



MANNVIT



STEYPA Í SJÁVARFALLAUMHVERFI

LOKASKÝRSLA

SKJALANÚMÉR: MV 2017-015						
NÚGILDANDI ÚTGÁFA: 3						
3	23.02.2018	Kóp.	GG			
2	02.01.2018	Kóp.	GG			Samþykkt
1	20.12.2017	Kóp.	GG	Sv.Sv.		
X.Xx	08.12.2017	Kóp.	GG		XX	N/A
ÚTGÁFA	DAGS. ÚTG	ÚTGÁFUSTADA	HÖFUNDUR	RÝNIR	SAMPYKKT	VERKKAUPI

MANNVIT | +354 422 3000 | www.mannvit.is | mannvit@mannvit.is

Efnisyfirlit

1. Inngangur	1
2. Fyrri rannsóknir	3
2.1 Borgarfjarðarbrú.....	3
2.2 Óseyrarbrú.....	5
3. Vettvangsskoðun	5
3.1 Borgarfjarðarbrú.....	6
3.2 Óseyrarbrú.....	7
3.3 Dýrafjarðarbrú	11
3.4 Kolgrafafjörður	12
4. Prófanir á rannsóknarstofu	13
4.1 Loftdreifing í steinsteypu.....	14
4.2 Klóríðgreining	14
4.3 Smásjargreining	16
4.3.1.1 Óseyrarbrú	16
4.3.1.2 Dýrafjarðarbrú.....	17
4.3.1.3 Kolgrafafjarðarbrú.....	18
5. Helstu niðurstöður	19
6. Samantekt	23
Viðauki A	40
Viðauki B	63

Töfluskrá

Tafla 1. Sýnaskrá	5
Tafla 2. Vettvangsskoðun á kápusteypu í Borgarfjarðarbrú þann 9.10.2017.....	7
Tafla 3. Loftdreifing í steinsteypu samkvæmt ASTM C 457 aðferð B.....	14
Tafla 4. Yfirborðsstyrkur klóríðs, leiðnistuðull, steypuhula, dýpi þar sem styrkur klóríðs er 0,1 % og hvenær tæringahætta skapast.....	23

Myndaskrá

Mynd 1. Óvarið bendijárn í neðri fjörumörkum í Borgarfjarðarbrú..	1
Mynd 2. Brynvarnarjárn á stöpli í Borgarfjarðarbrú í neðstu fjörumörkum.	2
Mynd 3. Borgarfjarðarbrú stöpull 4. Kápusteypa frá 1998..	2
Mynd 4. Skematísk framsetning á framgangi skemmda í stöpulsteypum í neðri fjörumörkum í Borgarfjarðarbrú.	4
Mynd 5. Kápusteypa á stöpli 11. Kápusteypan var steipt þann 2.08.2006.	6
Mynd 6. Óseyrarbrú, stöpull 5. Flögnun í steypunni við meðal fjörumörk.	8
Mynd 7. Óseyrarbrú, stöpull 5. Flögnun í steypunni fyrir neðan meðal fjörumörk.	8
Mynd 8. Óseyrarbrú, stöpull 4, yfirborð sökkuls. Neðri fjörumörk.	9
Mynd 9. Óseyrarbrú, stöpull 5. Sýnatökustaðir í efri fjörumörkum.	9
Mynd 10. Óseyrarbrú, stöpull 5. Sýnatökustaður í neðri fjörumörkum.	10
Mynd 11. Óseyrarbrú, stöpull 4. Kjarni boraður úr neðri fjörumörkum.	10
Mynd 12. Óseyrarbrú, stöpull 4. Kjarni boraður úr stöpulsteypu við neðri fjörumörk.	11
Mynd 13. Dýrafjarðarbrú. Brúin var steipt árið 1990.	12
Mynd 14. Dýrafjararbrú. Engar skemmdir voru sjáanlega í yfirborði steypunnar.	12
Mynd 15. Kolgrafafjarðarbrú. Brúin var steipt 2004.	13
Mynd 16. Kolgrafafjarðarbrú. Engar skemmdir voru sjáanlega í yfirborði steypunnar.	13
Mynd 17. Klóríðprófíll í stöplum úr Kolgrafafirði.	15
Mynd 18. Klóríðprófíll í stöplum úr Dýrafirði.	15
Mynd 19. Klóríðprófíll í stöplum úr Óseyrarbrú.	16
Mynd 20. Klóríðprófíll í stöpli nr. 6 í Borgarfjarðarbrú.	20
Mynd 21. Styrkur klóríðs í Dýrafjarðarbrú og Kolgrafafjarðarbrú.	21
Mynd 22. Styrkur klóríðs í Óseyrarbrú við neðri fjörumörk, sökkulsteypa.	22
Mynd 23. Samsett mynd af yfirborð steypu í efra fjöruborði stöpuls 5 í Óseyrarbrú.	27
Mynd 24. Samsett mynd af yfirborð steypu í efra fjöruborði stöpuls 5 í Óseyrarbrú.	28
Mynd 25. Samsett mynd af yfirborð steypu í efra fjöruborði stöpuls 5 í Óseyrarbrú.	29
Mynd 26. Samsett mynd af yfirborð steypu í neðra fjöruborði stöpuls 5 í Óseyrarbrú.	30
Mynd 27. Samsett mynd af yfirborð steypu í neðra fjöruborði stöpuls 5 í Óseyrarbrú.	31
Mynd 28. Yfirborð steypu í neðra fjöruborði stöpuls 5 í Óseyrarbrú.	32
Mynd 29. Yfirborð steypu í neðri fjöruborði stöpuls 5 í Óseyrarbrú.	32
Mynd 30. Við yfirborð steypu í neðri fjöruborði stöpuls 5 í Óseyrarbrú.	33
Mynd 31. Samsett mynd af yfirborð steypu úr efri fjöruborði millistöpuls I í Dýrafjarðarbrú.	34
Mynd 32. Loftbólur og annað holrými í steypu úr efri fjöruborði millistöpuls I í Dýrafjarðarbrú.	35
Mynd 33. Flúrljómun sementsefju úr efra fjöruborði millistöpuls I í Dýrafjarðarbrú.	35
Mynd 34. Útfellingar í holrými í loftbólum úr efra fjöruborði millistöpuls I í Dýrafjarðarbrú.	36
Mynd 35. Samsett mynd af yfirborð steypu úr efri fjöruborði stöpuls í Kolgrafafirði.	37
Mynd 36. Loftbólur og annað holrými í steypu úr efri fjöruborði stöpuls í Kolgrafafirði.	37
Mynd 37. Flúrljómun sementsefju úr efra fjöruborði stöpuls í Kolgrafafjarðarbrú.	38
Mynd 38. Samsett mynd af yfirborð steypu úr neðra fjöruborði stöpuls í Kolgrafafirði.	38
Mynd 39. Útfellingar í yfirborðssprungu í steypu úr neðri fjöruborði í Kolgrafafjarðarbrú.	39

1. Inngangur

Tildrög þessa verkefnis eru steypuskemmdir sem komu fram í stöplum í Borgarfjarðarbrú og í Óseyrarbrú. Yfirborðsflögnun átti sér stað í stöplunum. 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. Sýni úr yfirborði nokkura stöpla vour rannsökuð árin 1994 og 1995 á Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins af undirrituðum. Steypan sem verður fyrir skemmdum er sprungin við yfirborðið, sprungurnar liggja um sementsefjuna samsíða yfirborðinu og valda því að sementsefjan flagnar smám saman af. Í sprungunum má greina útfellingar sem eru væntalega orsök flögnunarinnar. Sökum þess að sprungurnar liggja ekki í gegnum fylliefnin, þá sitja þau eftir í steypunni og standa úr út sementsefjunni uns efjan sem heldur þeim föstum flagnar af, sjá Mynd 1 og Mynd 2. Þar sem flögnunin var mest í Borgarfjarðarbrú lágu bendijárn í yfirborð steypunnar, þannig að allt að um 30 til 50 mm höfðu flagnað af yfirborði steypunnar.



Mynd 1. Óvarið bendijárn í neðri fjörumörkum í Borgarfjarðarbrú. Yfirborðsflögnun er allt að um 50 mm, en steypuhulan var um 50 mm. Myndin er tekin árið 2000.



Mynd 2. Brynvarnarjárn á stöpli í Borgarfjarðarbrú í neðstu fjörumörkum (stór streymisfjara). Kápusteypa í stöpli 9 í bakgrunni. Myndin er tekin árið 2000.

Vegna flögnunar í stöplum Borgarfjarðarbrúar greip Vegagerðin til þess ráðs að steypa kápu utan um neðri hluta allra stöplanna, sjá Mynd 3. Því verki lauk 2007.



Mynd 3. Borgarfjarðarbrú stöpull 4. Kápusteypa frá 1998. Myndin er tekin árið 2000.

Sýni voru tekin af Vegagerðinni úr Óseyrarbrú árið 1994. Sýnin voru rannsökuð á Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins af undirrituðum¹. Ekki var að sjá neinar breytingar í innri gerð sementsefjunnar sem orsökuðu flögnunina, en flögnunin var mun minni í Óseyrarbrú, en í Borgarfjarðarbrú.

Tilgangur með þessu verkefni er eftirfarandi:

- Sjónskoða kápusteypu á stöplum Borgarfjarðarbrúar til þess að meta hvernig steypa hefur staðið sig og skrá niðurstöðuna m.t.t. síðari samanburðar og viðgerða í öðrum brúm.
- Rannsókn á sýnum úr Óseyrarbrú mun leiða í ljós hvernig skemmdir og efnabreytingar hafa þróast á rúmum 20 árum í steypu. Steypa var gerð með sk Blöndusementi og getur þannig hugsanleg nýst við val á sementsgerðum.
- Rannsóknir á sýnum úr Kolgrafafjarðarbrú og Dýrafjarðarbrú munu leiða í ljós hvernig þær steypugerðir sem notaðar hafa verið á undanförunum árum koma út í sjávarfallaumhverfi og vera prófsteinn á hvort rétt sé að fyrirskrifa þær áfram.

Markmiðið er að það liggi fyrir skýr gögn um hvort sú steypugerð, sem Vegagerðin hefur notað undanfarin ár henti í sjávarfallaumhverfi eða hvort þróa þurfi nýjar blöndur.

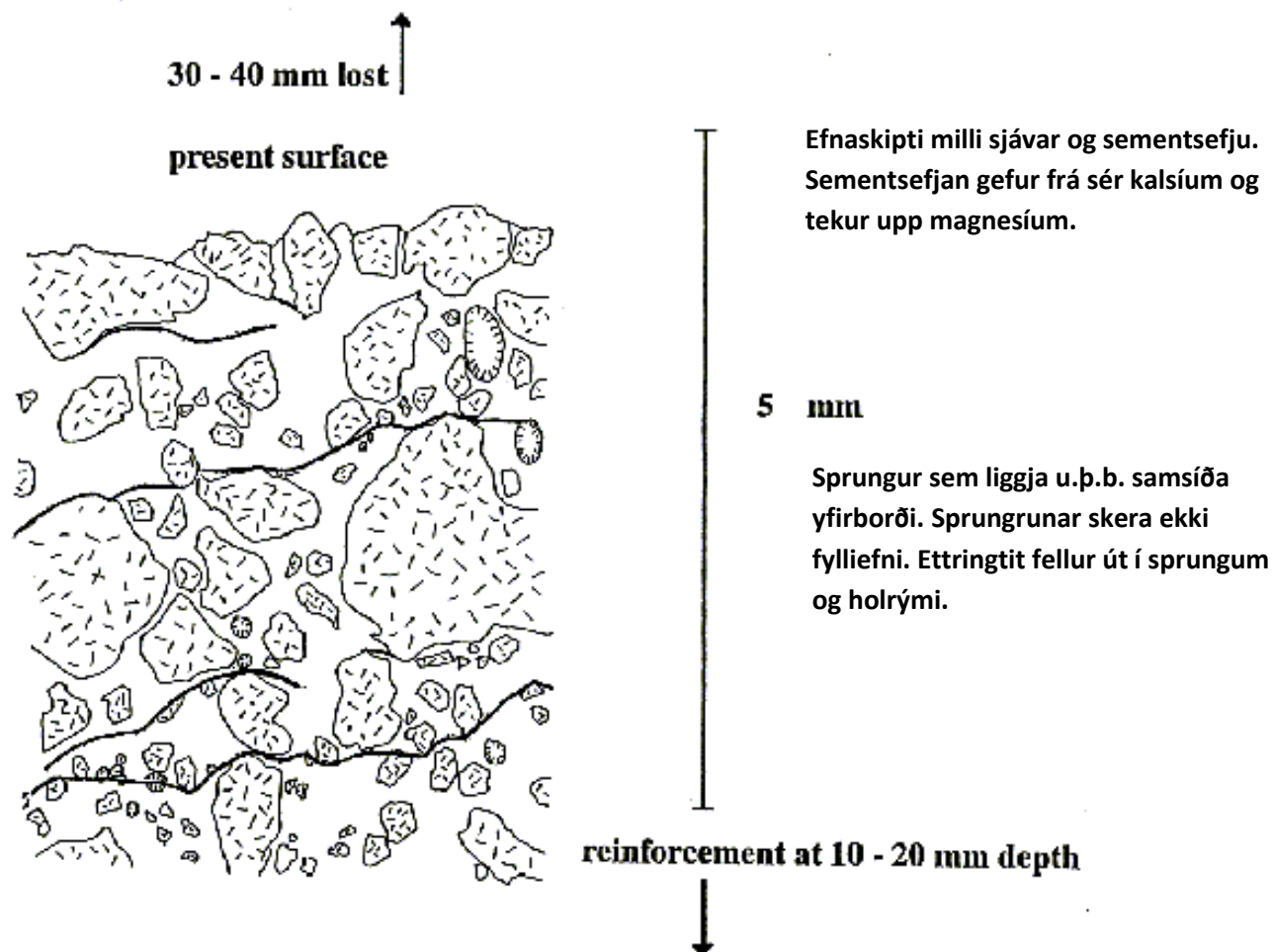
2. Fyrri rannsóknir

2.1 Borgarfjarðarbrú

Steypuskemmdir í Borgarfjarðarbrú, þ.e.a.s. flögnun í og við neðri fjörumörk stöplanna var rannsökuð af höfundi þessarar skýrslu á sýnum úr stöplum 6 og 9 á árunum 1994 til 1995. Samantekt á þeirri vinnu er að finna í riti frá 1997². Framgangur skemmdanna er sýndur á skematískan hátt á Mynd 4.

¹ Gísli Guðmundsson (1994) Yfirborðsflögnun í brúarstöplum sem standa í sjó. Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins 94-23, 32 bls.

² Guðmundsson, G., (1997) Deterioration of concrete bridge piers in Iceland. In: mechanisms of chemical degradation of cement-based systems. Eds.: K.L. Scrivener and J.F. Young. E & FN Spon, London, 201-208



Mynd 4. Skematísk framsetning á framgangi skemmda í stöpulsteypum í neðri fjörumörkum í Borgarfjarðarbrú.

Skemmdarferlið er þannig að efnaskipti milli sjávar og yfirborðs steypu eiga sér stað, kalsíum skolest út úr steypunni og magnesíum gengur úr sjó inn í steypuna. Þetta svæði er aðeins bundið við yfirborð steypunnar og virðist ekki ná lengra en á um 5 mm dýpi. Sprungur myndast í sementsefjunni samsíða yfirborði. Ettringit ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$) fellur út ú sprungum og öðru holrými. Sementsefjan flagnar af en stór fylliefni sitja eftir í efjunni. Fylliefnin losna smám saman og flögnunin gengur lengra inn í steypuna. Ettringtimyndun ein og sér er ekki talin vera skaðvaldur í steypu, þ.e.a.s. hún veldur ekki mikilli þenslu. Væntanlega er hún ekki nægjanleg skýring fyrir sprungumynduninni. Annað hlýtur að koma til, annars vegar eru aðrar steindir að valda þenslunni sem greindust ekki og/eða að efnaskipti milli sjávar og yfirborðs steypu veiki steypuna.

Frost/þíðu niðurbrot er ekki líklegt að valda verulegum skemmdum í þessu umhverfi. Hitastig í yfirborði kápusteypu í Borgarfjarðarbrú hefur verið mælt yfir tiltölulega langt tímabil³. Niðurstöður úr þeim mælingum er að áhrifa frost/þíðu sveifla gætir ekki mikið í neðra fjöruborði.

³ Gudmundsson, G., (2003) On site monitoring of high performance concrete during freeze/thaw cycles and relationship to standardized testing. Proceedings of the 15. International Baustofftagung, F.A. Finger – Institut für Baustoffkunde, pages 2-0051-2-0062.

2.2 Óseyrarbrú

Samkvæmt verklýsingu Vegagerðarinnar fyrir Óseyrarbrú þá var að öllum líkindum notað Blöndusement í stöpulsteypurnar. Blöndusement er með 10 % kísilryks og 25 % líparít í aukum. Sementsmagnið var ekki skilgreint sérstaklega en brotþolsflokkurinn var S35 (S30?), sem samsvarar 35 MPa þrýstistyrk og v/s-hlutfallið átti að vera minna en 0,5. Loftmagnið átti að vera frá 4 til 7 %, yfirborð loftbóla meiri en 25 mm-1 og fjarlægðarstuðull minni en 0,25 mm.

Brúin var tekin í notkun árið 1988. Stöplarnir voru steiptir árið 1986 og eru því 31 ára gamlir. Fljótlega kom fram flögnun í yfirborði stöplanna. Sýni voru tekin af stöpli 4 af Vegagerðinni árið 1994. Sýni úr neðsta hluta stöpuls 4 (stórstraumsfjara) voru rannsökuð af undirrituðum í smásjá. Áætlað var að um 5 mm hafi flagnað af yfirborði steypunnar, þar sem sementsefjan flagnaði af og fylliefni sátu eftir í yfirborðinu. Í smásjárrannsókn var ekki að sjá að sprungumyndu ætti sér stað samfara þessari yfirborðsflögnun.

3. Vettvangsskoðun

Vegagerðin annaðist sýnatökur úr öllum brúnum. Sýni úr Kolgrafafjarðarbrú og Dýrafjarðarbrú voru tekin 15.08.2017 og 16.08.2017. Sýni úr Óseyrarbrú voru tekin þann 21.09.2017. Auk þess voru stöplar Borgarfjarðarbrúar skoðaðir af Vegagerðinni 09.10.2017. Sýni voru ekki tekin úr Borgarfjarðarbrú. Skrá yfir sýnin sem tekin voru eru gefin í Tafla 1.

Tafla 1. Sýnaskrá

Mannvirki	Dagsetning	Stöpull	Staðsetning	Rannsókn
Kolgrafafjarðarbrú	16.08.2017	Millistöpull 3. 2 kjarnar	Efri fjörumörk	Smásjárrannsókn (þ.s. #9, 10 11), klóríðleiðni
Kolgrafafjarðarbrú	16.08.2017	Millistöpull 3. 2 kjarnar	Neðri fjörumörk	Smásjárrannsókn (þ.s. #6, 7, 8)
Dýrafjarðarbrú	15.08.2017	Millistöpull 1. 2 kjarnar	Efri fjörumörk	Smásjárrannsókn (þ.s. #1, 2)
Dýrafjarðarbrú	15.08.2017	Millistöpull 2.	Neðri fjörumörk	Smásjárrannsókn (þ.s. #3,4,5)
Óseyrarbrú	21.09.2017	Stöpull 4. 2 kjarnar (einn úr sökklí)	Neðri fjörumörk	
Óseyrarbrú	21.09.2017	Stöpull 5. 2 kjarnar	Efri fjörumörk	Smásjárrannsókn (þ.s. #12, 13)
Óseyrarbrú	21.09.2017	Stöpull 5. 2 kjarnar	Neðri fjörumörk	Smásjárrannsókn (þ.s. #14,15)

þ.s.: þunnsneið

3.1 Borgarfjarðarbrú

Stöplarnir voru steptir á árunum 1976 og 1977, alls 12 stöplar, úr íslensku hraðsementi. Eins og áður segir komu skemmdir fram í yfirborði steypunnar. Gripið var til þess ráðs að steypa kápusteypu utan um hvern stöpul. Fyrsta kápusteypan var stept 1998 og síðasta steypa stept 2010. Gerð var grein fyrir framgangi verksins af Einari Hafliðasyni (2016)⁴ og verður hann ekki rakinn hér.

Stöplarnir voru skoðaðir þann 9.10.2017 af Vegagerðinni. Brúin var skoðuð í stórstreymisfjöru. Samantektarskýrsla var skrifuð og fylgir í Viðauki A. Almennt má segja að kápusteypan líti vel út en þó hafa komið fram skemmdir í yfirborði nokkurra stöpla. Einnig má sjá skemmdir í upprunalegu steypunni fyrir ofan kápusteypana. Samantekt úr vettvangsskoðuninni er tekin saman í Tafla 2. Tveir fyrstu stöplarnir sem stept var utan um (nr. 4 og 9) voru steptir með s.k. hástyrkleikasteypu, kápusteypan í öðrum stöplum var s.k. sjálfútleggjandisteypa. Sýni úr sérhverri steypu tegund voru prófuð á rannsóknarstofu NMÍ, m.a. var frostþol prófað samkvæmt SS 137244 með 3 % salti í 56 umferðir. Niðurstöður frostþolsprófananna eru gefnar í Tafla 2 (frostþol úr stöpli 3 liggur ekki fyrir). Frostþolið er í alla staði mjög gott, vel undir kröfum um frostþolna steypu sem er að öllu jöfnu 1 kg/m². Aðeins eitt sýni reyndist vera með flögnun um 0,4 kg/m², og tvo á bilinu 0,17 til 0,27 kg/m². Önnur sýni voru með töluvert minni flögnun, eða minni eða jafnt og 0,02 kg/m². Ástand kápusteypu er almenn gott, þó eru steypur sem hafa nokkra til töluverða yfirborðsflögnun. Flögnunin lýsir sér þannig að sementsefjan hefur flagnað af og fylliefni sitja eftir, sbr. Mynd 5.

Fimm stöplanna reyndust vera með sýnilega yfirborðsflögnun, þarf af voru þrjú stöplar með töluverða yfirborðsflögnun eða stöplar nr. 5, 9 og 11. Stöpull nr. 9 var steptur með hástyrkleikasteypu, sem mældist með aðeins um 0,17 kg/m² flögnun í frost/þíðu-prófun. Stöplar nr. 5 og 11 voru steptir með sjálfútleggjandi steypu sem mældist vera með mjög litla til enga flögnun í frost/þíðu-prófun. Kápusteypan í stöplum nr. 5 og 11 eru aðeins 8 og 11 ára.



Mynd 5. Kápusteypa á stöpli 11. Kápusteypan var stept þann 2.08.2006. Töluverð yfirborðsflögnun hefur átt sér stað í kápusteypunni, þar sem sementsefjan hefur flagnað af og fylliefnin sitja eftir. Eitt kónagat sést á hvorri mynd, en þvermál þess er um 4 cm. Veðrun eftir aðeins 11 ár. Engin flögnun mældist í frost/þíðu-prófun á steypunni.

⁴ Einar Hafliðason, 2016. Ending steypi í sjávarumhverfi. Vegagerðin.

Tafla 2. Vettvangskoðun á kápusteypu í Borgarfjarðarbrú þann 9.10.2017

Stöpull	Dagsetning	Tegund	Frostflögnun, kg/m ² (SS137244)	Ástand á kápusteypu, aldur (ár)
1	21.08.2003	SCC*	0,02 og 0,002	Ástand mjög gott, 14 ára
2	25.05.2010	SCC	0	Ástand mjög gott, 7 ára
3	28.07.2004	SCC	Ekki prófað	Gott ástand, 13 ára
4	14.07.1998	HSSt**	0,44 (alls 10 sýni úr 5 steypubílum)	Gott ástand, en sementsefjan flögnuð úr yfirborði, 19 ára
5	28.07.2009	SCC	0,02 (2 steypubílar)	Töluverð flögnun sementsefju úr yfirborði, 8 ára
6	14.10.2004	SCC	0,01	Ástand mjög gott, 13 ára
7	19.07.2005	SCC	0,07	Ástand mjög gott, 12 ára
8	23.10.2007	SCC	0,02 (meðaltal tveggja prófana)	Ástand mjög gott, 10 ára
9	13.10.1999	HSSt	0,17	Veruleg flögnun sementsefju úr yfirborði
10	24.09.2003	SCC (SCC I og SCC II)	0,27 (meðaltal tveggja prófana). Mikil flögnun eftir 112 umferðir	Ástand gott, en nokkur flögnun sementsefju í yfirborði, 14 ára
11	02.08.2006	SCC	0	Ástand nokkuð gott, en töluverð flögnun sementsefju úr yfirborði, 11 ára
12	05.10.2007	SCC	0,02	Ástand mjög gott, 10 ára

*SCC: sjálfútleggjandisteypa

**HSSt: hástyrkleikasteypa

3.2 Óseyrarbrú

Brúin var skoðuð þann 21.09.2017 af Vegagerðinni og Mannviti hf. Þegar brúin var skoðuð var stórsteymisfjara. Steypan nokkuð skemmd fyrir neðan meðal stórt flóð eða í neðri fjörumörkum. Skemmdirnar eru þannig að sementsefjan hefur flagnað frá og fylliefni standa út úr steypunni, sjá Mynd 6 og Mynd 7. Sérstaklega á endunum (norðanmegin), þar er flögnunin allt að um 30 mm. Stöpull 5 virðist vera meira skemmdur en stöpull 4. Svo virðist að stöplarnir skemmast meira austanmegin og mest á norðurendum (ekki vitað um ástand á suðurendum). Yfirborð sökkla er einnig skemmt, en erfitt reyndist að meta hve mikið var flagnað af yfirborði þeirra, sjá Mynd 8.



Mynd 6. Óseyrarbrú, stöpull 5. Flögnun í steypunni við meðal fjörumörk. Rauða örin bendir á kónagat.



Mynd 7. Óseyrarbrú, stöpull 5. Flögnun í steypunni fyrir neðan meðal fjörumörk. Rauða örin bendir á sama kónagat og örin bendir á, á myndinni hér fyrir ofan. Flögnun úr yfirborði er áætluð allt að um 30 mm. Neðstu fjörumörk eru ekki alveg komin í ljós.



Mynd 8. Óseyrarbrú, stöpull 4, yfirborð sökkuls. Neðri fjörumörk.

Sýni voru tekin úr stöplum 4 og 5. Fjórir kjarnar voru teknir úr stöpli 5. Tveir kjarnar voru teknir u.þ.b. við neðri fjörumörk og tveir við efri fjörumörk, sjá Mynd 9 og Mynd 10.



Mynd 9. Óseyrarbrú, stöpull 5. Sýnatökustaðir í efri fjörumörkum.



Mynd 10. Óseyrarbrú, stöpull 5. Sýnatökustaður í neðri fjörumörkum.

Tveir kjarnar voru teknir úr stöpli 4. Einn á sökklinum og einn úr stöplinum, um 30 cm fyrir ofan sökkul, sjá Mynd 11 og um 50 cm fyrir ofan stórstraums fjöruborð, sjá Mynd 12.



Mynd 11. Óseyrarbrú, stöpull 4. Kjarni boraður úr neðri fjörumörkum.



Mynd 12. Óseyrarbrú, stöpull 4. Kjarni boraður úr stöpsteypu við neðri fjörumörk.

3.3 Dýrafjarðarbrú

Dýrafjarðarbrú var steypd 1990 og er því 27 ára gömul. Brúin er um 120 m löng bitabrá með járnbentu steypu gólfi, spennt steypa í burðarvirki og járnbent steypa í stöplum, sjá Mynd 13.

Brúin var skoðuð þann 15.08.2017 af Vegagerðinni. Engar skemmdir voru sjáanlega. Fjórir kjarnar voru teknir úr einum stöpli, tveir við neðri fjörumörk og tveir við efri fjörumörk, sjá Mynd 14.

Um er að ræða S-350 steypu, eða steypu með um 350 kg/m³ af sementi. Vatns/sements-hlutfallið var minna eða jafnt og 0,45. Loftmagnið átti að vera á bilinu 4 til 7 %, með yfirborð loftbóla stærra en 25 mm-1 og fjarlægðastuðul minni en 0,25 mm. Steypuhulan átti að vera meiri en 50 mm. Sementstegundin var Portlandsement með 7,5 % kísilyki.



Mynd 13. Dýrafjarðarbrú. Brúin var steipt árið 1990.



Mynd 14. Dýrafjararbrú. Engar skemmdir voru sjáanlega í yfirborði steypunnar t.v. Kjarni boraður úr neðri fjörumörkum t.h.

3.4 Kolgrafafjörður

Brúin yfir Kolgrafafjörð var steipt 2004 og er því 13 ára gömul. Brúin er um 230 m löng bitabrá með járnbentu steiptu gólfi, spennt steypa í burðarvirki og járnbent steypa í stöplum, sjá Mynd 15.

Brúin var skoðuð þann 16.08.2017 af Vegagerðinni. Engar skemmdir voru sjáanlega. Fjórir kjarnar voru teknir úr einum stöpli, tveir við neðri fjörumörk og tveir við efir fjörumörk, sjá Mynd 16.

Um er að ræða C-35 steypu, eða steypu með um 35 MPa þrýstistyrk og að lágmarki 400 kg/m³ af sementi. Vatns/sements-hlutfallið var minna eða jafnt og 0,4. Loftmagnið átti að vera um 6 %, með

yfirborð loftbóla stærra en 25 mm-1 og fjarlægðastuðul minni en 0,2 mm. Sementstegundin var Portlandsement með 7,5 % kísilyki.



Mynd 15. Kolgrafafjarðarbrú. Brúin var steipt 2004.



Mynd 16. Kolgrafafjarðarbrú. Engar skemmdir voru sjáanlega í yfirborði steypunnar, t.v. Kjarni boraður úr efri fjörumörkum t.h.

4. Prófanir á rannsóknarstofu

Sýnin voru prófuð á rannsóknarstofu Mannvits hf. Sýnin voru meðhöndluð á rannsóknarstofunni fyrir prófanirnar. Þó voru þunnsneiðarnar útbúnar í Háskóla Íslands.

4.1 Loftdreifing í steinsteypu

Loftdreifing í sýnum úr brúnum þremur var fundin samkvæmt ASTM C 457 aðferð B. Loftdreifing var ákvörðuð í tveimur sýnum úr hverri brú, þ.e. í sýnum úr efri og neðri fjörumörkum. Niðurstöður greiningarinnar eru gefnar í Tafla 3 og í Viðauki B.

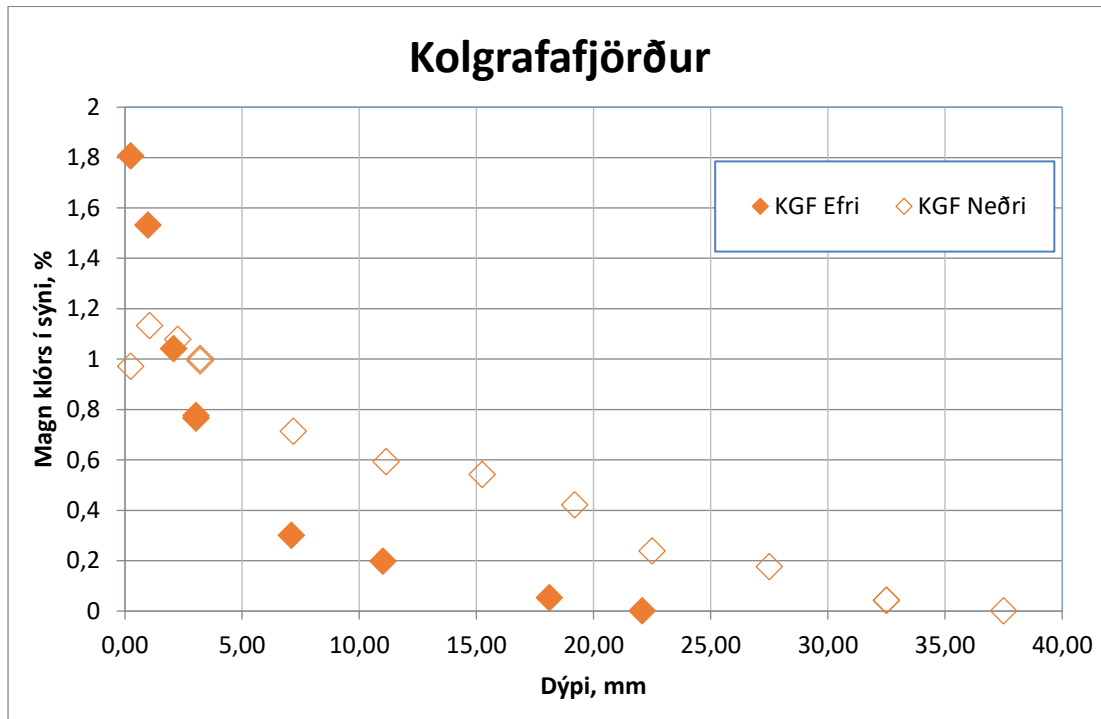
Tafla 3. Loftdreifing í steinsteypu samkvæmt ASTM C 457 aðferð B

	Kolgr.fj.br. Millist. 3 Neðri fjörumörk	Kolgr.fj.br. Millist. 3 Efri fjörumörk	Dýrafjarðarbrú, millistöpull II, Neðri fjörumörk	Dýrafjarðarbrú, millistöpull I, Efri fjörumörk	Óseyrarbrú, stöpull 5 Neðri fjörumörk	Óseyrarbrú, stöpull 5 Efri fjörumörk
Lofthluti steypu, %	3,6	3,0	3,1	1,8	3,4	4,4
Loft, hlutfall af sementsefju, %	13,4	11,4	12,2	5,7	9,7	10,3
Fjarlægðarstuðull, mm	0,31	0,30	0,23	1,03	0,31	0,26
Einkennandi yfirborð, mm-1	18	20	25	8	21	24
Þéttleiki loftbóla, stk./mm	0,16	0,15	0,19	0,04	0,18	0,27
Lengd mæilínu, mm	2.836	2.998	2.543	2.571	2.138	2.192
Rannsað svæði, mm ²	9.801	10.367	8.920	8.877	7.349	7.589
Taldir punktar, stk.	1616	1708	1449	1465	1218	1249
Dmax fylliefna í sýni, mm	20	34	17	20	15	16
Leiðbeinandi kröfur						
Lofthluti steypu, %	> 5					
Fjarlægðarstuðull, mm	< 0,2					
Einkennandi yfirborð, mm-1	> 25					

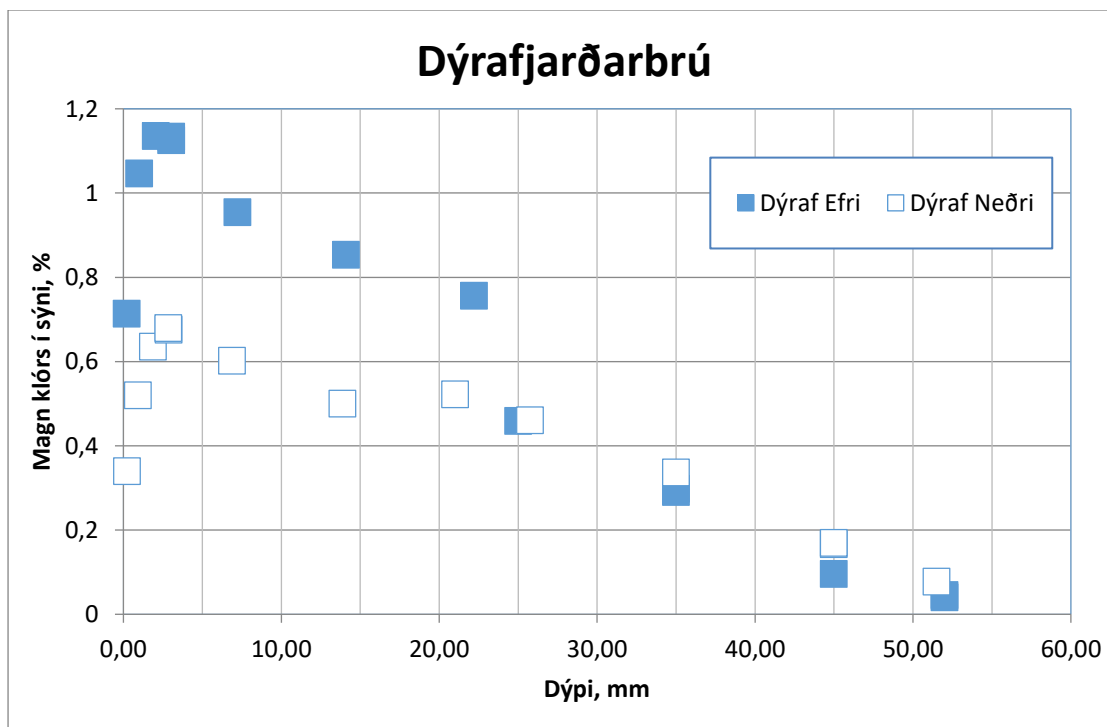
4.2 Klóríðgreining

Styrkur klóríðs í sýnum úr brúnum þremur var fundinn með efnagreiningum. Sýnin voru leyst upp með HNO₃ sýru lausn og efnagreiningin framkvæmt með spennutitrun (e. potentiometric titration). Klóríð kemur úr sjó og gengur inn í steypu sem stendur í eða er við sjó. Styrkur þess er hæstur við yfirborð þess og minnkar eftir því sem það gengur inn í steypu. Sýni til efnagreininga af borkjörnum voru tekin af 0-1, 1-2, 2-3, 3-4, 5-6, 10-11, 10-15, 15-16, 15-20, 20-21, 20-25, 25-26, 25-30, 27-28, 28-29, 29-30, 34-35, 35-40, 40-45, 43-44, 44-45, 45-50, 50-55, 55-60 mm dýptarbili. Miðað var við að efnagreina 7-10 sýni úr hverjum kjarna. Fjöldinn var háður því hve klóríð hafði gengið langt inn í steypuna. Einnig var sýni af a.m.k. einu dýptarbili efnagreint tvisvar.

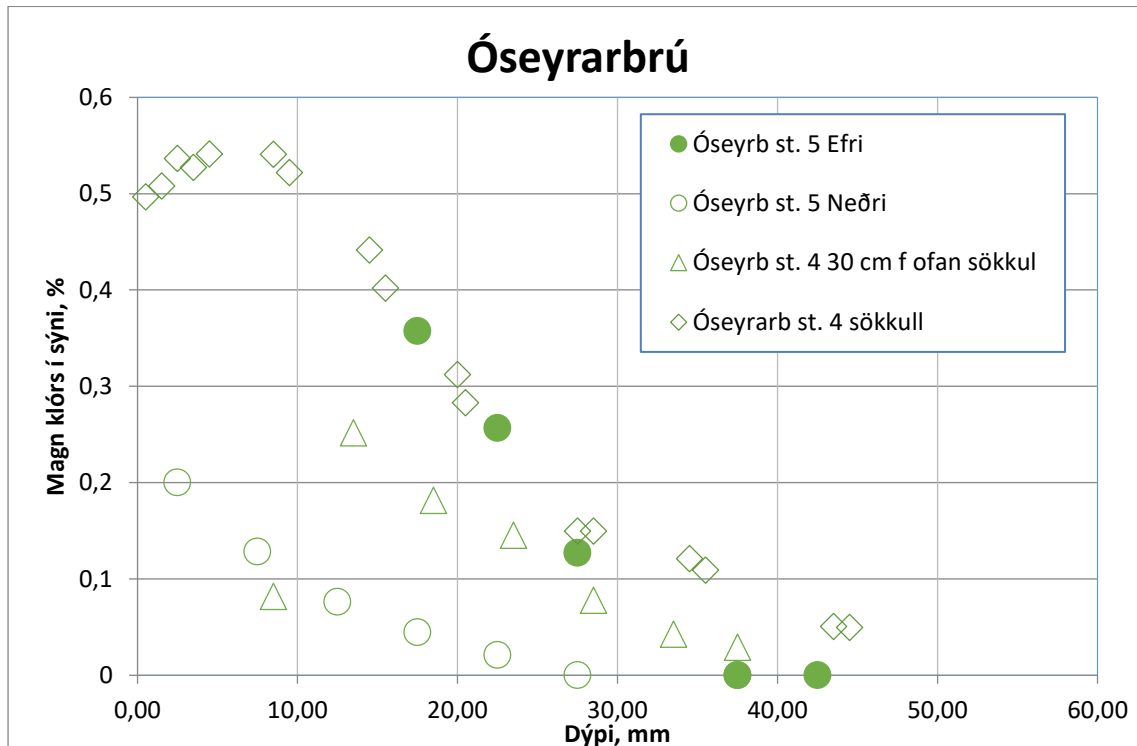
Styrkur klóríðs í stöplunum er sýndur á Mynd 17, Mynd 18 og Mynd 19. Í Kolgrafjarðarbrú og Dýrafjarðarbrú var styrkur klóríðs fundinn í sýnum úr bæði efra og neðra fjöruborði, einn kjarni af hvorum stað í hvorri brú. Í Óseyrarbrú var styrkur klóríðs fundinn í fjórum kjörnum, einn úr efra fjöruborði, tveir úr neðra fjöruborði í sitt hvorum stöplinum og einn úr sökkulsteypunni.



Mynd 17. Klóríðprófíll í stöplum úr Kolgrafafirði. Fyllt tákn eru úr sýnum úr efra fjöruborði og opin tákn úr neðra fjöruborði. Aldur steypunnar er 13 ára.



Mynd 18. Klóríðprófíll í stöplum úr Dýrafirði. Fyllt tákn eru úr sýnum úr efra fjöruborði og opin tákn úr neðra fjöruborði. Aldur steypunnar er 27 ára.



Mynd 19. Klóríðprófill í stöplum úr Óseyrarbrú. Fyllt tákn eru úr sýnum úr efra fjöruborði og opin tákn úr neðra fjöruborði. Aldur steypunnar er 31 ára. Ekki er búið að leiðrétta fyrir flögnuninni í yfirborði sýnanna úr neðra fjöruborði.

4.3 Smásjargreining

Sýni úr brúnum þremur voru skoðuð í smásjá. Til að skoða sýni í smásjá þarf að útbúa s.k. þunnsneiðar. Hver þunnsneið er um 3,5 x 5,0 cm að stærð og um 0,03 mm þykk. Þunnsneiðar voru gerðar úr efri og neðri fjörumörkum hverrar brúar og úr yfirborði og neðri hluta hvers kjarna. Alls voru útbúnar 15 þunnsneiðar. Þunnsneiðarnar voru útbúnar hjá Háskóla Íslands. Gæði þunnsneiðanna voru léleg, en tíma vannst ekki til þess að endurgera sneiðarnar. Sýnin sem þunnsneiðarnar voru gerðar úr voru límd með flúrljómandi litarefni. Í flúrljómun er hægt að meta v/s-hlutfall sementsefju í viðkomandi sýni, en einnig er hægt að meta hvort sementsefa hefur orðið fyrir utanaðkomandi efnaáhrifum. Í smásjárskoðun eru sýni skoðuð í 50 til 200 faldri stækkun.

4.3.1.1 Óseyrarbrú

Efri fjörumörk

Eins og sjá má á Mynd 6 og Mynd 9 er engin flögnun í steypunni við efri fjörumörk. Í smásjá er ekki að sjá merki um undanfara flögnunar eins og sprungur sem liggja samsíðan yfirborði, sjá Mynd 23. Hins vegar má sjá töluvert af fínum sprungum sem liggja hornrétt á yfirborð steypunnar. Þessar yfirborðssprungur mynda væntanlega net hárfæðasprungna sem ná frá yfirborði og inn í steypuna. Sprungurnar ná allt að um 9-10 mm inn í steypuna, sjá Mynd 24.

Takmörkuð efnaskipti eiga sér stað á milli sjávar og steypunnar, a.m.k er ekki að sjá að mikil útskolun efna úr sementsefjunni hafi átt sér stað. Þess í stað hefur yfirborð steypunnar kolsýrst, en kolsýring nær um 0,5 mm inn í steypuna. Það að steypa kolsýrist í þessu umhverfi bendir til þess að umhverfið sé tiltölulega þurr.

Tiltölulega mikið loft er í steypunni og mikið af smáum bóllum sem eru vel dreifðar um sýnin. Engar útfellingar er að finna í loftbólunum, sjá Mynd 25.

Net örprungna er til staðar í steypunni, en örprungur eru mjög algengar í steypu.

Sjá má smáa kísilykskekki í steypunni og líklega er um að ræða Blöndustement. V/s-hlutfallið er tiltölulega lágt og nokkuð einsleitt, sjá Mynd 25.

Í heild þá lítur steypan mjög vel út og ekki að sjá að niðurbrot eigi sér stað í henni.

Neðri fjörumörk

Á Mynd 7 og Mynd 8 má sjá að steypan sem liggur í svæðinu við neðri fjörumörk hefur flagnað. Flögnunin var metin vera allt að 30 mm. Framgangur flögnunarinnar virðist vera þannig að sementsefjan flagnar af, en tiltölulega stór fylliefnakorn sitja eftir í sementsefjunni. Fylliefnakornin taka ekki þátt í niðurbrotsferlinu. Fylliefnakornin falla síðan af þegar sementsefjan hefur flagnað það mikið að bindingurinn milli fylliefnakorna og semenstefju er orðinn það veikur að hann heldur fylliefnakornunum ekki föstu. Skemmdarferli eins og hér er líst er mjög svipað og átti sér stað í stöplum Borgarfjarðarbrúar⁵. Á Mynd 26 má sjá samsetta mynd af yfirborði steypunnar. Myndin nær yfir um 4,5 sinnum 15 mm svæði. Myndir er tekin með flúrljómun. Flúrljómunin dregur vel fram svæði sem hefur orðið fyrir efnaskiptum við sjó. Töluverð efnaskipti hafa átt sér stað milli steypu og sjávar. Efnaskiptasvæðið nær niður á um 2-3 mm dýpi. Á Mynd 27 má sjá minni hluta af yfirborði steypunnar í einskautuðu ljósi og í meiri stækkun. Fínar sprungur sem liggja hornrétt inn í steypuna frá yfirborði eru nokkuð algengar. Einnig má sjá fínar sprungur sem liggja samsíða yfirborðinu. Sjá má votta fyrir útfellingum í sprungum við yfirborð. Hins vegar er ekki að finna neinar áberandi gleiðar sprungur með útfellingum sem gætu orsakað flögnunina. Nárlaga útfellingar í loftbólum eru algengar, sjá Mynd 27, Mynd 28 og Mynd 29. Útfellingar í loftbólum eru væntanlega ekki að valda miklum skaða í steypunni, en eru þó merki þess að dregið hefur úr virkni þeirra gegn frost/þíðu-niðurbroti.

Loftmagnið í steypunni virðist vera í lægri kantinum. Loftbólurnar eru smáar og vel dreifðar, sjá Mynd 30.

Net örprungna er til staðar í steypunni, en örprungur eru mjög algengar í steypu.

Sjá má smáa kísilykskekki og fín malað líparít í steypunni og því líklega er um að ræða Blöndustement. V/s-hlutfallið er tiltölulega lágt og nokkuð einsleitt, sjá Mynd 30.

Algengt er að finna líparít fylliefni í steypunni.

Þrátt fyrir yfirborðsflögnunina sem hefur átt sér stað, þá má segja að steypan líti mjög vel út og ekki að sjá að niðurbrot eigi sér stað í henni ef undan eru skildir efstu 2-3 mm steypunnar, þar sem efnaskipti við sjó hafa átt sér stað.

4.3.1.2 Dýrafjarðarbrú

Efri fjörumörk

Yfirborð steypunnar er óskemmt, enga flögnun né sprungumyndun samsíða yfirborði er að sjá. Netsprungur hornrétt á yfirborð steypunnar eru nokkuð algengar, a.m.k. 10 sprungur er að finna á um 5 cm löngum kafla. Ein sprungan er tiltölulega gleið og gengur langt inn í steypuna. Sprungan gengur út úr þunnisneiðinni á um 30 mm dýpi. Sjá má útfellingar í sprungunum. Yfirborð steypunnar er aðeins kolsýrt, sjá Mynd 31.

Loftbólur viðrast vera nokkuð misdreifðar, sjá Mynd 32.

⁵ Gudmundsson, G., (1997) Deterioration of concrete bridge piers in Iceland. In: mechanisms of chemical degradation of cement-based systems. Eds.: K.L. Scrivener and J.F. Young. E & FN Spon, London, 201-208.

Net örprungna er til staðar í steypunni, en örprugnur eru mjög algengar í steypu.

V/s-hlutfallið er tiltölulega lágt og nokkuð einsleitt, sjá Mynd 33. Sjá má fínkorna kísilrykskekki í steypunni.

Í heild þá lítur steypan mjög vel út og ekki að sjá að niðurbrot eigi sér stað í henni.

Neðri fjörumörk

Steypa lítur mjög vel út og ekkert niðurbrot er sjáanlegt í steypunni, samanber sýnið úr efri fjörumörkum.

Algengt er að sjá fínkorna/myndlausar útfellingar í holrými, sjá Mynd 34. Ekki er ljóst hvaða efni þetta er né hver uppruni þess er. Úfellingarnar viðast vera bundnar við innri hluta sýnanna. Sjá má hvar útfellingarnar eru kristallaðar á yfirborði loftbóla en loftbólurnar eru að örðuleiti fylltar myndlausu efni.

4.3.1.3 Kolgrafafjarðarbrú

Efri fjörumörk

Yfirborð steypunnar er óskemmt, hvorki flögnun né sprungumyndun samsíða yfirborði er merkjanleg. Yfirborð steypunnar er með 0,2 mm þunnt kolsýrt lag. Sjá má tvær sprungur í yfirborði steypunnar, sjá Mynd 35. Önnur sprungan gengur ca. 40 mm inn í steypuna. Sprungan sker lítið fylliefnakorn. Engar útfellingar er að sjá í þessum sprungum. Ekki er að sjá nein merki um að efnaskipti hafi átt sér stað á milli steypunnar og sjávar.

Loftmagnið virðist vera eðlilegt, dreifingin góð og loftbólurnar smáar, sjá Mynd 36.

Net örprungna er til staðar í steypunni, en örprugnur eru mjög algengar í steypu.

V/s-hlutfallið er eðlilegt og nokkuð einsleitt, sjá Mynd 37.

Í heild þá lítur steypan mjög vel út og ekki að sjá að niðurbrot sé í henni.

Hluti af yfirborði steypunnar er með þunnt eða ca. 0,5 mm þykkt sementsbundið efjulag.

Neðri fjörumörk

Yfirborð steypunnar er óskemmt og engin flögnun hefur átt sér stað í yfirborði steypunnar. Hins vegar hefur sprungumyndun samsíða yfirborði steypunnar átt sér stað, sjá Mynd 38. Þessi sprungumyndun nær niður á um 15 mm dýpi. Sprungurnar eru allt að 0,1 mm gleiðar. Sjá má útfellingar í sprungunum við yfirborð, sjá Mynd 39. Ekki er ljóst hvaða efni það er sem eru að falla út í sprungunum. Sprungurnar skera fínkorna fylliefni en sprungurnar fara fram hjá stærri fylliefnakornum. Sprungur eru til staðar í steypunni, ekki er að sjá útfellingar í þeim.

Efnaskipti milli steypu og sjávar virðast takmarkast við tiltölulega þunnt kalsítlag á yfirborði steypunnar. Í þessu lagi er einnig að finna aðra óþekkta steinstegund.

Loftmagnið virðist vera eðlilegt, dreifingin góð og loftbólurnar smáar. Engar útfellingar eru til staðar í loftbólum.

Net örprungna er til staðar í steypunni, en örprugnur eru mjög algengar í steypu.

V/s-hlutfallið er eðlilegt og nokkuð einsleitt. Sjá má fína kísilryksköggla í steypunni.

Í heild þá lítur steypa mjög vel út og ekki að sjá er að niðurbrot í henni ef undan er skilið sprungumyndunin í yfirborði. Sprungumyndunin gæti verið undanfari yfirborðsskemmda í steypunni.

5. Helstu niðurstöður

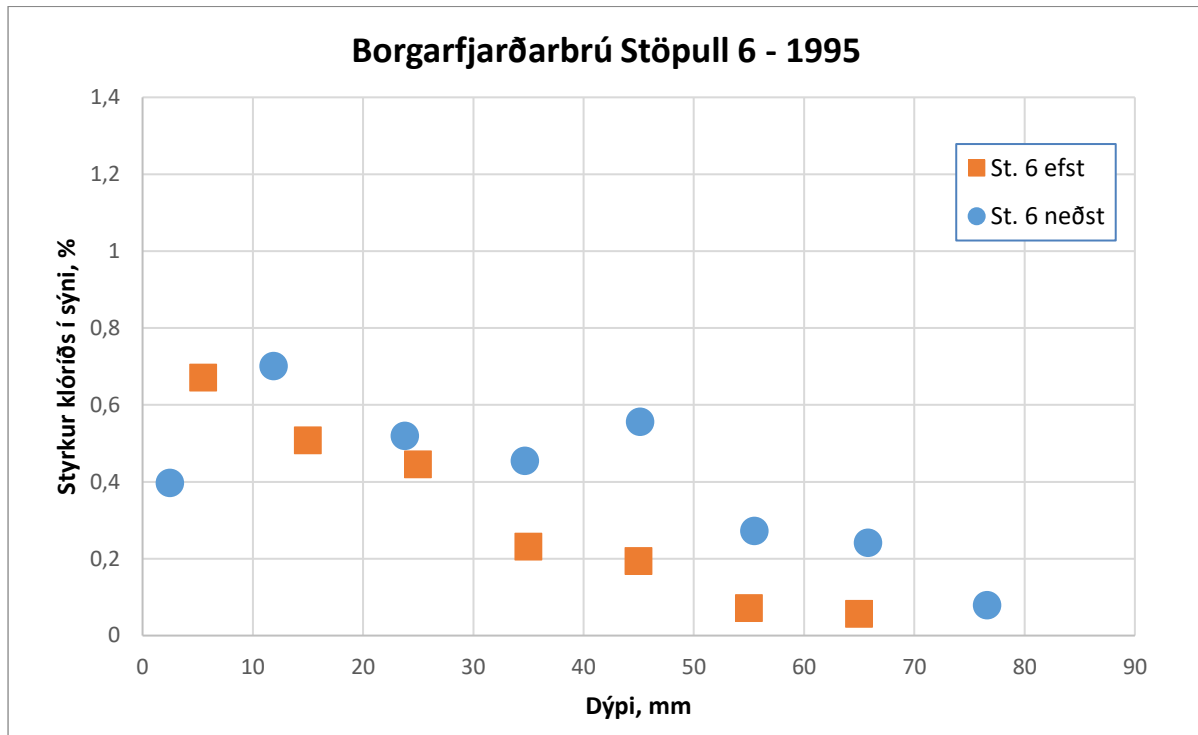
Eins og kemur fram í Tafla 3 þá er loftkerfið í sýnum úr öllum brúnum ekkert sérstakt. Loftmagnið er í lægri kantinum. Það er reyndar frekar lágt í öðru sýnanna úr Dýrafjarðarbrú, en um 3,0 til 4,4 % í öðrum sýnum. Fjarlægðarstuðullinn er í hærra lagi í öllum sýnunum og mjög hár í öðru Dýrafjarðarsýnanna. Það sama á við um einkennandi yfirborð loftloftbóla, það er í lægri kantinum fyrir öll sýnin og sérstaklega lágur fyrir annað Dýrafjarðarsýnið. Samkvæmt þessu ættu þessi sýnin að vera illa frostþolin.

Yfirborðs flögnun í Óseyrarbrú veldur því að aðeins erfiðara er að bera styrk klóríðs í steypusýnum úr Óseyrarbrú saman við styrk klóríðs í steypusýnum úr Dýrafjarðarbrú og/eða Kolgrafafjarðarbrú. Áhugavert við Óseyrarbrú er að í steypunni er Blöndusement. Blöndusement var s.k. blendi sement og innihélt 10 % kísilryk og 25 % líparít malað saman við sementsgjallið. Kísilryk og sennilega líparít í sementi draga úr leiðni klóríðs inn í steypu. Virkni þessara efna í samanburði við aðrar sements- tegundir er þó háð blönduhlutföllunum í steypunum sem bornar eru saman. Eins er klóríðleiðni inn í steypu háð styrk klóríðs í lausninni sem leggur til klóríð. Selta sjávar hér við land er yfirleitt á bilinu 33 til 35 g af uppleystum efnum í hverju kíló af sjó. Það er fremur lítil munur á seltu frá einum stað til annars hér við land, ef frá eru talin svæði við mynni stærstu ána (tekið af: <http://firdir.hafro.is/almennt-efni/sjor/>). Styrkur klóríðs í sjó er um 19000 mg/kg (19 g/kg). Brýrnar þrjár eru allar staðsettar í sjárvarumhverfi, en þó í mismunandi umhverfum. Kolgrafafjarðarbrú er staðsett við tiltölulega opið haf. Tiltölulega lítið ferskvatn rennur út í innfjörðinn fyrir aftan brúna. Því má búast við að styrkur klóríðs í umhverfinu við Kolgrafafjörð sé nokkuð jafn milli flóðs og fjöru og að klóríð styrkurinn sé tiltöluleg hár. Dýrafjarðarbrú er staðsett innarlega í þröngum firði, en er þó með innfjörð landmegin. Væntanlega er ferskvatns rennsli inn í innfjörðinn lítið. Styrkur klóríðs í umhverfi Dýrafjarðarbrúar ætti að vera svipaður milli flóðs og fjöru, en eitthvað lægri á fjöru og hærra á flóði. Sýni var ekki tekið af sjónum þannig að styrkur klóríðs í umhverfinu við brýrnar er ekki þekktur. Samkvæmt mælingum í Dýrafirði er seltan í innfirðinum um og yfir 34 g/kg.⁶ Svipaða sögu er að segja af Kografafirði þar sem seltan í innfirðinum er um 33 til 34 g/kg.⁷ Ekki er ljóst hver styrkur klóríðs í umhverfinu við Óseyrarbrú er. Brúin er fyrir opnu hafi annars vegar og Ölfusá hinum megin. Styrkur klóríðs við Borgarfjarðarbrú var ákvarðaður á sínum tíma. Á aðfalli þann 09.01.1995 kl. 11:10 reyndist klóríð styrkurinn vera um 9250 mg/kg og á útfallinu sama dag kl. 16:30 var styrkurinn orðinn 2460 mg/kg. Af þessu er ljóst að rennsli Hvítár hefur veruleg áhrif á styrk klóríðs í umhverfinu við Borgarfjarðarbrú. Rennslið í Ölfusá er u.þ.b. 3 til 4 sinnum meira en í Hvítá í Borgarfirði og því má búast við að styrkur klóríðs við Óseyrarbrú sé töluvert lægri en við Borgarfjarðarbrú. Styrkur klóríðs gæti verið um 2300 til 3000 mg/kg á aðfalli og um 615 til 820 mg/kg á útfalli í Óseyrarbrú. Í Borgarfjarðarbrú var yfirborðsgildi klóríðs áætlað um 0,85 % af steypuþunga í 18 ára gamalli steypu, Mynd 20. Leiðnistuðullinn í steypunni við efri fjörumörk var áætlaður um $9,33 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2/\text{sek}^8$.

⁶ Sólveig R Ólafsdóttir, Héðinn Valdimarsson, Andreas Macrander, Hafsteinn G Guðfinnson (2017) Burðarþol íslenskra fjarða. Hafrannsóknarstofnun, HV 2017-033.

⁷ Kolgrafarfjörður - Rannsókn á umhverfisaðstæðum og súrefnisbúskap við síldargöngur (2015). Vatnaskil – nr. 15.11.

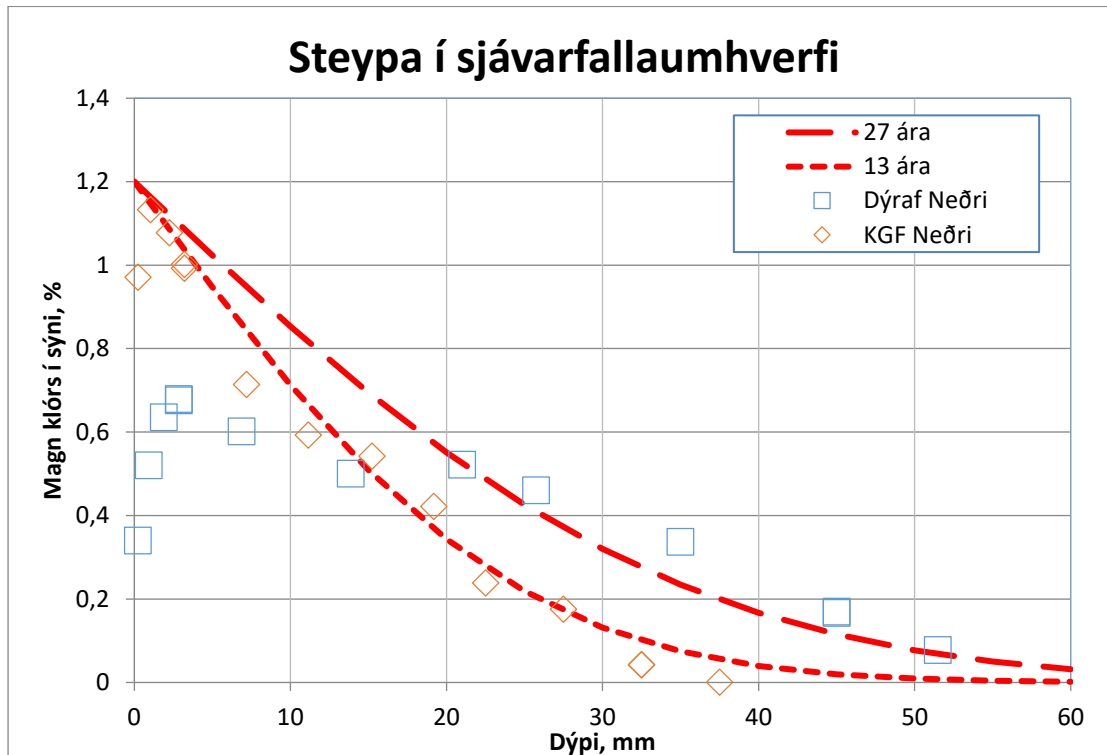
⁸ Gudmundsson, G., (1997) Deterioration of concrete bridge piers in Iceland. In: mechanisms of chemical degradation of cement-based systems. Eds.: K.L. Scrivener and J.F. Young. E & FN Spon, London, 201-208.



Mynd 20. Klóríðprófill í stöpli nr. 6 í Borgarfjarðarbrú. Appelsínugulu kassarnir sýna styrk klóríðs í steypu úr efri fjörumörkum og bláu hringirnir sýna styrk klóríðs í steypu úr neðri fjörumörkum. Rannsóknin var framkvæmd árið 1995 og mannvirknið var 18 ára gamalt.

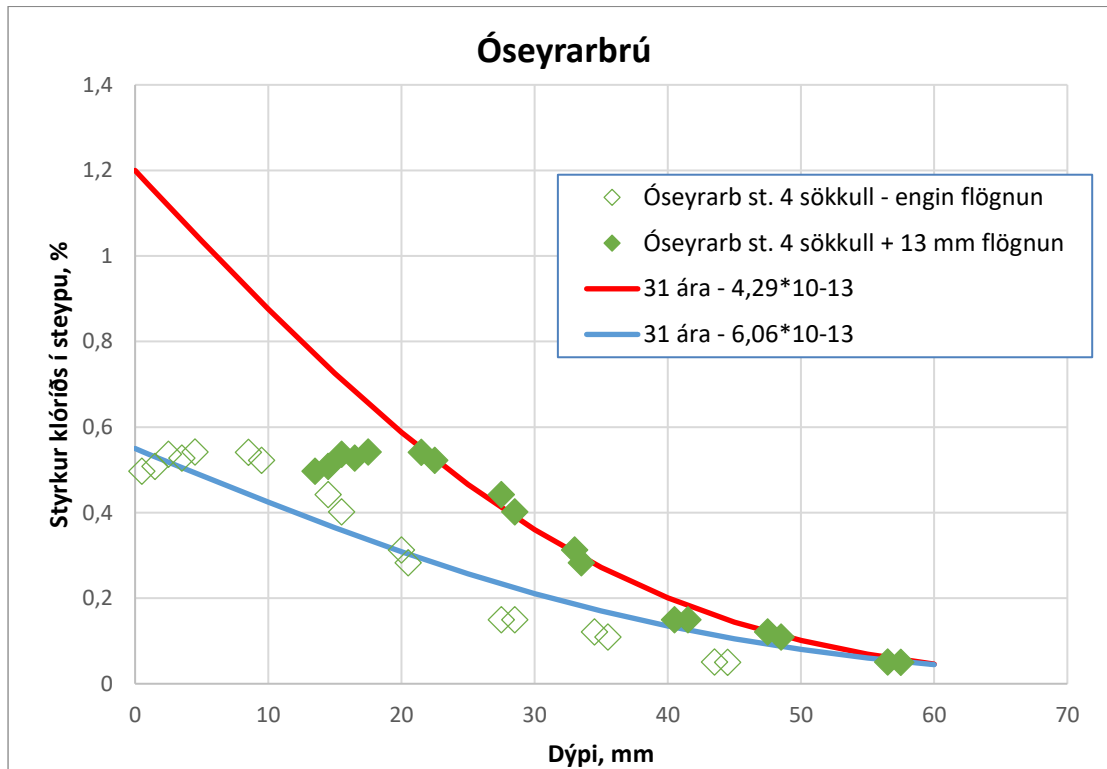
Yfirborðsgildi klóríðs í steypum úr Kolgrafarfirði og í Dýrafirði er annars vegar um 1,2 til 1,8 og hins vegar 0,8 til 1,3 % af steypubunga. Styrkur klóríðs hefur með tíma tilhneigingu til þess að aukast frá yfirborði og inn í steypu, ná hámarki á ákveðnu dýpi og minnka svo sem fall af dýpi. Ástæða fyrir þessu er ekki ljós. Þessi hegðun er greinileg í steypu úr Dýrafirði og úr Óseyrarbrú, sjá Mynd 18 og Mynd 19.

Leiðnistuðull fyrir klóríð var fundin fyrir steypuna í Kografafjarðarbrú með því að nota annað lögmál Ficks. Í útreikningunum var reiknað með að brúni væri 13 ára gömul og að yfirborðsgildi klórs í steypunni væri 1,2 %. Leiðnistuðullinn sem passar best við mælingarnar er $4,29 \cdot 10^{-13}$ m²/s. Niðurstöðurnar eru sýndar á Mynd 21. Sami stuðull var notaður til þess að ákvarða styrk klóríðs í 27 ára gamalli steypu, en tilgangurinn með því var að bera saman klóríðleiðni steypu í Kolgrafafjarðarbrú og Dýrafjarðarbrú. Eins og sjá á Mynd 21 er þokkalegt samræmi milli styrks klóríðs í Kolgrafafjarðarbrú og reiknaðs ferils. Gott samræmi milli fræðilegra gilda og mældra gilda bendir til þess að eiginleikar steypu úr Kolgrafarfirði og Dýrafirði benda til þess að steypurnar eru með svipaða eiginleika m.t.t. klóríðleiðni. Þess ber þó að geta að styrkur klóríðs í Dýrafjarðarbrú er ekki sérlega reglulegur, sérstaklega í efstu 20 mm. Segja má að styrkur klóríðs á dýptarbilinu frá yfirborði til 20 mm dýpis fylgi ekki öðru lögmáli Ficks, en fyrir neðan 20 mm sé fylgnin við annað lögmál Ficks nokkuð góð.



Mynd 21. Styrkur klóríðs í Dýrafjarðarbrú og Kolgrafafjarðarbrú og reiknaðir ferlar miðað við leiðnistuðul í Dýrafjarðarbrú fyrir 13 og 27 ára gamla steypu.

Ekki er fullljóst hvernig best er að finna leiðnistuðulinn fyrir steypuna í Óseyrarbrú. Fyrir það fyrsta þá er verulegur breytileiki í göngunum, sbr. Mynd 19. Einnig er ekki ljóst hvernig ber að höndla flögnunina sem hefur átt sér stað í neðri hluta stöplanna. Styrkur klóríðs er mestur í sökkulsteypunni og verður hún notuð til þess að finna leiðnistuðulinn. Í sökkulsteypunni er styrkur klóríðs frá yfirborði niður á um 15 mm dýpi nokkurn veginn fasti um 0,5 til 0,55 % af steypuþunga. Frá 15 mm niður á um 45 mm dýpi er styrknum greinilega stjórnað af leiðniferli. Ástæða fyrir því að styrkur klóríðs er u.þ.b. fasti niður á um 15 mm dýpi (miðað við enga flögnun) er ekki ljós, eins og komið hefur fram. Í gömlum mannvirkjum er algengt að sjá óreglu í styrk klóríðs í og við yfirborð. Það hefur verið túlkað þannig að klóríð geti skolast út úr yfirborði steypu. Hins vegar er það eðli leiðni sem stjórnast af öðru lögmáli Ficks að með tíma lækkar yfirborðsgildið, leiðniferlarnir verða flatari og klóríð gengur lengra inn í steypuna. Vandamálið við þetta er að þróun yfirborðsstyrks klóríðs sem fall af tíma er ekki þekkt fyrir þessar steypur. Ef leiðstuðull og yfirborðsgildi fyrir Kolgrafafjarðarsteypuna er notað fyrir Óseyrarbrú, þá passar leiðniferillinn fyrir neðri hluta steypunnar miðað við að 13 mm hafi flagnað af yfirborði steypunnar, sjá Mynd 22. Hins vegar er það mat höfundar að 1,2 % klóríð sem yfirborðsgildi sé óraunverulega hátt fyrir 31 ára mannvirki. Eðlilega er að álíta að yfirborðsgildið sé verulega lægri og að steypan sé settuð m.t.t. styrks klóríðs í þessu umhverfi niður á a.m.k. 15 mm. Leiðréttu þarf dýpið með því að bæta við þykktinni af flagnaða efninu. Þar fyrir neðan er leiðni klóríðs mögulega stjórnað af öðru lögmáli Ficks. Ef gert er ráð fyrir að yfirborðsgildi fyrir klóríð sé um 0,55 % af steypuþunga og að engin flögnun hafi átt sér stað þá er leiðnistuðullinn um $6,06 \cdot 10^{-13}$ m²/s, sjá Mynd 22. Reiknaði ferillinn passar ekkert sérstaklega vel við gögnin. Ljóst er að leiðnistuðlar fyrir aðra steypuhluta í Óseyrarbrú, s.b.r. Mynd 19 eru töluvert lægri. Segja má að steypan í Óseyrarbrú sé með töluvert lægri (betri) leiðnistuðull en steypurnar í Kolgrafarfirði og Dýrafirði.



Mynd 22. Styrkur klóríðs í Óseyrarbrú við neðri fjörumörk, sökkulsteypa. Opnu tíglarnir sýna klóríðleiðni eins og hún er í dag, en fylltu tíglarnir sýna klóríðleiðni miðað við að 13 mm yfirborðs flögnun. Rauði ferillinn sýnir reiknaða klóríðleiðni með leiðnistuðli og yfirborðsgildi úr Dýrafjarðarbrú. Blái ferillinn sýnir reiknaðan feril fyrir klóríðleiðni með 0,55 % klóríð og leiðnistuðull sem var fundinn út frá gögnum.

Tæringahætta bendistál

Vanalega er miðað við að sé styrkur klóríðs í steypu við bendistál meiri en 0,1 % af steypuþunga, hafi tæringahætta skapast í viðkomandi mannvirki. Í Tafla 4 er búið að reikna út það dýpi þar sem styrkur klóríð er 0,1 % af steypuþunga fyrir mannvirkin fjögur. Yfirborðsgildi og leiðnistuðlar sem voru notaðir eru gefnir upp í töflunni. Steypuhulan í Borgarfjarðarbrú var um 50 mm. Ef steypuhulan er um 50 mm þá hefur tæringahætta u.þ.b. verið að skapast í stöplasteypunum. Tæringahætta hefur ekki skapast í öðrum brún. Þess ber þó að geta að flögnun í Óseyrarbrú veldur því að tæringahætta hefur skapast í stöpulsteypunni. Búast má við að tæringarhætta skapist í Kolgrafafjarðarbrú eftir 18 ár og í Dýrafjarðarbrú eftir 4 ár.

Tafla 4. Yfirborðsstyrkur klóríðs, leiðnistuðull, steypuhula, dýpi þar sem styrkur klóríðs er 0,1 % og hvenær tæringahætta skapast.

	Yfirborðsgildi (Cs), % af steypuþunga	Leiðnistuðull, m ² /s	Steypuhula, mm	Dýpi við tæringarhættumörk (0,1 %), mm	Time to corrosion, ár
Borgarfjarðarbrú – 18 ára	0,85	$9,33 \cdot 10^{-13}$	50	51	0
Kolgrafafjörður – 13 ára	1,2	$4,29 \cdot 10^{-13}$	≥50	33	18
Dýrafjörður – 27 ára	1,2	$4,29 \cdot 10^{-13}$	≥50	47	4
Óseyrarbrú – 31 árs (án flögnunar)	0,55	$<6,06 \cdot 10^{-13}$ *	≥50	46	

*hæsta gildi fyrir leiðnistuðul.

Steypuskemmdir í Óseyrarbrú er mjög svipaðar og komu fram í Borgarfjarðarbrú og að einhverju leiti einnig í Kolgrafafirði. Skemmdirnar eiga sér stað í svæðinu sem liggur við neðri fjörumörk. Niðurbrotsferlið á sér stað á tiltölulega þunnu svæði í yfirborði sementsefjunnar, þ.e. skemmdirnar ná ekki langt inn í steypuna. Fylliefni taka ekki þátt í skemmdaferlinu. Svæðið verður fyrir efnaskiptum við sjó, kalsíum gengur úr steypunni og magnesíum (og klóríð) gengur inn í steypuna. Samfara þessu myndast sprungur samsíða yfirborði steypunnar. Sprungumyndunin nær aðeins innar í steypuna en efnaskiptin. Ekki er flulljóst hvað veldur sprungumynduninni, en alltént velur hún því að steypan flagnar og flögnunin vinnur sig smám saman inn í steypuna. Í þessu sambandi er áhugavert að sprungumyndun samsíða yfirborði steypu hefur myndast í Kolgrafafirði sem og efnaskipti milli sjávar og steypu hafa átt sér stað. Hins vegar er engin flögnun í Kolgrafafirði, en sjá má áhugaverðar steindir í yfirborðssprungum, sbr. Mynd 39. Nauðsynlegt er að finna út með efnagreiningum hvað steind hefur myndast í sprungunum. Líklegt má teljast að steindin sé valdur að sprungumynduninni. Ekki er ólíklegt að sambærileg steind hafi myndast í bæði Borgarfjarðarbrú og í Óseyrarbrú.

Í Borgarfjarðarbrú var flögnunin talin vera allt að 30 til 40 mm árið 1994, eða allt að 2,5 mm/ár. Í Óseyrarbrú er flögnunin minni, árið 1994 var flögnunin talin vera um 5 mm eða um 0,63 mm/ár og allt að 30 mm árið 2017 eða allt að 0,97 mm/ár.

Engar skemmdir er að sjá í Dýrafjarðarbrú. Það er áhugavert þar sem sementsgerðin í Dýrafjarðarbrú og Kolgrafafirði er sú sama og væntanlega eru umhverfis aðstæður mjög svipaðar. Sements magnið í steypunni í Kolgrafafirði er þó um 50 kg/m³ meira en í Dýrafirði.

6. Samantekt

Klóríðleiðni í Kolgrafafirði og Dýrafirði er svipuð að því leitinu til að leiðnistuðlar fyrir steypurnar eru svipaðir, reyndar fyrir mismunandi yfirborðsgildi. Yfirborðsgildi klóríðs í steypu minnkar með aldri. Það að leiðnistuðlarnir séu svipaðir ætti ekki að koma á óvart þar sem steypurnar eru svipað hannaðar og gerðar með sömu sementstegundinni. Auk þess sem ytri aðstæður þessara tveggja mannvirkja eru svipaðar. Það kemur því nokkuð á óvart að frumstig yfirborðsskemmda eins og í Óseyrarbrú er komið fram í Kolgrafafirði, en ekki í Dýrafirði. Þess er þó ekki að vænta að skemmdir í Kolgrafafirði verði sambærilegar við skemmdir í Borgarfjarðarbrú og Óseyrarbrú.

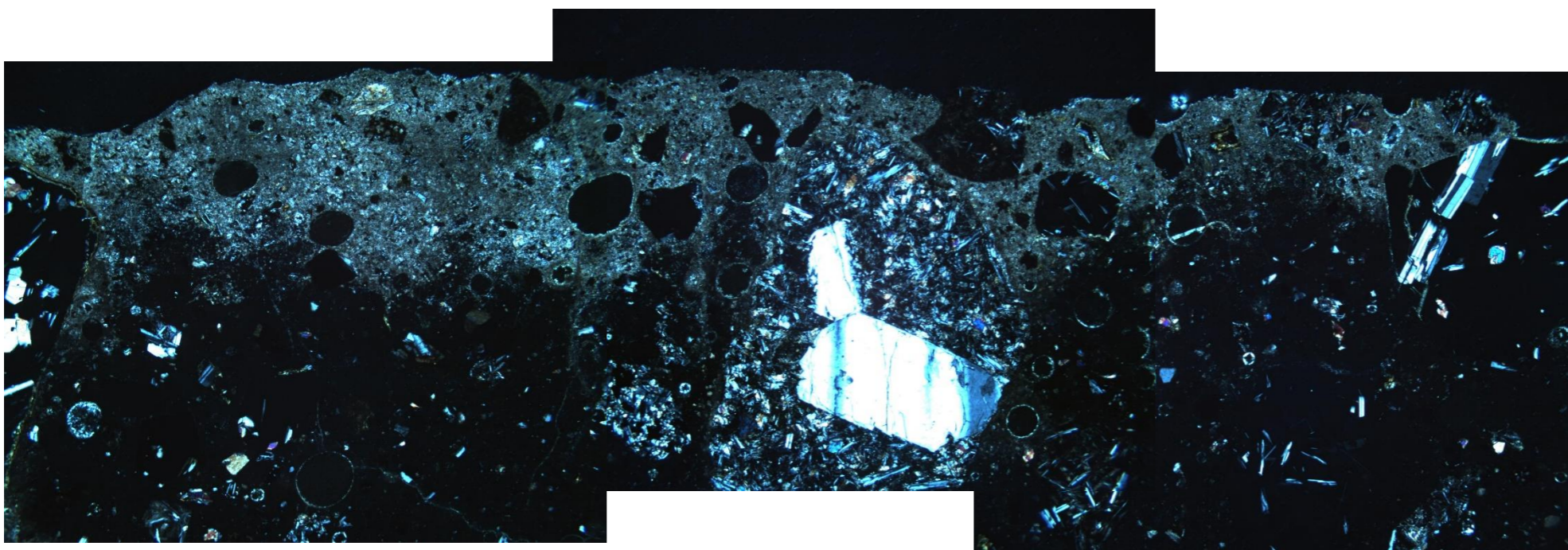
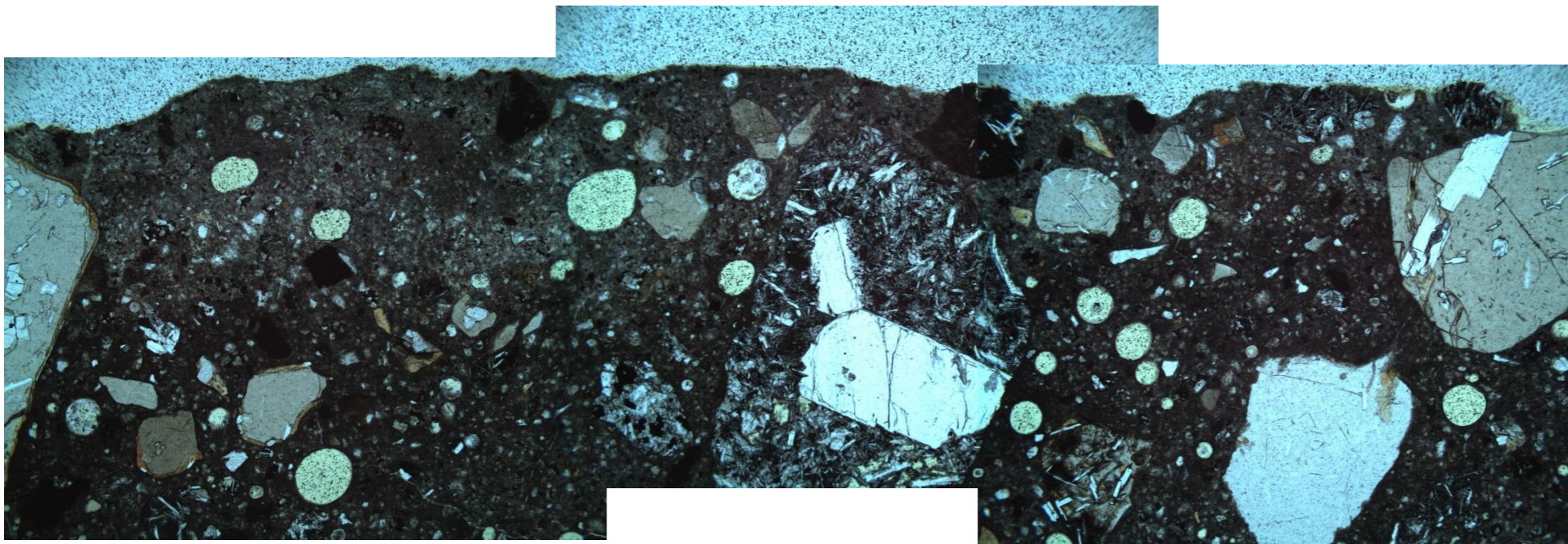
Skemmdir í Óseyrarbrú er að öllu leyti sambærilegar við skemmdir í Borgarfjarðarbrú. Framgangur skemmdanna er þó töluvert hægari í Óseyrarbrú en í Borgarfjarðarbrú.

Búast má við að tæringahætta bendistáls hafi þegar skapast í Óseyrarbrú. Tæringahætta bendistáls er farin að nálgast hættumörk í Dýrafjarðarbrú. Í Kolgrafafirði skapast ekki hætta fyrr en eftir 18 ár. Þótt tæringahætta hafi skapast í mannvirki, líður óákveðinn tími þangað til að tæring bendistáls verði veruleg.

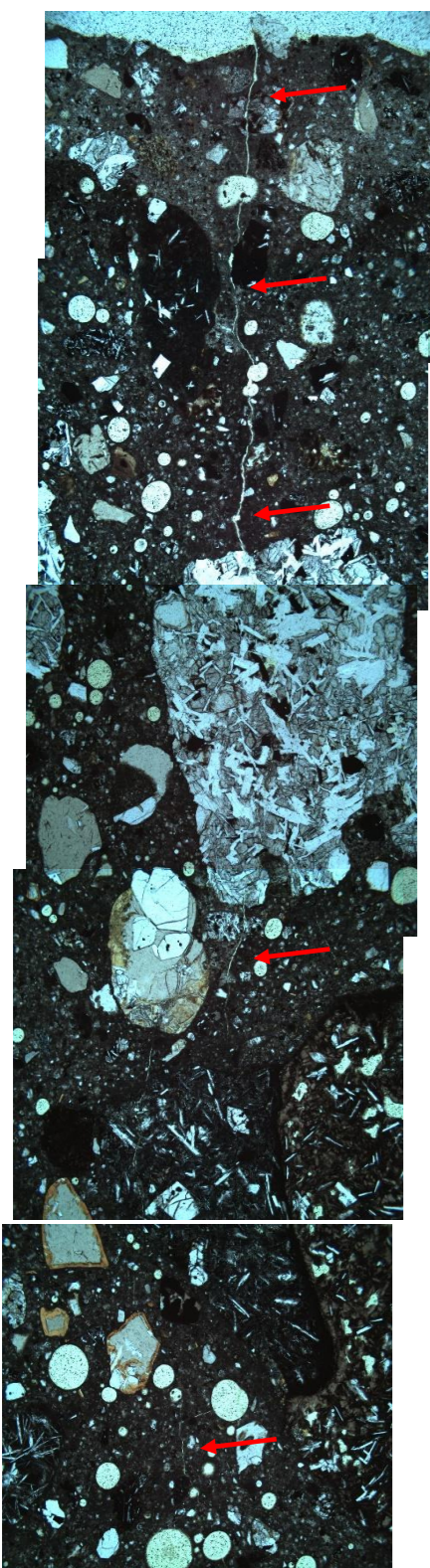
Markmið verkefnisins var að það lægi fyrir skýr gögn um hvort sú steypugerð, sem Vegagerðin hefur notað undanfarin ár henti í sjávarfallaumhverfi eða hvort þróa þurfi nýjar blöndur. Nú eru steypurnar í þessum fjórum mannvirkum svipaðar, en hafa þróað með tíma eins og búast má við. Þróunin byggir aðalega á auknu sementsmagni pr. m³. Borgarfjarðarbrú var steypst með íslensku hraðsementi, með engu kísilryki. Óseyrarbrú var steypst með Blöndusementi sem er með 10 % kísilryk og 25 % fín malað líparít. Síðan voru Dýrafjarðarbrú og Kolgrafafjarðarbrú steypst með íslensku sementi með 7,5 % kísilryki. Fylliefni sem notuð voru í steypurnar voru í öllum tilvikum fengin á staðnum og eru því mismunandi í hverri steypu. Þar sem fylliefni eru ekki talin hafa áhrif á framgang skemmdanna eru gæði þeirra og gerð ekki tíunduð hér. Yfirborðsflögnun á sér stað í steypum í Borgarfjarðarbrú og Óseyrarbrú, en ekki í steypum í Dýrafjarðarbrú og að mjög takmörkuðu leiti í Kolgrafafjarðarbrú. Þar sem síðustu tvær brýrnar eru með u.þ.b. eins steypugerð verður að telja að sú steypugerð sem Vegagerðin hefur verið að nota hentar ágætlega í sjávarfallaumhverfi. Þess ber þó að geta að loftkerfið í sýnum úr öllum brúnum er ekki nógu gott og ætti ekki að vernda steypuna gegn frost/þíðu-niðurbroti.

Í þessu sambandi er nauðsynlegt að efnagreina sýni úr Kolgrafafirði til þess að finna út hvaða steind finnst í yfirborðsprungum. Með því væri hægt að skilja niðurbrotsferlið til hlítar.

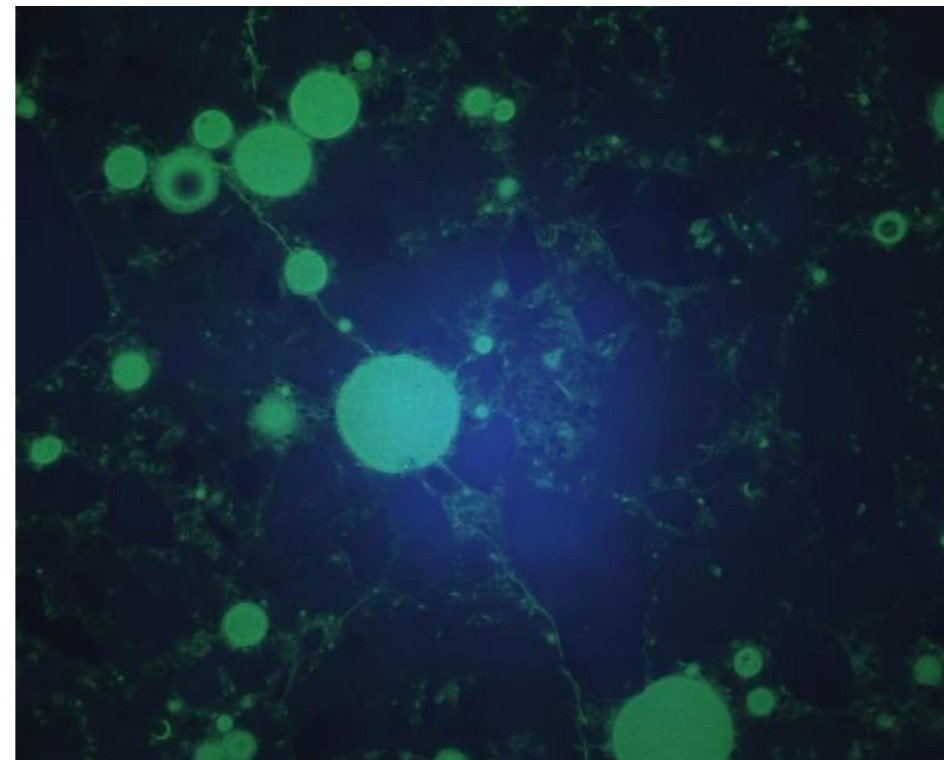
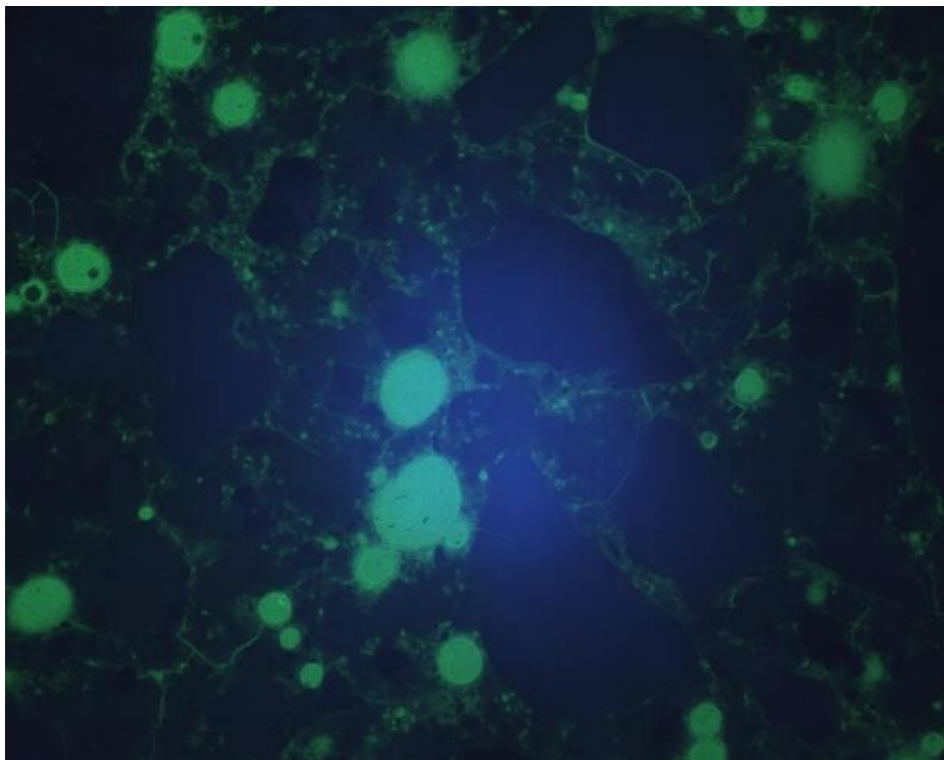
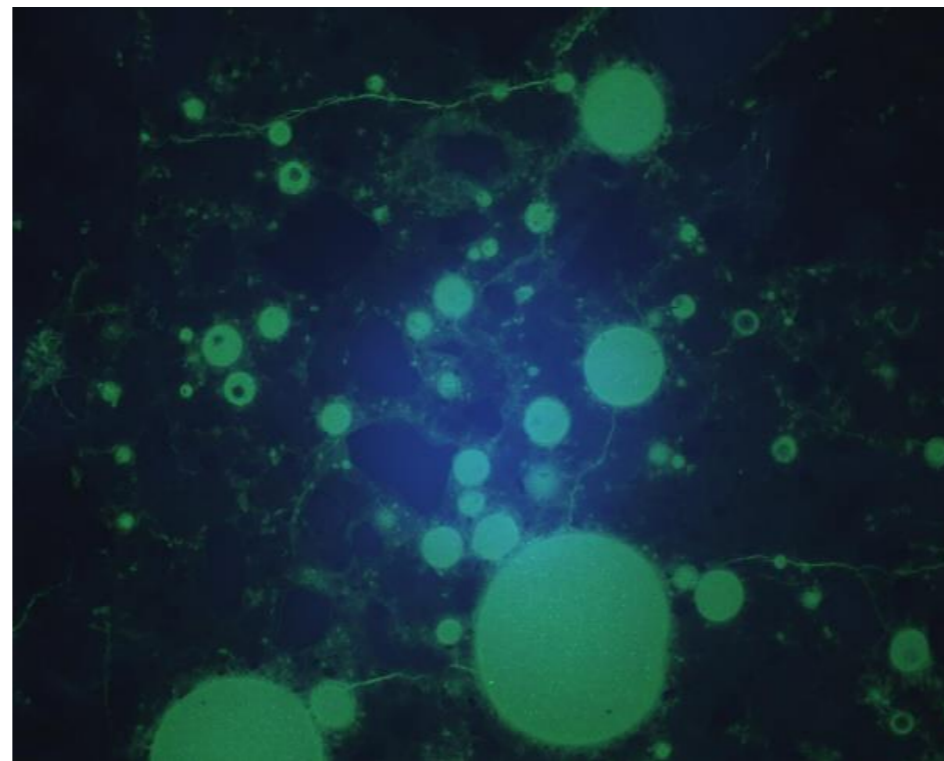
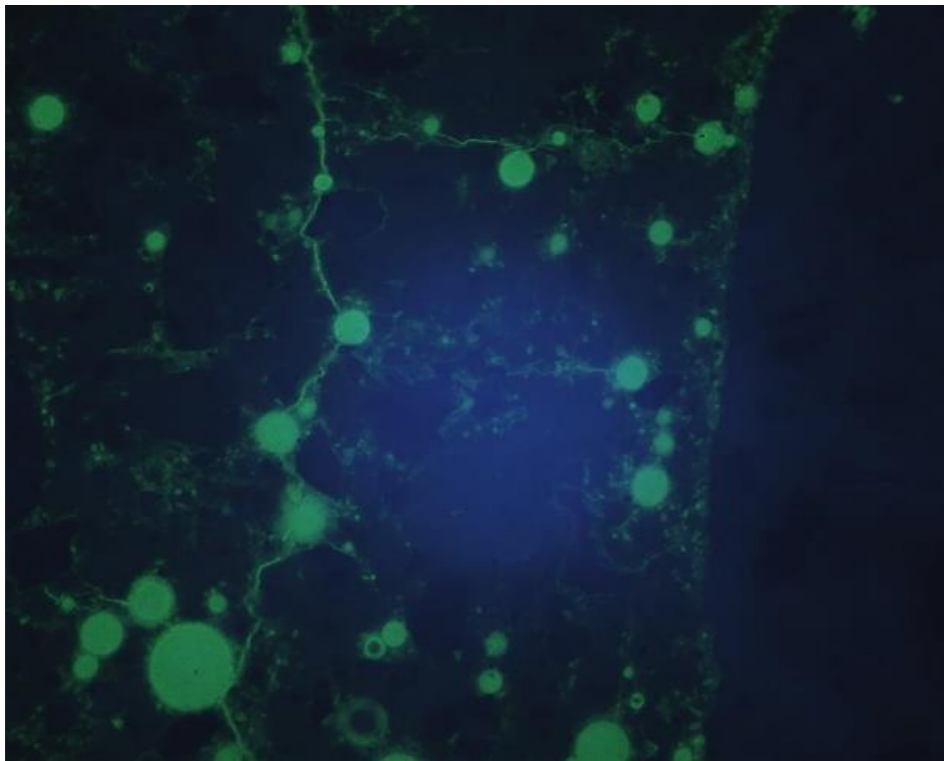
Í þessu sambandi er áhugaverð að í vettvangsskoðun á kápusteypu í Borgarfjarðarbrú mátti sjá töluverðar yfirborðsskemmdir í mismunandi kápusteypum, eftir tiltölulega stuttan tíma. Fróðlegt er að skoða hvaða niðurbrot eigi sér stað í þessum steypum. Einnig er áhugavert að frostþol þessara steypa reyndist ágætt. Ekki er hægt að mæla með þessum nýju steypugerðum sem notaðar voru í Borgarfjarðarbrú án þess að skilja eðli niðurbrotsins sem hefur átt sér stað.



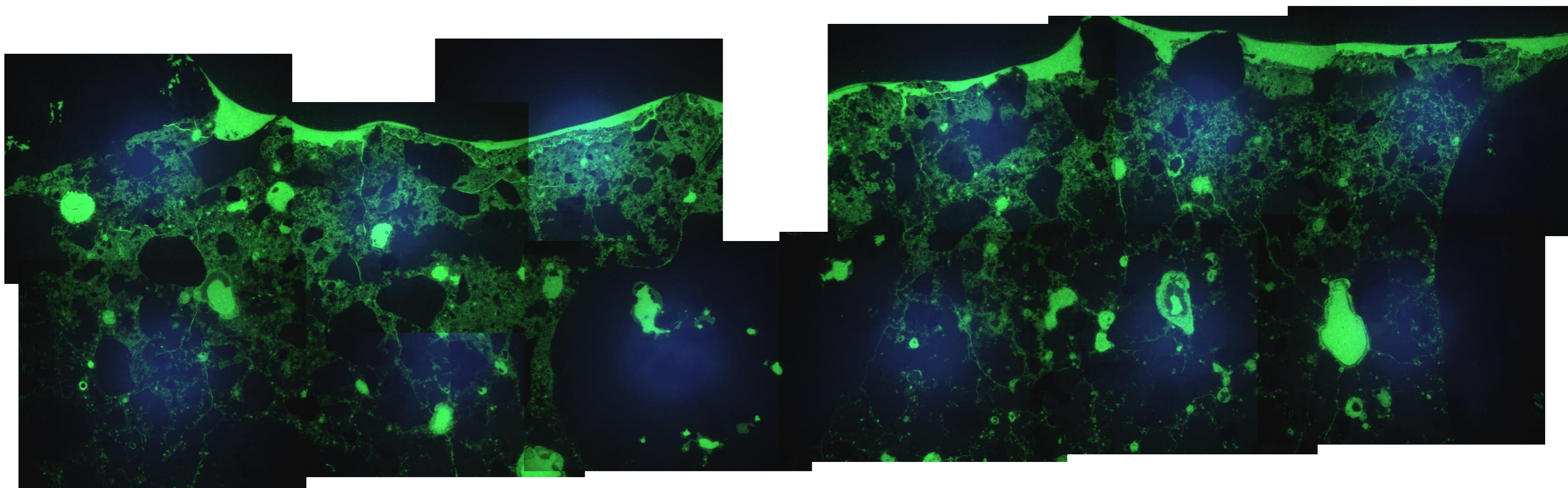
Mynd 23. Samsett mynd af yfirborð steypu í efra fjöruborði stöpsuls 5 í Óseyrarbrú. Efri myndaramminn sýnir steypuna í einskautuðu ljósi. Engin flögnun hefur átt sér stað og engar útfellingar er að sjá í holrýmum. Neðri myndaramminn sýnir sama svæðið í tvískautuðu ljósi. Í tvískautuðu ljósi má t.d. sjá hvort steypan sé kolsýrð. Yfirborð steypunnar er aðeins kolsýrt, kolsýringin nær u.þ.b. 0,5 mm inn í steypuna. Sérhver myndarammi er 1,97 x 2,66 mm að stærð.



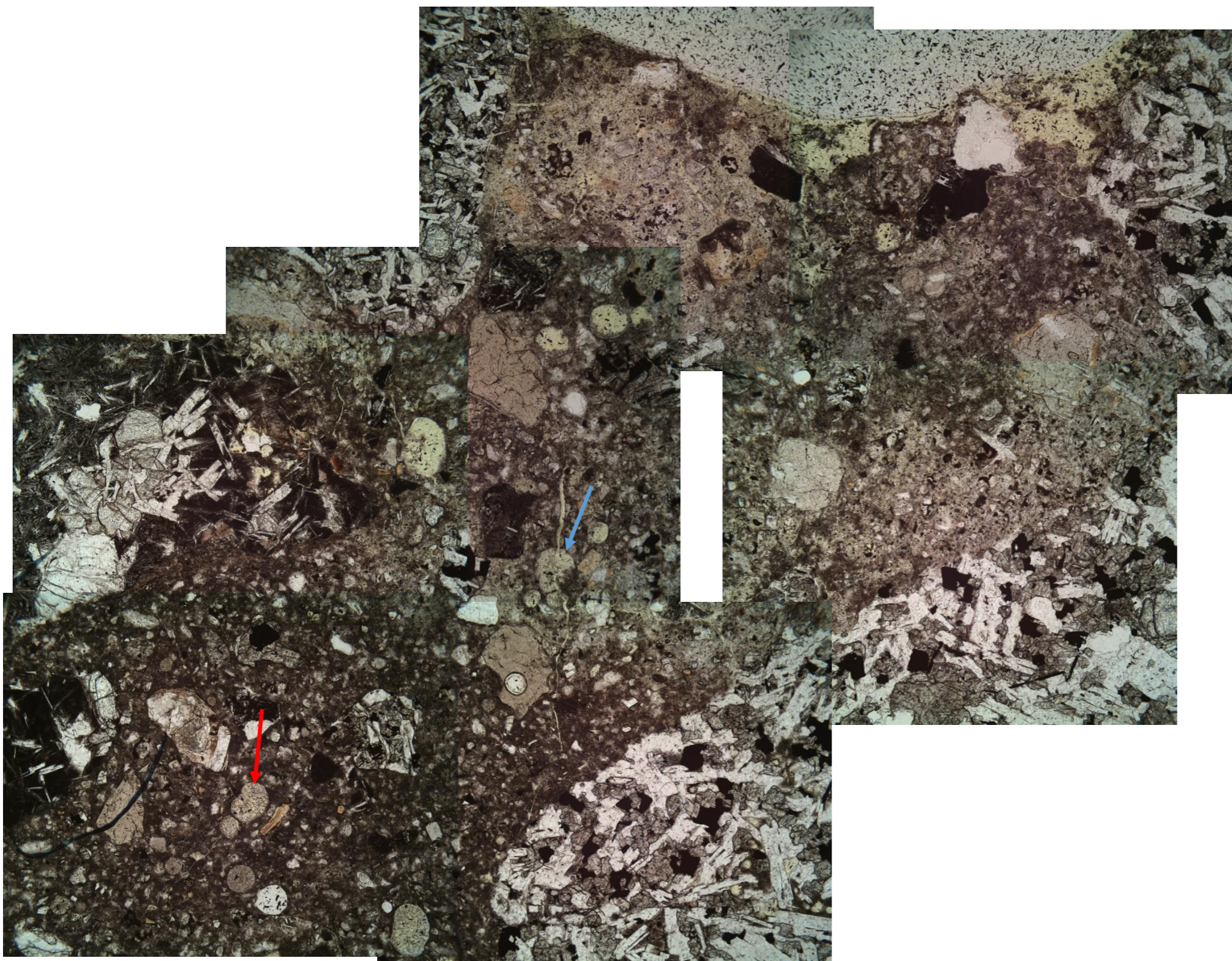
Mynd 24. Samsett mynd af yfirborð steypu í efra fjöruborði stöps 5 í Óseyrarbrú. Á myndinni má sjá yfirborðssprungu sem gengur a.m.k. 10 mm ofan í sýnið. Örvanar vísa á sprunguna. Sprungan sker bæði loftbólur og smærri fylliefnakorn. Ekki er að sjá útfellingar í sprungunni. Sprungan er um 0,05 mm gleið í yfirborði. Sérhver myndarammi er 1,97 x 2,66 mm að stærð.



Mynd 25. Samsett mynd af yfirborð steypu í efra fjöruborði stöpsuls 5 í Óseyrarbrú. Flúrljómun sementsefju. Flúrljómunin dregur fram einsleitni sementsefjunnar sem og loftdreifingu. Sérhver myndarammi er 1,97 x 2,66 mm að stærð.



Mynd 26. Samsett mynd af yfirborð steypu í neðra fjöruborði stöpsuls 5 í Óseyrarbrú. Yfirborðið er upp á myndinni. Myndarammarnir eru teknar í flúrljómun. Flúrljómunin dregur fram hluta sementsefjunnar sem hefur orðið fyrir útskolun af völdum sjávar. Útskolunin nær um 2-3 mm inn í steypuna. Um 20 mm hafa flagnað af steypunni. Sjá má bæði sprungur sem liggja samsíða og hornrétt á yfirborðsteypunnar. Engar útfellingar eru að finna í sprungum. Sérhver myndarammi er 1,97 x 2,66 mm að stærð.



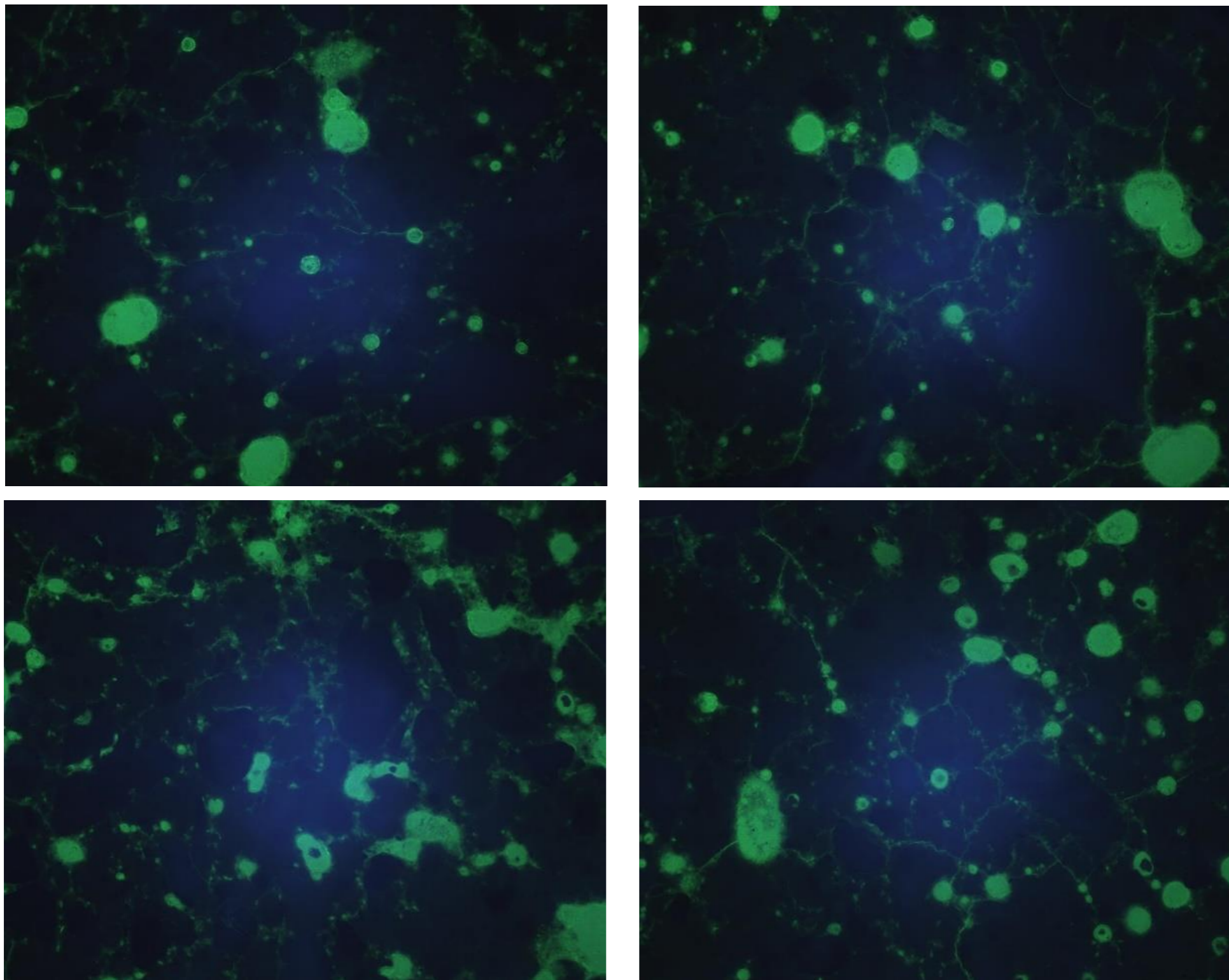
Mynd 27. Samsett mynd af yfirborð steypu í neðra fjöruborði stöpsuls 5 í Óseyrarbrú. Útskolun í sementsefju nær um 2 mm inn í steypunni. Engar útfellingar er að finna í sprungum sem liggja hornétt frá yfirborði, en nárlaga útfellingar í holrými (lofþólum) er algengar. Rauðu og bláu örvarnar benda á svæði sem eru sýnd í meiri stækkun á næstu myndum. Sérhver myndarammi er 0,985 x 1,33 mm að stærð.



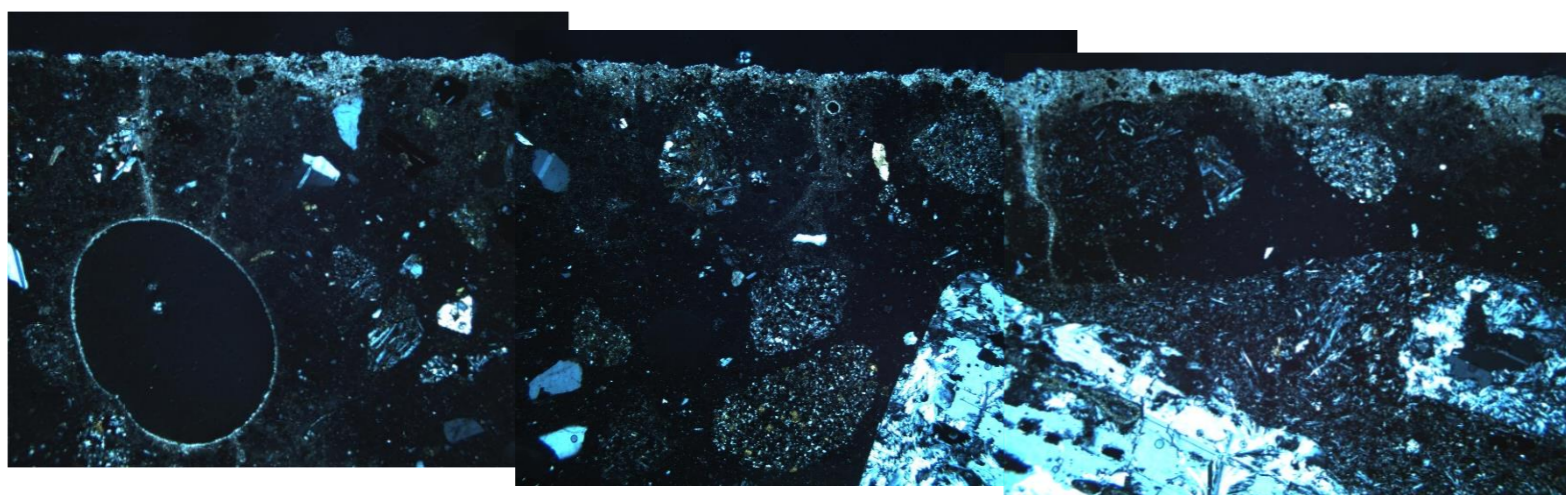
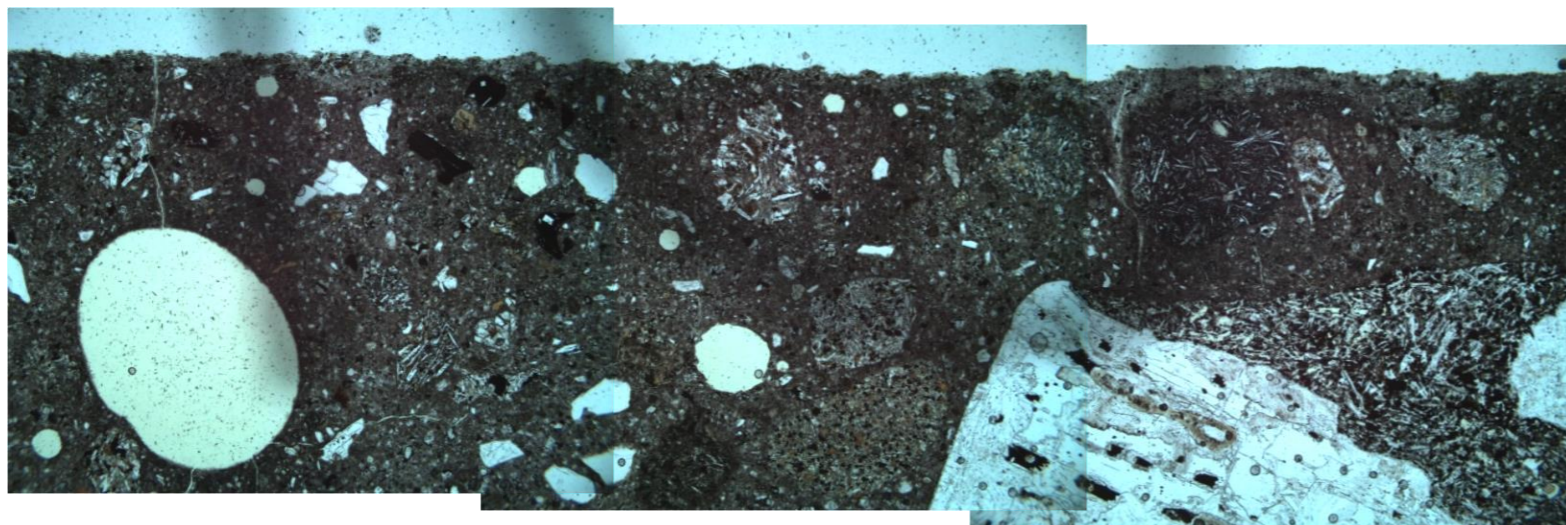
Mynd 28. Yfirborð steypu í neðra fjöruborði stöpsuls 5 í Óseyrarbrú. Útfellingar í loftbólum við yfirborð. Rauða örin bendir á útfellingar í holrými. Myndin er 0,49 x 0,67 mm að stærð.



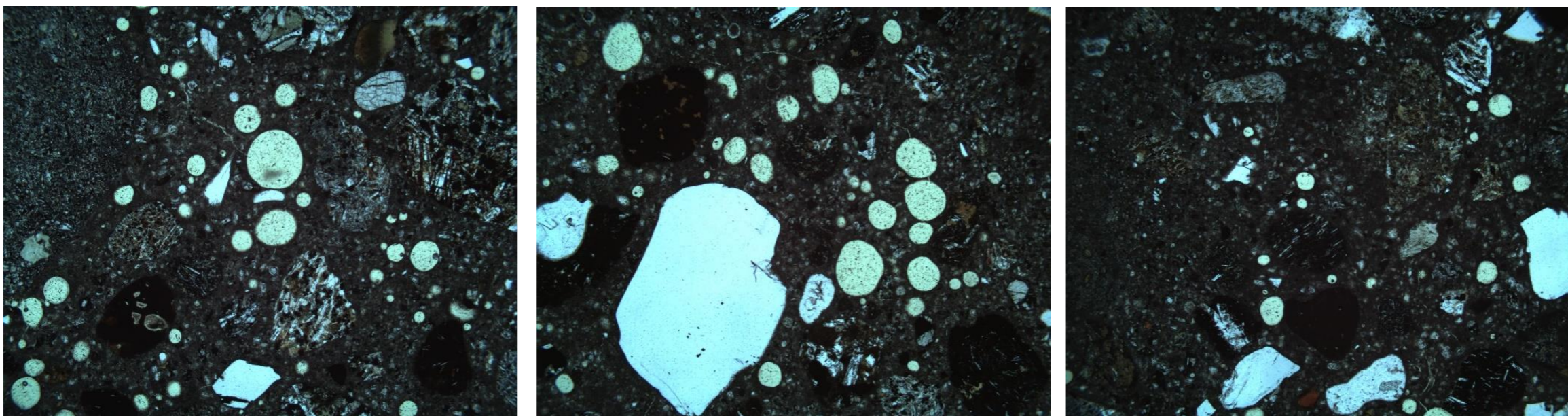
Mynd 29. Yfirborð steypu í neðri fjöruborði stöpsuls 5 í Óseyrarbrú. Útfellingar í loftbólum við yfirborð, sprunga sker loftbóluna, sjá bláu örina. Myndin er 0,49 x 0,67 mm að stærð.



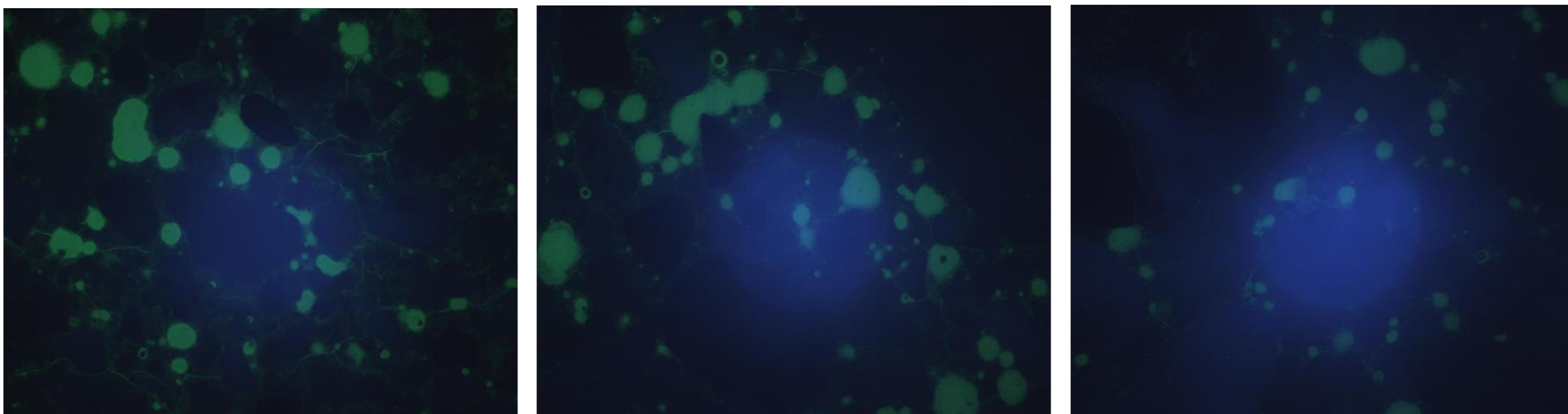
Mynd 30. Við yfirborð steypu í neðri fjöruborði stöpsuls 5 í Óseyrarbrú. Flúrljómun sementsefju. Flúrljómunin dregur fram einleitni sementsefjunnar sem og loftbólur annað holrými. Sérhver myndarammi er 1,97 x 2,66 mm að stærð.



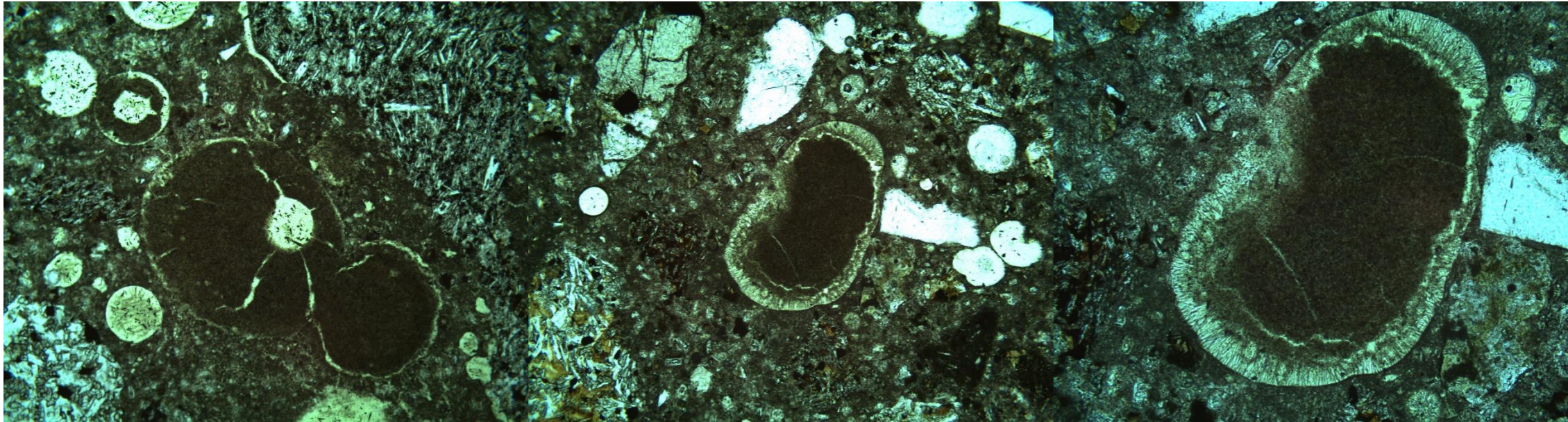
Mynd 31. Samsett mynd af yfirborð steypu úr efri fjöruborði millistöpsuls I í Dýrafjarðarbrú. Efri myndaramminn sýnir steypuna í einskautuðu ljósi. Engin flögnun hefur átt sér stað og engar útfellingar er að sjá í holrýmum. Neðri myndaramminn sýnir sama svæðið í tvískautuðu ljósi. Í tvískautuðu ljósi má t.d. sjá hvort steypa sé kolsýrð. Yfirborð steypunnar er aðeins kolsýrt, kolsýringin nær u.þ.b. 0,2 mm inn í steypuna. Sérhver myndarammi er 1,97 x 2,66 mm að stærð. 50x stækkun.



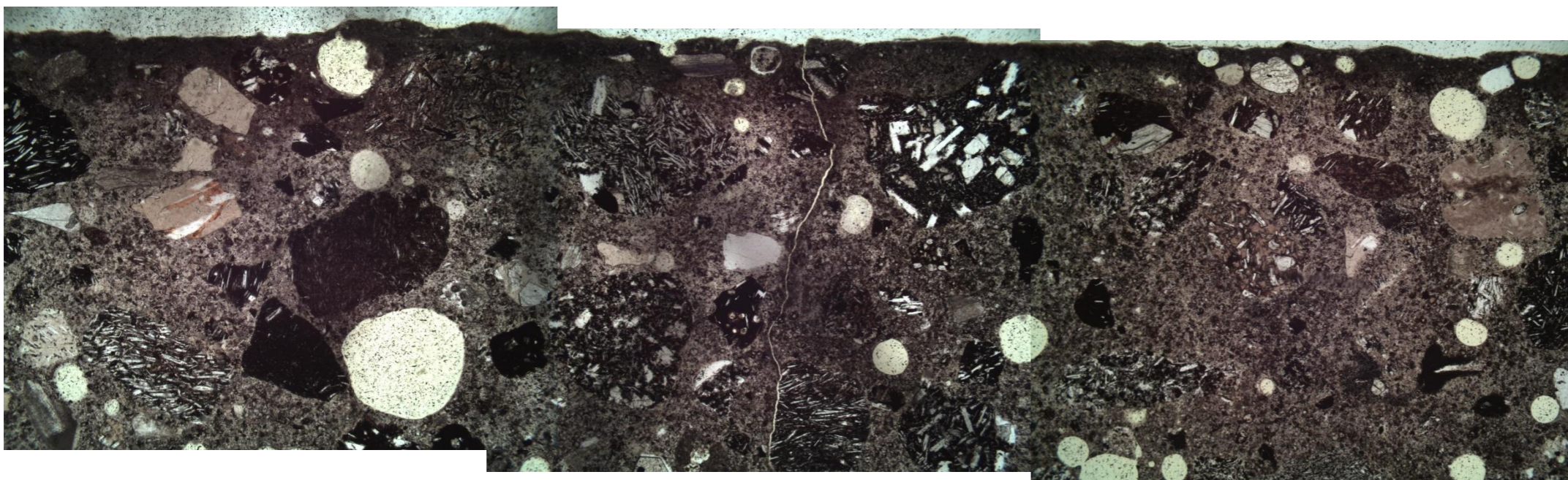
Mynd 32. Loftbólur og annað holrými í steypu úr efri fjöruborði millistöpsuls I í Dýrafjarðarbrú. Sérhver myndarammi er 1,97 x 2,66 mm að stærð.



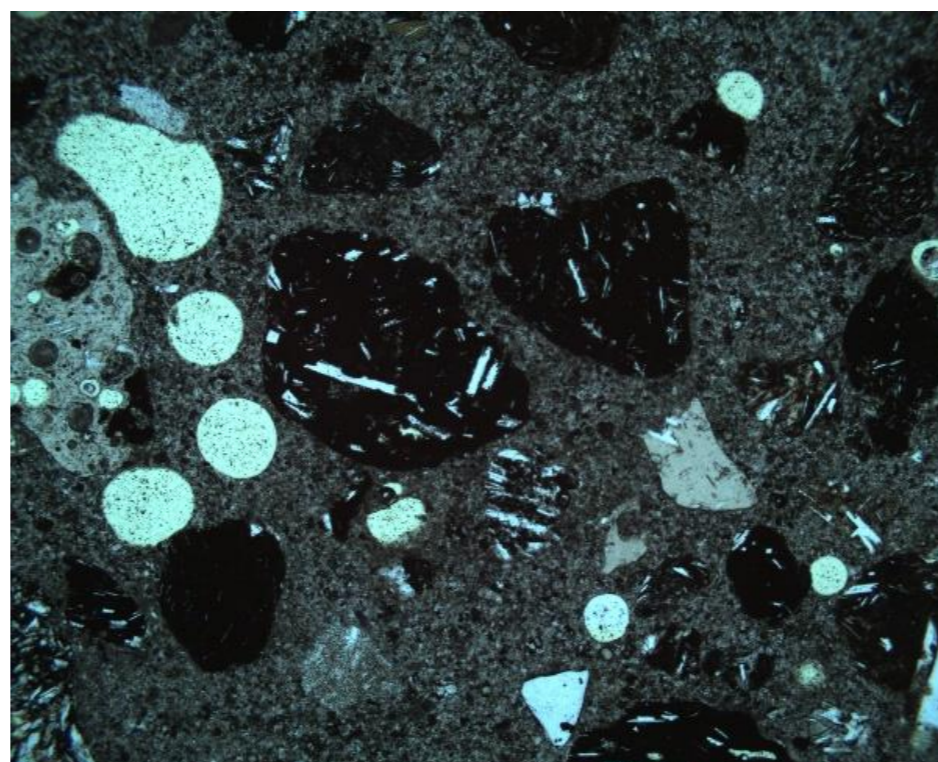
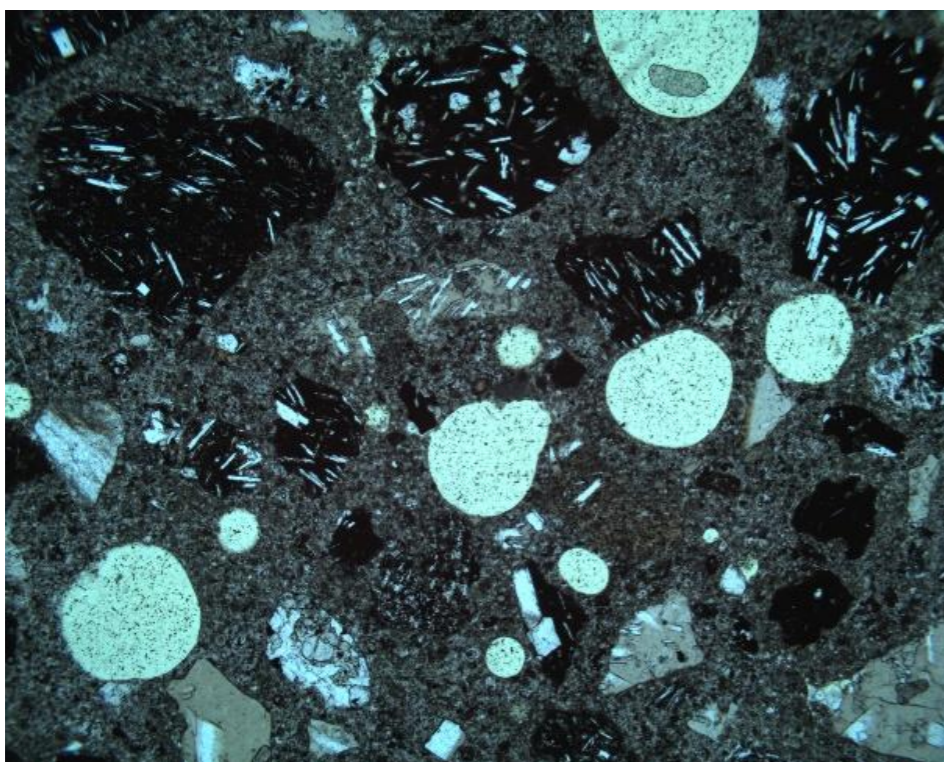
Mynd 33. Flúrljómun sementsefju úr efra fjöruborði millistöpsuls I í Dýrafjarðarbrú . Flúrljómunin dregur fram einsleitni sementsefjunnar sem og loftbólur og dreifingu þeirra. Sérhver myndarammi er 1,97 x 2,66 mm að stærð.



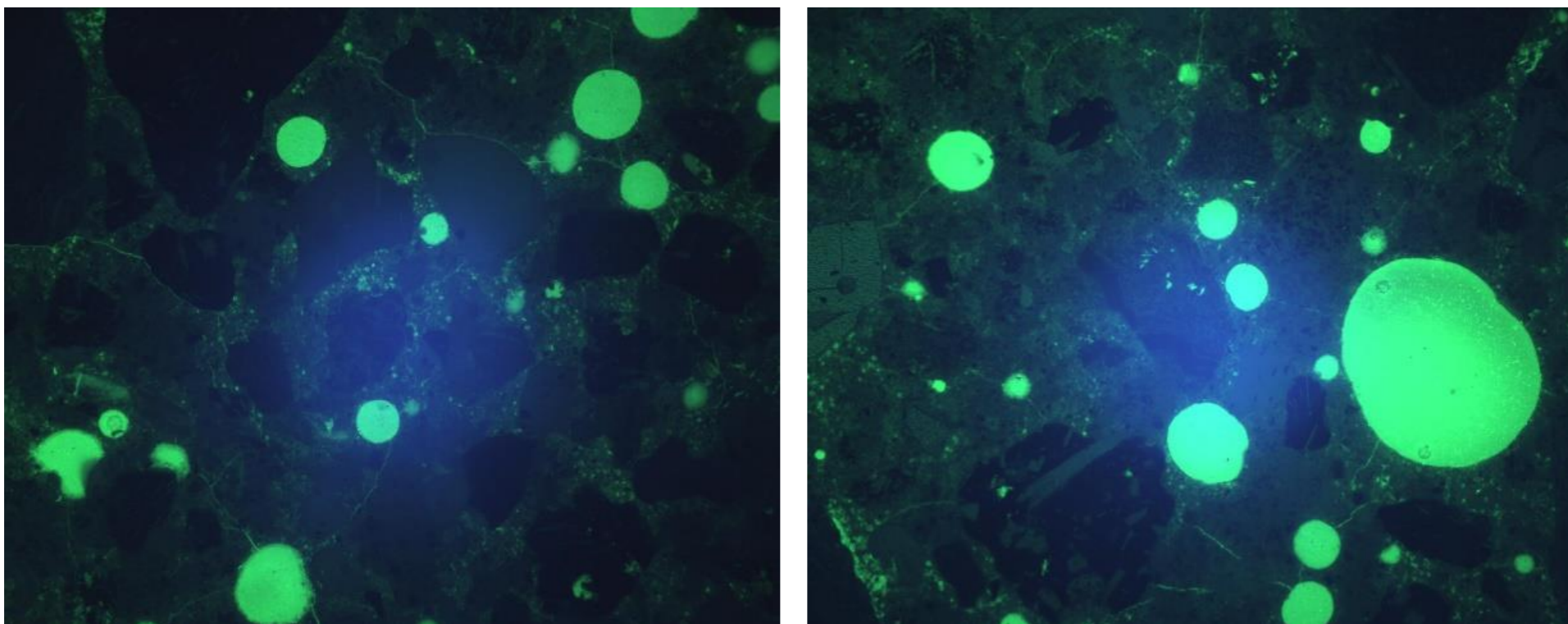
Mynd 34. Útfellingar í holrými í loftbólum úr efra fjöruborði millistöpuls I í Dýrafjarðarbrú, innri hluti sýnis. Rammarnir til vinstri og í miðju eru 0,98 x 1,34 mm að stærð hvor og ramminn til hægri er 0,49 x 0,67 mm að stærð. Ramminn lengst til vinstri sýnir útfellinguna í mið rammanum í meiri stækkun. Kristallaðar útfellingar hafa myndast á yfirborði steypunnar.



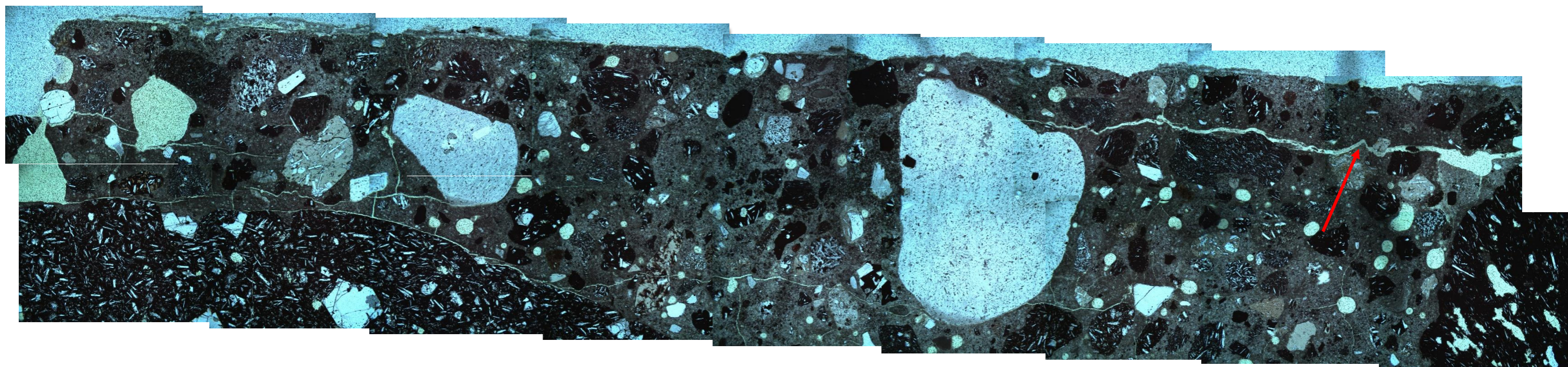
Mynd 35. Samsett mynd af yfirborð steypu úr efri fjöruborði stöpuls í Kolgrafafirði. Sjá má a.m.k. ein sprungu sem liggur hornrétt á yfirborðsteypunna og gengur a.m.k. 2 mm inn í steypuna. Engin flögnun hefur átt sér stað og engar útfellingar er að sjá í holrýmum. Yfirborð steypunnar er aðeins kolsýrt, kolsýringin nær u.þ.b. 0,2 mm inn í steypuna. Sérhver myndarammi er 1,97 x 2,66 mm að stærð.



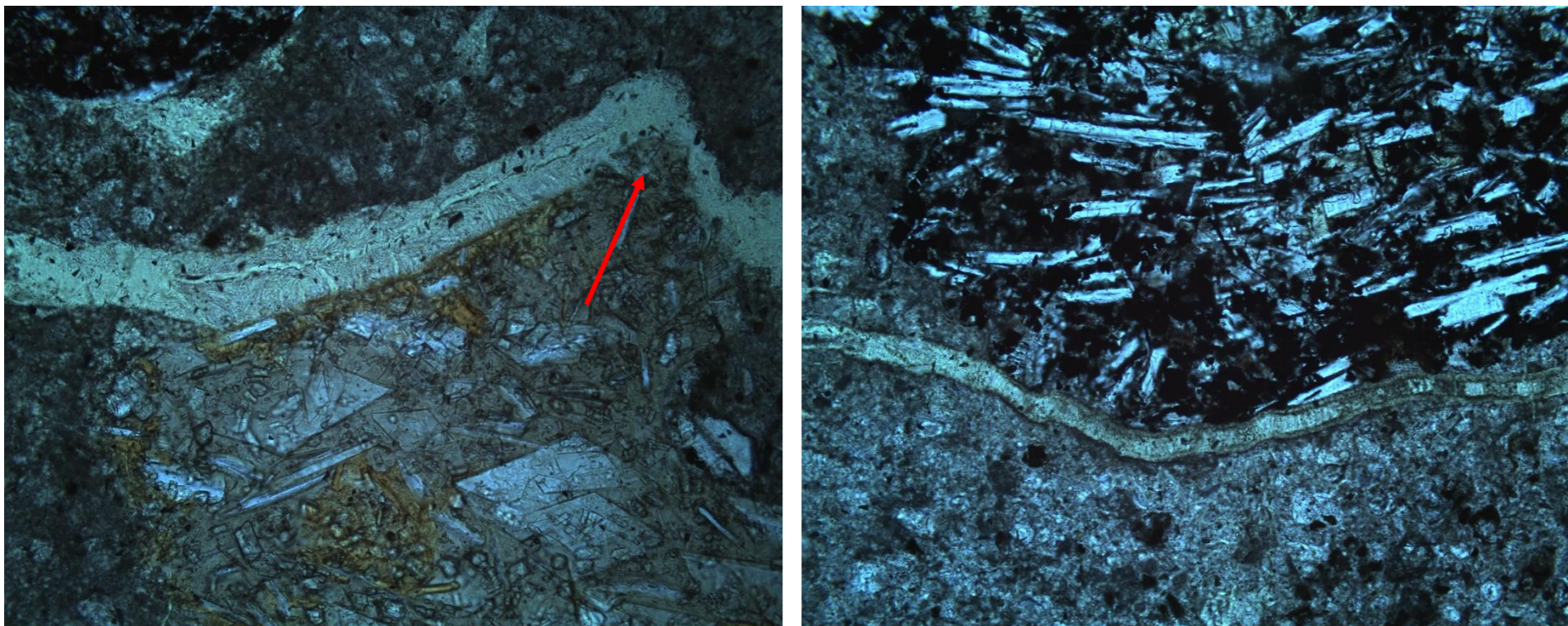
Mynd 36. Lofbólur og annað holrými í steypu úr efri fjöruborði stöpuls í Kolgrafafirði. Sérhver myndarammi er 1,97 x 2,66 mm að stærð.



Mynd 37. Flúrljómun sementsefju úr efra fjöruborði stöpsuls í Kolgrafafjarðarbrú. Flúrljómunin dregur fram einleitni sementsefjunnar sem og loftbólur og dreifingu þeirra. Sérhver myndarammi er 1,97 x 2,66 mm að stærð.



Mynd 38. Samsett mynd af yfirborð steypu úr neðra fjöruborði stöpsuls í Kolgrafafirði. Rauða örinn vísar á sama stað og örin á undan. Sérhver myndarammi er 1,97 x 2,66 mm að stærð.



Mynd 39. Útfellingar í yfirborðssprungu í steypu úr neðri fjöruborði í Kolgrafafjarðarbrú. Örin vísar á sama stað og örin á myndinni á undan. Báðar myndin eru 0,49 x 0,67 mm að stærð.

:

var

Viðauki A**Stöplar Borgarfjarðarbrúar skoðaðir 2017.10.09**

Í vettvangsferð:

Aron Bjarnason, Ingunn Loftsdóttir, Sigurður H. Sigurðsson, Gylfi Sigurðsson auk tveggja manna frá Slysavarnarfélaginu í Borgarnesi, sem útveguðu bát og sigldu honum.

Almennt

Leitast var við að skoða stöplana, þegar fjaran væri lág eða 0,21 m í Borgarnesi skv. flóðatöflu Faxaflóhafna.

Fram kom hjá SHS að í framkvæmdinni hefðu menn verið að prófa sig áfram með steypublöndur framan af. Í ljósi þess að ástand stöplanna er aðeins breytilegt var talið fróðlegt að setja fram upplýsingar um steypublöndur í hverjum stöpli hér á eftir, brotstyrk, frostþol, hvenær var steyppt o.fl., sem eru fengnar úr [Rannsóknarskýrslu Einars Hafliðasonar, Ending steypu í sjávarumhverfi](#).

Steypan ofan við stöplukápan var í mörgum tilvikum farin að láta á sjá, flögnun og jafnvel brotið úr, þannig að járn sáust. Þetta skýrist væntanlega á myndunum, sem fylgja hverjum stöpli.

Segja má að steypan hafi litið hvað best út neðst, þ.e. sú steypa sem lengst er í sjó, en einnig sá almennt minna á vestur hliðar stöplanna heldur en þeirri eystri.

Stöpull 1:

Stöplukápan var steyppt 21. ágúst 2003.

Steypublandan:

Magn í blöndu	m ³	1,0
Perla frá Harðakambi (max 16 mm)	kg	350
Fínmöl frá Harðakambi	kg	1465 (1410)
Sement: Aalborg Portland	kg	500 (498)
Kísilryk frá Járnblendiverksmiðjunni	kg	35
Vatn	kg	90 (143)
Flotefni: Glenium 51	l	6
Stáltreifar: Dramix 05/30 mm	kg	12
Fibertrefjar: Strux (frá Grace) 90x40 og 85x50	kg	1,4

Hér var um sjálfútleggjandi steypu að ræða og v/s ~ 0,29.

:

var

Brotstyrkur [MPa] Sýni: 10 x 20 sm sívalningar

	28 daga	90 daga
	111	132

Loft og loftdreifing: Steypan er hönnuð sem loftlaus. Loft ekki mælt. Sjá athugasemd við stöpul 10, 2002.

Frostþol samkvæmt SS 13 72 44 með 3% NaCl. Flögnun [kg/m²]

Sýni	28 umferðir	56 umferðir	112 umferðir
1	0,007	0,018	0,074
2	0,002	0,002	0,03



Mynd 1.1

:

var



Mynd 1.2

Hreiðrið í [Mynd 1](#) til hægri myndast vegna kögglamyndunar trefjanna. Ástandið á stöplinum mjög gott.

Stöpull 2

Stöpulkápan stept 25. maí 2010.

Steypublandan:

:

var

Upplýsingar vantar

Steyptir 13 m³, steypa var mjög góð, enginn aðskilnaður og allt gekk vel.

Brotstyrkur [MPa] Sýni: 10 x 20 sm sívalningar:

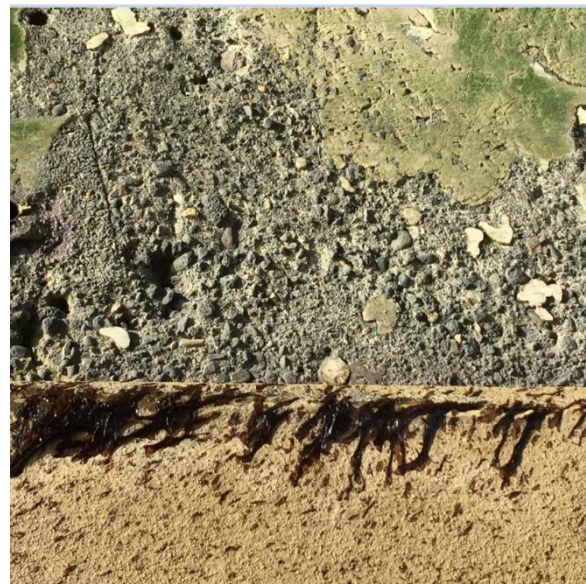
	28 daga	90 daga
	111	123

Loft og loftdreifing: Ekki mælt

Frostþol samkvæmt SS 13 72 44 með 3% NaCl. Flögnun [kg/m²]

Sýni	28 umferðir	56 umferðir
	0,00	0,00

Steypa, blöndun og niðurlögn gekk mjög vel.



Mynd 2.1

Þegar hér var komið sögu var eingöngu notuð sjálfútleggjandi steypa og $v/s \leq 0,3$.

Ekkert slit er komið fram enda stutt síðan stöplukápan var steyp til þess að gera.

Ástandið á stöplinum mjög gott.

:

var

Stöpull 3

Stöpkápan steipt 28. júlí 2004.

Steypublandan:

Magn í blöndu	m ³	1,0
Perla frá Harðakambi (11- 16 mm)	kg	600
Fínmöl frá Harðakambi (0-8 mm)	kg	1000
Rörsandur frá Loftorku	kg	200
Sement: Aalborg mísilryki	kg	500
Vatn	kg	Vantar upplýsingar
Flotefni: Glenium	l	15-16
Stáltrefjar: Dramix 05/30 mm (frá Ístak)	kg	15
Fibertrefjar: Strux (frá Grace) 90x40	kg	2

Upplýsingar liggja ekki fyrir um steypustyrk eða frostþol.

Hér hefur verið um sjálfútleggjandi steypu að ræða því Glenium flotefni var notað.



Mynd 3.1

Stöpkápan er í góðu lagi eins og [Mynd 3.1](#) ber með sér.

Stöpull 4

Stöpkápan steipt 14. júlí 1998.

Steypublandan:

:

var

Magn í blöndu		Samkv. skýrslu 99-4
	m ³	1,0
Finsandur frá Björgun	kg	117
Grófsandur frá Björgun	kg	613
Perla 11 – 16 frá Seljadal	kg	577
Perla 8 – 11 frá Seljadal	kg	433
Sement: Portland	kg	349
Slagg: Merit 5000	kg	172
Vatn	l	175
Þjálnefni ADWA-flow	l	4,4
Loftblend: SS-Air	l	0,197
Stáltrefjar: Dramix 05/30 mm	kg	40

Steypan er ekki sjálfútleggjandi og hún á að vera með lofti, en loftið reyndist frekar lágt. $V/s \sim 0,34$ ef slaggið er talið með sementinu.

Tafla 5-4. Þrýstipól (28 daga) sívalninga sem teknir voru úr steypubíl á brúnni, litlir sívalningar, MPa.

sýni (fjöldi)	Þrýstipól (frávik)	Rúmpyngd, [kg/m ³]
Bíll 1 (1)	65,7	2555
Bíll 3 (3)	70,3 (8)	2596 (18)
Bíll 4 (4)	54,2 (4)	2531 (13)

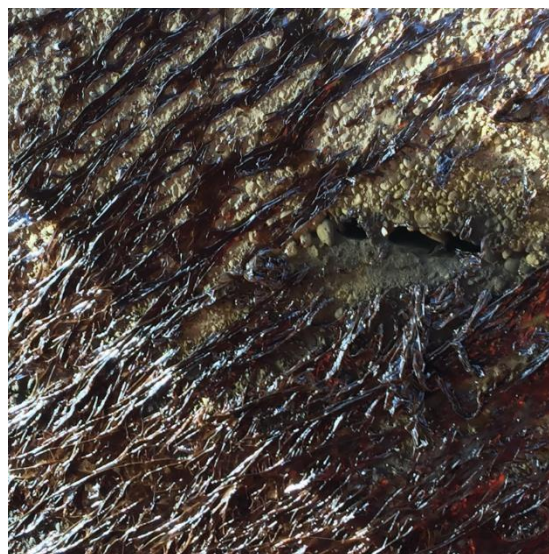
Tafla 5-7. Niðurstöður úr sænska veðrunarþolsprófinu (SS 13 72 44), með 3 % NaCl.

Sýni úr steypu sem steyppt var utan á stöpul 4, tekið úr steypubíl. Sýnin hörðnuðu við 98 % Rh og 20 °C í 28 daga.

Niðurbrotið er uppgæfið sem kg/m², meðaltals gildi tveggja mælinga. Loftblendin steinsteypusýni.

Sýni	Flatarmál, [cm ²]	Loft, hörðnuð steypa [%]	7 umferðir	14 umferðir	28 umferðir (0,5)	42 umferðir	56 umferðir (1,0)
Bíll 1	176,6	1,3	0,07	0,15	0,27	0,38	0,48
Bíll 2	176,6	2,5	0,05	0,13	0,24	0,34	0,44
Bíll 3	176,6	2,5	0,05	0,11	0,23	0,31	0,41
Bíll 4	176,6	2,9	0,05	0,11	0,27	0,39	0,50
Bíll 5	176,6	3,6	0,05	0,08	0,19	0,28	0,37

Flögnunin er alls staðar undir 0,5 kg/m² sem verður að teljast viðunandi árangur, þótt búist væri við að flögnunin yrði minni.



:

var

Mynd 4.1



Mynd 4.2

Í ljósi þess að loftkerfið var ekkert sérstakt kemur ekki á óvart að fylliefni sýni sig aðeins á [Mynd 4.1](#). Líklega valda trefjakögglar hreiðrinu til hægri á [Mynd 4.1](#). [Mynd 4.2](#) skýrir sig sjálf, en stykkið hefur flagnað burt eftir að stöplukápan var steipt. Þetta er greinilega svæði sem sjórinn skvettist upp á og spurningin er hvort hér sé sama skemmdarverkun í gangi og var neðar á stöplunum.

Stöplukápan er í góðu lagi, en ljóst að sementsefja hefur skolast úr yfirborðinu.

Stöpull 5:

Stöpkápan var steyp 28. júlí 2009.

Steypublandan:

Magn í blöndu	m ³	1,0
Perla frá Harðakambi (11- 16 mm)	kg	595
Fínmöl frá Harðakambi (0-8 mm)	kg	1155
Sement: Aalborg mísilryki	kg	585
Vatn	kg	157
Flotefni:	l	4,39
Loftblendi:	l	0,06
Stáltrefjar: Dramix 05/30 mm	kg	15,6
Plasttrefjar: Strux (frá Grace) 85x50	kg	2,8

Steyptir 13 m³, steypa var mjög góð, enginn aðskilnaður og allt gekk vel.

Sálfútleggjandi steypa, v/s ~ 0,27.

Brotstyrkur [MPa] Sýni: 10 x 20 sm sívalningar: Samkvæmt upplýsingum NMÍ 17.5.2016

	2 dagar	28 daga	90 daga
	65,3	117,6	126,0

Loft og loftdreifing: Ekki mælt

Frostþol samkvæmt SS 13 72 44 með 3% NaCl. Flögnun [kg/m²] Samkvæmt upplýsingum úr tölvu Björns Hjartarsonar 17.5.2016.

Sýni	? umferðir
Bill 1	0,02
Bill 2	0,02



Mynd 5.1



Mynd 5.2

Í [Mynd 5.1](#) til vinstri er hreiður líklega af völdum trefjaköggla. Vegna þess hve stutt er síðan að stöpkápan var steipt kemur á óvart hversu sýnileg fylliefnin eru í myndinni til hægri í [Mynd 5.1](#).

Steypa hefur brotnað út úr horni í [Mynd 5.2](#) með sama hætti og í [Mynd 4.2](#). Í báðum tilvikum er um skvettusvæði að ræða.

Stöpull 6:

Stöpkápan var steipt 14. október 2004.

Steypublandan:

Magn í blöndu	m³	1,0
Perla frá Harðakambi (11- 16 mm)	kg	215
Fínmöl frá Harðakambi (0-8 mm)	kg	1600
Rörsandur frá Loftorku	kg	200
Sement: Aalborg mísilryki	kg	500
Vatn	kg	Vantar upplýsingar
Flotefni: Glenium	l	15
Stáلتrefjar: Dramix 05/30 mm (frá Ístak)	kg	10
Fibertrefjar: Strux (frá Grace) 90x40	kg	2,3

Hér er um sjálfútleggjandi steypu að ræða og v/s þá líklega undir 0,3.

Brotstyrkur [MPa] Sýni: 10 x 20 sm sívalningar:

	28 daga	90 daga
	105	121

Frostþol samkvæmt SS 13 72 44 með 3% NaCl. Flögnun [kg/m²]

Sýni	28 umferðir	56 umferðir
	0,00	0,01



Mynd 6.1

Ekki er annað að sjá en að stöpulkápan sé í góðu lagi, en þarna eru hreiður, sem má skýra með kögglamyndun trefja.

Stöpull 7:

Stöpkápan var steypd 19. júlí 2005.

Steypublandan:

Magn í blöndu	m ³	1,0
Perla frá Harðakambi (11- 16 mm)	kg	517 (522)
Fínöl frá Harðakambi (0-8 mm)	kg	1220 (1233)
Sement: Aalborg Rapid Portland	kg	528 (550*)
Kísilryk	kg	22
Vatn	kg	144 (142)
Flotefni: (RN 30 Ath. magn aðeins breytilegt)	l	ca 14
Loftblendi: (Mapei Air)**	l	0,75
Stáltrefjar: Dramix 05/30 mm	kg	10,99
Plasttrefjar: Strux (frá Grace) 85x50	kg	1,84

Ath. Tölur og texti í sviga er samkvæmt skjölum GS.

* Samkv. heimildum GS er notað sement með 4% kísilryki

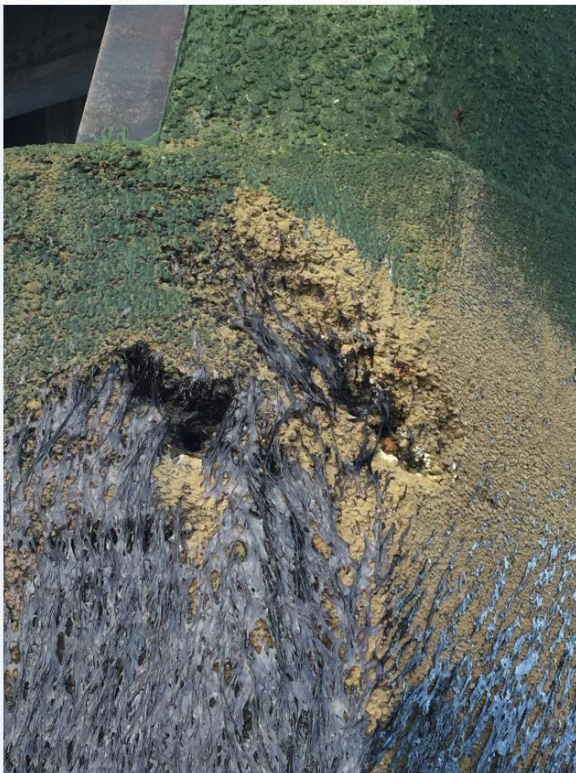
** Ó.W. „Loftblendi var ekki notað til að skapa loftkerfi og gott frostþol heldur til að brjóta niður stórar loftbólur og til að minnka seigju (e. plastic viscosity)“

Sjálfútleggjandi steypa, $v/s \sim 0,26$, ef kísilrykinu er bætt við sementið.

Brotstyrkur [MPa] Sýni: 10 x 20 sm sívalningar

Sýni	2 daga	7 daga	28 daga	90 daga
Bíll 1	64		113	
Bíll 2	62	100	116	135

Frostþolsprófanir samkvæmt SS 13 72 44 í vatni og með 3% NaCl sýndu mjög litlar breytingar í NaCl lausn (0,04 og 0,07 kg/m²) og alls engar breytingar (0,00 og 0,00 kg/m²) með vatnslausn eftir 112 umferðir



Mynd 7.1



Mynd 7.2

Það er sama skýring á hreiðrinu í Mynd 7.1 til vinstri og öðrum hreiðrum hér fyrir framan.

Mynd 7.2 staðfestir það, sem sagt var í upphafi, að steypan líti hvað best út neðst, þ.e. sú steypa sem er lengst í sjó.

Stöpull 8:

Stöpulkápan var steypd 23. október 2007.

Steypublandan:

Upplýsingum um steypublöndu ber ekki saman frá búarsmið og NMI og því hvort tveggja sett fram:

Magn í blöndu	m ³	1,0
Perla frá Harðakambi (11- 16 mm)	kg	517
Finmöl frá Harðakambi (0-8 mm)	kg	1220
Sement: Aalborg mísilryki	kg	528
Vatn	kg	144
Flotefni:RN 30 (ath. magn aðeins breytilegt)	l	U.þ.b. 14
Loftblendi: Mapei Air *	l	0,75
Stálfrefjar: Dramix 05/30 mm	kg	10,99
Plastrefjar: Strux (frá Grace) 85x50	kg	1,84

* Ó.W. „Loftblendi var ekki notað til að skapa lofikerfi og gott frostþol heldur til að brjóta niður stórar loftbólur og til að minnka seigju (e. plastic viscosity)“

Sjálfútleggjandi steypa, v/s ~ 0,27

Skv. NMI:

		TR1	TR2	TR1**	TR2**
Magn í blöndu	m³	1,0	1,0	1,0	1,0
Perla frá Harðakambi (11- 16 mm)	kg	706	644	703	643
Fínmöl frá Harðakambi (0-8 mm)	kg	1081	1135	1077	1132
Sement: *	kg	550	550	549	548
Vatn	kg	140	146	148	151
v/c - hlutfall		0,25	0,27	0,27	0,28
Flotefni:Gerð	-	D	D	D	D
Flotefni: Magn ***	kg	4,8	5,0	5,3	5,5
Trefjar	%	0,6	0,6	0,6	0,6
Flotmæling (Slump flow)	mm	680	700	695	750

* Sement blandað með kísilryki: 528 kg/m³ og 22 kg/m³ kísilryk

** Steypublanda endurreiknuð eftir leiðréttingu niður á brú rétt fyrir niðurlögn

*** Þur þyngd trefja

Sjálfútleggjandi steypa, v/s ~ 0,27.

Brotstyrkur [MPa] Sýni: 10 x 20 sm sívalningar:

	28 daga
Bíll 1	115
Bíll 2	107

Frostþol samkvæmt SS 13 72 44 með 3% NaCl. Flögnun [kg/m²]

Sýni merkt T1

Sýni	Flatarmál cm ²	7 umferðir	28 umferðir	42 umferðir	56 umferðir
A	225	0,00	0,00	0,02	0,02
B	225	0,00	0,00	0,00	0,01
C	225	0,00	0,00	0,00	0,00

Sýni merkt T2

Sýni	Flatarmál cm ²	7 umferðir	28 umferðir	42 umferðir	56 umferðir
A	225	0,00	0,00	0,03	0,04
B	225	0,00	0,00	0,00	0,00
C	225	0,00	0,00	0,01	0,02



Mynd 8.1

Allt í mjög góðu lagi hér skv. [Mynd 8.1](#).

Stöpull 9:

Stöpkápan var steipt 13. október 1999.

Steypublandan:

Magn í blöndu	m ³	0,974
Norskur sandur 0 – 8 mm	kg	806
Norsk mól 8 – 16 mm	kg	784
Slagg: Merit 5000	kg	144 (9 x 16 kg)
Sement: Portland	kg	333
Vatn	l	119
Þjálnefni ADWA-flow	l	1,6
Seinkari: Lentan 77	l	0,8
Loftblendi: SS-Air	l	0,14 + 1,0 l vatn
Stáltrefjar: Dramix 05/30 mm	kg	40

Hér er ekki um sjálfútleggjandi steypu að ræða og það gekk ekki vel að fá rétt loft í hana. Ef slagginu er bætt við sementið verður útreiknað v/s ~ 0,25, sem er reyndar ótrúlega lágt

Brotþol sívalninga [MPa]

	7 daga	28 daga	90 daga
Tilraunasteypa í Borgarn. – 28-09-99 – Harðnar í rakaklefa – stórir sívalningar (meðaltal tveggja mælinga)	40,3	61,5	
Tilraunasteypa í Borgarn. – 28-09-99 – Er úti allan tímann – litli sívalningar (meðaltal þriggja mælinga)			45,4* (46,8)
Tilraunasteypa í Borgarn. – 28-09-99 – Geymt í rakaklefa í tvær vikur fyrir brot-litlir sívalningar (meðaltal þriggja mælinga)			51,0* (52,6)
Kápusteypa - Bíll 1		39,4	
Kápusteypa - Bíll 2		42,4	
Kápusteypa - Bíll 3		50,1	
Kápusteypa - Bíll 3 borað 14-12-99, geymt úti, brotið 10-01-00			40,9*
Kápusteypa - Bíll 3 borað 14-12-99, geymt inni, brotið 10-01-00			57,0*

* 3% dregið frá mældu gildi vegna þess að hlutfallið lengd/breidd = 1,5. Óleiðrétt gildi í sviga.

Brotstyrkur (28 daga) reyndist misjafn og er það langt fyrir neðan brotstyrk tilraunasteypu og þess sem reiknað var með.

Eftir eitt ár voru kjarnar boraðir úr steypunni og mældist styrkur þeirra 62 MPa.

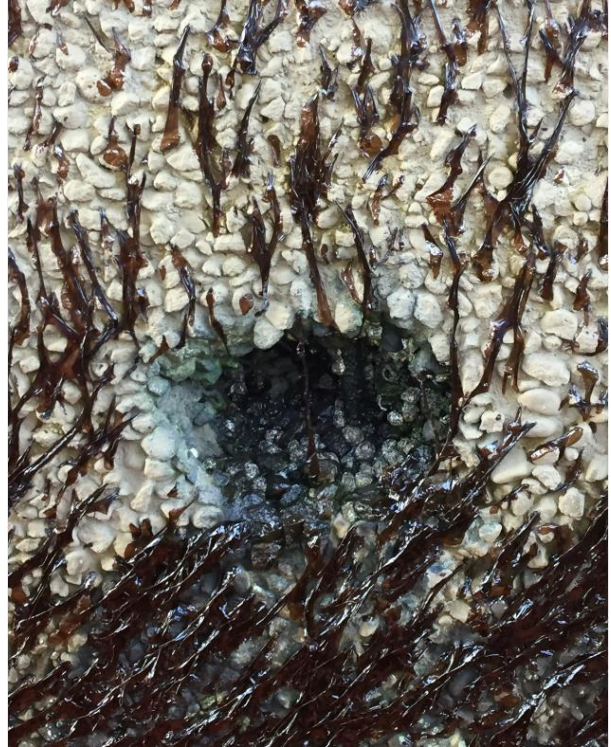
Upplýsingar um loft í steypu

	loft, %	fjarlægðarstuðull [mm]	Yfirborð loftbóla [mm ⁻¹]
Tilraunasteypa í Borgarnesi 28-9-99	3,5	0,26	
Kápusteypa - Bíll 1	10,8	0,13	25
Kápusteypa - Bíll 2	7,1	0,16	27
Kápusteypa - Bíll 3	2,9	0,42	16

Loft og loftdreifing reyndist einnig misjöfn

Frostþol samkvæmt SS 13 72 44 með 3% NaCl. Flögmun [kg/m²]- meðaltal þriggja mælinga.

Sýni	7 umferðir	14 umferðir	28 umferðir	42 umferðir	56 umferðir
Tilraunasteypa í Borgarnesi 28-9-99	0,08	0,15	0,27	0,36	0,41
Kápusteypa - Bíll 1	0,01	0,01	0,02	0,05	0,10
Kápusteypa - Bíll 2	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04
Kápusteypa - Bíll 3	0,01	0,03	0,07	0,09	0,12



Mynd 9.1



Mynd 9.2

Þessi stöpulsteypa var sú lakasta, sem skýrist af því sem fram kemur í textanum hér fyrir framan, erfitt að fá rétt loft og breytilegur steypustyrkur. Hreiður sem hafa stækkað frá því síðast var skoðað og fylliefnin nokkuð sýnileg.

Stöpull 10:

Stöpulkápan var steipt 24. september 2003.

Steypblandan:

Magn í blöndu	m ³	1
Norskur sandur 0 – 8 mm	kg	1054
Norsk möl 8 – 16 mm	kg	676
Sement: Norskt anleggsement	kg	497
Kísilryk	kg	40
Vatn	l	146
Þjálniefni Glenium	l	5,29
Fibertrefjar: Grace – Strux 90/40	l	Vantar upplýsingar um magn.

Vísbandingar voru um að frostþol steypunnar gæti verið lélegt þar sem smásjárskoðun steypunnar sýndi kekki af kísilryki sem gætu valdið lélegu frostþoli. Klórleiðnistuðull steypunnar reyndist einnig lágur og klórinnihald steypunnar var hátt, miklu hærra en í venjulegri steypu.

Ó. W. : „Ástæðan fyrir því að kísilrykið köggladist var sú að efnið var geymt í big bags og því miður var það geymt úti við í einhverri tíma. Kögglunina má því rekja til þeirrar ástæðu (ef þetta er steypa sem gerð var með big bags). Sökum þessa var talið óráðlegt að nota big bags í seinni stöpla.“

Brotstyrkur [MPa] Sýni: 10 x 20 sm sívalningar

	28 daga	90 daga
SCC I	94,3	114,6
SCC II	107	118,2

Loft og loftdreifing mæld í SCC II

Loft [%]	Fjarlægðarstuðull [mm]	Yfirborð loftbóla [mm ⁻¹]
1,7	0,76	11
1,0	0,52	20
2,2	0,7	11
Meðaltal		
1,6	0,6	14

Ó.W. „Fyrstu 2 árin (1998 og 1999) var steypa sem fór í stöplana loftblendin.

Frostþol samkvæmt SS 13 72 44 með 3% NaCl. Flögnun [kg/m²]

Sýni	28 umferðir	56 umferðir	112 umferðir	168 umferðir
1	0,09	0,37	2,01	
2	0,05	0,16	0,53	1,03



Mynd 10.1



Mynd 10.2

Ágætt ástand, en fylliefni aðeins sýnileg.

Stöpull 11:

Stöpkápan var steipt 2. ágúst 2006.

Steypublandan:

Magn í blöndu	m³	1,0
Perla frá Harðakambi (11- 16 mm)	kg	518
Fínmöl frá Harðakambi (0-8 mm)	kg	1238
Sement: Aalborg Rapid Portland	kg	518
Kísilryk	kg	22
Vatn	kg	176
Flotefni: (RN 30 Ath. magn aðeins breytilegt)	l	24,6
v/c hlutfall		0,33
Loftblendi: (Mapei air)**	l	0,75
Stálfrefjar: Dramix 05/30 mm	kg	10,99
Plastrefjar: Strux Grace 85x50	kg	3,22

* Samkv. heimildum GS er notað sement með 4% kísilryki

** Ó.W. „Loftblendi var ekki notað til að skapa lofkerfi og gott frostþol heldur til að brjóta niður stórar loftbólur og til að minnka seigju (e. plastic viscosity)“

Reiknað v/s er ~ 0,33 úr tölunum í töflunni.

Brotstyrkur [MPa] Sýni: 10 x 20 sm sívalningar

Sýni	2 daga	7 daga	28 daga	90 daga
Bíll 1/Bíll 2	40 *	70 *	80	109

* Ath. Gildi ekki nákvæm. Lesin úr grafi

Frostþol samkvæmt SS 13 72 44 með 3% NaCl. Flögmun [kg/m²]

Sýni	upplausn	56 umferðir	112 umferðir
	3%NaCl	0,00	0,12
	Vatn	0,00	0,00



Mynd 11.1

Ástandið ágætt, en fylliefni helst til sýnileg miðað við aldur steypunnar.

Stöpull 12:

Stöpkápan var steyp 5. október 2007.

Steypublandan:

Magn í blöndu	m ³	1,0
Perla frá Harðakambi (11- 16 mm)	kg	540
Fínmöl frá Harðakambi (0-8 mm)	kg	1209
Sement: Aalborg Rapid Portland	kg	539*
Kísilryk	kg	23
Vatn (Ath. Byrjunarblanda, vatn breytilegt)	kg	168
Flotefni: (RN 30 Ath. magn aðeins breytilegt)	l	23,2
Loftblendi: (Mapei Air)**	l	0,75
Stáltrefjar: Dramix 05/30 mm	kg	10,99
Plasttrefjar: Strux (frá Grace) 85x50	kg	2,53

* Samkv. heimildum GS er notað sement með 4% kísilryki.

** Ó.W. „Loftblendi var ekki notað til að skapa loftkerfi og gott frostþol heldur til að brjóta niður stórar loftbólur og til að minnka seigju (e. plastic viscosity)“

Reiknað v/s ~ 0,3 skv. gildumí töflunni.

Brotstyrkur [MPa] Sýni: 10 x 20 sm sívalningar

Sýni	2 daga	7 daga	28 daga	90 daga
Bíll 1/Bíll 2	40 *	83 *	110	114

* Ath. Gildi ekki nákvæm. Lesin úr grafi

Frostþol samkvæmt SS 13 72 44 með 3% NaCl. Flögmun [kg/m²]

Sýni	upplausn	56 umferðir	112 umferðir
	3%NaCl	0,02	0,06
	Vatn	0,00	0,00



Mynd 12.1



Mynd 12.2

Drendrúkurinn var eitthvað að stríða mönnum í [Mynd 12.2](#), en áferðin er mjög sannfærandi í [Mynd 12.1](#).

Skásprungur í bitum:



Mynd 13

Í flestum bitaendum markar fyrir sprungum sbr. Mynd Sett var fram tillaga að útskýringum á þeim í annarri greinargerð, Bitasprungur, sem send var út 2010.10.10.

Niðurstaða:

Eins og segir í upphafi voru menn að prófa sig áfram með steypublöndur, þannig að árangurinn er aðeins misjafn. Það er helst að stöpull 9 skeri sig úr í þeim skilningi, að það sér mest á honum.

Það væri æskilegt að gera við stærstu hreiðrin við tækifæri og mæla sprungubreiddir sbr. þá sem sést á [Mynd 13](#).

Að öðru leyti er skynsamlegt að skoða stöplana aftur með sama hætti innan ekki of langs tíma eða að hámarki eftir 5 ár.

Ástæða þess, að það sér minna á vestur hlið stöplanna en þeirri austari eins og nefnt var í upphafi, kann að vera örari frost- þíðu áhrif. Það rignir úr austan og suðaustan áttum á stöplana sú bleyta frís eftir atvikum og sólin bræðir frekar ísinn af þeirri hlið stöplanna. Þannig verða mögulega tíðari frost- þíðuáhrif á austurhliðum stöplanna.

Nú hafa stöplar 4 brúa verið skoðaðir í seinni parts sumars og í haust, þ.e. sökklar Brúa á Kolgrafafjörð, Dýrafjörð, Borgarfjörð og Óseyrarbrúar. Það sér mjög lítið á sökklum þeirra tveggja fyrst nefndu, en meira á þeim síðarnefndu, sérstaklega sökklum Óseyrarbrúar. Sú spurning vaknar hvort það liggi í mun meiri uppblöndun sjávar með árvatni en í hinum tveimur? Hvort sú blöndun hvetji fremur til efnabreytinga eða hvort minna salt valdi fremur frost- þíðuáhrifum?

Viðauki B

Dagsetning : 7.12.2017	<p>PRÓFUNARSKÝRSLA</p> <p>LOFTDREIFING</p> <p>Í STEINSTEYPU</p>	
Verk-ranns.nr. 7.009.324-000		
Framkv. : SvSv		

Verkkaupi :	Vegagerðin
Heimilisfang:	Borgartúni
Umbjóðandi:	Dr. Gísli Guðmundsson, Mannvit hf
Ýmsar upplýsingar :	
Verkefni:	Brúarsteypa í sjávarfällaumhverfi
Sýni:	aðsendir borkjarnar úr Kolgrafarfjarðarbrú, Óseyrarbrú og Dýrafjarðarbrú
Merki:	sjá töflu hér fyrir neðan

Prófunarstaðall :	ASTM C 457 aðferð B
-------------------	----------------------------

Auðkenni sýnis	Kolgr.fj.brú millistöpull 3, neðri	Kolgr.fj.brú millistöpull 3, efri	Óseyrarbrú stöpull 5, neðri	Óseyrarbrú stöpull 5, efri	Dýrafj.brú, millistöpull II, neðri	Dýrafj.brú, millistöpull 1, efri
Lofthluti steypu (%)	3,6	3,0	3,4	4,4	3,1	1,8
Loft, hlutfall af sementsefju (%)	13,4	11,4	9,7	10,3	12,2	5,7
Fjarlægðarstuðull (mm)	0,31	0,30	0,31	0,26	0,23	1,03
Einkennandi yfirborð (mm ⁻¹)	18	20	21	24	25	8
Þéttleiki loftbóla (stk/mm)	0,16	0,15	0,18	0,27	0,19	0,04
Lengd mællínu (mm)	2.836	2.998	2.138	2.192	2.543	2.571
Rannsað svæði (mm ²)	9.801		7.349	7.589	8.920	8.877
Taldir punktar (stk)	1616	1.708	1.218	1.249	1.449	1.465
D _{max} í fleti sneiðar (mm)	20	34	15	16	17	20

Með kveðju,



Sveinbjörn Sveinbjörnsson
byggingarverkfræðingur M.Sc.