

Steypa í Sjávarfallaumhverfi

Desember 2019





Efnisyfirlit

Myndaskrá.....	i
Töfluskrá.....	ii
Inngangur	1
Káпустeypur	1
Ástandsskoðun/sýnataka	3
Sýnataka	4
Niðurstöður mælinga	5
Klóríðgreining	5
Innri skemmdir	6
Ljóssmásjá.....	6
Rafeindasmásjá.....	12
Samantekt	26

Myndaskrá

Mynd 1. Stöpull 5. Myndin var tekin í sýnatökuferð 28.08.2019.....	4
Mynd 2. Stöpull 11. Myndirnar voru tekin í sýnatökuferð 28.08.2019, myndin niðri til vinstri var þó tekin í skoðunarferð 9.10.2017.....	5
Mynd 3. Magn klóríð sem % af þyngd sýnis, sýnt sem fall af dýpi frá yfirborði inn í steypuna fyrir steypusýni úr stöplum 5 og 11.....	6
Mynd 4. Samsett ljóssmásjármynd af steinsteypu úr stöpli 5 við yfirborð. Yfirborð steypunnar snýr upp á myndinni. Samsíða yfirborðinu er sprunga sem gengur eftir sýninu á um 1 mm dýpi.....	7
Mynd 5. Ljóssmásjármynd af steinsteypu, stöpull 5 við yfirborð. Sprungufyllingin er thaumasit.....	7
Mynd 6. Ljóssmásjármynd af steinsteypu, stöpull 5 við yfirborð. Hluti af sprungunni sem sýnd er á Mynd 4 en í meiri stækkun. Efri myndin er tekin í 200 sinnum stækkun (0,52 x 0,67 mm), til vinstri í einskautuðu ljósi og til hægri í tvískautuðu ljósi. Neðri myndin er tekin í 500 sinnum stækkun (0,21 x 0,27 mm), til vinstri í einskautuðu ljósi og til hægri í tvískautuðu ljósi.....	8
Mynd 7. Ljóssmásjármynd af steypu úr stöpli 11. Dæmi um hlaupsmyndun á um 18 mm dýpi.....	9
Mynd 8. Ljóssmásjármynd af steypu úr stöpli 11. Dæmi um hlaupsmyndun á um 24 mm dýpi.....	9
Mynd 9. Ljóssmásjármynd af hlaupsmyndun og thaumsit fylltum sprungum við yfirborð í stöpli 11.....	10
Mynd 10. Ljóssmásjármynd af steypu úr stöpli 5 við yfirborð. Á efri myndinni má sjá hluta úr plasttrefja, sjá má hvernig trefjinn fangar lárétta sprungu.....	11
Mynd 11. Ljóssmásjármynd af steypu úr stöpli 5. Á efri myndinni má sjá hluta úr plasttrefja, sem slitnað hefur um þvert og sementsefjan fyllt í sprungunna.....	12
Mynd 12. Efsta myndin er tekin í ljóssmásjá og sýnir sprungu í tiltölulega lítilli stækkun. Neðri myndirnar tvær eru rafeindasmásjármyndir af sprungufyllingu við yfirborð.....	13
Mynd 13. Efsta myndin til vinstri er tekin í ljóssmásjá og sýnir sprungu sem liggur samsíða yfirborði í tiltölulega lítilli stækkun. Hinar þrjár myndirnar eru rafeindasmásjármyndir af sprungufyllingu við yfirborð.....	15
Mynd 14. Efsta myndin til vinstri er tekin í ljóssmásjá og sýnir sprungu sem liggur samsíða yfirborði í tiltölulega lítilli stækkun. Hinar þrjár myndirnar eru rafeindasmásjármyndir af sprungufyllingu við yfirborð.....	16



Mynd 15. Efsta myndin til vinstri er tekin í ljóssmásjá og sýnir sprungu sem liggur samsíða yfirborði í tiltölulega lítilli stækkun. Hinar þrjár myndirnar eru rafeindasmásjármyndir af sprungufyllingu við yfirborð.....	18
Mynd 16. Efsta myndin til vinstri (innfelld) er tekin í ljóssmásjá og sýnir sprungu sem liggur samsíða yfirborði í tiltölulega lítilli stækkun. Hinar þrjár myndirnar eru rafeindasmásjármyndir af sprungufyllingu við yfirborð.....	19
Mynd 17. Rafeindasmásjármyndir af „honeycomb“ myndun.....	20
Mynd 18. Efsta myndin til hægri (innfelld) er tekin í ljóssmásjá og sýnir hlaupið sem liggur utan í fylliefniskorni við yfirborðið í tiltölulega lítilli stækkun. Hinar þrjár myndirnar eru rafeindasmásjármyndir af hlaupinu við yfirborð.....	21
Mynd 19. Rafeindasmásjármyndir af steypu við yfirborð, á efri myndinni má sjá plasttrefja.....	23
Mynd 20. Efsta myndin til hægri er tekin í ljóssmásjá í tiltölulega lítilli stækkun. Hinar þrjár myndirnar eru rafeindasmásjármyndir af sprungum við yfirborð.....	25
Mynd 21. Rafeindasmásjármynd af þverskurðir af stáltrefja.....	26
Mynd 22. Magn klóríðs, sýnt í % af þyngd sýnis sem fall af dýpi frá yfirborði inn í steypuna fyrir steypusýni úr stöplum 5 og 11.....	27
Mynd 23. Rafeindasmásjármynd af sprungunum kísilykskekk.....	28
Mynd 24. Samsett ljóssmásjármynd (áfallandi ljós) af yfirborði steypu úr stöpli 11.....	30
Mynd 25. Samsett smásjármynd af sprungu við yfirborði steypu úr stöpli 5.....	31

Töfluskrá

Tafla 1. Steypublöndur í kápusteypu í stöplum 5 og 11, magn í kg/m ³ *.....	2
Tafla 2. Þrýstistyrkur kápusteypu á stöpli 5 og 11, MPa.....	2
Tafla 3. Frostþol samkvæmt SS 137244, flögnun mæld sem kg/m ²	3
Tafla 4. Ástand kápusteypu 9.10.2017.....	3
Tafla 5. Niðurstöður efnagreininga með rafeindasmásjá á sprungufyllingum, þyngdarprósentur.....	14
Tafla 6. Niðurstöður efnagreininga með rafeindasmásjá á sprungufyllingum, þyngdarprósentur.....	15
Tafla 7. Niðurstöður efnagreininga með rafeindasmásjá á sprungufyllingum, þyngdarprósentur.....	17
Tafla 8. Niðurstöður efnagreininga með rafeindasmásjá á sprungufyllingum og sementsefju, þyngdarprósentur.....	18
Tafla 9. Niðurstöður efnagreininga með rafeindasmásjá á sprungufyllingum, þyngdarprósentur.....	20
Tafla 10. Niðurstöður efnagreininga með rafeindasmásjá á hlaupsmyndun, þyngdarprósentur.....	22
Tafla 11. Niðurstöður efnagreininga með rafeindasmásjá á sprungufyllingum, þyngdarprósentur.....	24
Tafla 12. Samsetning á sementefju við yfirborð, á um 15 mm dýpi og um 30 mm dýpi.....	25



SKÝRSLA

Skýrsla nr: NMÍ 19-03

Dreifing:

Opin Lokuð

Unnið fyrir:

Vegagerðina

Tengiliður verkkaupa:

Helgi S Ólafsson

Heiti skýrslu:	Steypa í Sjavarfallaumhverfi	Útgáfutími: Desember 2019
Höfundur/-ar:	Gísli Guðmundsson	Fjöldi síða: 31 bls.
Deild:	Rb við Nýsköpunarmiðstöð Íslands	Verkefnastjóri: GG

Úrdráttur:

Brúin yfir Borgarfjörð var steyp á árunum frá 1975 til 1979. Fljótlega fór að bera á skemmdum í steypum stöplum brúarinnar, sérstaklega í þeim hluta þeirra sem voru í og við neðri fjörumörk. Skemmdirnar lýstu sér sem flögnun í sementsefjunni og fylliefnin sátu eftir, að þeim mörkum þar til fylliefnin losnuðu frá sementsefjunni.

Steypuskemmdirnar leiddu til þess að steypur voru kápur utan á stöplana, á árunum frá 1998 til 2010. Kápusteypan var steyp frá undirstöðum (botni) upp fyrir efri fjörumörk. Við sjónskoðun á kápusteypu í Borgarfjarðarbrú árið 2017 kom í ljós að fimm (af tólf) stöplar reyndust vera með sýnilega yfirborðsflögnun, þar af voru þrjú stöplar með meiri yfirborðsflögnun en búast mátti við miðað við aldur steypunnar.

Steypuskemmdir í sjavarfallaumhverfi hér á landi lýsa sér allar á svipaðan hátt, sementsefjan flagnar af og tiltölulega stór fylliefniskorn sitja eftir, uns sementsefjan hefur flagnað það mikið að fylliefni missa alla festu og falla af. Þannig komu skemmdir fram í stöplum Borgarfjarðarbrúar sem og í Óseyrarbrú sér, einnig fannst visir að slíkum skemmdum í stöplum Kolgrafarfjarðar. Skemmdir í kápusteypum í Borgarfjarðarbrú falla einnig undir þessa lýsingu. Aðal skaðvaldur í kápusteypum í stöplum 5 og 11 er myndun thaumasit í sprungum, sem veldur þenslu í yfirborði sementsefjunnar og flögnun. Flögnunin er ekki mikil og í raun töluvert minni en hefur átt sér stað í Óseyrarbrú og átti sér stað í stöplum Borgarfjarðarbrúar, auk þess sem hún er takmörkuð við fáa stöpla.

Ekki er talin nein hættu á því að nota sambærilega steypu, þ.e.a.s. sjálfútleggjandi steypu í sjavarfallaumhverfi í líkingu við steypur sem notaðar voru í kápusteypur í Borgarfjarðarbrú.

3 lykilorð: Á íslensku

Á ensku

Borgarfjarðarbrú	Borgarfjarðarbrú
Kápusteypa	Covercrete
Súlfatskemmdir	Thaumasite attack

Inngangur

Brúin yfir Borgarfjörð var steyppt á árunum frá 1975 til 1979. Fljótlega fór að bera á skemmdum í steypnum stöplum brúarinnar, sérstaklega í þeim hluta þeirra sem voru í og við neðri fjörumörk. Skemmdirnar lýstu sér sem flögnun í sementsefjunni en fylliefnin sátu eftir, að þeim mörkum að þau losnuðu frá sementsefjunni.

Steypa úr sjávarfallaumhverfi úr Borgarfjarðarbrú var rannsökuð á árunum 1995 og 1996¹. Áhrif frost/þíðu voru síðan rannsökuð upp úr aldamótum. Helstu niðurstöður úr þessum rannsóknum voru þær að frost/þíðu-skemmdir eru ekki orsakavaldur í þessu ferli. Efnaskipti eiga sér stað á milli steypu og sjávar, magnesíum gengur inn í steypuna og kalsíum skolast út. Við þetta veikist sementsefjan. Ástæða fyrir flögnuninni er hins vegar óljós.

Steypuskemmdirnar leiddu til þess að steypantar voru kápur utan á stöplana, á árunum frá 1998 til 2010. Káпустeypan var steyppt frá undirstöðum (botni) upp fyrir efri fjörumörk. Framkvæmd káпустeypuverkefnisins er ítarlega lýst í skýrslu Vegagerðarinnar, sjá Einar Hafliðason, 2016².

Við sjónskoðun á káпустeypu í Borgarfjarðarbrú (2017) kom í ljós að fimm stöplar (af tólf) reyndust hafa sýnilega yfirborðsflögnun, þarf af voru þrír stöplar með töluverða yfirborðsflögnun en búast mátti við miðað við aldur steypunnar.

Markmið þessa verkefnisins voru:

- Að í verklok liggja fyrir skýr gögn um það hvort sjálfútleggjandi steypa, eins og notuð var í káпустeypu á Borgarfjarðarbrú, henti í sjávarfallaumhverfi eða hvort þróa þurfi nýjar blöndur.
- Að benda á prófunaraðferðir sem geta nýst við mat á endingu steinsteypu í sjávarfallaumhverfi.

Með því að greina umfang og eðli skemmdanna sem eiga sér stað í káпустeypu verður mögulegt að segja fyrir um líklegan líftíma þeirra stöpla sem skoðaðir verða. Mikilvægast er að vita hvaða ferli það eru sem valda því að yfirborð steypu í og við neðri fjörumörk flagnar eins og raun ber vitni. Af fyrri rannsóknum á Borgarfjarðarbrú má álykta að frostskemmdir séu ekki líklegar til þess að valda neinum skaða. Áhugavert er að yfirborð steypu sem hönnuð er með tilliti til endingar, þ.e.a.s. sjálfútleggjandi steypa, skuli flagna í þessu umhverfi. Þannig verður spurningunni um hvort nauðsynlegt sé að fara út í endurskoðun á steypublöndum í nýjum brúm svarað.

Við val á steypuefni og steypublöndum í káпустeypu í Borgarfjarðarbrú var stuðst m.a. við frostþol prófsýna eins og það fæst úr stöðluðum frost/þíðuprófunum. Vera má að frost/þíðuprófana séu ekki góður mælikvarði á endingu steypu í sjávarfallaumhverfi þar sem áhrifa frost/þíðu gæta lítið.

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

Káпустeypur

Eins og kemur fram hér að ofan þá var káпустeypuverkefninu lýst af Einari Hafliðasyni, 2016. Allar sjálfútleggjandi steypurnar, sjá Tafla 4, fyrir utan steypuna í stöpli 10 voru með Álaborgar Portland hraðsment, með kísilyki og með Harðakambsefni. Eini munurinn var að sements- og kísilyksmagnið

¹ Gisli Guðmundsson, 1995. Deterioration of Concrete Bridge Piers in Iceland. Bók: Mechanisms of Chemical Degradation of Cement-based Systems. Publisher: E & FN SPON Editors: K.L. Scrivner and J.F.Young.

² Einar Hafliðason, 2016. Ending steypu í sjávarumhverfi. Rannsóknir og prófanir vegna viðgerðar á stöplum Borgarfjarðarbrúar á árunum 1998 – 2010.



Í steypublöndunum sveiflaðist á milli 500 og 600 kg/m³ og kísilrykinu var ýmist blásið saman við sementið eða því var bætt út í steypublönduna í steypustöð. Steypa í stöpli 10 var steypd úr innfluttu og sekkjuðu norsku steypuefni.

Tafla 1 sýnir steypublöndur fyrir stöpla 5 og 11. Í báðum tilvikum var fylliefnið frá Harðakambi. Steypa í stöpli 11 var steypd úr hraðsementi frá Álaborg Portland (APR) og kísilryki sem bætt var í steypuna í steypustöð. Kísilrykið var um 4 % af þyngd sements. Í stöpul 5 var samskonar sement notað, þ.e. hraðsement frá Álaborg Portland, en kísilrykinu var blandað eða blásið í sementið í Helguvík. Í stöpul 5 var kísilrykmagnið um 8 % af þyngd sements. Vatnsmagnið var álíka mikið í blöndunum sem og magn trefja, nema hvað stáltrefjamagnið var aukið nokkuð í síðarnefndu blöndunni. Magn og tegund flot- og loftblendiefna er ekki tíundað hér, þar sem það hefur ekki áhrif á endingu steypunnar. Þess ber þó að geta að steypurnar voru ekki loftblendnar, þótt loftblendiefni væri notað til þess að brjóta niður stórar loftbólur.

Tafla 1. Steypublöndur í kápusteypu í stöplum 5 og 11, magn í kg/m³*

	Stöpull 5 (2009)	Stöpull 11 (2006)
Fylliefni 0 – 8 mm**	1155	1238
Fylliefni 11-16 mm**	595	518
Sement (APR)		518
Sement (Álaborg m. kísilryki)	585	
Kísilryk		22
Vatn	157	176
Stáltrefjar	15,6	10,99
Plasttrefjar	2,8	3,22

* auk þess var loftblendi- og flotefnum bætt út í blönduna

** Harðakambsefni

Þrýstistyrkur var mældur í nokkrum sýnum og eru niðurstöðurnar sýndar í Tafla 2. Verulegur munur er á þrýstistyrk milli þessara tveggja steypublandna. Þessi munur er óútskýrður, en segja má að 80 MPa styrkur sé í lægri kantinum fyrir þessar steypur.

Tafla 2. Þrýstistyrkur kápusteypu á stöpli 5 og 11, MPa

Stöpull	28 daga	90 daga
5	80	109
11	118	126

Frostþol þessara blandna var ákvarðað með því að prófa sýni í flögnunarprófi í 3 % saltlausn samkvæmt sænskum prófunarstaðli (SS 137244), sjá

Tafla 3. Miðað við 56 frost/þíðu umferðir mælist mjög lítil flögnun í báðum steypunum og væntanlega er ekki marktækur munur á þessum mælingum. Vanalega er miðað við að ef flögnunin er innan við 1 kg/m² eftir 56 frostþíðu umferðir, telst frostþol viðkomandi steypu gott. Samkvæmt þessum niðurstöðum er frostþol steypublandnanna beggja mjög gott.

Tafla 3. Frostþol samkvæmt SS 137244, flögnun mæld sem kg/m²

	56 f/þ sveiflur	112 f/þ sveiflur
Stöpull 5	0,00	0,12
Stöpull 11	0,02	

Samkvæmt upplýsingum sem koma fram í skýrslu Einars Hafliðasonar (2016) gekk blöndun steypu í stöpull 11 nokkuð hægt en niðurlögnin eðlilega. Blöndun og niðurlögn gekk eðlilega fyrir sig þegar stöpull 5 var steypdur.

Ástandsskoðun/sýnataka

Ástand kápusteypu í öllum stöplum Borgarfjarðarbrúar var skoðað af Vegagerðinni 09.10.2017. Þá kom í ljós að fimm stöplanna reyndust hafa sýnilega yfirborðsflögnun, þarf af voru þrjár stöplar með tölverða yfirborðsflögnun eða stöplar nr. 5, 9 og 11.

Gerð var grein fyrir niðurstöðum skoðunarinnar í óformlegri skýrslu frá Vegagerðinni sem Gylfi Sigurðsson, verkfræðingur tók saman fyrir Vegagerðina, sjá Tafla 4³.

Tafla 4. Ástand kápusteypu 9.10.2017

Stöpull	Kápusteypa, ár	Steyputegund	Ástand á kápusteypu, aldur (ár)
1	21.08.2003	SCC*	Mjög gott, 14 ára
2	25.05.2010	SCC	Mjög gott, 7 ára
3	28.07.2004	SCC	Gott, 13 ára
4	14.07.1998	HPC**	Gott, en sementsefjan flögnuð úr yfirborði, 19 ára
5	28.07.2009	SCC	Flögnun sementsefju úr yfirborði, 8 ára
6	14.10.2004	SCC	Mjög gott, 13 ára
7	19.07.2005	SCC	Mjög gott, 12 ára
8	23.10.2007	SCC	Mjög gott, 10 ára
9	13.10.1999	HPC	Flögnun sementsefju úr yfirborði
10	24.09.2003	SCC (SCC I og SCC II)	Gott, en nokkur flögnun sementsefju í yfirborði, 14 ára
11	02.08.2006	SCC	Nokkuð gott, en flögnun sementsefju úr yfirborði, 11 ára
12	05.10.2007	SCC	Mjög gott, 10 ára

*SCC: Sjálfútleggjandi steypa

**HPC: Hágæðasteypa (e. high performance concrete)

³ Gylfi Sigurðsson, 2017.



***Með norsku anlegg sementi (497 kg/m^3), kísilyki (40 kg/m^3) og norsku fylliefni sem var flutt inn sekkjað frá Noregi.

Sýnataka

Þann 28.8.2019 voru sýni tekin úr stöplum 5 og 11. Látið var nægja að taka sýnin neðst í fjöruborðinu. Tímasetningin miðaðist við stórstraumsfjöru. Boraðir voru tveir kjarnar úrhvorum stöplinum. Kjarnarnir voru 10 cm í þvermál og miðað var við að bora niður á 50 til 80 mm dýpi. Kjarnarnir voru boraðir úr körfu sem sem var tengd vörubíl með krana.

Stöpull 5

Eins og kemur fram í Tafla 4 var káпустeypan steypst í júlí 2009. Nokkur yfirborðsflögnun hefur átt sér stað í steypunni, sérstaklega á hliðinni sem snýr upp í strauminn (steypa í spíssum), sjá Mynd 1. Erfitt er að meta hve mikið hefur flagnað úr yfirborðinu. Eðli flögnunarinnar er svipað og átti sér stað í upprunalegu stöplasteypunni, n.l. að sementsefjan flagnar og fylliefni sitja eftir. Fylliefnin losna síðan þegar flögunin er orðin svo mikil að sementsefjan nær ekki að halda fylliefnunum föstum í efjunni. Ekki er að sjá að los sé komið á fylliefni í stöpli 5. Þar sem flögunin er mest, hafa aðeins flagnað af um 5 mm eða svo. Flögunin á langhliðunum er tiltölulega lítil, sem dæmi má nefna að enn má sjá móta fyrir flekamótum í yfirborði steypunnar, sjá Mynd 1.



Mynd 1. Stöpull 5. Myndin var tekin í sýnatökuferð 28.08.2019. Myndin sýnir nokkra yfirborðsflögnun í fletinum sem snýr upp í straum árinna. Steypa í langhliðum stöplunnar hefur hins vegar tiltölulega litla yfirborðsflögnun. Sýni voru tekin úr langhlið stöplunnar, neðarlega í stórstraumsfjörubelti.

Stöpull 11

Eins og kemur fram í Tafla 4 var kápan steypst í ágúst 2006. Nokkur yfirborðsflögnun hefur átt sér stað í steypunni, sérstaklega á hliðinni sem snýr upp í strauminn (steypa í spíssum), sjá Mynd 2. Flögunin er meiri en í stöpli 5. Eðli flögnunarinnar er svipað og átti sér stað í upprunalegu steypunni og í stöpli 5, n.l. að sementsefjan flagnar og fylliefni sitja eftir. Fylliefnin losna síðan þegar flögunin er orðin svo mikil að sementsefjan nær ekki að halda fylliefnunum föstum í efjunni. Ekki er að sjá að los sé komið á fylliefni og vel má sjá flekamót í steypunni. Þar sem flögunin er mest, hafa aðeins flagnað af um 5 til 7 mm eða svo.



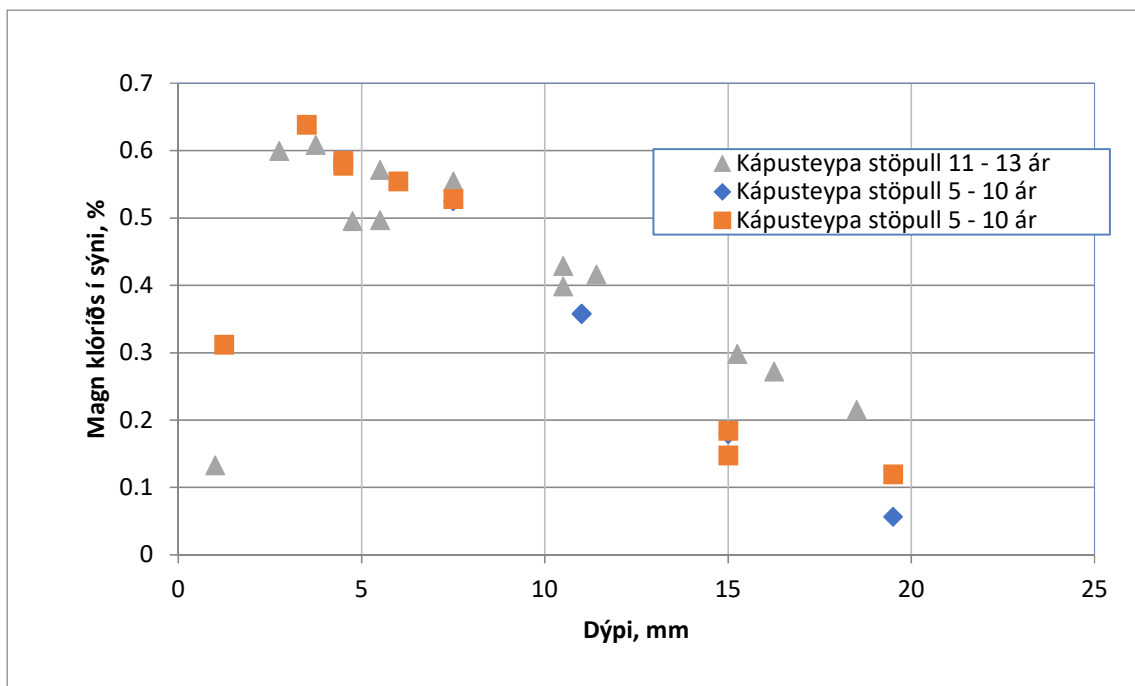
Mynd 2. Stöpull 11. Myndirnar voru tekin í sýnatökuferð 28.08.2019, myndin niðri til vinstri var þó tekin í skoðunarferð 9.10.2017. Myndirnar sýnir nokkra yfirborðslögnun í fletinum sem snýr upp í straum árinna. Steypa í langhliðum stöpsulsins er hins vegar með tiltölulega litla yfirborðslögnun, en þó aðeins meiri en í stöpli 5. Sýni voru tekið af langhliðinni, neðarlega í stórstraumsfjörubelti, sjá neðri myndina (gæði myndarinnar eru ekki góð).

Niðurstöður mælinga

Klóríðgreining

Magn klóríðs var greint í sýnum úr kápusteypu úr báðum stöplunum. Greiningar voru gerðar á sýnum sem tekin frá yfirborði og niður á um 20 mm dýpi. Borkjarnar úr kápusteypunni voru sorfnir niður í rennibekk og svarfi fyrir klóríðgreiningar safnað af um 1 til 2 mm dýptarbili. Styrkur klóríðs var fundinn með spennutírun og eru niðurstöðurnar birtar sem meðaltal af viðkomandi dýptarbili. Látið var nægja að endurtaka nokkrar mælingar, auk þess sem staðallausnir voru efnagreindar.

Niðurstöður efnagreininganna eru sýndar á Mynd 3. Klóríðprófilarnir eru teiknaðir sem fall af mældu dýpi, ekki var gerð ráð fyrir að yfirborðslögnun hefði átt sér stað. Eins og sjá má á Mynd 3 er heldur meira klóríð í sýni úr stöpli 11 en stöpli 5, þ.e.a.s. styrkur klóríðs er meiri fyrir neðan 10 mm dýpi í sýni úr stöpli 11. Leiðnistuðull fyrir klóríð í steypunum var fundinn samkvæmt öðru lögmáli Ficks. Fyrir steypu úr stöpli 5 reyndist leiðnistuðullinn vera $3,34 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2/\text{sek}$ og fyrir steypu úr stöpli 11 reyndist stuðullinn vera $5,16 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2/\text{sek}$.



Mynd 3. Magn klóríð sem % af þyngd sýnis, sýnt sem fall af dýpi frá yfirborði inn í steypuna fyrir steypusýni úr stöplum 5 og 11. Sýnin eru tekin úr neðsta hluta sjávarfallabeltis. Smávægileg yfirborðsflögnun hefur átt sér stað í steypunni, dýpið er ekki leiðrétt m.t.t. flögnunar.

Innri skemmdir

Sýni úr neðsta hluta sjávarfallabeltis úr báðum stöplunum, voru skoðuð í ljóssmásjá og sýni úr yfirborði stöpluls 11 var rannsakað með rafeindasmásjá.

Ljóssmásjá

Gerðar voru tvær þunnsneiðar (35 x 50 mm) úr hvorum stöpli, ein úr yfirborði steypunnar og ein innan úr steypunni. Sýnin voru rannsökuð í hefðbundinni ljóssmásjá í 32, 100, 200 og 500 sinnum stækkun í gegnumfallandi ljósi.

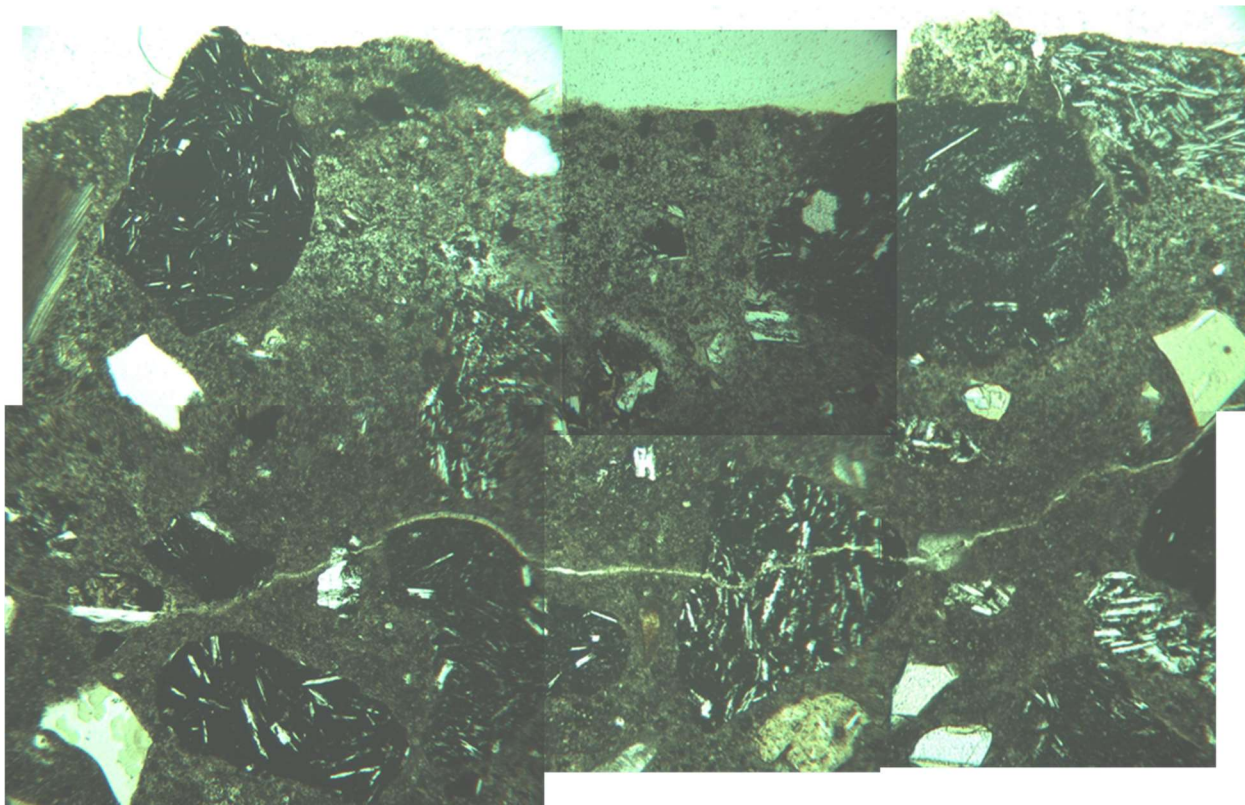
Eitt sýni var útbúið af yfirborði stöpluls 11, sýnið var um 30 x 50 mm og um 5 mm á þykkt. Sýnið var útbúið fyrir greiningu með rafeindasmásjá, en fyrir greininguna var það skoðað með ljóssmásjá í áfallandi ljósi, sjá t.d. Mynd 24.

Sprungumyndun

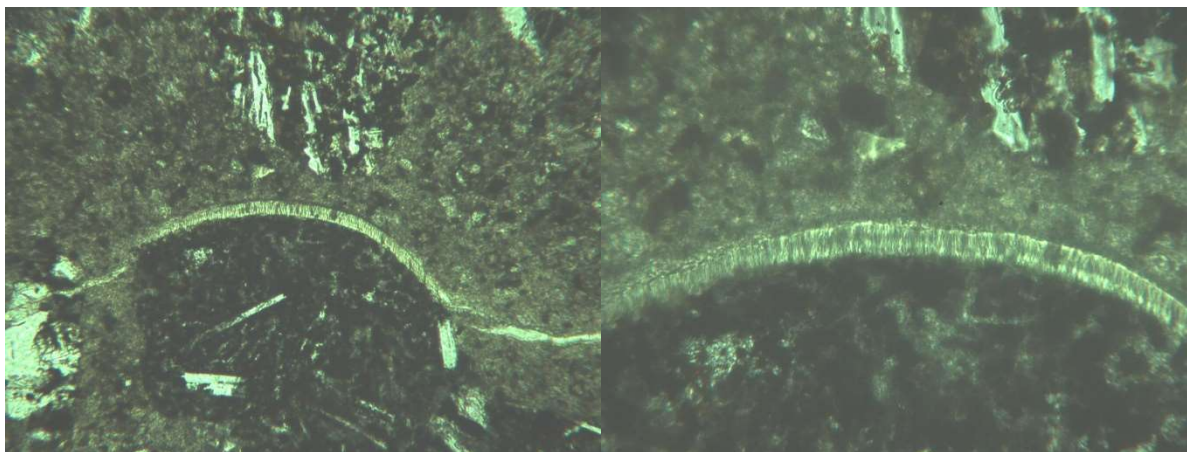
Sprungur er nokkuð algengar í yfirborði sýna úr báðum stöplunum, sjá Mynd 4, Mynd 5, Mynd 6, Mynd 24 og Mynd 25. Yfirborðssprungur liggja nokkurn veginn samsíða yfirborði á dýptarbilinu frá 0,5 til 1,5 mm. Einnig má sjá smærri sprungur sem liggja hornrétt á yfirborð sýnanna. Í láréttu sprungunum finnst steindin thaumasit ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 3\text{CaOSiO}_2 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$). Thaumasit er steingund sem myndast sem útfelling í steypu þegar umfram magn er til staðar af brennisteini, kolefni og kísli. Að öllu jöfnu er steindin mikill skaðvaldur í steypu, ef m.a. mikið framboð er af brennisteini og kolefni. Við slíkar aðstæður koma efnin úr fylliefnum⁴ og/eða grannbergi ef um sprautusteypu er að ræða⁵.

⁴ Rahman, MM, Bassuoni, MT, 2014. Thaumasite sulfate attack on concrete: Mechanisms, influential factors and mitigation. *Construction and Building Materials*, 73, 652-662.

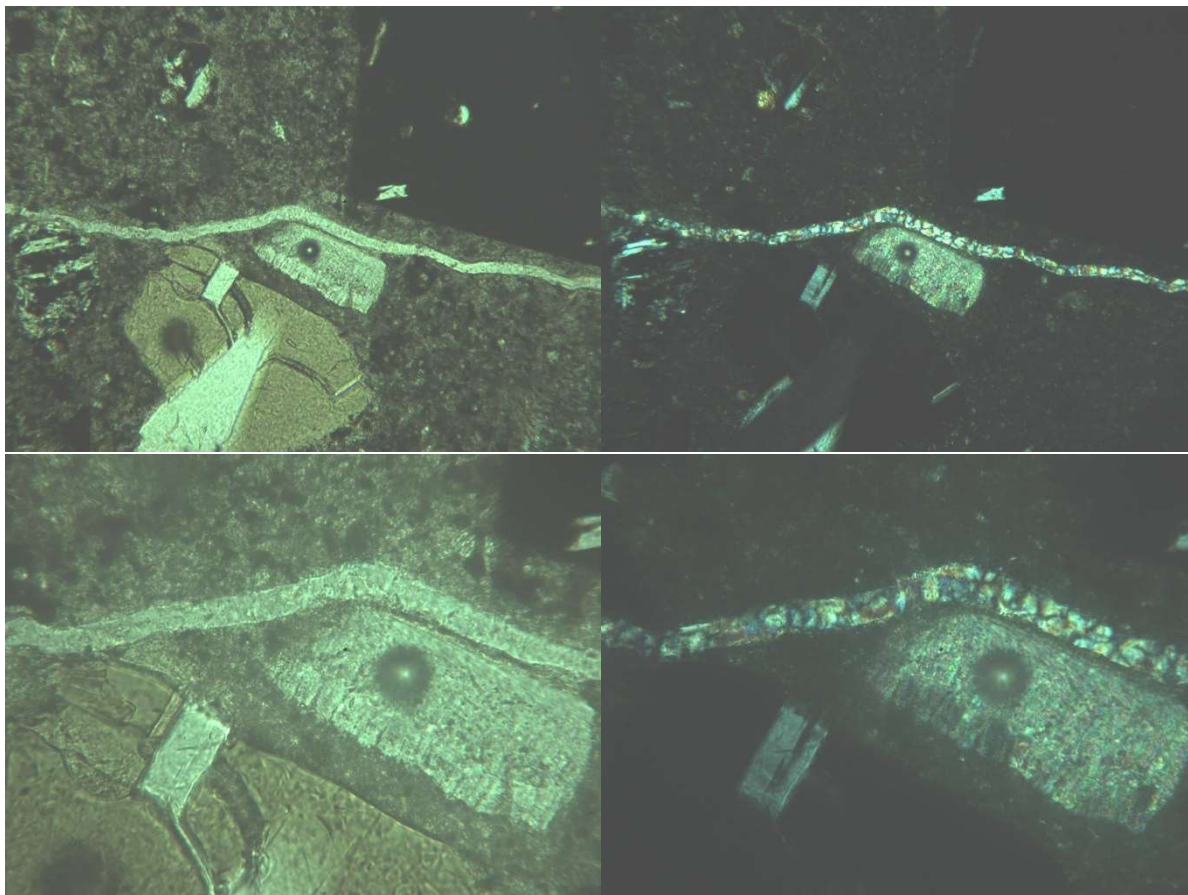
⁵ Hagelia P, Sibbick RG, Crammond NJ, Larsen CK. Thaumasite and secondary calcite in some Norwegian concretes. *Cem., Concr., Compos.*, 2003, 25, 1131-1140.



Mynd 4. Samsett ljósmásjármynd af steinsteypu úr stöpli 5 við yfirborð. Yfirborð steypunnar snýr upp á myndinni. Samsíða yfirborðinu er sprunga sem gengur eftir sýninu á um 1 mm dýpi. Hver myndrammi er 1,04 x 1,36 mm.



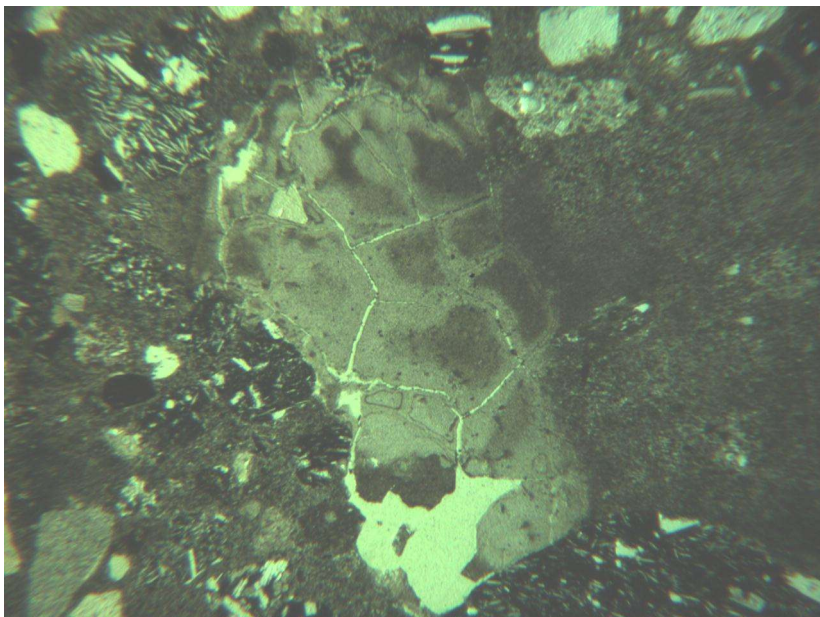
Mynd 5. Ljósmásjármynd af steinsteypu, stöpull 5 við yfirborð. Hluti af sprungunni sem sýnd er á Mynd 4 en í meiri stækkun. Myndin til vinstri er tekin í 200 sinnum stækkun (0,52 x 0,67 mm) og myndin til hægri er tekin í 500 sinnum stækkun (0,21 x 0,27 mm). Sprungufyllingin er thaumasit.



Mynd 6. Ljóssmásjármynd af steinsteypu, stöpull 5 við yfirborð. Hluti af sprungunni sem sýnd er á Mynd 4 en í meiri stækkun. Efri myndin er tekin í 200 sinnum stækkun (0,52 x 0,67 mm), til vinstri í einskautuðu ljósi og til hægri í tvískautuðu ljósi. Neðri myndin er tekin í 500 sinnum stækkun (0,21 x 0,27 mm), til vinstri í einskautuðu ljósi og til hægri í tvískautuðu ljósi. Sprungufyllingin er thaumasit.

Hlaupsmyndun

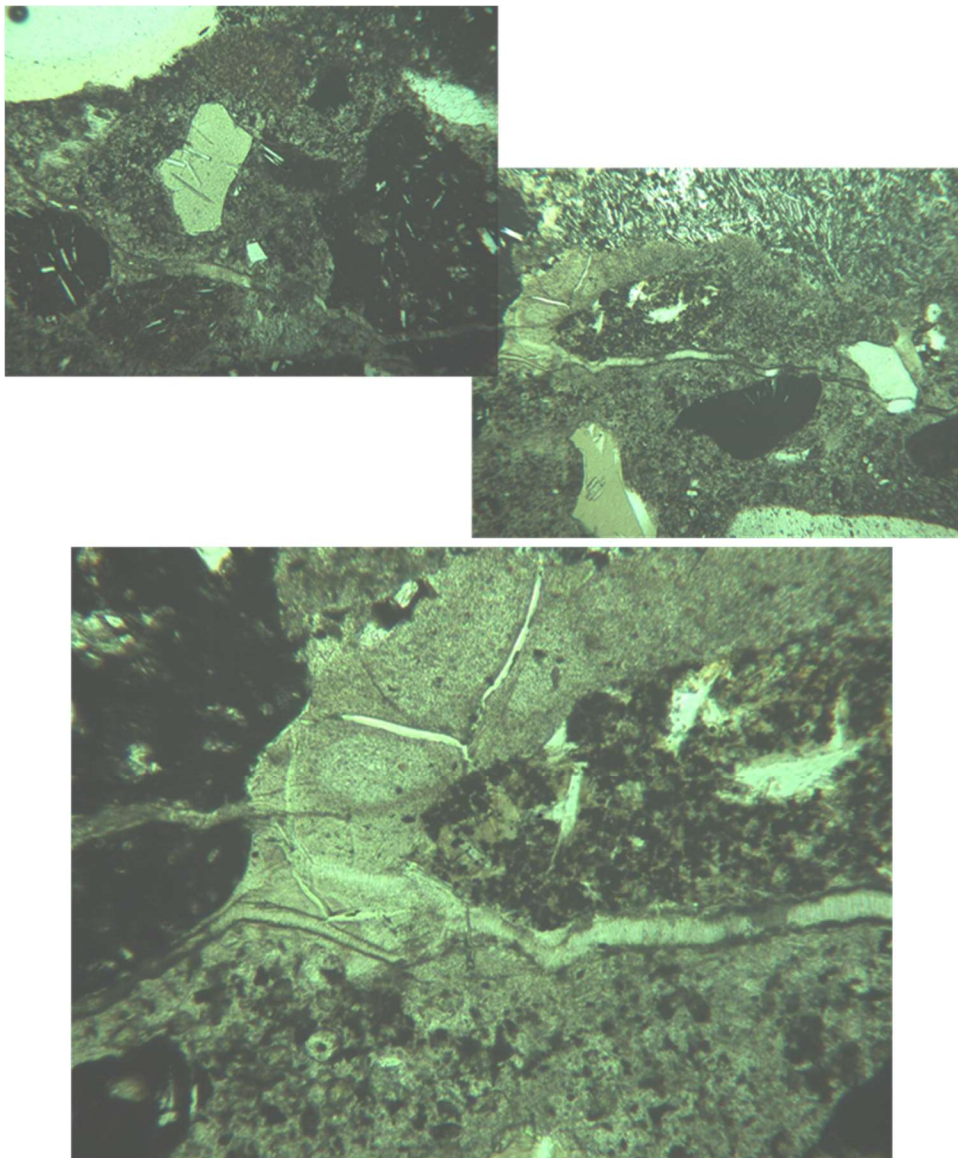
Hlaupsmyndun er nokkuð algeng í steypunni úr stöpli 11, sjá Mynd 7, Mynd 8, Mynd 9 og Mynd 24 en engin (ekki sjáanleg) í sýnum úr stöpli 5. Hlaupið fannst nokkuð jafndreift um allt sýnið. Í öllum tilvikum var eingöngu um hlaupsmyndun að ræða, ekki var að sjá að þensla og sprungumyndun væri samfara mynduninni, ef undan er skilið yfirborðið þar sem thaumasit fylltar sprungur liggja samsíða yfirborði steypunnar og skera hlaupsmyndun, sjá Mynd 9.



Mynd 7. Ljóssmásjármynd af steypu úr stöpli 11. Dæmi um hlaupsmyndun á um 18 mm dýpi. Myndin þekur 3,1 x 4,2 mm.



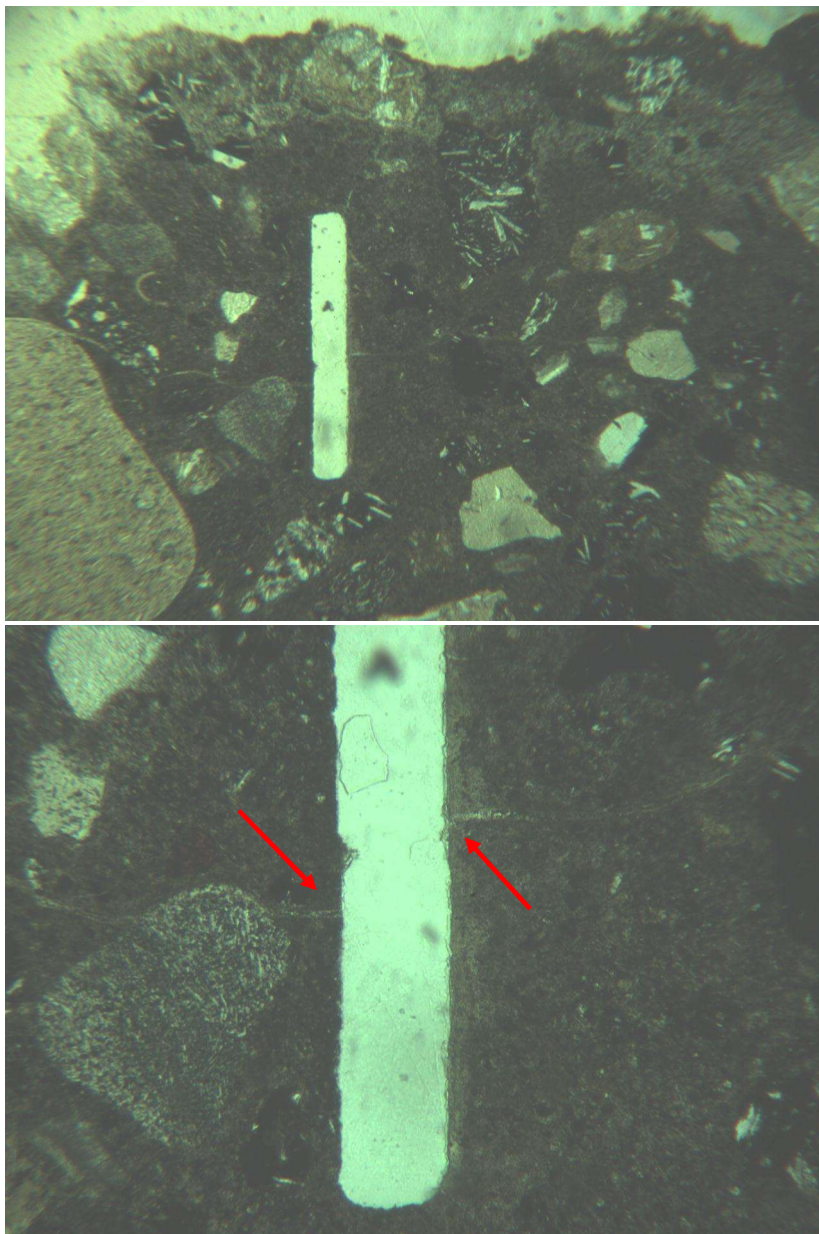
Mynd 8. Ljóssmásjármynd af steypu úr stöpli 11. Dæmi um hlaupsmyndun á um 24 mm dýpi. Myndin þekur 1,04 x 1,36 mm.



Mynd 9. Ljóssmásjármynd af hlaupsmyndun og thaumsit fylltum sprungum við yfirborð í stöpli 11. Efri myndirnar eru teknar í 100 sinnum stækkun og þekur hvor myndrammi 1,04 x 1,36 mm. Neðri myndin er tekin í 200 sinnum stækkun (0,52 x 0,67 mm).

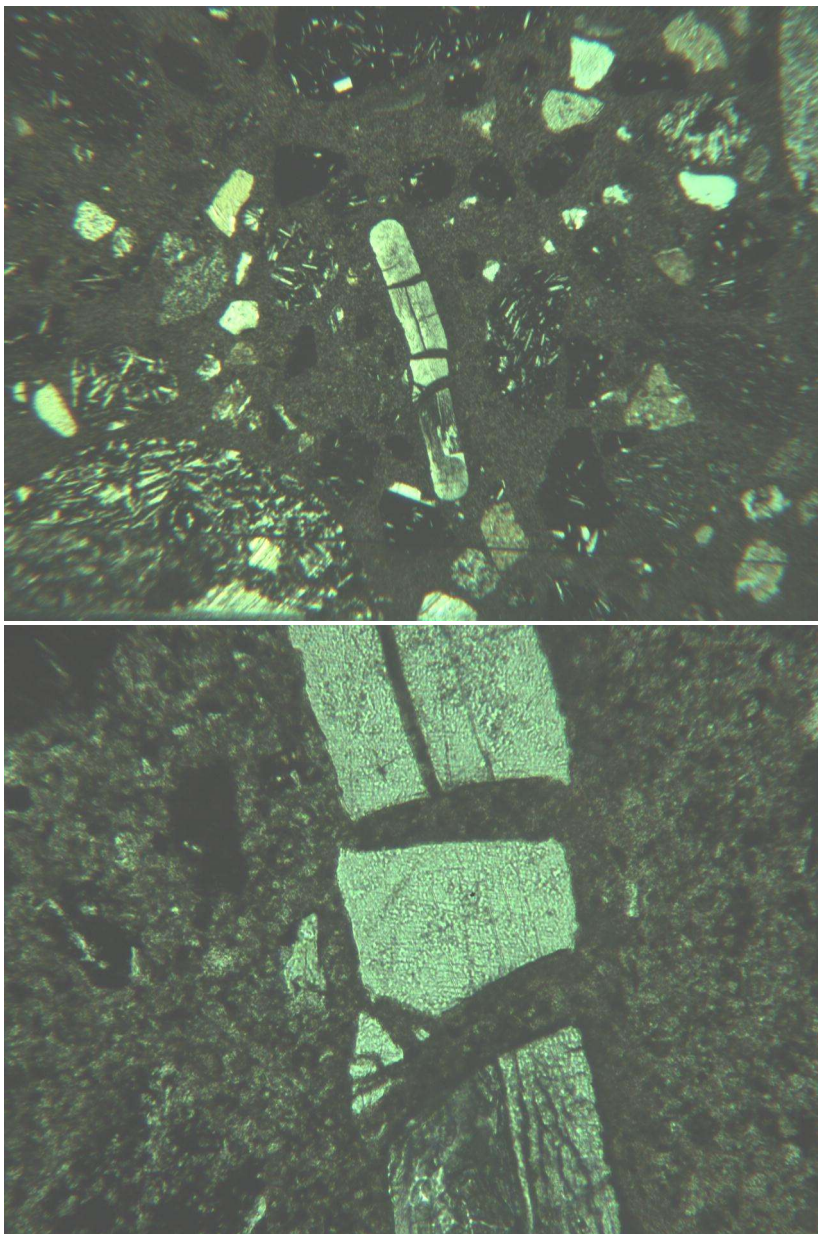
Trefjar

Steypunar í báðum stöplunum voru steypar með bæði stál- og plasttrefjum. Ekki er hægt að skoða stáلتrefjar með ljóssmásjá (gegnumfallandi ljós) en mögulegt er að skoða plasttrefjar. Á Mynd 10 má sjá hluta úr trefja sem liggur við yfirborð steypunnar. Sjá má hvar trefji fangar sprungu.



Mynd 10. Ljóssmásjármynd af steypu úr stöpli 5 við yfirborð. Á efri myndinni má sjá hluta úr plasttrefja, sjá má hvernig trefjinn fangar lárétta sprungu. Efri myndin þekur 3,1 x 4,2 mm og neðri myndin þekur 1,04 x 1,36 mm. Rauðu örvarnar vísa á sprunguna sitt hvorum megin við trefjann.

Á Mynd 11 má sjá hluta úr plast trefja, sem slitnað hefur um þvert og sementsefjan fyllt í sprungurnar. Ekki er óalgengt að sjá plasttrefja sem eru hlutaðar þvert í sundur. Þegar trefjarnir slitna er steypan enn þá plastísk og þess vegna fyllir sementsefjan iðulega í bilið sem myndast þegar trefjinn slitnar. Líklega eru rákirnar sem liggja langs eftir trefjanum rispúr sem myndast hafa við þunnsneiðargerðina. Annað dæmi um slitna trefja má sjá á Mynd 24, en á þeirri mynd má sjá tvær slitnar plasttrefja.



Mynd 11. Ljóssmásjármynd af steypu úr stöpli 5. Á efri myndinni má sjá hluta úr plasttrefja, sem slitnað hefur um þvert og sementsefjan fyllt í sprungurnar. Líklega eru rákirnar sem liggja langs eftir trefjanum rispur sem myndast hafa við þunnsneiðagerðina. Efri myndin þekur um 3,1 x 4,2 mm og neðri myndin þekur 0,52 x 0,67 mm.

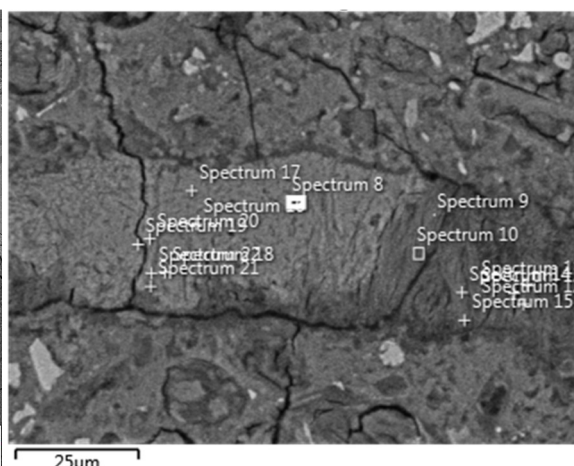
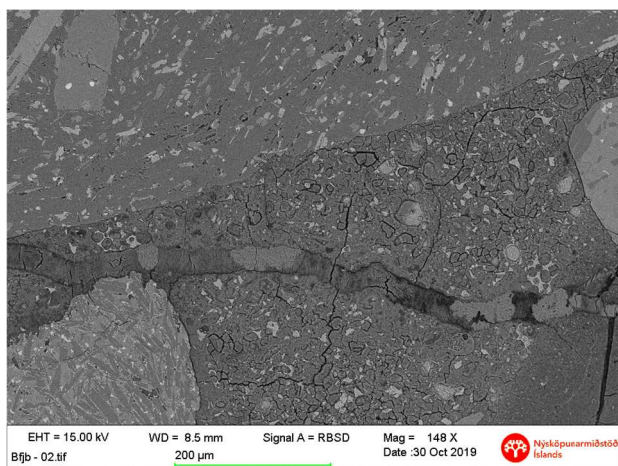
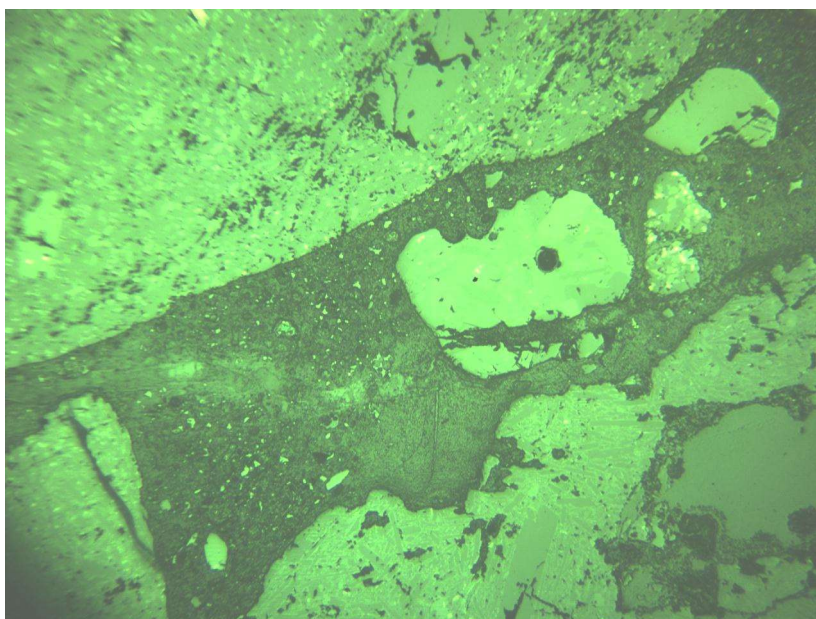
Rafeindasmásjá

Þar sem skemmdir eða yfirborðsflögnun var aðeins lengra gengin í steypu úr stöpli 11 var látið nægja að greina sýni úr stöpli 11 með rafeindasmásjá. Á Mynd 24 má sjá svæðið sem var rannsakað var við yfirborð, en svæðið er um 2 cm á lengd og nær frá yfirborði niður á um 2 mm dýpi. Í sýninu má sjá sprungu sem liggur nokkurn veginn samsíða yfirborði steypunnar á um 0,5 til 1 mm dýpi. Í sprungunni má sjá mismunandi útfellingar, einnig má sjá svæði þar sem kísil- og kalsíumríkt hlaup hefur safnast fyrir. Sjá má hvar sprungan sker smá fylliefniskorn. Þessi svæði voru skoðuð með rafeindasmásjá. Auk þessara svæða voru tveir staðir sem voru á allt að um 30 mm dýpi frá yfirborði rannsakaðir.

Áður en efnagreiningar voru framkvæmdar var rafstraumur í rafeindasmásjónni kvarðaður með hreinu kóbalti. Síðan var samsetning mismunandi fasa með þekktu samsetningu (staðlaðri) ákvörðuð og niðurstöður bornar saman við raunveruleg gildi. Efnagreiningarnar voru gerðar með 15 kV spennu og greiningarnar voru ekki reiknaðar upp í 100 %, heldur var stuðst við hráar niðurstöður. Þar sem

sýnið var kolefnishúðað var ekki talið raunhæft að greina kolefni í sýninu og styrkur súrefnis var ákvarðaður úr frá oxunarstigi þeirra frumefna sem fundust í viðkomandi sýni. Ef viðkomandi fasi sem verið var að efnagreina innihélt bundið vatn er súrefnisgreiningin röng þar sem rafeindasmásjain nemur ekki vetni. Niðurstöður sérhverrar greiningar er gefinn upp sem magn þeirra frumefna sem greindust í viðkomandi efnagreiningu. Efnagreiningarnar voru ýmist gerðar með punktgreiningu eða á stærra svæði, staðsetning efnagreininga og stærð svæða er sýnd á meðfylgjandi myndum.

Á Mynd 12 (efri hluti) má sjá sprunguna við yfirborð og útfellingar í henni. Neðri myndin til hægri sýnir hvar efnagreiningar voru gerðar á útfellingunum. Eins og sjá má eru a.m.k. tveir fasar til staðar í útfellingunum. Niðurstöður efnagreininganna sem meðaltal eru sýndar í Tafla 5. Niðurstöður þeirra benda til þess að fasinn til hægri í sprungunni (greiningar 10 til 15) eru s.k. thaumasit og fasinn til vinstri er kalsíum karbónat (greiningar 16 til 22). Svo virðist að thaumasit sé mun algengara í sprungunni en kalsíum karbónat.

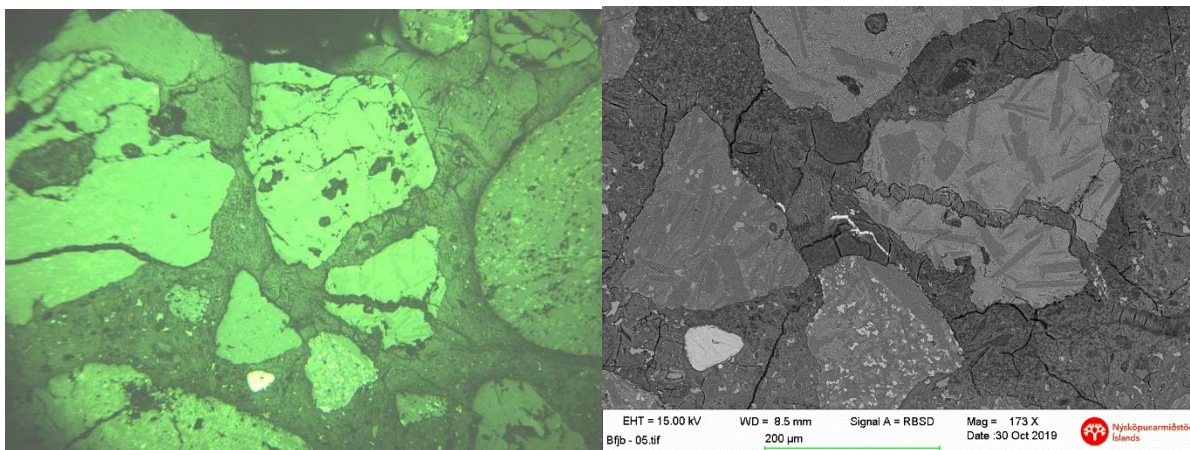


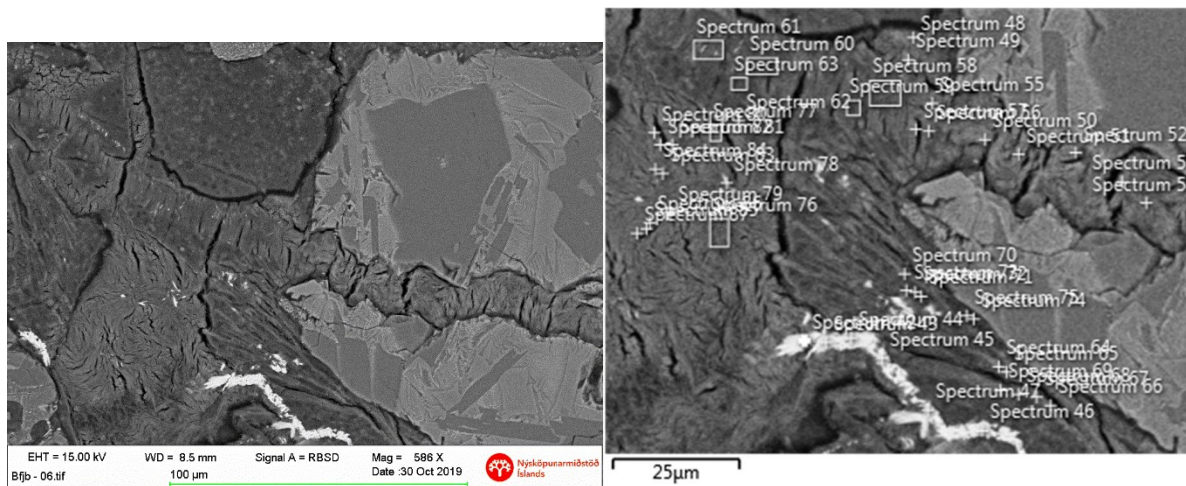
Mynd 12. Efst myndin er tekin í ljósmásjá og sýnir sprungu í tiltölulega lítilli stækkun, myndin er hluti af samsettri mynd, sjá Mynd 24. Neðri myndirnar tvær eru rafeindasmásjármyndir af sprungufyllingu við yfirborð. Myndin neðst til hægri sýnir staðsetningar á efnagreiningum.

Tafla 5. Niðurstöður efnagreininga með rafeindasmásjá á sprungufyllingum, bygndarprósentur.

	Meðaltal 10-15	Meðaltal 16-22
Fasi	Thaumasit	Kalsíum karbónat
O		
Mg	0.05	
Al	0.19	0.21
Si	4.84	1.60
S	5.72	2.12
Cl	0.48	0.45
Ca	20.23	33.38
Fe	0.06	
Heild	53.91	55.54

Samsetning sprungufyllingarinnar var könnuð þar sem sprungan sker tiltölulega smátt fylliefniskorn, sjá Mynd 13. Á þessum stað er sprungan á um 0,5 mm dýpi, en það sést í yfirborð sýnisins í hluta af efstu myndinni til vinstri. Staðirnir sem voru efnagreindir eru sýndir á neðstu myndinni til hægri. Niðurstöður efnagreininganna eru sýndar í Tafla 6. Sprungufyllingin er aðallega thaumasit, en sjá má baríum-strontíum sulfat ((BaSr)(SO₄), bæði sem smáar og dreifðar steindir í útfellingunni en einnig sem tiltölulega stór fasakorn, sjá Mynd 13.





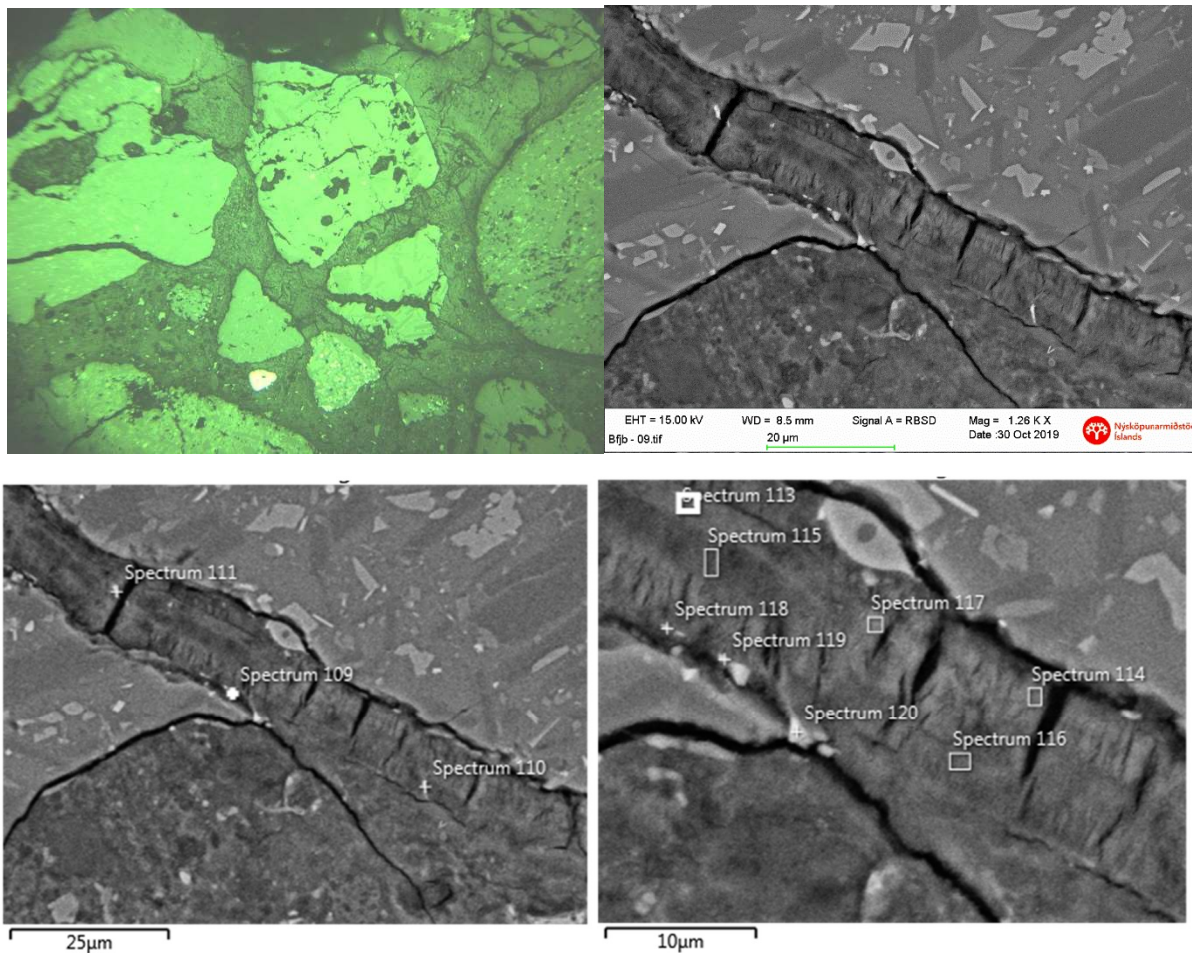
Mynd 13. Efsta myndin til vinstri er tekin í ljósmásjá og sýnir sprungu sem liggur samsíða yfirborði í tiltölulega lítilli stækkun, myndin er hluti af samsettri mynd, sjá Mynd 24. Hinar þrjár myndirnar eru rafeindasmásjármyndir af sprungufyllingu við yfirborð. Myndin neðst til hægri sýnir staðsetningar á efnagreiningum. Á rafeindasmásjármyndunum er Sr-Ba fasinn hvítur.

Tafla 6. Niðurstöður efnagreininga með rafeindasmásjá á sprungufyllingum, þyngdarprosentur.

	Meðaltal 42-46	Meðaltal 48-87
Fasi	Súlfat	Thaumasit
O	27.14	24.25
Na	0.06	0.03
Mg	0.17	0.07
Al		0.81
Si		6.61
S	13.09	4.98
Cl		0.64
K	0.12	0.01
Ca	2.05	20.52
Ti		0.03
Fe		0.90
Sr	5.59	
Ba	46.68	0.24
Heild	94.93	59.08

Á Mynd 14 má sjá annað svæði þar sem sama sprungan og sýnd er á Mynd 13 sker tiltölulega smátt fylliefniskorn. Efnagreiningar voru framkvæmdar á nokkrum fösum í sprungufyllingunni, sjá Tafla 7. Greiningar númer 110 og 111 voru gerðar á smáum fösum í sprungufyllingunni. Fasarnir eru tiltölulega smáir og gætu stærðarlega verið að nálgast neðri mörk svona greininga. Þeir eru baríum-, kalsíum-, kísil- og brennisteinsríkir fasar. Ekki er fullljóst um hvaða steintegund er að ræða. Greiningar 113 til 117 voru einnig gerðar á sprungufyllingunni. Um er að ræða kalsíum- og kísilríkan fasa með

mismiklu af brennisteini og áli. Væntanlega eru þessar steindir í ætt við thaumasit. Miðað við hefðbundið thaumasit er kísillinn helst til of mikill og brennisteinninn of lítill. Greiningar 109, 118, 119 og 120 voru gerðar á brotum úr fylliefnum og niðurstöðurnar eru ekki sýndar hér.

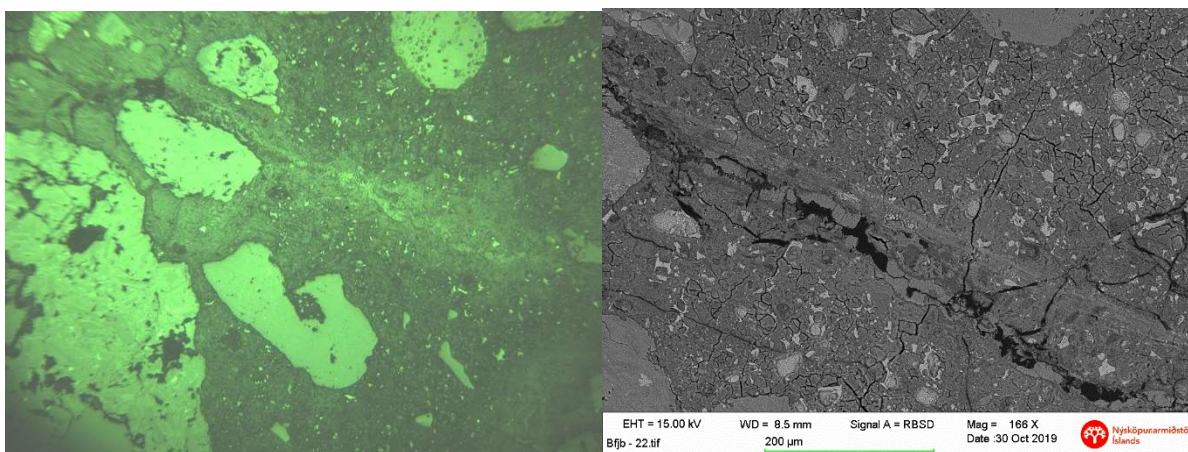


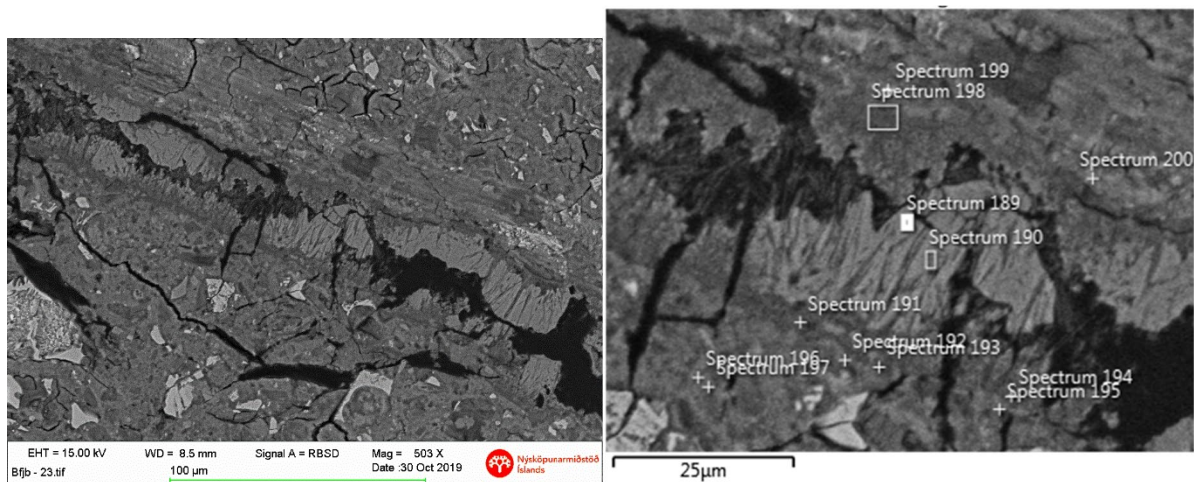
Mynd 14. Efsta myndin til vinstri er tekin í ljósmásjá og sýnir sprungu sem liggur samsíða yfirborði í tiltölulega lítilli stækkun, myndin er hluti af samsettri mynd, sjá Mynd 24. Hinar þrjár myndirnar eru rafeindasmásjármyndir af sprungufyllingu við yfirborð. Neðstu myndirnar sýna staðsetningu á efnagreiningum.

Tafla 7. Niðurstöður efnagreininga með rafeindasmásjá á sprungufyllingum, bygndarprósentur.

	110	111	113	114	115	116	117
Fasi	Óþekktur fasi	Óþekktur fasi	Líkist thaumasit	Líkist thaumasit	Líkist thaumasit	Líkist thaumasit	Líkist thaumasit
O	28.41	25.03	25.65	27.95	24.27	24.65	29.59
Mg		0.26	1.17		0.42	0.78	
Al	1.6	1.15	1.38	1.32	1.86	1.33	1.91
Si	8.22	4.51	11.98	5.49	7.7	10.09	6.2
S	6.45	7.76	2.36	7.45	4.22	2.64	7.25
Cl	0.52	0.4	0.55	0.84	1.04	0.68	1.09
K		0.19					
Ca	15.49	10.99	15.43	22.84	16.88	18.14	23.57
Ti					0.27		0.25
Fe	0.86	0.74	1.07	0.83	1.16	0.88	1.34
Sr							
Ba	13.17	20.93					
Heild	74.71	71.97	59.6	66.73	57.83	59.19	71.22

Á Mynd 15 má sjá enn annað svæði þar sem sama sprungan sker sementsefjuna. Útfellingar í sprungunni reyndust vera kalsíum karbónat, sjá Tafla 8. Samsetning sementsefjunnar var könnuð við sprunguna og eru niðurstöður efnagreiningarinnar einnig sýndar í Tafla 8.



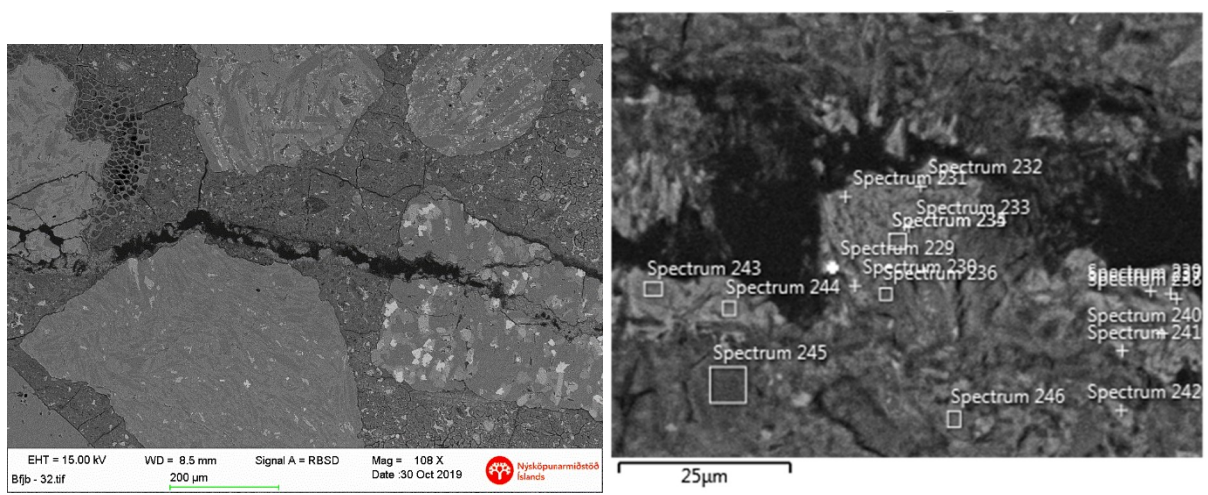
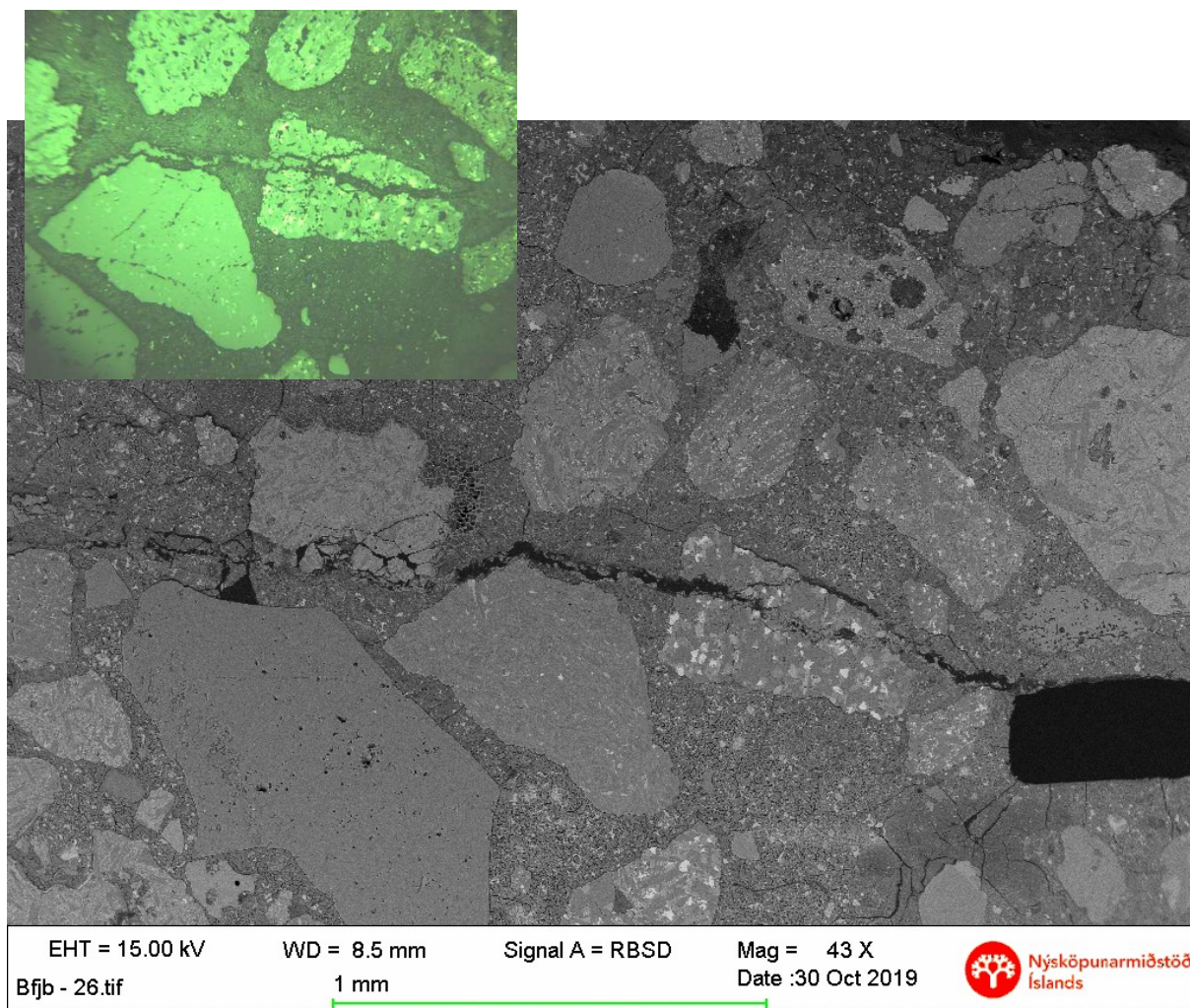


Mynd 15. Efsta myndin til vinstri er tekin í ljósmásjá og sýnir sprungu sem liggur samsíða yfirborði í tiltölulega lítilli stækkun, myndin er hluti af samsettri mynd, sjá Mynd 24. Hinar þrjár myndirnar eru rafeindasmásjármyndir af sprungufyllingu við yfirborð. Neðsta myndin til hægri sýnir staðsetningar á efnagreiningum. Ath. að sýnið er rispað og liggur rispan við sprunguna en samsíða henni.

Tafla 8. Niðurstöður efnagreininga með rafeindasmásjá á sprungufyllingum og sementsefju, þyngdarprósentur.

	Meðaltal 189 og 190	Meðaltal 191-200
Fasi	Kalsíum karbónat	Sementsefja
O	14.89	23.54
Mg		2.32
Al		1.59
Si	0.31	9.12
S	0.77	1.34
Cl		0.32
Ca	33.53	19.52
Fe		1.05
Heild	49.49	58.94

Á Mynd 16 má sjá enn eitt svæði þar sem sama sprungan sker steypuna. Sprungan sker einnig smátt fylliefniskorn. Útfellingar í sprungunni reyndust vera kalsíum karbónat svo og thaumasitlegar steindir sjá Tafla 9.

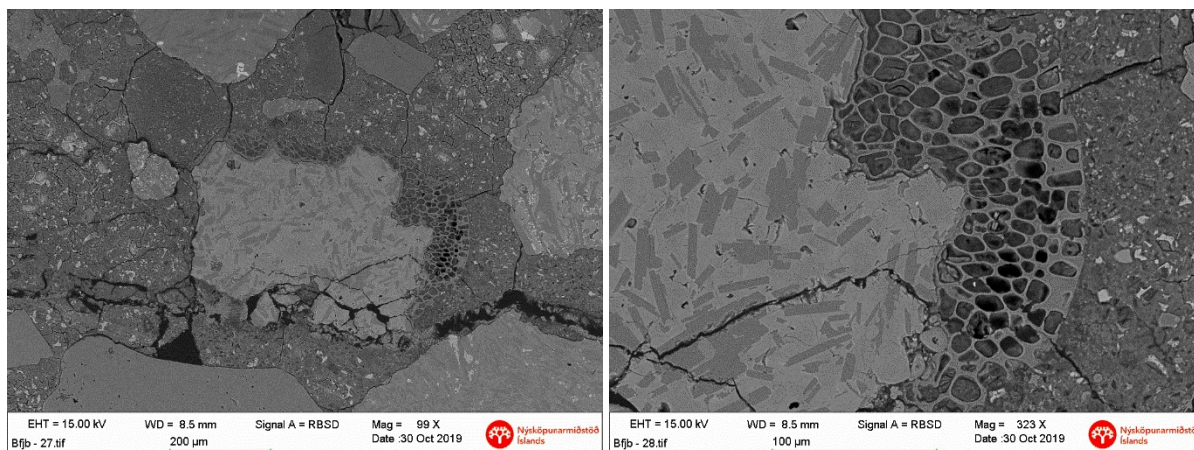


Mynd 16. Efsta myndin til vinstri (innfeld) er tekin í ljósmásjá og sýnir sprungu sem liggur samsíða yfirborði í tiltölulega lítilli stækkun, myndin er hluti af samsettri mynd, sjá Mynd 24. Hinar þrjár myndirnar eru rafeindasmásjármyndir af sprungufyllingu við yfirborð. Neðsta myndin til hægri sýnir staðsetningar á efnagreiningum. Dökki fasinn til hægri á efstu myndinni er hluti af plasttrefja.

Tafla 9. Niðurstöður efnagreininga með rafeindasmásjá á sprungufyllingum, bygðarprósentur.

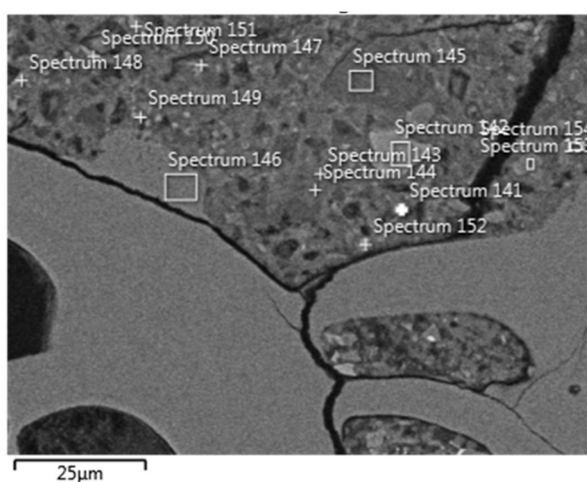
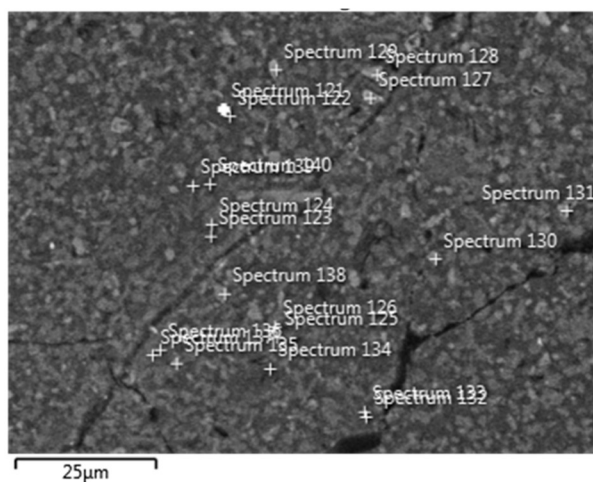
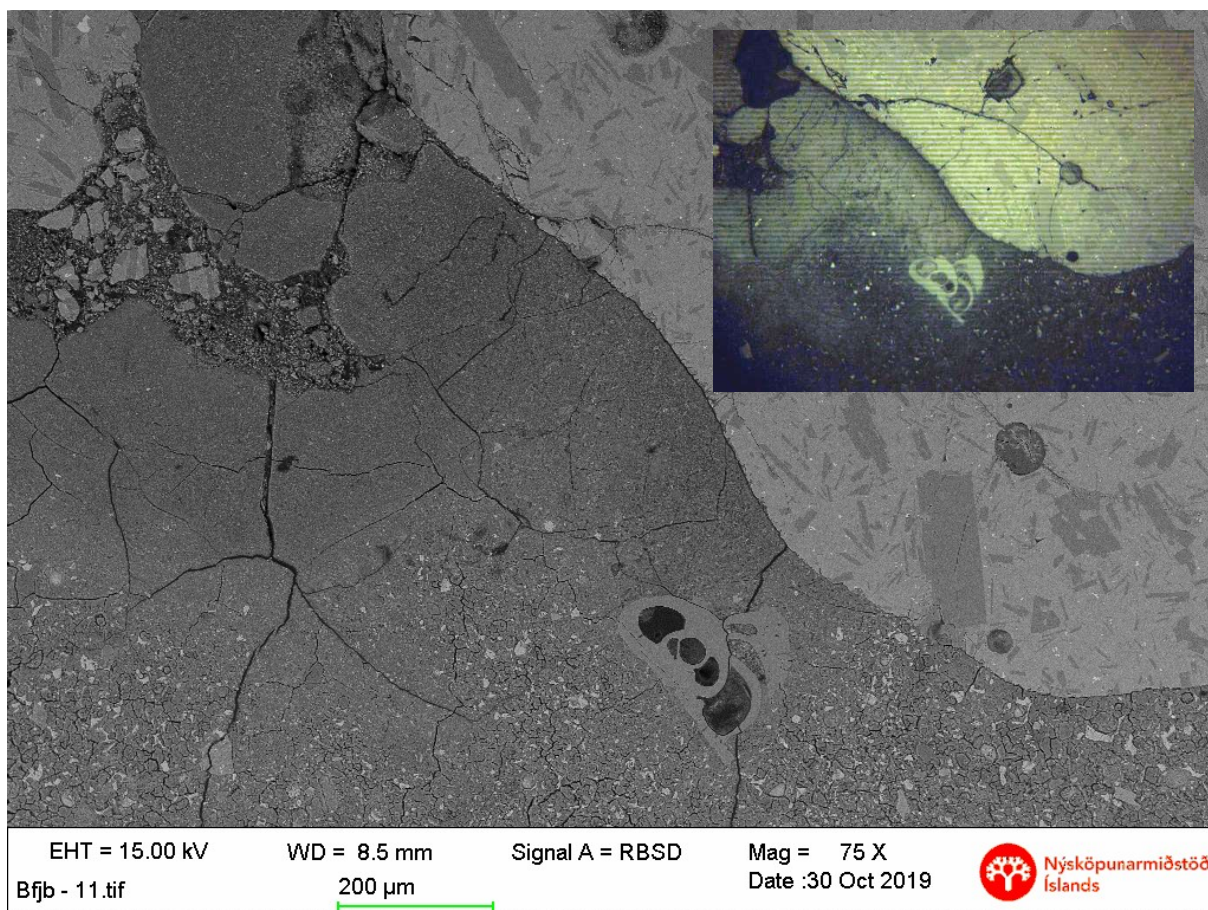
	Meðaltal 229-231, 237-241, 243-244	229-231, 237-241, 243-244
Fasi	Kalsíum karbónat	Í líkingu við thaumasit
O	16.35	21.83
Mg	0.23	0.75
Al	0.39	1.00
Si	0.60	2.28
S	1.22	3.83
Cl	0.12	0.42
Ca	33.40	30.16
Heild	52.34	60.52

Áhugavert er að sjá „honeycomb“ myndunina við fylliefni, sjá Mynd 16 sem einnig er sýnd í meiri stækkun á Mynd 17. Kalsíum karbónat (CaCO_3) myndar strúktúrinn. Ástæða fyrir þessari myndun er ekki ljós. Væntanlega hefur hún myndast í hörðunarferli steypunnar.



Mynd 17. Rafeindasmásjármyndir af „honeycomb“ myndun utan um tiltölulega smátt fylliefniskorn.

Nokkur dæmi eru um kalsíum-kísilrík hlaup, m.a. má sjá tvo slíka hlaupkekki við yfirborðið, sjá Mynd 24, en slíkir hlaupkekkir eru algengir í steypunni. Dæmi um hlaupsmyndun er sýnt á Mynd 18. Myndirnar í neðri röð sýna hvar efnagreiningar voru gerðar í hlaupinu. Eins og sjá má er a.m.k. tveir fasar til staðar. Niðurstöður efnagreininganna sem meðaltöl eru sýndar í Tafla 10. Einnig fannst kalsíum karbónat (CaCO_3) innan hlaupsins, t.d. í greiningu 146.



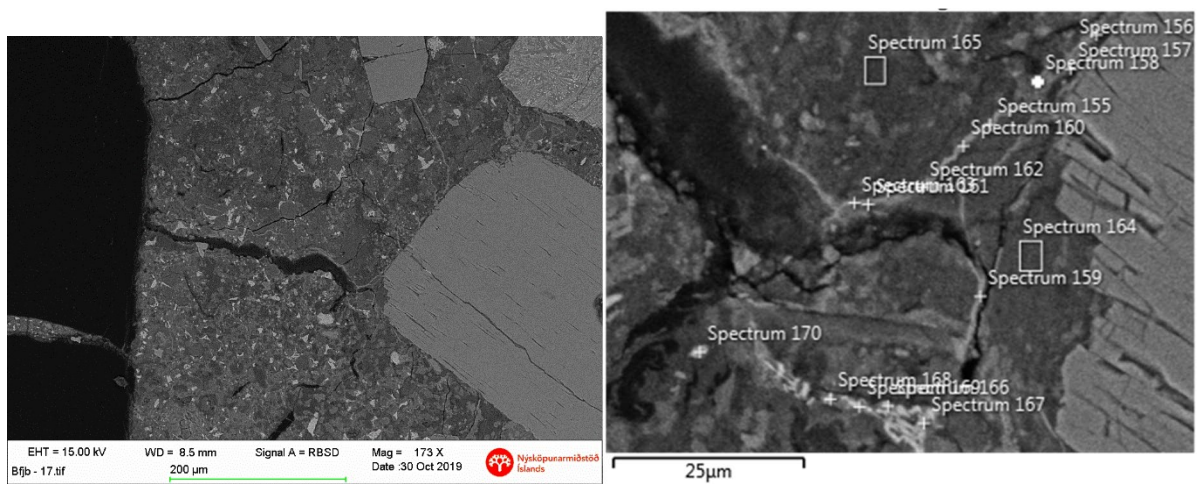
Mynd 18. Efst myndin til hægri (innfeld) er tekin í ljóssmásjá og sýnir hlaupið sem liggur utan í fylliefniskorni við yfirborðið í tiltölulega lítilli stækkun, myndin er hluti af samsettri mynd, sjá Mynd 24. Hinar þrjár myndirnar eru rafeindasmásjámyndir af hlaupinu við yfirborð. Neðri myndirnar sýnir staðsetningar á efnagreiningum. Ljósgrái fasinn hægra megin við miðja efri mynd er þverskurður af skel.



Tafla 10. Niðurstöður efnagreininga með rafeindasmásjá á hlaupsmyndun, þyngdarprósentur.

	Meðaltal 122-126 og 130-140	Meðaltal 142-145 og 147-151
Fasi	Ca-Si hlaup	Ca-Si hlaup
O	19.72	24.86
Mg	0.24	0.74
Al	0.89	2.27
Si	8.62	9.09
S	0.90	0.91
Cl	0.44	1.59
Ca	18.13	21.09
Fe	1.31	6.64
Heild	50.24	67.59

Samsetning sprungufyllinga í örprungum við yfirborð var efnagreind, sjá Mynd 19 og Tafla 11. Sprungufyllingarnar virðist aðallega vera kalsíum karbónat með nokkuð af öðrum efnum, eins og kísli, magnesíum, járn og áli.

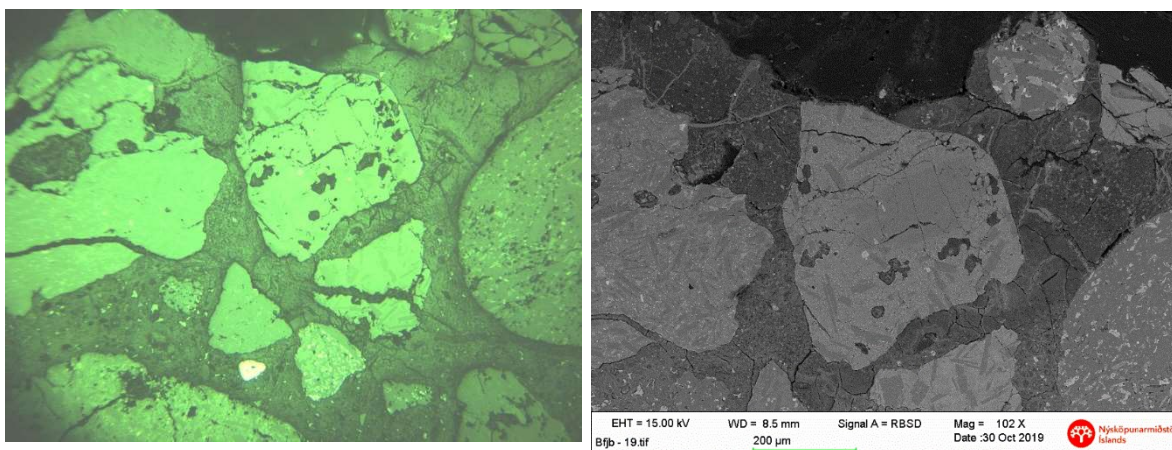


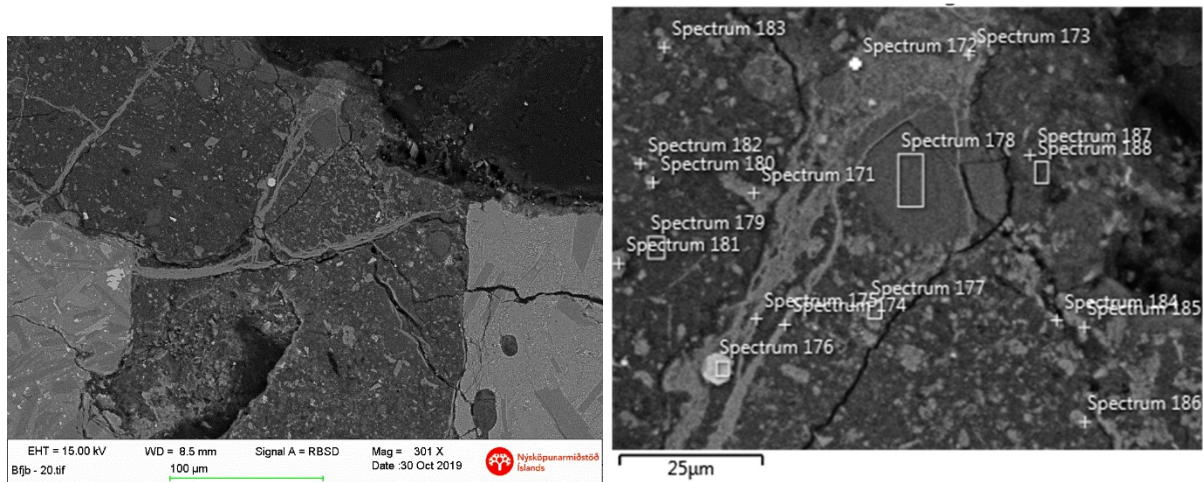
Mynd 19. Rafeindasmásjármyndir af steypu við yfirborð, á efri myndinni má sjá plasttrefja. Neðri myndin sýnir örprungur og staðsetningar á efnagreiningum.

Tafla 11. Niðurstöður efnagreininga með rafeindasmásjá á sprungufyllingum, bygðarprósentur.

	Meðaltal 155-163	Meðaltal 166-170
O	21.30	30.15
Mg	3.62	2.21
Al	1.15	8.72
Si	5.20	4.79
S	1.18	0.31
Ca	25.01	25.91
Ti		0.61
Fe	0.55	14.67
Heild:	58.14	87.42

Á Mynd 20 má sjá orsprungur við yfirborð. Samsetning útfellinganna er sýnd í Tafla 12. Sprungufyllingin virðist aðallega vera kalsíum karbónat, en nokkuð greindist af öðrum efnum, eins og kísili, magnesíum, járni og áli.





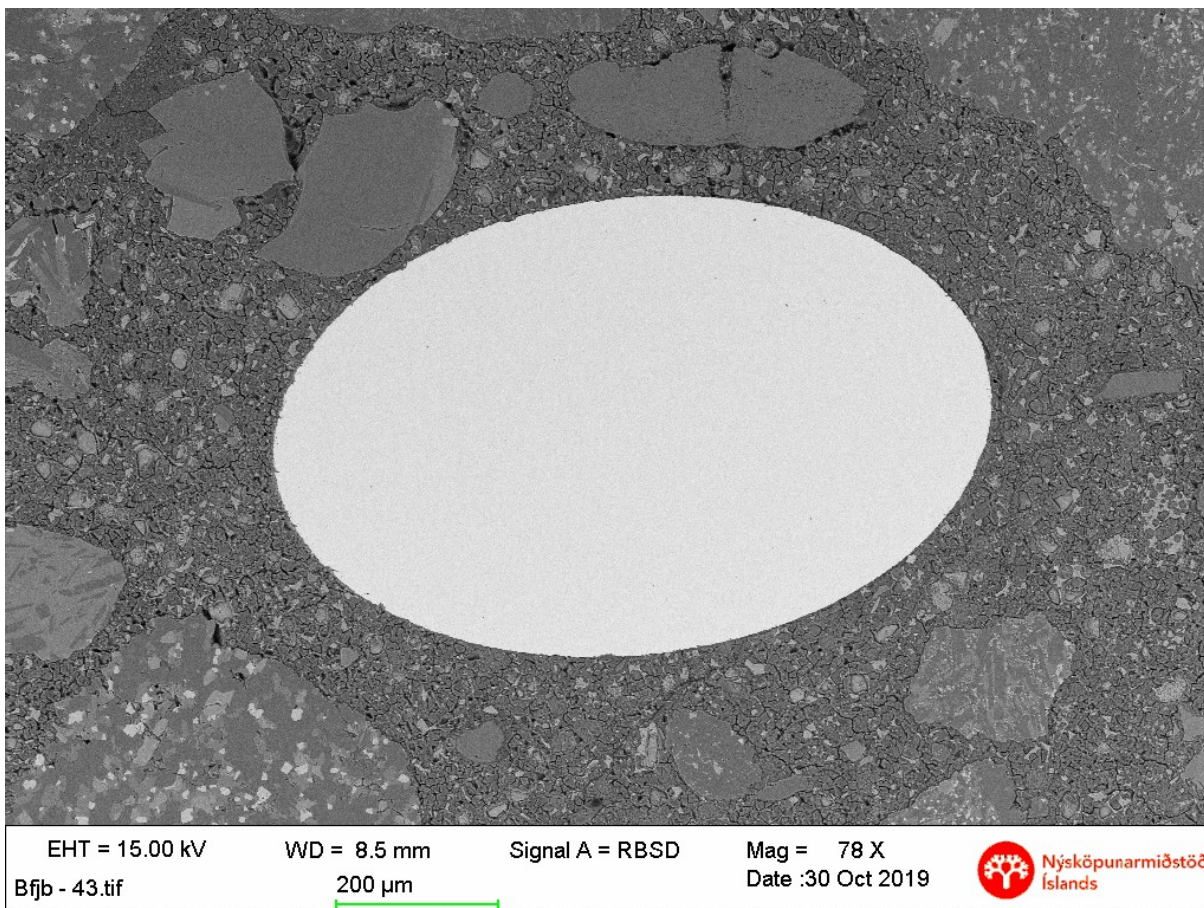
Mynd 20. Efsta myndin til hægri er tekin í ljósmásjá í tiltölulega lítilli stækkun, myndin er hluti af samsettri mynd, sjá Mynd 24. Hinar þrjár myndirnar eru rafeindasmásjármyndir af sprungum við yfirborð. Neðri myndin til hægri sýnir staðsetningar á efnagreiningum.

Samsetning á sementsefju var rannsökuð við yfirborðið, á um 15 mm dýpi og um 30 mm dýpi frá yfirborði. Niðurstöður efnagreininganna er sýndar í Tafla 12.

Tafla 12. Samsetning á sementefju við yfirborð, á um 15 mm dýpi og um 30 mm dýpi.

	Meðaltal 282-293	Meðaltal 295-298 og 308-310	Meðaltal	Meðaltal
	Við yfirborð	Við yfirborð	15 mm dýpi frá yfirborði	30 mm dýpi frá yfirborði
O	22.73	25.26	32.32	31.10
Mg	9.70	10.92	1.04	1.23
Al	2.32	1.96	4.01	3.89
Si	11.38	13.08	14.43	14.96
S		0.18	0.48	0.66
Cl	0.57	0.39		0.40
Ca	1.29	1.74	22.99	19.62
Fe	2.64	1.58	2.74	2.74
Heild:	50.71	55.13	78.56	74.60

Á Mynd 21 er sýnd dæmi um stáltrefja á um 30 mm dýpi. Ekki er að sjá nein merki um tæringu í trefjanum. Trefjinn er gerður úr 100 % járni (Fe).



Mynd 21. Rafeindasmásjármynd af þverskurðir af stáltreffja. Þvermál treffjans í sniðinu mældist 0.5 mm þar sem það er minnst. Treffjinn er gerður úr hreinu járn (100 %).

Samantekt

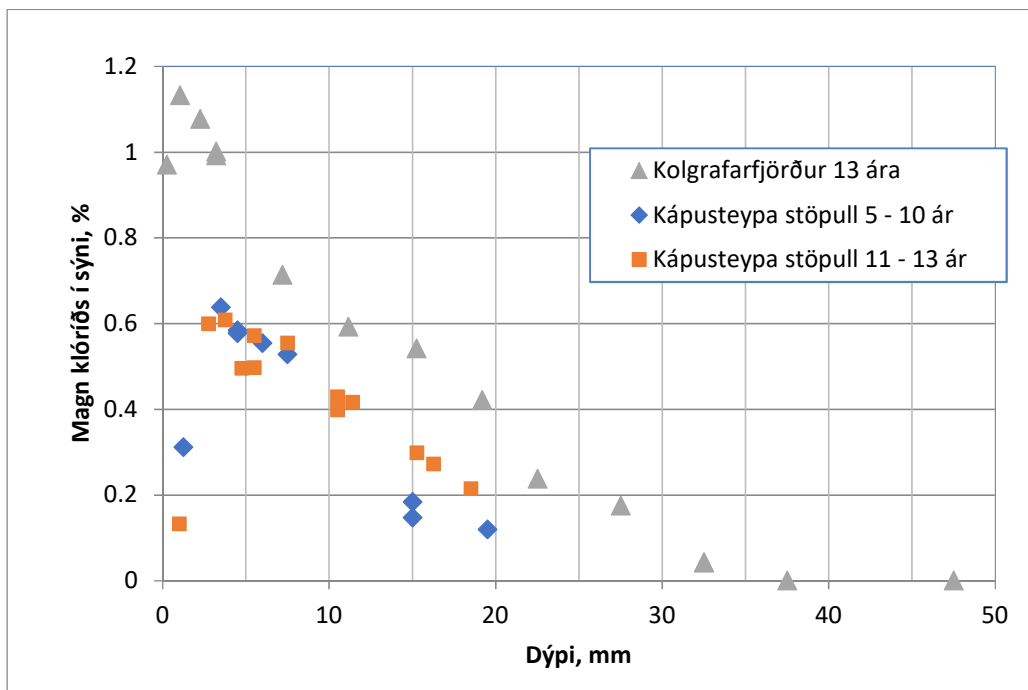
Stöplar Borgarfjarðarbrúar eru alls 12 talsins og hafa þeir allir verið klæddir með kápusteypu til þess að verja þá frekari steypuskemmdum. Tveir þessara stöpla voru varðir með s.k. hágæðasteypu. Kápusteypan sem var úr hágæðasteypu er ekki hluti af þessari rannsókn. Tíu stöplar voru varðir með sjálfútleggjandi steypu, þar af voru níu stöplar varðir með innbyrðis sambærilegri steypu, þ.e. sementstegund og fylliefni voru þau sömu í steypunum. Um var að ræða Álaborgar Portland hraðsment, með kísilryki. Kísilrykinu var ýmist blandað út í sementið í Helguvík, þar sem því var blásið saman við sementið eða því var bætt út steypublönduna í steypustöð. Fylliefni voru frá Harðakambi á Snæfellsnesi. Hlutföll steypuefna voru svipuð í öllum steypublöndunum.

Skemmdir hafa komið fram í kápusteypu í fimm stöplum af þessum 12, þar af einum sem steypur var úr s.k. hágæða steypu. Skemmdirnar í kápusteypu úr sjálfútleggjandi steypu eru ekki alvarlegar, takmörkuð yfirborðsflögnun hefur átt sér stað þar sem um 5 til 7 mm hafa flagnað af steypunni þar sem flögnunin er mest. Flögnunin hefur átt sér stað á 10 árum í stöpli 5 og á 13 árum í stöpli 11. Athyglisvert er að elstu steypurnar sem eru 14 til 16 ára gamlar hafa mun minni yfirborðsflögnun. Ekki er hægt að finna neina ástæðu tengda steypugerð eða verklag sem gæti gefið vísbendingu um ástæðu fyrir meiri flögnun í þessum tveimur stöplum.

Eins og sjá má á Mynd 22 er mun minna klóríð í stöplum 5 og 11 í samanburði við stöplusteypu í Kolgrafarfjarðarbrú⁶. Aldur þessara steypa er svipaður, en Kolgrafarfjarðarbrú var 13 ára þegar sýni

⁶ Gísli Guðmundsson, 2018. Steypa í Sjávarfallaumhverfi. MV 2017-015.

voru tekin þar. Niðurstöðurnar bera vott um þetta sementsefju í kápusteypunum. Steypan í stöplum Kolgrafarfjarðarbrúar hafði lágmarks sementsmagn um 400 kg/m^3 , þar af var 7,5 % kísilryk og v/s hlutfallið var minna eða jafnt og 0,4. Kápusteypan hafði meira en 500 kg/m^3 af sementi og var auk þess blönduð kísilryki, sjá Tafla 1. Útreiknaður leiðnistuðull fyrir klóríð í þessum steypum er mjög svipaður, en munurinn liggur í yfirborðsgildi fyrir klóríð í steypunni. Í Kolgrafarfirði er yfirborðsgildið um 1,2 % klóríð af steypubunga, meðan það er um 0,7 % fyrir kápusteypuna.

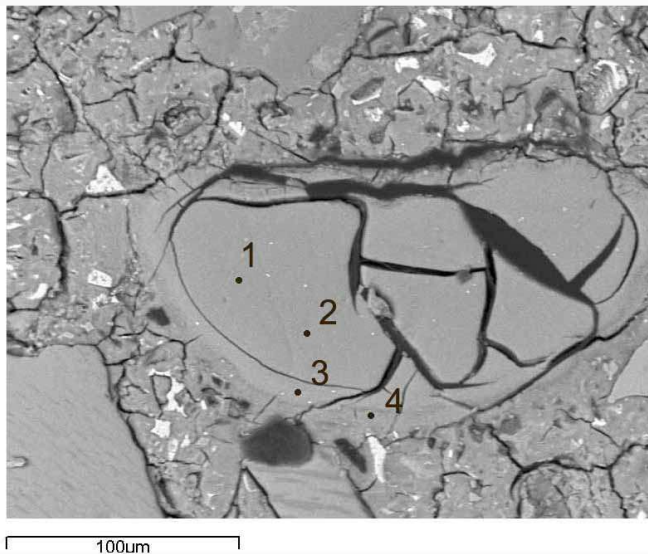


Mynd 22. Magn klóríðs, sýnt í % af þyngd sýnis sem fall af dýpi frá yfirborði inn í steypuna fyrir steypusýni úr stöplum 5 og 11. Til samanburðar eru sýndar niðurstöður mælinga á klóríðleiðni í stöplum Kolgrafarfjarðarbrúar⁴. Öll sýnin eru tekin úr neðsta hluta sjávarfallabeltis.

Steypuskemmdir í sjávarfallaumhverfi hér á landi lýsa sér allar á svipaðan hátt, sementsefjan flagnar af og tiltölulega stór fylliefniskorn sitja eftir, uns sementsefjan hefur flagnað svo mikið að fylliefni missa alla festu í henni og falla af. Þannig lýstu skemmdir í stöplum Borgarfjarðarbrúar¹ sem og í Óseyrarbrú⁴ sér, einnig fannst vísir að slíkum skemmdum í stöplum Kolgrafarfjarðar⁴.

Á sínum tíma var gerð umfangsmikil rannsókn á skemmdum í stöplum Borgarfjarðarbrúar. Steypublandan sem verið var að þróa var notuð til að steypa utan um stöpul (sjá Tafla 4)⁷. Í steypunni var algengt að finna kísilrík svæði, eins og sýnt er á Mynd 23. Myndin sýnir kísilrykskekk í prufusýni eftir að búið var að prófa sýnið í frost/þíðuprófun í 56 umferðir með 3 % saltlausn. Þessi svæði voru talin vera kísilrykskekkir. Efnagreiningar sýndu að um var að ræða kísil- og kalsíumrík svæði. Ef um er að ræða kísilryk, þá hefur það tekið upp tiltölulega mikið af kalsíum og tapað kísli. Þessar greiningar svipa nokkuð til greininga sem voru gerðar á kísil- og kalsíumríku hlaupi sem fundust í kápusteypu úr stöpli 11, sjá Tafla 10, þó er kísilmagnið töluvert lægra og kalsíummagnið hærra. Við samanburð á þessum tveimur sýnum, ber að hafa í huga að ef um er að ræða kísilrykskekki í steypu úr stöpli 11, þá hefur kísillinn haldið áfram að ganga út úr kísilrykinu og inn í sementsefjuna og kalsíum komið inn í staðinn.

⁷ Gísli Guðmundsson, 2004. Ending Sjálfútleggjandi Steinsteypu, RB-04-07, 31 bls.



Efnagreining á kísilyki, þyngdarprósentur sem oxíð.

	1	2	3	4
SiO ₂	68.72	63.64	62.89	52.51
Al ₂ O ₃	0.4	0	0	1.25
Fe ₂ O ₃	0	2.06	0.35	0.76
MgO	0.71	0.49	0.46	1.01
CaO	10.87	10.46	17.45	20.79
Na ₂ O	0.59	0.59	0.49	1.25
K ₂ O	2.71	2.52	2.01	3.14
SUM	84.0	79.8	83.7	80.7

Mynd 23. Rafeindasmásjármynd af sprungunum kísilykskekk, sjá má staðsetningar þar sem 4 efnagreiningar voru gerðar. Í töflunni til hægri eru niðurstöður efnagreininganna sýndar sem oxíð. Myndin og taflan eru teknar frá Gísla Guðmundssyni, 2004.

Þegar sýni úr stöplum Borgarfjarðarbrúar voru rannsökuð fannst engin vísbending um thaumasit eða gifsmyndanir í sprungum, í þeim fannst aðeins ettringit ($3\text{Ca Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$). Það út af fyrir sig útilokar ekki að thaumasit eða gifs hafi myndast. Ólíklegt verður að telja að ettringit eitt og sér sé aðal orsakavaldur skemmda í stöplum Borgarfjarðarbrúar. Líklegra er að aðrar steindir eins og thaumasit og/eða gifs hafi tekið þátt í skemmdaferlinu. Ettringit er algeng steind í steypu og almennt ekki talin vera skaðvaldur. Sýni úr Óseyrarbrú voru rannsökuð í fyrri áfanga þessarar skýrslu, sjá Gísl Guðmundsson⁸. Óseyrarbrú var steipt 1986 og flögnun hefur komið fram í stöplum hennar. Þar sem flögnunin var mest höfðu um 30 mm flagnað af steypunni þegar sýni voru tekinn úr brúnni 2017. Þetta gerir um 1 mm flögnun á ári þar sem hún er mest. Sprungur liggja um efri hluta steypunnar bæði samsíða og hornrétt á yfirborð hennar. Í sprungum og holrúmum í steypunni eru fyllingar sem eru m.a. thaumasit og gifs, sem og ettringit og kalsíum karbónat fyllingar. Segja má að skemmdir í Óseyrarbrú og mögulega í stöplum Borgarfjarðarbrúar sem og í kápusteypu úr stöpli 11 séu svipuð ferli, n.l. s.k. súlfatskemmdir sem byggja á myndun thaumasit og gifs. Thaumasit myndast að öllu jöfnu við tiltölulega hátt pH en gifs við lægra pH (sýrustig, í óskemmdri steypu er pH gildið um 13). Til þess að thaumasit geti myndast þarf auk kalsíum og brennisteins, kísil og kolefni. Í steypu er enginn skortur á kalsíum og það er mjög hreyfanlegt. Eins og kom fram í þessari rannsókn þá hefur kalsíum skolast út úr sementefjunni og reyndar tekið upp magnesíum, sjá Tafla 12. Væntanlega nýtist þetta kalsíum í myndun sprungufyllinga, eins og thaumasit, kalsíum karbónat, gifs og/eða ettringit. Brennisteinn er einnig til staðar í steypu og væntanlega kemur brennisteinninn einnig úr steypunni, en í sjávarumhverfi getur steypa einnig tekið upp brennistein úr sjónum. Á Íslandi eru engin kolefnisrík fylliefni og því hlýtur kolefnið að koma úr andrúmslofti. Kísillinn kemur væntanlega úr kísilríku hlaupi eins og því sem finnst í kápusteypu úr stöpli 11. Ef kísill eða kolefni eru ekki fyrir hendi eru líkur á að ettringit myndist, kalsíum karbónat myndast en það er þó stöðugt við tiltölulega lágt pH. Einnig er gifsmyndun hluti af svona ferli, en það er einnig stöðugt við tiltölulega lágt pH. Myndun thaumasit og gifs er verulegur skaðvaldur þegar myndun þeirra verður umfangsmikil. Þótt thaumasit

⁸ Gísl Guðmundsson, 2019. Steypa í Sjávarfallaumurverfi. Annar áfangi. MV 2019-002.



hafi fundist í kápusteypu úr stöpli 11 eru litlar líkur taldar á því að umfang skemmdanna verði verulegt. Steypan er mjög þétt og trefjastyrkt. Því er ólíklegt að svona skemmdir nái sér á strik.

Baríum og strontíum fundust í brennisteinsríkum fasa staðbundið umhverfis eitt fylliefni, sjá Mynd 13. Uppruni þessara efna er óljós, bæði efnin eru ólageng í íslensku fylliefni og því ólíklegt að uppruni efnanna sé tengdur fylliefnunum. Væntanlega er uppruni þessara efna tengdur sementinu. Þar sem myndun þessara fasa er mjög staðbundin, er talið að hún hafi engin áhrif á endingu steypunnar.

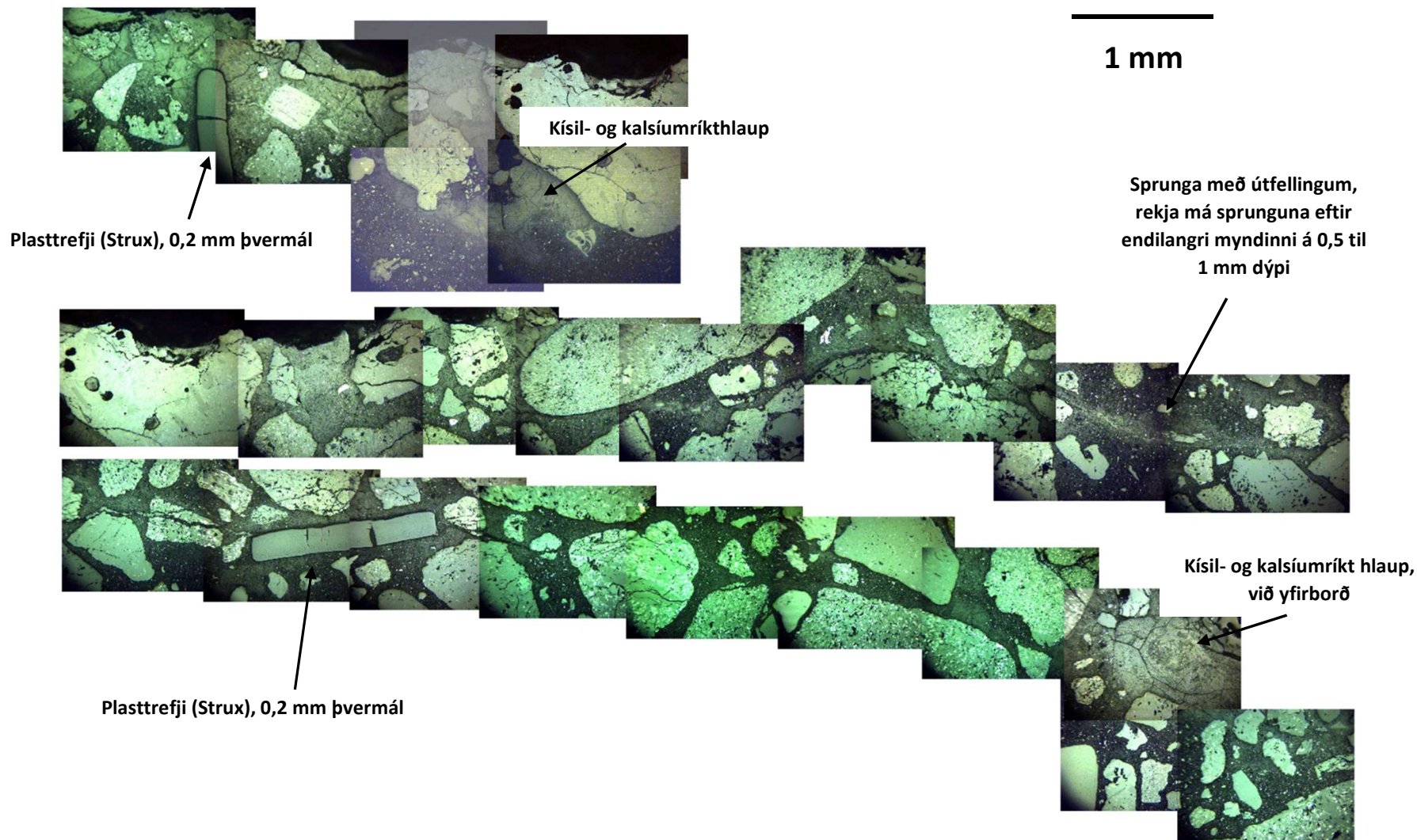
Ekki er talin nein hættu á því að nota sambærilega steypu, þ.e.a.s. sjálfútleggjandi steypu í sjávarfallaumhverfi í líkingu við steypur sem notaðar voru í kápusteypur í Borgarfjarðarbrú. Hafa verður í huga að steypuskemmdir eins og komu fram í stöplum 5 og 11 eru skammt á veg komnar. Ef mesta flögnun í svona mannvirki er 7 mm á 13 árum, er flögnunin um 0,5 mm á ári. Á tuttugu árum væri mesta flögnun um 1 cm, sem verður að teljast vel viðunandi. Einnig ber að hafa í huga að engin eða mjög lítil flögnun fannst við sjónskoðun í 8 af 10 stöplum sem voru steyptir úr sjálfútleggjandi steypu. Yfirborðsflögnunin er töluvert minni en í Óseyrarbrú sem og í upphaflegum stöplum Borgarfjarðarbrúar.

Þegar verið var að þróa steypuuppskriftir fyrir kápusteypu í Borgarfjarðarbrú var stuðst við frost/þíðuprófun bæði sem flögnunarprófun með 3 % saltlausn og sem innri skemmdir með hreinu vatni. Einnig var klóríðleiðni prófuð og klóríðleiðnistuðull ákvarðaður. Til stuðnings við val á bindiefni í steypu í sjávarfallaumhverfi voru óstaðlaðar prófunaraðferðir notaðar⁹. Þær gengu út á að láta steypusýni liggja í súlfatríkum lausnum í 12 mánuði og síðan var árangurinn metinn með sjónskoðun og smásjárrannsókn. Slíkar prófunaraðferðir geta verið árangurríkar sem hluti forrannsókna, en þær eru óæskilegar sem „performance“ prófanir, sökum tímalengdar, auk þess sem lítil reynsla er af slíkum prófunum hér á landi.

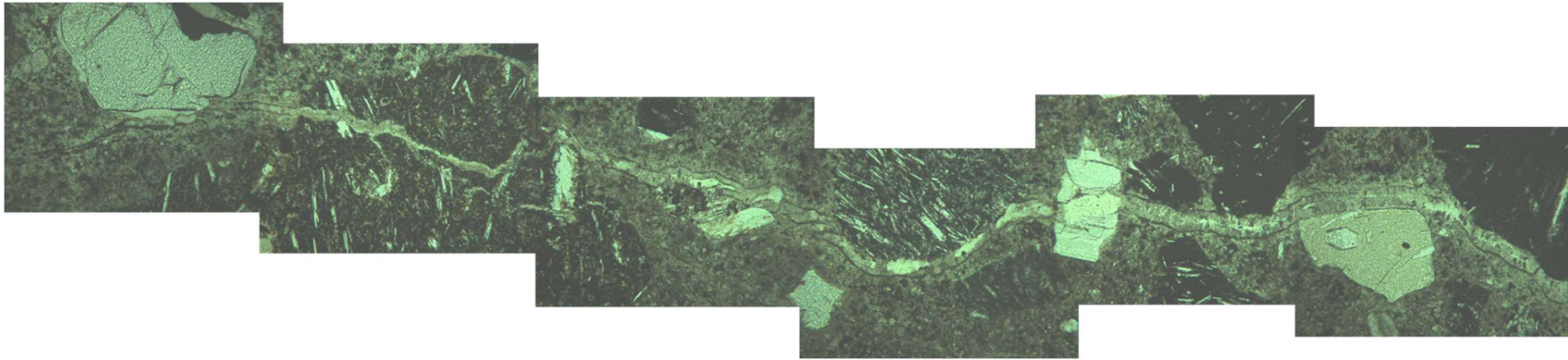
Þegar búið var að finna endanlega steypublöndu og niðurlögn steypu fór fram, voru sýni tekin til prófunar á frostþoli, eingöngu með flögnunarprófi í 3 % saltlausn. Sýnt hefur verið fram á að áhrif frost/þíðu á stöplusteypu í sjávarfallaumhverfi eru væntanlega hverfandi¹⁰. Því má spyrja hvort það sé eðlilegt að prófa svona steypu m.t.t. frostþols. Svar við þeirri spurningu er ekki ljóst. Hins vegar má segja að þar sem engin önnur sambærileg prófunaraðferð er fyrir hendi, a.m.k. ekki sem reynsla er af hér á landi, sé frostþolsprófun eins og flögnunarprófun í 3 % saltlausn ágætis lausn, uns aðrar prófunar aðferðir sem eru sérsniðnar að súlfatskemmdum verði að viðurkenndum prófunaraðferðum. Þar sem um óloftblendna steypur er að ræða má e.t.v. segja að frostþolin steypa sé einnig súlfatþolin, þ.e.a.s. hún hafi nægjanlega styrk til þess að standast áraun frostþíðu sem og súlfatvirkni.

⁹ Gísli Guðmundsson, 1997. Steypa í Ágengu Umhverfi. Ómerkt skýrsla til Vegagerðarinnar, dagsett 16.12.1997.

¹⁰ Gísli Guðmundsson, 2003. On site monitoring of high performance concrete during freeze/thaw cycles and relationship to standardized testing. Ráðstefnuhefti: IBAUSIL - 15th International Baustofftagung, F.A. Finger – Institut für BaustoffkundeAt: Weimar Germany Volume: Proceedings 15th International Baustofftagung, F.A. Finger – Institut für Baustoffkunde



Mynd 24. Samsett ljósmásjámynd (áfallandi ljós) af yfirborði steypu úr stöpli 11. Stærðarskali er sýndur til viðmiðunar, en hver myndarammi er 1,04 x 1,36 mm. Myndin nær mest um 2 mm ofan í steypuna. Sjá má sprungu sem gengur eftir endilangri myndinni á u.þ.b. 0,5 til 1 mm dýpi. Útfellingar eru í sprungunni og sjá má hvar sprungan sker fylliefni. Einnig má sjá tvö svæði við yfirborð þar sem kísil- og kalsíumríkt hlaup hefur safnast saman.



Mynd 25. Samsett smásjármynd af sprungu við yfirborði steypu úr stöpli 5, sprungan er á um 1 mm dýpi. Sprungan er fyllt thaumasit. Hver myndarammi er 0,52 x 0,67 mm.