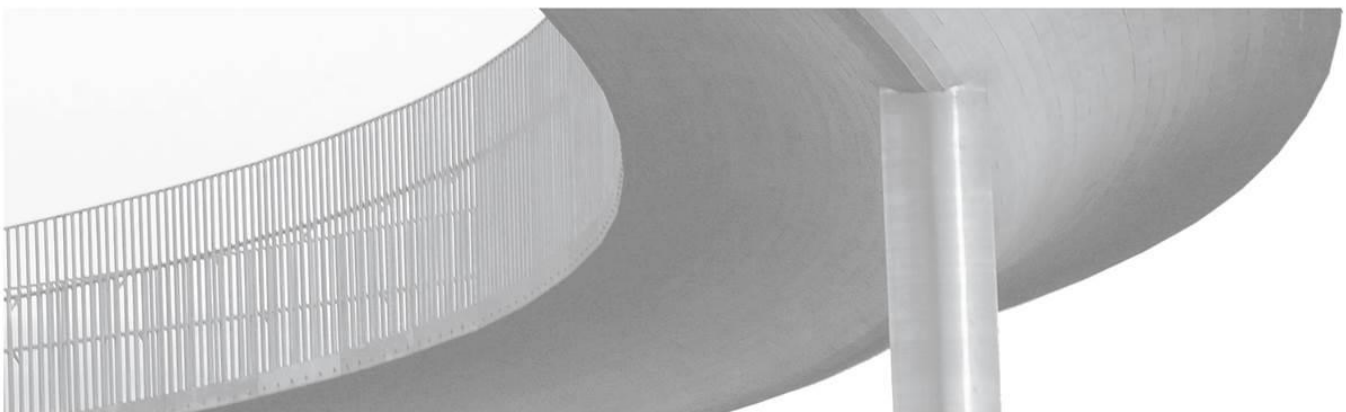




## HÆGRYÐGANDI STÁL

Áfangaskýrsla 4

18.11.2021





## SKÝRSLA – UPPLÝSINGABLAÐ

### SKJALALYKILL

2970-244-SKY-004-V01

### SKÝRSLUNÚMÉR / SÍÐUFJÖLDI

2970-244-SKY-004/34

### VERKEFNISSTJÓRI / FULLTRÚI VERKKAUPA

### VERKEFNISSTJÓRI EFLA

Baldvin Einarsson

### LYKILORÐ

Hægryðgandi stál  
Weathering steel  
Corten stál

### STAÐA SKÝRSLU

- Drög  
 Drög til yfirlstrar  
 Lokið

### DREIFING

- Opin  
 Dreifing með leyfi verkkaupa  
 Trúnaðarmál

### TITILL SKÝRSLU

Hægryðgandi stál, Áfangaskýrsla 4

### VERKHEITI

Hægryðgandi stál

### VERKKAUPI

Rannsóknarsjóður Vegagerðarinnar

### HÖFUNDUR

Baldvin Einarsson

### ÚTDRÁTTUR

Í þessari fjórðu áfangaskýrslu um hægryðgandi stál er fjallað um nokkrar hliðar á notkun stálsins við mannvirkjagerð og sérstaklega með áherslu á brúargerð.

Fjallað er um nýjan stálstaðal fyrir hægryðgandi stál og um val á stáli til brúargerðar.

Þá er kafli um myndun verndandi ryðhúðar á stálinu og hvað getur komið í veg fyrir að verndarhúðin myndist. Settar eru fram nokkrar ráðleggingar um hönnun á brúm úr hægryðgandi stáli, hvað ber að varast og hvernig staðið skal að smíði og uppsetningu þeirra.

Loks er kafli um hagkvæmni þess að nota hægryðgandi stál í stað venjulegs málaðs stál í brýr.

## ÚTGÁFUSAGA

NR.	HÖFUNDUR	DAGS.	RÝNT	DAGS.	SAMÞYKKT	DAGS.
01	Baldvin Einarsson Frumútgáfa	16.11.21	Vigdís Bjarnadóttir	17.11.21	Baldvin Einarsson	18.11.21
02	Höfundur útgáfu Lýsing	29.12.16	Nafn rýnis	30.12.16	Nafn samþykktaraðlila	31.12.16
03	Höfundur útgáfu Lýsing	29.12.16	Nafn rýnis	30.12.16	Nafn samþykktaraðlila	31.12.16
04	Höfundur útgáfu Lýsing	29.12.16	Nafn rýnis	30.12.16	Nafn samþykktaraðlila	31.12.16

## SAMANTEKT

Í þessari fjórðu áfangaskýrslu um hægryðgandi stál er fjallað um nokkrar hliðar á notkun stálsins við mannvirkjagerð og sérstaklega með áherslu á brúargerð.

Í nýrri útgáfu af staðli fyrir hægryðgandi stál (e. Weathering steel), ÍST EN 10025-5, er stál nú skilgreint með höggstyrk við -50°C hita. Það gerir okkur kleift að nota stál í brýr á norðlægum slóðum og uppfylla kröfur í Veghönnunarreglum Vegagerðarinnar. Í skýrslunni, kafla 2, er fjallað um kröfur staðalsins og í 3. kafla hvernig höggstyrkur er valinn í samræmi við hönnunarstaðalinn, ÍST EN 1993-1-10.

Þá er 4. kafli um myndun verndandi ryðhúðar á stálinu og hvað getur komið í veg fyrir að verndarhúðin myndist. Þar er helst að nefna að klór í loftbornu salti og iðnaðarmengun koma í veg fyrir myndun þetta hluta húðarinnar. Hægryðgandi stál hentar því illa í sjávarumhverfi, þar sem viðvarandi raki er til staðar eða þar sem brennisteinsmengun er mikil. Það setur notkun á hægryðgandi stáli skorður hér á landi þar sem sjóroki er viðvarandi nálægt ströndinni og brennisteinsmengun er í nágrenni við háhitasvæði og eldfjöll. Það er einmitt megintilgangur þessarar rannsóknar á hægryðgandi stáli að afla upplýsinga um tæringu á því við íslenskar aðstæður.

Í 5. kafla eru settar fram nokkrar ráðleggingar um hönnun á brúm úr hægryðgandi stáli. Þar er farið yfir efnisval með tilliti til umhverfis og stálgæða, fórnarþykkt á stáli yfir líftíma, þreytu, deililausnir og tengingar og loks yfirborðsmeðhöndlun og uppsetningu.

Loks er kafli um hagkvæmni þess að nota hægryðgandi stál í stað venjulegs málaðs stál í brýr. Þar kemur fram að yfirleitt er reiknað með að brýr úr hægryðgandi stáli og brýr úr máluðu venjulegu stáli kosta það sama í byggingu. Kostir hægryðgandi stálsins koma fram í lægri viðhaldskostnaði. Er þá bæði talað um beinan viðhaldskostnað og ekki síður afleiddan kostnað vegna truflunar á umferð, umferðarstýringu og slyshættu sem oftast er samfara viðhaldsaðgerðum á brúm.

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



## EFNISYFIRLIT

<b>SAMANTEKT</b>	<b>5</b>
<b>1 INNGANGUR</b>	<b>9</b>
1.1 Fyrri vinna	9
1.2 Nýr staðall fyrir hægryðgandi stál	10
1.3 Kostir við hægryðgandi stál	11
1.3.1 Byggingarkostnaður	11
1.3.2 Styttur byggingartími	11
1.3.3 Lægri líftímakostnaður	11
1.3.4 Umhverfi	12
1.3.5 Útlit	12
<b>2 STAÐALL UM HÆGRYÐGANDI STÁL</b>	<b>14</b>
<b>3 VAL Á STÁLI FYRIR BRÝR</b>	<b>17</b>
3.1 Stökkt brot	17
3.2 Framboð á stáli	19
<b>4 MYNDUN VARNARHÚÐAR Á HÆGRYÐGANDI STÁLI</b>	<b>20</b>
4.1 Myndun varnarhúðar	20
4.2 Áhrif salts á myndun varnarhúðar	21
4.3 Áhrif brennisteins á myndun varnarhúðar	23
4.4 Áhrif raka á myndun varnarhúðar	25
<b>5 RÁÐLEGGINGAR UM HÖNNUN ÚR HÆGRYÐGANDI STÁLI</b>	<b>26</b>
5.1 Stálgæði	26
5.2 Fórnarþykkt á stáli	26
5.3 Umhverfi	26
5.4 Þreyta	27
5.5 Deililausnir	27
5.6 Rafsuða	28
5.7 Boltaðar tengingar	29
5.8 Yfirborð	29
<b>6 SPARNADUR VIÐ AÐ NOTA HÆGRYÐGANDI STÁL</b>	<b>31</b>
6.1 Byggingarkostnaður	31
6.2 Viðhaldskostnaður	32

## MYNDASKRÁ

MYND 1	Mælistaðir fyrir hægryðgandi stál. _____	9
MYND 2	Dæmi um niðurstöður á tæringu á venjulegu stáli og hægryðgandi stáli. _____	10
MYND 3	Dæmi um samanburð á líftímakostnaði brúar úr hægryðgandi stáli og máluðu stáli. _____	12
MYND 4	Dæmi um útlit ryðhúðarinnar eftir mismunandi ytri aðstæðum og þroska. _____	12
MYND 5	Stálsýni eftir eitt ár í tæringarrekkja í Reykjavík. _____	13
MYND 6	Stálbrú úr samverkandi stálvirki í Frakklandi. _____	13
MYND 7	Skematísk mynd af myndun verndandi húðar á hægryðgandi stáli. _____	20
MYND 8	Tími þar til tæringarhraði verður að fasta á hægryðgandi stáli. _____	21
MYND 9	Samband tæringar, tæringarflokka og langtíma tæringarhraða í sjávarumhverfi. _____	22
MYND 10	Gullinbrú. Brúin er yfir sjó. Hægra megin er mynd sem sýnir ryðflögnur á innra borð skjaldanna. Innfellda myndin sýnir flögu sem fallið hefur niður á göngustíg. _____	23
MYND 11	Eldheimar í Vestmannaeyjum. Til hægri sést hvernig ryðhúðin flagnar af innra borði klæðningarinnar. _____	23
MYND 12	Áhrif brennisteins á tæringu á hægryðgandi stáli. _____	24
MYND 13	Niðurstöður á mælinum á tæringu á stáli. _____	24
MYND 14	Ryðsmit á steiptum flötum og timbri. Mynd frá útsýnispöllum á Amarstapa. _____	28
MYND 15	Þversnið í Nærosset brú í Noregi úr hægryðgandi stáli. _____	32

## TÖFLUSKRÁ

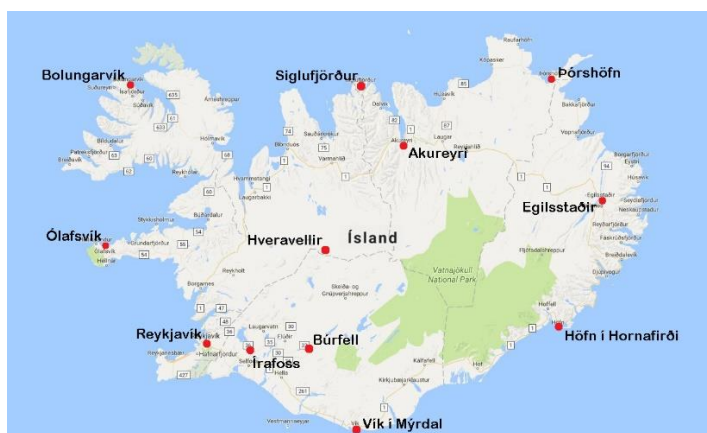
TAFLA 1	Efnasamsetning á hægryðgandi stáli skv. ÍST EN 10025-5. _____	14
TAFLA 2	Samanburður á kröfum um kolefnisjafngildi milli stáltegunda. _____	15
TAFLA 3	Eiginleikar á hægryðgandi stáli skv. ÍST EN 10025-5. _____	15
TAFLA 4	Höggstyrkur á hægryðgandi stáli skv. ÍST EN 10025-5. _____	16
TAFLA 5	Kröfur um lágmarksradía fyrir kaldbeygju platna. _____	16
TAFLA 6	Kröfur um hámarksþykkt á stáli til að koma í veg fyrir stökkt brot (úr ÍST EN 1993-1-10). _____	18
TAFLA 7	Suðuvír sem nota skal við suðu á stáli skv. ÍST EN 10025-5. _____	28



## 1 INNGANGUR

### 1.1 Fyrri vinna

Þessi skýrsla er sú fjórða í röð skýrsla um hægryðgandi stál. Í fyrstu skýrslunni<sup>1</sup> er fjallað almennt um hægryðgandi stál, sögu þess, eiginleika og notkun heima og erlendis. Meginefni hennar er hins vegar að lýsa markmiðum og framkvæmd rannsóknar á tæringu hægryðgandi stáls á Íslandi. Þar er lýst uppsetningu sýna úr hægryðgandi stáli um allt land árið 2017. Sýnin eru til mælinga á tæringu yfir 10 ára tímabil þar sem reiknað er með að mæla tæringu eftir 1, 3, 5 og 10 ár.



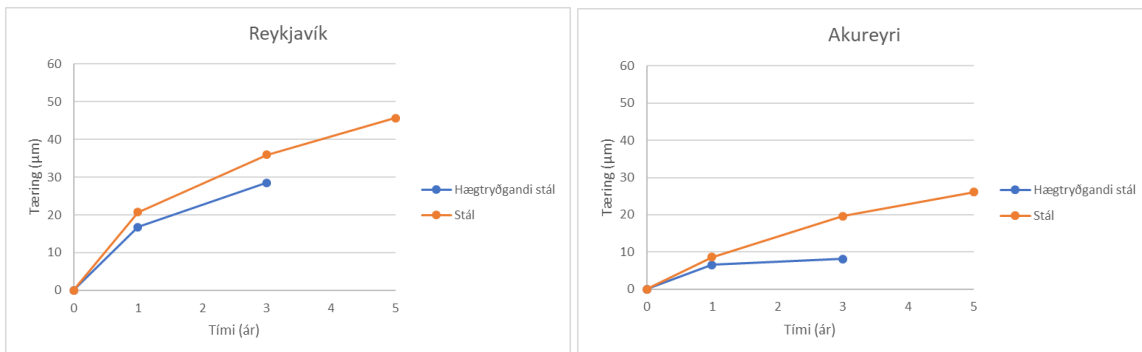
**MYND 1** Mælistaðir fyrir hægryðgandi stál.

Reiknað var með að setja upp sýni á þeim stöðum sem sýndir eru á mynd 1. Þetta eru sömu staðir og notaðir voru við mælingu á tæringu á stáli, sínki og áli á árunum 1999 til 2017. Kosturinn við að mæla á sömu stöðum er að þá fást sambærilegar niðurstöður á tæringu á venjulegu byggingarstáli og hægryðgandi stáli við sömu aðstæður. Einnig er það kostur að hægt var að nota sömu tæringarrekkanu aftur sem sparar umtalsverðar fjárhæðir. Í tæringarrannsókninni frá 1999 voru sett upp sýni á fleiri stöðum, en nokkrir tæringarrekkanu höfðu verið teknir niður í millitíðinni. Það á við um rekkana í

<sup>1</sup> Hægryðgandi stál. Tæring við íslenskar aðstæður. Áfangaskýrsla 1. EFLA, nóvember 2017.

Vestmannaeyjum, Neskaupsstað, Egilsstöðum og Siglufirði. Í þessari rannsókn var nýr rekki settur upp á Egilsstöðum en enginn rekki var settur upp á Siglufirði. Svo var einum rekka bætt við á Írafossi.

Í áfangaskýrslum 2 og 3 voru birtar niðurstöður mælinga á tæringu eftir 1 ár og 3 ár.<sup>2,3</sup>



**MYND 2** Dæmi um niðurstöður á tæringu á venjulegu stáli og hægtryðgandi stáli.

Eins og sést á mynd 2 er ávinningurinn af að nota hægtryðgandi stál mjög mismunandi eftir staðsetningu. Ávinningurinn er lítil í Reykjavík en verulegur á Akureyri. Verður fróðlegt að fylgjast með hvernig tæringu vindur fram í mælingum sem verða gerðar á sýnum eftir 5 ár og 10 ár, þ.e. árin 2022 og 2027.

## 1.2 Nýr staðall fyrir hægtryðgandi stál

Hægtryðgandi stál var fyrst þróað í Bandaríkjunum upp úr 1920 til að nota í járnbrautarvagna og á svipuðum tíma einnig í Þýskalandi. Fljótlega varð stálið vinsælt í brúargerð, sérstaklega eftir 1990 þegar betri tegundir voru þróaðar sem þoldu saltmettað umhverfi betur en áður og höfðu betri sjóðanleika.

Evrópustaðall um hægtryðgandi stál var gefinn út árið 1993 sem EN 10155 en hann var síðan felldur inn í stálstaðalinn 10025 sem ÍST EN 10025-5 árið 2004. Staðallinn hefur nýlega verið gefinn út endurbættur. Í millitíðinni hefur hægtryðgandi stál verið framleitt af mörgum framleiðendum undir mismunandi nöfnum svo sem: COR-TEN, SSAB Weathering, Arcorox, Indaten og DIWETEN. Sum af þeim falla ekki algjörlega að staðlinum hvað varðar samsetningu og eiginleika.

Í nýju útgáfu staðalsins frá árinu 2019 eru gerðar tvær meginbreytingar sem hafa áhrif á notkun hægtryðgandi stáls í brýr. Sú fyrri er að nú er skilgreint hægtryðgandi stál S420W og S460W með flotstyrk 420 og 460 MPa. Í öðru lagi eru nú skilgreind stál í gæðaflokkum (subgrades) K2, J4 og J5 með skilgreindan höggstyrk við -30°C, -40°C og -50°C. Það gjörbyltir möguleikum á að nota stálið í brýr á kaldari svæðum eins og hér á landi.

Kröfur úr staðlinu eru sýndar í kafla 2.

<sup>2</sup> Hægtryðgandi stál. Áfangaskýrsla 2. EFLA, mars 2019.

<sup>3</sup> Hægtryðgandi stál. Áfangaskýrsla 3. EFLA, mars 2021.

### 1.3 Kostir við hægryðgandi stál

#### 1.3.1 Byggingarkostnaður

Almennt er byggingarkostnaður stálbrúa úr hægryðgandi stáli lægri en úr venjulegu máluðu stáli þar sem kostnaður við málnun á stáli er umtalsverður. Sparnaðurinn er þó lægri en sem nemur málningarkostnaðinum vegna:

- Hægryðgandi stál kostar meira en venjulegt byggingarstál
- Við hönnun er reiknað með fórnarlagi af stáli á sérhverri úthlið stálsins
- Deilihönnun á hægryðgandi stáli er heldur flóknari en á venjulegu stáli

Það fer síðan eftir hönnuninni hvort vegur þyngra þegar upp er staðið, aukakostnaðurinn við stálið eða málningarkostnaðurinn. Oftast er reiknað með til einföldunar að þessir tveir þættir séu í jafnvægi<sup>4</sup>, þ.e. að fullsmíðað hægryðgandi stálvirki kosti það sama og fullsmíðað og fullmálað stálvirki úr venjulegu stáli. Fjallað er nánar um kostnað í kafla 6.

#### 1.3.2 Styttur byggingartími

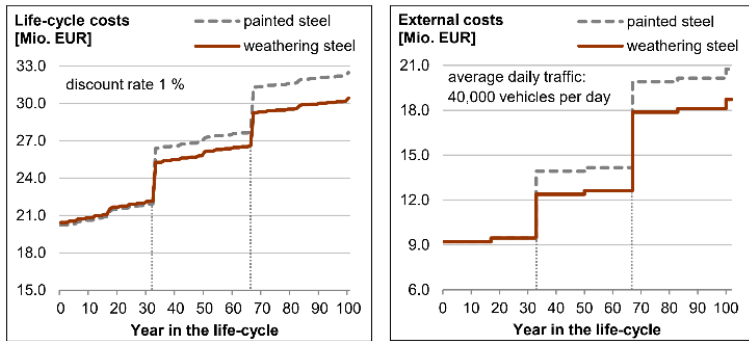
Hægryðgandi stál leiðir almennt til styttri byggingartíma. Ryðvörn á stáli er tímafremur verkþáttur. Ryðvörnin samanstendur yfirleitt af heithúðun með hreinu sínski sem grunn eftir hreinsun á yfirborðinu. Yfir sínkhúðina koma a.m.k. þrjú málningalög; grunnur, millimálning og yfirmálning. Heithúðun og málnun er gerð í mörgum lögum og virða þarf þurrktíma milli umferða. Málað stál er vandmeðfarið í flutningi og yfirleitt þarf að gera við málningarskemmdir á verkstað eftir uppsetningu á stálinu eða jafnvel heilmála síðustu umferðina eftir að brúin er risin.

#### 1.3.3 Lægri líftímakostnaður

Stærsti kosturinn við að nota hægryðgandi stál er veruleg lækkun á viðhaldskostnaði. Sé deilihönnun stálvirkisins vönduð verður viðhaldskostnaður stálbrúa úr hægryðgandi stáli hverfandi miðað við hefðbundið viðhald á máluðum stálbrúm. Afleiddur kostnaður á meðan á viðhaldsvinnu stendur, svo sem vegna truflunar á umferð, umferðarstýringu og umferðartöfum, verður einnig miklu lægri. Það á sérstaklega við um brýr yfir umferðarþunga vegi í eða nálægt þéttbýli. Brýr úr hægryðgandi stáli eru þannig næstum viðhaldsfriar miðað við hefðbundnar brýr. Einungis þarf að sinna hefðbundnu eftirliti og tryggja að drasl og óhreinindi safnist ekki fyrir á viðkvæmum stöðum.

<sup>4</sup> European design guide for the use of weathering steel in bridge construction. 2. útgáfa. ECCS, 2021.

Erfitt er að gefa upp raunverulegan kostnaðarmun á brúm úr mismunandi byggingarefnum þar sem



**MYND 3** Dæmi um samanburð á líftímakostnaði brúar úr hægryðgandi stáli og máluðu stáli.

hann er háður svo mörgum utanaðkomandi þáttum. Þar skiptir sjálf hönnunin miklu, þar sem hún leiðir til ákveðins hlutfalls stálþunga og stályfirborðs sem þarf að ryðverja. Þá hefur umhverfið mikil áhrif, þ.e.a.s. í hvers konar tæringarumhverfi brúin er og hversu miklar umferðartruflanir verða við endurmálun. Myndirnar sýna niðurstöður á slíkum

samanburði fyrir dalbrú (viaduct) með mikilli umferð.<sup>5</sup> Reiknað er með 100 ára líftíma og meginviðhaldi á 33 ára fresti. Um er að ræða heildarkostnað á mannvirkinu og kostnað á bæði stáli, steypu og búnaði svo sem legum og malbiki.

### 1.3.4 Umhverfi

Málun stálvirkis og viðhald málningar eru mengandi verkþættir þrátt fyrir að miklar framfarir hafi átt sér stað á síðustu áratugum í gerð málninga. Flestar málningar eru með rokgjörn lífræn leysiefni (VOC) og einar bestu málningarnar eru byggðar á epoxy bindiefnum. Bæði efnin eru hættuleg heilsu manna og mengandi í umhverfinu. Þá veldur niðurbrot málningar örplasti í umhverfinu. Við endurnýjun á málningu eru nú gerðar auknar kröfur til að safna saman og farga málningarflögum og menguðum sandblásturssandi en láta þau ekki menga umhverfið eins og gert var hér áður fyrr.

Það er því verulegur ávinningur fyrir öryggi, heilsu og umhverfi að sleppa við að mála stálvirki.

### 1.3.5 Útlit

Hægryðgandi stál myndar stöðuga verndarhúð á yfirborði stálsins. Þegar húðin er fullmynduð, sem getur tekið nokkur ár, þá verður hún venjulega dökkbrún. Liturinn er hins vegar háður þroska húðarinnar með tíma og tæringarumhverfinu. Ljósari litir tengjast frekar minna menguðu umhverfi en þeir dekkri meiri mengun.



**MYND 4** Dæmi um útlit ryðhúðarinnar eftir mismunandi ytri aðstæðum og þroska.

<sup>5</sup> European design guide for the use of weathering steel in bridge construction. 2. útgáfa. ECCS, 2021.



Liturinn virkar mjög náttúrulegur og fellur yfirleitt vel að náttúrulegum litum. Klæðningar úr hægryðgandi stáli hafa verið vinsælar á húsbyggingum á síðari árum eða áratugum hér á landi og var slík klæðning fyrst notuð hér á landi á Kjarvalsstöðum um 1970.

Til þess að fá jafna áferð á stályfirborðið er mælt með því að hreinsa það vel, helst sandblása létt. Þá er gott að vökva yfirborðið reglulega í byrjun og láta það þorna vel á milli.

**MYND 5** Stálsýni eftir eitt ár í tæringarreka í Reykjavík.



**MYND 6** Stálbrú úr samverkandi stálvirki í Frakklandi.

## 2 STAÐALL UM HÆGRYÐGANDI STÁL

Ný útgáfa af staðli fyrir hægryðgandi stál var gefin út árið 2019.<sup>6</sup> Breytingarnar frá fyrri útgáfum eru að nú eru skilgreindar nýjar tegundir af stáli. Í fyrsta lagi nær staðallinn nú til stáls með styrk upp í 460 MPa (S420W og S460W) og í öðru lagi eru stálgerðirnar nú skilgreindar með höggstyrk við allt að -50°C (K2, J4 og J5). Þessar viðbætur gjörbylta möguleikunum á að nota hægryðgandi stál í brýr þar sem þróunin er í að nota sterkara stál og hönnunarreglur gera kröfur um hærri höggstyrk fyrir brýr en önnur mannvirki.<sup>7</sup>

Hér að neðan er farið yfir helstu kröfur í staðlinum fyrir hægryðgandi stál.

**TAFLA 1** Efnasamsetning á hægryðgandi stáli skv. ÍST EN 10025-5.

Designation		Method of de-oxidation a	C % max.	Si % max.	Mn %	P % b	S % max. b	N % max. f	Addition of nitrogen binding elements c	Cr %	Cu %	Others d e	CEV % max.
Steel name	Steel number												
S235J0W	1.8958	FN	0,13	0,40	0,20 to 0,60	max. 0,035	0,035	0,012	-	0,40 to 0,80 g	0,25 to 0,55	-	0,44
S235J2W	1.8961	FF					0,030	-	yes				
S355J0WP	1.8945	FN	0,12	0,75	max. 1,0	0,06 to 0,15	0,035	0,012	-	0,30 to 1,25	0,25 to 0,55	-	0,52
S355J2WP	1.8946	FF					0,030	-	yes				
S355J0W	1.8959	FN	0,16	0,50	0,50 to 1,50	max. 0,035	0,035	0,012	-	0,40 to 0,80 g	0,25 to 0,55	-	0,52
S355J2W	1.8965	FF				max. 0,030	0,030	yes					
S355K2W	1.8967	FF				max. 0,030	0,030	yes					
S355J4W	1.8787	FF				max. 0,030	0,025	yes					
S355J5W	1.8991	FF				max. 0,030	0,025	yes					
S420J0W	1.8943	FN	0,20	0,65	0,50 to 1,35	max. 0,035	0,035	-	0,40 to 0,80 g	0,25 to 0,55	-	0,52	
S420J2W	1.8949	FF				max. 0,030	0,030	yes					
S420K2W	1.8997	FF				max. 0,030	0,030	yes					
S420J4W	1.8954	FF				max. 0,030	0,025	yes					
S420J5W	1.8992	FF				max. 0,030	0,025	yes					
S460J0W	1.8966	FN	0,20	0,65	max. 1,40	max. 0,035	0,035	-	0,40 to 0,80 g	0,25 to 0,55	-	0,52	
S460J2W	1.8980	FF				max. 0,030	0,030	yes					
S460K2W	1.8990	FF				max. 0,030	0,030	yes					
S460J4W	1.8981	FF				max. 0,030	0,025	yes					
S460J5W	1.8993	FF				max. 0,030	0,025	yes					

<sup>6</sup> ÍST EN 10025-5:2019. Hot rolled products of structural steels – Part 5: Technical delivery conditions for steels with improved atmospheric corrosion resistance.

<sup>7</sup> Vegagerðin, Reglur um hönnun brúa, 2. útgáfa, 2018.

Með samanburði við kröfur um efnainnihald á venjulegu smíðastáli skv. ÍST EN sést að munur á kröfum til helstu innihaldsefna er ekki svo frábrugðið. Það eru gerðar lágmarkskröfur til króms og kopars en það eru þau efni, ásamt nikkeli, sem gefa stálinu hina eftirsóttu eiginleika.

**TAFLA 2** Samanburður á kröfum um kolefnisjafngildi milli stáltegunda.

Staðall-hluti	Gæði	S355	S420	S460
10025-02	J2 – J5	0,45	-	0,47
10025-03	N, NL	0,43	0,48	0,53
10025-04	M, ML	0,39	0,43	0,45
10025-05	J2W – J5W	0,52	0,52	0,52

10025-2,3, og 5 að kolefnisjafngildi, CEV, má almennt vera herra fyrir hægryðgandi stál en smíðastál. Það hefur fyrst og fremst áhrif á sjóðanleika þess en einnig brotlengingu.

**TAFLA 3** Eiginleikar á hægryðgandi stáli skv. ÍST EN 10025-5.

Designation		Minimum yield strength $R_{eH}^a$ MPa						Tensile strength $R_m^a$ MPa			Orientation of test pieces a	Minimum percentage elongation after fracture $a$ %														
Steel name	Steel number	Nominal thickness mm						Nominal thickness mm				$L_0 = 80$ mm Nominal thickness mm			$L_0 = 5,65 \sqrt{S_0}$ Nominal thickness mm											
		≤ 16	> 16 ≤ 40	> 40 ≤ 63	> 63 ≤ 80	> 80 ≤ 100	> 100 ≤ 150	< 3	≥ 3 ≤ 100	≥ 100 ≤ 150		> 1,5 ≤ 2	> 2 ≤ 2,5	> 2,5 < 3	≥ 3 ≤ 40	> 40 ≤ 63	> 63 ≤ 100	> 100 ≤ 150								
S235J0W	1.8958	235	225	215	215	215	195	360 to 510	360 to 510	350 to 500	l	19	20	21	26	25	24	22								
S235J2W	1.8961										t	17	18	19	24	23	22	22								
S355J0WP	1.8945	355	345	-	-	-	-	510 to 680	470 to 630 b	-	l	16	17	18	22	-	-	-								
S355J2WP	1.8946										t	14	15	16	20	-	-	-								
S355J0W	1.8959	355	345	335	325	315	295	510 to 680	470 to 630	450 to 600	l	16	17	18	22	21	20	18								
S355J2W	1.8965										t	14	15	16	20	19	18	18								
S355K2W	1.8967																									
S355J4W	1.8787																									
S355J5W	1.8991																									
S420J0W	1.8943	420	400	390	380	370	365	520 to 680	500 to 660	460 to 620	l	15	15	15	19	18	17	16								
S420J2W	1.8949										t	13	13	13	17	16	15	14								
S420K2W	1.8997																									
S420J4W	1.8954																									
S420J5W	1.8992																									
S460J0W	1.8966	460	440	430	410	400	385	540 to 720	530 to 710	490 to 660	l	14	14	14	17	16	15	14								
S460J2W	1.8980										t	12	12	12	15	14	13	12								
S460K2W	1.8990																									
S460J4W	1.8981																									
S460J5W	1.8993																									

Í nýju útgáfunni af 10025 hefur verið bætt við stáli af styrk S420 og S460.

Brotlenging á hægryðgandi stáli er heldur minni en á venjulegu smíðastáli. Það er samt ekki talið hafa áhrif á hönnun stálvirkja.

**TAFLA 4** Höggstyrkur á hægryðgandi stáli skv. ÍST EN 10025-5.

Designation		Temperature °C	Minimum energy $KV_2^a$ J
Steel name	Steel number		
S235J0W	1.8958	0	27
S235J2W	1.8961	-20	27
S355J0WP <sup>b</sup>	1.8945	0	27
S355J2WP <sup>b</sup>	1.8946	-20	27
S355J0W	1.8959	0	27
S355J2W	1.8965	-20	27
S355K2W	1.8967	-20	40 <sup>c</sup>
S355J4W	1.8787	-40	27
S355J5W	1.8991	-50	27
S420J0W	1.8943	0	27
S420J2W	1.8949	-20	27
S420K2W	1.8997	-20	40
S420J4W	1.8954	-40	27
S420J5W	1.8992	-50	27
S460J0W	1.8966	0	27
S460J2W	1.8980	-20	27
S460K2W	1.8990	-20	40
S460J4W	1.8981	-40	27
S460J5W	1.8993	-50	27

Fyrir stál til brúargerðar er hér stærsta breytingin frá fyrri staðli, að búið er að skilgreina stál af gæðaflokkum K2, J4 og J5 til viðbótar við þá sem fyrir voru. Þar með er hægt að skilgreina stál sem uppfyllir kröfur um höggstyrk utandyra á Íslandi. Það er hins vegar vandamál að þessar stáltegundir eru ekki framleiddar ennþá nema sem sérpöntun. Það er því líklegt að stálmagn þurfi að vera mikið til að hagkvæmt sé að nota það enn sem komið er.

**TAFLA 5** Kröfur um lágmarksradía fyrir kaldbeygju platna.

Designation		Bending direction a	Minimum recommended inside bend radius <sup>b</sup> for nominal thicknesses mm												
Steel name	Steel number		> 1,5 ≤ 2,5	> 2,5 ≤ 3	> 3 ≤ 4	> 4 ≤ 5	> 5 ≤ 6	> 6 ≤ 7	> 7 ≤ 8	> 8 ≤ 10	> 10 ≤ 12	> 12 ≤ 14	> 14 ≤ 16	> 16 ≤ 18	> 18 ≤ 20
			t	l	t	l	t	l	t	l	t	l	t	l	t
S235J0W	1.8958	t	2,5	3	5	6	8	10	12	16	20	25	28	36	40
S235J2W	1.8961	l	2,5	3	6	8	10	12	16	20	25	28	32	40	45
S355J0WP	1.8945	t	4	5	6	8	10	12	16	-	-	-	-	-	-
S355J2WP	1.8946	l	4	5	8	10	12	16	20	-	-	-	-	-	-
S355J0W	1.8959	t	4	5	6	8	10	12	16	20	25	32	36	45	50
S355J2W	1.8965	t	4	5	6	8	10	12	16	20	25	32	36	45	50
S355K2W	1.8967	t	4	5	6	8	10	12	16	20	25	32	36	45	50
S355J4W	1.8787	l	4	5	8	10	12	16	20	25	32	36	40	50	63
S355J5W	1.8991	l	4	5	8	10	12	16	20	25	32	36	40	50	63

<sup>a</sup> t: transverse to the rolling direction.  
l: parallel to the rolling direction.

<sup>b</sup> The values are applicable for bend angles ≤ 90°.

Ekki er mælt með því að kaldbeygja plötur úr stáli S420 eða S460. Það er hvort sem er ekki gert í brúarmannvirkjum þar sem kaldbeygja minnkar seigju stálsins.



### 3 VAL Á STÁLI FYRIR BRÝR

#### 3.1 Stökkt brot

Um val á stálgæðum m.t.t. hættu á stökku broti er fjallað í Evrópustaðli ÍST EN 1993-1-10 fyrir stálhluta í togi. Fyrir utan það að gefa færi á að nota þróaðar aðferðir við ákvörðun á stálgæðum er í staðlinum einföld aðferð til að velja stálgæði.

Einfalda aðferðin byggist á því að finna hönnunarhitastig með því að umreikna lágmarkshitastig byggingarstaðarins til að taka tillit til útgeislunar, streituhróðunar og fleiri þátta sem skipta minna máli. Síðan er tafla sem gefur leyfilega hámarksþykkt á stáli fyrir hönnunarhitastig, spennuástand og sérhverja tegund af stáli.

Hönnunarhitastigið er gefið sem:

$$T_{Ed} = T_{md} + \Delta T_r + \Delta T_\sigma + \Delta T_R + \Delta T_\varepsilon + \Delta T_{\varepsilon_{cf}}$$

þar sem:

$T_{md}$  er lágmarkshitastig á staðnum skv. ÍST EN 1991-1-5.

$\Delta T_r$  er leiðrétting vegna útgeislunar skv. ÍST EN 1991-1-5.

$\Delta T_\sigma$  er leiðrétting vegna sprungumyndunar og spennutoppa (sett = 0).

$\Delta T_R$  er leiðrétting ef aukins öryggis er krafist en er í staðlinum.

$\Delta T_\varepsilon$  er leiðrétting vegna streituhraða.

$\Delta T_{\varepsilon_{cf}}$  er leiðrétting vegna kaldbeygju, ef hún er fyrir hendi (hér sett = 0).

Lágmarkshiti er gefinn í þjóðarviðauka við ÍST EN 1991-1-5 sem  $-30^\circ\text{C}$  fyrir allt landið en þess getið að ákvarða þurfi hitastigið í hverju tilfalli. Engar upplýsingar eru um leiðréttingu vegna útgeislunar í þjóðarskjalinu og má leiða líkum að því að hún eigi ekki við um brýr nema í sérstökum tilvikum. Reikna má með að allar hinar leiðréttingarnar eigi ekki við um venjulegt álag á brýr.

**TAFLA 6** Kröfur um hámarksþykkt á stáli til að koma í veg fyrir stökkt brot (úr ÍST EN 1993-1-10).

Steel grade	Sub-grade	Charpy energy CVN at T [°C]	J <sub>min</sub>	Reference temperature T <sub>Ed</sub> [°C]																				
				σ <sub>Ed</sub> = 0,75 f <sub>y</sub> (t)							σ <sub>Ed</sub> = 0,50 f <sub>y</sub> (t)							σ <sub>Ed</sub> = 0,25 f <sub>y</sub> (t)						
				10	0	-10	-20	-30	-40	-50	10	0	-10	-20	-30	-40	-50	10	0	-10	-20	-30	-40	-50
S235	JR	20	27	60	50	40	35	30	25	20	90	75	65	55	45	40	35	135	115	100	85	75	65	60
	J0	0	27	90	75	60	50	40	35	30	125	105	90	75	65	55	45	175	155	135	115	100	85	75
	J2	-20	27	125	105	90	75	60	50	40	170	145	125	105	90	75	65	200	200	175	155	135	115	100
S275	JR	20	27	55	45	35	30	25	20	15	80	70	55	50	40	35	30	125	110	95	80	70	60	55
	J0	0	27	75	65	55	45	35	30	25	115	95	80	70	55	50	40	165	145	125	110	95	80	70
	J2	-20	27	110	95	75	65	55	45	35	155	130	115	95	80	70	55	200	190	165	145	125	110	95
	M,N	-20	40	135	110	95	75	65	55	45	180	155	130	115	95	80	70	200	200	190	165	145	125	110
	ML,NL	-50	27	185	160	135	110	95	75	65	200	200	180	155	130	115	95	230	200	200	200	190	165	145
S355	JR	20	27	40	35	25	20	15	15	10	65	55	45	40	30	25	25	110	95	80	70	60	55	45
	J0	0	27	60	50	40	35	25	20	15	95	80	65	55	45	40	30	150	130	110	95	80	70	60
	J2	-20	27	90	75	60	50	40	35	25	135	110	95	80	65	55	45	200	175	150	130	110	95	80
	K2,M,N	-20	40	110	90	75	60	50	40	35	155	135	110	95	80	65	55	200	200	175	150	130	110	95
	ML,NL	-50	27	155	130	110	90	75	60	50	200	180	155	135	110	95	80	210	200	200	200	175	150	130
S420	M,N	-20	40	95	80	65	55	45	35	30	140	120	100	85	70	60	50	200	185	160	140	120	100	85
	ML,NL	-50	27	135	115	95	80	65	55	45	190	165	140	120	100	85	70	200	200	200	185	160	140	120
S460	Q	-20	30	70	60	50	40	30	25	20	110	95	75	65	55	45	35	175	155	130	115	95	80	70
	M,N	-20	40	90	70	60	50	40	30	25	130	110	95	75	65	55	45	200	175	155	130	115	95	80
	QL	-40	30	105	90	70	60	50	40	30	155	130	110	95	75	65	55	200	200	175	155	130	115	95
	ML,NL	-50	27	125	105	90	70	60	50	40	180	155	130	110	95	75	65	200	200	200	175	155	130	115
	QL1	-60	30	150	125	105	90	70	60	50	200	180	155	130	110	95	75	215	200	200	200	175	155	130
S690	Q	0	40	40	30	25	20	15	10	10	65	55	45	35	30	20	20	120	100	85	75	60	50	45
	Q	-20	30	50	40	30	25	20	15	10	80	65	55	45	35	30	20	140	120	100	85	75	60	50
	QL	-20	40	60	50	40	30	25	20	15	95	80	65	55	45	35	30	165	140	120	100	85	75	60
	QL	-40	30	75	60	50	40	30	25	20	115	95	80	65	55	45	35	190	165	140	120	100	85	75
	QL1	-40	40	90	75	60	50	40	30	25	135	115	95	80	65	55	45	200	190	165	140	120	100	85
	QL1	-60	30	110	90	75	60	50	40	30	160	135	115	95	80	65	55	200	200	190	165	140	120	100

Í Evrópustaðli fyrir stálbrýr, ÍST EN 1993-2, er opnað fyrir að gera frekari kröfur til höggstyrks fyrir brýr. Þar er sýnt dæmi þar sem reiknað er með að nota eingöngu fínkornastál í burðarvirki brúa með þykkt meiri en 30 mm. Ekki er tekin afstaða til þess í íslenska þjóðarskjalinu með staðlinum.

Í reglum norsku vegagerðarinnar<sup>8</sup> er gert ráð fyrir að ΔT<sub>r</sub> = -10°C og ΔT<sub>R</sub> = 0 og að prófunarhitastig við prófun á höggstyrk sé ekki hærra en 20°C yfir lágmarkshitanum, T<sub>md</sub>. Þá gera þeir einnig kröfu um að stálið sé fínkornastál skv. ÍST EN 10025-3 eða 4.

Ákvæðin í reglum um hönnun brúa frá Vegagerðinni<sup>9</sup> eru samhljóða þeim norsku. Þessi ákvæði komu í veg fyrir að hægt væri að velja hægryðgandi stál í brýr á landinu fyrr en nýja útgáfan af staðlinum leit dagsins ljós árið 2019 þar sem stáltegundir J4W og J5W eru skilgreindar.

Hér á landi er hins vegar löng reynsla af því að nota S355J2 fyrir valsaða bita í stálbrýr (St 52-3) þar sem flangabykkt er milli 30 og 40 mm (HEB/M 800-1000, UKB 914x305x289 og stærri). Flestir þessara bita eru einungis með soðnar kroppstífur og leguplötur. En nokkrar samverkandi stálbrýr eru þó til með langar flangastyrkingar bæði í höfum og yfir ásetum. Ekki er kunnugt um stökkt brot í neinum af þessum brúm hér á landi.

Eins og áður sagði er lágmarkshiti sem miða skal við gefinn í þjóðarviðauka við ÍST EN 1991-1-5 sem -30°C fyrir allt landið. Það er mjög óheppilegt þar sem lægsti mældi hiti á landinu er mjög breytilegur í byggð eftir landshlutum og hæð yfir sjó. Þannig er lægsti mældi hiti í Reykjavík um -25°C en um -35°C við Mývatn. Það er því ástæða til að skoða hvert tilvik sérstaklega. Það á við um áhrifin af fjarlægð frá sjó og hæð yfir sjávarmáli. Í Noregi er gefið út jafnhitakort sem sýnir hitastig við sjávarmál alls staðar í

<sup>8</sup> Statens vegvesen, Håndbok R762, Prosesskode 2, júní 2018.

<sup>9</sup> Vegagerðin, Reglur um hönnun brúa, 2. útgáfa, 2018.

landinu. Síðan er hitastigið lækkað um 0,3°C fyrir hverja 100 m í hækkun frá sjávarmáli. Vonandi tekst að gefa betri leiðbeiningar fyrir Ísland í fyrirhugaðri endurskoðun á álagsstöðlum Eurocode.

### **3.2 Framboð á stáli**

Stálplötur úr hægryðgandi stáli hafa verið framleiddar hingað til í öllum gæðaflokkum upp að S355K2 og eru fánlegar frá mörgum framleiðendum í flestum stærðum eins og úr venjulegu stáli. Nýrri tegundirnar, S420-S460 og J5 og J6, eru hins vegar fágætari og gæti þurft að panta með miklum fyrirvara og þá er líklegt að panta þurfi töluvert magn til að ná hagkvæmni.

Völsuð þversnið í hægryðgandi stáli eru almennt ekki lagervara. Margir framleiðendur bjóða upp á að valsa hvaða þversnið sem er, en til þess að það geti verið hagkvæmt þarf pöntunin að koma snemma fram og magnið að vera töluvert. Til þess að leysa það eru slík þversnið oftast soðin saman úr plötum. Það hefur væntanlega áhrif á hönnun stálbrúa að því leyti að þverbitar og stífur er hagkvæmara að framleiða úr I-bitum en skúffum eða vinklum.

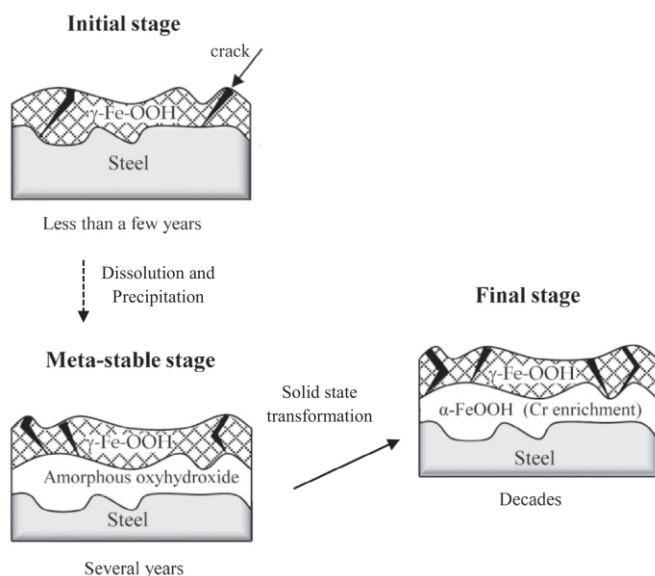
Um rör og kassa gildir það sama og með önnur völsuð þversnið.

Boltar úr hægryðgandi stáli eru einnig sjaldséðir. Þeir koma gjarnar frá Bandaríkjunum og eru þá í tommumáli. Hér er líka rétt að huga að afhendingartíma ef hugmyndin er að nota boltuð bitaskeyti.

## 4 MYNDUN VARNARHÚÐAR Á HÆGRYÐGANDI STÁLI

### 4.1 Myndun varnarhúðar

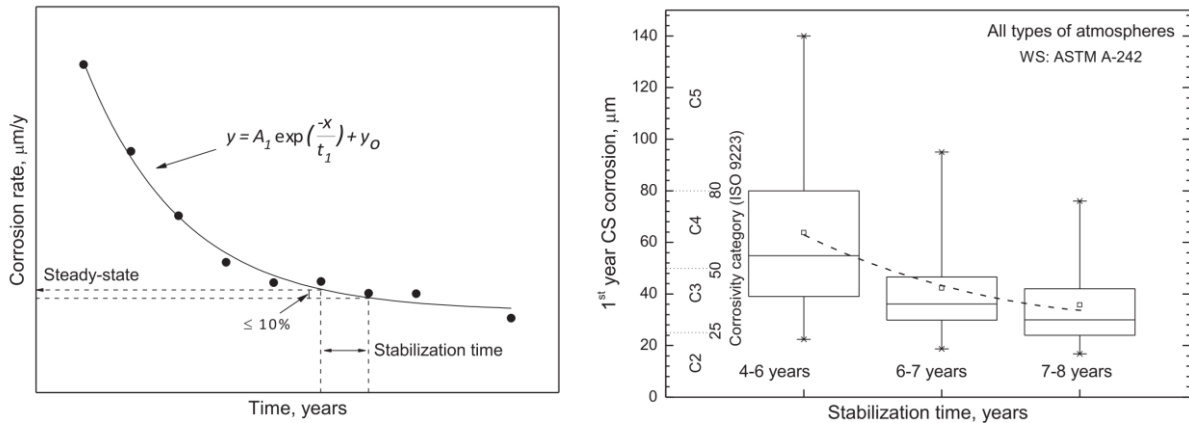
Við tæringu eða oxun á hægryðgandi stáli myndast fjöldinn allur af járnoxíðum og hydroxíðum á yfirborði stálsins sem við í almennu tali köllum ryð. Sum þessara efna eru óstöðug og hvarfast, önnur eru opin og mynda hrúður og loks er sérstaklega ein gerð þeirra sem myndar þetta húð við yfirborð stálsins. Þetta húðin, sem kölluð er patína ( $\alpha$ -FeOOH), myndast ekki strax í upphafi heldur verður hún til úr öðrum gerðum ryðs á löngum tíma næst yfirborði stálsins. Ryðlagið sem myndast er því jafnan lagskipt þar sem þetta húðin eða patínan er innst en önnur opin ryðlög eru þar fyrir utan. Verndareiginleikar ryðlagsins fara eftir því hversu hátt hlutfall af þessu verndandi afbrigði af ryði er til staðar.



**MYND 7** Skematísk mynd af myndun verndandi húðar á hægryðgandi stáli.<sup>10</sup>

<sup>10</sup> Morcillo, M. et al. Atmospheric corrosion of weathering steels. Overview for engineers. Part I: Basic concepts. Construction and Building Materials 213 (2019) 723-737.

Til þess að verndandi lagið geti myndast þarf yfirborð stálsins að fá raka og það sem meira er, það þarf að fá til skiptis raka og þurrk. Stálið byrjar því að tærast hratt á meðan þetta húðin er að myndast og ekkert er til að vernda yfirborðið. Tæringin er þá svipuð og á óvörðu stáli. En svo dregur úr tæringarhraðanum og hann endar með því, undir venjulegu kringumstæðum, að verða fasti. Lengdin á þessu upphafstímabili er háð tæringarhraðanum sem aftur er háður umhverfisaðstæðum. Þannig myndast húðin á fáeinum árum í tærandi umhverfi (C4-C5) en það getur tekið hana nokkur ár að myndast í lítið tærandi umhverfi (C2-C3).



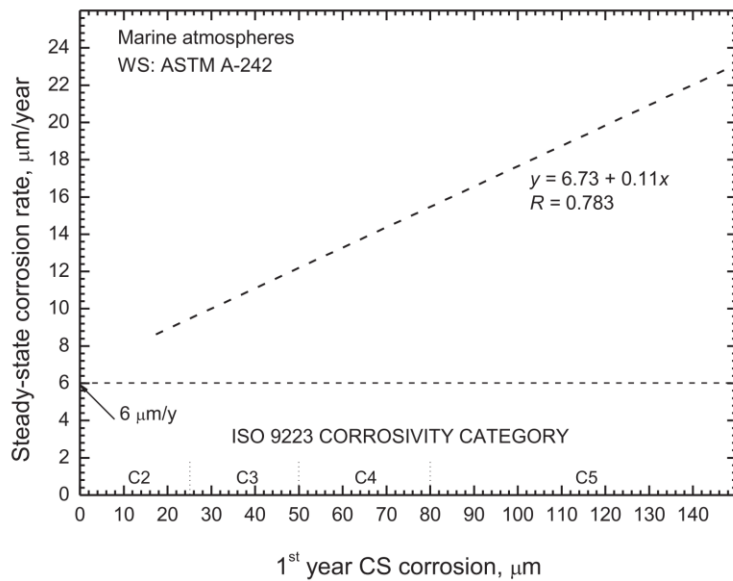
**MYND 8** Tími þar til tæringarhraði verður að fasta á hægryðgandi stáli.<sup>11</sup>

Komið hefur í ljós að til þess að fá verndarhúðina til að myndast fljótt þarf að sjá til þess að stálið fái reglulega vökvun og þorni svo vel á milli. Þá fæst þétt og endingargóð varnarhúð með jöfnum og fallegum lit.

## 4.2 Áhrif salts á myndun varnarhúðar

Ýmsar ytri aðstæður hafa áhrif á myndun varnarlagsins á stályfirborðinu. Þar er fyrst að nefna áhrif salts. Salt hindrar eða kemur í veg fyrir myndun  $\alpha$ -FeOOH á yfirborðinu og mest af tæringunni myndar aðrar tegundir oxíða sem ekki eru verndandi. Saltmagnið hefur afgerandi áhrif. Þannig verða þeir fletir af stálinu illa úti þar sem salt getur safnast saman eða þar sem það skolast ekki af við náttúrulegar aðstæður. Þetta veldur því að mikill munur getur verið á tæringu í sama mannvirkinu eftir því hvort salt skolast af fleti áveðurs eða hvort flöturinn er í skjóli, til dæmis á milli burðarbita í stálbrú. Þá getur orðið mun meiri tæring ofan á neðri flöngum bita þar sem salt getur safnast fyrir heldur en á kroppplötum þar sem saltið skolast frekar af.

<sup>11</sup> Morcillo, M. et al. Atmospheric corrosion of weathering steels. Overview for engineers. Part I: Basic concepts. Construction and Building Materials 213 (2019) 723-737.



**MYND 9** Samband tæringar, tæringarflokka og langtíma tæringarhraða í sjávarumhverfi.<sup>12</sup>

Salt á stálbrúm á sér aðallega tvennan uppruna. Annars er um að ræða salt frá sjóroki. Í brimi þyrlast sjór í loft upp, vatnið gufar upp í rokinu en saltið kristallast og berst með vindi langar leiðir. Það sest síðan á alla fleti sem það rekst á. Þetta á við um öll strandsvæði hringinn í kringum landið, sérstaklega á annesjum. Mestur saltburður á land er frá brimi í stífri suðvestanátt. Þá nær saltmettað loft að hálendisbrúninni og jafnvel hefur verið mælt salt í lofti í suðvestanátt fyrir norðan heiða.<sup>13, 14</sup> Þannig mælist tæring á venjulegu byggingarstáli svipuð við Búrfellsvirkjun og í Reykjavík.<sup>15</sup>

Staðallinn ÍST EN ISO 9223 flokkar loftslag eftir þeim veðurfarsþáttum sem taldir eru hafa mest áhrif á tæringu málma svo sem hlutfallsraka, brennisteini (SO<sub>2</sub>) og seltu (Cl<sup>-</sup>) í lofti. Flokkarnir eru C1 sem er lítil tæring upp í C5 sem er mikil tæring. C5 flokknum er síðan gjarnan skipt í tvennt eftir því hvort um er að ræða sjávarumhverfi eða iðnaðarumhverfi. Veðurfar á Íslandi, flokkað samkvæmt staðlinum, gefur tæringarumhverfi fyrir stál í flokkum C3 til C4 og jafnvel C5.<sup>16</sup> Einnig er, samkvæmt staðlinum, hægt að flokka umhverfið eftir mælingum á tæringu. Mælingar á tæringu byggingarstáls benda hins vegar til að raunveruleg flokkun ætti að vera lægri eða C2 til C3 á landinu. Þar kemur að vísu einnig fram að tæring á fyrsta ári er ekki góður mælikvarði á langtímatæringu á stáli.

Eitt vandamál varðandi loftborið salt er að stálfletir eru mjög misjafnlega útsettir fyrir saltákomunni. Einnig snúa þeir misjafnlega við regni og þar með þvotti á yfirborði. Þótt það séu sömu fletirnir sem eru útsettir fyrir salti og rigningu þá er ákoman mest í hvassviðri og þyrlast saltið á fleti sem skolast illa af í venjulegri rigningu. Saltið safnast því mest fyrir á flötum sem eru í skjóli, svo sem á innhliðum bita í stálbitabrúm. Þetta sést mjög greinilega á skjöldum úr hægryðgandi stáli sem hafa verið hengdir upp utan á Gullinbrú í Reykjavík.

<sup>12</sup> Morcillo, M. et al. Atmospheric corrosion of weathering steels. Overview for engineers. Part I: Basic concepts. Construction and Building Materials 213 (2019) 723-737.

<sup>13</sup> Seltumælingar, Írafoss, Hrauneyjafoss og Svartárlkot. Áfangaskýrsla. Rarik, 2002.

<sup>14</sup> Úrvinnsla seltumælinga Landsvirkjunar 1993-2002. Afl Verkfræðistofa, 2005.

<sup>15</sup> Tæring málma í andrúmslofti á Íslandi, Áfangaskýrsla 2. EFLA, 2021.

<sup>16</sup> Björn Marteinsson og Jón Sigurjónsson: Tæring málma í andrúmslofti á Íslandi. Árbók VFÍ og TFÍ, 2002.



**MYND 10** Gullinbrú. Brúin er yfir sjó. Hægra megin er mynd sem sýnir ryðflögnur á innra borð skjaldanna. Innfellda myndin sýnir flögu sem fallið hefur niður á göngustíg.

Önnur uppspretta á salti á brýr er vegna söltunar vega. Það á bæði við um salt sem notað er á akbrautir brúarinnar til hálkuvarna, sem þyrlast upp og fýkur á stálvirkið, en einnig vegna umferðar undir umferðarbrýr. Þá þyrlast saltþækillinn upp á veginum undir brúnni og sest á burðarvirkið. Mikið af samverkandi brúm í norðurríkjum Bandaríkjanna hafa skemmt umtalsvert vegna saltnotkunar við hálkuvarnir.<sup>17</sup> Nokkur ríkjanna hættu alfarið að byggja brýr úr hægryðgandi stáli í kjölfarið.

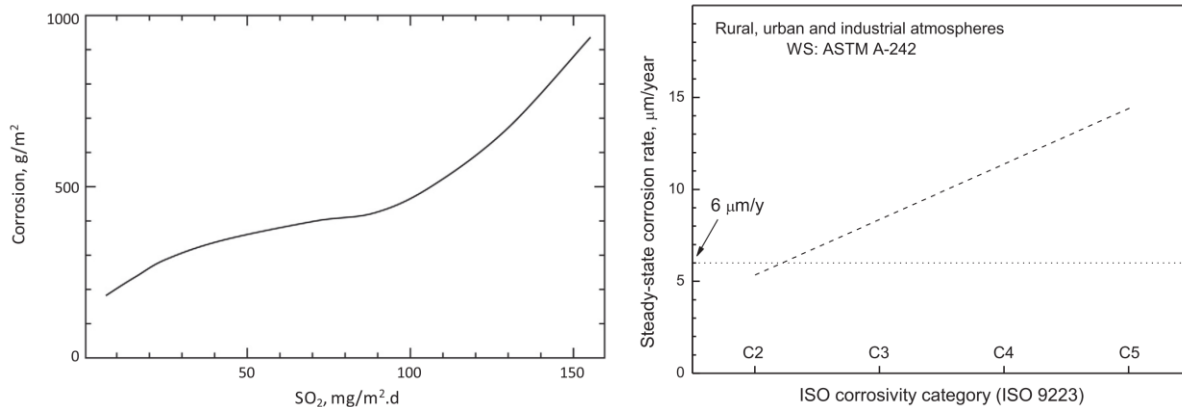


**MYND 11** Eldheimar í Vestmannaeyjum. Til hægri sést hvernig ryðhúðin flagnar af innra borði klæðningarinnar.

### 4.3 Áhrif brennisteins á myndun varnarhúðar

Brennisteinn hefur mikil áhrif á myndun varnarhúðar á hægryðgandi stáli. Brennisteinninn flýtir fyrir myndun varnarhúðar en húðin verður ekki eins verndandi og í ómenguðu umhverfi.

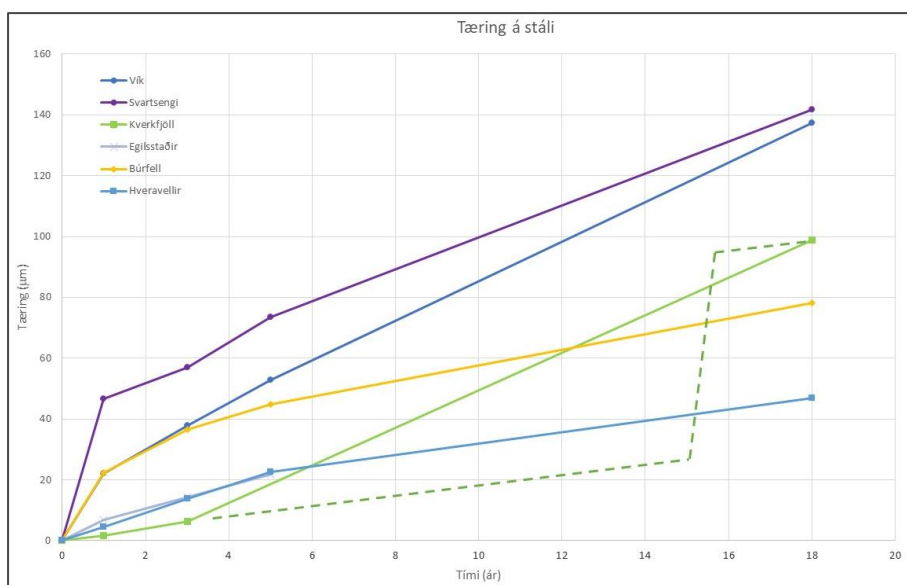
<sup>17</sup> Performance of weathering steel in bridges. NCHR report 272, TRC 1984.



**MYND 12** Áhrif brennisteins á tæringu á hægryðgandi stáli.<sup>18</sup>

Aðaluppspretta brennisteinsmengunar er útblástur frá iðnaði, aðallega iðnaði tengdum jarðefnaeldsneyti. Hann kemur oftast fyrir sem brennisteinstvíldi (SO<sub>2</sub>) eða sem brennisteinsvetni (H<sub>2</sub>S). Mengun frá brennisteini fer almennt minnkandi í heiminum. Hér á landi kemur brennisteinn aðallega fyrir við jarðhitavæði og jarðhitavirkjanir sem H<sub>2</sub>S en einnig er nokkur mengun kringum álverin. Annars staðar er brennisteinsmengun mjög lítil, en mælist þó í þéttbýli vegna bílaumferðar.

Mikill brennisteinn kemur upp í eldgosum á landinu. Þetta má glögg sjá mynd 13 hér að neðan.



**MYND 13** Niðurstöður á mælingum á tæringu á stáli.<sup>19</sup>

Á myndinni eru bornar saman niðurstöður á tæringarmælingum á venjulegu byggingarstáli á 5 stöðum á landinu með mismunandi veðurfari og mengun. Í fyrsta lagi er áhugavert að bera saman tæringu í Vík í Mýrdal og við Svartsengi. Báðir staðir eru með mikla saltmengun en mælistaðurinn við Svartsengi er í um 500 m fjarlægð frá jarðhitavirkjuninni. Í öðru lagi er fróðlegt að bera saman mælistaðina þrjá á hálendinu; Búrfell, Hveravelli og Kverkfjöll. Tæringin á Búrfelli er svipuð og á suðvesturhorninu en

<sup>18</sup> Morcillo, M. et al. Atmospheric corrosion of weathering steels. Overview for engineers. Part I: Basic concepts. Construction and Building Materials 213 (2019) 723-737.

<sup>19</sup> Tæring málna í andrúmslofti á Íslandi, Áfangaskýrsla 2. EFLA, 2021.



norðan heiða við Hveravelli og Kverkfjöll er mun minni tæring. Mælingarnar við Kverkfjöll skera sig úr. Því miður var ekkert sýni þaðan mælt frá þremur árum og að átján árum en fimmtán árum frá uppsetningu sýnanna hófst eldgosíð í Holuhrauni 2014 með mikilli brennisteinsmengun sem gjörbreytti tæringaraðstæðum á svæðinu. Gosíð stóð í um 6 mánuði. Græna brotalínan er líkleg lína sem hefur verið teiknuð frihendis inn á grafið.

#### 4.4 Áhrif raka á myndun varnarhúðar

Komið hefur í ljós að hægryðgandi stál tærist með svipuðum hætti og venjulegt stál ef það er haft við stöðugan raka eða í vatni. Dæmi eru um að það hafi jafnvel ryðgað meira en venjulegt stál. Það er því nauðsynlegt að takmarka notkun þess við þau svæði þar sem stálið nær að þorna vel á milli vökvunar. Ekki virðist ástæða til að takmarka notkun á hægryðgandi stáli m.t.t. magns á úrkomu eða fjölda úrkomudaga hér á landi. Það eru frekar staðbundnar aðstæður sem ráða því hvort stálið nái að þorna.

Dæmi eru um að hægryðgand stál í lokuðum kassapversniðum hafi ryðgað mikið. Luling brúin í Louisiana í Bandaríkjunum er stagbrú yfir Mississippi ána með turnum úr hægryðgandi stáli og byggð árið 1975.<sup>20</sup> Eftir 20 ár hafði þétt og gott varnarlag myndast utan á turnunum en ryð var byrjað að flagna af yfirborðinu inni í turnunum í þykkum flygsum. Ástæðan var talin vera að raki þéttist inni í turnunum og stályfirborðið náði aldrei að þorna vel á milli, en brúin er í umhverfi með hátt rakastig nálægt Mexíkóflóa.

Mikill raki getur einnig safnast saman milli bita í stálbitabrum sem eru nálægt vatnsyfirborði þar sem raki er yfirleitt mikill. Víða eru gerðar kröfur um lágmarkshæð brúar yfir vatnsborði til að fyrirbyggja að slíkt geti komið fyrir.

Svipað á einnig við um stál sem er í snertingu við jarðveg þar sem raki helst að stálinu í langan tíma. Einnig er varað við því að tengja hægryðgandi stál beint við timbur þar sem rakinn í timbrinu veldur tæringu í stálinu kringum skilin ef timbrið getur blotnað. Þá geta komið ljótir ryðtaumar á timbrið.

Að sama skapi er hægt og ákjósanlegt að flýta myndun varnarlagsins á stályfirborðinu með því að vökva yfirborðið reglulega fyrst eftir uppsetningu og sjá til þess að það þorni vel á milli. Þessi aðferð tryggir líka jafna og fallega áferð á stálinu til lengri tíma. Þetta á sérstaklega við um mannvirki þar sem stálið er við misjöfn ytri skilyrði, sem oft á við um brýr. Þannig hafa komið fram verulegar litabreytingar í tilraunum á brúm í Tékklandi<sup>21</sup> eftir staðsetningu stálsins, hvort það er á kroppplötum að utan eða innan eða ofan á eða undir flöngum.

<sup>20</sup> Cook, D.C. og A.C.V, Orden: The Luling Bridge: An Inside Story. Corrosion 2000, Paper 00449.

<sup>21</sup> Urban, V., Krivy, V. og Kreislova, K. (2015). The Development of Corrosion Processes on Weathering Steel Bridges. Procedia Engineering, 114, 546-554.

## 5 RÁÐLEGGINGAR UM HÖNNUN ÚR HÆGRYÐGANDI STÁLI

### 5.1 Stálgæði

Stálgæði fyrir hægryðgandi stál eru skilgreind í ÍST EN 10025-5. Eins og kemur fram í kafla 3 hér að framan þá kemur einungis til greina að nota stál af gæðum K2, J4 og J5 í stálbrýr á landinu. Um val á stáli er fjallað í staðli ÍST EN 1993-1-10 og er fyrirskrifað í Reglum um hönnun brúa frá Vegagerðinni að miða við hitastig sem er 10°C lægra en lægsta umhverfishitastig svæðisins. Lægsti umhverfishiti á landinu er á bilinu -25 – -35°C í byggð.

### 5.2 Fórnarþykkt á stáli

Gera þarf ráð fyrir tæringu á hægryðgandi stáli við hönnun. Það er gert með því að bæta við þykkt á öllum stálflötum og fer viðbótarþykktin eftir umhverfisaðstæðum. Eftir er að móta tillögur að viðbótarþykkt fyrir landið. Annars staðar þar sem brýr eru gerðir úr slíku stáli er gjarnan miðað við 1,0 mm á hvern stálflöt í lítið tærandi umhverfi en 1,5 mm í meira tærandi umhverfi. Innan í opnum kassabítum er reiknað með 0,5 mm en ekki þarf að reikna með viðbótarþykkt í lokuðum loftþéttum kassabítum.<sup>22</sup>

Viðbótarþykktin kemur líka á allar kverksuður og stúfsuður með hlutagegnumbræðslu (partial penetration welds). Hins vegar þarf ekki að reikna með neinu við venjulegar stúfsuður. Ekki þarf að reikna viðbótarþykkt á spennibolta.

### 5.3 Umhverfi

Í kafla 4 er fjallað um myndun varnarhúðar á hægryðgandi stáli í mismunandi umhverfi. Í framhaldi af þeirri umfjöllun er hægt að gefa eftirfarandi leiðbeiningar um hvar ekki á að nota hægryðgandi stál.

---

<sup>22</sup> CD 361 Weathering steel for highway structures. Design Manual for Roads and Bridges. Highways England, 2019.

Það er hins vegar nauðsynlegt að við upphaf hönnunar á brúarmannvirkjum verði farið vandlega yfir forsendur efnisvals ef hugmyndin er að nota hægryðgandi stál í brýr.

- Í nágrenni við uppsprettu á brennisteinsmengun, t.d. háhitasvæði og virka gosbeltið. Það útilokar belti frá Mýrdalsjökli til Grímsvatna/Bárðarbungu og norður í Gjástykki. Þarf að skoða í nágrenni við álver.
- Nálægt strönd þar sem klórmengun er mikil. Þetta svæði er breiðast á Suður- og Suðvesturlandi en er mjórri fyrir norðan og austan. Leiðbeiningar um þetta verða byggðar á yfirstandandi rannsóknarverkefni.
- Þar sem salt frá hálkuvörnum vegar getur borist á stálið.
- Þar sem stálvirkið er rakt í langan tíma og nær ekki að þorna á yfirborði. Hér er gjarnan miðað við að brýr séu meira en 2,5 m yfir vatnsborði.
- Þar sem stálið er í snertingu við jarðveg.

#### 5.4 Þreyta

Samkvæmt ÍST EN 1993-1-9 falla ákveðin deili úr hægryðgandi stáli í lægri flokk varðandi þeytu heldur en deili úr venjulegu byggingarstáli. Það er vegna þess að tæringin veldur pittum í stálinu sem veldur spennutoppum. Þetta á því eingöngu við um ósoðin deili sem ólíklegt er að verði ráðandi við hönnun gagnvart þeytu í brúm þar sem suðudeilin eru oftast ráðandi.

#### 5.5 Deililausnir

Deililausnir fyrir hægryðgandi stál eru í grundvallaratriðum þær sömu og fyrir venjulegt stál fyrir utan að vond deili geta haft heldur meiri og verri áhrif á endingu og útlit. Hér eru nokkur atriði sem vert er að hafa í huga varðandi brýr:

- Hannið bita með góðri afvötnun. Forðist staði þar sem skítur og drasl geta safnast saman. Slípið suður á efra borði (láréttum flötum) svo vatn/raki geti ekki safnast saman.
- Skerið 50 mm úr stífum (cope holes) við kropp/flanga suðuna. Þar sem stífur ná ekki alveg niður á neðri flanga skiljið eftir a.m.k. 30 mm bil.
- Tryggið góða aðkomu eftirlits að stöðum þar sem skítur eða óhreinindi getur safnast saman
- Ef til eru svæði með mjög erfiðar aðstæður þrátt fyrir allt, málið þau svæði. Einnig svæði sem erfitt er að komast að fyrir eftirlit og viðhald.
- Látið kroppplötur ná niður fyrir neðri flanga í kassabítum þannig að kroppurinn myndi droparauf.
- Forðist þensluraufar. Þensluraufar eru mjög líklegar til að leka einhvern tímann á æviskeiði brúar.
- Þar sem þensluraufar eru nauðsynlegar, setjið upp afvötnunarkerfi úr ryðfrúu stáli sem leiðir vatn frá þensluraufinni vel út fyrir brú eða í fyllingu.
- Staðsetjið skil þannig að vatn geti ekki runnið niður stálið eða út á steypuvirki á millistöplum eða endastöplum. Hafið góðan vatnshalla á legusætum og leguhnöllum.



**MYND 14** Ryðsmit á steiptum flötum og timbri. Mynd frá útsýnispöllum á Arnarstapa.

- Sjóðið plötur á stálið til að leiða vatn, t.d. af neðri flöngum stálbita, út af stálvirkinu áður en það nær að steypu.
- Þar sem stál kemur að steypu er gott að kítta í rauf á milli.
- Forðist boltuð skeyti þar sem plötur leggjast saman. Skítur safnast saman við skilin og ryð getur sprengt sundur skeytin. Séu þau nauðsynleg þá er gott að kítta í samskeytin og sjá til þess að raki setjist ekki í skorur.



- Fyrir samverkandi brýr er gott að nota breiða/langa útkrögun með góðri droparauf.
- Forðast þer að tengja saman tvo ólíka málma til að forðast tæringu vegna spennunar. Það er þó yfirleitt í lagi að nota t.d. ryðfría bolta sem eru ofar í spennuröðinni en stálið.
- Forðast þer að hafa auðvelt aðgengi að stálbitunum þar sem hættu er á veggjakroti. Erfitt getur verið að fjarlægja veggjakrot af bitunum svo vel sé.

## 5.6 Rafsuða

Til að sjóða saman hægryðgandi stál þá er meginreglan sú að nota suðuvír með sömu samsetningu og stálið til að tryggja að suðurnar hafi sömu tæringaeiginleika og grunnstálið. Í ST EN 1090-2 gefur nokkra möguleika á að velja suðuvír. Hér er reiknað með tengingu þar sem suðan tærist með sama hætti og stálið þó efnasamsetningin sé ekki sú sama.

**TAFLA 7** Suðuvír sem nota skal við suðu á stáli skv. Í ST EN 10025-5.

Process	Option 1	Option 2	Option3
111	Matching	2,5 % Ni	1 % Ni 0,5 % Mo
135	Matching	2,5 % Ni	1 % Ni 0,5 % Mo
121,122	Matching	2 % Ni	1 % Ni 0,5 % Mo
Matching: $\geq 0,4$ % Cu and other alloy elements			
NOTE See also 7.5.10.			

Í töflunni er suðuaðferð 111 venjuleg pinnasuða (MMA), 135 er hlífðargassuða (MAG) og 121 og 122 eru duftsuður (SAW).

Það hefur sýnt sig í reynd að í sumum tilfellum er betra að nota venjulegan suðuvír fyrir hægryðgandi stál. Það á við í þykkum suðum með mörgum suðustrengjum. Þá er þess gætt að ystu strengirnir séu úr hægryðgandi stáli. Það þarf þó að gæta þess að rétt stál verði ávallt í yfirborði þegar plötur eru skornar í suðunni eftir samsuðu.

Skúfboltar fyrir samverkandi brýr úr hægryðgandi stáli eru ekki til. Þá eru notaðir venjulegir skúfboltar í staðinn. Það er allt í lagi þar sem þeir eru alltaf á kafi í steypu. Þeir eru soðnir á sama hátt og aðrir skúfboltar. Þó verður að gæta að suðuaðstæðum því að kolefnisjafngildi hægryðgandi stáls er hátt og hærra en í venjulegu stáli. Fyrir þykkar plötur getur það þýtt að forhita verði stálið til að draga úr kólnunarhraðanum.

### 5.7 Boltaðar tengingar

Mælt er með því að nota HSWG bolta í allar boltaðar tengingar til að losna við rifur milli platna. Boltar þurfa að vera úr svipuðu stáli og stálvirkið, þ.e. hafa svipaða samsetningu. Slíkir boltar eru ekki skilgreindir í núverandi útgáfum af Evrópustöðlum. Í Bandaríkjunum er staðall ASTM A325, Type 3, Grade A fyrir svona bolta.

Svona boltar eru frekar sjaldgæfir þannig að alveg er eins líklegt að kaupa þurfi þá frá Bandaríkjunum eða annars staðar utan Evrópu. Þá getur verið skynsamlegt að miða boltafjarlægðir við tommubolta þar sem 24 mm bolta er erfiðara að fá. Þarf þá e.t.v. að endurhanna skeytin. Ekki er gott að nota álagsskinnur eða aðrar slíkar aðferðir til að meta herslu þar sem ryð kemur til með að safnast í rifurnar og sprengja sundur skeytin.

Nota má sömu núningsstuðla fyrir hægryðgandi stál og venjulegt stál og smáryð á yfirborði hefur ekki áhrif á stuðlana. Gott er að gæta vel að hámarksfjarlægðum til að koma í veg fyrir að plötur gapi á köntunum. Síðan er gott að kitta meðfram plötuskeytunum.

### 5.8 Yfirborð

Það er mikilvægt að ganga þannig frá yfirborði á hægryðgandi stáli að áferðin verði sem jöfnust og að liturinn á ryðhúðinni verði sem jafnastur. Eftirfarandi atriði er gott að hafa í huga:

- Sandblása yfirborðið með léttum sandblæstri Sa2 til að fjarlægja alla valshúð og óhreinindi.
- Ekki nota merkingar á stálinu við smíðina sem hindra myndun verndarhúðar svo sem vax eða þess háttar. Svona merki gætu orðið mjög áberandi eftir veðrun.
- Besta og jafnasta áferðin á stálið fæst með því að vökva yfirborðið reglulega nokkrum sinnum og láta þorna vel á milli. Þá myndast verndarhúðin fljótt og verður einsleitari.
- Það er mikilvægt að ganga vel um stálið á byggingartíma til að verndarhúðin laskist ekki og verið ójöfn. Þá þarf að gæta þess að steypa eða grautur þorni ekki á yfirborðinu.
- Á byggingartíma gæti þurft að vernda stöpla og sökkla úr steinsteypu með yfirbreiðslum fyrir afrennsli af stálinu til að koma í veg fyrir að þeir litist af ryðtaumum.
- Stundum getur verið vænlegt að mála hægryðgandi stál. Það getur verið á stöðum sem erfitt er að komast að eða eru meira útsettir fyrir uppsöfnun á mengandi efnum. Það getur líka verið af fagurfræðilegum ástæðum, til að fá ákveðinn lit á ytra borð brúarinnar. Þá eru kostir

hægryðgandi stáls að vísu ekki nýttir, en komið hefur í ljós að málning endist heldur betur á hægryðgandi stáli en venjulegu stáli.

## 6 SPARNAÐUR VIÐ AÐ NOTA HÆGRYÐGANDI STÁL

Við ákvörðun um hvort nota skuli hægryðgandi stál í brú er nauðsynlegt að bera saman kostnað við að byggja brúna úr venjulegu byggingarstáli. Samanburðurinn þarf að ná til byggingarkostnaðar en ekki síður til viðhaldskostnaðar. Inn í viðhaldskostnaðinn þarf síðan að taka beinan kostnað við sjálft viðhaldið á stálinu en einnig óbeinan kostnað vegna umferðarstýringar og kostnað umferðarinnar vegna tafa á verktímanum.

Í hönnunarleiðbeiningum bresku vegagerðarinnar fyrir vegi og brýr (CD 355) er gerð krafa um að gerð sé núvirðisgreining á kostnaði við framkvæmdir í vega- og brúargerð.<sup>23</sup> Þar ber að taka inn byggingarkostnað til viðbótar við allan viðhaldskostnað og allan afleiddan kostnað umferðarinnar á meðan á viðhaldsaðgerðum stendur.

### 6.1 Byggingarkostnaður

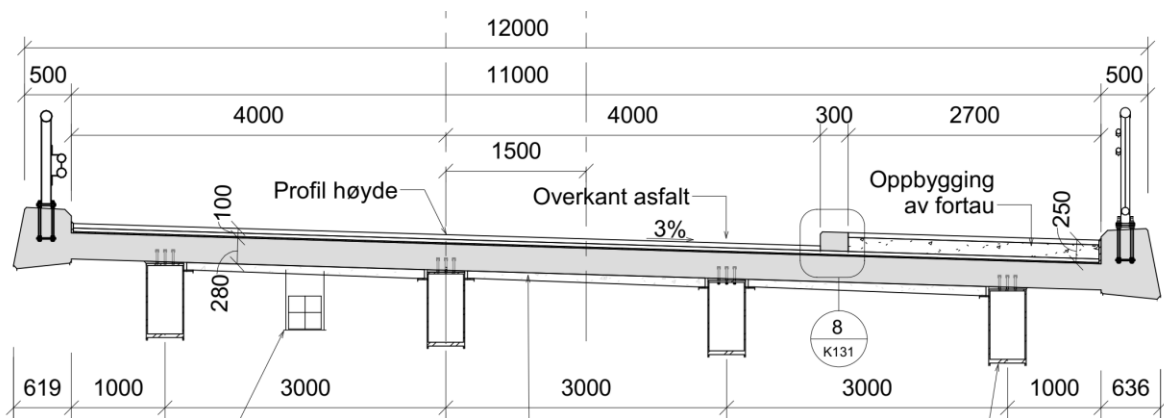
Mismunur í byggingarkostnaði er háður mismun í stálverði og smíðakostnaði, kostnaði við aukþykkt á stáli vegna tæringar og svo málningarkostnaði. Yfirleitt er reiknað með 1,0-1,5 mm aukþykkt á stáli á hvert yfirborð. Fyrir stál með 20 mm þykkt þýðir þetta 10-15% aukningu á stálmagni fyrir I-bitu þar sem allar hliðar eru opnar fyrir tæringu en 5-7,5% fyrir lokaðan kassabita þar sem einungis úthliðar hans geta tærst. Þessar tölur eru svo heldur lægri ef bitarnir eru samverkandi með steypu að einni hlið. Hægryðgandi stál er dýrara en venjulegt byggingarstál. Erfitt er að festa ákveðna tölu á muninn, hann er síbreytilegur og háður framboði á hægryðgandi stáli. Á móti þessum kostnaðarauka við sjálft stálið kemur síðan kostnaðurinn við ryðhreinsun og málun. Sá kostnaður er háður gæðum málningar og fjölda málningarumferða og málningarþykkt. Málningarkerfin sem notuð eru hér á landi með heitsínksprautun (thermal spray) sem grunn og heildarþykkt milli 300 og 400 µm eru dýr en endingargóð. Í þeim erlendu athugunum sem gerðar hafa verið á samanburði á kostnaði við hægryðgandi stál og málað stál hefur munurinn verið metinn 5-10% þar sem hægryðgandi stálið er ódýrara. Er þá miðað við heildarkostnað við efni, smíði og ryðvörn. Við skoðun á fýsileika hefur gjarnan

<sup>23</sup> Design Manual for Roads and Bridges. CD 355: Application of whole-life costs for design and maintenance of highway structures. Highways England, 2019.

verið reiknað með sem íhaldssama nálgun að hægryðgandi stál og málað stál kosti það sama. Munurinn komi einungis fram í viðhaldskostnaðinum.

Uppsetningarkostnaður á stáli ætti að vera svipaður þótt hægryðgandi stálið sé aðeins þyngra. Á móti kemur að eftir reisingu á máluðu stáli þarf yfirleitt að gera við málningarskemmdir og jafnvel heilmála síðustu umferðina á staðnum þegar mikið er lagt upp úr útliti brúarinnar. Slík eftirvinna getur líka komið til við hægryðgandi stál sem er þá gjarnan léttur sandblástur til að fjarlægja óhreinindi og tryggja jafna og fallega áferð á stálið þegar ryðhúðin myndast.

Sem dæmi um samanburð á kostnaði er hér tekin brú í Noregi sem hönnuð var sem samverkandi brú úr hægryðgandi stáli S355WJ5 og með steypu brúargólfi. Stálið í brúna er um 29 tonn og málningarflötur er um 225 m<sup>2</sup>. Brúin er með fjórum lokuðum kassabítum sem eru loftþéttir og er því ekki reiknað með að þeir séu málaðir að innan í máluðu útfærslunni og tæring á hægryðgaða stálinu sé einungis á ytra borði. Brúin hefur því frekar lágt hlutfall á milli málaðs stályfirborðs og þyngdar á stáli.



**MYND 15** Pversnið í Næroset brú í Noregi úr hægryðgandi stáli.<sup>24</sup>

Væri brúin gerð úr venjulegu máluðu stáli gæti kostnaður verið:

Stál	29 tonn	700 kr./kg	20.300 þús.kr.
Málning	225 m <sup>2</sup>	15.000 kr./m <sup>2</sup>	3.375 þús.kr.
Samtals			23.675 þús.kr.

Hér hafa verið notuð líkleg einingaverð hér á landi fyrir smíðað stál í stálbitum og málningarkerfi sem tíðkast á stálbrúm. Niðurstaðan er að hægryðgandi stál má í þessu tilviki kosta allt að 15% meira en venjulegt stál til þess að byggingarkostnaðurinn verði sá sami.

## 6.2 Viðhaldskostnaður

Viðhaldskostnaður skiptist í beinan viðhaldskostnað og afleiddan kostnað. Beini viðhaldskostnaðurinn fyrir málað stál er endurmálun sem reikna má með að falli til á um 25-30 ára fresti. Líði lengra á milli endurmálunar þarf að gera við málninguna með blettun á milli. Það getur verið góður kostur því að þá þarf ekki að endurnýja grunninn og sandblása inn í stál heldur er látið nægja að hreinsa málninguna

<sup>24</sup> Næruset bru. Útboðsgögn fyrir Statens Vegvesen í Noregi. EFLA 2021.



ofan af grunninum eingöngu þar sem skemmdir ná inn að stályfirborði. Þá þarf bara að endurnýja milli- og yfirmálninguna.

Afleiddi kostnaðurinn er kostnaður veghaldarans eða verktakans við að halda brúnni opinni á framkvæmdatíma og einnig kostnaður umferðarinnar á framkvæmdatímanum. Kostnaður veghaldarans, sem hann oftast yfirfærir á verktakann sem sinnir viðhaldinu, er að sjá um merkingar og jafnvel ljósastýringu umferðar ef loka þarf akreinum. Það á sérstaklega við um brýr yfir vegi þar sem rými yfir akbraut er takmarkað. Einnig getur verið að gera þurfi hjáleidir fyrir umferð framhjá framkvæmdasvæðinu.

Kostnaður umferðarinnar kemur til vegna tafa í umferðinni vegna þrengingar á umferð þannig að draga verður úr umferðarhraða á vinnusvæðinu, setja upp umferðarljós eða leiða umferðina um hjáleid. Allt veldur þetta aukakostnaði hjá ökumönnum, bæði tafatímakostnaði og aksturskostnaði. Þessi kostnaður er mjög breytilegur eftir því hversu mikil umferðin er og hverjar aðstæður eru til að takmarka umferð um veginn yfir og undir brúna. Leiðbeiningar um útreikninga á tafatímum er að finna í CD 355.

Allan kostnað sem til fellur á líftíma brúarinnar þarf að núvirða til framkvæmdatímans og leggja við beinan byggingarkostnað til að fá líftímakostnað mannvirkisins. Á grunni líftímakostnaðar ætti síðan að taka ákvörðun um hvaða útfærsla er valin.

Þegar stálbrú úr hægryðgandi stáli er byggð við réttar aðstæður og vel deilihönnuð verður stálið u.þ.b. viðhaldsfrítt. Eini kostnaðurinn sem fellur til er við reglubundið eftirlit með yfirborðinu. Það felst fyrst og fremst í að athuga hvort ryðhúðin sé ekki tryggilega föst við stályfirborðið eins og hún á að vera. Skoða þarf sérstaklega viðkvæma staði þar sem óhreinindi geta safnast saman og svo í nágrenni við niðurföll og þensluraufar þar sem hætta er á að raki nái ekki að þorna. Þetta eftirlit er ekki umfangsmeira en eftirlit með máluðu stáli, en er nokkuð annars eðlis. Kostnaðurinn ætti ekki að vera hærri fyrir hægryðgandi stál.

Allur núvirtur kostnaður við viðhaldsmálun á venjulegu stáli leggst því ofan á byggingarkostnaðinn þegar reynt er að bera saman þessa tvo valkosti. Við núvirðingu kostnaðar í framtíðinni eru notaðir almennir vextir og er deilt um hvaða vexti skuli nota. Hér á landi hafa vextir verið að lækka og eru stýrivextir Seðlabankans núna 1,5% (hækkaðir í 2,0% 17.11.2021) sem þykir hátt á mælikvarða þjóðanna hér í kringum okkur.

Til að skoða þetta í samhengi við brúna hér að ofan þá er hægt að finna beinan viðhaldskostnað og núvirða. Viðhaldsmálun á 25 ára fresti þar sem viðhaldskostnaður er áætlaður um 30.000 kr./m<sup>2</sup> gefur 6,75 millj.kr. í hvert skipti eða samtals 27 millj.kr. Sé þessi upphæð núvirt með 2% vöxtum verður núvirtur kostnaður 9,1 millj.kr. og um 6 millj.kr. ef núvirt er með 3% vöxtum. Viðhaldsmálunin hefur því mun meiri áhrif á val á hægryðgandi stáli heldur en málningarkostnaðurinn í upphafi.

Hvað viðvíkur óbeinum kostnaði við viðhald þá er hann svo breytilegur eftir aðstæðum að erfitt er að gefa nokkur viðmið. Hann getur verið lítill sem enginn á umferðarlitlum vegum með gott aðgengi að vinnusvæðinu og upp í að tvöfalda kostnað við heinsun og málun í þéttbýli með mikla umferð sem þarf að stjórna eða leiða annað.

