

HÆGTRYÐGANDI STÁL

Tæring við íslenskar aðstæður

Áfangaskýrsla 1

Nóvember 2017

Rannsóknarverkefni styrkt af Vegagerðinni



SKÝRSLA – UPPLÝSINGABLAÐ

SKJALALYKILL

2970-247-SKY-001-V01

SKÝRSLUNÚMÉR / SÍÐUFJÖLDI

01 / **X**

VERKEFNISSTJÓRI – FULLTRÚI VERKKAUPA

-Guðmundur Valur guðmundsson

VERKEFNISSTJÓRI – EFLA

-Baldvin Einarsson

LYKILORÐ

Hægtryðgandi stál, brýr, tæring,

STAÐA SKÝRSLU

- Í vinnslu
 Drög til yfirlstrar
 Lokið

DREIFING

- Opin
 Dreifing með leyfi verkkaupa
 Trúnaðarmál

TITILL SKÝRSLU

Hægtryðgandi stál -Tæring við íslenskar aðstæður

VERKHEITI

Tæring á hægtryðgandi stáli

VERKKAUPI

Vegagerðin

HÖFUNDUR

-Kristín Helgadóttir, Baldvin Einarsson

ÚTDRÁTTUR

Tilgangur verkefnisins er að afla áreiðanlegra heimilda (tölulegra gagna) um tæringu- og veðrunarþol hægtryðgandi stáls við íslenskar aðstæður með tilliti til notkunar í brúargerð. Framkvæma á tæringar- og veðrunarprófanir á hægtryðgandi stáli á nokkrum stöðum á landinu. Mikilvægt er að tengja niðurstöður prófana við veðurathugunar Veðurstofu Íslands og þá sérstaklega seltumælingar sem framkvæmdar eru í Reykjavík og á Írafossi. Kanna á notkunarmöguleika hægtryðgandi stáls í samgöngumannvirki héraendis og athuga sérstaklega hagkvæmni fyrir brúargerð. Mögulegur ávinningur af notkun hægtryðgandi stáls í brúargerð er tvíþættur. Umtalsverður kostnaður sparast á framkvæmda- og líftíma brúarinnar þar sem ekki þarf að yfirborðsmeðhöndla, þ.e. ryðverja og mála stálið. Um leið minnkar umhverfisfótspor mannvirkisins vegna þessa efnissparnaðar. Niðurstöður munu nýtast við mikilvægar ákvarðanatökur við hönnun brúa héraendis og vera verkfæri fyrir hönnuði, framkvæmdaraðila og eigendur brúa á Íslandi.

ÚTGÁFUSAGA

NR.	HÖFUNDUR	DAGS.	RÝNT	DAGS.	SAMÞYKKT	DAGS.
01	Kristín Helgadóttir Baldvin Einarsson	29.10.17	Einar Óskarsson	6.11.17	Baldvin Einarsson	14.11.17

02

03

04

SAMANTEKT

Tilgangur verkefnisins er að afla áreiðanlegra heimilda (tölulegra gagna) um tæringu- og veðrunarþol hægtryðgandi stáls við íslenskar aðstæður með tilliti til notkunar við brúargerð. Framkvæma á tæringar- og veðrunarprófanir á hægtryðgandi stáli á nokkrum stöðum á landinu. Mikilvægt er að tengja niðurstöður prófana við veðurathugunar Veðurstofu Íslands og þá sérstaklega seltumælingar sem framkvæmdar eru í Reykjavík og á Írafossi. Kanna á notkunarmöguleika hægtryðgandi stáls í samgöngumannvirki héraendis og athuga sérstaklega hagkvæmni fyrir brúargerð. Mögulegur ávinningur af notkun hægtryðgandi stáls í brúargerð er tvíþættur. Umtalsverður kostnaður sparast á framkvæmda- og líftíma brúarinnar þar sem ekki þarf að yfirborðsmeðhöndla, þ.e. ryðverja og mála stálið. Um leið minnkar umhverfisfótspor mannvirkisins vegna þessa efnissparnaðar. Niðurstöður munu nýtast við mikilvæga ákvarðanatöku við hönnun brúa héraendis og vera verkfæri fyrir hönnuði, framkvæmdaraðila og eigendur brúa á Íslandi.

Rannsóknarverkefnið er styrkt af Rannsóknarsjóði Vegagerðarinnar.

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	II
1 INNGANGUR	1
2 ALMENNT UM HÆGTRYÐGANDI STÁL	3
2.1 Eiginleikar	3
2.2 Þróun og saga	5
2.3 Aðstæður og loftlagsáhrif	5
3 ERLENDAR RANNSÓKNIR	7
3.1 Áhrif viðbæta á tæringareiginleika hægtryðgandi stáls	7
3.2 Tæringarprófun á hægtryðgandi stálbrúm - Tékkland	8
3.3 Tæringarprófun á hægtryðgandi stálbrúm - Bandaríkin	9
4 HÆGTRYGANDI STÁL Í BRÚARGERÐ	10
5 MANNVIRKI ÚR HÆGTRYÐGANDI STÁLI	11
5.1 Erlendis	11
5.2 Hérlandis	14
6 AÐFERÐ	17
6.1 Staðlar	17
6.2 Framkvæmd	17
7 TÆRINGARRANNSÓKN FRÁ 1999	22
8 LOKAORÐ	25
9 HEIMILDIR	26

MYNDASKRÁ

Mynd 1	Samanburður á tæringarferli hefðbundins stáls og hægtryðgandi stáls	3
Mynd 2	Ryðlag á venjulegu smíðastáli (a) og á hægtryðgandi stáli (b) eftir langan veðrunartíma.	4
Mynd 3	Tölverður útlitsmunur á flanga og kroppi á brú í Prag	8
Mynd 4	Ryð á svæði þar sem leka var ekki vart	8
Mynd 5	Ójafnt ryð á lekasvæði	8
Mynd 6	Biggleswade Bridge í Englandi	11
Mynd 7	Shiremoor Bypass í Englandi	11
Mynd 8	River Eden Bridge í Englandi	12
Mynd 9	Slochd Beag Bridge í Skotlandi	12
Mynd 10	Shanks Millennium Bridge að vetri til	12
Mynd 11	Shanks Millennium Bridge að sumri til	12
Mynd 12	The New river Gorge Bridge í Vestur Virginíu	13
Mynd 13	The Sauvie Island Bridge í Portlandi	13
Mynd 14	Beacon Bridge í New York fylki	13
Mynd 15	Kjarvalsstaðir í Reykjavík eru klæddir hægt-ryðgandi stáli	14
Mynd 16	Eldheimar í Vestmanneyjum eru klæddir hægtryðgandi stáli	14
Mynd 17	Bílakjallari hjúkrunarheimilisins Mörk er klæddur hægtryðgandi stáli	14
Mynd 18	Skúlpúrinn Spenna eftir Hafstein Austmann er alfarið úr hægtryðgandi stáli.	14
Mynd 19	Stjórnstöð OR í Norðlingaholti er að hluta klædd hægtryðgandi stáli	15
Mynd 20	Inngangur Sjóminjasafnsins í Reykjavík er klæddur hægtryðgandi stáli.	15
Mynd 21	Veggur klæddur kortenstáli við Borgartún 27.	15
Mynd 22	Inngangur Norðurturms Smáralindar er klæddur hægtryðgandi stáli.	15
Mynd 23	Gullinbrú í Grafarvogi er klædd hægtryðgandi stáli	16
Mynd 24	Tæring klæðningarinnar er ójöfn	16
Mynd 25	Tæringarrekki á Sigurðarskála í Kverkfjöllum (mynd af netinu).	17
Mynd 26	Staðsetningar sýnarekka á landinu	18
Mynd 27	Merkt Weathering 355 sýni	19
Mynd 28	Lausnalykillinn lagður ofan á sýni	19
Mynd 29	Vigtun og skráning sýna	19
Mynd 30	Sýnarekkar við Veðurstofu Íslands í Reykjavík	20
Mynd 31	Sýnarekkar við skrifstofu Rarik á Akureyri	20
Mynd 32	Sýnarekki með 12 hægtryðgandi stálsýnum í Bolungarvík	20
Mynd 33	Uppsetning sýna í Bolungarvík.	20

TÖFLUSKRÁ

Tafla 1	Efnasamsetning SSAB Weathering 355	3
Tafla 2	Kostir þess að nota hægtryðgandi stál	10
Tafla 3	Efnasamsetning sýnanna sem notuð voru í þessari rannsókn	18
Tafla 4	Uppsetning veðrunarsýna úr hægtryðgandi stáli 2017	21

1 INNGANGUR

Hægtryðgandi stál (e. Weathering steel) eða *Cor-Ten* stál, er stál með háan kennistyrk og lágt hlutfall viðbæta (e. alloys). Það hefur reynst hafa mun betra tæringarþol en hið hefðbundna byggingarstál. Þetta mikla tæringarþol er til komið vegna oxíð yfirborðslags, stundum nefnt *patina*, sem myndast þegar stálið kemst í tæringu við umhverfið sökum ákveðinn efna í stálinu, þ.á.m. kopars (Morcillo o.fl., 2014).

Hægtryðgandi stál var fyrst þróað í Bandaríkjunum á fyrri hluta síðustu aldar. Stálið var fyrst notað í járnbrautarvagna en á 7. áratug síðustu aldar í klæðningar á byggingum en einnig sem smíðastál fyrir burðarvirki í brýr, m.a. í fylkjum Michigan og New Jersey í Bandaríkjunum. Undir lok þess áratugs var svo byrjað að nota það í burðarvirki í Evrópu. Nú er aðalnotkunarsvið þess brúargerð en framleiðslu- og byggingarkostnaður er talinn allt að 10% minni en fyrir sambærileg virki af yfirborðsmeðhöndluðu stáli. Helsti sparnaðurinn er þó á líftíma mannvirkis þar sem kostnaður vegna viðgerða og endurnýjunar ryðvarnarlags og málningar. Af sömu ástæðum er vistfræðilegt fótspor mannvirkja úr hægtryðgandi stáli minna en vistspor sambærilegra mannvirkja úr hefðbundnu stáli (Krivý o.fl., 2015).

Þó svo að kostir þess að nota hægtryðgandi stál séu margir er lítil reynsla af notkun þess í mannvirkjum hér á landi. Helst hefur það verið notað í klæðningar og var það fyrst notað hér á landi í klæðningu utan á Kjarvalsstöðum á Klambratúni sem opnaðir voru árið 1973. Hægtryðgandi stál er einnig notað sem klæðning á Gullinbrú í Grafarvogi. Einnig þekkist notkun á hægtryðgandi stáli í listaverkum, t.d. skúlptúr Hafsteins Austmanns *Spenna* sem stendur við stjórnstöð Landsvirkjunar á Bústaðarvegi (núna Veðurstofunni). Á síðastliðnum árum hefur áhuginn á notkun hægtryðgandi stáls aukist verulega hér á landi. Enn þann dag í dag er þó engin reynsla á notkun þess í burðarvirki hérlendis. Arkitektar hafa sýnt hægtryðgandi stáli áhuga vegna útlits þess og vildu t.d. nota það í burðarvirki göngu- og hjólabrúar yfir Elliðaárósa þó svo að lokum hafi verið horfið frá þeirri ákvörðun og notað hefðbundið málað stál vegna skorts á upplýsingum um tæringarhraða stálsins í burðarvirki (munnleg heimild).

Það er nokkuð ljóst að til þess að geta notað hægtryðgandi stál í burðarvirki, í byggingariðnaði hérlendis með fullu sjálfstrausti þarf að rannsaka tæringarþol þess við íslenskar aðstæður. Erfitt er að styðjast við erlendar rannsóknir eingöngu þar sem tæringarumhverfi á Íslandi er nokkuð frábrugðið því sem gerist víða erlendis (Björn Marteinson og Jón Sigurjónsson, 2002).

Björn Marteinson og Jón Sigurjónsson stóðu fyrir rannsóknarverkefni um kortlagningu tæringarhraða og mat á tæringarvörnum árið 1998 hjá Rannsóknarstofu byggingariðnaðarins ásamt fleirum. Fóru tæringarprófanir fram á 15 stöðum út um land allt í sýnarekkum sem settir voru upp. Tæringin var metin eftir 1, 3 og 5 ár. Ætlunin var að meta hana einnig eftir 10 ár, en það var aldrei gert. Við framkvæmd þessarar rannsóknar verður hægt að endurnýta þessa rekka ásamt því að meta tæringu sýnanna sem sett voru upp fyrir um 18 árum, að minnsta kosti þeirra sem enn eru á sínum stað (Björn Marteinson og fleiri, 2005). Sjá kafla 7 fyrir frekari upplýsingar um þessa rannsókn.

Tilgangur þessa verkefnis er að afla áreiðanlegra heimilda um tæringu- og veðrunarþol hægtryðgandi stáls við íslenskar aðstæður með tilliti til notkunar í brúargerð. Fyrst verður fjallað stuttlega almennt um hægtryðgandi stál. Því næst verður fjallað um erlendar rannsóknir, ávinning á notkun þess í brúargerð og stiklað á stóru um notkun þess í mannvirki, bæði erlendis og hérlendis. Síðan verður

fjallað um aðferðarfræði rannsóknarinnar og hvernig framkvæmdinni er háttað. Því næst verður fjallað stuttlega um tæringarrannsóknina frá árinu 1999. Að lokum er svo áætlun næstu ára dregin saman á einfaldan hátt. Í viðauka má finna bæði upphafsþyngdir sýna ásamt staðsetningu þeirra á sýnarekka.

2 ALMENNT UM HÆGTRYÐGANDI STÁL

2.1 Eiginleikar

Hægtryðgandi stál, stundum kallað *CorTen* stál, er tegund stáls sem hefur háan kennistyrk og lágt hlutfall viðbæta og hannað til að vera með mun betra tæringarþol en hefðbundið stál. Efnasamsetning stálsins er málmblanda járn (Fe), kolefnis (C) og viðbæta, þar sem kolefnismagn er innan við 0.2% þyngdar og magn viðbæta ekki meira en 3-5% (Morcillo o.fl., 2013). Til eru þó nokkrar tegundir af hægtryðgandi stáli en sú tegund sem flutt er hingað til lands frá Svíþjóð kallast *SSAB Weathering 355* og má sjá efnasamsetningu þess í töflu 1 hér að neðan (SSAB, 2017).

TAFLA 1 Efnasamsetning *SSAB Weathering 355* (SSAB, 2017)

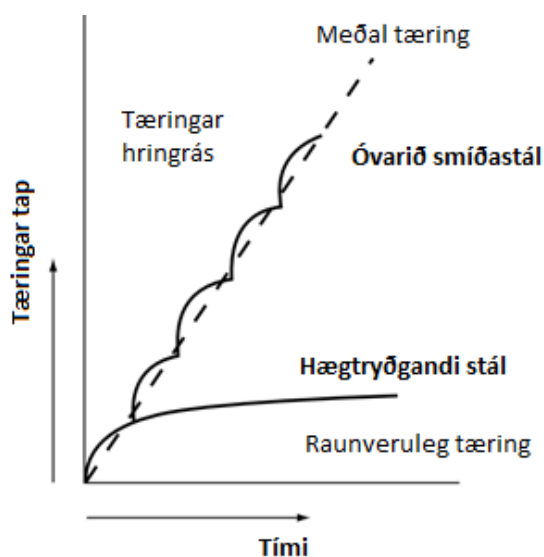
TEGUND	C MAX %	Si MAX %	Mn MAX %	P %	S MAX %	Al _{TOT} MIN %	Cr %	Cu %	Ni MAX %
Kald valsað	0,12	0,75	1,0	0,06-0,15	0,030	0,020	0,3-1,25	0,25-0,55	0,70
Heit valsað	0,12	0,75	1,0	0,06-0,15	0,030	0,020	0,3-1,25	0,25-0,55	0,70
Þung plata	0,16	0,75	1,5	≤0,035	0,030	0,020	0,4-0,8	0,25-0,55	0,20

Stálið er kornhreinsað og róað.

Hægt er að nota viðbótar örlefnipætti Nb, V og Ti.

Heitvalsað *SSAB Weathering 355* er mest notað hér á landi.

Allt stál hefur tilhneingingu til þess að ryðga í viðveru raka og lofts. Hraði tæringarinnar er háður aðgengi súrefnis, raka og mengunarefna að stályfirborðinu. Þegar líður á tæringarferlið myndar ryðið eins konar lag sem hindrar aðgang súrefnis, raka og mengunarefna að yfirborði stálsins og við þetta hægist verulega á tæringunni. Eftir ákveðinn tíma losnar ryðlagið af stálinu og tæringin eykst á ný. Þannig má nálga tæringu hefðbundins stáls sem beina línu og fer halli hennar eftir umhverfisaðstæðum. Það sem einkennir hægtryðgandi stál er stöðuga ryðlagið sem það myndar. Upphaflega er tæringin eins og hjá hefðbundnu stáli en í stað þess að ryðlagið losni og tæringin aukist á ný þá myndast stöðugt ryðlag, *patina*, sem ver stálið varanlega fyrir tæringu. Þessi tvö ferli má sjá á mynd 1 (Corus Construction & Industrial, 2005).



MYND 1 Samanburður á tæringarferli hefðbundins stáls og hægtryðgandi stáls (Corus Construction & Industrial, 2005)

Tæringarþol stálsins er til komið vegna oxíð yfirborðslags, *patina*, sem myndast þegar stálið kemst í tæringu við umhverfið sökum ákveðinna efna í stálinu, þar á meðal kopars. Helstu efnisþættir ryðsins eru (Krivy o.fl., 2015):

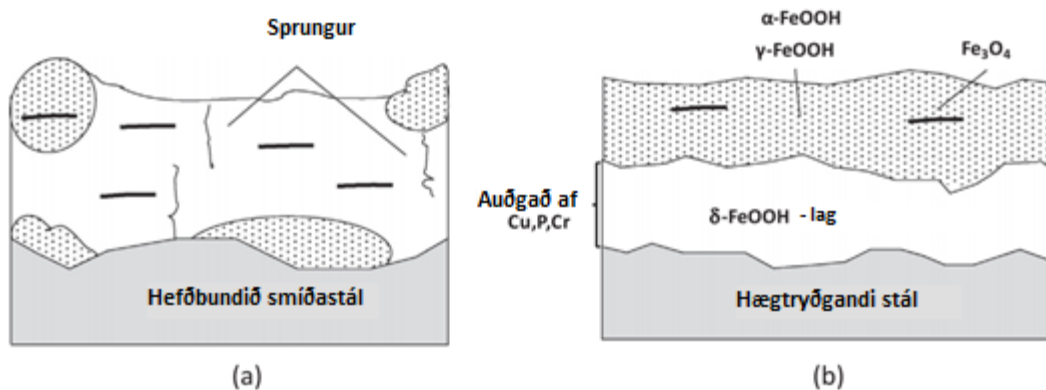
- *Goethite*, α -FeOOH - Stöðugasti fasinn og stuðlar að verndandi eiginleikum yfirborðisins. Ef það er í formi nanóagna þá kemur það í veg fyrir að vatn, súrefni og klóríð jónir fari inn í neðri ryðlög og að yfirborði stálsins.
- *Akaganeite*, β -FeOOH – Stuðlar ekki að verndandi eiginleikum yfirborðisins. Dæmigert fyrir umhverfi með klóríðum.
- *Lepidocrocite*, γ -FeOOH - Óstöðugt efnasamband sem umbreytist í Fe_3O_4 eða γ - Fe_2O_3 í umhverfi sem inniheldur súrefni.
- *Magnetite*, Fe_3O_4 - Dæmigerður hluti ryðs sem myndast á yfirborði sem verður fyrir langtíma raka eða í sprungum.

Vísitala verndurnareiginleika, PAI_α , er skilgreind á grundvelli samanburðar á hlutfalli massa einstakra efnasambanda í yfirborðslaginu, þ.e.

$$PAI_\alpha = \frac{\alpha}{\gamma + \beta + Fe_3O_4}$$

Ef hlutfallið er $PAI_\alpha > 1,0$ þá er yfirborðslagið verndandi og tæringarhraði minni en $10 \mu\text{m}/\text{ár}$ (Krivy et al, 2015).

Myndun varnarlagsins er háð veðurfari í umhverfi sínu og þá er það sérstaklega viðkvæmt fyrir vætutíma, seltu og mengun frá brennisteinstvíldi (SO_2). Neikvætt hlaðnar klórjónir úr salti minnka þol yfirborðslagsins gegn tæringu (Morcillo et al, 2014). Einnig hafa klórjónir þau áhrif að við myndun varnarlagsins verða til β -FeOOH sameindir í meira mæli. Það er því ljóst að myndun β -FeOOH sameinda minnkar verndandi áhrif yfirborðslagsins. En þessi tiltekna gerð oxíða umbreytist ekki í *amorphous ferric oxyhydroxide* ($FeO_x(OH)_{3-2x}$) sem er aðaluppistaða varnarlagsins (Damgaard o.fl.,2010). Mynd 2 hér að neðan sýnir á einfaldan hátt hvernig ryðlag myndast á venjulegu smíðastáli annars vegar og svo á hægtryðgandi stáli hins vegar. Þessa skýringarmynd settu Misawa o.fl. (1971) fram í skýrslu sinni, *The mechanism of atmospheric rusting and the effect of Cu and P on the rust formation of low-alloy steels*.



MYND 2 Ryðlag á venjulegu smíðastáli (a) og á hægtryðgandi stáli (b) eftir langan veðrunartíma. Eins og sjá má þá myndast þétt tæringarvarnandi lag á hægtryðgandi stálinu (Misawa o.fl., 1971)

2.2 Þróun og saga

Uppruna hægtryðgandi stáls má rekja aftur til þróunar á stáli sem innihélt kopar, þekkt sem koparstál (Morcillo o.fl., 2013). Árið 1910 framkvæmdi maður að nafni Buck, hjá *US Steel Corporation*, stóra veðrunarrannsókn á koparstáli í Pennsylvania (iðnaðarhverfi), Atlantic City (námunda við sjó) og Kittanning (dreifbýli). Rannsóknin sýndi fram á jákvæð áhrif kopars í stáli gegn veðrun (Morcillo o.fl., 2014). En það var einmitt *US Steel Corporation* sem fékk einkaleyfi á fyrsta hægtryðgandi stálinu, USS Cor-Ten, árið 1933 en það var aðallega notað við smíði á lestarvögnum (Krivy et al, 2015). Átti þessi tegund stáls að búa yfir 30% betri styrkeiginleikum heldur en venjulegt smíðastál og þar með draga úr nauðsynlegri þykkt stálsins. Fyrstu útgáfur af *USS Cor-Ten* stáli byggðust á Fe-Cu-Cr-P samböndum, sem nikkell (Ni) var síðar bætt við til að bæta tæringarþol í sjávarumhverfi (Morcillo o.fl., 2013).

Árið 1992 byrjaði *US FHWA*, *AISI* og bandaríski sjóherinn að þróa endurbætt hægtryðgandi stál, *High Performance Steel (HPS)*, ætlað í brúargerð. Þrjú grundvallarmarkmið voru sett til að bæta heildargæði og framleiðslugetu stálsins sem hingað til höfðu verið notuð í brúargerð í Bandaríkjunum. Það fyrsta var það að bæta sjóðanleika (e. weldability) og var það gert með því að lækka kolefnis-, fosfór- og brennisteinsinnihaldið. Annað var að bæta styrkeiginleika stálsins, svo sem brot- og flotstyrk sem náðist með því að hækka hámark mangans (Mn). Þriðja markmiðið var að viðhalda myndun varnarlagsins sem er einkennandi fyrir hægtryðgandi stál. Árið 1997 var svo fyrsta brúin úr þessari endurbættu tegund byggð í Nebraska (Morcillo o.fl., 2013). Í dag er hægtryðgandi stál einmitt mest notað í brúargerð.

2.3 Aðstæður og loftlagsáhrif

Hið aukna tæringarþol hægtryðgandi stáls er, eins og áður hefur komið fram, til komið vegna myndunar þétts varnarlags. Mikil rannsóknarvinna hefur varpað ljósi á það hver skilyrðin séu svo að hlífðar-ryðlagið myndist. Það er nú almennt viðurkennt að blaut og þurr hringrás sé nauðsynleg til þess að þétt varnarlag myndist. Regn þarf að þvo yfirborð vel, uppsafnaður vökvi þarf að geta þornað auðveldlega og þurrkun þarf að vera fremur fljót, þ.e. að stálið sé ekki blautt í lengri tíma. Það er því ljóst að hæfni hægtryðgandi stáls til þess að mynda þétt varnarlag er háð veðurfari og áhrifum þess á málmyfirborðið (Morcillo o.fl., 2014).

Vissulega hafa fleiri þættir áhrif á myndun varnarlagsins, eins og t.d. mengunarstig, útsetningaraðstæður og samsetning járnsins. Fjöldi erlendra rannsókna hefur t.d. sýnt fram á að hægtryðgandi stál þrífst ekki jafn vel nálægt sjó þar sem saltmagn í lofti er mikið og í iðnaðarverfum eða í þéttbýli þar sem mengun er mikil, líkt og það gerir í dreifbýli inn í landi (Morcillo o.fl., 2014). Það er því nauðsynlegt að skoða fleiri þætti en veðurfar þegar kemur að hægtryðgandi stáli því að í ákveðnu umhverfi getur verið að varnarlagið myndist aldrei eða það taki sérstaklega langan tíma að myndast (Morcillo o.fl., 2013).

Í staðlinum ISO 9223 er umhverfi flokkað í tæringarflokka, annars vegar byggt á beinum mælingum á tæringarhraða og hins vegar á þeim veðurþáttum sem taldir eru hafa mest áhrif á veðurtæringu málma, en það eru vætutími, SO₂ mengun og loftborin selta. Flokkarnir eru frá C1, mjög lítil tæring, til C5, mjög mikil tæring. Ef niðurstöður rannsókna Björns Marteinsonar og Jóns Sigurjónssonar (2002) á *Tæringu málma á Íslandi* eru skoðar telst Ísland liggja í flokki 2-3 er stál varðar. Flokkun byggð á

veðurfarsupplýsingum gaf hins vegar flokka 3-4, eða jafnvel 5. Það er því ljóst að flokkun sem byggir á veðurfari ofmetur tæringu hér á landi. Rannsóknin sýndi að breytileiki í tæringarhraða eftir landssvæðum var mikill þar sem tæringin var hröðust í Vestmannaeyjum en hægust í Kverkfjöllum og á Egilsstöðum af þeim stöðum sem mælingar fóru fram á (Björn Marteinsson og Jón Sigurjónsson, 2002).

Tæringarumhverfi á Íslandi er töluvert frábrugðið því sem víða gerist erlendis. Landið liggur í braut lægða sem fara um Norður-Atlantshafið og vegna hálendis og jökla um miðbik landsins þá er loftslag allólíkt eftir stöðum á landinu. Áberandi er hve loftslag norðan jökla er þurrt og svalt í samanburði við aðra staði á landinu. Sökum tíðra vinda er staðbundin mengun almennt fremur lítil og eru því áhrif brennisteins, SO_2 , almennt lítil hérlendis miðað við annars staðar. Brennisteinsmengun getur hins vegar verið nokkur í námunda við hverasvæði og eldfjöll. Það er því saltmagn í lofti sem er helsta ógn hægtryðgandi stáls hér á landi. Seltan er mest í lofti í námunda við sjóinn en minnkar svo þegar inn í landið dregur. Áberandi er hve mikil seltan er í lofti við strönd á Suður- og Suðvesturlandi miðað við annars staðar á landinu (Björn Marteinsson og Jón Sigurjónsson, 2002).

Í skýrslunni *Atmospheric corrosion data of weathering steels. A review* sem skrifuð er af M. Morcillo o.fl. (2013) eru dregnar fram nokkrar ályktanir út frá ítarlegum upplýsingum er varða skilyrði fyrir eiginleikum andrúmslofts þar sem ráðlegt er að nota hægtryðgandi stál. Þar kemur fram að í andrúmslofti sem telst vera í tæringarflokkum C2 til C3 getur það tekið verndandi yfirborðslagið um 6 til 8 ár að ná stöðugleika en í meira tærandi andrúmslofti, C3 til C5, tekur það aðeins 4 til 6 ár. Ekki er mælt með því að nota efnið í veðuraðstæðum í flokkum $\geq C3$ eða í sjávarumhverfi.

Eins og fram kom hér á undan þá telst Ísland vera í flokki C3-C4, jafnvel C5 ef flokkunin er byggð á veðurfarsupplýsingum. Samkvæmt þessu ætti hægtryðgandi stál ekki að henta í burðarvirki hér á landi. En aftur á móti voru niðurstöður Björns o.fl. þær að tæringarhraði á Ísland lægi í flokkum C2-C3 og ætti efnið því að henta vel í burðarvirki á ákveðnum svæðum á landinu, þá einna helst á Norður- og Austurlandi og einnig inn í landi, fjarri sjó.

Einnig kemur fram að ekki sé talið ráðlegt að nota efnið í umhverfi þar sem styrkur SO_2 er í kringum 20 mg/m^2 dag eða þar sem Cl^- styrkur klórjóna er í kringum 3 mg/m^2 dag. Ef styrkur þessara efna í andrúmsloftinu er hærri þá er ekki talið ráðlegt að nota hefðbundið ómálað hægtryðgandi stál. Við skoðun á styrk þessara efna í andrúmslofti á Íslandi kemur í ljós að víðast hvar er styrkur SO_2 lágur nema nálægt hverasvæðum. Þá þarf að kanna betur áhrif jarðgufuvirkjana á styrk brennisteins í umhverfinu. Skv. mælingum á seltu sem gerðar hafa verið hér á landi má búast við að styrkur klórjóna (Cl^-) í úrkomu sé víðast hærra en 3 mg/m^2 ,dag.

3 ERLENDAR RANNSÓKNIR

Fjöldi rannsókna hafa verið gerðar á hægtryðgandi stáli erlendis og hafa þessar rannsóknir verið gerðar á mismunandi stöðum í heiminum við mismunandi aðstæður. Þær hafa verið gerðar í löndum eins og Bandaríkjunum, Kanada, Svíþjóð, Frakklandi, Brasilíu, Rússlandi, Taívan o.fl. löndum. Það eru því til fjöldi rannsókna sem hægt er að bera sig saman við. Gögn er varða hegðun hægtryðgandi stáls fyrstu 10 ár veðrunar eru mjög aðgengileg en heldur minni upplýsingar eru til um langtímaveðrun (Morcillo o.fl., 2013). Undir ákveðnum umhverfisskilyrðum hefur tæring á stálinu verið hraðari en búist var við og eru því ákveðnar áhyggjur er varða langtímaendingu stálsins. Er það ein helsta ástæðan þess að hægtryðgandi stál hefur ekki verið notað í meiri mæli en nú er gert (Albrecht og Naeemi, 1984). Einnig er ákveðinn óvissupáttur í því að andrúmsloftið er oft eingöngu flokkað gróft niður í dreifbýli, þéttbýli, iðnaðarhverfi og hverfi nálægt sjó, byggt á huglægu mati á mengunarpáttum (Morcillo o.fl., 2013).

3.1 Áhrif viðbæta á tæringareiginleika hægtryðgandi stáls

Fyrstu víðtæku prófanirnar voru framkvæmdar af Copson, Larrabee og Coburn í Bandaríkjunum, sú fyrri árið 1941 og sú seinni 1942, en þær mörkuðu stórt skref í þekkingu á hægtryðgandi stáli (Morcillo o.fl., 2013). Þeir rannsökuðu áhrif mismunandi viðbæta og magn þeirra í málmblöndu járn og kolefnis. Þeir könnuðu hvaða áhrif helstu viðbætar hefðu á tæringareiginleika stálsins í andrúmslofti. Viðbætarnir sem þeir skoðuðu voru fosfór, kopar, króm og nikkell (Morcillo o.fl., 2014). Í stuttu máli voru niðurstöðurnar eftirfarandi.

Fosfór er ekki nauðsynlegur fyrir myndun varnarlagsins en hann bætir vissulega við nám hægtryðgandi stáls gegn ryði. Hann dregur úr meðalþyngdar- og þykktartapi eftir því sem magn hans í málmblöndunni er aukið. Hins vegar er efri mörkum hans stjórnað af skaðlegum áhrifum á eiginleika stálsins og því ætti magn fosfórs í hægtryðgandi stáli ekki að vera meira en 0,1% þyngdar málmblöndunnar skv. Copson o.fl. Kopar er mikilvægasti viðbætirinn, en það var viðbót hans sem leiddi til fæðingar hægtryðgandi stáls. Með tilraunum ákvörðuðu þeir neðri prósentumörk 0,05% og efri mörk 0,20%, en mesti ávinningurinn kom fram við fyrstu 0,05%. Einnig komust þeir að því að ávinningur kopars sem viðbætir var minni í umhverfi í námunda við sjó heldur en dreifbýli og iðnaðarhverfi. Áhrif króms á tæringu hægtryðgandi stáls eru líklega best þekkt allra viðbæta. Að bæta króm við stál leiðir til verulega meiri tæringarmótstöðu. Til þess að áhrifanna verði vart þarf a.m.k. 0,1% af kopar að vera í blöndunni. Þykktartap stálsins minnkar með auknum krómstyrk upp að 1,2%. Hins vegar ef magn kopars er minna en 0,04% þá getur króm haft skaðleg áhrif. Líkt og í tilviki króms, hefur lítið prósentuhlutfall kopars mikil áhrif á virkni nikkels sem tæringarvörn. En 1% nikkell ásamt lágri prósentu kopars leiðir til aukinnar tæringarmótstöðu (Morcillo o.fl., 2014).

3.2 Tæringarprófun á hægtryðgandi stálbrúm - Tékkland

Rannsókn á hægtryðgandi stálbrúm er í gangi í Tékklandi, framkvæmd af Viktor Urban, Vit Krivy og Katerina Kreislova. Megintilgangur rannsóknarinnar er að útbúa spálíkan fyrir hönnunargildi á tæringartapi hægtryðgandi stáls. Veðrunarsýnum var komið fyrir á tíu brúm úr hægtryðgandi stáli árið 2014. Alls voru þetta 97 veðrunarsýni af stærðinni 150×100×1,5 mm og var þeim komið fyrir á mismunandi stöðum á yfirborði brúanna. Fyrirhuguð lengd rannsóknarinnar er 10 ár og er ætlunin að mæla tæringu eftir 1, 3, 5 og 10 ár (Urban o.fl., 2015).

Niðurstöður eftir eins árs veðrun voru settar fram í skýrslu sem birt var árið 2015. Niðurstöður mælinganna gáfu það til kynna að tæring stálsins sé verulega háð staðsetningu á yfirborði brúarinnar og er því tæring stálsins töluvert ójöfn í hverri brú. Sem dæmi má nefna að hámarksþykkt tæringar var ofan á neðri flanga að utan og mældist árleg tæringin þar 2,7 sinnum meiri en tæringin á ytra yfirborði aðliggjandi kroppi. Þetta stafar af mismunandi aðstæðum því að á neðri flanganum safnast fyrir meiri raki, úrfellingar, óhreinindi og, snjór og oftast en ekki salt sem notað er til að hálkuverja göturnar. Það er því oft augljós munur á ryði eftir því hvar það er staðsett á brúnni. Líkt og sjá má á mynd 3, af járnbrautarbrú í Prag, þá er tölverður útlitsmunur á flanganum og aðliggjandi kroppi. Einnig var það mikilvægur þáttur rannsóknarinnar að leggja mat á tæringarferli á yfirborði þar sem vökvi getur safnast saman vegna galla í frárennsliskerfi. Tæring var töluvert meiri á þessum svæðum, líkt og myndir 4 og 5 sýna. Það er því einkar mikilvægt að frárennsliskerfi séu viðunandi við hönnun á brúm sem þessum (Urban o.fl., 2015).



MYND 3 Tölverður útlitsmunur á flanga og kroppi á brú í Prag



MYND 4 Ryð á svæði þar sem leka var ekki vart



MYND 5 Ójafnt ryð á lekasvæði

3.3 Tæringarprófun á hægtryðgandi stálbrúm - Bandaríkin

Pedro Albrecht, prófessor við *University of Maryland* og Amir H. Naeemi, verkfræðingur, rannsökuðu brýr úr hægtryðgandi stáli í fjölmörgum fylkjum Bandaríkjanna. Var rannsóknin gerð með svipuðum hætti og rannsókn Viktor Urban o.fl. í Tékklandi. Markmið þessarar rannsóknar var að safna saman upplýsingum um tæringu hægtryðgandi stáls á kerfisbundinn hátt til dagsins í dag ásamt því að skrá og meta núverandi starfshætti á þessu sviði (Albrecht og Naeemi, 1984).

Komust þeir að því að meirihluti brúnna var í góðu ástandi, þó svo að staðbundna aukna tæringu væri að finna í sumum þeirra. Fjöldi brúa í ákveðnum fylkjum, eins og t.d. í Alaska, Kaliforníu, Michigan, Texas og Ohio, varð fyrir óhóflegri tæringu vegna saltmengunar og/eða langvarandi vökvasöfnunar. Framangreind dæmi eru þó undantekningar frá almennt góðum tæringareiginleikum stálsins í brúargerð í Bandaríkjunum. Rannsóknin leiddi það í ljós að mikilvægt er að frárennsliskerfi brúarinnar sé í lagi svo að vökvi standi ekki til lengri tíma á yfirborðinu. Einnig er mikilvægt að umhverfisaðstæður séu þannig að þétt ryðverndunarlag geti myndast, saltumhverfi eða svæði þar sem loftmengun er mikil henta t.d. ekki. Möguleiki er á því að verja berskjölduð svæði með málningu ef þörf á. Það er því ekkert sem stendur í vegi fyrir því að byggja brú úr hægtryðgandi stáli með fullnægjandi endingartíma og takmörkuðu viðhaldi ef mannvirkið er hannað með hliðsjón af niðurstöðum rannsókna á stálinu (Albrecht og Naeemi, 1984).

4 HÆGTRYGANDI STÁL Í BRÚARGERÐ

Í dag er aðalnotkunarsvið hægtryðgandi stáls erlendis við brúargerð, en kostir þess að nota það fremur en hefðbundið smíðastál eru þó nokkrir og eru þeir helstu listaðir upp í töflu 2 hér að neðan.

TAFLA 2 Kostir þess að nota hægtryðgandi stál (Corus Construction & Industrial, 2005)

VIÐHALD	Reglubundin skoðun og hreinsun ætti að vera eina viðhaldið sem þarf til að tryggja að brúin haldi viðunandi ástandi. Hentar því vel þar sem aðgengi er erfitt eða hættulegt og þar sem nauðsynlegt er að lágmarka framtíðarröskun.
UPPHAFLEGUR KOSTNAÐUR	Kosnaður við byggingu á hægtryðgandi stálbrúm er a.m.k. 5% lægri miðað við venjulegt málað stál.
LÍFSTÍMAKOSTNAÐUR	Lágmarks framtíðarviðhald veldur því að viðhaldskostnaður, ásamt óbeinum kostnaði vegna tafa á umferð er haldið í algjöru lágmarki. Sparnaður til framtíðar er því töluvert meiri en 5%.
BYGGINGAHRÆÐI	Framkvæmdartími er styttri þar sem komist er hjá allri málun á stálinu.
ÚTLIT	Það er skoðun margra, þá sérstaklega arkitekta, að ryðgað útlit stálsins sé afar aðlaðandi. Þykir það falla einstaklega vel að grænni náttúrunni.
UMHVERFIÐ	Umhverfisvandamál tengd losun rokgjarnra lífrænna efna-sambanda, VOC, úr málningu, sem er notuð sem tæringar-vörn á hefðbundið stál, eru lágörkuð.
ÖRYGGI	Heilsu- og öryggisvandamál tengd upphafs málun brúar-innar eru útilokuð ásamt því að áhættan við framtíðar-viðhald er lágörkuð.

5 MANNVIRKI ÚR HÆGTRYÐGANDI STÁLI

5.1 Erlendis

Talsverða reynslu er að finna af notkun hægtryðgandi stáls í berandi mannvirki erlendis. Löndin eru um allan heim á svæðum með mismunandi loftslag, í Suður- og Norður Ameríku, Evrópu og Asíu. Reynslan innan ákveðinna svæða er þó ekki einsleit og dæmi eru um að mannvirki úr hægtryðgandi stáli hafi verið tekin úr notkun 25 árum eftir byggingu vegna tæringar á svæðum þar sem talið var að heppilegt væri að nota stálið. Til dæmis var leikvangurinn *Omni Coliseum*, sem byggður var árið 1972 í Atlanta, rifinn árið 1997 vegna skemmda í hægtryðgandi stálinu. Raka loftslagið í Atlanta olli því að stálið hætti aldrei að ryðga og mynduðust stórir bollar í það. Svipaða sögu er að segja af leikvanginum *Aloha Stadium* á Hawaii sem byggður var árið 1975. Þar var það umhverfi hlaðið sjávarsalti sem olli því að stálið hætti aldrei að ryðga. Leikvangurinn var þó ekki rifinn heldur var ráðist í miklar og kostnaðarsamar viðgerðir árið 2008 og er leikvangurinn enn notaður í dag. Mörg önnur dæmi sýna hins vegar að efnið hafi reynst vel í mannvirki, þá einkum brýr, með góða endingu með tilliti til tæringar (Aramendia o.fl., 2015).

Hægtryðgandi stál hefur verið vinsælt efni í burðarvirki brúa í Bretlandi í þó nokkurn tíma. Efnið hefur verið notað í fjölmargar brýr í vegakerfi landsins með almennt góðum árangri. Helsta markmið þar í landi með notkun efnisins virðist vera að brúin falli sem best inn í umhverfið og að framtíðar viðhaldi sé haldið í lágmarki. Helstu vandamálín sem upp hafa komið þar í landi eru þegar brýr hafa staðið of nálægt sjó eða mistök í hönnun, þá einna helst frárennsliskerfi, þannig að vatn stendur á yfirborði stálsins og veldur aukinni staðbundinni tæringu. Einnig hefur salt sem notað er við afísingu vega valdið vandamálum en það er þá yfirleitt einnig tengt einhverskonar leka eða galla í hönnun. Dæmi um brýr úr þessu efni þar í landi eru t.d. *Lincluden Bridge* og *Slochd Beag Bridge* í Skotlandi, *Biggleswade Bridge*, *Doveridge Bridge*, *River Eden Bridge* og *Shiremoor Bypass Bridge* í Englandi ásamt fjölmörgum öðrum. Sjá myndir 6 - 9 (Corus Construction & Industrial, 2005).



MYND 6 *Biggleswade Bridge* í Englandi (Dolling, 2012a)



MYND 7 *Shiremoor Bypass* í Englandi (Dolling, 2012b)



MYND 8 River Eden Bridge í Englandi (Dolling, 2012c)



MYND 9 Slochd Beag Bridge í Skotlandi (Google Maps, 2009)

Shanks Millennium Bridge liggur yfir ána Nene í Englandi og tengir saman Peterborough og Whittlesey. Brúin er ætluð hjólandi og gangandi ásamt því að fólki á hestum á einnig þar leið um. Hún var hönnuð og smíðuð af *Whitby Bird & Partners* árið 2000 og er burðarvirki hennar úr hægtryðgandi stáli. Hönnun brúarinnar miðar að því að lágmarka truflun á fuglalífi á svæðinu og er stálið að hluta til framleitt úr endurunnum málm. Hægtryðgandi stálið hefur reynst vel í brúnni hingað til og hafa engin vandamál er varða það komið upp. Brúin er einstaklega fögur og þykir ryðgað stálið falla vel inn í dreifbýlt umhverfið, myndir 10 og 11, og hefur hún verið tilnefnd til þó nokkurra verðlauna (British Constr. Steelwork Association, 2001).



MYND 10 *Shanks Millennium Bridge* að vetri til (Dowse, 2012)



MYND 11 *Shanks Millennium Bridge* að sumri til (Humphrey, 2012)

Þrátt fyrir að hægtryðgandi stál hafi ekki reynst vel í fylkjum eins og Alaska, Kaliforníu og Ohio þá er í Bandaríkjunum mikill fjöldi mannvirkja, þá sérstaklega brúa, úr hægtryðgandi stáli. Ein þeirra er *The New River Gorge Bridge*, sem er bogabru fyrir akandi umferð og er staðsett í Appalásíu-fjöllum, Vestur Virginíufylki. Brúin er 924 m löng með 518 m langan boga úr hægtryðgandi stáli. Hún var byggð á árunum 1974 til 1977 og var hönnuð af *the Michael Baker Company*. Notkun hægtryðgandi stáls leiddi til nokkurra áskorana, þar á meðal að tryggja að rafsuður ryðguðu á sama hraða og önnur svæði stálsins. Enn þann dag í dag er brúin í góðu ásigkomulagi og árið 2013 var brúin skráð á *National Register of Historic Places* (National Park Service, 2014).

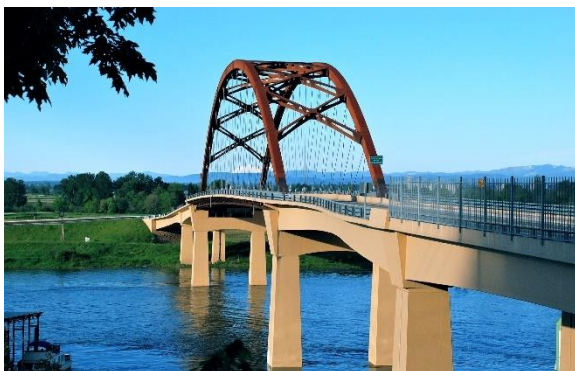
Brúin, *The Sauvie Island Bridge* í Portlandi, á vesturströnd Bandaríkjanna, er annað dæmi um bogabru úr hægtryðgandi stáli í Bandaríkjunum. Brúin var opnuð árið 2008 og tengir hún saman iðnaðarsvæði

og þéttbýli við dreifbýlið norður af Portlandi. Brúin var gerð úr hægtryðgandi stáli svo hún myndi falla vel inn í dreifbýla umhverfið (Multnomah County, e.d.).

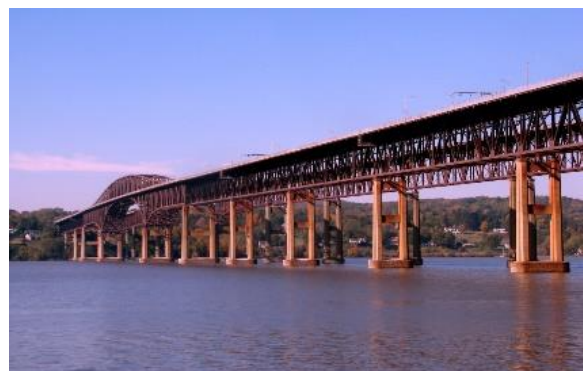
Önnur brú sem vert er að nefna er annar hluti *Beacon Bridge* brúarinnar, sem liggur yfir Hudsonfljót í New York fylki. Árið 1980 var brúin stækkuð úr tveimur akreinum yfir í fjórar. Nýja brúin, sem ber umferð til austurs, er 2394 m og var á þessum tíma talin sú lengsta sem smíðuð hafði verið úr CORTEN stáli. Eldri brúin var máluð svo hún myndi passa betur við ryðlit nýju brúarinnar (New York State Bridge Authority, e.d.). Allar þessar brýr eiga það sameiginlegt að hafa reynst vel þrátt fyrir það að vera í töluverðri nálægð við sjó.



MYND 12 *The New River Gorge Bridge* í Vestur Virginíu (McLaughlin, L., e.d.)



MYND 13 *The Sauvie Island Bridge* í Portland í Oregon fylki (Morgan, 2011)



MYND 14 *Beacon Bridge* í New York fylki (Wantman,S., 2005)

5.2 Hérlandis

Eins og áður hefur komið fram, þá er reynsla af hægtryðgandi stáli hérlandis af skornum skammti. Helst hefur það verið notað í klæðningar á byggingar eða í listaverk. Áhugi arkitekta fyrir efninu er verulegur en reynsluleysi varðandi notkun efnisins í burðarvirki hefur hamlað notkun þess verulega. Sem dæmi má nefna að horfið var frá því að nota hægtryðgandi stál við byggingu göngu- og hjólabrúa yfir Elliðaárósa. Var það gert vegna þess að framleiðandinn gat ekki tryggt endingu efnisins svo nálægt sjó og undir þessum veðurskilyrðum. Þess í stað var ákveðið að hefðbundið stál með yfirborðsmeðhöndlun í samræmi við kröfur Vegagerðarinnar (Reykjavíkurborg, 2013).

Dæmi um mannvirki þar sem hægtryðgandi stál hefur verið notað í klæðningar eru t.d. Kjarvalsstaðir í Reykjavík, Eldheimar í Vestmanneyjum, stjórnstöð OR í Norðlingaholti, Víkin Sjóminjasafn í Reykjavík, einbýlishús í Kópavogi, Hjúkrunarheimilið Mörk (stálið var einnig nota í blómaker á lóðinni), Borgartún 27, Norðurtúrn Smáralindar, fangelsið á Hólmsheiði, húsnæði hugbúnaðarfyrirtækisins TM Software í Kópavogi, landvarðabústaður í Blágiljum, Kaupvangur 3b á Egilsstöðum og Gullinbrú í Grafarvogi. Einnig notaði Hafsteinn Austmann efnið í skúlptúr sinn *Spenna*, sem stendur fyrir utan stjórnstöð Landsvirkjunar við Bústaðarveg (nú Veðurstofuna) og einnig í skúlptúrinn *Hljóðbylgja* sem stendur á horni Ármúla og Síðumúla. Myndir 15 – 22 sýna nokkur þeirra mannvirkja sem eru nefnd hér að ofan.



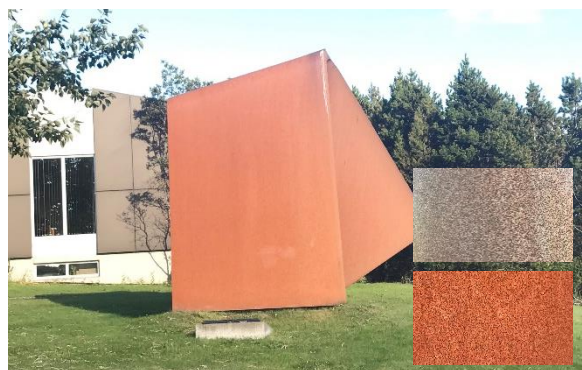
MYND 15 Kjarvalsstaðir í Reykjavík eru klæddir hægtryðgandi stáli, að hluta til hefur verið skipt um klæðningu (Efla, 2017).



MYND 16 Eldheimar í Vestmanneyjum eru klæddir hægtryðgandi stáli þrátt fyrir að andrúmsloftið þar sé með því saltasta á Íslandi (Efla, 2017).



MYND 17 Bílakjallari hjúkrunarheimilisins Mörk er klæddur hægtryðgandi stáli (Efla, 2017).



MYND 18 Skúlptúrin *Spenna* eftir Hafstein Austmann er alfarið úr hægtryðgandi stáli. Dekkri myndin er tekin inn í boga skúlptúrsins þar sem rigning skellur ekki beint á stálið (Efla, 2017).



MYND 19 Stjórnstöð OR í Norðlingaholti er að hluta klædd hægtryðgandi stáli (Efla, 2017).



MYND 20 Inngangur Sjóminjasafnsins í Reykjavík er klæddur hægtryðgandi stáli. Ryð úr hægtryðgandi stálinu hefur smitað steypuna fyrir neðan (Efla, 2017).



MYND 21 Veggur klæddur kortenstáli við Borgartún 27. Húsið er ekki í meira en 100 metra fjarlægð frá sjó (Efla, 2017).



MYND 22 Inngangur Norðurturns Smáralindar er klæddur hægtryðgandi stáli. Framkvæmdir eru enn í gangi (Efla, 2017).

Samkvæmt rannsókn Björns Marteinsonar og Jóns Sigurjónssonar (2002) er tæringarhraði hér á landi mjög breytilegur eftir landsvæðum. Tæringin var hröðust í Vestmannaeyjum en lægst í Kverkfjöllum og á Egilsstöðum. Tæringin er almennt minni inn í landi en eykst í átt til sjávar. Einnig var tæring meiri á Suður- og Vesturlandi en á Norður- og Austurlandi. Þetta má rekja til þess að mun meiri selta er í lofti við strönd á Suður- og Suðvesturlandi en annars staðar. Þrátt fyrir þessar niðurstöður hafa risið hús t.d. í Reykjavík og í Vestmanneyjum sem nýlega hafa verið klædd með hægtryðgandi stáli.

Gullinbrú í Grafarvogi var klædd hægtryðgandi stáli, mynd 23, þegar hún var tvöfölduð árið 1999. Nálægð hennar við sjó er töluverð og er tæring stálsins mikil og ójöfn líkt og mynd 24 sýnir.



MYND 23 Gullinbrú í Grafarvogi er klædd hægtryðgandi stáli (Efla, 2017).



MYND 24 Tæring klæðningarinnar er ójöfn (Efla, 2017).

Myndir 15 – 24 eru allar teknar af höfundum á tímabilinu júlí-ágúst 2017.

6 AÐFERÐ

6.1 Staðlar

Rannsóknin er framkvæmd í samræmi við eftirfarandi viðurkennda staðla:

- ÍST EN ISO 8565:2011 *Metals and alloys – Atmospheric corrosion testing – General requirements*
- ÍST EN ISO 8407:2009 *Corrosion of metals and alloys – Removal of corrosion products from corrosion test specimens*
- ÍST EN ISO 9223:2012 *Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – Classification, determination and estimation*

6.2 Framkvæmd

Gerðar verða tæringar- og veðrunarprófanir á hægtryðgandi stáli á 12 stöðum á landinu. Veðrunarsýni líkt og á mynd 27, hvert af stærðinni 100 × 150 × 2 mm, eru fest á sýnarekka sem enn standa eftir tilraun Björns Marteinsonar, Jóns Sigurjónssonar og fleiri á tæringu málma í andrúmslofti á Íslandi frá 1999 (sjá umfjöllun í kafla 7). Sýnarekkarnir eru á 15 mismunandi stöðum en í þessari rannsókn verða sýni sett upp á ellefu þeirra. Auk þess verða sett upp sýni í nýjan tæringarrekkka við Írafoss. Staðirnir eru valdir með tilliti til staðsetninga mælistöðva Veðurstofunnar svo unnt verði að greina samband tæringar og áhrifaþátta veðurfars. Einnig verður haft til hliðsjónar við val á staðsetningu hvar líklegast er að stálið verði notað. Staðsetningu rekkanna tólf má sjá á mynd 26 hér að neðan.

Þar sem tæringarrekkinn á Egilsstöðum hefur verið tekinn niður og finnst ekki, verður ónotaður rekki frá Vík í Mýrdal settur þar upp. Tæringarmælingar eru taldar mikilvægar á Egilsstöðum vegna staðsetningar á svæði langt frá sjó og með litla útkomu. Nýr rekki verður settur upp á Írafossi og verður notaður rekki sem verið hefur á Sigurðarskála í Kverkfjölum og tekinn verður niður. Tæringarmælingar á Írafossi eru mikilvægar því þar hafa verið gerðar mælingar á salti í úrkomu um langt árabíl. Einnig er mikilvægt að mæla tæringu í meiri fjarlægð frá sjó því þar eru mestar líkur á að hægtryðgandi stál verði notað. Ekki er víst að hægt sé að setja upp sýni á Siglufirði þar sem óvíst um afdrif tæringarrekkans þar.



MYND 25 Tæringarrekki á Sigurðarskála í Kverkfjölum (mynd af netinu, www.photo.is).



MYND 26 Staðsetningar sýnarekka á landinu (Google Maps, 2017).

Sýnin eru af tegundinni *Weathering 355* og er flutt inn frá framleiðandanum SSAB sem er í Svíþjóð. Vottuð efnasamsetning sýnanna sem notuð voru í þessari rannsókn er sýnd í töflu 3.

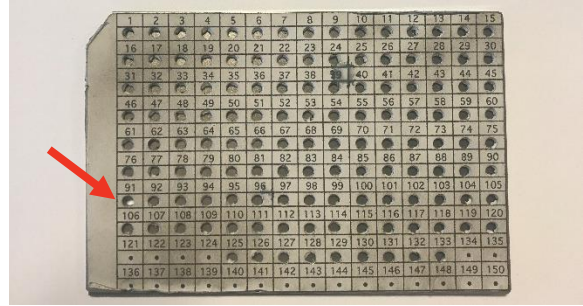
TAFLA 3 Efnasamsetning sýnanna sem notuð eru í þessari rannsókn

TEGUND	C MAX %	Si MAX %	Mn MAX %	P %	S MAX %	Al _{TOT} MIN %	Cr %	Cu %	Ni MAX %
Weathering 355	0,12	0,75	1,0	0,06-0,15	0,030	0,020	0,3-1,25	0,25-0,55	0,70

Í staðlinum ÍST EN ISO 9223 er þess krafist að sýnin séu láti standa í a.m.k. eitt ár áður en fyrstu niðurstöður liggja fyrir. Einnig segir í honum að æskilegur fjöldi sýna fyrir hverja mælingu sé ekki minni en þrjú. Verða því gerðar mælingar eftir 1, 3, 5 og 10 ár og tvö til þrjú sýni verða fyrir hvern veðrunartíma á hverri staðsetningu. Átta eða tólf sýni af hægtryðgandi stáli verða því fest á hvern rekka í byrjun rannsóknarinnar. Alls verða þetta 120 veðrunarsýni og verða þau öll kyrfilega merkt með því að bora göt á ákveðinn stað á sýninu. Lausnalykill, líkt og á mynd 28, verður svo notaður til að lesa út númer. Öll sýnin eru vigtuð eftir að borað var í þau á vigt með nákvæmni upp á þrjá aukastafi, mynd 29. Við alla meðhöndlun á sýnum voru notaðir hanskar líkt og fram kemur í staðli. Að þessu loknu voru sýnin sett upp.



MYND 27 Merkt Weathering 355 sýni



MYND 28 Lausnalykillinn lagður ofan á sýnið, ef vel er að gáð, má sjá að sýnið á mynd 27 er númer 91



MYND 29 Vigtun og skráning sýna

Sýnin eru fest með nælon töppum á berandi krossviðarplötu, þ.a. fjarlægð milli sýnis og krossviðar er um 17 mm og eru 15 mm milli sýna. Sýnin eru í 3 til 4 m hæð frá jörðu, halla öll 45° frá lóðréttu og verður öllum sýnarekkum snúið þannig að þeir snúi í átt í sjávar. Áður en nýju sýnin eru fest er þó byrjað á því að fjarlægja sýnin frá árinu 1999 svo hægt sé að rannsaka tæringu þeirra. Á myndum 30 og 31 má sjá sýnarekkana sem notaðir verða, eldri sýni verða tekin niður og þau nýju sett upp í þeirra stað. Á hverjum rekka verða átta eða tólf sýni af hægtryðgandi stáli þannig að hægt verður að taka niður sýni til skoðunar. Myndir 32 og 33 sýna sýnarekka með hægtryðgandi stálsýnunum og uppsetningu þeirra í Bolungarvík.



MYND 30 Sýnarekkar við Veðurstofu Íslands í Reykjavík



MYND 31 Sýnarekkar við skrifstofu Rarik á Akureyri



MYND 32 Sýnarekki með 12 hægtryðgandi stálsýnum í Bolungarvík



MYND 33 Uppsetning sýna í Bolungarvík. Sýnarekka var snúið í átt til sjávar

Rannsóknin hefst sumarið/haustið 2017 og liggja fyrstu niðurstöður fyrir í lok sumars 2018. Verða þá sýnin eftir eins árs veðrun tekin niður og tæringin mæld. Tæringarhraðinn er samkvæmt staðli mældur sem þyngdarbreyting sýnis deilt með flatarmáli þess að teknu tilliti til allra hliða. Áður en sýnin eru vigtuð verður ryð þeirra fjarlægt skv. ÍST EN ISO 8407, á þetta einnig við um meðhöndlun sýna frá árinu 1999. Verða niðurstöður prófana tengdar við veðurathuganir Veðurstofu Íslands og þá sérstaklega seltumælingar sem framkvæmdar eru í Reykjavík og á Írafossi. Verður þetta ferli síðan endurtekið fyrir 3, 5 og 10 ára veðrun.

Tæring á hægtryðgandi stáli er mjög háð því hvernig stálflöturinn snýr við veðurfari. Til þess að þétt patína myndist á yfirborði þarf flöturinn helst að verða fyrir reglulegri skolun frá regni. Mengunarefni í lofti svo sem salt og brennisteinn geta komið í veg fyrir að patínan þéttist ef þau setjast á yfirborðið.

Það gerist þá helst þar sem flöturinn er í vari fyrir rigningu. Einnig getur viðvarandi raki komið í veg fyrir myndun patínu.

Sú uppsetning sýna sem notuð er í þessari rannsókn er óheppileg því hún gefur ekki sömu stöðu á báðum hliðum sýna gagnvart veðurfari. Það eru því miklar líkur á að tæring verði mismunandi eftir því hvor hliðin snýr upp í veðrið eða snýr niður að spjaldinu. Með þessari uppsetningu og aðferð við vigtun sýna fæst í raun meðaltæring á þessum tveimur hliðum. Þetta er sérlega bagalegt fyrir hægtryðgandi stál þar sem tæringin er mjög háð því hvort þétt patína myndast eða ekki. Hægt er að hluta til að komast framhjá þessum vanda með því að mæla þykkt patínunnar áður en sýnin eru hreinsuð, en nokkuð ákveðið samband er á milli tæringar yfirborðs og þykktar á ryðinu eða patínunni á því (Urban, 2015). Nákvæmari aðferð væri að hylja aðra hlið sýnisins, þ.e. þá sem snýr niður, þannig að tæring verði einungis á þeirri hlið sem snýr upp og á móti ríkjandi vindátt af hafi. Slíkt krefst hins vegar fleiri sýna, eða meiri vinnu við undirbúning sýna. Athugað verður hvort hægt sé að bæta við slíkri mælingu á fáum völdum mælistöðum á síðari stigum.

Í eftirfarandi töflu er yfirlit yfir uppsetningu sýna. Þar er sýnd staðsetning sýnanna, uppsetningartími, fjöldi sýna á hverjum stað og númer þeirra. Auðir dálkar þýða að sýnum hefur ekki enn verið komið upp.

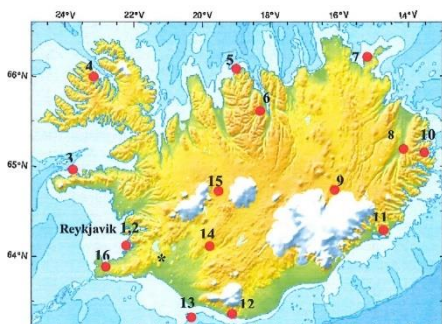
TAFLA 4 Uppsetning veðrunarsýna úr hægtryðgandi stáli 2017

Nr.	Staðsetning	Sýni sett upp	Fjöldi sýna	Nr. sýna
1	Bolungarvík, lóð Orkubúsins	10.8.2017	12	85-96
2	Ólafsvík, lóð Rarik	23.8.2017	12	37-48
3	Reykjavík, við Veðurstofuna	16.8.2017	12	1-12
4	Egilsstaðir		12	109-120
5	Írafoss		8	33-36, 105-108
6	Búrfell		8	53-60
7	Siglufjörður		8	97-104
8	Akureyri, lóð Rarik á Oddeyri	1.11.2017	12	13-24
9	Þórshöfn	30.10.2017	12	73-84
10	Höfn í Hornafirði, við kyndistöðina	6.10.2017	8	65-72
11	Vík í Mýrdal, við lóð Vegagerðarinnar	5.10.2017	8	49-52 og 61-64
12	Hveravellir, við veðurstöðina	28.9.2017	8	25-32

7 TÆRINGARRANNSÓKN FRÁ 1999

Heildstæð rannsókn á tæringu málma á Íslandi hófst árið 1999 með uppsetningu tæringarekka á 15 stöðum á landinu. Aðilar að rannsókninni voru Rannsóknarstofnun byggingariðnaðarins, Almenna Verkfræðistofnan, Verkfræðipjónusta Péturs Sigurðssonar og Raunvísindastofnun Háskólans. Jón Sigurjónsson hjá Rannsóknarstofnun byggingariðnaðarins fór með verkefnisstjórn verkefnisins. Til að fyrirhugaður árangur næðist var einnig leitað til fleiri aðila um stuðning. Þannig komu margir styrktar- og samstarfsaðilar að verkefninu: Rannís, Íbúðalánasjóður, Orkubú Vestfjarða, Rarik, Vegagerðin, Landsvirkjun, Áltak, Málning, Harpa, Sjöfn, Slippfélagið, Vírnet, Garðastál og Sindri.

Tæringarrekkar voru settir upp á 15 stöðum sem dreift var umhverfis landið og einnig inn til landsins til þess að ná til sem flestra veðursvæða. Tæringarrekkar voru settir upp á eftirtöldum stöðum: Reykjavík, Ólafsvík, Bolungarvík, Siglufirði, Akureyri, Þórshöfn, Egilsstöðum, Kverkfjöllum, Neskaupsstað, Höfn í Hornafirði, Vík í Mýrdal, Vestmannaeyjum, Búrfelli, Hveravöllum og Svartsengi. Sjá mynd.



Í alla rekka voru sett upp sýni af ómeðhöndluðu stáli, heitgalvanhúðuðu stáli, hreinu áli (1050 A) og veðrunarþolnu manganblönduðu áli (AlMg3). Þá voru á flestum stöðum sett upp sýni með stöðluðum málningarkerfum og var meiningin

að fylgjast með niðurbroti málningarinnar með FT-IR mælitækni. Á 6 stöðum var síðan einnig komið fyrir veðrunarsýnum frá samstarfsaðilum, bæði klæðningarsýnum (Áltak, Vírnet, Garðastál og Sindri) og máluðum sýnum frá málningarframleiðendum (Málning, Harpa, Sjöfn og Slippfélagið).

Sýni voru tekin niður úr veðrunarrekkunum eftir 1 ár, 3 ár og 5 ár og voru niðurstöðurnar birtar í vísindagreinum og í sérritum frá Rannsóknarstofnun byggingariðnaðarins. Markmiðið var að taka niður síðustu sýnin eftir 10 ár, þ.e. árið 2009, en það fórst fyrir af ýmsum ástæðum en þó sérstaklega vegna fjárskorts.

Niðurstöðum úr mælingum á tæringu fyrstu 5 ár tilraunarinnar hafa verið gerð góð skil, bæði í útgefnum fréttabréfum Rannsóknarstofnunar byggingariðnaðarins og í greinum í innlendum og erlendum tímaritum. Hér er yfirlit yfir útgefið efni með niðurstöðunum:

Björn Marteinsson og Jón Sigurjónsson (2002). *Tæring málma í andrúmslofti á Íslandi – Kortlagning tæringarhraða*. Í Ragnar Ragnarsson (ritstj.), *Árbók VFÍ TFÍ 2002* (bls. 229-235). Reykjavík: Verkfræðingafélag Íslands og Tæknifræðingafélag Íslands.

Marteinsson, Björn; J. Sigurjónsson (2002). *Corrosion of metals – mapping of the environment in Iceland*. Proc. 9th International Conference on Durability of Building Materials and Components 9DBMC, Brisbane, Australia, 17. – 21. March 2002.

Marteinsson, Björn; J. Sigurjónsson, P. Stefánsson, P. Sigurðsson (2004). *Atmospheric corrosion of metals in Iceland – three year results*. Proc. 13. Scandinavian Corrosion Congress, Reykjavík, Iceland, 18.-20. April 2004.

Marteinsson, Björn; J. Sigurjónsson, P. Stefánsson, P. Sigurðsson (2005). *Atmospheric corrosion of metals in Iceland – characteriation of the environment and five year results*. 10DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components. Lyon (France) 17.-20. April 2005.

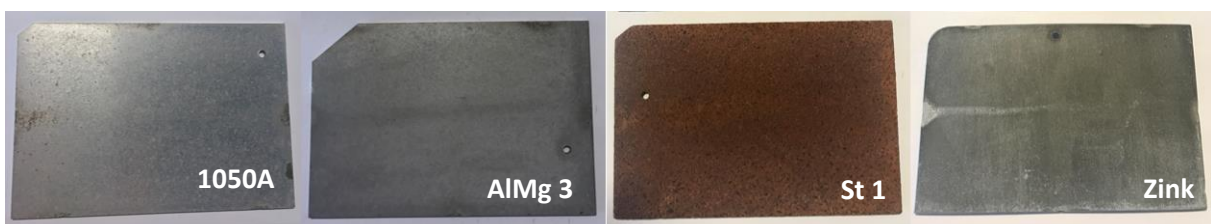
Jón Sigurjónsson (2001). *Tæring málma og æskileg tæringarvörn við íslenskar aðstæður– Lokaskýrsla verkefnisstjóra*. Skýrsla til Rannís og samstarfsaðila verkefnisins. Rb, September 2001.

Rannsóknarstofnun byggingariðnaðarins, Almenna verkfræðistofan og Verfræðipjónusta Péturs Sigurðssonar. Upplýsingabæklingar með niðurstöðum mælinga eftir eins árs prófanir og eftir þriggja ára prófanir.

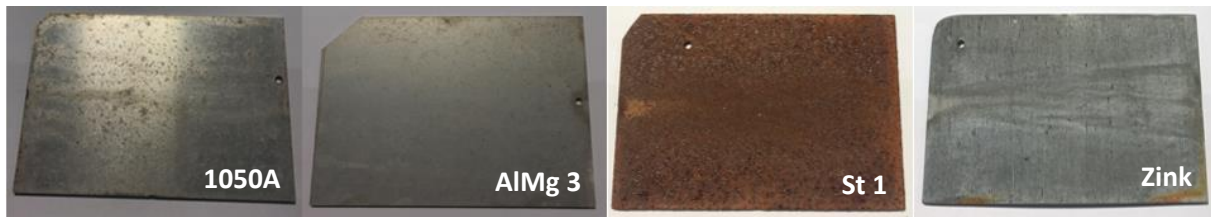
Núna, 18 árum eftir uppsetningu tæringarekkanna, hafa nokkrir þeirra verið teknir niður. Það á við um rekkana á Siglufirði, Egilsstöðum, Neskaupsstað, Vík í Mýrdal og Vestmannaeyjum. Í Vík voru rekkarnir teknir niður fyrir 2-3 árum með sýnunum á svo hægt var að ná sýnunum úr rekkunum óskemmdum. Tæringarekkarnir sem enn standa eru almennt í góðu standi og eru flest sýni sem taka átti niður eftir 10 ár ennþá í rekkunum í góðu ásigkomulagi.

Þegar ákveðið var að fara í rannsókn á tæringu á hægtryðgandi stáli og velja staði fyrir tæringarsýni lá beint við að skoða hvort nota mætti tæringarekkana frá 1999. Þá sparast mikill tími og fyrirhöfn auk þess sem tæringarekkar kosta allmikið fé í framleiðslu og uppsetningu. Er því hægt að koma upp sýnum á mun fleiri stöðum en ella. Fengið var leyfi frá verkefnisstjóra fyrra verkefnis, Jóni Sigurjónssyni, til að nota rekkana. Þá kom einnig upp sú hugmynd að taka niður 10 ára sýnin úr rekkunum núna eftir 18 ár, mæla tæringu þeirra og gefa niðurstöðurnar út. Þannig væri hægt að ljúka því rannsóknarverkefni og koma niðurstöðunum á framfæri þannig að þær nýttust við hönnun mannvirkja á Íslandi. Því hafa sýni í rekkunum sem taka átti niður eftir 10 ár verið tekin niður jafnóðum og ný sýni hafa verið sett upp og bíða þau nú eftir að vera hreinsuð, vigtuð og niðurstöðurnar birtar. Er vonast til að styrkir fái til að ljúka því verki innan árs.

Við fyrstu skoðun sýnanna, sem tekin hafa verið niður, má sjá að stálið hafði ryðgað töluvert, eins og við var að búast, en það vekur mikla athygli í hversu góðu lagi sínkið og álið virðist vera. Myndir 34 og 35 sýna ástand tæringarsýna frá Reykjavík og Bolungarvík eftir 18 ára útiveru.



MYND 34 Sýni sett upp í Reykjavík árið 1999.



MYND 35 Sýni sett upp á Bolungarvík árið 1999.

8 LOKAORÐ

Undirbúningsvinnu fyrir tæringarrannsóknina er lokið og sýnum hefur verið komið fyrir á flestum tæringarrekkum. Sýnin hafa verið vigtuð. Klárað verður í haust að koma öllum sýnum, 120 að tölu, fyrir í rekkum.

Tímaáætlun næstu ára er eftirfarandi:

- | | |
|-------------|---|
| Sumar 2018: | Sýni tekin til mælinga einu ári frá uppsetningu og veðurfarsgögnum fyrir tímabilið safnað. Töluleg úrvinnsla gagna. Áfangaskýrsla 2. |
| Haust 2018 | Niðurstöður settar fram í grein fyrir Verktækni, tímariti VFÍ/TFÍ og kynning á rannsóknarráðstefnu Vegagerðarinnar. |
| Sumar 2020 | Sýni tekin til mælinga þremur árum frá uppsetningu og veðurfarsgögnum fyrir tímabilið safnað. Töluleg úrvinnsla gagna. Áfangaskýrsla 3. |
| Sumar 2022 | Sýni tekin til mælinga fimm árum frá uppsetningu og veðurfarsgögnum fyrir tímabilið safnað. Töluleg úrvinnsla gagna. Áfangaskýrsla 4. |
| Haust 2027 | Sýni tekin til mælinga tíu árum frá uppsetningu. Uppfærðar niðurstöður settar fram í grein fyrir Verktækni, tímariti VFÍ/TFÍ og kynning á rannsóknarráðstefnu Vegagerðarinnar. Lokaskýrsla. |

Áætlunin nær til 10 ára en ætlunin er að í lok sumars 2027 verði seinustu sýnin tekin niður til skoðunar, tíu árum frá uppsetningu. Unnið verður úr þeim gögnum ásamt því að skoða mælingar fyrri ára og heildstæð lokaskýrsla sett fram.

Mögulegur ávinningur af notkun hægtryðgandi stáls í brúargerð er tvíþættur. Umtalsverður kostnaður sparast á framkvæmda- og líftíma brúarinnar þar sem ekki þarf að yfirborðsmeðhöndla, þ.e. ryðverja og mála stálið. Um leið minnkar umhverfisfótspor mannvirkisins vegna þessa efnissparnaðar. Miklar vonir eru bundnar við það að rannsókn þessi muni veita betri innsýni inn í það hvort og þá hvar hægtryðgandi stál hentar á Íslandi. Niðurstöður munu nýtast við mikilvæga ákvarðanatöku við hönnun brúa héraendis og vera verkfæri fyrir hönnuði, framkvæmdaraðila og eigendur brúa á Íslandi.

9 HEIMILDIR

Albrecht, P. og Naeemi, A. H. (1984). *Performance of weathering steel bridges*. Washington D.C., Bandaríkin: Transportation Research Board.

Aramendia, J., Gomez-Nubla, L., Castro, K. og Madariaga, J.M. (2015). *Structural and chemical analyzer system for the analysis of deposited airborne particles and degradation compounds present on the surface of outdoor weathering steel objects*. *Microchemical Journal*, 123, 267-275. Sótt 19. júlí af <https://doi.org/10.1016/j.microc.2015.07.004>

Björn Marteinnsson og Jón Sigurjónsson (2002). *Tæring málmna í andrúmslofti á Íslandi – Kortlagning tæringarhraða*. Í Ragnar Ragnarsson (ritstj.), *Árbók VFÍ TFÍ 2002* (bls. 229-235). Reykjavík: Verkfræðingafélag Íslands og Tæknifræðingafélag Íslands.

Björn Marteinnsson, J. Sigurjónsson, P. Stefánsson, P. Sigurðsson (2005). *Atmospheric corrosion of metals in Iceland – characteriation of the environment and five year results*. 10DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components. Lyon (France) 17.-20. April 2005.

British Constructional Steelwork Association. (2001). *Shanks Millennium Bridge, Near Peterborough*. Sótt 17. júlí af <http://www.steelconstruction.org/design-awards/2001>

Corus Construction & Industrial. (2005). *Weathering steel bridges*. Stockport, Bretland: Orchard Corporate Ltd.

Damgaard, N., Walbridge, S., Hansson, C. og Yeung, J. (2010). Corrosion protection and assessment of weathering steel highway structures. *Journal of Constructional Steel Research*, 66, 1174-1185.

Dolling, C. (2012a). *Biggleswade Bridge*. [Ljósmynd]. Biggleswade, England. Sótt 31. júlí af http://www.steelconstruction.info/File:Biggleswade_Bridge.jpg

Dolling, C. (2012b). *Shiremoor Bypass*. [Ljósmynd]. Shiremoor, England. Sótt 31. júlí af http://www.steelconstruction.info/File:Shiremoor_Bypass-1.JPG

Dolling, C. (2012c). *Temple Sowerby Bypass*. [Ljósmynd]. Temple Sowerby, England. Sótt 31. júlí af http://www.steelconstruction.info/File:Temple_Sowerby_Bypass.jpg

Dowse, J. (2012). *Shanks Millennium Bridge over frozen Nene*. [Ljósmynd]. Peterborough, England. Sótt 31. júlí af <http://www.geograph.org.uk/photo/2801813>

Google Maps. (2009). *Skotland, street view*. [Ljósmynd]. Tomatin, Skotland. Sótt 31. júlí af <https://www.google.is/maps/>

Google Maps. (2017). *Ísland*. [Kort]. Ísland. Sótt 20. júlí af <https://www.google.is/maps/>

Humphrey, R. (2012). *The Millennium Bridge near Peterborough*. [Ljósmynd]. Peterborough, England. Sótt 31. júlí af <http://www.geograph.org.uk/photo/3221709>

Krivy, V., Urban, V. og Kreislova, K. (2015). *Development and failure of corrosion layers on typical surfacs of weathering steel bridges*. Engineering Failure Analysis, 69, 147-160.

McLaughlin, L. (e.d.). *The New River Gorge Bridge*. [Ljósmynd]. Vestur Virginía, Bandaríkin. Sótt 31. júlí af <https://www.nps.gov/neri/planyourvisit/nrgbridge.htm>

Misawa, T., Kyuno, Y., Suëtaka, W. og Shimodaira, S. (1971). *The mechanism of atmospheric rusting and the effect of Cu and P on the rust formation of low-alloy steels*. Corrosion Science, 11, 35-48.

Morcillo, M., Chico, B., Díaz, I., Cano, H. og de la Fuente, D. (2013). *Atmospheric corrosion data of weathering steels. A review*. Corrosion Science, 77, 6-24.

Morcillo, M., Díaz, I., Chico, B., Cano, H. og de la Fuente, D. (2014). *Weathering steels: From empirical development to scientific design. A review*. Corrosion Science, 83, 6-31.

Morgan, S. (2011). *Sauvie Island Bridge (second)*. [Ljósmynd]. Portland, Bandaríkin. Sótt 31. júlí af [https://en.wikipedia.org/wiki/Sauvie_Island_Bridge#/media/File:Sauvie_Island_Bridge_\(second\).jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Sauvie_Island_Bridge#/media/File:Sauvie_Island_Bridge_(second).jpg)

Multnomah County. (e.d.). *Sauvie Island Bridge*. Sótt 18. júlí af <http://www.multco.us/bridges/sauvie-island-bridge>

National Park Service. (2014). *New River Gorge Bridge*. Sótt 18. júlí af <http://www.nps.gov/neri/planyourvisit/nrgbridge.htm>

New York State Bridge Authority (e.d.). *Beacon Bridge*. Sótt 13. Nóvember 2017 af http://www.nysba.state.ny.us/bridgepages/NBB/NBBpage/NYSWeb_nbb_page_NoLogo.htm

Reykjavíkurborg. (2013). *Ánægja með nýtt kennileiti á Geirsnefi*. Sótt 20. júlí af http://eldri.reykjavik.is/desktopdefault.aspx/tabid-757/521_read-37140/

SSAB. (2017). *SSAB Weathering 355 – Data sheet 2355*. Sótt 14. júlí af <http://www.ssab.com>

Urban, V., Krivy, V. og Kreislova, K. (2015). *The Development of Corrosion Processes on Weathering Steel Bridges*. Procedia Engineering, 114, 546-554.

Wantman, S. (2005). *Newburgh-Beacon Bridge 2*. [Ljósmynd]. New York, Bandaríkin. Sótt 31. júlí af https://en.wikipedia.org/wiki/Newburgh%E2%80%93Beacon_Bridge#/media/File:Newburgh-Beacon_Bridge_2.jpg

Viðauki A UPPHAFSPYNGDIR SÝNA

TAFLA A.1.

	Sýni nr.	Upphafspyngd [g]		Sýni nr.	Upphafspyngd [g]
Reykjavík	1	235,456	Ólafsvík	37	236,990
	2	235,695		38	235,235
	3	235,066		39	234,726
	4	234,025		40	234,492
	5	236,162		41	234,541
	6	236,513		42	236,773
	7	236,411		43	237,038
	8	233,269		44	236,066
	9	237,211		45	233,242
	10	237,021		46	238,042
	11	237,270		47	239,004
	12	233,680		48	240,299
Akureyri	13	233,840	Vík í Mýrdal	49	236,333
	14	234,237		50	236,388
	15	236,303		51	235,726
	16	235,305		52	237,124
	17	235,129	Búrfell	53	237,331
	18	235,242		54	237,378
	19	235,394		55	235,228
	20	234,431		56	231,979
	21	234,496		57	235,316
	22	236,123		58	235,382
	23	235,545		59	236,016
	24	236,447		60	234,890
Hveravellir	25	233,240	Vík í Mýrdal	61	238,015
	26	236,759		62	235,927
	27	237,081		63	236,576
	28	237,678		64	236,615
	29	232,520	Höfn	65	236,464
	30	236,236		66	234,682
	31	236,419		67	235,366
Írafoss	32	235,834	68	235,754	
	33	237,197	69	236,456	
	34	237,014	70	236,136	
	35	228,923	71	236,932	
	36	235,945	72	236,368	

	Sýni nr.	Upphafsbýngd [g]		Sýni nr.	Upphafsbýngd [g]
Þórshöfn	73	236,275	Siglufjörður	97	236,459
	74	233,209		98	237,071
	75	235,480		99	236,967
	76	236,386		100	237,165
	77	237,664		101	236,804
	78	237,829		102	235,925
	79	236,860		103	236,248
	80	236,737		104	236,080
	81	233,738	Írafoss	105	236,522
	82	237,991		106	236,643
	83	237,897		107	236,926
	84	237,888		108	233,391
Bolungarvík	85	237,469	Egilsstaðir	109	236,505
	86	236,490		110	233,990
	87	234,992		111	232,706
	88	236,802		112	236,286
	89	236,576		113	236,338
	90	236,677		114	236,726
	91	233,770		115	236,292
	92	235,652		116	236,339
	93	236,035		117	235,685
	94	235,122		118	236,419
	95	235,844		119	236,496
	96	236,663		120	236,242

Viðauki B STAÐSETNINGAR SÝNA Á SÝNAREKKUM

TAFLA B.1.

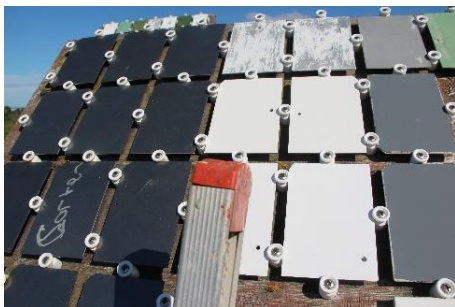
Staður: Reykjavík

Sett upp af: Baldvin Einarsson og Kristín Helgadóttir

Dagsetning: 16.08.17

Athugasemdir: Sýni 1-12. Rekki snýr í suður.

ár (2018)	3	2	1				
3 ár (2020)	6	5	4				
5 ár (2022)	9	8	7				
10 ár (2027)	12	11	10				



TAFLA B.2.**Staður: Akureyri**

Sett upp af: Friðrika Marteinsdóttir

Dagsetning: 1.11.2017

Athugasemdir: Sýni 13-24. Rekka snúið í norður

	21	22	23	24		
	17	18	19	20		
	13	14	15	16		

1 ár (2018) 3 ár (2020) 5 ár (2022) 10 ár (2027)



TAFLA B.3.**Staður: Egilsstaðir****Sett upp af:****Dagsetning:****Athugasemdir: Sýnarekki frá Vík í Mýrdal settur upp. Snýr út að Héraðsflóa.**

1 ár (2018)**3 ár (2020)****5 ár (2022)****10 ár (2027)**

TAFLA B.4.**Staður: Ólafsvík**

Sett upp af: Baldvin Einarsson

Dagsetning: 23.8.2017 kl 10:00

Athugasemdir: Nr. 37-48. Rekka snúið til norðurs.

48	44	40				1 ár (2018)
47	43	39				3 ár (2020)
46	42	37?				5 ár (2022)
45	41	38?				10 ár (2027)



TAFLA B.5.**Staður: Búrfell**

Sett upp af:

Dagsetning:

Athugasemdir: Sýni 53-60. Sýnarekki snýr í suður.

53	54	55	56			
57	58	59	60			

1 ár (2018)

3 ár (2020)

5 ár (2022)

10 ár (2027)

TAFLA B.6.**Staður: Höfn í Hornafirði**

Sett upp af: Baldvin Einarsson

Dagsetning: 6.10.2017

Athugasemdir: Sýni nr. 65-72

	65	66				1 ár (2018)
	67	68				3 ár (2020)
	69	70				5 ár (2022)
		72		71		10 ár (2027)



TAFLA B.7.**Staður: Þórshöfn**

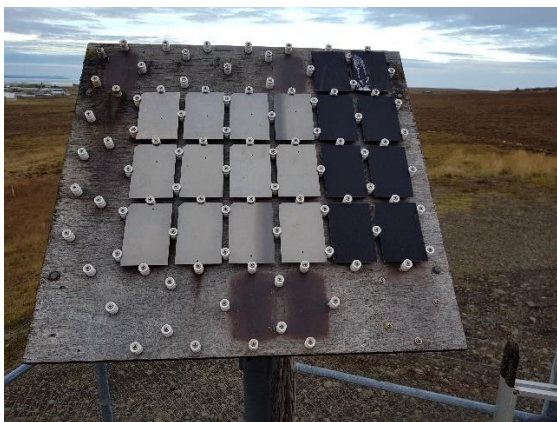
Sett upp af: Friðrika Marteinsdóttir

Dagsetning: 30.10.2017

Athugasemdir: Sýni 73-84. Rekka snúið til norðurs.

					Vírnet 1999	Vírnet 1999
	84	83	82	81	Vírnet 1999	Vírnet 1999
	80	79	78	77	Vírnet 1999	Vírnet 1999
	76	75	74	73	Vírnet 1999	Vírnet 1999

1 ár (2018) 3 ár (2020) 5 ár (2022) 10 ár (2027)



TAFLA B.8.**Staður: Bolungarvík**

Sett upp af: Baldvin Einarsson

Dagsetning: 10.08.2017 (kl 11:00-12:00). Rekka snúið til norðurs.

Athugasemdir: Sýni 85-96

87	90	92*	94**	96**		
86	89	91*	93*	95**		
85	88					

1 ár (2018)

3 ár (2020)

5 ár (2022)*

10 ár (2027)**



TAFLA B.9.

Staður: Írafoss

Sett upp af:

Dagsetning:

Athugasemdir: Sýni 33-36, 105-108. Nýr rekki settur upp á inntaksmannvirkjum

1 ár (2018)

3 ár (2020)

5 ár (2022)

10 ár (2027)

TAFLA B.10.

Staður: Siglufjörður

Sett upp af:

Dagsetning:

Athugasemdir: Sýni 97-104

Sýnarekki finnst ekki enn

1 ár (2018)

3 ár (2020)

5 ár (2022)

10 ár (2027)

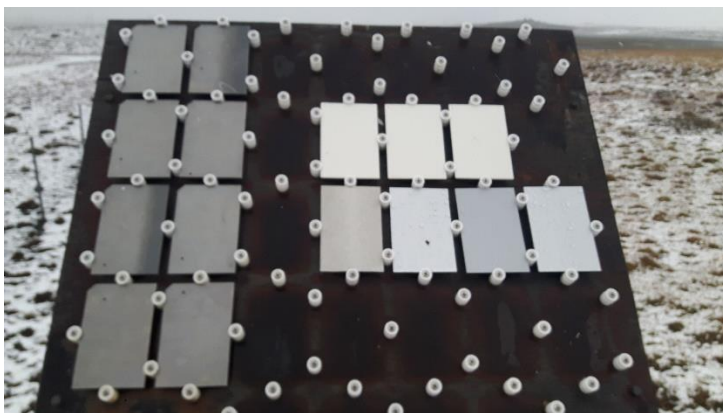
TAFLA B.11.**Staður:** Hveravellir

Sett upp af: Baldur Bragason, Veðurstofunni

Dagsetning: 28.9.2017

Athugasemdir: Sýni nr. 25-32. Sýnarekki snýr til suðurs. Ónúmeruð sýni eru frá 1999.

26	25					1 ár (2018)
27	30		Sjöfn	Sjöfn	Sjöfn	3 ár (2020)
29	28		Áltak	Áltak	Áltak	Áltak 5 ár (2022)
32	31					10 ár (2027)



TAFLA B.12.**Staður: Vík í Mýrdal**

Sett upp af: Baldvin Einarsson

Dagsetning: 5.10.2017

Athugasemdir: Sýni nr. 49-52 og 61-64. Sýnarekki snýr í suður. Önnur sýni frá 1999.

63	64					1 ár (2018)
61	62					3 ár (2020)
52	49?					5 ár (2022)
50	51					10 ár (2027)

