

Skynjarar í kápusteypu Borgarfjarðarbrúar



Útg.	Dagsetning	Höfundur	Yfirfarið	Samþykkt	Lýsing
3	27/06 2007	GG	Vegagerðin	Já	Lokaskýrsla
2	17/01 2007	GG	ML	Já	Lokaskýrsla
1	11/01 2007	GG	GG		Uppkast

Skýrsla nr: VH-2007-070	Útgáfudags.: (mán/ár) Júní/2007	Dreifing: Opin <input checked="" type="checkbox"/> Lokuð <input type="checkbox"/>
Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill: Skynjarar í kápusteypu Borgarfjarðarbrúar Samantekt, lokaskýrsla		Upplag: 10 Fjöldi síðna: 32
Höfundur/ar: Gísli Guðmundsson,		Verkefnisstjóri: Gísli Guðmundsson Verknúmer: 7.009.258
Útdráttur: <p>Í yfirborði kápusteypunni frá 2004 er yfirborð steypunnar nánast aldrei í hættu á frost/þíðu-skemmdum. Sjávarföllin valda því að frost/þíðu-sveiflan verður aldrei mikil (hámark um +/- 2-3 °C) og síðan þegar lofthitinn fer niður í um – 8 °C , þá nær sjórinn ekki að hita steypuna upp fyrir frostmark, því er lítil hættu á frostskemmdum í yfirborði steypunnar.</p> <p>Hitastigsmælingar eins og hafa verið framkvæmdar í kápusteypun í Borgarfjarðarbrú geta veitt mikilvægar upplýsingar um ástand og endingu viðkomandi mannvirkis. Að saman skapi þarf að gefa þessum skynjum tíma til þess að vinna sitt hlutverk og nauðsynlegt er að safna nægjanlegum upplýsingum frá þeim. Þessar upplýsingar er síðan hægt að notað við ástandsmat mannvirkisins.</p> <p>Tæringasellunum var komið fyrir í steypunni í október 1999. Ýmis vandamál hafa komið upp, sem hafa orðið til þess að mæliniðurstöðurnar hafa reynst bæði ótrúverðugar og ósambærilegar. Ekki er hægt með óyggjandi hætti að segja til um hvort tæring eigi sér stað í einhverjum anóðu-katóðu pörum, eða hvenær tæringarhætta skapast í bendistálinu. Eins og staðan er í dag er því ekki hægt að mæla með notkun á svona tæringasellum til þess að spá fyrir um tæringarhættu í mannvirkjum.</p>		
Verkkaupi: Vegagerðin	Tengiliður verkkaupa: Einar Hafliðason	
Samstarfsaðilar:		
Efnisorð: Steinsteypa, hitanemar, tæringasellur	ISBN:	
	Undirskrift verkefnisstjóra:	
	Yfirfarið af: Matthías Loftsson	

Efnisyfirlit

Efnisyfirlit	3
Töfluskra	3
Myndaskra	3
Inngangur	4
Athuganir 1999	5
Athuganir 2004	7
Hitastigsmælingar	8
Rakaskynjarar	14
CorroWatch skynjarar	15
Viðmiðunarelektróður	20
Samantekt.....	22
Viðauki I. Staðsetning skynjara í Kápusteypu frá 1999	25
Viðauki II. Helstu heimildir er fengust úr heimildaleit.....	27
Viðauki III. Tæringaskynjarar	30

Töfluskra

Tafla 1. Niðurstöður úr mælingum á leiðni klórs inn í sýnin.....	17
Tafla 2. CW #360 tæringarskynjarar í neðri hluta sjávarfallabeltis.....	19
Tafla 3. CW #359 tæringarskynjarar í efri hluta sjávarfallabeltis	20
Tafla 4. Niðurstöður úr mælingum með viðmiðunarelektróðum.....	20

Myndaskra

Mynd 1. Óvarið brynvarnarjárn á stöpli (t.v.) og bendijárn (t.h.).....	4
Mynd 2. Kápusteypa frá 1998.....	5
Mynd 3. Uppsetning og aflestur af tæringasellum.....	5
Mynd 4. Samanburður á hita frá Veðurstofunni og lofthita á Borgarfjarðarbrú.....	8
Mynd 5. Niðurstöður úr hitastigsmælingum í Kápusteypunni.....	9
Mynd 6. Samband á milli hitastigs á 5 og 9 cm dýpi í Kápusteypunni	10
Mynd 7. Hitastig í Kápusteypunni í tiltölulega löngum frostakafla.	10
Mynd 8. Hluti af einum tiltölulega löngum frostakafla.	11
Mynd 9. Niðurstöður úr hitastigsmælingum í Kápusteypu frá 15-10-06 til 4-1-07....	12
Mynd 10. Hitastig í Kápusteypunni í nokkrum tiltölulega löngum frostaköflum.	12
Mynd 11. Tiltölulega langur frostakafla.....	13
Mynd 12. Niðurstöður úr hitastigsmælingum í Kápusteypu frá 15-10-06 til 4-1-07..	14
Mynd 13. Niðurstöður úr hitastigsmælingum í Kápusteypu.....	14
Mynd 14. CorroWatch tæringarskynjari	15
Mynd 15. Skematísk uppsetning á CorroWatch tæringarskynjurum.....	16
Mynd 16. Skematísk uppsetning á CorroWatch tæringarskynjurum og spennumælingu.	16
Mynd 17. CW-359 efsta katóðu-anóðu parið, skrá sem fall af tíma.....	18
Mynd 18. CW-359 efsta katóðu-anóðu parið, skrá með gagnasafnara.....	19
Mynd 19. Uppsetning á viðmiðunarelektróðu ERE 20 - MnO ₂ – elektróður.	20
Mynd 20. Vatnsupptaka sýna í frostþolsprófun.....	22
Mynd 21. Hitastigsferill ófrostþolinnar steinsteypu í frostþolsprófun.....	23
Mynd 22. Hitastigsferill frostþolinnar steinsteypu í frostþolsprófun.....	23

Inngangur

Tildrög þessa verkefnis eru steypuskemmdir sem komið hafa fram í stöplum undir Borgarfjarðarbrúnni. Yfirborðsflögnun á sér stað í steypunni. Flögnunin er mest í þeim hlutum stöplanna sem eru við lægstu fjörumörk. Flögnunin minnkar þegar ofar dregur og hún er engin fyrir neðan lægstu fjörumörk. Steypan sem verður fyrir skemmdum er sprungin við yfirborðið, sprungurnar liggja um sementsefjuna samsíða yfirborðinu og valda því að sementsefjan flagnar smám saman af. Sökum þess að sprungurnar liggja ekki í gegnum fylliefnin, þá sitja þau eftir í steypunni og standa út úr sementsefjunni uns efjan sem heldur þeim föstum er farin, sjá mynd 1.

Þar sem flögnunin er mest er bendijárn óhulið í yfirborði steypunnar og bendijárnið því óvarið gegn tæringu. Við viðgerðir á stöplum hefur komið í ljós að nokkur bendijárn voru tærð í sundur. Slíkt ástand er mjög alvarlegt vegna þess að burðargeta mannvirkisins byggir að hluta til á járnagrindinni. Hins vegar virðist tæring í bendistáli ekki vera í öllum stöplunum og það virðist vera undantekning að finna alvarlega tæringu í þeim. Stöplarnir eru varðir fyrir ísreki á endunum með vinkiljárn, sjá mynd 1. Bendistálið virðist vera tengt við þessi járn og þar af leiðir mun öll tæring eiga sér stað í brynvörninni. Hún myndar s.k. varnaranóðu (e. sacrificial anode). Algengt er að sjá mikla tæringu í þessum járnnum. Þannig kemur brynvarnarjárníð í veg fyrir tæringu bendistálsins.



Mynd 1. Óvarið brynvarnarjárn á stöpli (t.v.) og bendijárn (t.h.)

Ekki er ætlunin að fjalla nánar um steypuskemmdirnar og þær úrlausnir sem gripið hefur verið til. Þegar hefur verið steyp utan um allmarga stöpla. Á mynd 2 er sýnd kápusteypa frá 1998, sem var fyrsta kápusteypan, sem var steyp utan um stöpul 4. Samfara viðgerðum árin 1999¹ og 2004 var komið fyrir skynjurum í kápusteypunni. Í

¹ gerð var grein fyrir niðurstöðum í Rb-skýrslu árið 2001

Þessi skýrsla er gerð grein fyrir skynjum sem voru innsteyptir í kápusteypuna og mæliniðurstöðum frá þeim, þar með talið eldri niðurstöðum.



Mynd 2. Kápusteypa frá 1998

Markmið þessarar rannsóknar er tvíþættur. Í fyrsta lagi að kanna hvort tæringarsellur eins og komið var fyrir í Borgarfjarðarbrú geti gefið upplýsingar um ástand bendistáls í steypunni, en ef svo er þá gefa þær verulegar upplýsingar um ástand mannvirkis á tiltölulega einfaldan og hagkvæman hátt. Í öðru lagi að kanna áhrif sjávarfalla á frost/þíðu-sveiflur í steypunni og sjá hve langt frost/þíðu -sveiflur ná inn steypuna.

Uppsetning og aflestur af tæringasellu í kápusteypu frá 1999 má sjá á mynd 3. Á myndinni má sjá mæli, viðnámsbox og vírahneppi (sem í eru alls um 520 m af vírum).



Mynd 3. Uppsetning og aflestur af tæringasellum.

Athuganir 1999

Auk beinna athugana og mælinga var gerð nokkuð ítarleg leit að bókum og ritum sem fjölluðu um skynjara í steypu, þá sérstaklega um tæringarskynjara og klórskynjara. Lista með helstu heimildum úr leitinni er að finna í viðauka II.

Hita- og rakaskynjarar voru keyptir frá Element Skynjaratækni. Hitanemarnir eru thermocouple nemar (K-type) og rakanemarnir spennunemar (HY CAL).

Hitanemarnir eru alltaf í gangi og þeir þurfa enga utanaðkomandi orku, þeir ganga á eigin orku ef svo má segja. Hins vegar þurfa rakanemarnir 5 volta spennu.

Við val á “tæringarskynjurum” var úr vöndu að ráða því tiltölulega mikið framboð er á slíkum nemum. Ákveðið var að taka skynjara frá FORCE INSTITUTE í Danmörku svokallaða. CorroWatch (CW) skynjara með viðmiðunarelektróðu. Skynjararnir sem eru í boði, eru allir keimlíkir, meginástæða fyrir valinu á CorroWatch skynjurunum voru góð samskipti sem Rb hafði við FORCE stofnunina. Lýsing á CorroWatch skynjurunum frá FORCE INSTITUTE fylgir í viðauka III. Í stuttu máli er hver skynjari samsettur úr fjórum anóðum og einni katóðu. Anóðurnar eru hafðar við yfirborð steypunnar, í mismikilli fjarlægð og katóðan er innar í steypunni. Síðan er fylgst með spennu og viðnámi milli hveirrar anóðu og katóðu. Það tekur skynjarana nokkurn tíma að ná jafnvægi við steypuna en eftir að því er náð eiga litlar spennubreytingar sér stað, ef engin breyting á sér stað í hinni alkalísku vörn steypunnar. Ef hins vegar vörn steypunnar brotnar niður (klór gengur inn eða steypan kolsýrist), þá byrja anóðurnar að tærast. Samfara því breytist spennujafnvægið milli anóðu og katóðu mikið. Þar sem anóðunum er raðað upp í mismikla fjarlægð frá yfirborði er hægt að fylgjast með því hve hratt þessi breyting gengur inn í steypuna og þar með er hægt að segja fyrir um hvenær tæring nær inn að bendijárninu og hættuástand skapast. Til að byrja með (fyrstu tvö til þrjú árin) þurfti að lesa um fjórum sinnum á ári af skynjurunum, síðan var hægt að fækka aflestrunum niður í tvo á ári.

Í upphaflegri verkáætlun var gert ráð fyrir að koma klórskynjurum fyrir í steypunni. Horfið var frá þessu, aðallega vegna þess að þróun slíkra skynjara er komin tiltölulega stutt á veg og líftími þeirra er mjög stuttur. Samkvæmt upplýsingum frá dr. Bernard Elsener er líftíminn aðeins um tvö ár. Þannig að það var ekki talið svara kostnaði og fyrirhöfn að koma slíkum skynjurum fyrir í kápusteypu. Steypan er mjög þétt, þannig að klór gengur mjög stutt inn í steypuna á tveimur árum, og því hefðu engar marktækar upplýsinga fengist úr slíkum mælingum. Niðurstöður úr CorroWatch mælingunum gefa vísbendingar um hversu hratt klór gengur inn í steypuna, því tæringin hefst þegar klór kemst inn að anóðunum. Þar að auki voru sýni tekin úr steypunni og leiðnistuðull fyrir klór ákvarðaður í þeim, sjá síðar í skýrslunni. Út frá slíkum mælingum er síðan hægt að reikna út tíma sem tekur klór að berast inn að járnagrindinni. Einnig má bora kjarna úr stöplunum og mæla klórmagnið í þeim.

Skynjurunum var komið fyrir í mótunum í annarri viku október mánaðar 1999. Starfsmenn Vegagerðarinnar önnuðust ísetninguna, en það reyndist nokkuð auðvelt að koma þeim fyrir. Hver skynjari er með 20 m langan kapal, alls urðu þetta um 520 m af leiðslum. Skynjararnir voru skorðaðir fastir við járnagrindina í kápusteypunni þegar þeir voru lagðir. Leiðslurnar frá skynjurunum voru teknar upp úr kápusteypunni í röri, rauf fyrir rörið var fræst í yfirborð stöpulins þannig að það væri slétt við yfirborðið. Leiðslurnar voru síðan lagðar upp að handriði fyrir ofan stöpulinn og tengdar inn í vatnsþétta rafmagnstöflu.

Skynjurunum komið fyrir á tveimur stöðum, annars vegar við flóðmörk (70 cm fyrir neðan neðri mörk á kápusteypu) og hins vegar við fjörmörk (70 cm fyrir ofan neðri mörk á kápusteypu). Á hvorum staðnum var komið fyrir:

- tveimur hitaskynjurum á 5 og 9 cm dýpi frá yfirborði
- einum rakaskynjara á 5 cm dýpi frá yfirborði
- fjórum anóðum frá 5 til um 3,5 cm dýpi frá yfirborði
- einni viðmiðunar elektróðu á 5 cm dýpi

Auk þess var einum hitaskynjara komið fyrir vel undir sjávarföllumum.

Sjá nánari lýsingu á staðsetningu skynjara í viðauka I.

Hitaskynjararnir voru tengdir gagnasafnara (ACR Systems Inc.) sem skráir hitastigið á klukkutíma fresti. Þannig uppsettur með fimm skynjara gat gagnasafnarinn safnað gögnum í allt að 111 daga.

Frá 2001 hefur hitastigið ekki verið skráð að neinu gangi, vegna þess að gagnasafnarar eyðilögðust. Aðalvandamál við hitastigmælingarnar var að ef skrá átti hitastigið á klukkustundar fresti þá fylltist minni gangasafnaranna tiltölulega fljótt auk þess sem rafhlaðan í þeim entist aðeins í nokkur ár.

Athuganir 2004

Þegar steyp var utan um stöplana árið 2004 með sjálfútleggjandi steypu voru hitanemar steyptir inn með steypunni.

Hitaskynjurunum var komið fyrir á tveimur stöðum, annars vegar við flóðmörk og hins vegar við fjörumörk. Skynjurunum var komið fyrir mun nær yfirborði steypunnar en áður.

Á efra svæðinu var hitaskynjurunum komið fyrir:

- 10 mm frá yfirborði steypu
- 20 mm frá yfirborði steypu
- 30 mm frá yfirborði steypu
- 50 mm frá yfirborði steypu

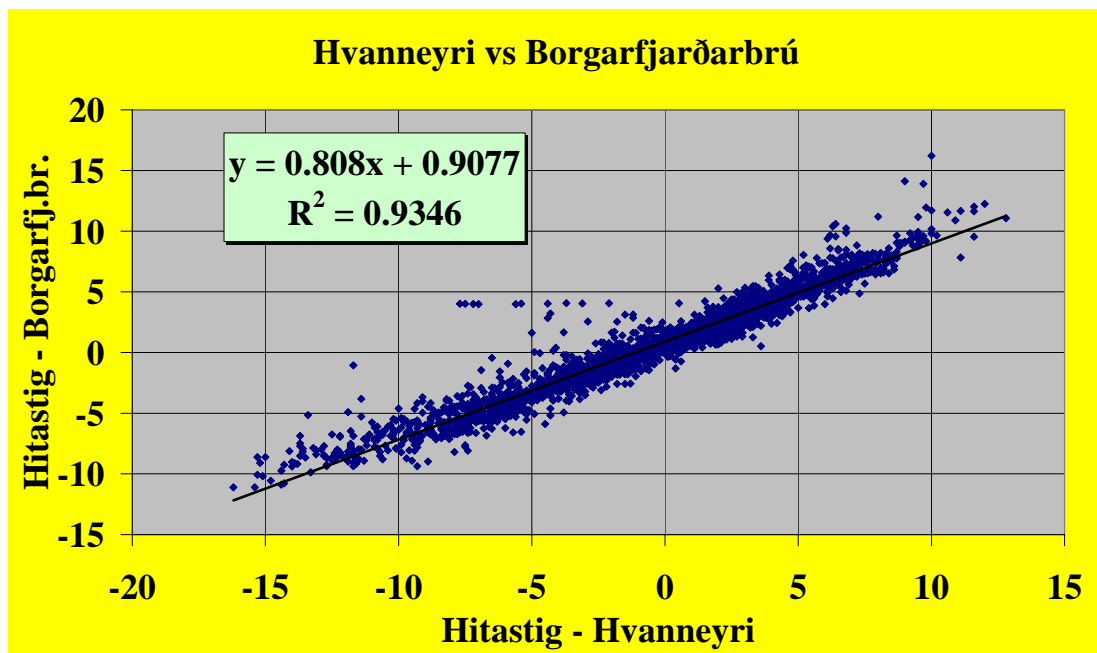
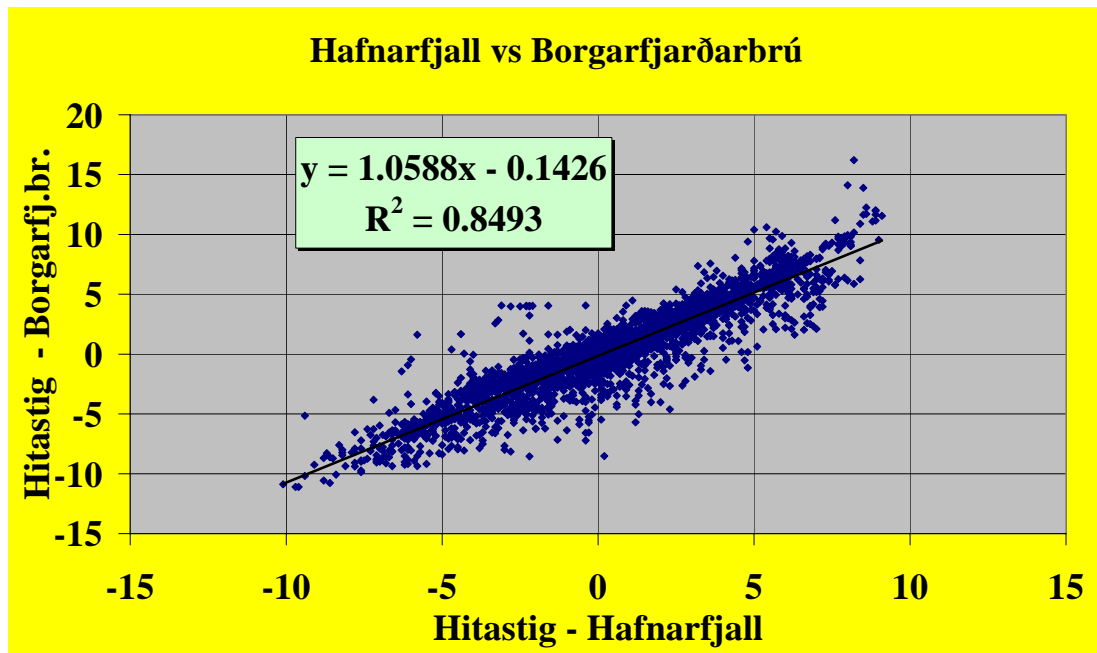
Á neðra svæðinu var hitaskynjurunum komið fyrir:

- 10 mm frá yfirborði steypu
- 20 mm frá yfirborði steypu
- 50 mm frá yfirborði steypu

Hitastig í steypunni var skráð þegar hún var steypd (hitamyndun), en síðan hefur hitastigið ekki verið skráð fyrir en mælingar hófust þann 15-10-2006. Núna er hitastigið skráð á klukkutíma fresti. Miða við fjóra hitavíra geta gagnasafnararnir safnað gögnum án þess að lesið sé af þeim í um 725 daga. Rafhlaðan í gagnasöfnunum endist í um 10 ár.

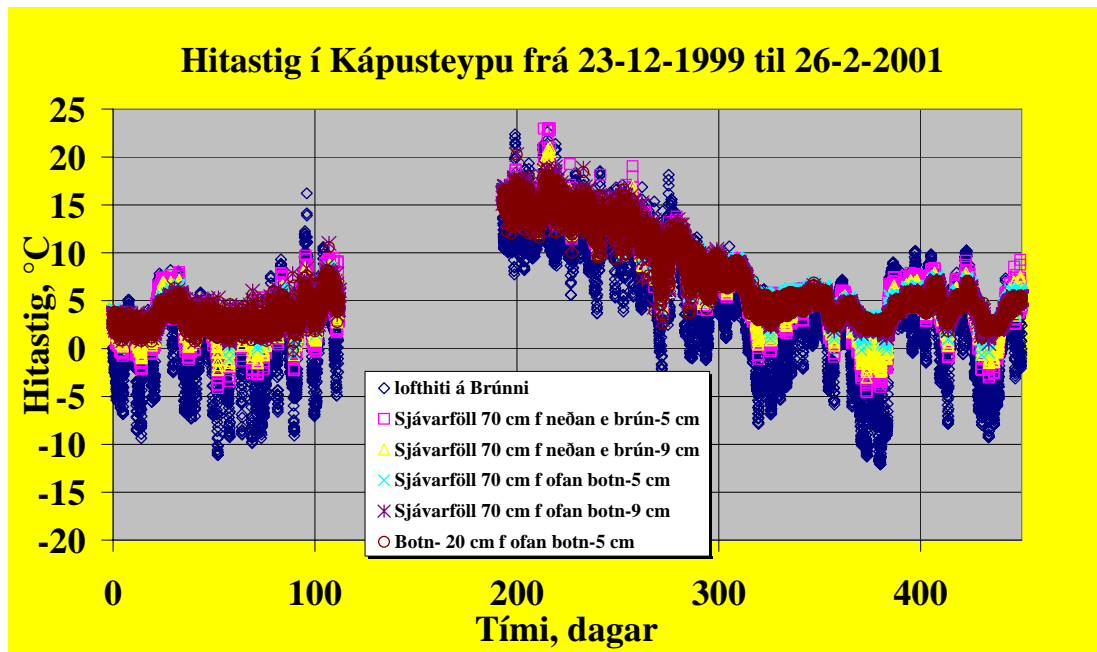
Hitastigsmælingar

Eftir fyrsta aflesturinn í Kápusteypunni frá 1999, sem var gerður í apríl 2000 var yfirborðshitastigið borið saman við hitastig á tveimur nærliggjandi veðurstöðvum Veðurstofunnar, annars vegar Hvanneyri og hins vegar Hafnarfjall. Samanburðurinn er sýndur á mynd 4. Mjög gott samræmi er á milli lofthitas á brúnni og þessum tveimur mælistöðvum, en það bendir til þess að uppsetning tækjanna og virknin sé í góð lagi.



Mynd 4. Samanburður á hita frá Veðurstofunni og lofthita á Borgarfjarðarbrú.
 Samanburður milli mælds hita á Hafnarfjalli (efri myndin) annars vegar og Hvanneyri (neðri myndin) hins vegar og Borgarfjarðarbrú.

Á mynd 5 eru sýndar niðurstöður úr hitastigmælingunum yfir tímabilið frá því að mælingar hófust til 26-2-2001. Því miður virðist sem gögn hafi tapast frá miðjum apríl og fram á mitt sumar. Af þessum sökum er ekki hægt að fullyrða nákvæmlega um hve margir frostakaflarnir voru á tímabilinu, því sennilega hafa einhverjir frostakaflar tapast, sbr. mynd 5.

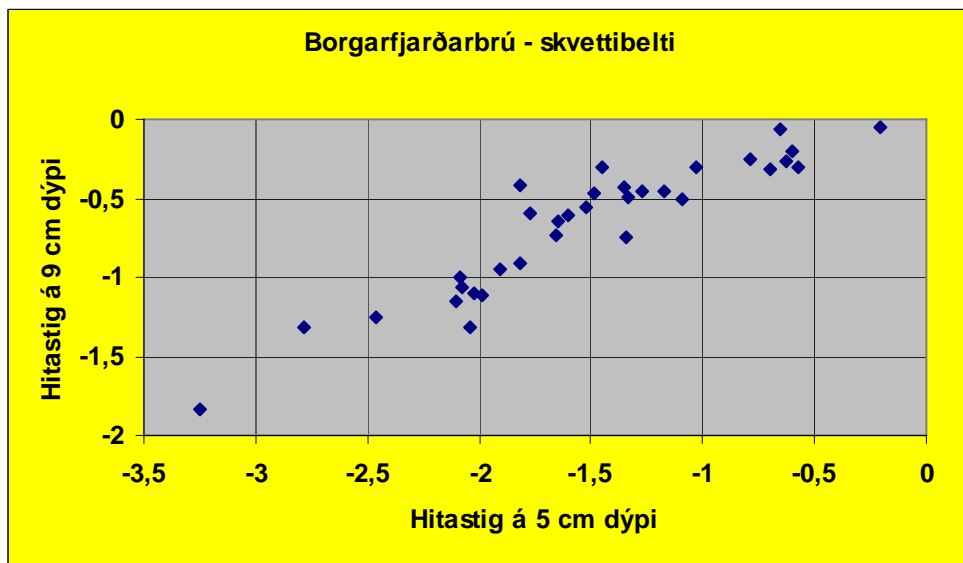


Mynd 5. Niðurstöður úr hitastigsmælingum í Kápusteypunni

Á tímabilinu frá 23-12-1999 til 26-2-2001 voru alls 66 frostakaflar á Brúnni. Meðalhitastig allra kaflana var $-1,82$ °C og þeir stóðu í 1,52 sólahringa að meðaltali. Í efri hluta kápusteypunnar, 5 cm frá yfirborði, mældust 67 frostakafla í steypunni með $-0,94$ °C meðalhitastig, að meðaltali aðeins í 0,16 daga (3,9 tímar). Hins vegar 9 cm dýpi frá yfirborði mældust 33 frostakaflar með $-0,7$ °C meðalhita í um 0,15 daga (4,3 stundir). Í neðri hluta Kápusteypunnar fór hitastigið einungis þrisvar sinnum niður fyrir núllið. Í öll skiptin stóð frostakafla þar skemur en eina klukkustund.

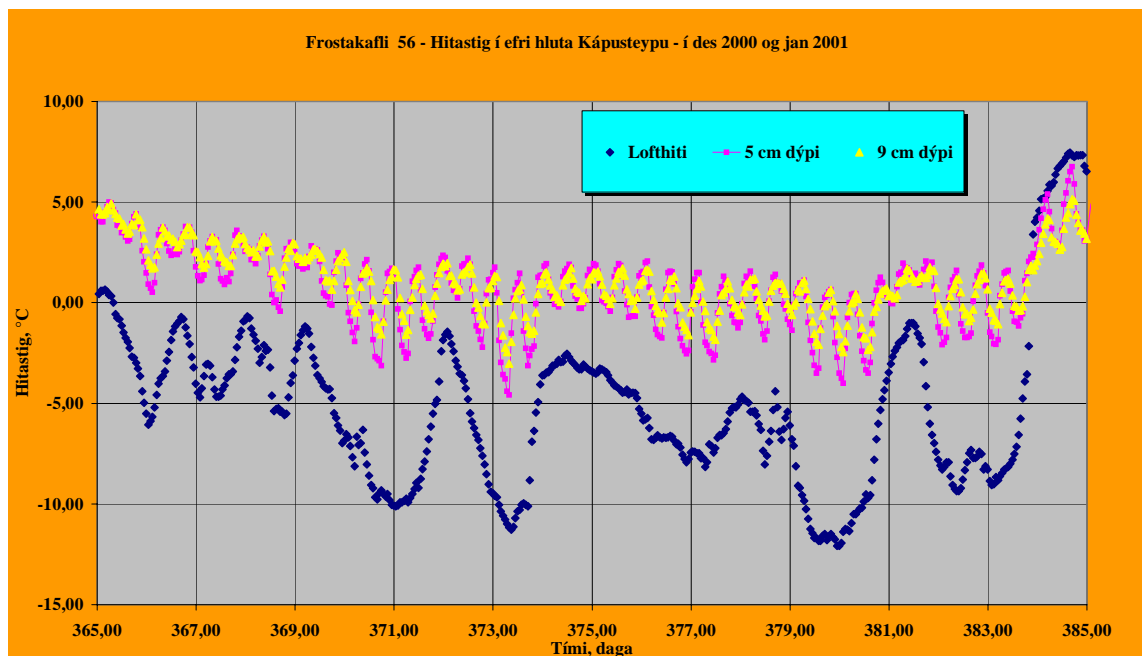
Eitt af markmiðunum með þessu verkefni var að mæla fjölda frostþíðukafla sem kápusteypan verður fyrir á hverju ári, en eins og áður segir tapaðist hluti af mælingunum. Mælingarnar hófust 23-12-99 og þann 23-12-00 voru frostakaflarnir orðnir a.m.k. 55. Á 5 cm dýpi í efri hluta kápusteypunnar reyndust frostakaflarnir hins vegar vera 36 talsins. Á 9 cm dýpi reyndust frostakaflarnir vera einungis 10 talsins.

Nokkuð gott samband er á milli hitastigs á 5 cm dýpi og á 9 cm dýpi, sjá mynd 6. Í grófum dráttum má segja að hitastigið á 5 cm dýpi sé um helmingi hærra en á 9 cm dýpi. Það er mjög athyglisvert hversu langt hitasveiflurnar ná inn í steypuna. Við þessar aðstæður ná gera ráð fyrir að hitastig undir frostmarki nái a.m.k. 10 cm inn fyrir steypukápuna. Þetta vekur upp spurningu hvenær steinsteypa verður fyrir skemmdum af völdum frosts, en það liggur ekki ljóst fyrir í dag.



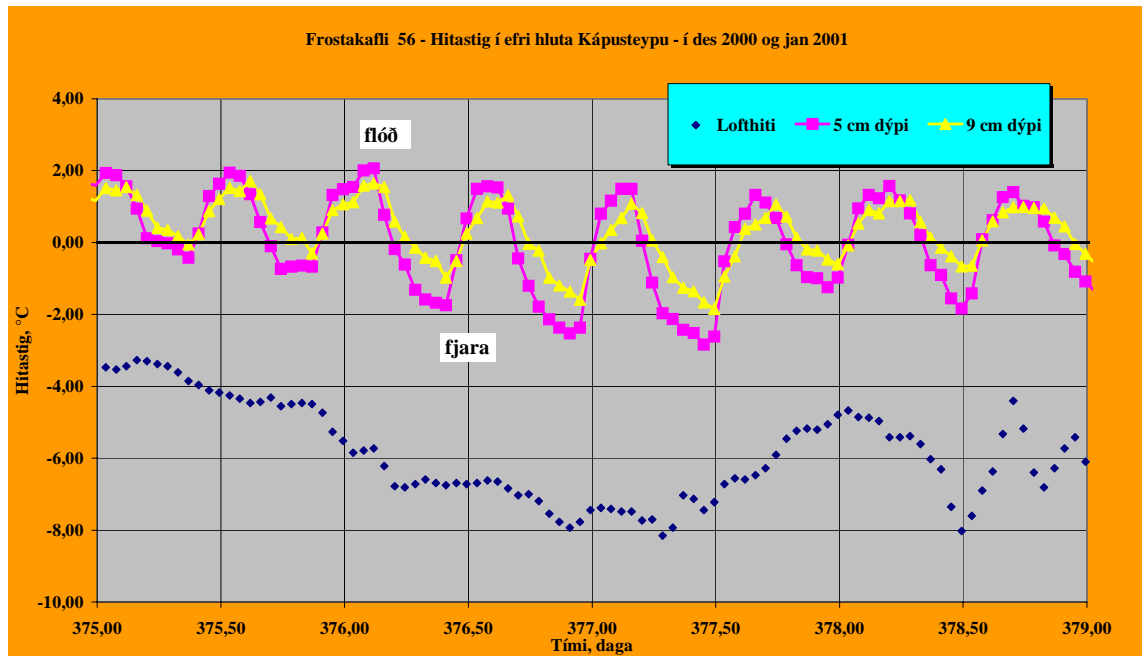
Mynd 6. Samband á milli hitastigs á 5 og 9 cm dýpi í Kápusteypunni

Eins og sjá má á mynd 7 og reyndar í töflu 4-1 þá kom tiltölulega langur frostakafli í lok desember 2000. Frostakafllinn (númer 56) varði í 18,5 daga. Þessi kafli er mjög athyglisverður fyrir þær sakir að hann sýnir svo ekki verði um villst að sjávarföll hafa mikil áhrif á fjölda frostþíðusveifla sem steypa verður fyrir í svona umhverfi, sjá mynd 8. Á myndinni er allur frostakafllinn sýndur ásamt hitastigi í steypunni í efri hluta kápusteypunnar. Á þessu tímabili, þegar lofthitinn er alltaf undir frostmarki, þá skiptast á frosta- og hlýindakaflar í steypunni. Alls eru frostþíðuskiptin 27 talsins á 5 cm dýpi undir yfirborði steypunnar. Þau eru 22 talsins á 9 cm dýpi frá yfirborði.



Mynd 7. Hitastig í Kápusteypunni í tiltölulega löngum frostakafli. Hitanemarnir eru á 5 og 7,5 cm dýpi.

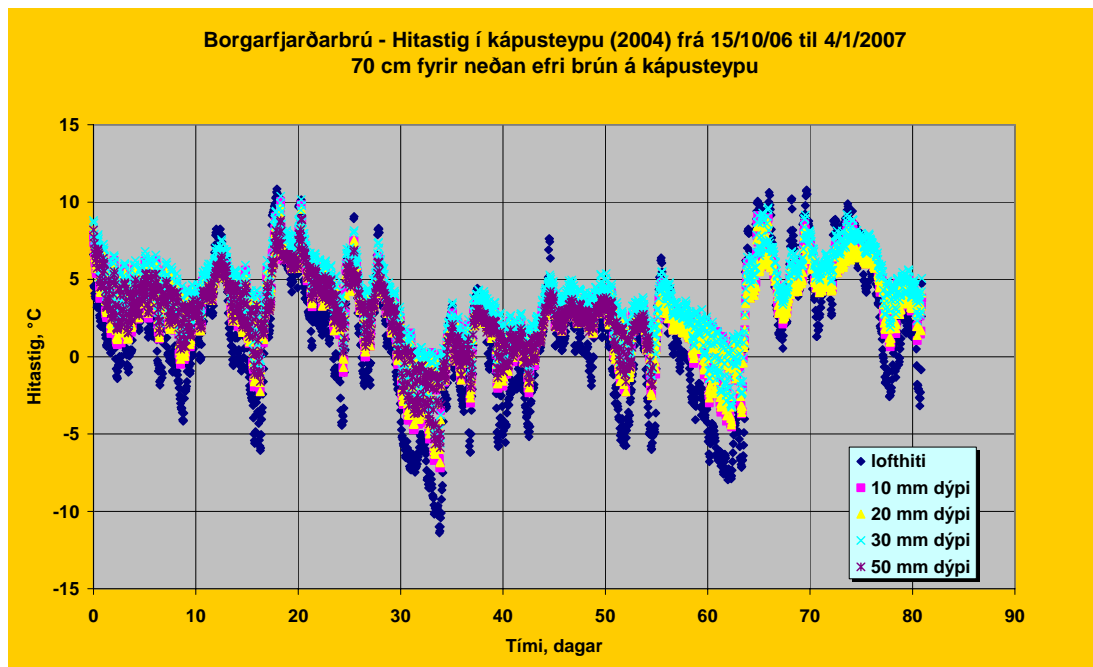
Á mynd 8 er sýndur hluti af 56. frostþíðukaflanum, þar sem hitastigið í steypunni sveiflast tvisvar sinnum á sólarhring um frostmark. Hitastigshámark hverrar sveiflu svarar til tímans þegar háflóð er og hitastigslágmarkið svarar til tímans þegar fjarar út.



Mynd 8. Hluti af einum tiltölulega löngum frostakafli.

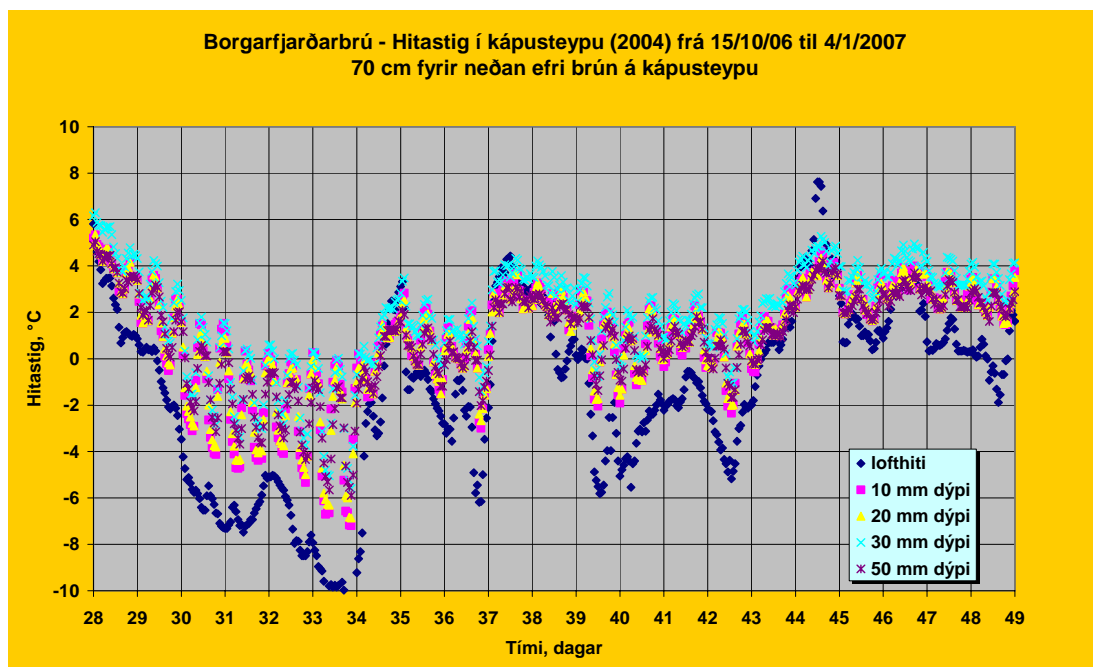
Á flóði hitar sjórinn kápusteypuna upp fyrir frostmak. Á fjöru kælir loftið steypuna niður fyrir frostmark. Frostþíðusveiflan á um 5 cm dýpi er þó ekki meiri en um 4 gráður, þ.e. frá +2 niður í -2 °C miðað við um - 8 °C lofthita. Væntanlega er 4° frostþíðusveifla í steypu ekki að valda verulegum skemmdum.

Áhugi var fyrir að rannsaka hitasveiflur í steypunni nær yfirborði, en á 5 og 9 cm dýpi. Þegar steypd var utan stöpul árið 2004 var hitanemum komið fyrir mun nær yfirborði steypunnar. Á mynd 9 eru sýndar niðurstöður af mælingum í kápusteypunni á tímabilinu frá 15-10-2006 til 4-1-2007. Hitanemarnir voru staðsettir um 70 cm fyrir neðan efri brún kápusteypunnar.



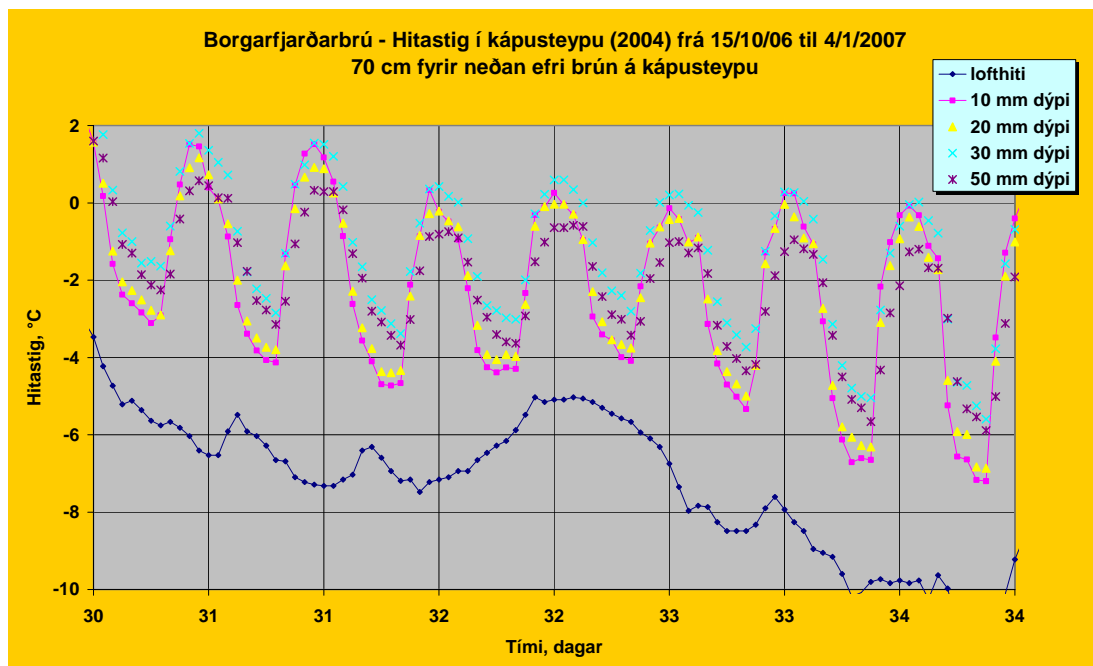
Mynd 9. Niðurstöður úr hitastigsmælingum í Kápušteypu frá 15-10-06 til 4-1-07
 70 cm fyrir neðan efri brún á kápusteypu

Á þessu tímabili voru nokkrir tiltölulega langir frostakaflar þar sem lofthitinn var undir -5°C . Á mynd 10 eru nokkrir frostakaflar sýndir í meiri upplausn.



Mynd 10. Hitastig í Kápušteypunni í nokkrum tiltölulega löngum frostaköflum.

Sjá má að sambærilegar micro-frost/þíðusveiflur eiga sér stað í steypunni sem er stjórnað af sjávarföllum eins og mældist í kápusteypunni frá 1999. Á mynd 11 má sjá einn tiltölulega langan frost/þíðukafla, þessi frost/þíðukafla er sambærilegur frostakaflanum sem sýndur eru á mynd 8.

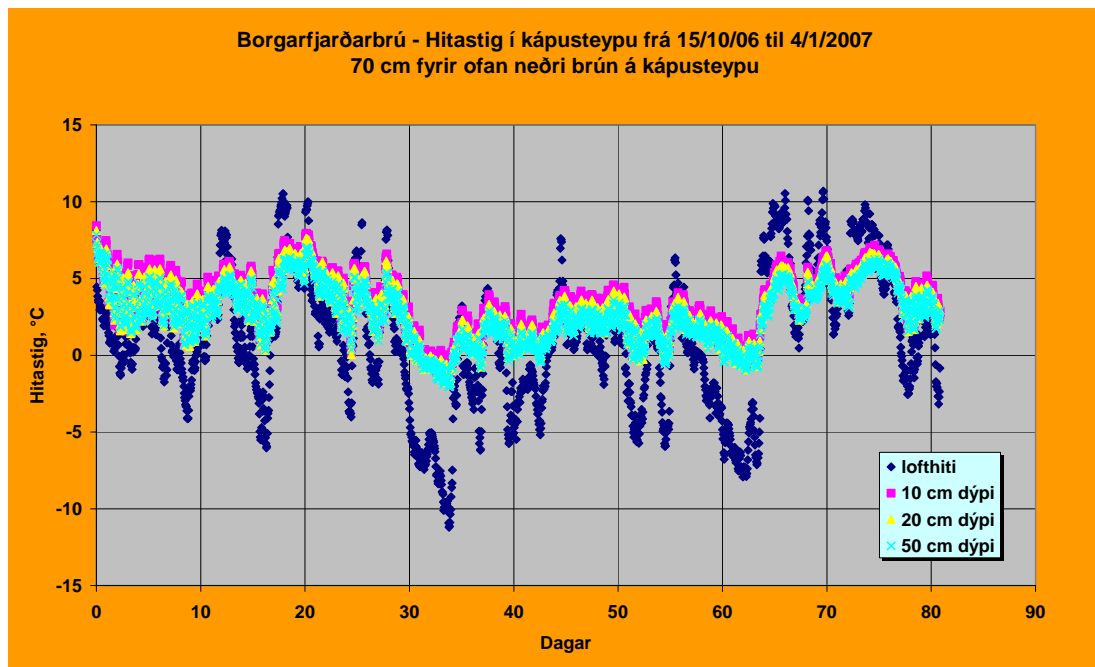


Mynd 11. Tiltölulega langur frostakafli.

Athyglisvert er að sjá að þegar lofthitinn er undir -10 °C er ekki lengur hætt á frostsKemmdum í steypunni þar sem hitastigið í steypunni er alltaf undir frostmarki miðað við þessar mælingar.

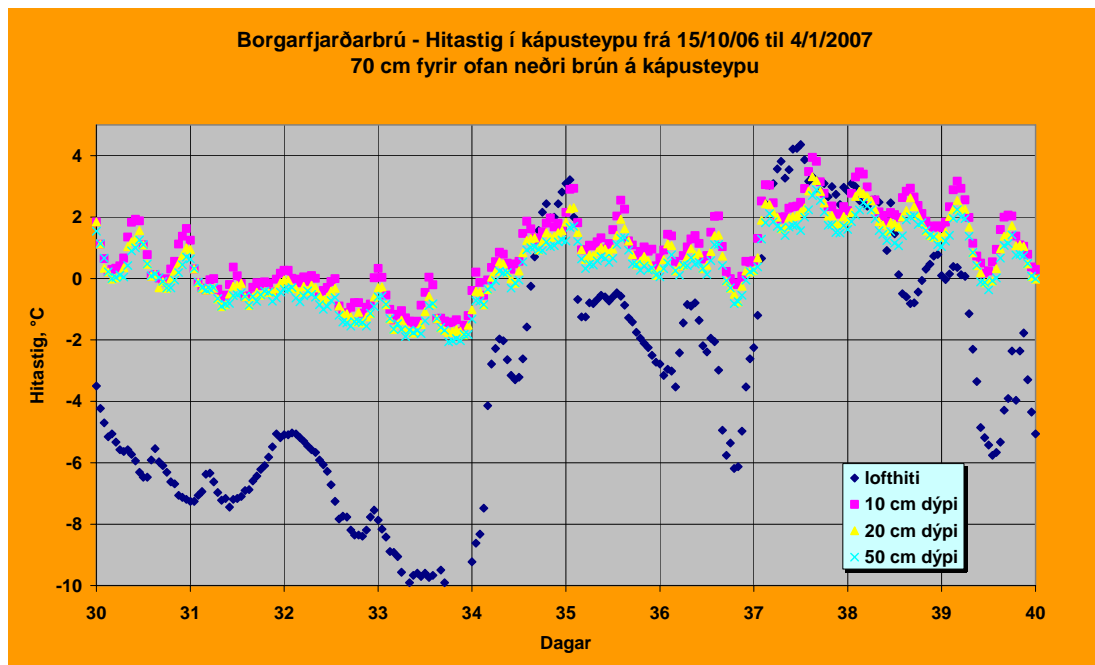
Svo virðist sem hitastigið á 3 cm dýpi sé lægra en á 5 cm dýpi, ástæða fyrir þessu er óljós, mögulegt er að mistök hafi átt sér stað við innsteypingu eða tengingu nemanna. Einnig er líklegt að hitanemi af 50 mm dýpi gefi rangar niðurstöður, amk. datt þessi hitanemi úr sambandi eftir um 55 daga, sjá mynd 9.

Þegar hitamælingar úr kápusteypunni sem eru um 70 cm fyrir ofan neðri brún á kápusteypu eru skoðaðar kemur í ljós að tiltölulega fáir frostakaflar mælast í steypunni, sjá mynd 12.



Mynd 12. Niðurstöður úr hitastigsmælingum í Kápusteypu frá 15-10-06 til 4-1-07 70 cm fyrir ofan neðri brún á kápusteypu. (ath. hitanemar eru á 10, 20 og 50 mm dýpi)

Á mynd 13 má sjá nokkra frostakafla í steypunni í neðri hluta sjávarfallabeltisins. Mesta frost sem mældist í steypunni er aðeins um -2 °C, þegar yfirborðshiti var um -10 °C.



Mynd 13. Niðurstöður úr hitastigsmælingum í Kápusteypu.

Rakaskynjarar

Tveimur rakaskynjurum var komi fyrir í kápusteypunna frá 1999, báðum 5 cm frá yfirborði. Annar er ofarlega í sjávarfallabeltinu og hinn er neðarlega í sama belti.

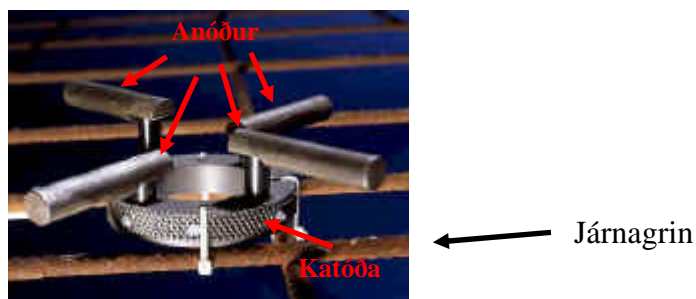
Upphaflega var gert ráð fyrir að skynjararnir væru tengdir við gagnasafnara og aflesturinn skráður nokkrum sinnum á sólarhring. Skynjararnir ganga fyrir rafmagni, 5 volta spenna er send niður, frá spennugjafa, til skynjara. Loftrakinn í steypunni umhverfis skynjarana hefur áhrif á leiðnina í skynjurunum. Spennan sem fer í gengum skynjarana er síðan breytt yfir í hlutfallslegan loftraka. Loftrakinn er síðan talinn vera í jafnvægi við rakastigið í steypunni. Þar sem ekkert rafmagn er til staðar á brúnni hefur verið látið nægja að mæla rakastigið þegar lesið er af hitastigs gangasafnaranum.

Niðurstöðurnar úr báðum skynjurunum eru á þá lund að steypan er vatnsmettuð sem verður að teljast mjög hæpin niðurstaða. Líklegt er talið að vatnsdropar hafi þéttst á skynjurunum og því nemi þeir aðeins rakamettun. Ekki hefur verið lesið af rakaskynjurunum í nokkur ár.

CorroWatch skynjarar

Mögulegt er að fylgjast með tæringarhraða í bendistáli með því að mæla reglulega svokallaðan. “macrocell” straum milli anóðu og katóðu svæða í bendistálinu. Makrósellu straumur í bendistáli myndast á milli anóðu – þar sem tæring á sér stað og katóðu – þar sem engin tæring á sér stað.

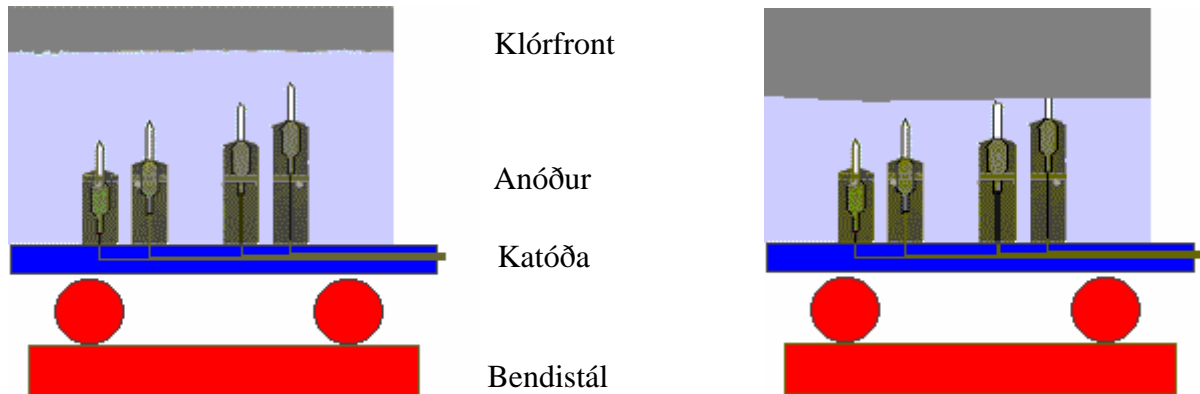
Í óskemmdri steypu (ekki klór og engin kolsýring) ver steypan bendistálið steypuna fyrir tæringu. Þegar vörnin brotnar niður getur tæring hafist. Tæringarskynjarar eins og CorroWatch skynjararnir sem komið var fyrir í kápusteypuna, sjá mynd 14, gera það kleift að segja fyrir um hættu á tæringu og jafnvel sagt fyrir um það hvenær tæring hefst í bendistálinu. Skynjararnir eru útbúnir úr tveimur hlutum, anóðu og katóðu. Katóðan er úr eðalmálmi sem tærist ekki og anóðan úr mildu stáli sem tærist tiltölulega auðveldlega, ef aðstæður í steypunni eru þess eðlis. Galvanísk spenna myndast á milli þessara tveggja póla. Þegar anóðan byrjar að tærist verður breyting á galvanísku spennunni og spennan stillir sig inn á nýtt gildi. Í tæringarsellunum er spennubreytingin túlkuð sem svo að tæring sé byrjuð. CorroWatch skynjararnir eru samsettir úr fjórum anóðum sem eru í mismunandi fjarlægð frá katóðunni og katóðan er látin sitja á járnagrindinni. Þannig er hægt að fylgjast með því hve hratt klórfronturinn gengur inn í steypuna og hægt að spá fyrir um hvenær klórfronturinn náí að járnagrindinni og tæringarhætta skapast í henni.



Mynd 14. CorroWatch tæringarskynjari

Á mynd 15 er sýnt á skematískan hátt uppbygging skynjarana. Anóðurnar fjórar eru mislangt frá yfirborði steypunnar og katóðan situr á járnagrindinni. Smám saman

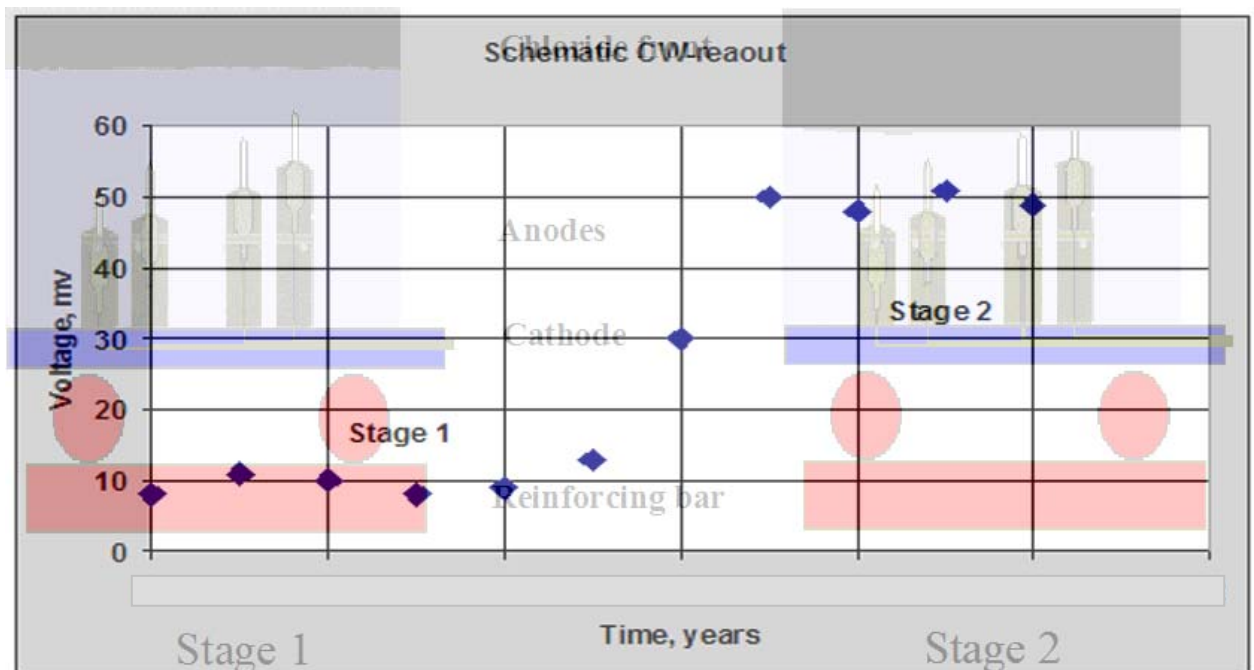
eykst klórmagnið í steypunni og jafnframt gengur það inn í steypuna uns það nær fyrstu anóðunni.



Mynd 15. Skematísk uppsetning á CorroWatch tæringarskynjurum.

Á vinstri myndinni er hefur klórfronturinn ekki náð inn að anóðunum. Á myndinni til hægri hefur klórfronturinn náð inn að ystu anóðunni og er við að ná að næst ystu anóðunni.

Þegar klórfronturinn nær að ystu anóðunni breytist spennan milli ystu anóðunnar og katóðunnar, sjá mynd 16. Spennan á hinum anóðu-katóðu þörunum verður óbreytt, uns klórfronturinn nær að næst ystu anóðunni og svo koll af kalli. Með þessu móti er hægt að áætla hvenær klórfronturinn verður kominn niður að efstu járnnum og hvenær tæring hefjist eða hættuástand skapast í steypunni.



Mynd 16. Skematísk uppsetning á CorroWatch tæringarskynjurum og spennumælingu.

Þegar tæring hefst í efstu anóðunni (næst yfirborði) eykst spennan frá skynjaranum.

Leiðnistuðull fyrir klór í kápusteypu frá 1999 og frá 2002² er gefinn í töflu 1.³ Fyrir steypuna frá 1999 má segja að leiðnistuðullinn sé mjög lágur í sýnunum um 1,7 til $1,9 * 10^{-12}$ m²/sec sem er mjög lágt og hann er lægstur í sýninu með minnst loft (bíl 3) og hæstur í sýninu með mest loft (bíl 1). Svipaða sögu er að segja um steypuna frá 2002, en klórleiðnistuðulinn er einnig tiltölulega lágur í þeirri steypu.

Tafla 1. Niðurstöður úr mælingum á leiðni klórs inn í sýnin
CTH-próf, leiðnistuðull (m²/sec)

Sýni	Leiðnistuðull (D_{nssm}), m ² /sec
Kápusteypa 1999 – bíll 1	$1,93 * 10^{-12}$
Kápusteypa 1999 – bíll 2	$1,85 * 10^{-12}$
Kápusteypa 1999 – bíll 3	$1,71 * 10^{-12}$
Kápusteypa 2002 – sýni 1 ⁴	$1,25 * 10^{-12}$
Kápusteypa 2002 – sýni 2	$2,11 * 10^{-12}$

Út frá þessum niðurstöðum er hægt að reikna út hve hratt klór gengur inn í viðkomandi steypu og hve langan tíma það tekur fyrir klór að ganga inn að járnagrindinni og hvenær hættuástand skapast m.t.t. tæringar á bendistáli.

Tæringasellurnar hafa verið um 7 ár í steypunni. Miðað við klórleiðnistuðla í töflu 1 ætti klórstyrkurinn í efstu anóðunni að vera um 0,13 % (miðað við steypuþunga)⁵. Neðsti tæringarskynjarinn er á um 50 mm dýpi, miðað við sömu forsendur og að ofan er klórstyrkurinn á 50 mm dýpi um 0,05 %. Þar sem hættumörk gagnvart tæringu eru, samkvæmt ÍST EN 206-1:2000, talin liggja á bilinu 0,04 til 0,07 % af steypuþunga, má búast við að tæring eigi sér stað a.m.k. við tæringarskynjarna sem liggja næst yfirborði.

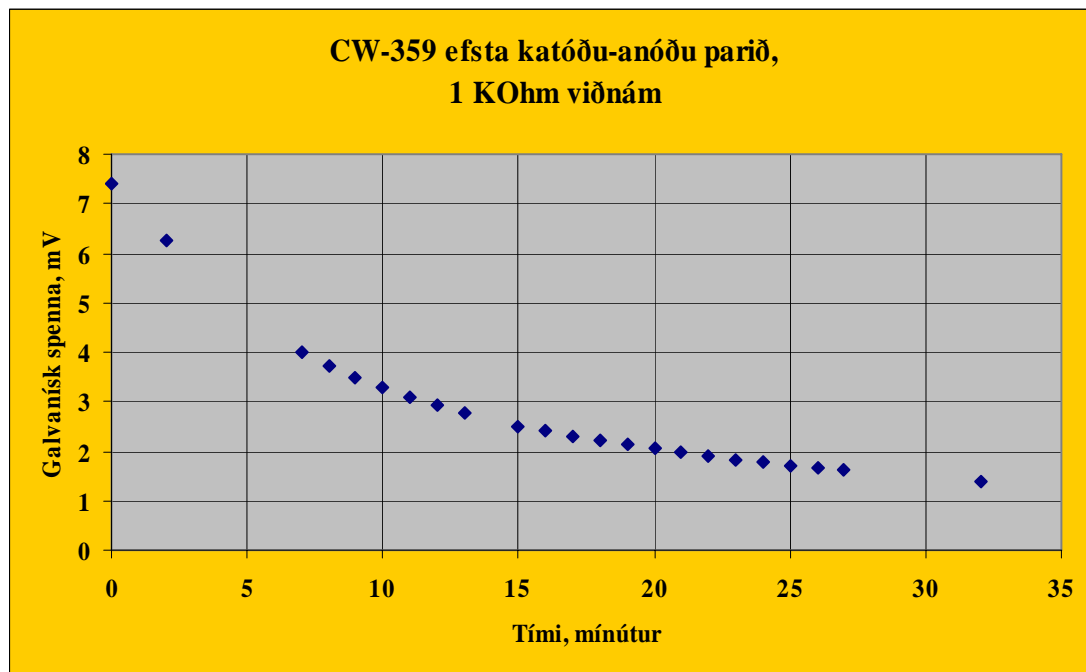
Ekki hefur reynst auðvelt að mæla galvaníska spennu milli katóðu og anóðu para í tæringaskynjurunum. Aðalvandamálið er að þegar viðnám og voltmælir eru tengdir við katóðu og anóðu mælist ákveðin upphafsspenna. Upphafsspennan lækkar síðan mjög ört í byrjun, en að lokum virðist spennan nálgast ákveðið jafnvægisgildi sjá mynd 17.

² Um er að ræða steypu sem notuð var í Brákarsundsbrú.

³ gamlar rannsóknir frá Rb-dögum höfundar

⁴ sýni var 22 daga gamalt, önnur sýni voru 28 daga gömul

⁵ Annað lögmál Ficks er notað til þess að spá fyrir um klóríðleiðni inn í steypuna og miðað er við yfirborðsgildi fyrir klóríð um 0,62 % af steypuþunga

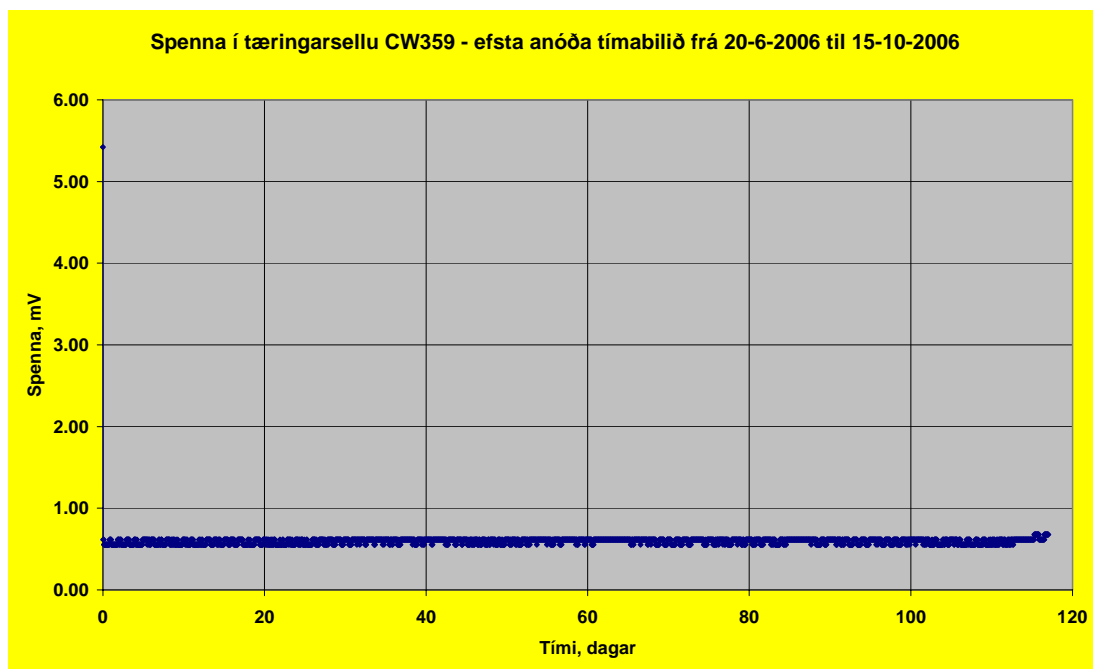


Mynd 17. CW-359 efsta katóðu-anóðu parið, skrá sem fall af tíma

Upphafsspenna lækkar síðan mjög ört í byrjun en að lokum virðist spennan nálgast ákveðið jafnvægisgildi.

Höfundur þessara skýrslu er ekki ljóst hvort nota ætti fyrsta gildið (upphafsspennu) eða hvort bíða ætti eftir því að jafnvægi næðist (jafnvægisspennu). Framleiðendur skynjarana voru ráðalausir sem og aðrir sem höfundur leitaði til. Menn hölluðust þó flestir að því að nota ætti upphafsspennuna til þess að ákvarða galvaníska spennu fyrir viðkomandi anóðu-katóðu par.

Einnig var reynt að tengja tæringarsellur við gagnasafnara og skrá spennuna á klukkustunda fresti. Með því að nota gagnasafnara er hægt að safna miklum upplýsingum á tiltölulega auðveldan hátt. Reynt var að nota gagnasafnara í CW #359 á tímabilinu frá 20-6-2006 til 15-10-2006, sjá mynd 18.



Mynd 18. CW-359 efsta katóðu-anóðu parið, skrá með gagnasafnara
 Gagnasafnara var notaður til að skrá spennu í CW #359 á tímabilinu frá 20-6-2006 til 15-10-2006

Því miður er það sama upp á teningnum, nefnilega að upphafsspenna er töluvert hærrí en aðrar mælingar og því er ekki hægt að nota gagnasafnara til þess að skrá upphafsspennuna.

Á tímabilinu frá því að tæringasellunum var komið fyrir í steypunni (október 1999) þangað til í janúar 2007 hefur verið farið ótal sinnum og lesið af skynjurunum. Ýmis vandamál hafa komið upp, sem hafa orðið til þess að mæliniðurstöðurnar hafa reynt bæði ótrúverðugar og ósambærilegar. Í töflum 2 og 3 eru gefnar upp niðurstöður þar sem upphafsspennan var skráð og 1 kohm viðnám var notað við mælinguna.

Í töflu 2 eru niðurstöður úr tæringarsellu CW #360, en hún er staðsett um 70 cm fyrir ofan neðri brún kápusteypu.

Tafla 2. CW #360 tæringarskynjarar í neðri hluta sjávarfallabeltis
 Mæliniðurstöður eru miðar við 1 kohm, mV

Dagsetning	35,6 mm frá yfirborði	39,8 mm frá yfirborði	45,3 mm frá yfirborði	50 mm frá yfirborði
23-10-2000	10,5	3,7	16,1	24,8
26-02-2001	8,4	5,0	12,9	24,0
04-01-2007	5,1	26,3	28,7	3,5

Nokkuð erfitt er að ráða í niðurstöðurnar í töflu 2, ef aðeins er einblínt á mælingarnar frá efsta anóðu-katóðu parinu þá má segja að spennan sé nokkuð svipuð og væntanlega hefur tæring ekki hafist. Samanburður milli neðri anóðu-katóðu para dregur verulega úr trúverðuleika þessara mælinga, nema að tæring sé byrjuð í öllum anóðunum.

Í töflu 3 eru niðurstöður úr tæringarsellu CW #339, en hún er staðsett um 70 cm fyrir neðan efri brún kápusteypu.

**Tafla 3. CW #359 tæringarskynjarar í efri hluta sjávarfallabeltis
Mæliniðurstöður miðað við 1 Kohm, mV**

Dagsetning	35,5 mm frá yfirborði	40,2 mm frá yfirborði	45,4 mm frá yfirborði	50 mm frá yfirborði
11-05-2000	7,4	7,3	31,2	-34,4
26-02-2001	12,8	14,8	23,7	6,1
12-09-2002	6,7	22	-20	5,5
13-10-2006	13,9	17,3	13	17,3
04-01-2006	15,9	11,5	13,7	9,3

Niðurstöður í töflu 3 eru í meira innbyrðis samræmi en niðurstöður í töflu 2. Spennan á efsta og næst efsta anóðu-katóðu þörunum bendir til þess að engin tæring eigi sér stað.

Viðmiðunarelektróður

Þegar tæringarskynjarar eins og CorroWatch eru notaðir er algengt að koma svokölluðum viðmiðunarelektróðum fyrir á bendistálinu. Það var einnig gert í kápusteypunni og uppsetningin svipuð og sýnd er á mynd 19.



Mynd 19. Uppsetning á viðmiðunarelektróðu ERE 20 - MnO₂ – elektróður.

Það sama á við tæringaskynjarana og viðmiðunarelektróður að í byrjun þurfa þær að ná jafnvægi við steypuna áður en sjálf mælingin hefst. Þegar mæling er gerð, þá er elektróðan jarðtengd við bendistálið, eða eins og var gert í þessari rannsókn við tæringaselluna. Niðurstöður mælinga á milli katóðu í tæringarsellu og viðmiðunarelectróðu eru gefnar í töflu 4.

Tafla 4. Niðurstöður úr mælingum með viðmiðunarelektróðum

Dagsetning	R-3457 -CW360	R-3460 - CW359
23-10-2000 ⁶	-0,760 volt	-0,840 volt
26-2-2001 ⁶	-0,638 volt	-0,710 volt
10-8-2004 ⁶	-0,669 volt	-0,586 volt
13-10-2006 ⁷	-30 mV	-25 mV
04-01-2007 ⁷	-12,5 mV	-15,7

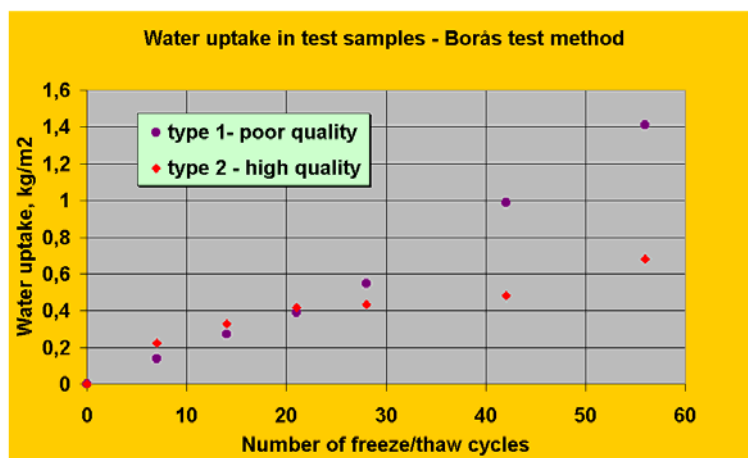
Ljóst er að af þessum niðurstöðum að lítið er að byggja á þessum mælingum.

⁶ miða við 100 kohm

⁷ miðað við 1 kohm

Samantekt

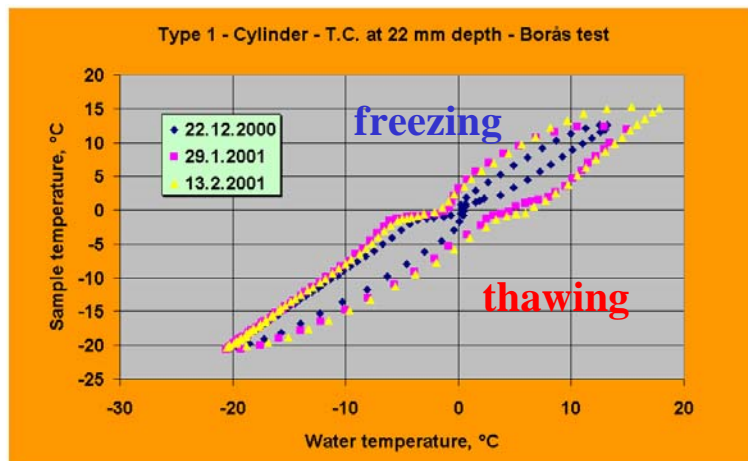
Hitamælingarnar eru mjög athygliverðar og talið er mögulegt að mælingarnar geti sagt til um hvenær hættu sé á frostskeiddum í steypu, því lögun frost/þíðu-hitastigsferla er háð því hve mikið vatn er í steypunni, þ.e. hvort ísmyndun eigi sér stað í steypunni þegar hún frýs. Til að sýna fram á að þetta sé mögulegt þarf að safna gögnum í nokkur ár. Hins vegar hefur þetta verið rannsakað lítillega af höfundu í öðru verkefni (sjá verkefnið: Endurbætt prófunaraðferð við mat á veðrunarþoli, einnig styrkt af Vegagerðinni)⁸. Þar kom fram að þegar steinsteypa byrjar að skemmast í stöðluðu frost/þíðuprófi eykst vatnsmagnið í steypunni verulega, sjá mynd 20. Á myndinni er sýnd vatnsupptaka á meðan á frostþíðuprófun stendur. Um er að ræða tvær tegundir af steinsteypu, ófrostþolna steypu (type 1) og frostþolna steypu (type 2). Frostþolna steypa tekur upp töluvert minna magn af vatni en ófrostþolna steypa.



Mynd 20. Vatnsupptaka sýna í frostþolsprófun

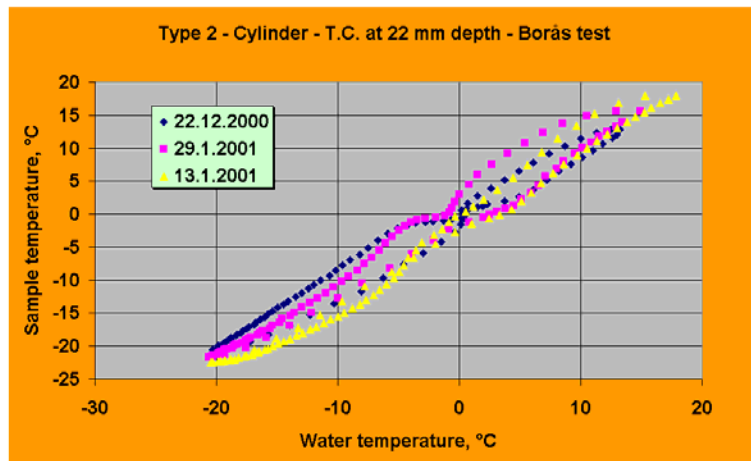
Aukið vatnsmagn veldur því að frost/þíðu-hitastigsferlarnir breytast. Ísmyndunin í steypunni veldur því að hitastigið í steypunni fer ekki mikið niður fyrir frostmark meðan hún er að frjósa. Þegar steypa þíðnar þá hækkar hitastigið ekki mikið yfir frostmark fyrr en allur ísinn er þíðinn. Á myndum 21 og 22 eru sýndir hitastigsferlar fyrir bæði sýnin á meðan á prófinu stóð. Aðeins eru sýndir þrjár ferlar, blái ferillinn sýnir hitastigið stuttu eftir að prófunin hófst, bleiki ferillinn er tekin eftir um 30 frostþíðu umferðir og guli ferillinn sýnir hitastigið undir lok prófsins.

⁸ Verkefnið er styrkt af Vegagerðinni og Rannís. Áfangaskýrsla kom út í febrúar 2001.



Mynd 21. Hitastigsferill ófrostþolinnar steinsteypu í frostþolsprófun

Á mynd 22 má sjá að töluverður stallur hefur myndast við frostmark, þegar ísmyndunin á sér stað og þegar ísinn þiðnar.



Mynd 22. Hitastigsferill frostþolinnar steinsteypu í frostþolsprófun

Við samanburð á myndum 21 og 22 má sjá að stallurinn við frostmarkið í frostþolnu steypunni er töluvert minni um sig en í ófrostþolnu steypunni. Ástæðan fyrir því er að það er mun minna vatn í frostþolna sýninu og þar af leiðandi á mun minni ísmyndun sér stað í steypunni.

Í kápusteypunni frá 2004 eru hitanemarnir mun nær yfirborði steypunnar en í kápusteypunni frá 1999. Athyglisvert er að sjá að við yfirborð steypunnar er nánast aldrei nein hættu á frost/þíðu-skemmdum. Sjávarföllin valda því frost/þíðu-sveiflan verður aldrei mikil (hámark um +/- 2-3 °C) og síðan þegar lofthitinn verður undir um - 8 °C þá nær sjórinn ekki að hita steypuna upp fyrir frostmark, sbr. mynd 8 og því er lítil hættu á frostskeimmdum í yfirborði steypunnar.

Því er margt sem bendir til þess að frostverkun sé ekki höfuðástæða fyrir þeim skemmdum sem hafa fundist í stöplum Borgarfjarðarbrúar. Þó ber að hafa í huga að bæði kápusteypan frá 1999 og 2004 eru mjög endingagóðar steypur og sem slíkar hafa þær tiltölulega litla vatnsdrægni. Þegar/ef vatnsdrægnin væri hærri, litu hitaferlarnir allt öðruvísi út og væntanlega gætti frost/þíðu-áhrifa mun meira í steypunni.

Ljóst er að rannsókn sem þessi geti veitt mikilvægar upplýsingar um ástand og endingu viðkomandi mannvirkis. Að saman skapi þarf að mæla yfir langan tíma svo safna megi nægjanlegum upplýsingum frá þeim. Þessar upplýsingar er síðan hægt að notað við ástandsmat mannvirkisins.

Rakaskynjarar hafa aldrei gefið neinar trúverðugar niðurstöður.

Lesið var reglulega af tæringarsellum fyrstu 2-3 árin því mikilvægt var að fá góðar upphafsmælingar til samanburðar við seinni tíma mælingar og liggja þær fyrir. Markmiðið er að setja upp gagnasafnara sem les reglulega af skynjurunum.

Frá því að tæringasellunum var komið fyrir í steypunni (október 1999) þangað til í janúar 2007 hefur ótal sinnum verið lesið af sellunum. Ýmis vandamál hafa komið upp, sem hafa orðið til þess að mæliniðurstöðurnar hafa reynst bæði ótrúverðugar og ósambærilegar. Auk þess sem framleiðandi hefur ekki sýnt fram á hvernig eigi að túlka niðurstöðurnar. Ekki er hægt með óyggjandi hætti að segja til um hvort tæring eigi sér stað í einhverjum anóðu-katóðu þörum, eða hvenær tæringarhætta muni skapast í bendistálinu. Eins og staðan er í dag er því ekki hægt að mæla með notkun á svona tæringarsellum til þess að spá fyrir um tæringarhættu í mannvirkjum. Mun öruggara er að taka sýni úr viðkomandi mannvirki og mæla klór í steypunni, eða kortleggja galvanískar spennur með yfirborðsmælingu.

Viðauki I. Staðsetning skynjara í Kápusteypu frá 1999**Staður 1. Undir sjávarmáli**

Staðsetning miðað við sjávarmál: 20 cm fyrir ofan neðri brú á kápusteypu

Skeynjara:

Hitaskynjari númer 1.

Staðsetning: 5 cm frá yfirborði

Aflestur: síritandi

Staður 2. Sjávarfalla belti

Staðsetning miðað við sjávarmál: 70 cm fyrir ofan neðri brún á kápusteypu

Skeynjara:

Tæringaskynjarar CW 360

Rauður vír á CW er katóða

Anóður:

- | | |
|------------------|---------|
| 1. efst: | Svartur |
| 2. næst efstur: | Blár |
| 3. næst neðstur: | Grænn |
| 4. neðstur: | Gulur |

Staðsetning:

1 anóða: 35,6 mm frá yfirborði

2 anóða: 39,8 mm frá yfirborði

3 anóða: 45,3 mm frá yfirborði

4 anóða: 50,0 mm frá yfirborði

Aflestur: 3 til 4 sinnum á ári

Viðmiðunarelektróða R 3460

Staðsetning: 5 cm frá yfirborði

Aflestur: 3 til 4 sinnum á ári (aflestrar mælir ekki kominn)

Rakaskynjari númer 2

Staðsetning: 5 cm frá yfirborði

Aflestur: Reiknað með að hann yrði síritandi, en það er vandamál með rafmagn á brúnni

Hitaskynjarar

Staðsetning:

Númer 2: 5 cm frá yfirborði

Númer 3: 9 cm frá yfirborði

Aflestur: síritandi

Staður 3. Skvettibelti

Staðsetning miðað við sjávarmál: 70 cm fyrir neðan efri brún á kápusteypu

Skynjarar:

Tæringaskynjarar CW 359

Staðsetning:

1 anóða: 35,5 mm frá yfirborði

2 anóða: 40,2 mm frá yfirborði

3 anóða: 45,4 mm frá yfirborði

4 anóða: 50,0 mm frá yfirborði

Aflestur: 3 til 4 sinnum á ári

Viðmiðunarelektróða R 3557

Staðsetning: 5 cm frá yfirborði

Aflestur: 3 til 4 sinnum á ári (mælir til aflestrar ekki kominn)

Rakaskynjari númer 1

Staðsetning: 5 cm frá yfirborði

Aflestur: Reiknað með að hann yrði síritandi, en það er vandamál með rafmagn á brúnni

Hitaskynjarar

Staðsetning:

Númer 4: 5 cm frá yfirborði

Númer 5: 9 cm frá yfirborði

Aflestur: síritandi

Viðauki II. Helstu heimildir er fengust úr heimildaleit⁹**Einstakar greinar (ath. aðeins birtur listi yfir tiltölulega nýjar greinar)**

- Andrade C, Alonso MC, Gonzales JA, Feliu S (1990) Similarity between atmospheric/underground corrosion and reinforced concrete corrosion. In: Corrosion of reinforcement in concrete. Elsevier Applied Science
- Banfill PFG (1997) Re-alkalisation of carbonated concrete – effect on concrete properties. *Construction and Building Materials*, 11, 255-258
- Baronio G, Berra M, Bertolini L, Pastore T (1996) Steel corrosion monitoring in normal and total-lightweight concretes exposed to chloride and sulphate solutions part I: Potential measurements. *Cement and Concrete Research*, 26, 683-689
- Baronio G, Berra M, Bertolini L, Pastore T (1996) Steel corrosion monitoring in normal and total-lightweight concretes exposed to chloride and sulphate solutions part II : Polarisation resistance measurements. *Cement and Concrete Research*, 26, 691-696
- Beamish S, Roberts M (1998) Corrosion in Parking Structures. *Conc. Eng. Int.*,
- Broomfield JP (1999) Corrosion inhibitors for steel in concrete. *Concrete*, June 1999, 44-47
- Broomfield JP (1998) Corrosion Monitoring. *Concrete Engineering International*, March, 27-30
- Cabrera JG, Claisse PA, Hunt DN (1995) A statistical analysis of the factors which contribute to the corrosion of steel in Portland cement and silica fume concrete. *Construction and Building Material*, 9, 105-113
- Cabrera JG (1996) Deterioration of concrete due to reinforcement steel corrosion. *Cement and Concrete Composites*, 18, 47-59
- Capozucca R. (1995) Damage to reinforced concrete due to reinforcement corrosion. *Construction and Building Materials*, 9, 295-303
- Cleland DJ, Yeoh KM, Long AE (1997) Corrosion of reinforcement in concrete repair. *Construction and Building Materials*, 11, 233-238
- Constantinou AG, Scrivener KL (1995) The corrosion of steel reinforcement in carbonated concrete under different humidity regimes. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, 370, 471-478
- de Vries J, Polder R (1997) Hydrophobic treatment of concrete. *Construction and Building Materials*, 11, 259-265
- Dhir RK, Jones MR, McCarthy MJ (1994) PFA concrete: Chloride-induced reinforcement corrosion. *Magazine of Concrete Research*, 46, 269-277
- Dry CM, Corsaw MJT (1998) A time-release technique for corrosion prevention. *Cement and Concrete Research*, 28, 1133-1140
- Elsener B (1997) Corrosion rate of steel in concrete – from laboratory to reinforced concrete structures. *EUOCORR 1997*
- Elsener B (1995) Chloride penetration – non destructive determination of the free chloride content in mortar and concrete. *RILEM workshop*, ritstj. Nilsson LO,

⁹ list frá 2001

- og Ollivier JP, Electrochemical techniques for monitoring the conditions of concrete bridge structures. Greinin birtist í: Procc. Int. Conf. "Repair of Concrete Structures" Svolaver, Norway
- Estoup JM, Carbrillac R (1997) Corrosion of biological origin observed on concrete digestors. *Construction and Building Materials*, 11, 225-232
- González A, Otero E, Feliu S, Bautista A, Ramírez E, Rodríguez P, López W, (1998) Some considerations on the effect of chloride ions on the corrosion of steel reinforcements embedded in concrete structures. *Magazine of Concrete Research*, 50, 189-199
- González JA, Andrade C, Alonso C, Feliu S (1995) Comparison of rates of general corrosion and maximum pitting penetration on concrete embedded steel reinforcement. *Cement and Concrete Research*, 25, 257-264
- Grantham MG, Broomfield J (1997) The use of linear polarisation corrosion rate measurements and aiding rehabilitation options for the deck slabs of a reinforced concrete underground car park. *Construction and Building Materials*, 11, 215-224
- Huang R, Yang CC, (1997) Condition Assessment of reinforced concrete beams relative to reinforcement corrosion. *Cement and Concrete Composites*, 19, 131-137
- Mietz J, Isecke B, (1996) Monitoring of concrete structures with respect to rebar corrosion. *Construction and Building Materials*, 10, 367-373
- Monteiro PJM, Morrison F, Frangos W (1998) Nondestructive Measurements of Corrosion State of Reinforcing Steel in Concrete. *ACI materials Journal*, Nov-des, 704-709
- Polder RB, (1996) The influence of blast furnace slag, fly ash and silica fume on corrosion of reinforced concrete in marine environment. *Heron*, 41, 287-300
- Raupach M, Schiessel P (1997) Monitoring systems for the penetration of chlorides, carbonation and the corrosion risk for the reinforcement. *Construction and Building Materials*, 11, 207-214
- Rodríguez J, Ortega LM, Casal J (1997) Load carrying capacity of concrete structures with corroded reinforcements. *Construction and Building Materials*, 11, 239-248
- Thangavel K, Rengaswamy NS (1998) Relationship between Chloride/hydroxide ratio and corrosion rate of steel in concrete. *Cement and Concrete Composite*, 20, 283-292
- Velivasakis EE, Henriksen SK, Whitmore D, (1997) Halting corrosion by chloride extraction and realkalization. *Concrete International*, Dec, 39-45
- Whitmore D, Abbott S, Velivasakis E, (1999) Battling Concrete Corrosion. *Civil Engineering*, jan, 46-48
- Wilson MA, Hoff WD (1997) Properties in concrete in the cover zone: developments in monitoring techniques - discussion.
- Wood JGM, Crerar J (1997) Tay road bridge: analysis of chloride ingress variability and prediction of long term deterioration. *Construction and Building Materials*, 11, 249-254
- Yalcyn H, Ergun M, (1996) The prediction of corrosion rates of reinforcing steels in concrete. *Cement and Concrete Research*, 26, 1593-1599
- Zimmermann L, Elsener B, (1997) Electrochemical techniques for monitoring the conditions of concrete bridge structures.

Bækur

Tuutti K (1982) Corrosion of steel in concrete. CBI 4:82, 468 bls

Page CL, Treadaway KWJ, Bamforth PB (1990) Corrosion of reinforcemetn in concrete. Elsevier Applied Science, 612 bls

Alekseev SN, Ivanov FM, Modry S, Schiessel P (1993) Durability of reininforced concrete in aggressive media. AA Balkema/Rotterdam/Brookfield, 380 bls

COST Action 509/521 rit/greinar

Banfill P (1996) Corrosion Protection of Metals in Contact with concrete. Safn fjölda greina sem fjalla um tæringu á bendistáli og varnir gegn henni. Útgefið af Heriot-Watt Háskólanum í Edinborg Skotlandi, 132 bls. Lokaskýrsla frá COST ACTION 509 nefndinni

Polder R (1998) Corrosion of steel in reinforced concrete structures. Útgefið af TNO stofnuninni í Hollandi, ótölusett. Erindi flutt á verkfundi (workshop) hjá COST ACTION 521 nefndinni árið 1998

Raharinaivo A (1999) Corrosion of steel in reinforced concrete structures. Útgefið af LCPC stofnuninni í Frakklandi, ótölusett. Erindi flutt á verkfundi (workshop) hjá COST ACTION 521 nefndinni árið 1999.

Viðauki III. Tæringaskynjarar

Embeddable Reference Electrode for potential reading

ERE 20



The ERE 20 attached to the reinforcement

The ERE 20 is a true, long life Reference Electrode, which can be cast into the cover concrete to check the cathodic protection and to monitor the corrosion state of reinforcing steel or predict corrosion. Normally in newly cast concrete structures, but the electrode can also be installed in existing structures.

The potential of ERE 20 is virtually independent of changes in the chemical properties of the concrete. It can, therefore, be used in wet or dry concrete, whether exposed to chlorides or to carbonation.

Based on proven battery technology, the ERE 20 is a true half-cell using a manganese dioxide electrode in steel housing with an alkaline, chloride-free gel. The steel housing is made of a corrosion resistant material. The pH of the gel corresponds to that of pore water in normal concrete, so errors due to diffusion of ions through the porous plug are eliminated.

The ERE 20 can easily be attached to a logger in order to monitor data. Remote monitoring by modem is also possible.

Advantages

- Control of cathodic protection.
- For potential measurements in wet and dry concrete.
- Can be exposed to chloride or carbonation.
- Does not induce corrosion in steel.
- Does not change potential of steel.
- Easy to install in new or old structures.

Example

The ERE 20 is used to check the correct operation of the cathodic protection in structures. Figure 2 shows a typical curve found on checking a CP-system.

The reinforcing steel to be protected shall be polarised a minimum of 100 mV at anodic locations. When using the polarisation decay method, the decay is determined by interrupting the protective current and monitoring the reinforcement's potential measured relative to a stable reference electrode.

When the current is interrupted, an immediate voltage shift is the result of eliminating the IR-drop and is not to be included in the polarisation measurements.

According to EN 12696 the Polarisation Decay should be met within 24 hours.

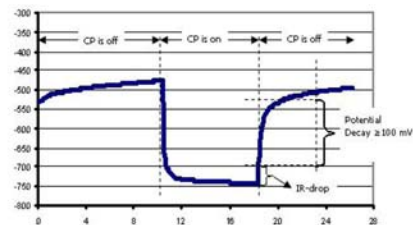


Figure 2. Polarisation curve from CP-system



Further information:
 Oskar Klinghoffer, tel. (direct) +45 43 26 72 55, osk@force.dk
concrete@force.dk - www.force.dk/ciad

Subject to changes without notice

FORCE Technology USA Inc.
 Tel. +1 713 975 8300
 FORCE Technology Canada Inc.
 Tel. +1 403 286 0606
 FORCE Technology Brazil Ltda.
 Tel. +55 21 2610 7400
 FORCE Technology Netherlands B.V.
 Tel. +31 71 523 5212

FORCE Technology Norway AS
 Claude Monets allé 5
 1338 Sandvika, Norway
 Tel. +47 64 00 35 00
 Fax: +47 64 00 35 01
info@forcetechnology.no
www.forcetechnology.no

FORCE Technology Sweden AB
 Tallmätargatan 7
 721 34 Västerås, Sweden
 Tel. +46 (0)21 490 3000
 Fax: +46 (0)21 490 3001
info@forcetechnology.se
www.forcetechnology.se

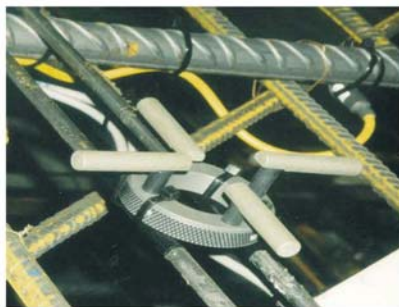
FORCE Technology
 Main office
 Park Allé 345
 2605 Brøndby, Denmark
 Tel. +45 43 26 70 00
 Fax: +45 43 26 70 11
force@force.dk
www.force.dk

An Early Warning System for Initial Stages of Corrosion



CorroWatch Multiprobe & ERE 20 Reference Electrode

CorroWatch



The CorroWatch attached to the reinforcement

The CorroWatch is a multiprobe, which in the standard version consists of four black steel anodes and one noble metal cathode. The anodes are placed in varying, but defined distances from the exposed concrete surface. The height of the anodes is flexible and can be adjusted according to the concrete cover thickness.

The CorroWatch acts as an early warning system to predict the initial stages of corrosion in concrete structures. It is cast into the cover concrete, normally in newly cast concrete structures. The probe can measure most of the relevant corrosion parameters.

To predict when the reinforcement will start corroding, the current between the single anodes and the cathode is measured, either with a volt-meter or a specially designed data logger. When corrosion starts, the current will increase significantly.

Areas of use

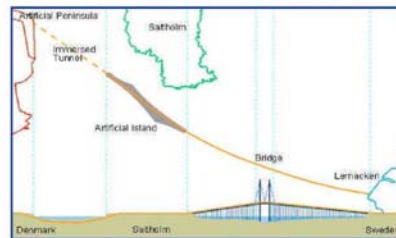
- Areas difficult to access, e.g. tunnels.
- Bridges in marine environments.
- Splash zones, e.g. pillars in sea water.
- De-icing areas, e.g. parking floors/decks.
- Structures heavily affected by acid rain, e.g. chimneys.

Example

The adjacent picture shows a CorroWatch multiprobe which has been installed for monitoring of time to corrosion initiation in the immersed elements of Øresund tunnel connecting Denmark and Sweden. (See sketch below).

In each of the chosen tunnel elements 21 pcs of CorroWatch were installed together with 27 pcs of ERE 20 - see reverse side. In total 189 pcs of CorroWatch were installed in 9 tunnel elements.

The CorroWatch were installed in such a way that the concrete cover on the highest electrode (anode) is approximately 25 mm.



Sketch of the Øresund Link between Denmark and Sweden

Example

In Figure 1 an example from a laboratory test is shown indicating when the corrosion initiates at each of the 4 anodes.

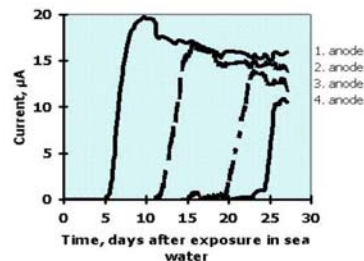


Figure 1. Increase in current in the 4 anodes