í vatnsfylltum loftbólum í steypunni eða með hárpípukröftum með saltvatni. Steypa getur bundið ákveðið magn af klór en alltaf verður nokkur hluti óbundinna klórjóna í steypunni. Oft er miðað við að bendistál geti farið að tærast þegar styrkur klórs fer yfir 0,4% af þunga sements í steypunni. Þessi viðmið voru sett fram fyrir um 40 árum og virðast halda enn þá gildi sínu. Engar rannsóknir hafa verið gerðar hér á landi til að sannreyna þau við íslenskar aðstæður. Viðmiðunarmörkin hafa verið sett inn á gröfin fyrir mæliniðurstöðurnar í yfirstandandi rannsókn.



MYND 6.1 Niðurstöður rannsókna á tæringu í bendistáli og algeng viðmið um líkur á tæringu.⁹

Niðurstöður mælinga á klór í brúargólfum sýna að styrkur klórs fer mjög vaxandi. Það helst í hendur við aukna notkun á salti til hálkuvarna í vegakerfinu í stað sands. Líklegt er að sú þróun haldi áfram á næstu árum þar sem kröfur til vetrarþjónustu á vegakerfinu eru sífellt að aukast. Mikið af eldri spenntu brúnum er með takmarkaða steypuhulu á efri járnagrind. Það er ástæða til að skoða mögulegar aðgerðir við slíkar brýr þegar hætta skapast á að bendistáli fari að tærast. Yngri brýrnar eru með meiri steypuhulu og eru hannaðar fyrir meira álag sem ekki einungis frestar vandamálinu heldur einnig býður upp á einfaldari lausnir.

Niðurstöður mælinga á klór í bitahliðum brúa sem standa í sjó eru ekki uppörvandi. Nauðsynlegt er að skoða og kostleggja vandann miklu betur en hægt hefur verið hingað til. Þá er einnig vert að skoða til hvaða aðgerða er hægt að grípa til að vernda bitahliðar á núverandi brúm fyrir frekari áraun frá salti. Einnig er rétt að skoða hvort ekki séu til aðferðir til að vernda steypu í bitum í nýjum brúm í sjó, t.d. með yfirborðsefnum, þannig að klór gangi ekki eins greiðlega inn í steypuna.

6.1.3 Frost/þýðu-áhrif

Frost/þýðu-áhrif eru orsakir algengustu steypuskemmda í brúm á Íslandi. Áhrif frosts á steypu eru með tvennum hætti. Í fyrsta lagi springur steypan þegar ákveðið hlutfall af loftbólum í steypunni fyllist af vatni. Vatnið þenst út í frostinu og loftkerfið er orðið óvirkt til að taka við þenslunni því það er fullt af vatni. Þetta eru svokallaðar innri skemmdir. Við þetta minnkar styrkur steypunnar og burðarþolið skerðist. Í öðru lagi verður flögnun á steypunni þegar klórmengað vatn kemst inn í steypuna og frýs. Þá flagnar yfirborðið en steypan undir getur haldið styrk sínum lítið breyttum. Sænska frost/þýðu-prófið, SS 137244 (ÍST CEN/TS 12390-9 með salti), er einmitt gert á sýnum með 3% saltvatni á yfirborði. Þetta er prófun á flögnun steypunnar á yfirborði.

Hér á landi hefur loftblendi verið notað í steyptar brýr í um 60 ár. Upp úr 1980 var farið að gera auknar kröfur til stærða loftbóla og dreifingu þeirra í steypunni og þá var tekið að gera frost/þýðu-próf eftir

⁹ Myndin er tekin úr: Structural Concrete. Textbook on behaviour, design and performance. Volume 5. Fib bulletin 62, 2012. Þar er að finna vísun í grunnheimildir.

sænska staðlinum. Að öllu jöfnu stóðst öll steypa sem notuð var í brýr síðan kröfur staðalsins. Mjög gjarnar reyndist flögnun í prófinu innan við helmingur þess sem krafist var.



MYND 6.2 Steypuskemmdir í útkanti brúar yfir Norðurá hjá Sveinatungu (byggð 1983). Mynd frá 2022.

Án þess að sérstök úttekt hafi verið gerð á því þá virðast frost/þýðu skemmdir vera að mestu af fyrri tegundinni í brúm hér á landi. Brúarkantar, bríkur, eru verulega útsettir fyrir regni og slagviðri og steypan mettast af vatni sem sprengir steypuna þegar það frýs. Lítil eða mjög takmörkuð flögnun verður á yfirborði. Vatn getur síðan gengið inn í sprungna steypuna og útfellingar koma fram á yfirborði. Það vekur oft furðu hversu bendistál getur verið í góðu ástandi í slíkri steypu. Skýringar er e.v.t. að leita í því að steypan er vatnsmettuð lengst af þannig að súrefni kemst ekki að stálinu, en aðkoma súrefnis er skilyrði fyrir tæringu stáls.

Það er athyglisvert að bitahliðar og neðri brún plötu eru enn þá í fullkomnu ástandi þrátt fyrir að mældur meðaltalsraki árin 1982-3 í Norðurárdal var yfir 90% á mælitímabilinu. Það má reikna með að jafnvægisraki steypunnar í því umhverfi sé einnig á því róli, en það rakastig er á mörkum þess að geta valdið frostskeppum í steypu.



MYND 6.3 Brú á Norðurá hjá Fornahvammi. Skemmdir á brík og stöpli með kalkútfellingum. Bitar óskemmdir.

Einnig virðast litlar skemmdir almennt á brúargólfinu sem þó verður fyrir miklu vatns- og saltálagi. Þó koma fram skemmdir í gólfunum á brúnum í Norðurárdal sem líklega má rekja til staðbundinna mistaka við steypuvinnu. Einnig getur verið að frostskeppur hafi áhrif á slit gólfanna.



MYND 6.4 Skemmdir í brúargólfum á brúnum í Norðurárdal. Brú við Sveinatungu til vinstri en Sanddalsá til hægri.

Niðurstaðan af þessum dæmum sem hér hafa verið nefnd er að aðalburðarkerfi þessara brúa stafar almennt ekki hættu af frost/þýðu-áhrifum á steypuna. Hins vegar koma yfirleitt fyrst fram skemmdir á bríkum og virðist full ástæða til að huga að betri aðferðum til að koma í veg fyrir rakamettun steypunnar í þeim byggingarhlutum sem mest eru útsettir fyrir slagviðri. Á níunda áratug síðustu aldar var farið að nota monosílan á ytri fleti brúa, bæði á stöpla og yfirbyggingar. Ekki hefur verið gerð úttekt á hversu margar brýr fengu þá meðferð og hverju það hefur skilað. Rannsóknir Rannsóknarstofnunar byggingariðnaðarins sýndu að monosílanböðun hafði góð áhrif á rakastig steypu í húsbyggingum en mun minni áhrif á sterkari og þéttari steypu, eins og notuð hefur verið við brúargerð. Í ljósi mikils kostnaðar við endursteypu brúarkanta á síðustu árum svo sem á Blöndubró og Höfðabakkabró virðist full ástæða til að huga betur að vatnsvörn á bríkum brúa svo að minnsta kost sé hægt að seinka svo dýrum aðgerðum.

6.2 Matslykillinn í áfangaskýrslu 2

Í Áfangaskýrslu 2 í þessu verkefni¹⁰ var kynntur matslykill bresku vegagerðarinnar fyrir áhættu greiningu, áhættumat og áhættustýringu fyrir eftirspenntar brýr.¹¹ Ný útgáfa af matslykli fyrir áhættumat kom svo út árið 2020 mikið til í svipuðu formi en sama innihaldi.¹²

Í áhættugreiningu felst söfnun og rýni viðeigandi gagna fyrir viðkomandi brú. Á Íslandi er að finna u.þ.b. 150-170 eftirspenntar brýr í samgöngukerfinu og líklegt er að þeim komi til með að fjölga í framtíðinni. Tilgangurinn með áhættugreiningu við eftirlit á eftirspenntum íslenskum brúm er að safna fyrrgreindum upplýsingum um þær og bera kennsl á hvaða brýr þurfa frekar á áhættumati að halda en aðrar, þar sem ekki er talið fýsilegt að framkvæma áhættumat á öllum eftirspenntum brúm landsins.

Megintilgangur með áhættumati er að ganga úr skugga um að eigendur og rekstraraðilar brúarmannvirkis hafi skilning og þekkingu á þeim áhættuþáttum sem eru til staðar fyrir mannvirkið og

¹⁰ Ástand spennikapla í steiptum brúm, Áfangaskýrsla 2 – Ástandsmat á völdum brúm í íslensku vegakerfi. Efla 2017.

¹¹ Manual of post-tensioned concrete bridges. BD54/15. Volume 3, Section 2, Part 5. The Highway Agency, 2015.

¹² CS 465 Management of post-tensioned concrete bridges. Design Manual for Road and Bridges. 2020.

auðvelda þeim val á viðeigandi leiðum til áhættustýringar á líftíma þess. Við áhættumat fæst einnig einkunnargildi fyrir áhættu fyrir mannvirknið sem nota má til að forgangsraða úttektum og viðgerðum.

Áhættumat skal byggja á áhættugreiningu og upplýsingum sem þar er aflað. Áhættumatið er hugsað sem lifandi skjal sem uppfærast með tilkomu nýrra upplýsinga á líftíma mannvirkisins. Áhættumatið skal bera kennsl á mögulegar hættur sem kunna að hafa áhrif á mannvirknið, líkur á að atburðir í tengslum við hættunna eigi sér stað og afleiðingar þeirra.

TAFLA 6-1 Líkur á mismunandi áhættuatburðum

LÍKUR	LÝSING
Næsta öruggt	Fullvissa – Ástæða er til að ætla að atburðurinn hafi þegar átt sér stað, sé að eiga sér stað eða sé í þann mund að eiga sér stað
Miklar	Mjög líklegt – reynsla manna sýnir að atburður eigi sér vanalega stað ef ekki er tekið á hættunni
Töluverðar	Mögulegt og líklegt – fræðilegur möguleiki til staðar og reynsla manna sýnir að atburður geti átt sér stað ef ekki er tekið á hættunni
Litlar	Mögulegt en ólíklegt – fræðilegur möguleiki til staðar en reynsla manna sýnir að slíkir atburðir séu sjaldgæfir

TAFLA 6-2 Afleiðingar mismunandi áhættuatburða

AFLEIÐINGAR	LÝSING
Miklar	Algert hrún mannvirkis/Mikill fjöldi dauðsfalla/lokun á mikilvægri samgönguæð
Í meðallagi	Brigð eða bilun í hluta mannvirkis/Lítill fjöldi dauðsfalla/mikil meiðsli á fólki/lokun á fjölfarinni samgönguæð/takmörkun á mikilvægri samgönguæð
Litlar	Takmörkun á notagildi mannvirkis/Lítill meiðsli á fólki/dauðsföll ólíkleg/takmörkun á fjölfarinni samgönguæð/lokun eða takmörkun á smárrí samgönguæð

TAFLA 6-3 Áhættustig miðað við líkur og afleiðingar.

		AFLEIÐINGAR		
		Miklar	Í meðallagi	Litlar
LÍKUR	Næsta öruggt	Mjög hátt	Hátt	Meðal
	Miklar	Hátt	Meðal	Lágt
	Töluverðar	Meðal	Lágt	Mjög lágt
	Litlar	Lágt	Mjög lágt	Óverulegt

Í breska matslyklinum er síðan aðferð til að forgangsraða aðgerðum sem byggist á aldri, gerð, viðkvæmum byggingarhlutum, ástandi og mögulegum afleiðingum af hrúni mannvirkisins sem metið er. Hættunna, sem greindar eru og útlistaðar í matinu, eru notaðar til að reikna út einkunn fyrir mannvirknið.

Einkunn fyrir mannvirki er gefin sem prósentu skv. eftirfarandi formúlu:

$$R = 100 \left[\left((4F_A + F_F + F_V + F_C) F_Q \right) - 6 \right] / 254$$

þar sem:

F_A – Aldursstuðull, einungis háður aldri brúar

F_F – Brúarformsstuðull, háður formi burðarvirkis

F_V – Viðkvæmnistuðull, háður útfærslu og deili

F_C – Ástandsstuðull, háður ástandi svo sem sprungum, klóri og fl.

F_Q – Afleiðingastuðull, háður umferðarþunga, hjáleiðum og beinum afleiðingum brots

Til viðbótar við þetta á að taka tillit til sögu brúarinnar, viðhaldi, úttektum og umhverfi. Matslykillinn gefur síðan lista yfir helstu atriði sem hafa áhrif á val á þessum stuðlum í formúlunni. Við skoðun á þessum listum má sjá að þar eru fá atriði sem hafa vond áhrif á einkunnagjöfina fyrir brýr hér á landi.

Eins og sést á formúlunni hefur aldur veruleg áhrif á áhættu. Það tengist beint framþróun í gerð spenntra mannvirkja á síðastliðnum áratugum hvað varðar þekkingu, hönnunarstaðla og aðferðir og spennikerfi hafa batnað með tímanum.

Brúarform hefur veruleg áhrif á hættu á stökku broti. Þannig eru brýr gerðar úr forsteyptum einingum sérstaklega útsettar, einnig brýr með steypuskilum þvert á kapalstefnu. Einnig eru nefndar brýr með neikvæðum ásetukröftum sem eru tjóðraðar niður í endum. Brýr sem steypar eru í heilu lagi (monolithic), eins og flestar spennar brýr á Íslandi eru, eru hins vegar í lítilli áhættu gagnvart stökku broti. Hér á landi eigum við ekki margar brýr úr forsteyptum einingum en allar lengri brýrnar eru með áfagaskil. Þá eru nokkrar brýr sem eru tjóðraðar í endana.

Viðkvæmni brúa er háð útfærslu burðarkerfis og einstökum deilum sem notuð eru. Hér kennir margra grasa en þau helstu sem koma fyrir í brúm hér á landi eru steypuskil, ófrágengin akkeri, lélegur frágangur á afvötnun, lítil skúfbending, steypuhula á bendistál ófullnægjandi og óhöpp við uppspennu og grautun. Almenn má segja að alúð hafi verið lögð í hönnun á deilum í spennnum brúm hér á landi. Hér eru þó brýr með þversteypuskilum og enga einangrun á brúargólfi, steypuhula hefur verið aukið hin síðari ár í samræmi við Evrópuþaðla en er almennt 30 mm í eldri brúm. Þá hafa óhöpp við uppspennu yfirleitt verið skrásett og borin undir hönnuði.

Ástand mannvirkisins hefur áhrif á hættumat. Þar ber helst að nefna sprungumyndun, lélegt viðhald á afvötnunarkerfi, formbreytingar, steypuskemmdir, tæring á bendistáli, leki á samskeytum, skemmdar legur og loks skemmdir á uppspennikerfinu, en þær geta náð til kapalröra, grauts, spennivíra og akkera. Fáar spennar brýr landinu hafa þurft á viðhaldi að halda hingað til. Á tveimur, brúm á Blöndu og Elliðaám (Höfðabakkabrá), hafa kantar verið endursteyptir og þensluraufar endurnýjaðar, en engar aðgerðir náðu til hins spennna burðarkerfis.

Loks er notaður stuðull sem tekur á afleiðingum af stökku broti í burðarkerfinu. Hann er fyrst og fremst háður umferðarmagni um eða undir brúna, viðkvæmum lögnum í brúnni og staðsetningu hennar í viðkvæmu umhverfi. Einnig skal taka tillit til hvort hjáleid er fyrir hendi eða óhóflega löng og slíti sundur nauðsynlega þjónustu. Flestar brýr á íslenska vegakerfinu ættu að skora nokkuð hátt hvað þennan síðasta þátt varðar þar sem vegakerfið er að mestu einfalt og lítið um ásættanlegar hjáleidir.

6.3 Flokkun á brúarstofninum eftir matslykli

6.3.1 Almenn

Það er hægt er að flokka spennar brýr á Íslandi í tiltölulega fáa flokka eftir burðarkerfi og útfærslu á deilum:

Brýr með forsteyptum strengjasteypubitum
 Brýr með forsteyptum en eftirspennntum bitum
 Brýr með heilu þversniði (monolithic) í einu hafi
 Samfelldar brýr með heilu þversniði
 Samfelldar brýr með heilu þversniði en áfangaskiptar
 Brýr með tjóðraða enda

Í þessum kafla er gerð tilraun til að fara yfir helstu gerðir þessara brúa og benda á þær hættur sem að þeim steðja.

6.3.2 Brýr með forsteyptum strengjasteypubitum

Af brúm með forspennta bita er einungis brúin á Hornafjarðarfljót eftir uppistandandi á Þjóðvegakerfinu. Hinar forspenntu brýrnar sem byggðar voru snemma á sjöunda áratugnum svo sem Þverá og Skógá hafa verðið rifnar og tvíbreiðar brýr byggðar í staðinn. Líklegt er að brúin á Hornafjarðarfljót fái að standa enn um sinn, enda verið að brúa Fljótin á öðrum stað. Ein önnur brú gerð úr forspennntum bitum frá sama tíma er yfir Suðurá á vegi Veitna að Gvendarbrunnum í Heiðmörk. Svo er ein göngubrú á Elliðaám við Breiðholtsbraut úr forspennntum þakbitum, hún var upprunalega byggð sem lagnabrú. Sú brú verður rifin fljótlega þegar ný göngubrú brú verður tekin í notkun.



MYND 6.5 Brú á Hornafjarðarfljót frá 1960-61, mynd frá 2022.



MYND 6.6 Brú á Suðurá í Heiðmörk úr forsteyptum bitum.



MYND 6.7 Göngubrú á Elliðaár (Dimmu) í Víðidal. Gerð úr forsteyptum þakbitum.



MYND 6.8 Nærmyndir af brú á Elliðaár í Víðidal. Það rignir í gegnum neðri flanga bitanna.

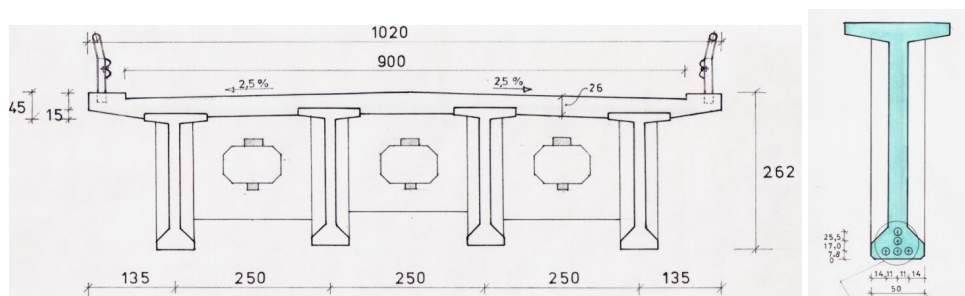
Þessar brýr lenda í hæsta áhættuflokki í breska matslyklinum. Vegbrýrnar eru báðar tiltölulega fáfarnar til framtíðar og göngubrúin er orðin hættuleg, en verður rifin fljótlega.

6.3.3 Brýr með forsteyptum en eftirspenntum samverkandi bitum

Í þennan flokk falla einnig fáar brýr; Brú á Borgarfjörð, Laxá í Leirársveit á Hringvegi, Sog við Þrastarlund og Gullinbrú í Reykjavík (tvær brýr).

Brú á Borgarfjörð er með 4 forsteypta og uppspennta bita í þversniði. Samvirkni við staðsteypta brúarplötu er tryggð með knöstum og lykkjum. Bitarnir eru 40 m langir og eru einfalt studdir með þenslurauf yfir hverjum stöpli. Hæð forsteyptu bitanna er 2,25 m og er efri flanginn 1,0 m breiður en sá neðri 0,5 m. 5 kaplar eru í hverjum bita og voru 3 þeirra spenntir fyrir uppsetningu.

Búið er að brjóta upp efsta lag steypunnar í brúargólfinu með vatnsbroti og steypa nýtt slitlag úr þéttri, yfirsterkri steypu (100 MPa) með slitsterku steinefni og með engu loftkerfi. Þensluraufar voru endurnýjaðar.



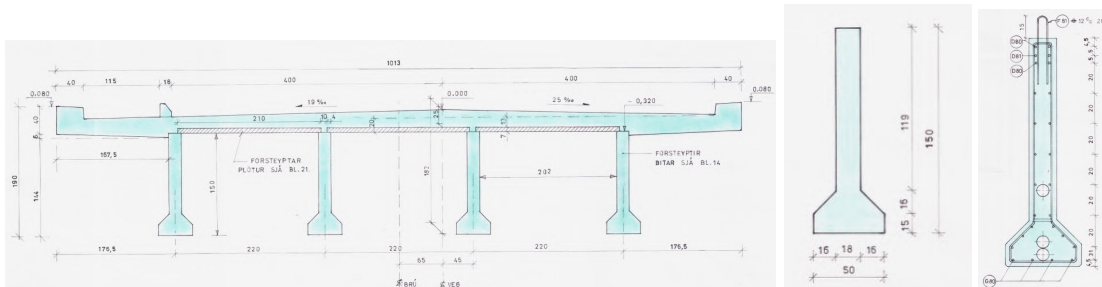
MYND 6.9 Þversnið í Borgarfjarðarbrú. Til hægri er þversnið í forsteyptan bita.

Bitakroppurinn er einungis 180 mm þykkur með 8 mm lóðréttum lykkjum. Hann þykkist til endanna upp í 500 mm við ásetuna. Steypuhula mældist 45 mm í þykkingunni þar sem sýni til klórmælinga voru tekin.

Þau atriði sem þarf að taka tillit til við áhættumat:

- Burðarkerfið er með forsteyptum samverkandi bitum. Staðsteypt brúargólf.
- Vatnsvarnarlag brúargólfs er steyppt með þéttri steypu
- Steypuhula er e.t.v. of lítil í bitahliðum og neðri brún bita
- Klórmælingar sýna að klór í nægilegu magni til að framkalla tæringu í lykkjum er á 35 mm dýpi
- Skúfbending er lítil (8 mm lykkjur)
- Í sumum bitum eru láréttar sprungur við akkeri
- Vegurinn er saltaður á hverjum hálkudegi
- Brúin stendur í sjó fyrir opnu hafi
- Umferð um brúna (2024) er 5800 ökutæki á sólarhring (ÁDU)
- Brúin er á stofnvegi (Hringvegi). Hjáleið er löng (30 km), sérstaklega fyrir stóra bíla (70 km)

Brýrnar á Laxá og Sog eru að vissu marki með sambærilegt þversnið þótt sjálft burðarkerfið sé ólíkt. Brúin á Laxá er einfalt studd brú í einu 23 m hafi með 4 bita í þversniði. Bitarnir voru steypptir í sama móti og bitarnir í Borgarfjarðarbrúnni en eru einungis 1,50 m háir og það vantar á þá efri flanga. Brúin á Sog er samfelld brú yfir þrjú höf þar sem forsteyptir 28 m langir bitar eru notaðir í miðhafið sem er lengst. Annað burðarvirki í brúnni er staðsteypt. Í brúnni á Sog eru þrír kaplar í hverjum bita þar sem tveir þeirra eru samfelldir yfir milliáseturnar til enda burðarvirkis. Samvirkni við staðsteypt brúargólf er fengin með lykkjum. Milli forsteyptu bitanna eru forsteyptar plötur sem einnig eru samverkendi með gólfinu.

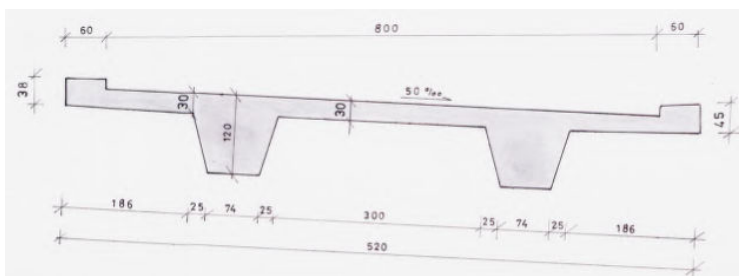


MYND 6.10 Þversnið í brú á Sog hjá Þræstarlundi. Til hægri eru þversnið í forsteypta bita í Sogsbrú og Laxárbrú.

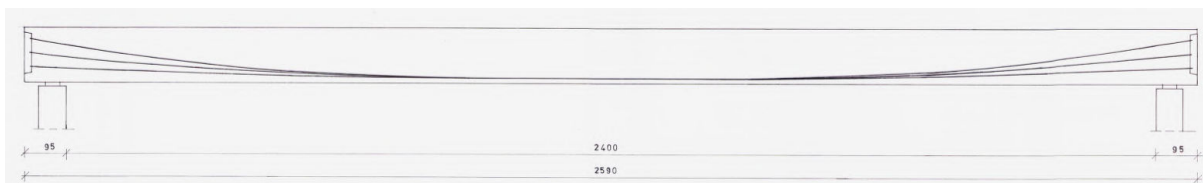
Í bitakroppnum er 80 mm kapalrör utan um kaplana þannig að einungis 50 mm eru frá bitahlið inn að rörum. Þar á milli eru bitalykkjurnar sem eru 8 mm bendistál.

6.3.4 Brýr með heilu þversniði í einu hafi

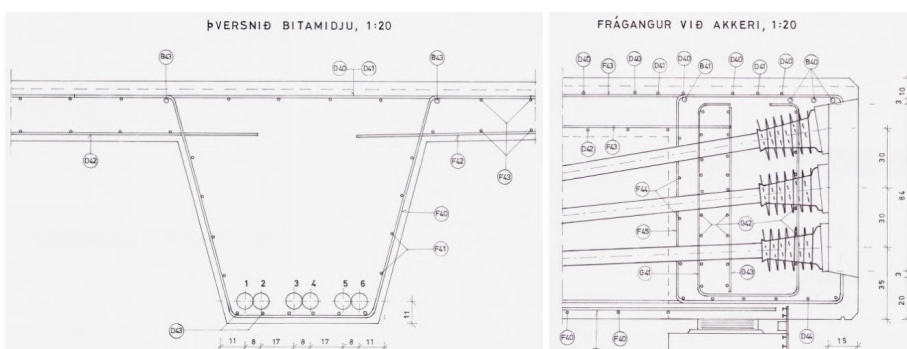
Þessi tegund brúa er sú algengasta af spennnum brúm í vegakerfinu eða um 40%.



MYND 6.11 Dæmigert þversnið brúar með heilt þversnið. Sanddalsá í Norðurárdal (1983).



MYND 6.12 Kapallega í brú yfir Sanddalsá.



MYND 6.13 Staðsetning kapla í þversniði og frágangur akkera í endum.

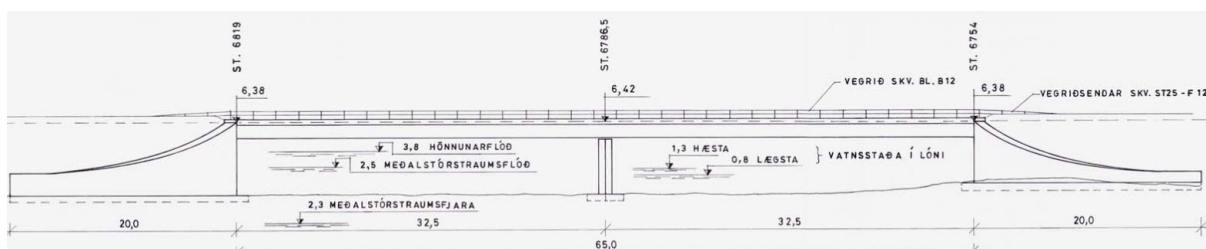
Spennikaplar eru næst yfirborði steypu í neðri brún bita á miðju hafi og er dæmigerð fjarlægð miðju kapals 100 – 120 mm frá steypuyfirborði. Miðað við að þvermál röra sé 80 mm þá er lágmarksfjarlægðin

að röri 60 – 80 mm. Fjarlægð kapla frá efri brún brúargólfs er alltaf mikil. Þá hefur almennt tíðkast vandaður frágangur á kapalfestingum til endanna þannig að lítil hætta stafar af tæringu þar.

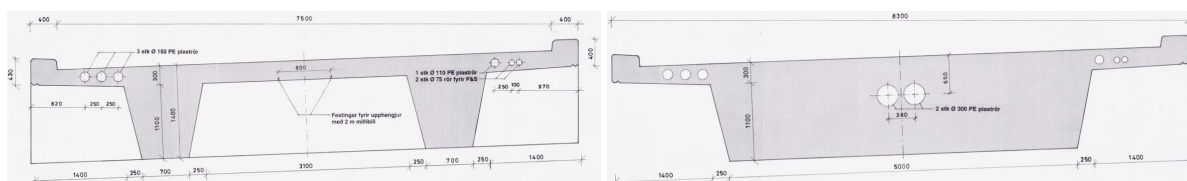
Niðurstaðan er að spennikerfið á þessum brúm er ekki í hættu frá klórflæði frá umhverfinu. Hins vegar eru margar af þessum brúm, sérstaklega þær eldri, með takmarkaða steypuhulu á efri járnagrindina þannig að henni stafar hætta af tæringu vegna klórs frá hálkuvörnum. Það vandamál eiga þær hins vegar sameiginlegt með öllum eldri brúm á vegakerfinu og við því þarf einhvern veginn að bregðast.

6.3.5 Samfelldar brýr með heilu þversniði án áfangaskiptingar

Þessi tegund brúa er næstalgengust spenntra brúa. Sem dæmi má taka brú yfir Gilsfjörð frá 1996.



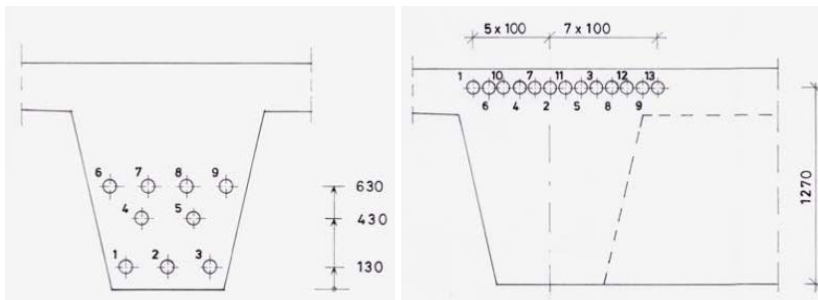
MYND 6.14 Brú á Gilsfjörð, hliðarmynd.



MYND 6.15 Brú á Gilsfjörð, þversnið í brúarhafi og yfir millistöpli.



MYND 6.16 Brú á Gilsfjörð, mynd frá 2024.

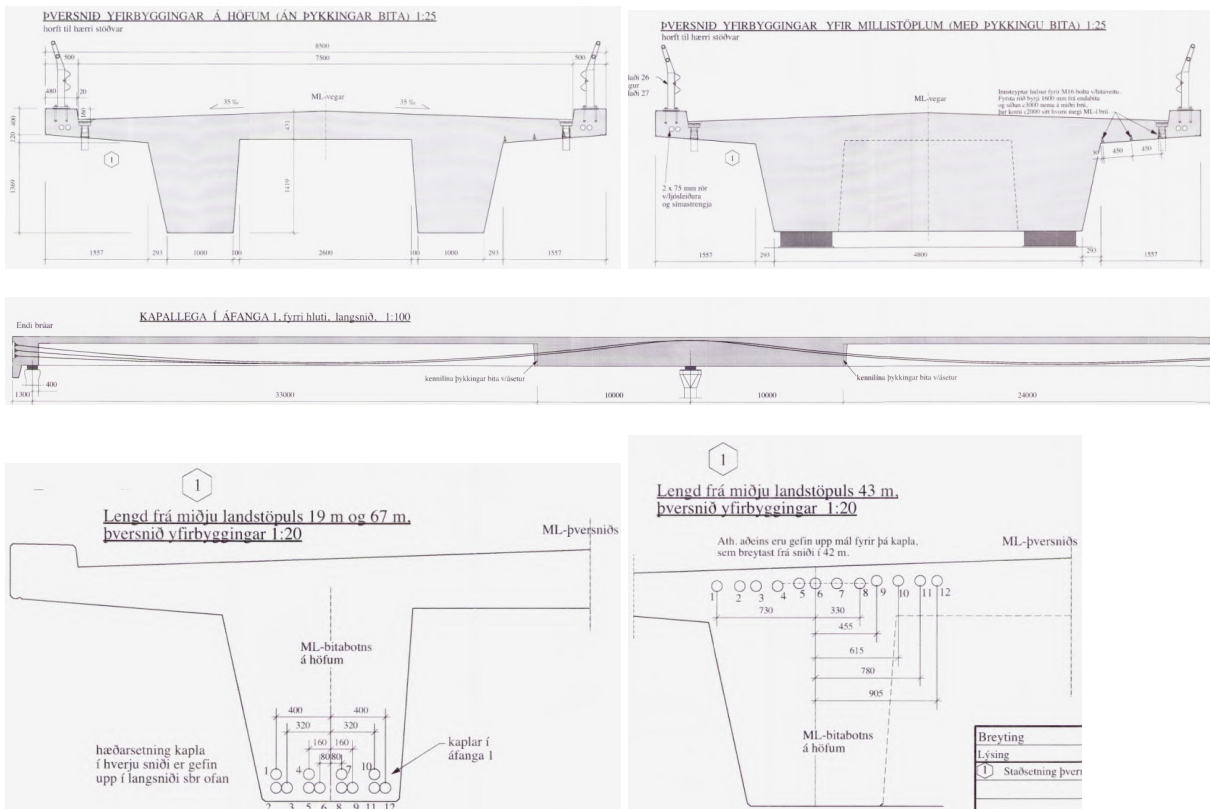


MYND 6.17 Lega kapla í brúarhafi til vinstri og yfir millistöpli til hægri.

Um neðri brún bita og bitahliðar gildir það sama og um flokkinn hér að framan, kaplar liggja frekar djúpt og ekki í hættu á tæringu frá þeim hliðum. Hins vegar eru kaplar í efri brún yfir millistöplinum einungis 130 mm frá efri brún steypu og steypuhula á kapalrörin því 90 mm. Þessar brýr eru því í meiri hættu á tæringu en brýrnar í flokknum hér á undan.

6.3.6 Samfelldar brýr með heilu þversniði en áfangaskiptar

Þegar heildarlengd á samfelldri yfirbyggingu brúar fer mikið yfir 100 m er talið hagkvæmt að spenna hana upp í áföngum til þess að takmarka spennutap í köplum og minnka áhættu við að grauta í löng kapalrör með fullu öryggi. Þannig eru allar af lengri spennu brúnum gerðar í vegakerfinu. Fyrsta slíka brúin er brú á Héraðsvötn í Skagafirði frá árinu 1981. Sem dæmi eru hér teikningar af brúnni yfir Kolgrafarfjörð á Snæfellsnesi og brúnni yfir Ölfusárós á Óseyrarnesi, en báðar þessar brýr voru byggðar í áföngum og verða fyrir mikilli saltáraun frá sjó og vegsöltun.

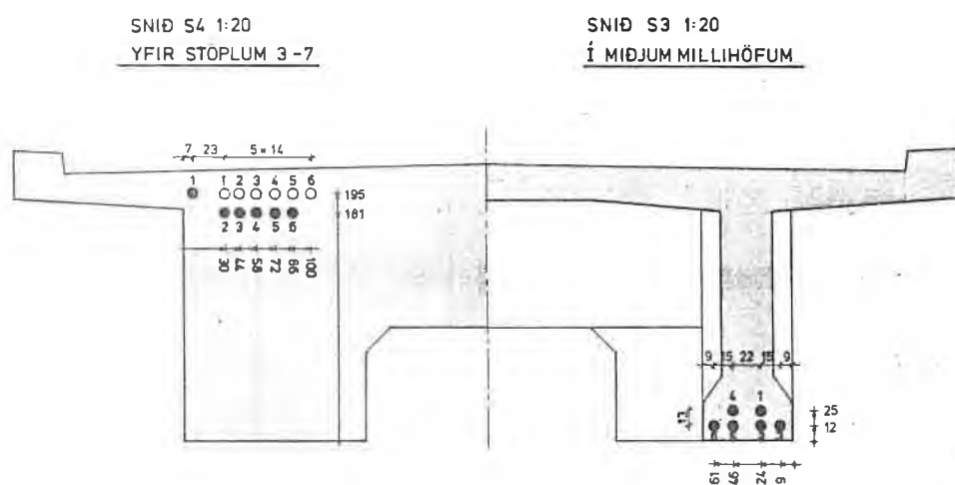


MYND 6.18 Brú yfir Kolgrafarfjörð. Þversnið og kapallega.

Hér á það sama við og í floknum hér að ofan. Það er greiðust leið fyrir klórjónir að köplunum yfir millistöplunum. Á brúnni yfir Kolgrafarfjörð er þetta vandamál meira en á mörgum öðrum þar sem að útloftunarrörin sem voru úr kapalrörum fyrir grautun enduðu í úrtaki í brúargólfinu. Síðan var úrtakið fyllt með sementsbundnu viðgerðarefni. Við sýnatöku úr viðgerðarefninu kom í ljós að klór á greiða leið í gegnum það (sjá Áfangaskýrslu 4). Fjarlægð í miðjan kapal samkvæmt teikningu er 120 mm sem gefur steypuhulu 80 mm. Hafi úrtakið verið 50 mm djúpt (battningsþykkt) þá er virk steypuhula einungis 30 mm undir viðgerðarefninu. Þetta þarf nauðsynlega að kanna nánar.



MYND 6.19 Brú yfir kolgrafarfjörð. Úrtök yfir millistöplum með viðgerðarefni.



MYND 6.20 Brú yfir Ölfusárós á Óseyrarnesi. Þversnið.

Brúin á Óseyrarnesi hefur einnig takmarkaða steypuhulu í bitahliðum, eða einungis 55 mm frá yfirborði að kapalrörum.

Annað atriði sem er sérstakt við þessar lengri brýr er að í þeim eru lóðrétt steypuskil. Steypuskil eru alltaf veikur punktur í hverju mannvirki sem gefur færi á aukinni leiðni klórs inn í steypuna. Flestar ef ekki allar þessar brýr eru ekki með einangrað brúargólf svo að hálkuvannarefni eiga greiða leið að skilunum. Mótstaðan við að klór komist að köplum er því háð vinnubrögðum við tengingu áfanganna. Þessar brýr eru því í heldur meiri áhættu en brýrnar í floknum hér að framan.

6.3.7 Brýr með tjóðraða enda

Sérlega er talin mikil hættu á stökku broti í spenntum brúm með tjóðraða enda. Þar er átt við brýr þar sem endi eða endar hafa neikvæða ásetukrafta. Að minnsta kosti þrjár brýr eru af þessari tegund hér á landi: Blanda, Arnarneshæð og göngubrá á Korpu við Korpúlfsstaðaveg.



Brú á Blöndu er fyrsta eftirspennta brú á Íslandi byggð 1963. Nýir kantar voru steypir á brúna árið 2016 og þá voru einnig bitarnir gegnumlýstir til að skoða ástand kaplanna. Ekkert óvenjulegt kom í ljós við þá skoðun en rétt er að nefna að ekki var mögulegt að skoða kaplana í viðkvæmustu stöðunum, þ.e. yfir millistöplunum þar sem líklegast er að fram komi holrúm við grautun.

Brúin er tjóðruð niður til endanna með þykkum stöngum/lykkjum sem eru nokkuð tærðar. Í þessu verkefni hefur ekki verið gerð nein greining á stærð ásetukrafta í endum.

Brúin yfir Hafnarfjarðarveg á Arnarneshæð var byggð árið 1990. Hún hefur stutt, falin endahöf. Í fasta endann, austurendann, er endinn tjóðraður niður með bendistáli en í lausa endann er það gert með vantstrekkiurum. Aðgengi er að strekkjurunum inni í stöplinum.

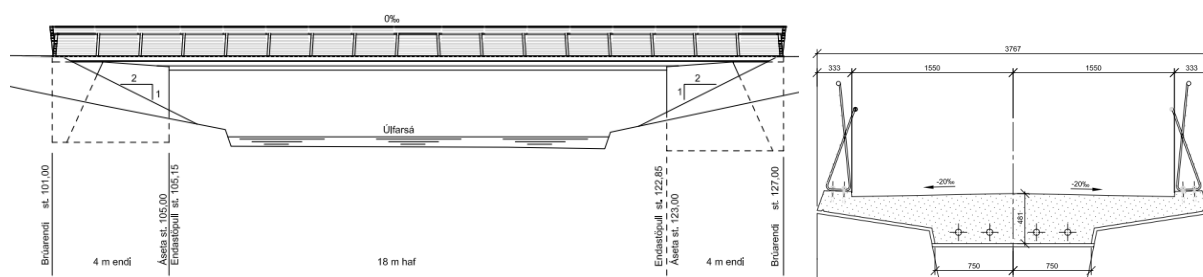


MYND 6.21 Brú yfir Hafnarfjarðarveg á Arnarneshæð í skammdegismyrkrinu 2025.

Brúin yfir Korpu er göngubrá byggð árið 2005. Hún er með falin endahöf sem eru tjóðruð niður með steypum endaveggjum báðum megin. Burðarformið gefur færi á að hafa hlutfallið á milli lengdar og þykktar brúargólfsins óvenju hátt eða 39. Ókostur er að erfitt er að fylgjast með ástandi endaveggjanna sem tryggja tjóðrunina.



MYND 6.22 Göngubrú á Korpu við Korpúlfsstaðaveg.



MYND 6.23 Göngubrú á Korpu við Korpúlfsstaðaveg. Hliðarmynd og þversnið.

7 HELSTU NIÐURSTÖÐUR OG NÆSTU SKREF

Í þessum áfanga rannsóknar á spenntum brúm var sjónum beint að klórflæði inn um bitahliðar á brúm sem standa í sjó. Fyrri mælingar gáfu til kynna að innflæði klórs var síst minna inn um bitahliðar vegna nálægðar við sjó heldur en niður úr brúargólfum vegna notkunar salts í hálkuvarnir. Tekin voru sýni úr 4 brúm sem standa í sjó. Niðurstöðurnar staðfestu að uppsöfnun á klórjónum er mikil í steypunni, sérstaklega á þeim hliðum sem eru í meira skjóli.

Tvær af þessum brúm, Borgarfjörður og Kolgrafarfjörður, voru einnig í fyrri mælingu. Athygli vekur að mikil dreifing er á niðurstöðum úr þessum tveimur mælingum, þrátt fyrir að sýnin séu tekin á svipuðum stað. Gefur það til kynna að dreifing á klórmagni sé mikil eftir staðsetningu. Gera þarf umfangsmeiri mælingar á dreifingu klórs í þessum brúm til að kortleggja vandamálið.

Leiddar eru líkur að því að innflæði klórs í steypu skapi mesta hættu fyrir aðalburðarvirki uppspenntra brúa hér á landi. Tæring á spenniköplum getur valdið skyndilegu broti á burðarvirkinu, slík brot eru stökk og gera ekki boð á undan sér og eru þess vegna sérlega hættuleg. Í þessari skýrslu er gerð tilraun til að flokka brýr eftir áhættu á skemmdum vegna innflæðis klórs. Er þar stuðst við breskan matslykil, en um hann er fjallað í Áfangaskýrslu 2 í þessu rannsóknarverkefni.

Niðurstöður úr þeirri forskoðun gefur færi á að flokka spenntar brýr á Íslandi betur í áhættuflokka og gera áætlanir um reglubundið eftirlit með þeim brúm sem falla í hæstu áhættuflokkana. Fyrir hvern flokk er síðan hægt að skilgreina þá þætti sem sérstaklega þarf að fylgjast með í viðkomandi brúm til framtíðar.

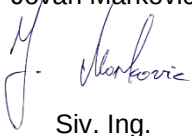
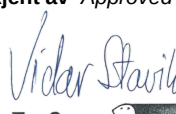
Aukin saltnotkun við hálkuvarnir á síðustu árum með aukinni umferð og auknum kröfum um þjónustu á vegum allan ársins hring er líkleg til að auka innflæði klórs í brúargólf í náninni framtíð. Bregðast þarf við þessum breyttu aðstæðum, bæði við hönnun nýrra brúa en einnig með aðgerðum á eldri brúm. Þetta á sérstaklega við brýr þar sem engin einangrun er á brúargólfinu, sem á við um flestar brýr utan þéttbýlis á landinu.

Mikið klór í bitahliðum brúa sem standa í sjó er áhyggjuefni. Það á sérstaklega við um eldri brýr þar sem steypuhula á járn var almennt um 30 mm. Samkvæmt niðurstöðum mælinga er klórmagn á því dýpi í steypunni það mikið að hætta er á tæringu bendistálsins. Finna þarf aðferðir til þess að hindra frekari innflæði klórs í þessar brýr.

Annar þáttur sem hefur mikil áhrif á endingu brúa er frostþol steinsteypu. Þessi þáttur einskorðast ekki við spenntar brýr sérstaklega, heldur á meira eða minna við um allar brýr. Þótt allar brýr sem byggðar hafa verið undanfarin a.m.k. 60 ár séu gerðar úr frostþolinni steypu þá eru frostskemmdir algengar í íslenskum brúm. Skemmdirnar koma aðallega fram í brúarköntum og bríkum þar sem ágangur regns er mikill. Talið er að skemmdirnar stafi af því að loftkerfið í steypunni verði óvirkt þegar steypan mettast af vatni. Þessar skemmdir ógna yfirleitt ekki öryggi aðalburðarvirkis brúa en viðgerðir á brúarköntum eru dýrar og valda verulegri truflun á umferð. Því er full ástæða til að finna betri leiðir til að vernda steypu sem er útsett fyrir slagregni til að lengja líftíma hennar fram að fyrstu viðgerð.

Aðgerðir sem þarf að fara í strax: Við steypu á yfirbyggingum nokkurra samfelldra brúa var komið fyrir úrtakslista kringum útloftunarrör yfir millistöplum. Það var gerð til að auðveldara væri að slétta brúargólfið. Eftir steypa var úrtakið síðan fyllt með viðgerðarmúr. Við mælingar á klór í viðgerðarmúr á brúnni yfir Kolgrafarfjörð kom í ljós að klór átti greiða leið í gegnum múrinn og inn að steypunni. Þá eru einungis eftir um 30 mm inn að kapalrörunum. Þetta þarf að kanna nánar og bregðast við. Þá þarf að leita upp aðrar brýr sem svipað er ástatt um.

VIÐAUKI A NIÐURSTÖÐUR KLÓRMÆLINGA

Oppdragsgiver Client EFLA Rådgivende Ingeniører Voldsveien 6 1366 Lysaker		Utførende enhet/lab. Department/laboratory responsible Kiwa AS PB 141 Økern 0580 OSLO	
Rapportnr. Report no. WO000007080			
Tittel Title Determination of chloride content in concrete Rapid Chloride Determination			
Dato Date 25.11.2024	Utarbeidet av Prepared by Jovan Markovic  Siv. Ing.	Godkjent av Approved by   Vidar Stavik Avdelingsleder	Innleveringsdato for prøve Date of receipt of test object 08.11.2024 Prøvetaking utført av Kiwa Sampling by Kiwa -
Revisjonsnr. Revision no. -	Konfig. kont. Config.contr.	Antall sider No. of pages 3	Ant. vedlegg No. of append.
Kopi nr. Copy no.	Akkreditert test (ISO 17025) Accredited test (ISO 17025)	Kundens ref. Client's ref. Brynja Arnardóttir	Bestillingsnr. Order no. 105567
Fordeling Distribution PDF to client			

Prøvingsresultater gjelder utelukkende de prøvede objekter. Utdrag av rapporten må ikke gjengis uten skriftlig godkjenning fra Kiwa as.

Test results relate only to the items tested. The report shall not be reproduced except in full, without the written approval of the laboratory.

Results

The results of the measurements are listed in Table 1. Critical limit values are listed in Table 2 below. The calibration curve is shown in Figure 1.

Table 1: The results of RCT

Number of samples	Sample ID	Bridge info	[mV]	Chloride content in % of concrete weight	Chloride content in % of estimated cement weight ¹	Probability of corrosion
1	BF-01	Borgarfjarðarbrú I-biti 0-1 cm	99	0,64735	4,439	Certain
2	BF-02	Borgarfjarðarbrú I-biti 1-2 cm	88	0,37448	2,568	Certain
3	BF-03	Borgarfjarðarbrú I-biti 2-3 cm	77	0,23381	1,603	Very likely
4	BF-04	Borgarfjarðarbrú I-biti 3-4 cm	67	0,16057	1,101	Very likely
5	BF-05	Borgarfjarðarbrú I-biti 4-5 cm	47	0,07677	0,526	Possible
6	BF-06	Borgarfjarðarbrú Y-biti 0-1 cm	75	0,21623	1,483	Very likely
7	BF-07	Borgarfjarðarbrú Y-biti 1-2 cm	58	0,11616	0,797	Possible
8	BF-08	Borgarfjarðarbrú Y-biti 2-3 cm	43	0,06528	0,448	Possible
9	BF-09	Borgarfjarðarbrú Y-biti 3-4 cm	35	0,04589	0,315	Negligible
10	BF-10	Borgarfjarðarbrú Y-biti 4-5 cm	46	0,07377	0,506	Possible
11	GB-01	Gullinbrú I-biti 0-1 cm	64	0,14414	0,988	Possible
12	GB-02	Gullinbrú I-biti 1-2 cm	28	0,03213	0,220	Negligible
13	GB-03	Gullinbrú I-biti 2-3 cm	19	0,01770	0,121	Negligible
14	GB-04	Gullinbrú I-biti 3-4 cm	18	0,01628	0,112	Negligible
15	GB-05	Gullinbrú I-biti 4-5 cm	19	0,01770	0,121	Negligible
16	GB-06	Gullinbrú Y-biti 0-1 cm	57	0,11202	0,768	Possible
17	GB-07	Gullinbrú Y-biti 1-2 cm	25	0,02697	0,185	Negligible
18	GB-08	Gullinbrú Y-biti 2-3 cm	15	0,01224	0,084	Negligible
19	GB-09	Gullinbrú Y-biti 3-4 cm	14	0,01096	0,075	Negligible
20	GB-10	Gullinbrú Y-biti 4-5 cm	11	0,00740	0,051	Negligible

¹ Calculation of chloride content in % of assumed cement weight is based on the assumptions of 350 kg cement per 1 m³ of concrete and weight of concrete of 2400 kg/m³.

Table 2: Guideline critical limit values for chloride content according to Byggforsk instruction 520.034.

Chloride content in % of estimated cement weight	Probability of corrosion
< 0.4	Negligible
0.4 – 1.0	Possible
1.0 – 2.0	Very likely
> 2.0	Certain

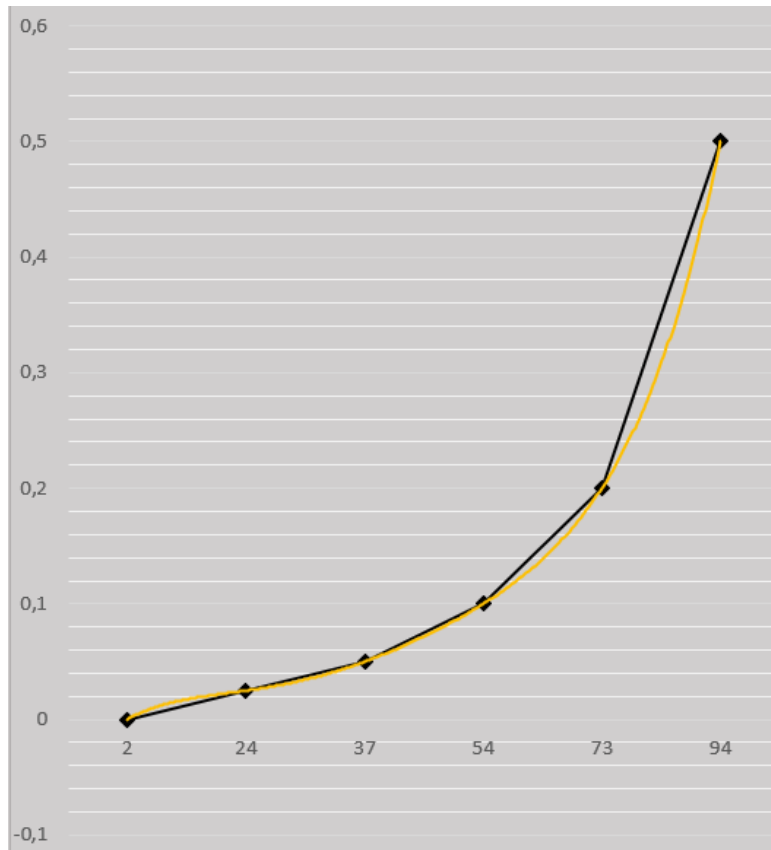


Figure 1: Calibration curve