

Undersøking av langtids-eksponerte armeringsfibrar

Armeringsfibrar eksponert for kloridholdig tunnelvann i Oslofjorden testfelt

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 950



Tittel

Undersøking av langtids-eksponerte armeringsfibrar

Undertittel

Armeringsfibrar eksponert for kloridholdig tunnelvann i Oslofjorden testfelt

Forfatter

Per Hagelia

Avdeling

Konstruksjoner

Seksjon

Konstruksjonsteknikk

Prosjektnummer

L10449

Rapportnummer

950

Prosjektleder

Lise Bathen

Godkjent av

Øyvind Bjøntegaard

Emneord

Armeringsfiber, kloridholdig tunnelvann, tilstandsutvikling, levetid, bakteriell vekst, eksponeringsklasse XA3 og XS2

Sammendrag

Oslofjord testfelt omfattar blant anna langtidstesting av fleire ulike armeringsfibrar. Denne rapporten omhandlar resultatane frå langtidstesting av armeringsfibrane frå testfeltet, utført i 2022-2023:

- Fibrar eksponert frå mars 2016 til september 2022 (6 ½ år). Fibrane har vore direkte eksponerte for grøftevatna.

- Fiber innstøpt i betongplater (12 stk v/b 0,4 og 12 stk v/b 0,8) eksponert frå juni 2019 til september 2022 (3 ¼ år). Platane har vore delvis neddykka.

Rapporten er bestilt av seksjon for Konstruksjonsteknikk, Vegdirektoratet og utarbeida av seksjon Fagressurs Geofag, Utbyggingsdivisjonen.

Title

Examination of long-term exposed reinforcing fibers

Subtitle

Reinforcing fibers exposed to salty tunnelwater in the Oslofjord testfield

Author

Per Hagelia

Department

Structures

Section

Structural Engineering

Project number

L10449

Report number

950

Project manager

Lise Bathen

Approved by

Øyvind Bjøntegaard

Key words

Reinforcement fibres, salty tunnelwater, durability, bacterial growth, exposure class XA3 and XS2

Summary

The Oslofjord testfield includes long-term testing of different types of reinforcing fibers. This report presents results from long-term testing of the reinforcing fibers:

- Fibers directly exposed to ditch water from March 2016 to September 2022 (6 ½ years).

- Fibers embedded in concrete, test slabs, exposed from June 2019 to September 2022 (3 ¼ years). The slabs have been partially submerged.

The report has been commissioned by Structures, Structural Engineering, NPRA Legislation and Regulatory Authority and prepared by Planning and Engineering Services, Geomechanics, NPRA Construction.



Statens vegvesen

Laboratorium for petrografi og bildeanalyse

Statens vegvesen
Postboks 6706 Etterstad, 0609 OSLO



Rapportnummer: PB23/1

Dato: 2023-04-28

Sider inkl. vedlegg: 97

Oppdragsgjevar/prosjekt:

L10449 Nye sementer og bindemidler. v/ Lise Bathen, Konstruksjonsteknikk, Statens vegvesen

**Undersøking av langtidseksponerte armeringsfibrar
i Oslofjord testfelt**

Prøvemateriale:

Antal prøver: 20
Type prøve: Fiber og plateprøver med fiber eksponert for salt tunnelvatn
Dato prøvetaking: 2022-09-06

Undersøking:

Undersøkt av: Per Hagelia (Geofag Utbygging – Statens vegvesen).
Siri Simonsen (Institutt for geofag – Universitetet i Oslo).
Prøvemethodikk: Mikroskopering med binokularlupe og analyse med Scanning
elektronmikroskop (SEM)
Datoar undersøkt: 2022-10-14, 2022-11-03 & 2022-11-08

Innhold

1 Bakgrunn, problemstilling og utplasserte prøver:.....	3
1.1 Fibrar direkte eksponerte for grøftevatn	3
1.2 Plateprøver med armeringsfibrar	4
2 Eksponeringsforhold:.....	6
2.1 Vatn og partiklar	6
2.2 Bakteriell vekst	8
3 Resultat:.....	8
3.1 Direkte eksponerte fibrar	8
3.1.1 Visuell vurdering.....	8
3.1.2 SEM av fibrar etter 6 ½ års direkte eksponering i Grøft A og Grøft B	10
3.2 Plateprøver med fibrar	14
3.2.1 Visuell undersøkning av kjerner	14
3.2.2 Undersøkning av betongfragment med fiber i binokular for uttak til SEM-analyse	15
3.2.3 SEM-analyse av fiber frå plateprøver etter 3 1/4 års eksponering i Grøft A & Grøft B	17
4 Oppsummering og konklusjon:	24
4.1 Generelt.....	24
4.2 Hovedresultat.....	24
4.2.1 Barchip 54.....	24
4.2.2 MasterFiber 246 polypropylenfiber	25
4.2.3 Reforcetech AR glass Minibars™ med zirkonium	25
4.2.4 Reforcetech Basalt FRP Minibars™	25
4.2.5 Dramix fiber med Cr-Ni stål.....	26
4.2.6 Dramix RC-65/35-BN med sinkbelegg	26
4.3 Avsluttande merknader	26
Referansar	28

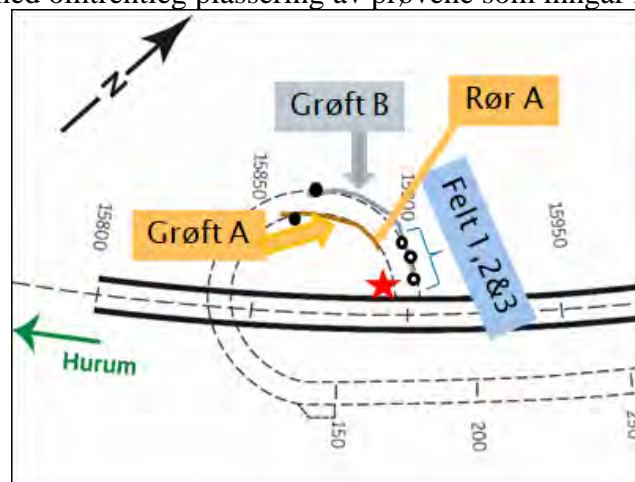
1 Bakgrunn, problemstilling og utplasserte prøver:

Statens vegvesen har behov for å skaffe fram dokumentasjon om tilstandsutvikling og levetid for materiala vi brukar i tunnel. Oslofjord testfelt blei etablert av Statens vegvesen i 2010. Det er hittil utført testing av sprøytebetong og utstøpte prøver, med planar om oppfølging etter nokre år (Hagelia 2019). I 2013 blei det etablert eit eige område for langtidstesting av korrosjon på bergboltar (Klemetsrud 2016). Det er også utført undersøking av bakteriell nedbryting av sprøytebetong i tunnelen (Karačić 2021).

Testfeltet omfattar også langtidstesting av fleire ulike armeringsfibrar. Fibertesten omfattar følgjande:

- Direkte eksponerte fibrar plasserte i koffertar frå mars 2016 til 6 september 2022 (6 ½ år).
- Fiberarmerte betongplater eksponert frå 12-13. juni 2019 til 6 september 2022 (3 ¼ år)

Figur 1 viser testfeltet, med omtrentleg plassering av prøvene som inngår i fibertesten.



Figur 1: Testfeltet i Oslofjordtunnelen er lokalisert i omløpstunnelen nær pumpesumpen (stipla trasé). Prøvene med armeringsfiber er eksponerte nedstrøms i grøftene A og B (svarte punkt). Felt 1, 2 & 3 er området for langtidseksponering av sprøytebetong på berg. Testfeltet for bergboltar er plassert på vegg rett nedstrøms tilførsla til Grøft A frå Rør A.

1.1 Fibrar direkte eksponerte for grøftevatn

Seks ulike fibertypar blei plasserte under lokk i totalt fire plastkoffertar, med to koffertar (seriar) i kvar grøft. Koffertane er ikkje vasstette og fibrane er derfor eksponerte for grøftevatna. Kvar fibertype ligg ordna som ei matrise for uttak på fem forskjellige tidspunkt. Plastkoppene er dekte med filterduk for å unngå overslag mellom dei ulike fibrane og tidspunkta (Figur 2). Fibrane i kvar enkelt plastkopp er vegd inn individuelt for å kunne undersøke for evt. vekttap etter lang tids lagring (sjå matrise i Vedlegg 1).

Den opphavlege planen var å undersøke fibrane kvart år. Filterduken er derfor merka med årstal, men *planen blei endra*: Koppar merka «2016» blei først henta inn for visuell undersøking 12-13 Juni 2019. Det blei ikkje observert spesielle teikn på nedbryting i 2019, og derfor ikkje utført vidare undersøkingar. Prøvene er lagra ved Laboratorium Sørøst for evt. seinare analyse.

Fiberprøvene undersøkt i denne rapporten er frå plastkoppar merka «2017» som blei henta til laboratoriet i september 2022. Plastkoppar merka 2018, 2019 & 2020 blei ikkje henta inn og er fortsatt eksponerte i Grøft A og Grøft B.



Figur 2: Eksempel på koffertar med fiber i koppar arrangert som matrise. Sjå detaljar i Vedlegg 1.

Tabell 1 gir oversikt over prøvenummer og fibertypar. Fibrane i Grøft A er dei same som i Grøft B, medan vatna i dei to grøftene er litt forskjellige (sjå Kap 2 Eksponeringsforhold).

Tabell 1: Direkte eksponerte fibrar i Grøft A og Grøft B. Fibertypen merka med grått er ikkje undersøkt i denne rapporten.

Grøft A	Fibertype	Grøft B
Serie A-1-1	Dramix RC-65/35-BN* Stål	Serie B-1-1
Serie A-1-2	MasterFiber 246, Polypropylen, 40mm	Serie B-1-2
Serie A-1-3	Barchip 54, Polypropylen, 54mm	Serie B-1-3
Serie A-2-1	Reforcetech Minibars™ AR glass 55mm	Serie B-2-1
Serie A-2-2	Reforcetech Basalt FRP Minibars™, 55mm	Serie B-2-2
Serie A-2-3	Reforcetech kuttet basaltfiber, 8 mm, μ 16	Serie B-2-3

* Det knyter seg noko usikkerheit til om dette er same armeringsfiber som ble benytta i 2019, basert på kjemisk samansetning. Det er ikkje funnet grunnlag og andre data som tyder på dei ikkje har same produktamn då dei blei lagt ut i 2016.

1.2 Plateprøver med armeringsfibrar

Det blei støpt ut totalt 24 plateprøver med armeringsfiber på Laboratorium Sørøst ($40 \times 20 \times 8 \text{ mm}^3$) fordelt på to reseptar for undersøking av tilstandsutviklinga til seks ulike fibertypar ved eksponering i Grøft A og Grøft B. Det blei laga 12 plateprøver av kvar resept.

- Den eine resepten er basert på Standard FA-sement med vatn/bindemiddel forhold = 0,40. Dette er ein normal resept for betong i aggressivt undersjøisk miljø og meint for eksponering over mange år, og som først vil bli undersøkt på seinare tidspunkt.
- Den andre resepten er basert på Aalborg sement (prøver merka Aa) med høgt v/b = 0,80 (Tabell 2). Dette er ein «open betong» som ein reknar med vil vise teikn på nedbryting av sementpasta og gje informasjon om tilstandsutviklinga til dei ulike fibrane etter forholdsvis kort eksponeringstid.

Dei to reseptane er dokumenterte i Vedlegg 2. Plateprøvene med v/b = 0,80 blei henta i Oslofjordtunnelen 6 september 2022. Prøvene blei spylt, deretter blei det bora ut to sylindrar ($\Phi = 50$ mm) frå kvar plate den 10 oktober 2022:

- Den eine sylindren blei reservert for visuell dokumentasjon.
- Den andre sylindren blei trykt i betongpresse den 11. oktober 2022 for uttak av fibrar inni betongen for undersøking i SEM.

Sylindrane blei bora ut nær eine enden av kvar plate med plass for nye sylindrar for undersøking på to seinare tidspunkt. Plateprøvene blei deretter returnert til Oslofjorden testfelt den 01. november 2022 for vidare eksponering.



Figur 3: Eksempel på fiberarmerte plateprøver frå Grøft A (venstre) og Grøft B (høgre) laga med Ålborg sement og masseforhold = 0,80 (før utboring). Det blei bora ut to sylindrar ($\Phi = 50$ mm) av kvar plate med reservert plass for utboring etter vidare eksponering på to seinare tidspunkt.

Tabell 2: Plateprøver med Ålborg sement og $v/b = 0,80$ eksponert i Grøft A og Grøft B er undersøkt i denne rapporten. Prøver merka med grått blei ikkje undersøkt.

Grøft A Plate merka	Fibertype	Fiber- mengde/m ³	Grøft B Plate merka
A-Aa-1	Reforcetech Basalt FRP Minibars™, 55mm	8 kg	B-Aa-1
A-Aa-2	Reforcetech Minibars™ AR glass 55mm	8 kg	B-Aa-2
A-Aa-3	Reforcetech AR glass CEM FIL Minibars™ (kvit) 43mm	10 kg	B-Aa-3
A-Aa-4	Dramix RC-65/35-BN Stål (m/ sinkbelegg)	20 kg	B-Aa-4
A-Aa-5	Barchip 54, Polypropylen, 54mm	5 kg	B-Aa-5
A-Aa-6	MasterFiber 246, Polypropylen, 40mm	5 kg	B-Aa-6

2 Eksponeringsforhold:

2.1 Vatn og partiklar

Eksponeringsmiljøet er karakterisert ved sjøvassliknande grunnvatn. Det opphavlege sjøvatnet over tunnelen er modifisert av minerala langs sprekker i bergmassen og av bakteriell vekst. Grøft A har rennande vatn med rustfarga jernrike utfellingar knyta til organisk materiale/bakteriar, medan Grøft B har stillestående mørkt manganrikt vatn. Testfeltet er lokalisert i den djupaste delen av tunnelen der grunnvatnet og grøftevatna mesteparten av tida har høg salinitet. Vatnet i dei to grøftene blei analysert kjemisk fleire gongar i tida 2010 til 2016. Det blei registrert ein episode med innverknad av ferskvatn i 2012 (Hagelia 2019). Koffertane med direkte eksponerte fibrar og plateprøvene var/er til ei kvar tid fullstendig neddykka i grøftevatna. Tabell 3 viser vasskjemiske analysedata frå Grøft A og Grøft B (Figur 4), samanlikna med sjøvatn på 60 meters djup i Oslofjorden frå NIVA sin feltstasjon på Solbergstranda.



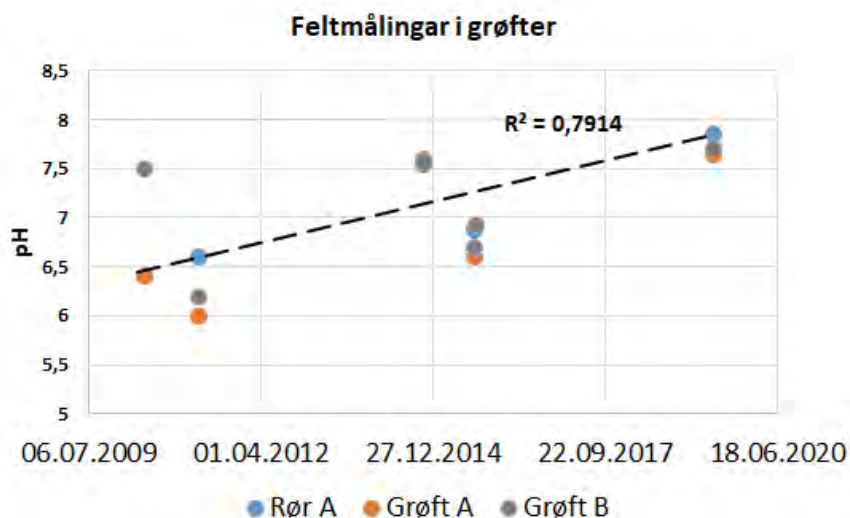
Figur 4: Foto av plateprøver i Grøft A (venstre) og Grøft B (høgre) frå juni 2010. Plateprøvene vist på bildet ($v/b = 0,40$ og $0,45$, med PP-fiber og stålfiber) blei undersøkte i etatsprogrammet Varige konstruksjonar. Prøvene for testing av direkte eksponerte fibrar og plateprøver med $v/b = 0,80$ i denne rapporten er plasserte i same område og er fullstendig neddykka. Alle prøvetypane er framleis representerte i grøftene for langtidseksponering.

Eksponeringsklassane for kjemisk angrep på sementpastaen (XA-klassar) er generelt definert ut frå pH og konsentrasjonar av Mg^{2+} , NH_4^+ , SO_4^{2-} og karbonsyre. Klassane for korrosjon på stål (XS-klassar) er i følge NS-EN 206 gitt ved ulike verbalt definert kontaktforhold med sjøvatn og er ikkje gradert etter kloridionekonsentrasjon. Innhaldet av ammonium og karbonsyre i grøftevatna ($NH_4^+ = 0 - 0,0035$ mg/L; karbonsyre ≈ 0 mg/L) og pH ($\approx 7-8$) er i følge standaren ikkje aggressive. Den kjemiske eksponeringsklassen etter NS-EN 206 er XA3 er her definert av Mg og sulfat basert på gjennomsnittsverdiar frå kvar grøft. Korrosjonsklassa i grøftevatna er XS2 («Permanent

neddykka»). Feltnmålingar av pH (Figur 5) viser større variasjon enn analysane i laboratoriet, og ved eitt tilfelle var pH i grøftene 6-6.2. Målingane i grøftene har konvertert mot pH = 7,5-8 over tid. Eh-verdiane (redokspotensialet) i Tabell 3 er gjennomsnitt av tre feltnmålingar i kvar grøft (2014-2016). Vatnet i Grøft B er oksiderande trass i at det er stagnant, medan vatnet i Grøft A (rennande vatn frå Rør A) er svakt reduserande. NS-EN 206 har ikkje krav til måling av redokspotensialet sjølv om dette kan ha betydning for korrosjon.

Tabell 3: Laboratorieanalysar av sjøvotn frå Oslofjorden og gjennomsnitt av Grøftene A og B frå seks ulike tidspunkt i tidsrommet 2010 til 2016. Dette er filtrerte vatn som representerer oppløyste anion og kation. Eh-verdiane blei målte i felt. Bikarbonat (HCO_3^-) er rekna ut frå analysar av alkalinitet. Eksponeringsklasser etter NS-EN 206. Data frå Hagelia (2019).

	Oslofjorden 60 m.u.h.	Grøft A (filtrert)	Grøft B (filtrert)
Na^+ (mg/L)	10800	10027	9590
Cl^- (mg/L)	18600	17083	15817
Mg^{2+} (mg/L)	1370	1185	1180
SO_4^{2-} (mg/L)	2630	2305	2163
Ca^{2+} (mg/L)	413	455	630
HCO_3^- (mg/L)	144	141	125
Fe^{total} (mg/L)	0,023	4,7	39,7
Mn^{total} (mg/L)	0,006	1,2	4,9
V^{total} (μL)	1	12,8	4,0
Zn^{total} (μL)	5	1,4	1,6
Mo^{total} (μL)	6	36	38
Cr^{total} (μL)	<3	1	5
pH	7,74	7,27	7,62
Eh (mV-ORP)	Ikkje målt	- 21	+67
Eksponerings-klasser	XA3 / XS2	XA3 / XS2	XA3 / XS2



Figur 5: Feltnmålingar av pH frå 2010 til 2019 viste nokså store variasjonar dei første åra. pH-verdiane i grøftene og Rør A har med tida konvertert til verdiar mellom 7,5 og 8. Data frå Hagelia (2019).

2.2 Bakteriell vekst

Bakteriell vekst (biofilm) med jern og mangan i undersjøiske tunnelar har av og til ført til tydeleg skade på fiberarmert sprøytebetong i Oslofjordtunnelen (Hagelia 2011, 2019). Begge grøftene har omfattande bakterievekst. Undersøkinga viste at direkte eksponert fiber i Grøft A er dominert av rustfarga jernrike utfellingar medan Grøft B har ei mørkare farge på grunn av høgare innhald av utfelt manganoksid. Det er vist at bakteriell vekst på sprøytebetong i Oslofjorden også er avhengig av tilgang på bl.a. Ca, Mg og V (Karačić mfl. 2019).

Grøft B har høgare innhald av oppløyst Ca, Fe og Mn enn Grøft A. Konsentrasjonane av oppløyst Zn, Mo, V og Cr er til samanlikning ganske låge. Oppløyst Zn og Mo er omtrent likt i begge grøftene, medan V er høgst i Grøft A og Cr er høgst i Grøft B (Tabell 3). Partikkelfraksjonane i Grøft A og Grøft B har ikkje svært forskjellig innhald av Fe, medan Mn, Ca, Mg, V, Zn, Mo og Cr er variabelt anrika i Grøft B (Tabell 4). Grøft B har størst totalkonsentrasjon av partiklar.

Tabell 4: Partiklar i Grøft A og Grøft B. Analysar utført i 2012-2016 oppgitt som variasjonsområde (mg/kg = ppm). Data frå Hagelia (2019).

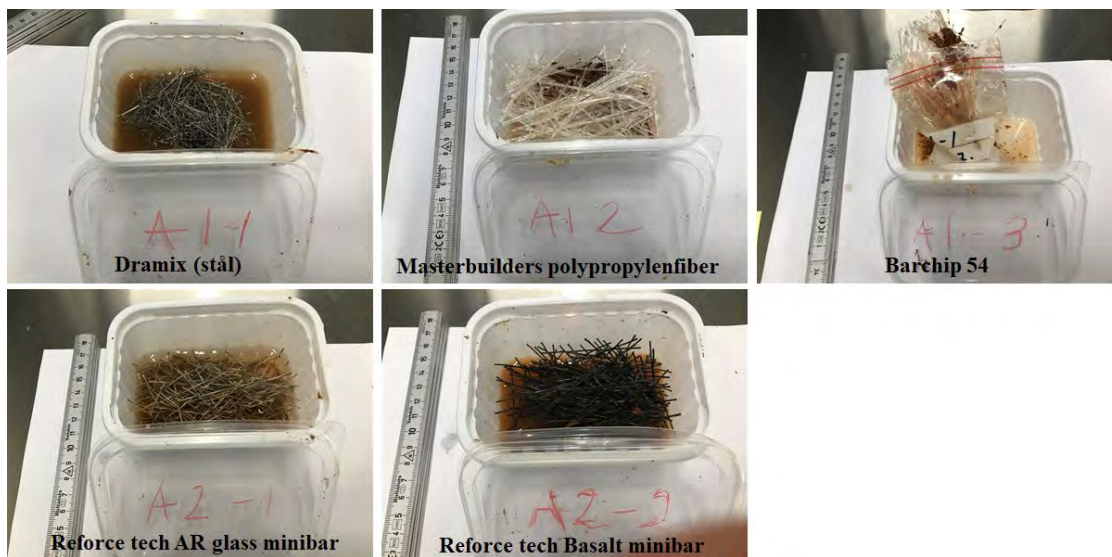
Element	Grøft A (mg/kg)	Grøft B (mg/kg)
Fe	69000-180000	82000-160000
Mn	15000-25000	48000-110000
Ca	5100-12000	26000-66000
Mg	1000-4000	8900-18000
V	2,3-27	22-65
Zn	9,3-51	130-300
Mo	77-150	77-360
Cr	1-10	15-38

3 Resultat:

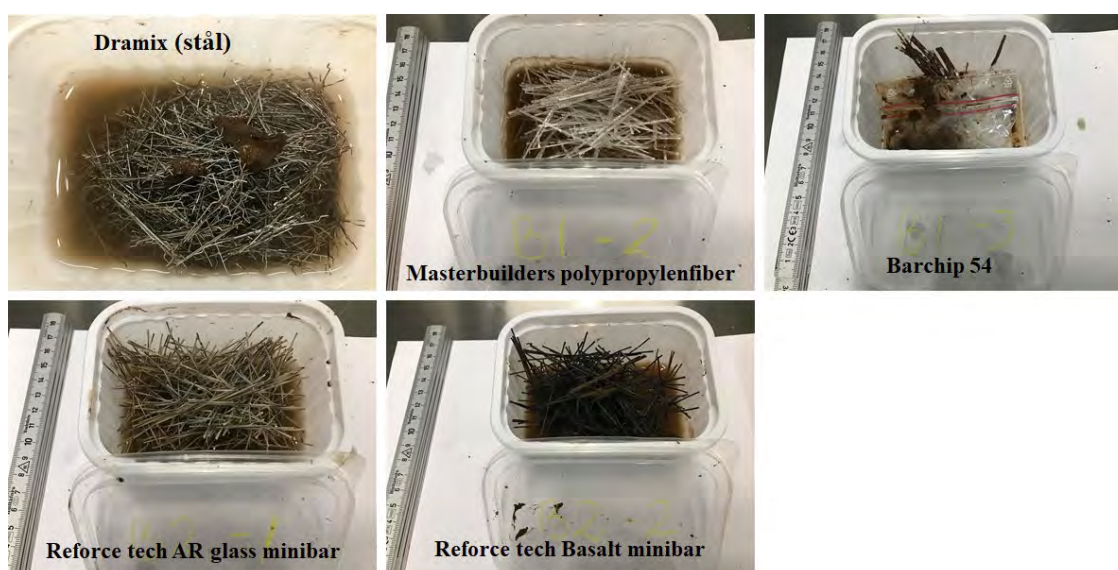
3.1 Direkte eksponerte fibrar

3.1.1 Visuell vurdering

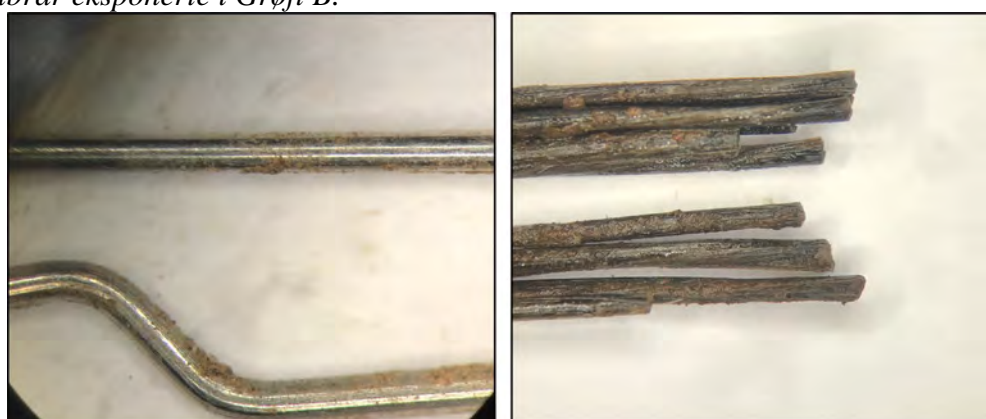
Direkte observasjon av fibrane og undersøking med binokularlupe gav eit første inntrykk. Figur 6 og 7 viser foto av fibrane frå hhv. Grøft A og Grøft B. Fibrane frå Grøft A hadde rustprega belegg/utfellingar medan fibrane i Grøft B hadde eit mørkare belegg. Dramix-fibrane hadde muleg teikn på begynnande korrosjon, men var generelt blanke/metalliske (Figur 8). Dei to polypropylenfibrane (MasterFiber 246 og Barchip 54) viste ikkje teikn på nedbryting av polypropylenmateriala, men hadde tydeleg oppflising med utfellingar av bl.a. bakterielt slim langs interne fibrar. Reforcetech AR glass Minibars™ og Reforcetech Basalt FRP Minibars™ var litt «skitne» på overflata med ujamnt belegg med biofilm (Figur 8). Det var vanskeleg å sjå eventuelle nedbrytingsfenomen.



Figur 6: Fibrar eksponerte i Grøft A.



Figur 7: Fibrar eksponerte i Grøft B.



Figur 8: Eksempel fotografert gjennom binokularlupe. Dramix stålfiber (venstre) og Reforcetech Basalt FRP Minibars™ (høgre) eksponert i Grøft A.

3.1.2 SEM av fibrar etter 6 ½ års direkte eksponering i Grøft A og Grøft B

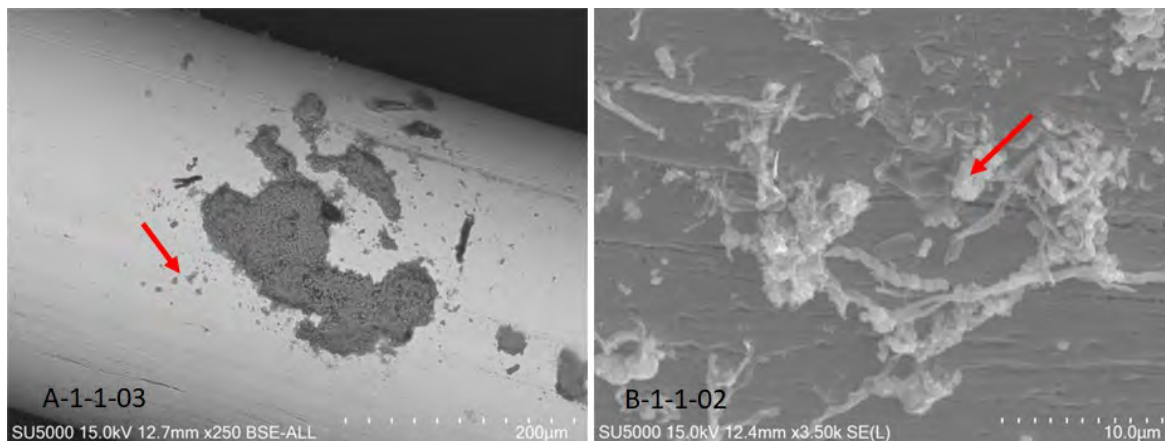
Undersøkinga i SEM fokuserte på 1-2 fibrar av kvar type. Uttaket blei gjort i binokularlupe som sikra at alle typiske trekk blei representert. SEM-analysane er semi-kvantitative. Alle prøvene blei pådampa med karbon før analyse og er praksis ujamt fordelt på prøvene, som gjer tolkingar av karbon delvis usikre. SEM-foto kombinert med mikrokjemiske analysar gav informasjon om fiberprodukt, tilstand og reaksjonsprodukt, inklusive bakterielle utfellingar. I realiteten finst det langt fleire slag bakteriar i tunnelen enn det vi kan sjå i SEM (Karačić 2021). I nokre tilfelle var det tidlege teikn på nedbrytingsreaksjonar. Lim og plast viste høgt innhald av C og O, men SEM-analyse kan ikkje skille mellom ulike organiske materialar. Resultata frå analyseområda er oppsummerte og tolka i Vedlegg 3. Analyserapportane frå UiO med data og SEM-foto frå totalt 18 område er gitt i Vedlegga 5 til 9. Tabell 5 oppsummerer resultata frå analysen med vekt på primære trekk i produkta og vurdering av tilstand.

Tabell 5: Direkte eksponerte fibrar, undersøkingar i SEM og tilstand etter 6 ½ år. Effekt av fysisk nedbryting ved mineralutfellingar er usikker.

Fibertype	Produkt	Nedbryting	Utfellingar	Tilstand
Dramix, Grøft A	Valsa stål m/ langsgående mikrosprekker	Litt pitting-korrosjon?	Stort sett på overflata utan	Svært god
Dramix, Grøft B		Litt korrosjon ved bakteriar	tilknytting til mikrosprekkar	God/svært god
MasterFiber 246, Grøft A & B	Langsgående delaminering	Mineralutfellingar på langsgående delaminering	På overflata & langsgående sprekker	Usikker effekt av delaminering
Barchip 54, Grøft A og B	Langsgående delaminering	Mineralutfellingar på langsgående delaminering	På overflata & langsgående sprekker	Usikker effekt av delaminering
Reforcetech AR glass Minibars™, Grøft A og B	Glasfiber og varierende liminnhald	Oppsprekking i limet med utfellingar	På overflata og i sprekker	Usikker mht. limet
Reforcetech Basalt FRP Minibars™, Grøft A og B	Glasfiber og svært varier. liminnhald	Bakteriell vekst på bekostning (?) av limet	På overflata og i sprekker	Usikker mht. limet

Dramix stålfiber

Grøft A. Analysen viste at denne stålfiberen inneheld *krom og nikkell*. Fiberen består av valsa stål med svært mange langsgående primære mikrosprekker (Figur 9). Område A-1-1-03 viser saltholdig rustutfelling knytta til bakteriar utan krom og nikkell: dette tyder på at rust er danna ved bakteriell utfelling utan bidrag frå stålfiberkorrosjon. Nokre små spreidde mørke punkt tyder på litt korrosjon. Rusta ser ikkje ut til å vere knytta til mikrosprekkane. Fiberen er i praksis fri for korrosjon trass i høgt kloridinnhald i vatnet. Årsaka ligg truleg i reduserande forhold i denne grøfta.

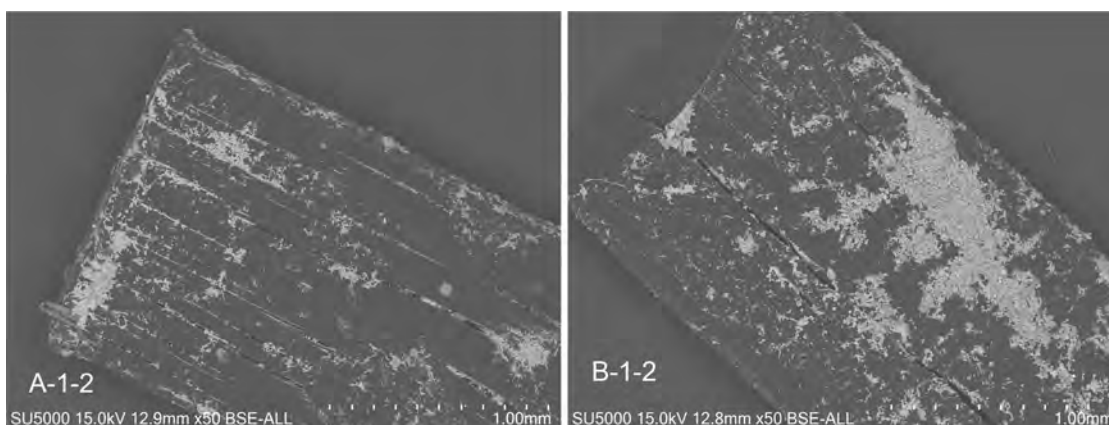


Figur 9: Grøft A (venstre BSE-bilde): Intakt Dramix Cr-Ni stålfiber med mulig pitting korrosjon (pil). Utfellingane midt på bildet inneheld ikkje Cr og Ni. Grøft B (høgre SE-bilde): Utfellingar knytta til bakteriar i Grøft B, med innslag av Fe rike reaksjonsprodukt med Cr og Ni (pil) som er korrosjonsprodukt danna frå stålfiberen. Inneheld også litt mangan. Den upåverka fiberen viser mange primære langsgående mikrosprekkar. Analysedata i Vedlegg 5.

Grøft B. Stålfiberen var eksponert for oksiderande forhold og viste sikkert teikn på korrosjon i område B-1-1-02 (Figur 9): nokre jernrike reaksjonsprodukt har innslag av krom som etter alt å dømme er derivert frå fiberen. Det meste var likevel tilsynelatande heilt upåverka og viser at denne stålfibertypen har høg motstand mot korrosjon i direkte kontakt med oksiderande salt grunnvatn.

MasterFiber 246

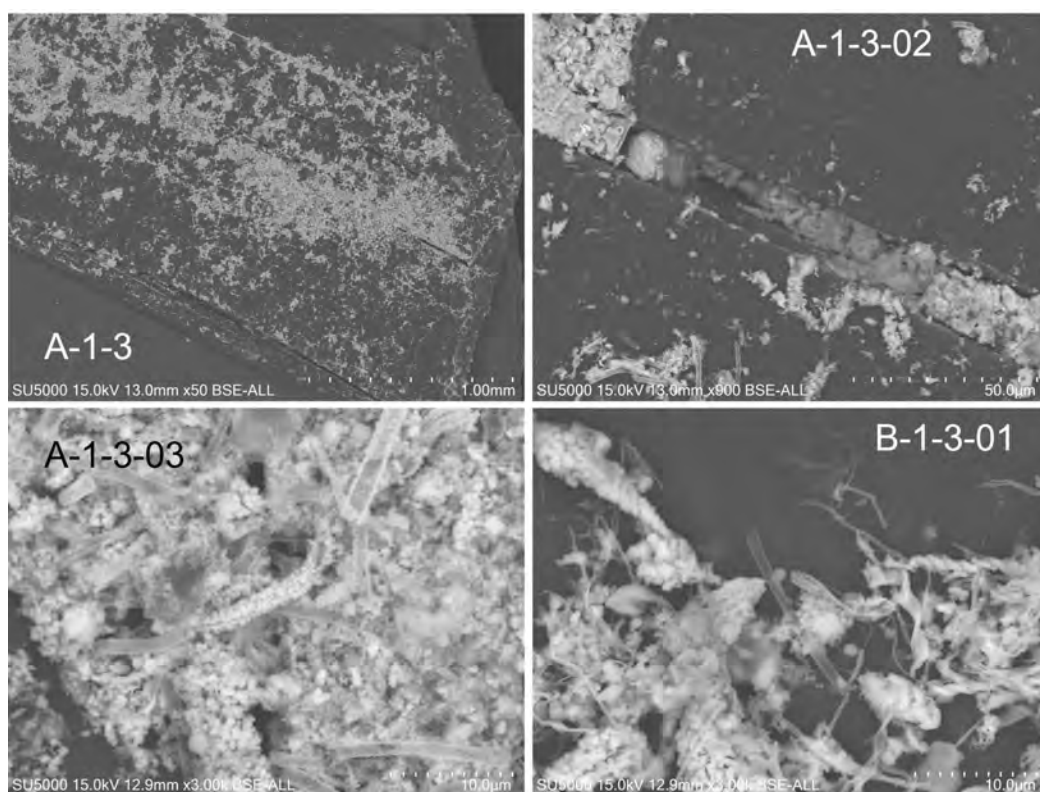
Grøft A og Grøft B. Denne polypropylenfiberen var til dels sterkt oppflisa med langsgående sprekkar, trass i at fibrane var forsiktig plasserte i plastkoppene og ikkje var påført deformasjon. Dette tolkast derfor som eit primært trekk i fiberen slik han ligg føre frå produsent. Plastmaterialet mellom sprekkane hadde ofte mange primære mikroskopiske luftbobler (eksempel område A-1-2-01 og B-1-2-01b i Vedlegg 6). Fibrane hadde utfellingar på sprekkane og vekst av bakteriar på overflata med tydeleg innslag av jernoksiderande hylsebakteriar og jernoksiderande *Mariprofundus ferrooxidans* (med vridde skrueforma avfallsprodukt danna ved metabolisme). Fibrane frå Grøft A hadde noko større innslag av hylsebakteriar enn fibrane frå Grøft B, som var typisk for alle fibertypar (eksempel vist i Figur 11). Det var ingen teikn på direkte bakteriell nedbryting av plastmaterialet i PP-fiberen. Analysane viste derimot utfelling av halitt (NaCl) og gips på overflater og sprekkar (Vedlegg 3 og 6). Det er muleg vekst av halitt og gips kan føre til utviding av dei primære langsgående sprekkane i fiberen, særleg ved gjentatte tørke-/fuktskyklar. Slike forhold er ikkje representert i forsøket, og det er ennå usikkert kor stor effekt delamineringa har på eigenskapane til fiberen. Det var elles ingen tydeleg forskjell på fibrar eksponert i Grøfte A og Grøft B.



Figur 10: Masterbuilders polypropylenfiber eksponert i Grøft A (venstre) og Grøft B (høgre). Fiberen er sterkt oppflisa med bakteriar og utfellingar både på overflata og på langsgåande sprekkar. Analysedata i Vedlegg 6.

Barchip 54

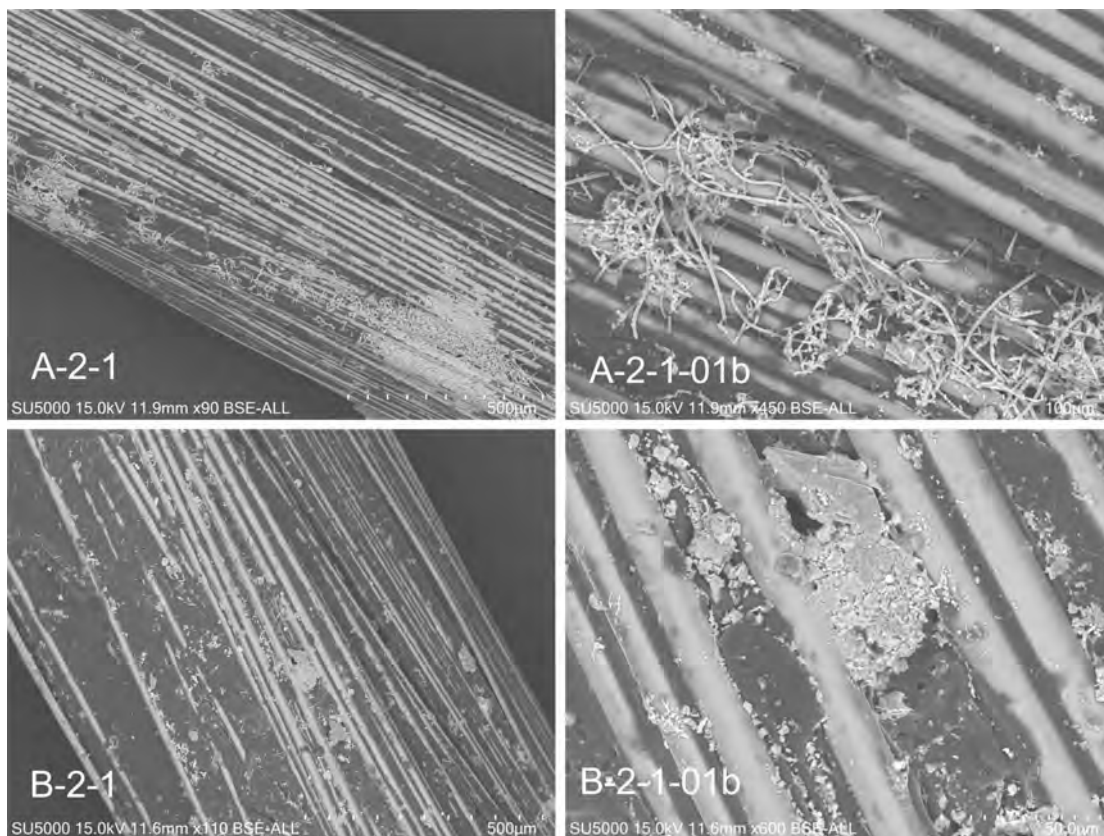
Grøft A og Grøft B. Også denne polypropylenfiberen var tilsynelatande upåverka av bakterievekst, utan synlege teikn på nedbryting av plastmaterialet (Figur 11). Fiberen var sterkt oppflisa, trass i at fibrane var forsiktig plasserte i plastkoppene og ikkje var påført deformasjon og tolkast som eit primært trekk. Dette plastmaterialet hadde få primære mikroskopiske luftbobler (områda vist i Figur 11 var utan, medan område B-1-3-01 i Vedlegg 7 viser bobler). Utfellingar på dei langsgåande sprekkane var for det meste jern- og manganoksid og salt (NaCl). Det er muleg vekst av mineral kan føre til utviding og av dei primære sprekkane i fiberen, men denne effekten er usikker. Det var ingen tydeleg forskjell mellom fibrane frå Grøftene A og B.



Figur 11: Barchip 54 med oppflising og utfellingar. Utfellinga på sprekk i område A-1-3-02) er Mn-Fe oksid, salt og muleg karbonat. Bakterielle utfellingar av hylsebakteriar (jernoksiderande) dominerte i Grøft A medan bakteriar med twista skruar var mest typisk i Grøft B (tolka som jernoksiderande *Mariprofundus ferrooxidans*). Analysedata i Vedlegg 7

Reforcetech AR glass Minibars™

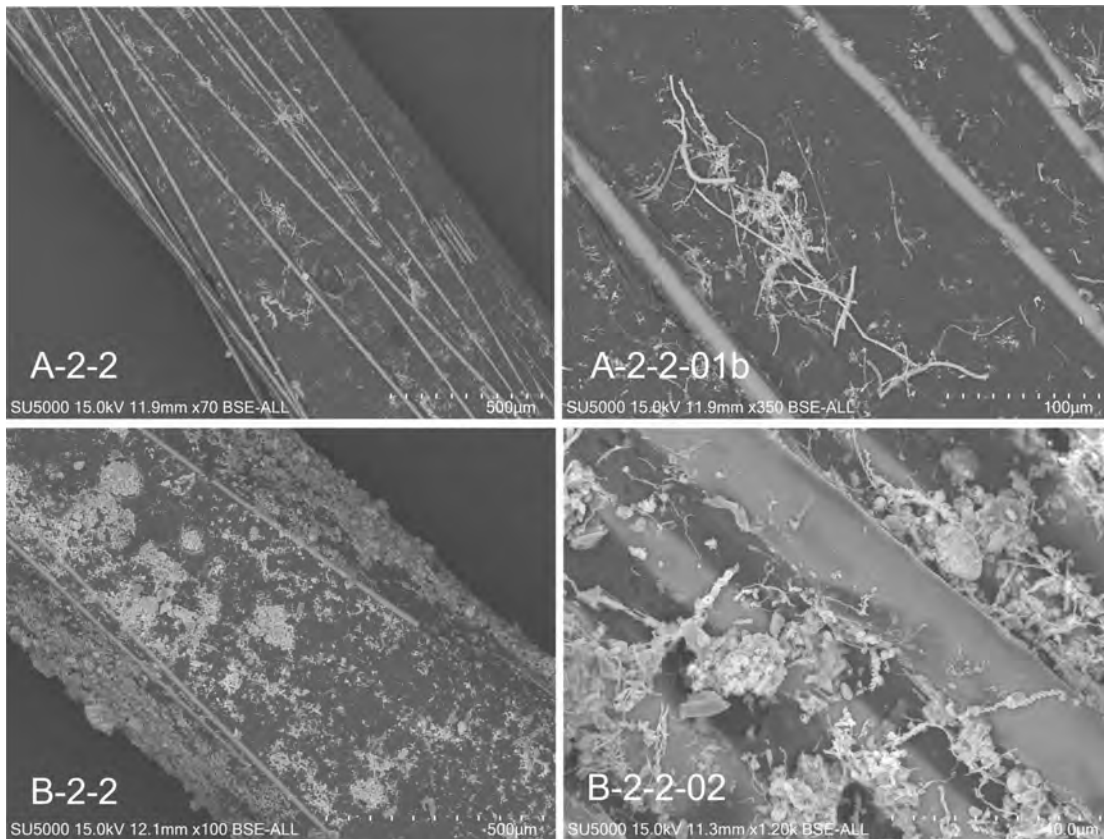
'Grøft A og Grøft B. Glasfiberen inneheld litt zirkonium, som etter leverandørens dokumentasjon skal hindre oppløysing ved alkalireaksjon i sementpasta med høg pH. I dette tilfellet er pH ca. 7,5, dvs. mykje lågare enn i sementpasta. Glasfibrane verka å vere homogene og upåverka. Små mørke område på fiberen er truleg flekker av lim (ikkje oppløysingsfenomen): Analysespektrum 2 i mørkt område A-2-1-02 med lim på fiber tyder på dette (sjå Vedlegg 8). Innhaldet av limet mellom fibrane varierer og er delvis krakelert/oppsprukke med utfellingar av salt (NaCl) og muleg karbonat både på limoverflata og på krakeleringssprekkar. Dette indikerer at limet kan vere utsett for nedbryting. Det er muleg at limet er potensielt svakaste ledd i denne fiberen. Det var ingen tydeleg forskjell mellom fibrane frå Grøftene A og B.



Figur 12: Reforcetech AR glass Minibars™ består av glas (lyst) og har varierende innhald av lim (mørkt). Område A-2-1-01b viser hylsebakteriar på fiberen. I område B-2-1-01b var det tydeleg at utfellingar fyller groper og mikrosprekker i limet som tilsynelatande påverkar limet negativt. Analysedata i Vedlegg 8

Reforcetech Basalt FRP Minibars™

Grøft A og Grøft B. Reforcetech Basalt FRP Minibars™ består av basaltfiber med sterkt varierende og for det meste veldig stor mengde lim. Basaltglaset verkar upåverka og mørke små område på glaset er tolka som lim. Utfellingane er ofte knytta til bakteriar med manganoksid, jernoksid og jernhydroksid, samt salt og muleg Ca-Mg-karbonat. Det ser ut til at desse reaksjonsprodukta stort sett er danna på limet. Det er usikkert kva dette betyr, men det er muleg at bakteriane i Grøft B har ein viss påverknad på eller frå limet. Vekst av bakteriar er avhengig av karbon og limet er ei mogleg kjelde for karbon. Bestandigheita til limet er truleg det potensielt svakaste leddet. Det var ingen tydeleg forskjell mellom fibrane frå Grøftene A og B.

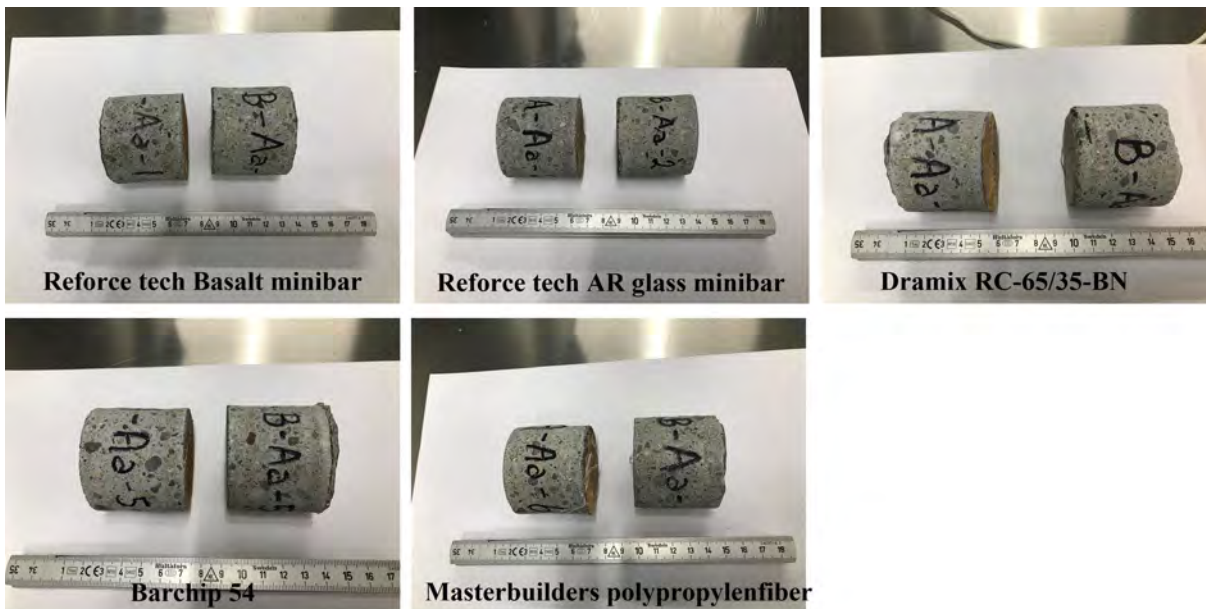


Figur 13: Basaltfiber består av glas (lyse striper) og svært varierende innhold av lim (mørkt). Det verkar som at dei bakterielle utfellingane har best vekstvilkår på limet. Analysedata i Vedlegg 9

3.2 Plateprøver med fibrar

3.2.1 Visuell undersøking av kjerner

Alle kjerneprøvene var ytre sett tilsynelatande intakte, utan teikn på oppsmuldring eller annan strukturell skade nær kontaktflatene mot grøftevatna (Figur 14 og 15). Det var utfelt eit tynt brunleg belegg på alle eksponerte flater i Grøft A og tilsvarande, mørkare belegg på prøvene frå Grøft B. Belegga blei ikkje analyserte. Men tidlegare røntgenopptak av utfellingar på andre plateprøver har vist at rustbelegget i Grøft A består av jern-oksyhydroksid (gøthitt og lepidochrositt). Belegget felt ut frå Grøft B inneheld manganoksid (birnessitt) og litt gøthitt. Det er også utfelt karbonatmineral (kalsitt, dolomitt) og halitt (NaCl) i begge tilfelle (Hagelia 2019). Mangan- og jernminerala er danna frå biofilm som lokalt påverkar betongen og kan føre til auka porøsitet og permeabilitet (Hagelia 2011).



Figur 14: Samanlikning av kjerner bora ut frå plateprøver med fem ulike armeringsfibrar, eksponerte i Grøft A (venstre) og Grøft B (høgre).

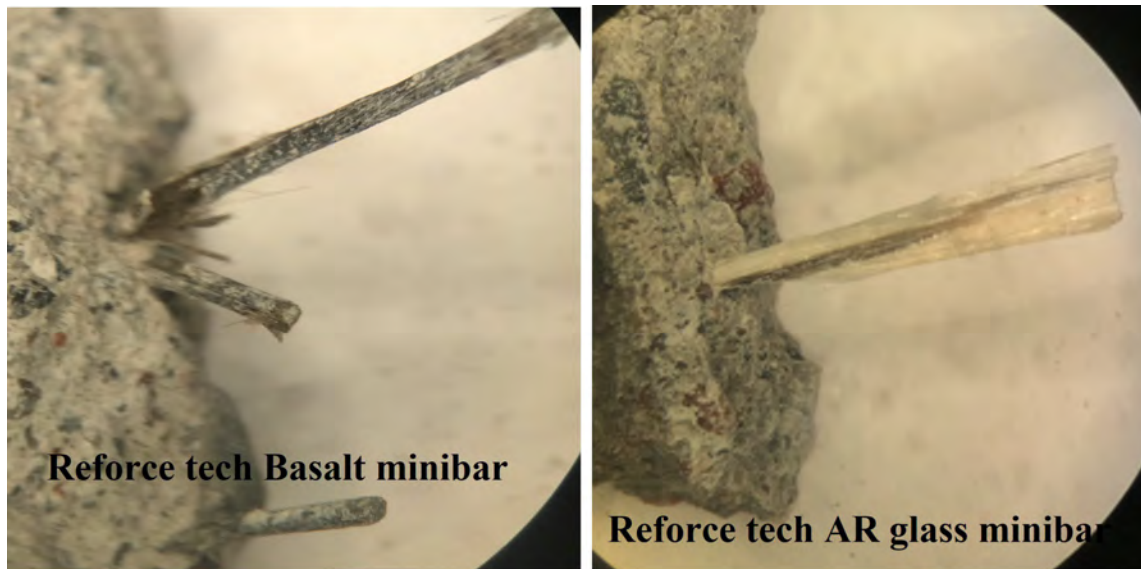
Prøve B-Aa-4 med Dramix RC-65/35-BN eksponert i Grøft B viste stålfiberkorrosjon inntil omkring 5 mm under overflata, medan prøva frå Grøft A (A-Aa-4) ikkje viste klare teikn på fiberkorrosjon (Figur 15). Dette reflekterer sannsynlegvis dei ulike redoks-forholda i grøftene.



Figur 15: Sylindrar med Dramix RC-65/35-BN. A-Aa-4 eksponert i Grøft A med ytre jernrik utfelling og B-Aa-4 eksponert i Grøft B med ytre jern- og manganrik utfelling. Bare B-Aa-1 viste stålfiberkorrosjon under eksponeringsflata (raud pil ca. 5 mm).

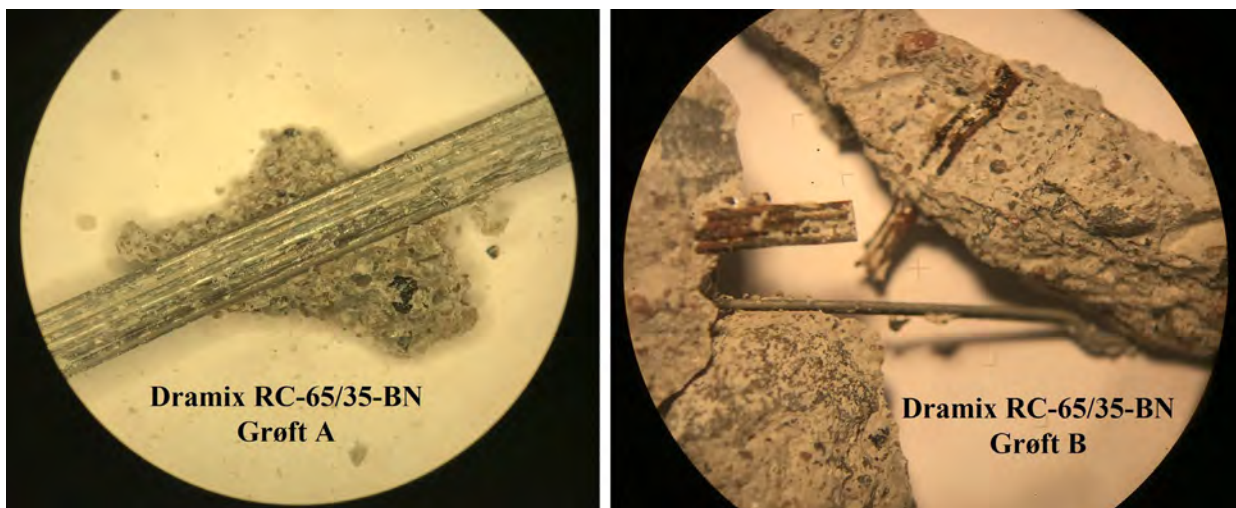
3.2.2 Undersøking av betongfragment med fiber i binokular for uttak til SEM-analyse

Reforcetech Basalt FRP Minibars™ og Reforcetech AR glass Minibars™ (Figur 16). Fibrane var delvis oppflisa etter trykking i betongpressa. Men det var også tilsynelatande udeformerte fibrar, som blei klipt av for analyse i SEM. Sementpastaen var litt omvandla og lys. Det var ingen opplagt skilnad på prøver frå Grøft A og B.



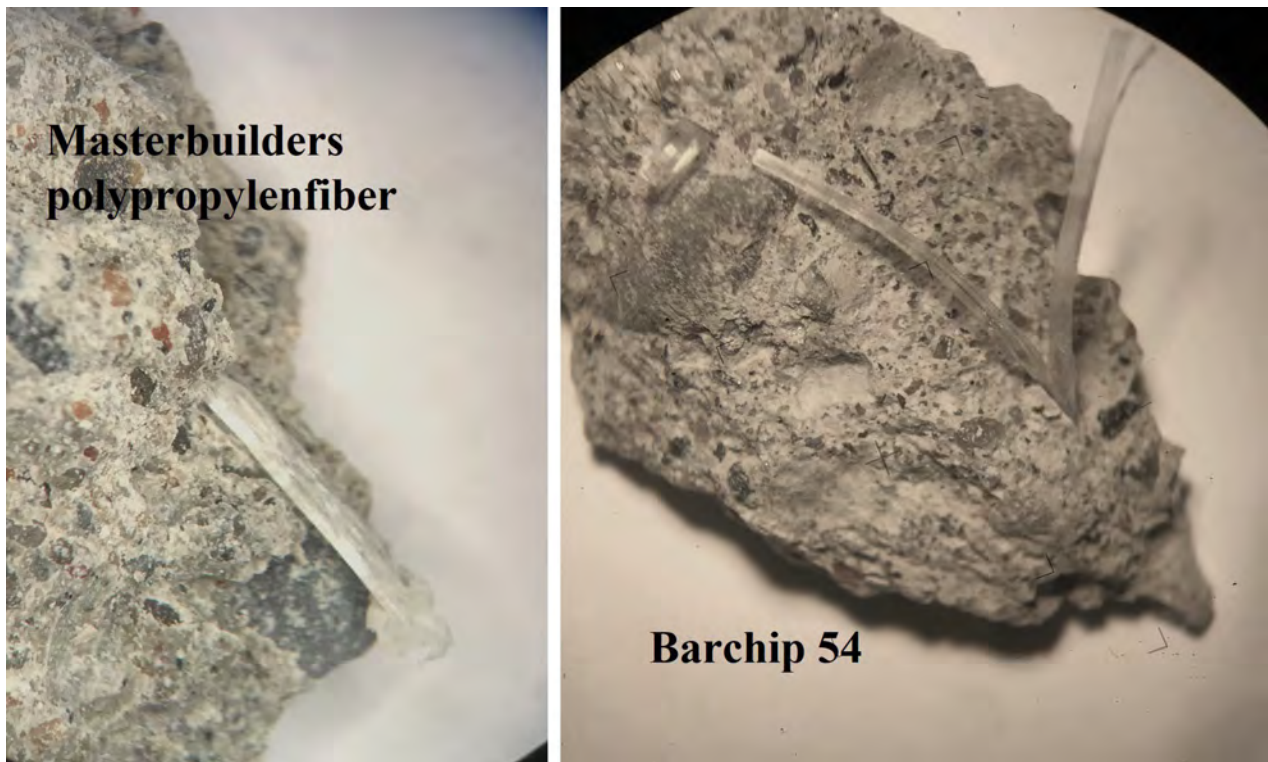
Figur 16: A-Aa-1 eksponert i Grøft A og B-Aa-2 eksponert i Grøft B

Dramix RC-65/35-BN. Stålfiberen i prøva frå Grøft A viste praktisk talt ingen korrosjon sjølv om sementpastaen var litt lys og omvandla. Prøva frå Grøft B viste derimot tydeleg rustfarga korrosjon. Sementpastaen var meir forvittra med muleg karbonatisering og eventuelle andre nedbrytingsreaksjonar. Fibrar vist i Figur 17 blei vald ut for analyse i SEM.



Figur 17: Stålfiber i indre betong frå kjerner trykt i betongpressa. Stålfiberen i A-Aa-1 (Grøft A) var praktisk talt upåverka medan fiberen i B-Aa-1 (Grøft B) var tydeleg korrodert.

MasterFiber 246 og Barchip 54 polypropylenfiber. Desse plastfibrane var delvis oppflisa (Figur 18). Det blei klipt av tilsynelatande udeformerte fiberbitar for SEM-analysen. Det var ingen opplagt skilnad på fiber eksponert i Grøft A og Grøft B.



Figur 18: A-Aa-5 eksponert i Grøft A og B-Aa-6 eksponert i Grøft B

3.2.3 SEM-analyse av fiber frå plateprøver etter 3 1/4 års eksponering i Grøft A & Grøft B

Prøver med Dramix RC-65/35-BN frå begge grøftene blei undersøkt med vekt på dokumentasjon av korrosjon. Undersøkingane av dei fire andre fibertypene var avgrensa til prøver eksponert i Grøft A, fordi samanlikning med prøvene frå Grøft B (i binokular) ikkje avdekte vesentlege forskjellar mellom dei to eksponeringsmiljøa.

Undersøkinga i SEM fokuserte på 1-2 fibrar av kvar type. Uttaka i binokularlupe sikra at typiske trekk var representerte. Alle fibrane var frå område i betongen under dei eksponerte overflatene. Tilstanden til fibrane reflekterer derfor eit eksponeringsmiljø med innverknad frå porevatnet til sementlimet og samtidig innverknad frå grøftevatna som har diffundert inn i prøvene ($v/b = 0,80$). Det var ingen direkte kontakt med biofilm. Alle prøvene blei pådampa med karbon før analyse og er praksis ujamt fordelt på prøvene. Dette gjer tolkingar av karbon delvis usikre. SEM-foto kombinert med mikrokjemiske analysar gav informasjon om fiberprodukta, tilstand og reaksjonsprodukt.

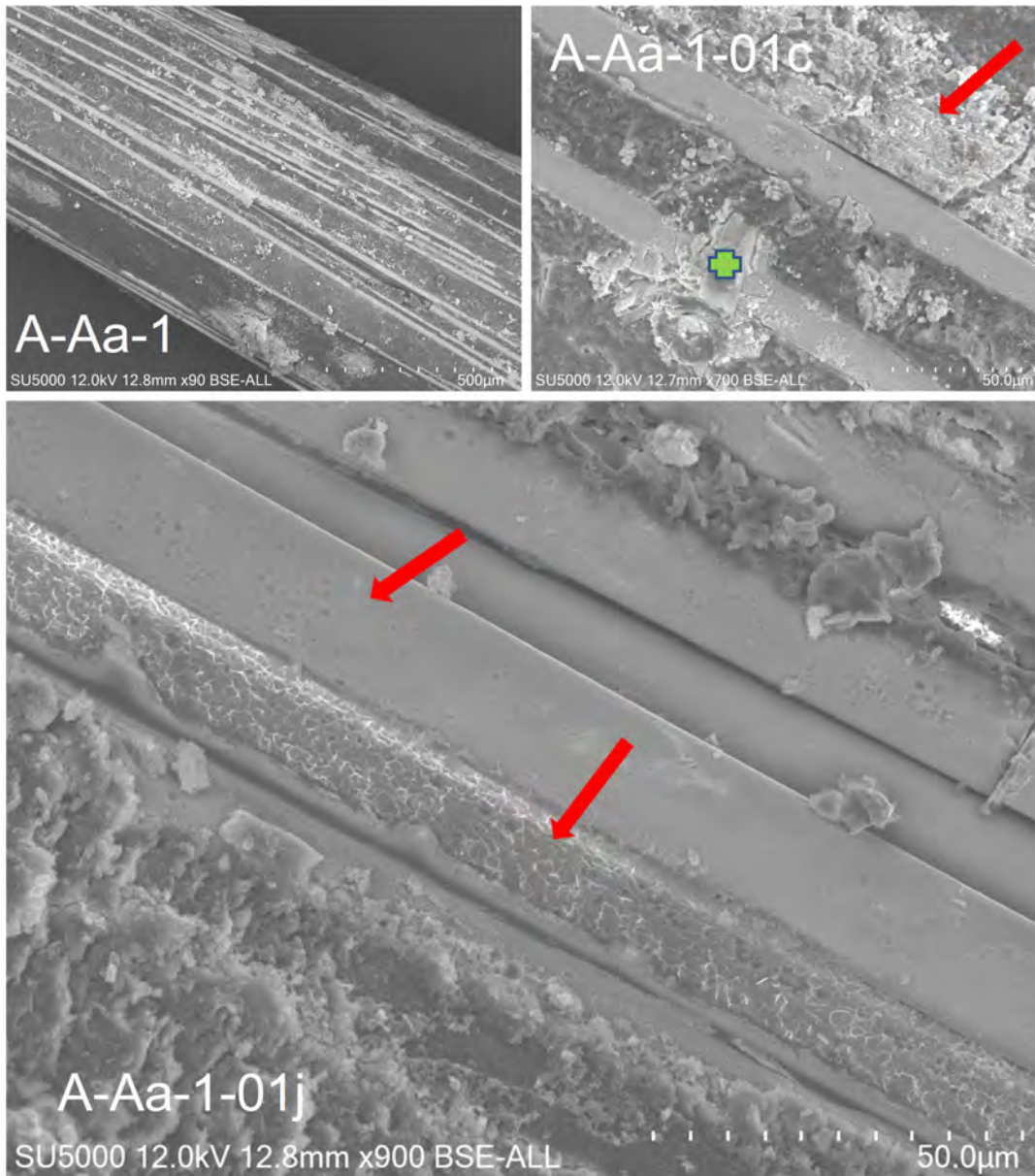
Resultata frå analyseområda er oppsummerte og tolka i Vedlegg 4. Analyserapportane frå UiO med data og SEM-foto frå totalt 34 område er gitt i Vedlegga 10 til 16. Tabell 6 oppsummerer resultata frå analysen med vekt på primære trekk i produkta og førebels vurdering av tilstand.

Tabell 6: Observasjonar av fibrane i SEM. Uttak av fiber frå trykte sylindrar. Prøver med Dramix RC-65/35-BN eksponert i både Grøft A og Grøft B blei undersøkt. Analysane av dei andre fibertypene er avgrensa til prøver eksponerte i Grøft A.

Fibertype	Produkt	Nedbryting	Utfellingar	Tilstand
Reforcetech Basalt FRP Minibars™, 55mm, Grøft A	Glasfiber og varierende liminnhald	Innslag av groptæring/oppløysing av basaltglas	På overflata av lim og og basaltglas. Sementpasta med Cl og salt	God, med usikker langtidsutvikling pga. oppløysing/groptæring
Reforcetech Minibars™ AR glass 55mm, Grøft A	Glasfiber og varierende liminnhald	Neppe. Glasfiber utan groptæring	På overflata av lim og basaltglas. Sementpasta med Cl	Svært god etter 3 års eksponerin
Dramix RC-65/35-BN, Grøft A	Stålfiber av reint Fe, med Zn-belegg	Kraftig korr. av Zn-belegg, Litt pitting-korrosjon	Neppe	God, med usikker langtidsutvikling pga. korrosjon
Dramix RC-65/35-BN, Grøft B	Stålfiber av reint Fe, med Zn-belegg	Kraftig korr. av Zn-belegg Stålet under er korrodert.	Neppe	God, med usikker langtidsutvikling pga. korrosjon
Barchip 54, Polypropylen, 54mm, Grøft A	Plast med langsgående delaminering	Nei, intakt plastmateriale	Sement trengt inn på sprekker	God, men usikker effekt av delamineringa
MasterFiber 246, Polypropylen, 40mm, Grøft A	Plast med langsgående delaminering	Nei, intakt plastmateriale	Sement trengt inn på sprekker	God, men usikker effekt av delamineringa

Reforcetech Basalt FRP Minibars™

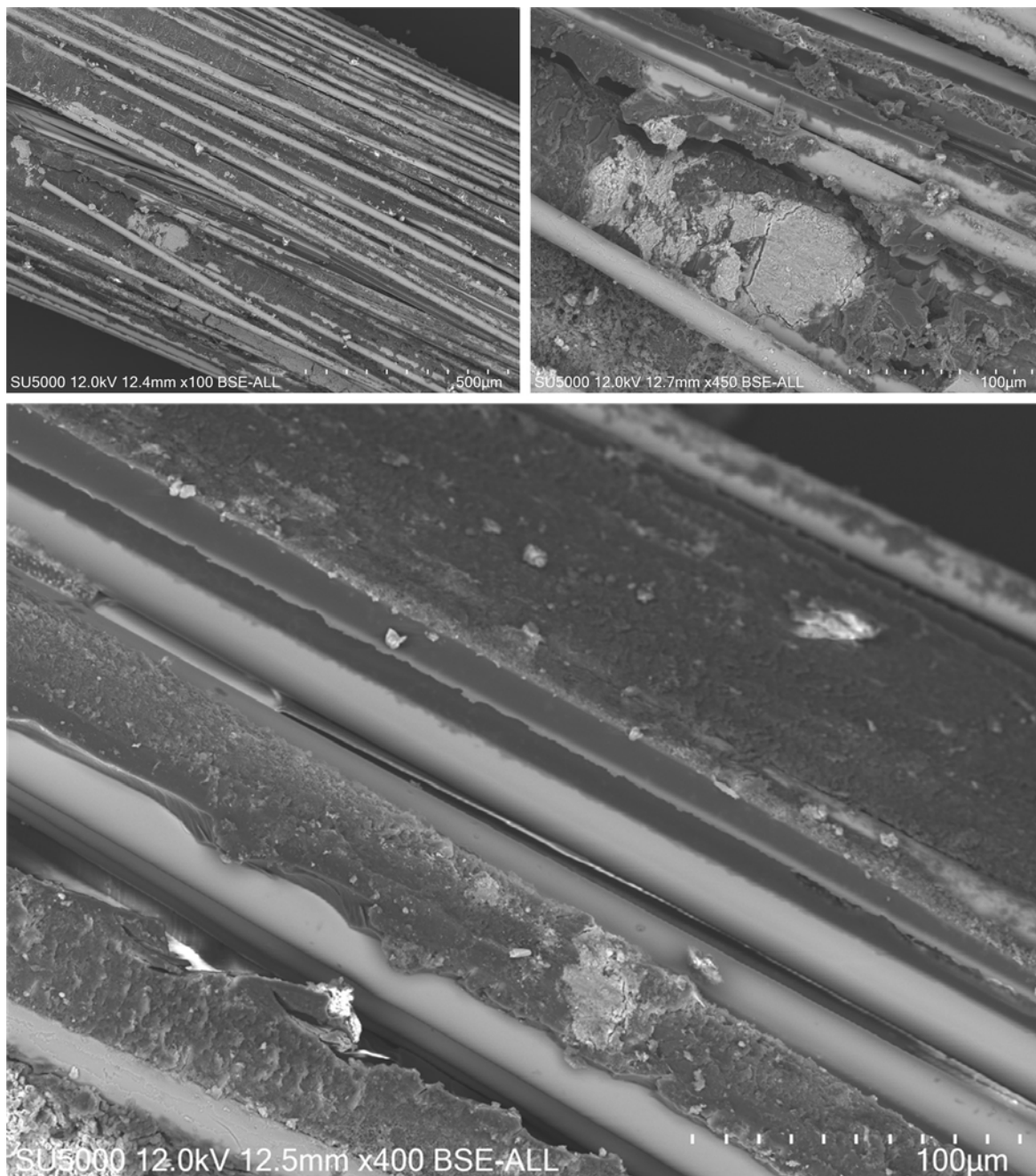
Mesteparten av basaltglaset var intakt, men viste lokalt teikn på oppsprekking relatert til prøveprepareringa (trykking i betongpressa gir mikroskopiske tensjonssprekker og avkutta glasfiber). Det var også innslag av groptæring og sterk oppløysing av basaltglaset (Figur 19). Liminnhaldet varierende. Utfellingar og restar av sementpasta var ofte knytta til limet. Restane av sementpasta var stort sett C-S-H, til dels med relativt lågt Ca innhald (tyder på utluta), og ofte påverka av Cl og salt. Det var vanskeleg å vurdere om utfellingane har reagert med limet. Oppløysingsfenomena i glasfiberen er ikkje uventa fordi betongplatene har høg pH i porevatnet (truleg 12,5-13). Etter påverknad av grøftevatn med pH omkring 7,5 ser vi ein tendens til utluting av kalsium i nokre av analysane. Det er derfor muleg at porevatnet nær eksponert flate kan ha minka litt i åras løp.



Figur 19: Reforcetech Basalt FRP Minibars™ hadde utfellingar og mulege reaksjonsprodukt på limet (oppe venstre) og lokalt tydeleg oppløysing av basaltglas etter eksponering i Grøft A. Bildet oppe til høgre viser eit reaksjonsprodukt på basaltglas som er rikt på karbon med innslag av Ca frå sementlimet (grønt kors): Pila viser rest av sementhydrat med klorid, svovel og magnesium frå saltvatnet. Basaltfiberen viste tydelege teikn på oppløysing og groptøring fleire stader (nedst, piler). Omfanget av nedbryting varierte. Det oppløyste basaltglas hadde same kjemisk samansetting som intakt basaltglas og var utan ASR-gel (områda A-Aa-1-01c, -01g & -01j). Analysane er gitt i Vedlegg 10.

Reforcetech AR glass Minibars™

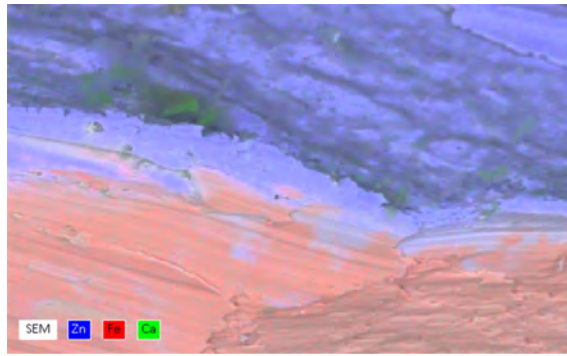
Denne glasfiberen inneheld ei mindre mengde zirkonium. Glasfiberen var for det meste glatt og jamn og viste ingen opplagte teikn på oppløysing. Dette viser at fiberen er motstandsdyktig mot høg pH i porevatnet i sementpastaen i motsetning til ordinært glas. Innhaldet av lim varierte noko, men var generelt intakt utan klare teikn på reaksjon mellom utfellingar og sementpasta. Restar av sementpasta var stort sett intakt C-S-H, med litt klorid.



Figur 20: Reforcetech AR glass Minibars™ med zirkonium eksponert i Grøft A hadde få utfellingar. Limet var stort sett intakt. Det var ikkje teikn på oppløysingsfenomen i glaset (groptøring mm). Dei lysegrå belegga på limet er sementpasta, ofte med litt Cl (områda A-Aa-2-02 & -03). Analysedata i Vedlegg 11.

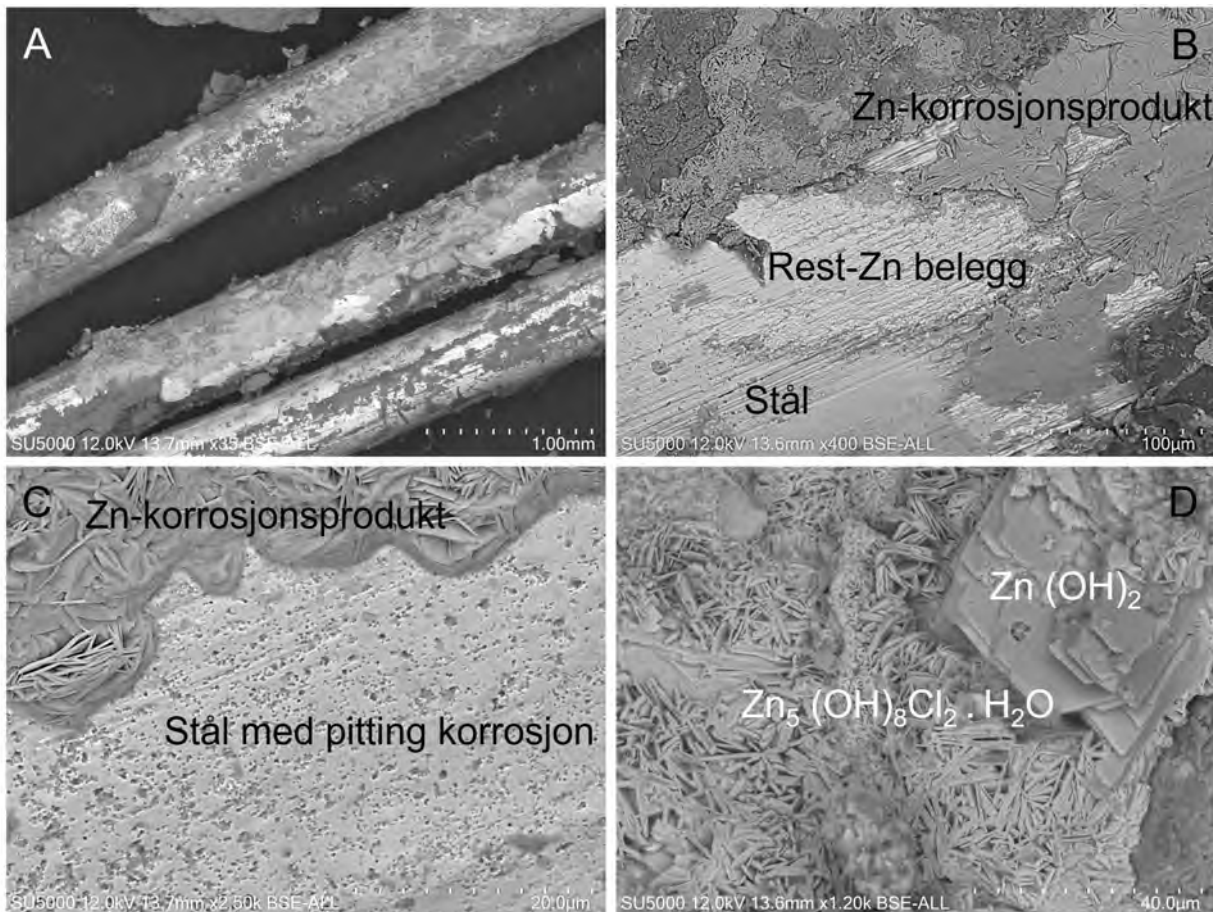
Dramix RC-65/35-BN Grøft A

Fiberen i prøve A-Aa-04 var eksponert i reduserande vatn og hadde lokalt upåverka og intakt sinkbelegg på stålet (Figur 21). Hovudinstrykket var likevel at sinkbelegget for det meste var kraftig korrodert og nedbrote, med tydelege avskalningar frå stålet under (Figur 22A).



Figur 21: Dramix RC-65/35 BN fiber frå område med upåverka sinkbelegg. Prøve A-Aa-4.

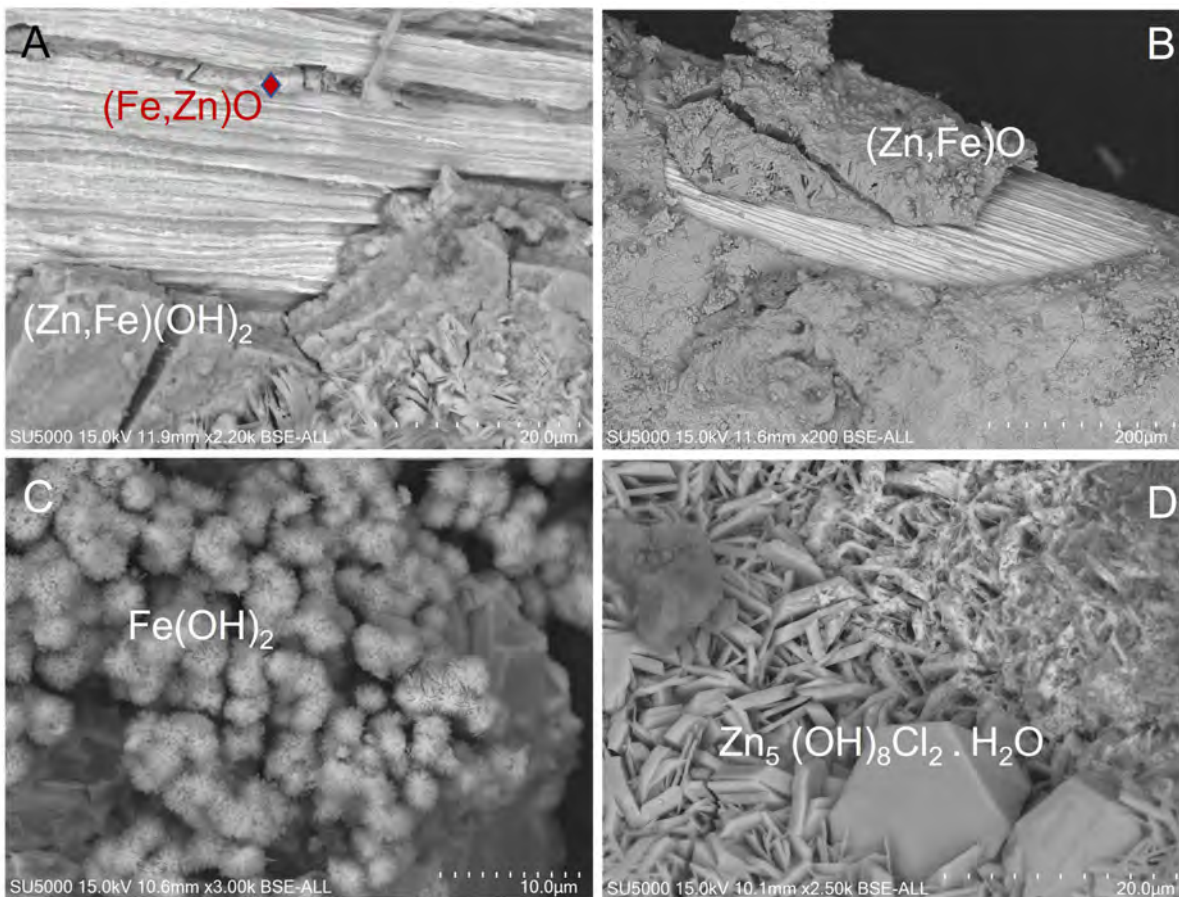
Detaljanslysane og forholda mellom ulike element viste at sinkbelegget på stålfiberen var omvandla til $Zn_5(OH)_8Cl_2 \cdot H_2O$ (simonkolleitt) med varierende innslag av $Zn(OH)_2$ og ZnO (Figur 22 B, C & D). Stålfiberen bestod av reint Fe utan spor av andre metall (forskjellig frå den direkte eksponerte Dramix fiberen med Cr og Ni). Det var svært dårleg heft mellom korrosjonsprodukta etter sink og stålfiberen under. Stålet var relativt glatt med svakt stripete flater og viste ofte pittingkorrosjon. (Figur 22 B og C). Vi kan førestille oss at slikt omfang med avskaling av det ytre sjiktet mot betongen vil påverke resultat frå «pull-out» testar negativt.



Figur 22: Prøve A-Aa-4 med Dramix RC-65/35 BN fiber. A: Avskala korrosjonsprodukt danna frå sinkbelegget med litt sementpasta. B: Avskala Zn-korrosjonsprodukt med liten rest av intakt sinkbelegg på stål (område A-Aa-4-02). C: Fullstendig nedbrote sinkbelegg med korrodert stål under (område A-Aa-4-05). D: Typiske korrosjonsprodukt danna frå sinkbelegget. Formlane er basert på elementforholda gitt ved mikroanalysar (område A-Aa-4-03). Analysedata i Vedlegg 12.

Dramix RC-65/35-BN Grøft B

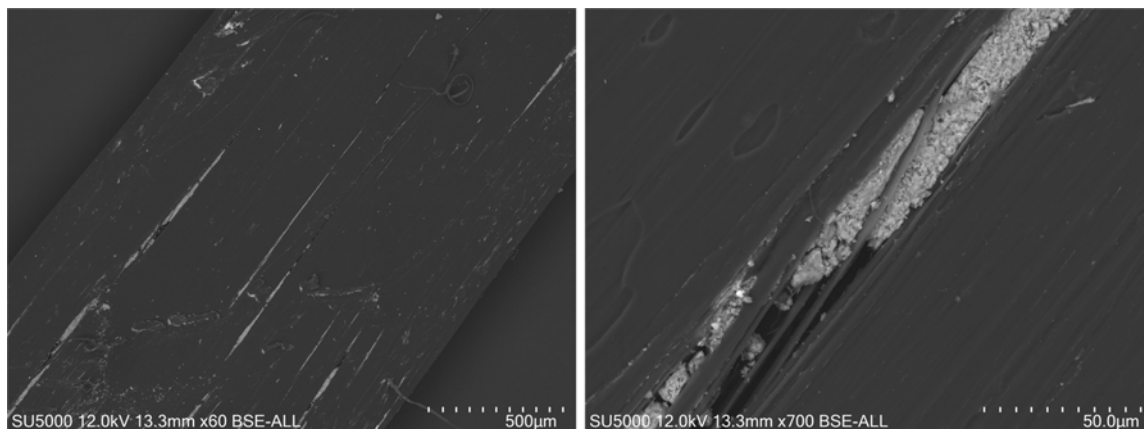
Prøve B-Aa-04 som var eksponert i oksiderende grøftevatn viste stor grad av nedbryting og avskaling av sinkbelegget. Omfanget var minst like stort som i prøve A-Aa-04. Korrosjonsproduktet innhald i dette tilfellet også jern danna på bekostning av stålet under (Fe-Zn-oksidi og Fe-hydroksidi). Sinkbelegget var i all hovudsak gjennomkorrodert og består av Zn-Fe oksidi og simonkolleitt (Figur 22B og D). Stålfiberen hadde mykje meir omfattande korrosjon enn tilfellet var i Grøft A. Stålet under korrosjonsprodukta frå sinkbelegget var sterkt laminert med djupe striper danna ved korrosjon (Figur 23A & B), i motsetning til relativt glatte flater i prøve A-Aa-04. Analysane viste at grå lamina/striper bestod av oksidert Fe med lokalt (Fe,Zn)-oksidi i sprekkefyllingar, medan lyse striper består av intakt stål utan oksygen (område B-Aa-04-01b & -01c). Elles blei det observert større mengder rosettar med fibrige krystallar av Fe-hydroksidi (ofte toverdige) med eit lite innslag av Cl.



Figur 23: Prøve B-Aa-4 med Dramix RC-65/35 BN fiber viste meir rust enn prøva eksponert i Grøft A. A: Stålfiber under avskala nedbrote sinkbelegg viste laminær struktur med variabel grad av korrosjon (grå djupt korroderte striper og grått område på tvers). Utfelling av Fe-Zn-oksidi på langsgående sprekk og med avskala Zn-Fe-hydroksidi utanpå (områda B-Aa-01b og -01c). B: Avskala nedbrytingsprodukt av Zn-Fe-oksidi på laminert og korrodert stålfiber (område B-Aa-02). C: Utfelling av fibrige Fe-hydroksidi ofte med litt Cl var vanleg (områda B-Aa-09, -09b og -11). D: Simonkolleitt danna ved full nedbryting av sinkbelegget (områda B-Aa-01d, -03, -09, -07, og -07b). Analysedata i Vedlegg 15 og 16.

Barchip 54

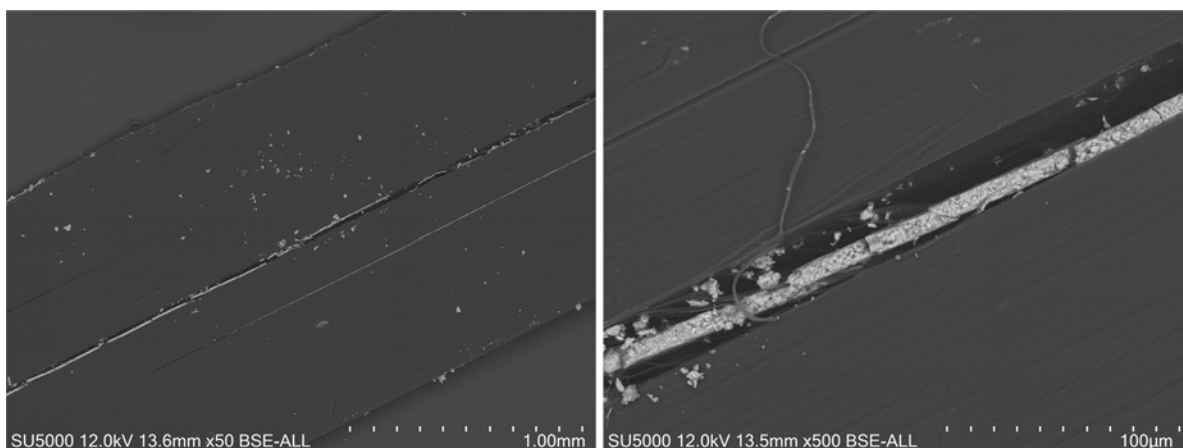
Denne plastfiberen hadde langsgående oppflising med utfelling av sementhydrat. Delamineringa tilsvarar observasjonane i direkte eksponert og udeformert Barchip 54. Dette må tolkast som eit primært trekk i produktet, der sementpasta har trengt inn på sprekkane under tillaging av plateprøvene. Det var ikkje teikn på kjemisk nedbryting av plastmaterialet.



Figur 24: Prøve A-Aa-5 av Barchip 54, polypropylenfiber eksponert i Grøft A hadde delaminering (langsgående sprekkar) tilsvarande direkte eksponerte fibrar. Sement har trengt inn langs primære sprekkar under tillaging av plateprøvene. Analysedata i Vedlegg 13.

MasterFiber 246

Denne PP-fiberen hadde langsgående oppflising med utfelling av sementhydrat. Delamineringa tilsvarar observasjonane i direkte eksponert og udeformert Masterbuilders polypropylenfiber. Dette må tolkast som eit primært trekk i produktet, der sementpasta har trengt inn på sprekkane under tillaging av plateprøvene. Det var ikkje teikn på kjemisk nedbryting av plastmaterialet



Figur 25: Prøve A-Aa-6 av MasterFiber 246 polypropylenfiber eksponert i Grøft A hadde delaminering (langsgående sprekkar) tilsvarande direkte eksponerte fibrar. Sement har trengt inn langs primære sprekkar under tillaging av plateprøvene. Analysedata i Vedlegg 14.

4 Oppsummering og konklusjon:

4.1 Generelt

Undersøkinga omfatta direkte eksponerte fibrar og eksponerte plateprøver med fibrar i to litt forskjellige grøftevatn. Grøft A med utfelling av jern har reduserande forhold og Grøft B har oksiderande forhold med utfellingar av mangan og jern, i begge tilfelle delvis på grunn av bakteriell aktivitet. Begge grøftene har klorid, sulfat og magnesium konsentrasjonar som er ganske likt sjøvatn.

- *Dei direkte eksponerte fibrane var i kontakt med salt grøftevatna som har gjennomsnittleg pH omkring $7,5 \pm 0,5$. Dette tilsvarar eksponeringsforhold på sprøytebetongoverflater under saltvasslekkasjar med biofilm, og til ein viss grad sprøytebetong som alt har vore utsett for djup nedbryting med redusert porevass-pH (omkring 8,5-9).*
- *Fibrane i plateprøver var i kontakt med sementpastaen som vi reknar med har pH omkring 12,5-13. Det er registrert ein viss grad av kalsium-utluting i restar av sementpasta som tyder på at pH er buffra ved oppløysing av portlanditt. Truleg har dominerande pH i porevatnet vore omkring 12-12,4 gjennom forsøket. Klorid frå grøftevatnet har også trengt inn i prøvene ved diffusjon. Eksponeringa kan etter alt å dømme samanliknast med forhold nokre millimeter (-cm?) under sprøytebetongoverflater med lekkasjar og biofilm, men utan kraftig nedbryting.*
- *Forskjellane med tanke på eksponeringsforhold har betydning for tolking av resultata, men ikkje minst overføringsverdi med tanke på sprøytebetong brukt som bergsikring.*
- *Alle prøvene har til ei kvar tid vore fullstendig neddykka under forsøka*
- *Dei direkte eksponerte fibrane var ikkje utsett for deformasjonar i samband med forsøket, og gir derfor informasjon om utgangstilstanden til dei enkelte produkta.*

Fire av fibertypane var eksakt dei same i begge prøvesetta, nemleg dei to plastfibrane og dei to komposittfibrane med ulike glasfibrar og lim. Analysane viste derimot at stålfibrane er forskjellige. Den direkte eksponerte Dramix-fiberen er laga med *krom-nikkel stål*, medan Dramix-fiberen i plateprøvene består av *100 % jern med sinkbelegg*.

4.2 Hovudresultat

Tabellane 5 og 6 gir oversikt over hovudresultata med vurdering av tilstand etter hhv 6 års og 3 års eksponering. Oppsummeringa under går gjennom sentrale observasjonar og analysar av dei enkelte fibrane for å kaste nærmare lys over nedbrytingsfenomena og relevans for sprøytebetong.

4.2.1 Barchip 54

Det var ingen teikn på kjemisk nedbryting av sjølve plastmaterialet, verken i direkte eksponerte fibrar eller fibrar i plateprøvene. Det var ingen forskjell på fibrar eksponerte i Grøft A og Grøft B.

- *Dei direkte eksponerte fibrane hadde utfellingar av Mn- og Fe-oksider, hovudsakleg på grunn av bakteriell påverknad, samt salt, både på overflata og på langsgåande sprekkar.*
- *Barchip 54 i plateprøvene hadde sementhydrat på dei langsgåande sprekkane og tyder på inntrenging av sement langs primære sprekkar.*

Bakteriane i grøftene har ikkje fotosyntese, i motsetning til rapportert nedbryting av polypropylenfiber i kontakt med algar, som delvis bryter ned polypropylenfiber i marine konstruksjonar (Hughes 2012). Det er ennå usikkert om slik nedbryting er avgrensa til fotosyntetiske mikroorganismar.

Krystallvekst kan i prinsipp føre til sprenging og utviding av sprekker, men dette er bare viktig der det mange tørke/fukt-syklar og er også avhengig av løysingsevna og molarvoluma til minerala. Saltsprenging er eit kjent fenomen, medan effektar av krystallvekst av Mn-Fe oksid er usikkert. Det er sannsynleg at inntrenginga av sement på dei langsgåande sprekkane gjer fiberen stivare og dermed introduserer ein kompetanseforskjell mellom plast og sement. Det er usikkert om sementhydratisering kan føre til utviding av sprekkane.

Tilstanden til fiberen er tilsynelatande god, men vi veit for lite om effekten av oppflising og inntrenging av sement med tanke på å bevare duktiliteten til oppsprukken/svekka sprøytebetong sett i eit levetidsperspektiv.

4.2.2 MasterFiber 246 polypropylenfiber

Det var ingen teikn på kjemisk nedbryting av sjølve polypropylenmaterialet, verken i direkte eksponerte fibrar i kontakt med bakteriar eller fibrar i plateprøvene. Det var ingen forskjell på fibrar eksponerte i Grøft A og Grøft B.

- *Dei direkte eksponerte fibrane hadde utfellingar av salt og gips, på overflata og på langsgåande sprekkar.*
- *Masterbuilders polypropylenfiber i plateprøvene hadde sementhydrat på dei langsgåande sprekkane og tyder på inntrenging av sement langs primære sprekker.*

Det er muleg at utfelling av salt og gips vil kunne føre til ytterlegare oppflising av PP-fiber eksponert på overflata i sprøytebetong, men dette vil neppe skje utan tørke/fuktskyklar. Problemstillinga er ganske lik det som gjeld Barchip 54. Tilstanden til fiberen er tilsynelatande god, men vi veit for lite om effekten av oppflising og inntrenging av sement med tanke på å bevare duktiliteten til svekka og oppsprukken sprøytebetong i det lange løp.

4.2.3 Reforcetech AR glass Minibars™ med zirkonium

Glasfiberen var homogen og tilsynelatande heilt upåverka, men innhaldet av lim varierte ein god del.

- *Dei direkte eksponerte fibrane viste at limet ofte var krakelert med utfellingar på mikrosprekkar av salt og kanskje karbonat, dels med bakterielle utfellingar på overflata. Dette gav inntrykk av at limet kanskje er utsett for nedbryting. Dette vil i tilfelle ikkje ha nokon djup innverknad på sprøytebetong..*
- *AR glaset i plateprøvene var glatt og jamt utan noko teikn på oppløysing i kontakt med porevatnet i motsetnad til ordinært glas og basaltglas (sjå under). Limet viste også god tilstand utan krakelering med utfellingar som sett under direkte eksponerte forhold.*

Tilstanden til fiberen i plateprøvene er så langt svært bra.

4.2.4 Reforcetech Basalt FRP Minibars™

Denne fiberen viste svært varierende innhald av lim, i nokre fibrar får ein inntrykk at det er ein «limfiber» med litt basaltglas.

- *Dei direkte eksponerte fibrane hadde mest bakterievekst på limet, som tyde på bakteriell vekst på bekostning av limet. Med dette må verifiserast. Sjølve basaltglaset var glatt og intakt utan noko teikn på oppløysing i kontakt med grøftevatna.*
- *Basaltglaset i plateprøvene viste derimot variabel grad av oppløysing etter kontakt med porevatnet i betongen. Det er derfor sterk indikasjon på at dette glaset ikkje vil vere heilt stabilt i intakt sprøytebetong med høg pH i porevatnet.*

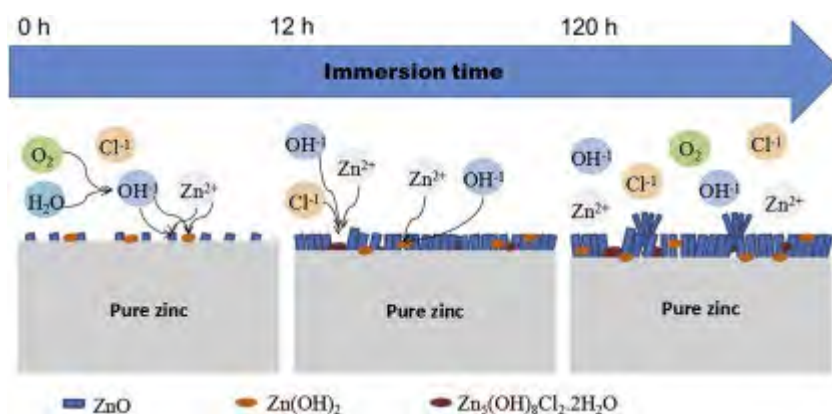
4.2.5 Dramix fiber med Cr-Ni stål

Denne fiberen var bare direkte eksponert i grøftene, og viste unnataksvis lokalt korrosjon i kontakt med jernoksidende bakteriar. Fiberen vurderast som svært god og motstandsdyktig mot dei kjemiske forholda i grøftevatna.

4.2.6 Dramix RC-65/35-BN med sinkbelegg

Dramix RC-65/35-BN med sinkbelegg var bare testa ved eksponering i plateprøver. Sinkbelegget var i stor grad korrodert, omvandla og avskala etter eksponering i både Grøft A og Grøft B. Det var lite korrosjon på stålet i prøva frå Grøft A, i motsetnad til tydeleg og lokalt nokso omfattande korrosjon og nedbryting av stål etter eksponering i Grøft B. Årsaka til dette er etter alt å dømme at Grøft A har reduserande vatn, medan Grøft B har oksiderande vatn.

Dei ulike nedbrytingsprodukta (minerala) som er danna på bekostning av metallisk sink samsvarar med eksperimentelle undersøkingar under marine vilkår (McMahon et al. 2019, Meng et al 2019). Figur 26 viser at nedbryting av sink er trinnvis: 1) sinkoksid (ZnO), 2) sinkhydroksid ($Zn(OH)_2$) og 3) simonkolleitt ($Zn_5(OH)_8Cl_2 \cdot H_2O$). Analysane viste at simonkolleitt ofte var det dominerande nedbrytingsproduktet som representerer svært framskride korrosjon av sinkbelegget.



Figur 26: Korrosjon av sink i marint miljø foregår i fleire trinn (Meng et al. 2019). Analysane har vist det same i Dramix RC-65/35-BN der sinkbelegget for det meste var fullstendig av reaksjonsprodukt med stort innslag av simonkolleitt.

4.3 Avsluttande merknader

Statens vegvesen har lang erfaring med fleire ulike fibrar i sprøytebetong som bergsikring. Vi gir her nokre eksempel på erfaringar med andre typar stål i Oslofjordtunnelen og eitt eksempel på utfellingar av muleg ekspanderande mineral i svart polypropylen (PP)-fiber.

- Stålfiber av typen Dramix viser liten grad av korrosjon etter over 25 år i saltvassona Oslofjordtunnelen der sprøytebetonglaget er tilstrekkeleg tjukt og utan stor grad av nedbryting. Analysar utført med SEM ved Naturhistorisk museum i 2005 viste at denne fiberen består av stål med mangan ($Fe = 97,5$ vekt %, $Mn = 1,53$ vekt %, $Ni = 0,1$ vekt % og $C = 3,2$ vekt %). Denne fiberen viser bare kraftig korrosjon i overflata, trass i at sprøytebetongen ofte er kloridinfisert under overflata. Årsaka er at oksygen bare slepper til lokalt og at det elektrokjemiske systemet med anode – katode dermed foregår på mm-skala i motsetning til armeringsjern i bruer der dette verkar over titals meter (Hagelia 2018).
- Sprøytebetongen i Oslofjord testfelt er laga med EE-fiber. Også her viser resultatata svært lite stålfiberkorrosjon i kloridinfisert sprøytebetong etter 5 års eksponering (Hagelia 2019).

- *Polypropylen (PP)-fiberen i Oslofjord testfelt er ikkje undersøkt systematisk. Men i eitt tilfelle med 40 mm tykk sprøytebetong og med omfattande omvandling gjennom heile tverrsnittet (magnesium-utfellingar og sulfatangrep under biofilm) hadde nokre PP-fibrar omfattande utfelling av ettringitt. Krystallvekst av ettringitt fører generelt til ekspansjon. Det er muleg at dette kan føre til ytterlegare oppflising etter lenger tids eksponering av tynn og sprøytebetong under påverknad av sulfat frå sjøvatn (Vedlegg 17, Hagelia 2019).*

Stålfiber har generelt vist seg å vere bestandig der betong-tykkelsen er omkring 100 mm, i samsvar med dagens krav for undersjøisk miljø (Hagelia 2018). Men vi har ikkje tilsvarende erfaring med sinkbelagt stålfiber etter lang eksponeringstid av sprøytebetong som bergsikring. Resultata i denne rapporten viser at sinkbelegget er svært ustabil og bryter fullstendig ned etter få års eksponering i saltvassmiljøet. Reaksjonsmekanismen er ikkje heilt klarlagt, og vi kjenner ikkje til om dette også kan vere eit problem i ferskvatn.

Norsk Betongforenings publikasjon nr 7 setter krav til at det for fiber med overflatebelegg skal «..være dokumentert hvilken virkning dette har for betongens egenskaper, og at overflatebelegget er kompatibelt med betongens sementlim og tilsetningsstoffer». Erfaringa frå Oslofjord testfelt viser at dette alle fall ikkje er tilfelle i undersjøisk miljø. Ein bør unngå sinkbelagt stålfiber i sprøytebetong før ein har skaffa fram eit betre datagrunnlag basert på langtidseksponering også i ferskvassmiljø.

Polypropylenfiber: Sjølv om resultata viser høg bestandigheit mot kjemisk påverknad er det lite truleg at Statens vegvesen vil ta i bruk polypropylenfibrar igjen, om ikkje sikker oppsamling av fiber på avveie etableres. Med eit økande antal undersjøiske tunnelprosjekt der ein også legg til grunn at tunnelmassene kan deponeres i sjø eller benyttes til utfylling i sjø, kom det frem ein utfordring knyta til at fibrar av polypropylenmateriale (plast) fulgte med tunnelmassane som blei lagt i sjøen. Tiltak for å redusere mengda fiber som transporterast ut (oppsamling av prelltap frå tunnelsålen) og tiltak med siltgardin/lense for å fange opp fibrar i sjøen har vist seg ikkje effektive nok. Konsekvensen har dessverre blitt at relativt store mengdar fibrar lokalt har komet på avveie og forureinar naturmiljøet langs kysten.

Glasfiber:

Reforcetech AR glass Minibars™ har så langt vist gode eigenskapar etter 3 års eksponering i Oslofjord testfelt. Denne glasfiberen med zirkonium er tydelegvis motstandsdyktig mot oppløysing i kontakt med høg pH i sementlimet. Men ein bør likevel skaffe erfaring frå lenger tids eksponering før ein tar denne fiberen i bruk. Limet i fiberen består av vinylester som er ein type plast. Per i dag er fiberen ikkje godtkjent for bruk av de same grunner som ligg til grunn for forbodet mot polypropylenfiber.

Reforcetech Basalt FRP Minibars™ har i testen vist opplagte teikn på oppløysing bare etter 3 år. Ein bør derfor ikkje rekne denne som bestandig i intakt sprøytebetong som alltid har høg pH i porevatnet. Ein bør ikkje ta denne basaltfibertypen i bruk før ein har skaffe erfaring frå langtidseksponering.

Potensialet for oppløysing av glass er generelt høgast i intakt betong med normalt høg pH i porevatnet. Graden av oppløysing minkar i takt med minkande pH. Det er derfor grunn til å tru at den mest pålitelege erfaringa ein kan få med bestandigheit av glasfibrane kan hentast frå den parallelle prøveserien med $v/b = 0,40$. Desse prøvene er designa i samsvar med NS-EN 206 for aggressivt marint miljø og vil vere langt mindre utsett for nedbryting og reduksjon av pH, medan den «opne betongen» med $v/b = 0,80$ truleg vil gje lågare porevass-pH etter kvart som åra går. Det er dermed sannsynleg at særleg basaltfiberen vil vere mest påverka i plateprøvene med $v/b = 0,40$. Angående limdelen av fiberen, sjå kommentar ovanfor for *Reforcetech AR glass Minibars™*.

Referansar

Hagelia P (2011): Deterioration mechanisms and durability of sprayed concrete for rock support in tunnels. PhD-avhandling, TU-Delft, Nederland.

Hagelia P (2018): Oppsummering av tilstandsutvikling i sprøytebetong som bergsikring i ulike miljø. Etatsprogrammet Varige konstruksjoner 2012-2015. Statens vegvesens rapportar Nr 566.

Hagelia P (2019): Oslofjord testfelt for sprøytebetong – etablering og fem års resultat. Etatsprogrammet Varige konstruksjoner 2012-2015. Statens vegvesens rapportar Nr 570.

Hughes P (2012): A new mechanism for accelerated degradation of synthetic fibre reinforced marine concrete. Concrete, September 2012. 18-20.

Karačić S, Wilén B-M, Suarez C, Hagelia P, Persson F (2019): Subsea tunnel reinforced sprayed concrete subjected to deterioration harbors distinct microbial communities.

Karačić S (2021): Microbial biofilm communities associated with degradation of sprayed concrete in subsea tunnels. PhD-Thesis, Chalmers University of Technology.

Klemetsrud K (2016): Korrosjonsforsøk på bolter i Oslofjordtunnelen. Etatsprogrammet Varige konstruksjoner 2012-2015. Statens vegvesens rapporter Nr. 466.

McMahon, ME, Santucci RJ, Scully JR (2019): Advanced chemical stability diagrams to predict the formation of complex zinc compounds in a chloride environment. The Royal Society of Chemistry RCS Advances, 9, 19905-19916.

Meng Y, Liu L, Zhang D, Dong C, Yan Yu, Volinsky AA, Wang L-Ning (2019). Initial formation of corrosion products on pure zinc in saline solution. Bioactive Materials, 4 87-96.

Norsk Betongforening. Publikasjon nr. 7: Sprøytebetong til Bergsikring

Vedlegg 1 Direkte eksponerte fibrar med vekter.
Vedlegg 2 Betongreseptar og fiberdoseringar
Vedlegg 3 Oppsummering - SEM-analysar av direkte eksponerte fibrar
Vedlegg 4 Oppsummering - SEM-analysar av fibrar i plateprøver
Vedlegg 5 SEM rapport prøve A-1-1 og B-1-1
Vedlegg 6 SEM rapport prøve A-1-2 og B-1-2
Vedlegg 7 SEM rapport prøve A-1-3 og B-1-3
Vedlegg 8 SEM rapport prøve A-2-1 og B-2-1
Vedlegg 9 SEM rapport prøve A-2-2 og B-2-2
Vedlegg 10 SEM rapport prøve A-Aa-1
Vedlegg 11 SEM rapport prøve A-Aa-2
Vedlegg 12 SEM rapport prøve A-Aa-4
Vedlegg 13 SEM rapport prøve A-Aa-5
Vedlegg 14 SEM rapport prøve A-Aa-6
Vedlegg 15 SEM rapport prøve B-Aa-4 del 1
Vedlegg 16 SEM rapport prøve B-Aa-4 del 2
Vedlegg 17 Delaminering av PP-fiber med ettringitt i sprøytebetong.

Per Hagelia

Seksjon: Fagressurs geo, Utbyggingsdivisjonen

Postadresse: Statens vegvesen, Postboks 6706 Etterstad, 0609 OSLO

Kontoradresse: Brynsengfarete 6A, OSLO

Telefon: +47 22073931. Mobil: +47 91584701. e-post: per.hagelia@vegvesen.no

Vedlegg 1

Direkte eksponerte fibrar med vekter

Fibrane blei lagt ned i plastkoppar plasserte i plastkoffertar i Grøft A og Grøft B i Oslofjord testfelt i mars 2016. Koffertane er sett opp som ein matrise med tanke på innhenting av fibrar på fleire tidspunkt. Det er lagt ned to likeverdige seriar i kvar grøft fordelte på to koffertar i kvar grøft; hhv Serie A-1 & A-2 og Serie B -1 & B - 2. Dei fire koffertane er merka slik:



Grøft B

Figur VI-1: Merking av koffertane med direkte eksponerte fibrar.

Alle fibrane er dekte med filterduk med årstal for planlagt undersøking. I tillegg blei Seriane A-1-3/B-1-3 og A-2-3/ B-2-3 (små fibrar) lagt i plastposar (med fleire hol for å sikre god tilgang på grøftevatn) under filterduk. Dette for å unngå at fibrar av ulike typar/år blir blanda under neddykking av koffertane. Neddykking av koffertar fører til at masse luft trenger ut og det er derfor lagt opp til at kvar utteken boks med fiber blir erstatta med ein tom plast boks av same dimensjon før ny utplassering av koffertane.

Planen om årleg undersøking av fibrar blei endra:

- Boksane merka 2016 blei ikkje henta inn før i mars 2019 for første inspeksjon.
- Boksane merka 2017 blei henta inn for omfattande analyse først i september 2021.
- Boksane merka 2018, 2019 og 2020 er fortsatt plasserte i testfeltet for langtids eksponering.

Tabellen under viser eksakte vektorer av kvar batch med fiber. Alle vektorer er i gram. Plastboksar med og utan plastposar blei *individuell tarerte* ved innveging. Tanken var å sette oss i stand til å undersøke om vektene endrar seg etter lang tids eksponering. Dette er førebels ikkje undersøkt, men vil kunne bli aktuelt etter lenger tids eksponering.

Tabell VI-1. Fibervekt.

Fibertype	2016	2017	2018	2019	2020
Serie A-1-1 Dramix RC-65/35-BN* (Cr-Ni stål)	38,65	46,80	57,83	49,74	53,30
Serie A-1-2 MasterFiber 246, Polypropylen, 40mm	12,20	12,44	14,47	14,11	12,13
Serie A-1-3 Barchip 54, Polypropylen, 54mm	6,50	6,92	7,04	6,36	6,07
Serie A-2-1 Reforcetech Minibars™ AR glass 55mm	14,76	13,90	14,53	15,13	16,64
Serie A-2-2 Reforcetech Basalt FRP Minibars™, 55mm	20,55	14,37	15,16	14,87	12,50
Serie A-2-3 Reforcetech kuttet basaltfiber, 8 mm, μ 16	17,32	14,75	15,05	15,14	17,22
Serie B-1-1 Dramix RC-65/35-BN* (Cr-Ni stål)	49,45	54,69	51,43	52,03	52,49
Serie B-1-2 MasterFiber 246, Polypropylen, 40mm	12,19	10,75	12,82	12,48	11,85
Serie B-1-3 Barchip 54, Polypropylen, 54mm	6,20	5,46	6,14	6,91	5,96
Serie B-2-1 Reforcetech Minibars™ AR glass 55mm	15,29	17,95	12,85	16,34	13,29
Serie B-2-2 Reforcetech Basalt FRP Minibars™, 55mm	15,67	13,96	14,78	12,19	16,18
Serie B-2-3 Reforcetech kuttet basaltfiber, 8 mm, μ 16	13,28	14,80	19,14	18,11	15,75

* Det knyter seg noko usikkerheit til om dette er same armeringsfiber som ble benytta i 2019, basert på kjemisk samansetning. Det er ikkje funnet grunnlag og andre data som tyder på dei ikkje har same produktamn då dei blei lagt ut i 2016.

Vedlegg 2

Betongreseptar

Plateprøver av betong med fibrar blei plasserte i Grøft A og Grøft B natta mellom 12. og 13. juni 2019. Tabellane under viser betongreseptane. Det støypt to seriar:

- Den eine serien blei laga med Standard FA sement og lågt vatn/bindemiddel forhold for lang tids eksponering. Denne betongen er laga i samsvar med krav i NS-EN 206 for det aktuelle eksponeringsmiljøet.
- Den andre serien blei laga med Aalborg Rapid sement som ein «open» betong med høgt vatn/bindemiddelforhold. Denne serien vil vere utsett for sekundære reaksjonar og omvandling av sementpastaen og gje tidlege indikasjonar på effektar av nedbryting på fiber.

Tabell V2-1: Betongreseptar.

Standard FA masseforhold 0,39		Aalborg Rapid masseforhold 0,80	
Std.FA	483 kg	Aalborg Rapid	385 kg
Silika	24 kg	Silika	19 kg
0-8	1530 kg	0-8	1295 kg
SP	5,8	SP	3 kg
L	1,45 kg	L	1 kg
Vann	201 kg	Vann	335 kg

Vedlegg 3

Oppsummering av SEM analysar av direkte eksponerte fibrar

Tabell V3-1: Direkteeksponerte fibrar i grøftene A og B. Tolking av rådata frå SEM gitt i Vedlegg 5 til 9. Saltutfellingar har Na og Cl, ofte saman med S og Mg (typisk for salt grunnvatn). Karbon (C) er ofte vanskeleg å tolke fordi prøvene er pådampa med tynn karbonfilm. Analysar med karbon ca. 35-50 atom % er lagt inn i tabellen der det er knytta til lim mellom basalt- eller glasfiber, plast eller muleg karbonat.

Vedlegg/fibertype	Område	Spektrum	Hovudinnhald og tolking	
5 Dramix RC-65/35-BN* Stål	A-1-1-01	1	Fe>Cr>Ni>Mn	Frisk stålfiber
	A-1-1-03	1 & 2	C >Na ≈ Cl >O ≈Fe>>Si	Utfelling av salt på fiber med litt bakterielt utfelt rust. Muleg fiberkorrosjon
	B-1-1-01	-1 & 2	-O>Fe>Mn og litt Na, Cl & Si, Al	- Bakterielt utfelt biomineral frå <i>Mariprofundus ferrooxidans</i> på fiberoverflate i blanding med salt og silikat Korn. Muleg korrosjon
		-3	-Fe>Cr>Ni>Mn	-Frisk fiber
	B-1-1-02	-1 & 2	-C >O>Fe>Cr, litt Mg, Ca, Na, Cl	-Fe-oksiderande <i>Mariprofundus</i> m Cr-korrosjonsprodukt danna frå stålfiber
-3 & 4		-C >O>Fe>Cr>Ni>Mn, litt Al, Si	-Korrosjonsprodukt nær bakteriar	
6 MasterFiber 246, Polypropylen, 40mm	A-1-2-01	-1	-O>Na≈ Cl> Fe >Mg, Ca, S	-Salt med utfelling av Fe-hydroksid på overflata
		-2	-C >O >Fe >>Na,Cl,Mg,S	Hylsebakterie (<i>Leptothrix ochracea?</i>) på overflata
		-3	-C >> O	-Plast
	B-1-2-01b	-1	-O>Fe >> Na, Cl, Mg, Ca, S	-Fe-hydroksid utfelt av <i>Mariprofundus</i> på fiberoverflate i blanding med salt
		-2	-O>Mn>Ca>Fe og Na, Cl, S, Mg, Ca	-Mn-oxid utfelt på overflata frå Mn-Fe oksiderande bakterie (m salt)
		-3	-K,Si,Al,O	-Kalifeltspat (korn)
	B-1-2-01c	-1 & 2	-O>Mn>Ca og Na, Cl, Mg,(S)	-Mangannodul, biomineral utfelt frå Mn-oksiderande bakterie med salt
		-3	-Na,Cl, (Mg,S) og O>Fe (C)	-Saltrikt område med Fe-hydroksid (biomineral) med innslag av silikat Korn
	B-1-2-02	-1	-O>Ca ≈ S	-Gipskrystallar utfelt på fiberen
-2		-Na,Cl,, O = 3xFe	-Salt med litt Fe(OH) ₃	

7 Barchip 54, Polypropylen, 54mm	A-1-3-01b	-1	-O>Mn>Fe, Na, Cl	- Mangannodul, Mn-oxid utfelt frå Mn-oksiderande bakterie + salt
		-2	-C>O >Na,Cl,	-Salt (ureint) og organisk karbon
		-3	-Fe, O >Na, Cl	-Fe-oxid utfelt frå <i>Mariprofundus ferroxidans</i> på fiberoverflate i blanding med salt
	A-1-3-02	-1	-O>Mn,Fe >Ca, Na, Cl>Mg>S	-Mn-Fe-oxid utfelt på sprekk i fiber + litt salt
		-2	-Na,Cl>O >Fe	-Salt og litt Fe(OH) ₃ (på sprekk)
	B-1-3-01	-1 & 3	-O >Na,Cl>Fe Na, Cl >Ca, Mg	-Fe-oxid utfelt frå <i>Mariprofundus</i> på fiberoverflate i blanding med salt
		-2	-Si,Al, K,O,Mg	- Silikatmineral (partikkel)
	B-1-3-02	-1 & 3	-O>Mn, Na, Cl	- Mangannodul, Mn-oxid utfelt frå Mn-oksiderande bakterie og salt på overflata
		-2	-O>Fe, Si > Na, Cl, Al, K, Mg,	- Fe-oxid utfelt frå <i>Mariprofundus</i> på fiberoverflate i blanding med salt og silikatmineral
8 Reforcetech Minibars™ AR glass, 55mm	A-2-1-02	-1	-O>Si> Na>Zr> Ca	-Intakt glasfiber med zirkonium
		-2	-C>>O>>Si,Zr, (Na)	-Lim på glasfiber
	B-2-1-01b	-1	-O>Si>Al, K	-Kalifeltspat (korn)
		-2	-O> Cl>Mg >Na, Si>Al (C)	- Salt og muleg Ca-Mg karbonat (utfelt) m/ silikatpartiklar
		-3	-O>Ca>>Mg, Cl, Na, C	-Muleg Ca-karbonat (utfelt)
9 Reforcetech Basalt FRP Minibars™, 55mm	A-2-2-01b	-1	-O>Si>Al>Ca> Fe>Na>k	-Intakt basaltfiber
		-2	-C > O	-Lim
		-3	-O >Fe>Si,Cl >Na,Mg>S,K, Ca	- Fe-oxid utfelt frå <i>Mariprofundus</i> , og litt salt på fiberoverflate
	A-2-2-02	-1	-Cl>Na>O >Al,Si	-Salt mm.
		-2	-Na,Cl>>O	-Salt
		-3	-O>Fe >> Na, Cl,Mg,Si,S	-Utfelling av Fe-hydroksid frå hylsebakterie (<i>Leptothrix</i> <i>ochracea?</i>) med salt
	B-2-2-01c	-1 & 3	- O > Si, Al, Na, K, Mg	<i>Utfelling i holrom i lim:</i> -Blanding av silikatpartiklar (kvarts, feltspat mm).
		-2	- O > C ≈ Ca Na, Cl, Mg, (S) Si, Al	-Kalsitt med salt og innslag av silikat

Reforcetech Basalt FRP Minibars™, 55mm fortsatt ...	B-2-2-02	-1	-O>Si>Al>Mg, Fe>Na	-Intakt basaltfiber
		-2	-O>Mn>Fe >> Na,Cl,Ca	-Utfelling av Mn-oksid med salt
		-3	-O>Fe Na, Cl, Si, Al	-Utfelling av Fe-hydroksid med salt og silikatpartiklar

** Det knyter seg noko usikkerheit til om dette er same armeringsfiber som ble benytta i 2019, basert på kjemisk samansetning. Det er ikkje funnet grunnlag og andre data som tyder på dei ikkje har same produktamn då dei blei lagt ut i 2016.*

Vedlegg 4

Oppsummering av SEM analysar av fiber i plateprøver

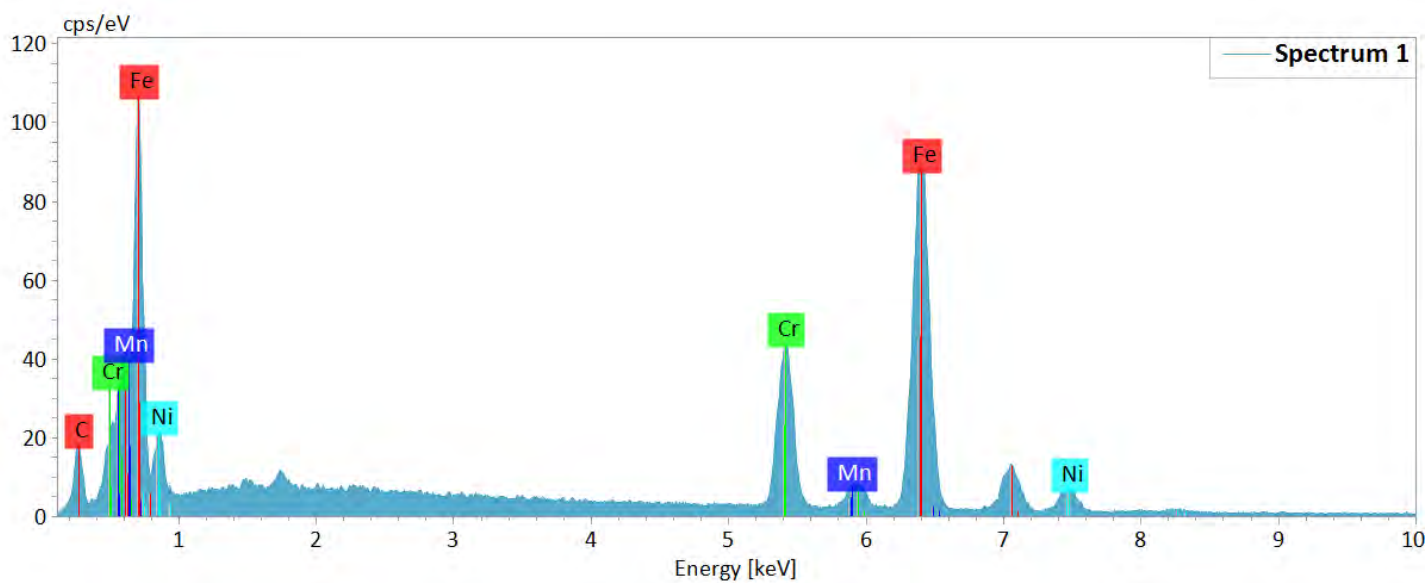
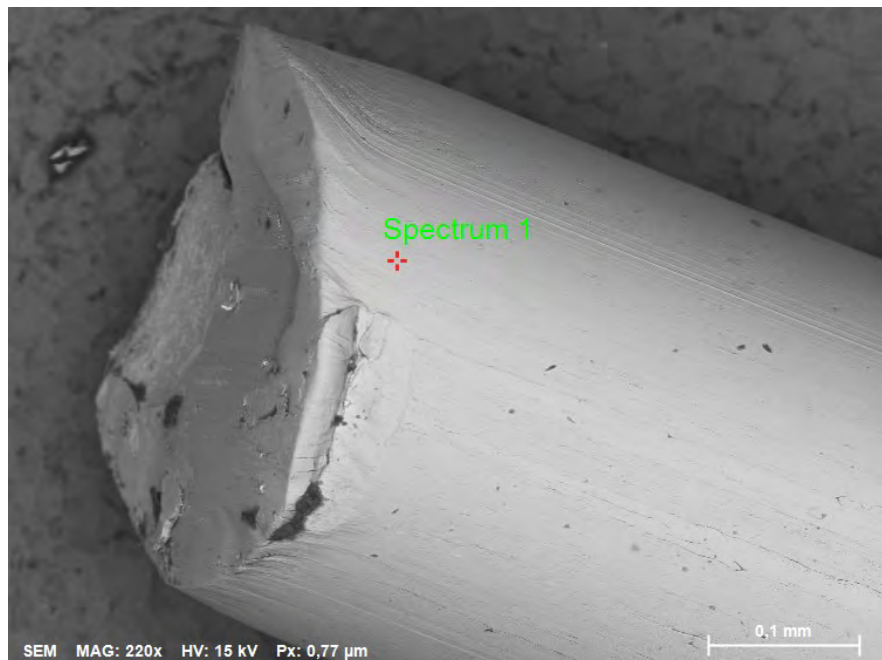
Tabell V4-1: Fibrar i grøftene A og B. Oppsummering av SEM analysar i plateprøver. Tolking er basert på elementforhold frå SEM i Vedlegg 10 til 16. Saltholdige utfellingar har Na og Cl ofte saman med S og Mg (typisk for salt grunnvatn). Karbon (C) er ofte vanskeleg å tolke fordi prøvene er pådampa med tynn karbonfilm. Analysar med karbon ca. 35-50 atom % er lagt inn i tabellen der det er knytta til lim mellom basalt-eller glasfiber, plast eller muleg karbonat.

Vedlegg/fibertype	Område	Spektrum	Hovudinnhald og tolking
10 Reforcetech Basalt FRP Minibars™, 55mm	A-Aa-1-01c	-1	- O>Si>Ca>Al >Fe>Cl>Mg>Na
		-2	- O>C>Ca>Si >Al Cl, Mg, S
		-3	- C >>O>>Ca>Si >Al; litt Cl
	A-Aa-1-01d	-1	-C>>O >>Ca
-2		-C>O >>Si >Al,Ca,Cl	
-3		- O>Si >Al>Ca, Fe, Mg, Na, K	
	A-Aa-1-01e	-1	- O>Ca>Si>Al Litt Na, Cl, S
-2		- C>O>Ca>Si> Al. Litt Mg, Cl, S	
-3		- O>Ca>Si>Cl >Al. Litt S	
	A-Aa-1-01f	-1 & 2	- C>O>>Ca>Si
	A-Aa-1-01g	-1	-O>>Ca, Si>Cl > Al
-2		-Si>Ca>O,Al,, Cl>Fe>K	
-3		-O>Ca>Si>Cl, S, Al, Na	
	A-Aa-1-01j	-1 & 2	- O>Si>Al>Ca > Fe, Mg, Na, Cl
-3		- C > O >> Ca, Cl, Si, Al	
	A-Aa-1-02	-1	-O>Fe>>Ca
-2 & 3		-O>Ca>Si> Al, Fe,Cl, Mg	
	A-Aa-1-2-03	-1 til 4	-O>Ca>Si, Al, Cl, Fe, (S, Mg)
	A-Aa-1-2-04	-1 til 4	-O>Ca>Si,Al,Cl, Fe, S, Mg

11 Reforcetech Minibars™ AR glass 55mm	A-Aa-2-02	-1 -2 -3	-C > O -O >Ca>Si>Cl >Al, >S -O >Si>Na >Zr>Ca	- Lim - C-S-H - Intakt glasfiber med zirkonium
	A-Aa-2-03	-1 & 2 -3	- C > O> Si>Ca >Cl, Zr -C >O>Si>Na, Zr	- Blanding av lim og litt sementpasta - Glasfiber med litt lim
12 Dramix RC- 65/35-BN Stål (m/ sinkbelegg)	A-Aa-4	-1 -2	-Fe (100 %) - Fe > Zn	-Reint indre Fe stål (utan Ni, Cr) - Overgang til ytre Zn-belegg
	A-Aa-4-02	-1 -2 & 4 -3	- Zn>> O - O >Zn > Cl - O > Ca > Al, Si, Zn, Cl, S	- Ytre intakt sinkbelegg på stål - truleg $Zn_5(OH)_8Cl_2 \cdot H_2O$ (Simonkolléitt) - Korrosjonsprodukt etter Zn, påverka av sement og salt
	A-Aa-4-03	-1 -2 & 3	->O >Zn >> S,Cl >Ca - O > Zn > Cl	- Korrosjonsprodukt etter Zn, påverka av sement og salt (krystallar) - Krystallar: $Zn_5(OH)_8Cl_2 \cdot H_2O$ (Simonkolléitt)
	A-Aa-4-04	-1 & 3 -2	- O > Zn > Cl -O > Zn > Ca, Si	- Sekskanta trigonale krystallar av simonkolléitt - $Zn_5(OH)_8Cl_2 \cdot H_2O$ (Simonkolléitt) med Ca, Si frå sementlimet
	A-Aa-4-05	-1 -2 -3	- C >O>Zn >Ca >Si>P -Zn (C) -O> Ca>Si (Zn,Mg, Cl)	-Korrosjonsprodukt, m. Zn - Restar av upåverka Zn i korrosjonsprodukt - Korrosjonsprodukt m. Zn, påverka av sement og salt
13 Barchip 54, Polypropylen, 54mm	A-Aa-5-02	-1 & 2 -3	-O >Ca >Si > Cl, Al, S - C (100 %)	- Sementhydrat trengt inn i langsgående sprekk -Intakt plastfiber
	A-Aa-5-03	-1 -2	-C, O >Ca>Si>Cl >Al, S -C > O > Ca, Si >Al, Cl, Mg, Na	- Sementhydrat C-S-H trengt inn i langsgående sprekk - Sementhydrat med Ca-fattig utluta C-S-H trengt inn i langsgående sprekk

14 MasterFiber 246, Polypropylen, 40mm	A-Aa-6-02	-1 -2 & 3	- C (100 %) - O > Ca>Si>Cl > Al, S	- Intakt plastfiber - Sementhydrat med Ca-fattig utluta C-S-H trengt inn i langsgående sprekk
15 Dramix RC- 65/35-BN Stål (m/ sinkbelegg) (del 1)	B-Aa-4-01b	-1 -2 -3	-Fe >>> Zn -O> Fe, Zn >> Ca, Si, Al>> Cl -O> Zn > Fe ,Cl	-Intakt stålfiber under Zn-korrosjonsprodukt - (Zn, Fe)(OH) ₂ korrosjonsprodukt dannet fra sinkbelagt stålfiber + litt sementhydrat - (Zn, Fe)(OH) ₂ + Cl
	B-Aa-4-01c	-1 -2 -3	-O> Zn>Fe>Cl -Fe> O >> Zn -Fe >> Zn	-(Zn, Fe)O utfelt på sprekk i stålfiber - Oksidert stålfiberdel - Relativt frisk del av stålfiber
	B-Aa-4-01d	-1 -2 -3 -4	-O > Zn > Cl -Zn > O > Cl -O>Zn>Cl>S,Ca -O>Zn> Cl>>Fe	- Zn ₅ (OH) ₈ Cl ₂ . H ₂ O - Uidentifisert Zn-Cl-O - Finkorna Zn-rik, blandfase - Muleg (Zn,Fe)ClO ₄
	B-Aa-4-02	-1 -2 -3	-Fe >>> Cl - Fe>O>Cl>Zn - O >Fe>Cl >Zn	- Intakt del av stålfiber under Zn-korrosjonsprodukt - Svakt korrodert fiberdel - Uident. Zn-Cl-O: avskala
	B-Aa-4-02b	-1 & 2 -3	-O>Fe>Cl>Zn -O>Fe>Cl>Zn >Si,Ca,Al	- Fe, Zn korr. produkt m. Cl - Fe, Zn korr. produkt m. Cl (Uidentifiserte)
	B-Aa-4-03	-1 -2 -3	-O > Ca>Si, Zn> Si>Cl, Fe,Al,Si -Zn>O >> Ca,Fe,Si,Cl -O > Zn > Cl >> Fe, Ca, Si	- Fase/ blandfase dannet fra sementhydrat og Zn-korr. produkt. - Muleg blandfase av Zn & ZnO med Fe (mm.) - Rosett,sekskanta krystaller Zn ₅ (OH) ₈ Cl ₂ . H ₂ O
	B-Aa-4-04	-1 -2 -3	- O ≈ Zn>Cl> Fe,Ca -O >Zn >> Fe - C> Zn ≈ O > Cl	-Seks-kanta krystall. Muleg ZnO med Fe og Cl. - Finkorna, muleg ZnO og Zn(OH) ₂ (Fe-substituert) - Muleg ZnO med Cl
	B-Aa-4-06	-1 & 2 -3	- Fe>> Al (Si) - Fe > O > Zn >> Cl, Al, Ca	- Intakt stålfiberdel - Delvis oksidert stålfiber og Zn-belegg

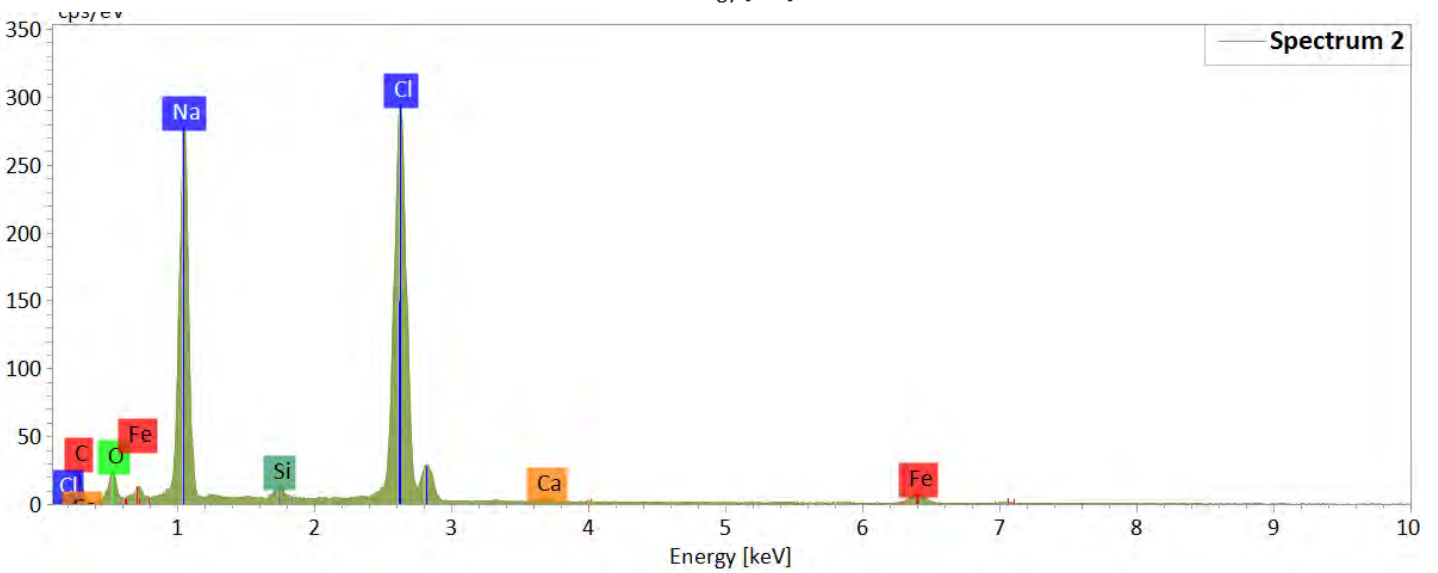
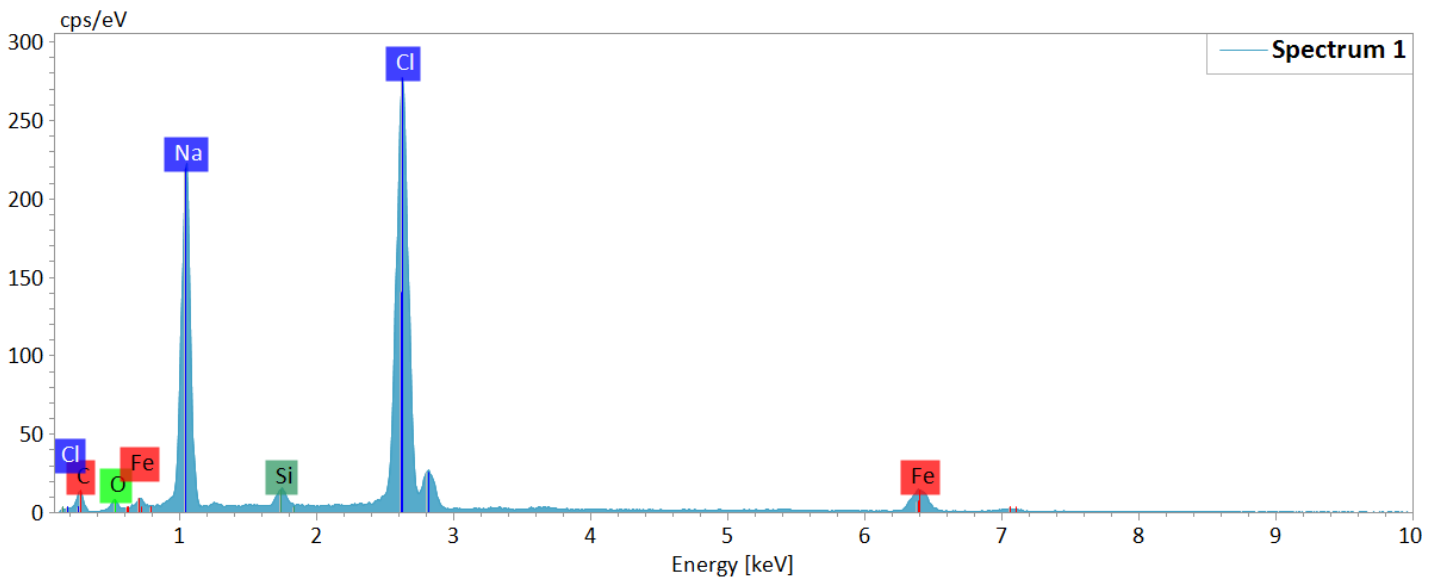
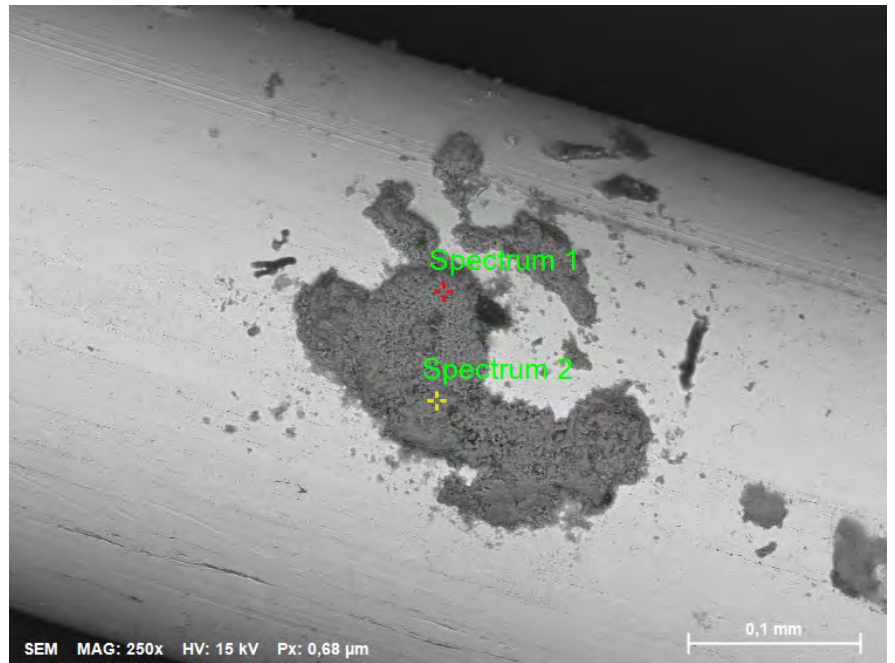
16 Dramix RC-65/35-BN Stål (m/sinkbelegg) (del 2)	B-Aa-4-07	-1	-O >Fe> Cl >>Zn	- Fe (-Zn) korr. produkt m. Cl
		-2	-O >Zn >>Fe,Cl	- Muleg (Zn,Fe) ₅ (OH) ₈ Cl ₂ .
		-3	-Zn>O >>Fe (Ca, Si)	- Muleg ZnO med Fe og Cl.
		-4	-O ≈Zn > Cl>>Fe	- ZnO med Fe og Cl
		-5	-O>Ca>>Si Cl,Fe	- Omvandla sementpasta
	B-Aa-4-07b	-1	-O > Zn > Cl	-Muleg Zn ₅ (OH) ₈ Cl ₂ .H ₂ O (sekskanta kryst)
-2		-O ≈Zn>Cl >>Fe	-ZnO (lang sekskanta krystall, m/Cl på overflata?)	
-3		-Zn> O>>Fe,Al	-Muleg blandfase av Zn ⁰ og ZnO	
	B-Aa-4-07c	-1 & 2;	-O ≈2Fe >Cl>Zn	-Fe (OH,Cl) ₂ (fibrige krystallar)
-3		-O>Zn>Na,Cl >Fe	-Zn-oxid m salt	
	B-Aa-4-09	-1 & 2	-O>Fe>Cl	-Fe-hydroksid m/Cl
-3		-O>Si>Al >Fe,Mg,Ca, Na	-Amfibol (mineralkorn)	
	B-Aa-4-09b	-1 & 2	-O≈2Fe>>Cl >>Ca,Si	Fe(OH,Cl) ₂ (fibrige krystallar)
	B-Aa-4-10b	-1	-O >Ca,S>Fe>Cl	-Gips mm.
-2		-O≈2Fe>>Cl >Ca,Si	- Fe(OH,Cl) ₂ skorpe på gips (m/innslag av sementhydrat)	
	B-Aa-4-11	-1 & 2	-O ≈2Fe >> Cl	Fe(OH,Cl) ₂ (fibrige krystallar)



Spectrum 1

Element	Mass [%]	Atom [%]	abs. error [mass%] (1 σ)	rel. error [%] (1 σ)
C	7,3	26,7	0,4	5,7
Cr	17,2	14,5	0,5	3,2
Mn	1,1	0,8	0,1	9,1
Fe	66,6	52,5	2,2	3,3
Ni	7,2	5,4	0,3	4,5
	99,4	100,0		

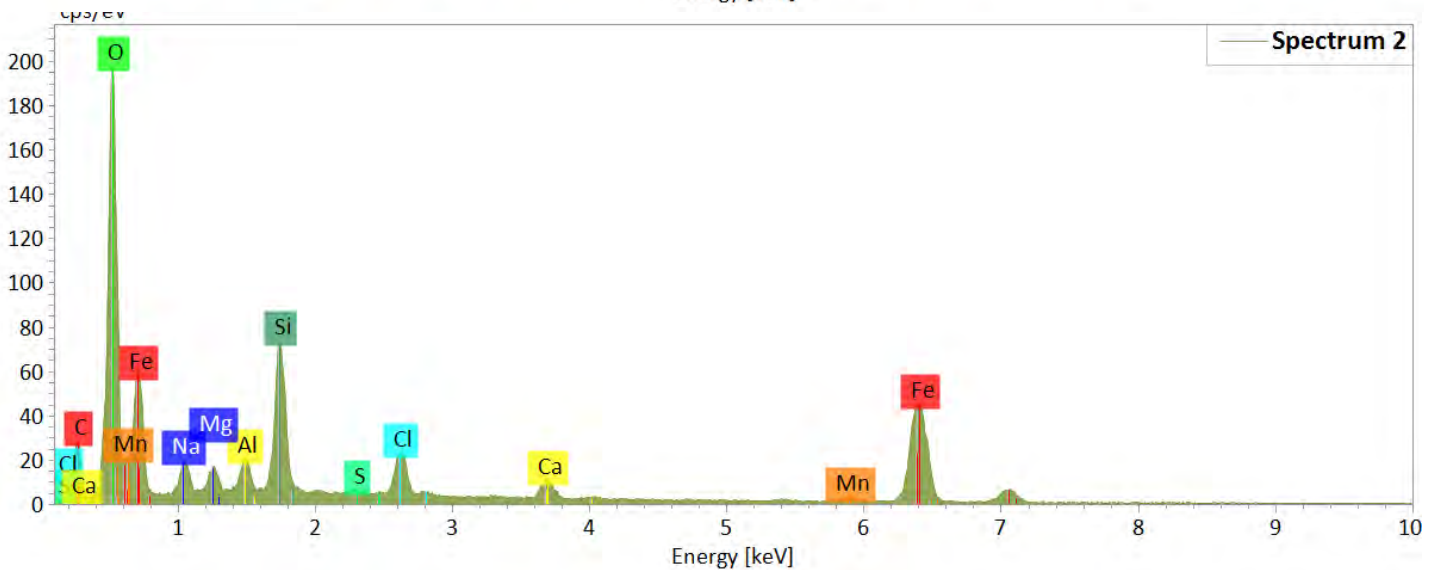
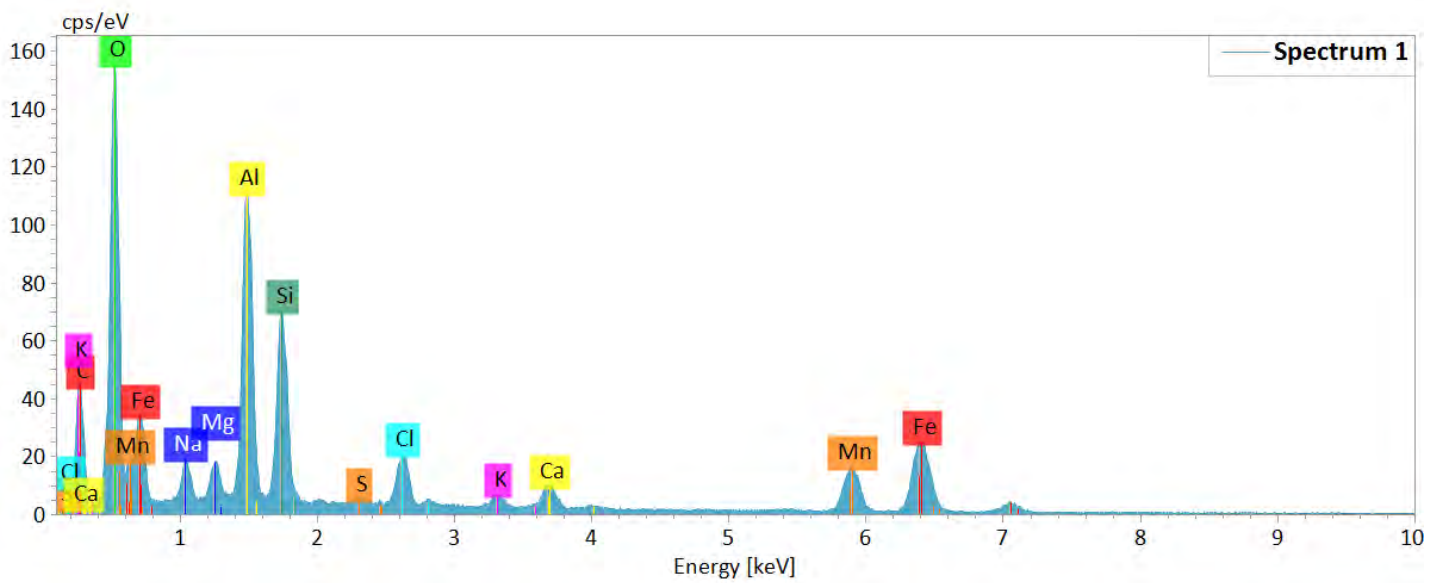
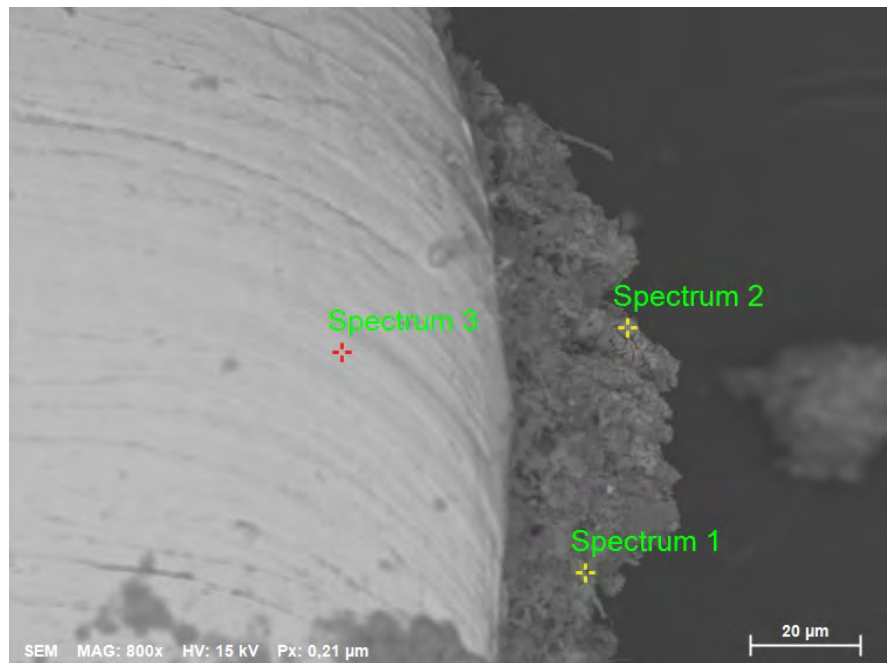
A-1-1-03



Atomic concentration [%]

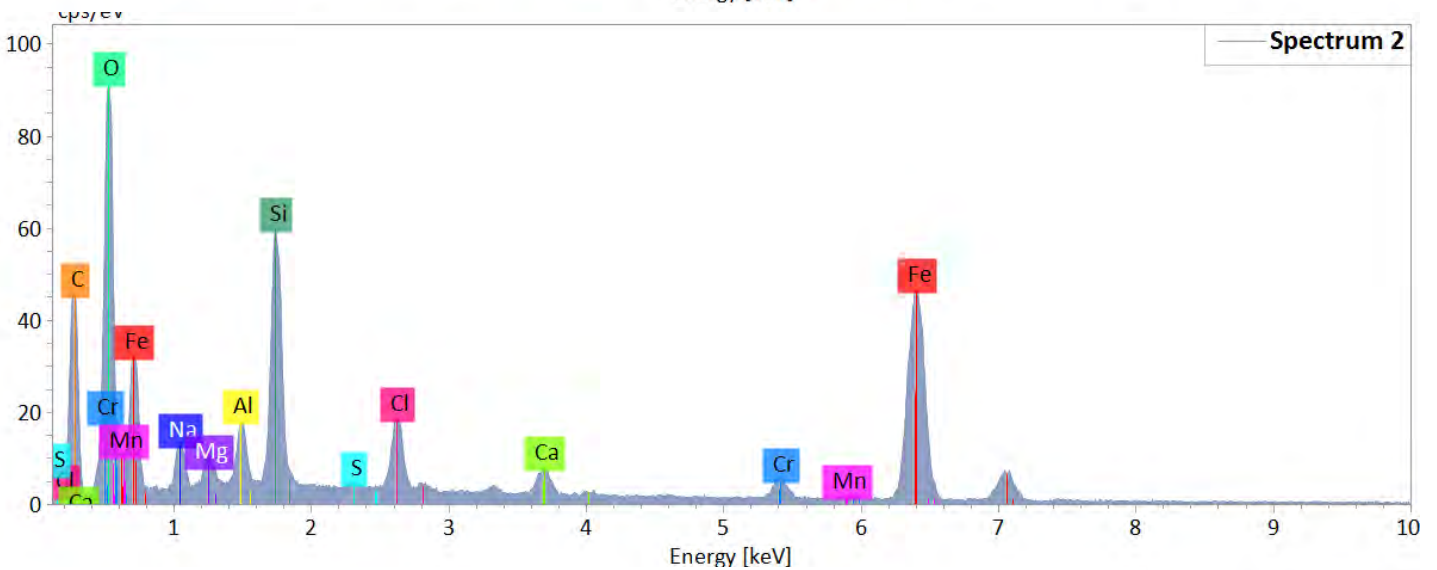
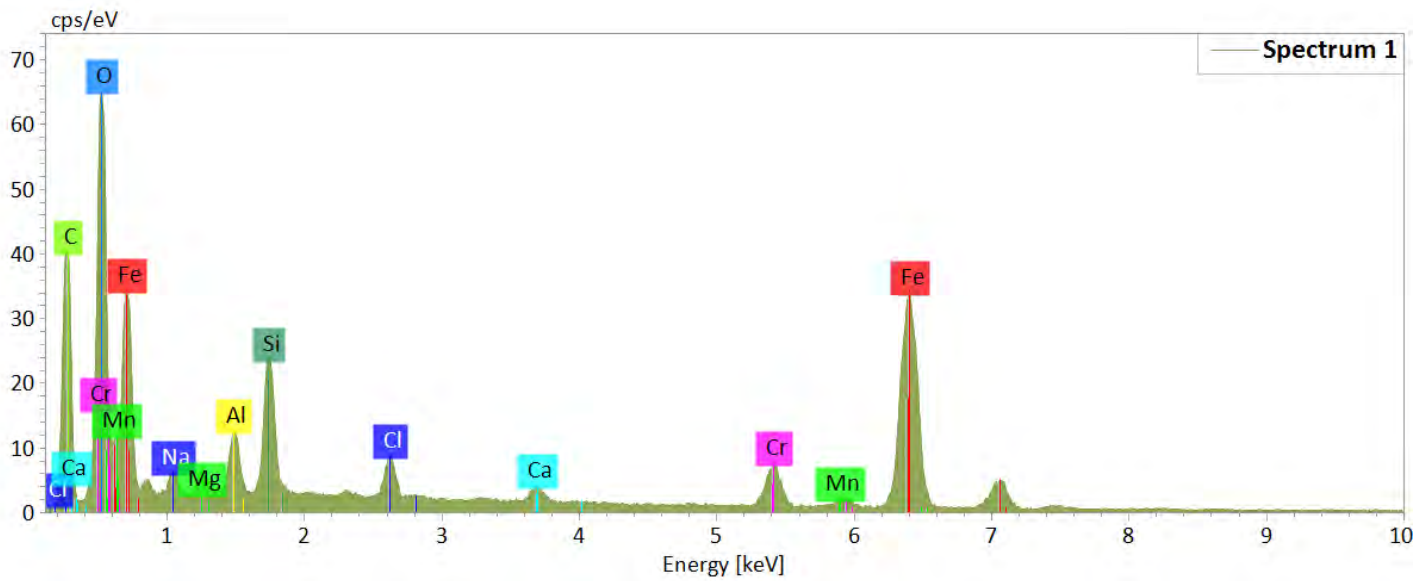
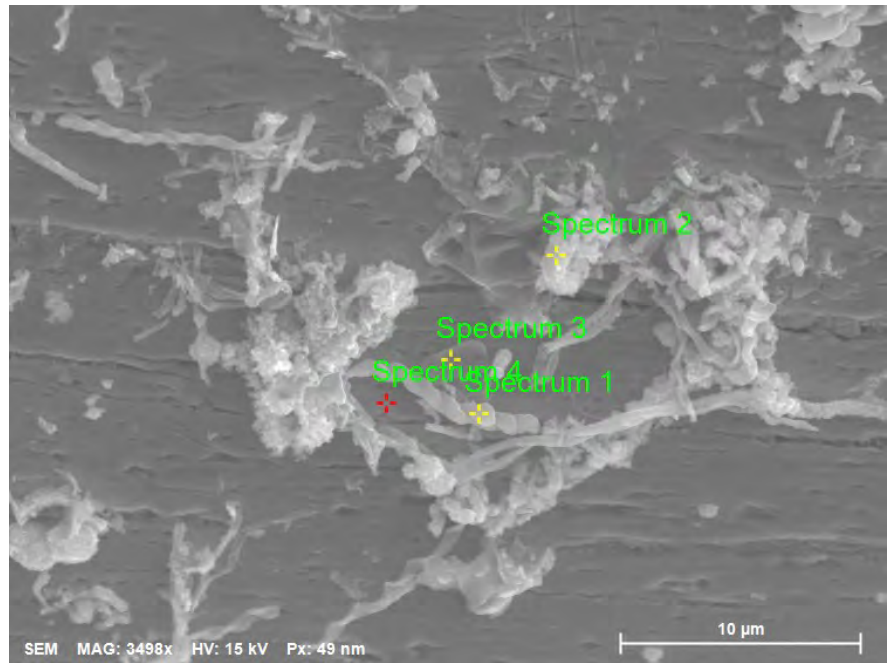
Spectrum	C	O	Na	Si	Cl	Ca	Fe
Spectrum 1	41,4	4,0	26,9	1,1	21,5		5,1
Spectrum 2	49,2	10,4	19,2	0,6	17,9	0,3	2,3

B-1-1-01



Atomic concentration [%]

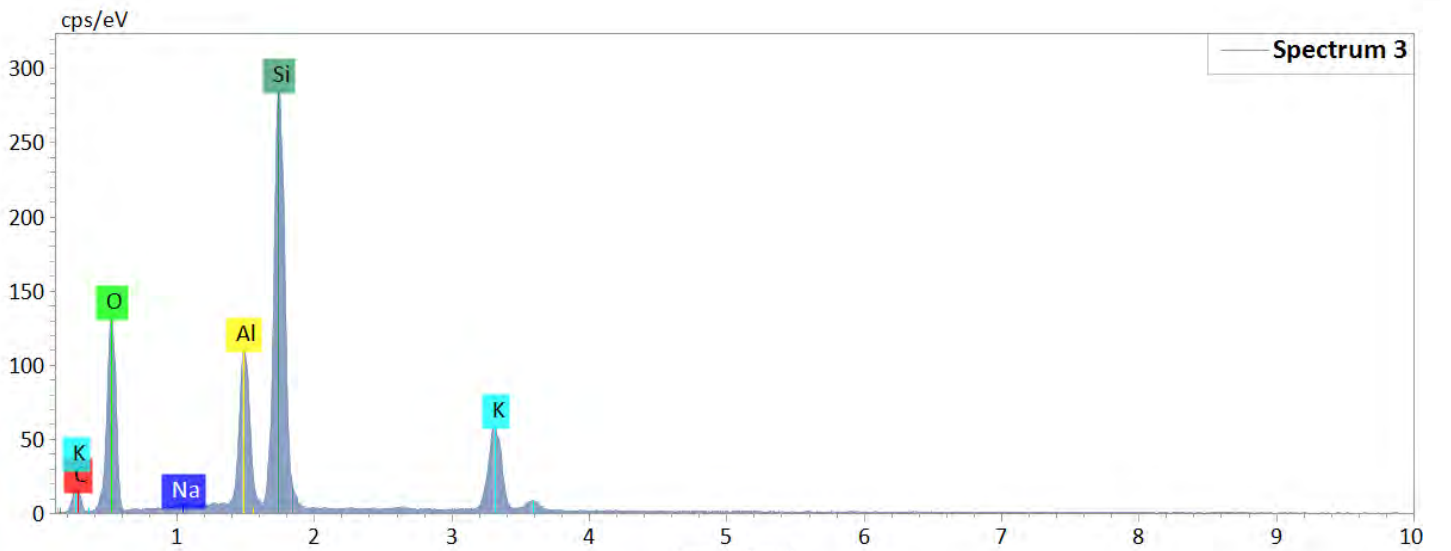
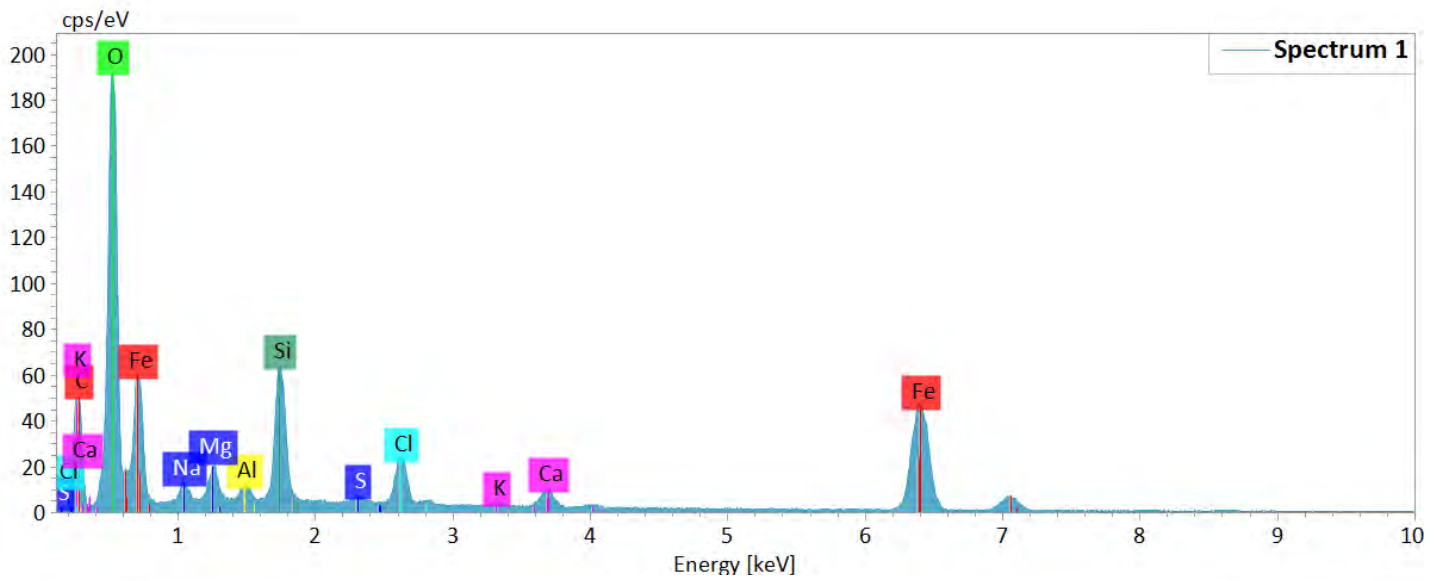
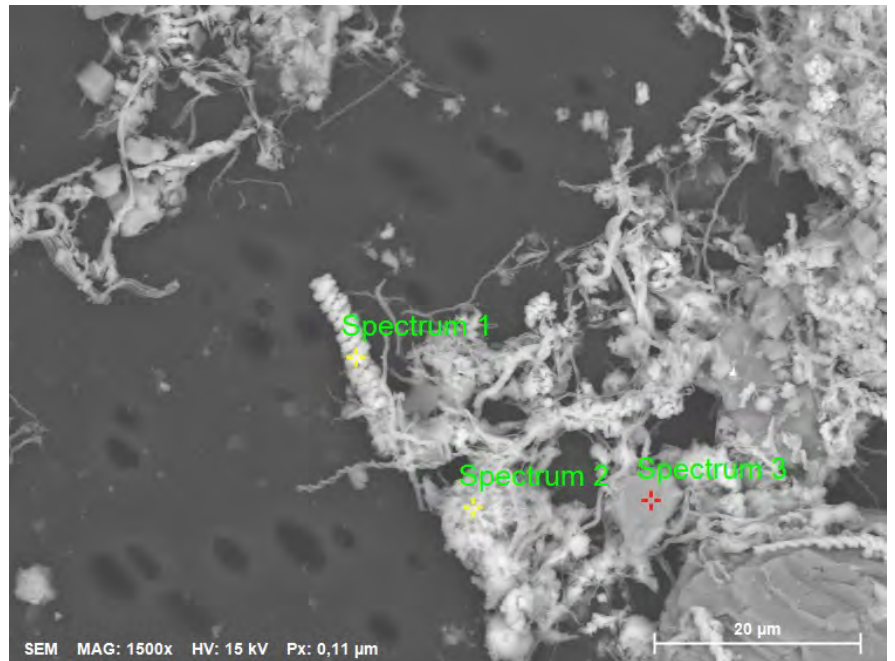
Spectrum	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Cr	Mn	Fe	Ni
Spectrum 1	24,0	47,5	1,7	1,0	7,5	4,6	0,2	1,5	0,4	1,1		3,5	7,0	
Spectrum 2	22,5	54,4	1,0	0,5	0,6	3,3	0,1	1,6		0,9		0,5	14,7	
Spectrum 3	33,0				0,3	0,5	0,3				13,1	0,9	47,0	4,9



Atomic concentration [%]

Spectrum	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	Ca	Cr	Mn	Fe	Ni
Spectrum 1	46,9	30,6	0,5	0,4	0,9	2,5		1,0	0,5	2,0	0,2	14,5	
Spectrum 2	43,7	31,6	1,0	0,6	0,8	3,9	0,1	1,5	0,9	0,9	0,1	14,9	
Spectrum 3	31,6	23,9			5,1	4,3				7,1	0,4	25,3	2,4
Spectrum 4	47,5	7,2			1,1					8,5	0,7	31,9	3,1

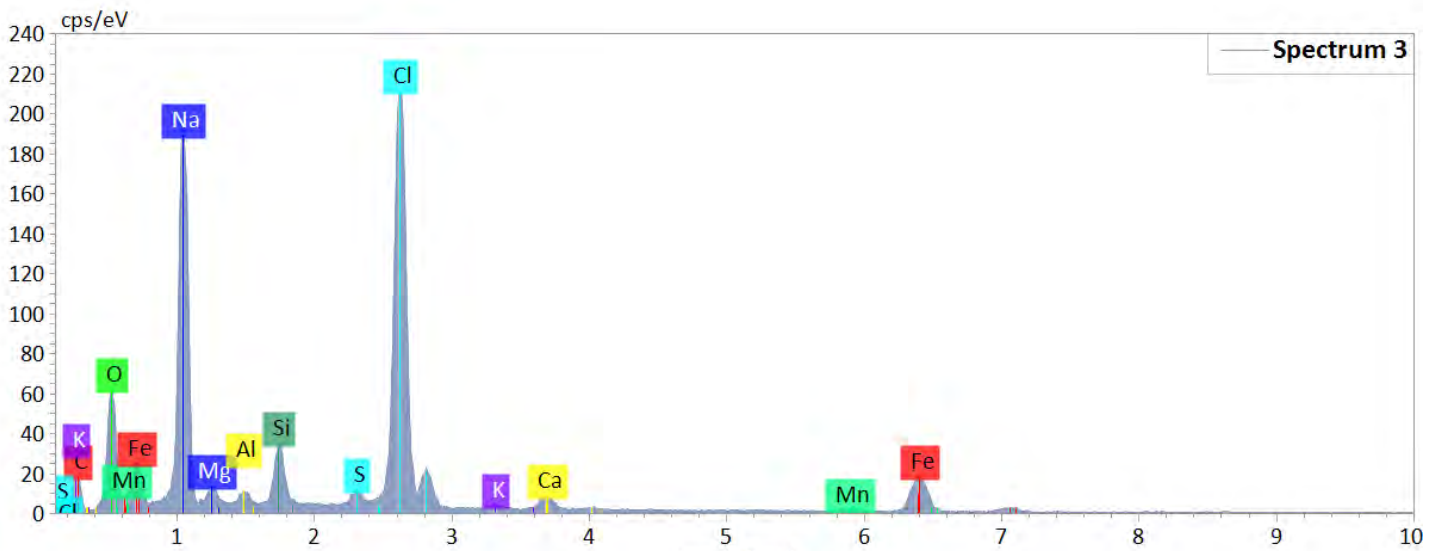
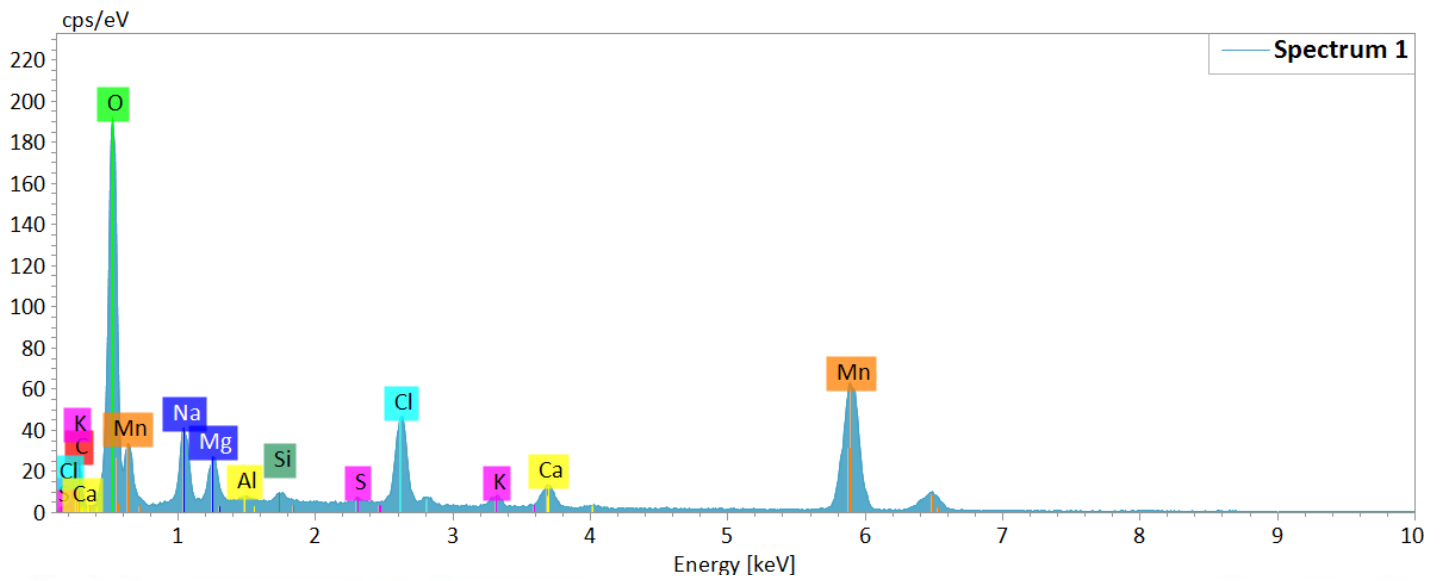
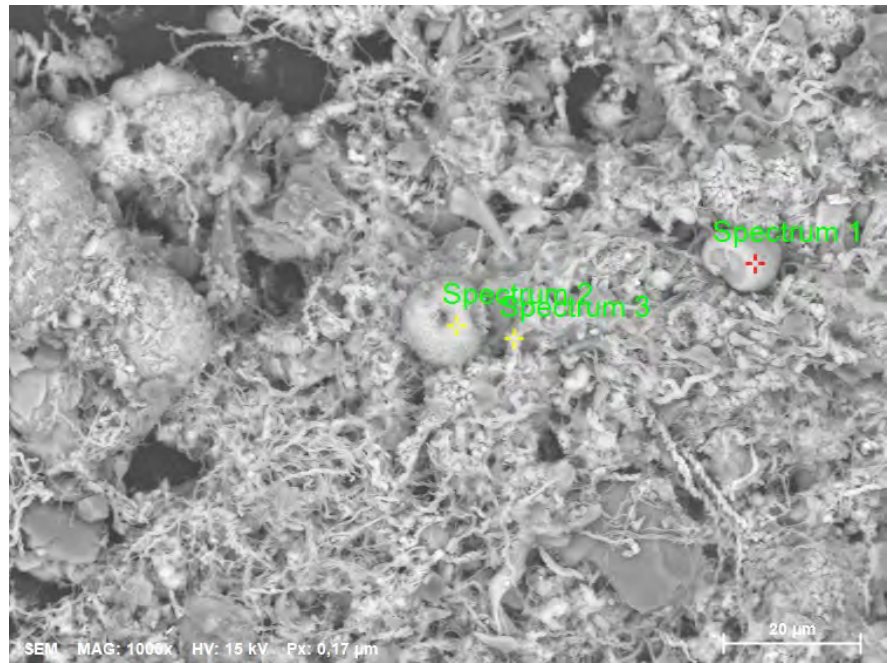
B-1-2-01b



Atomic concentration [%]

Spectrum	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Mn	Fe
Spectrum 1	22,4	54,6	1,0	1,3	0,5	3,8	0,3	1,6	0,2	1,0		13,5
Spectrum 2	21,4	53,9	7,3	1,7	0,3	0,8	1,7	3,5	0,3	2,7	4,7	1,7
Spectrum 3	10,7	56,0	0,2		6,2	20,3			6,5			

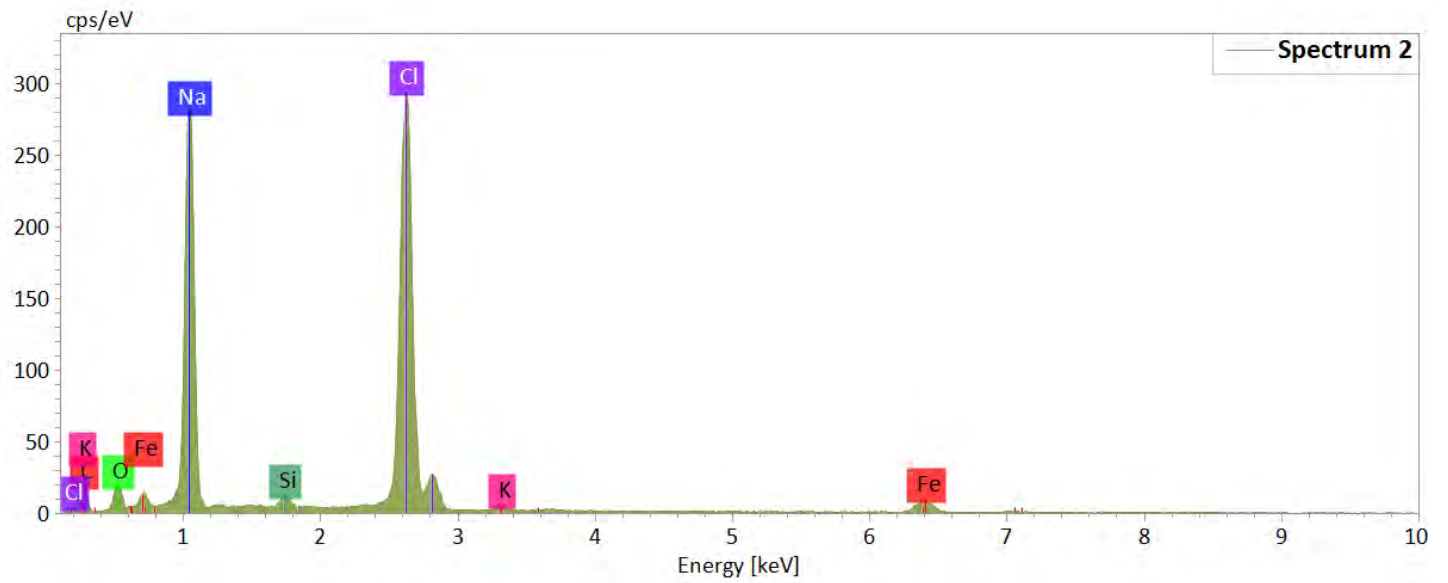
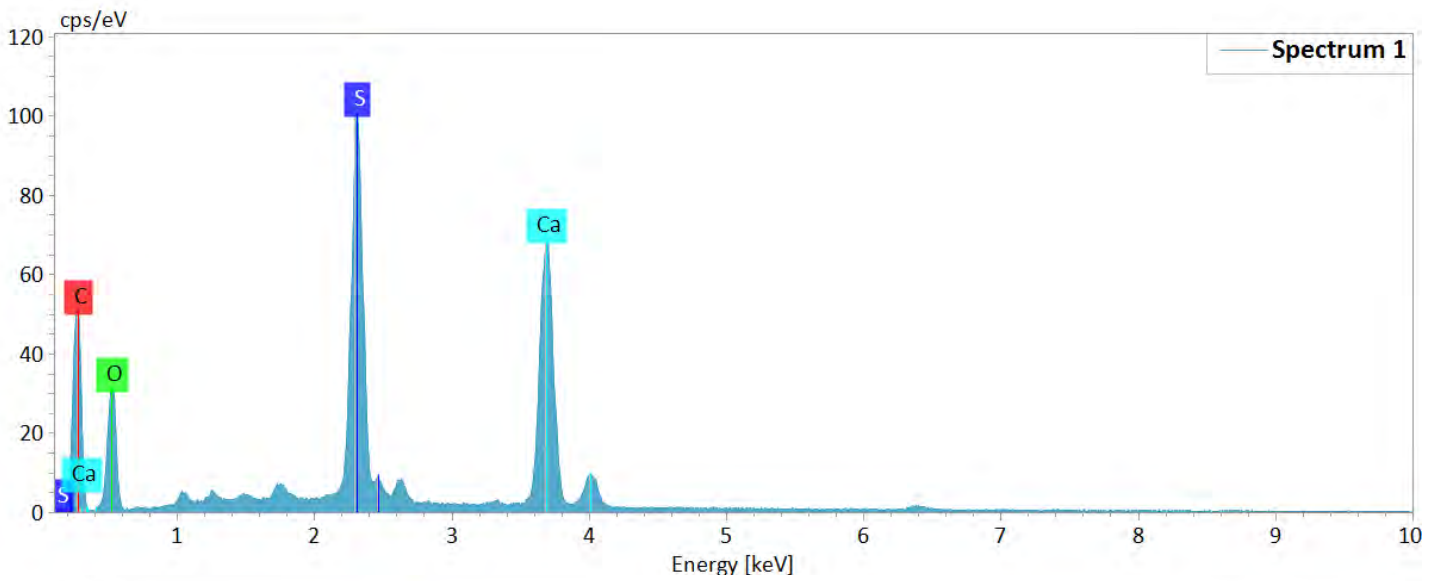
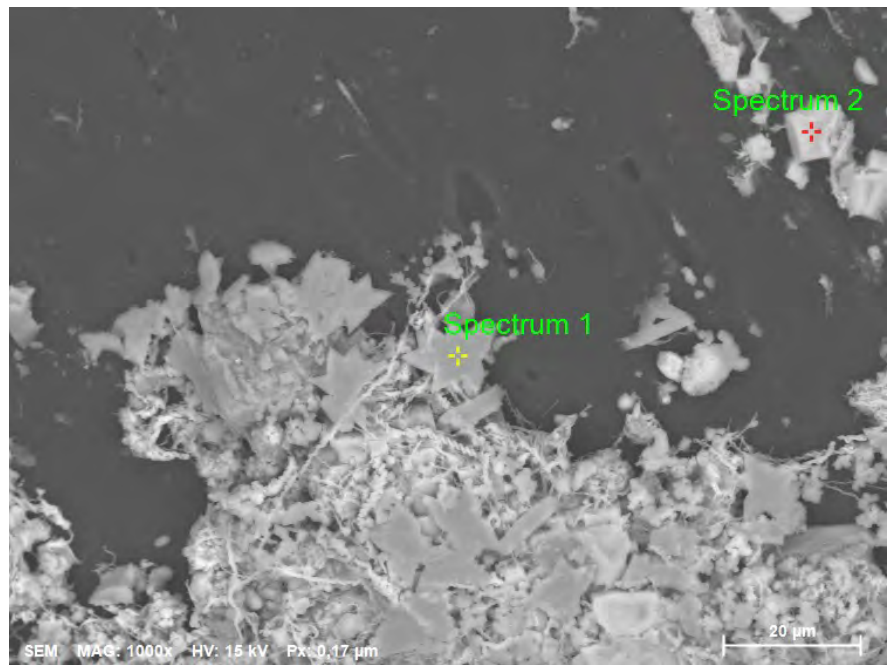
B-1-2-01c



Atomic concentration [%]

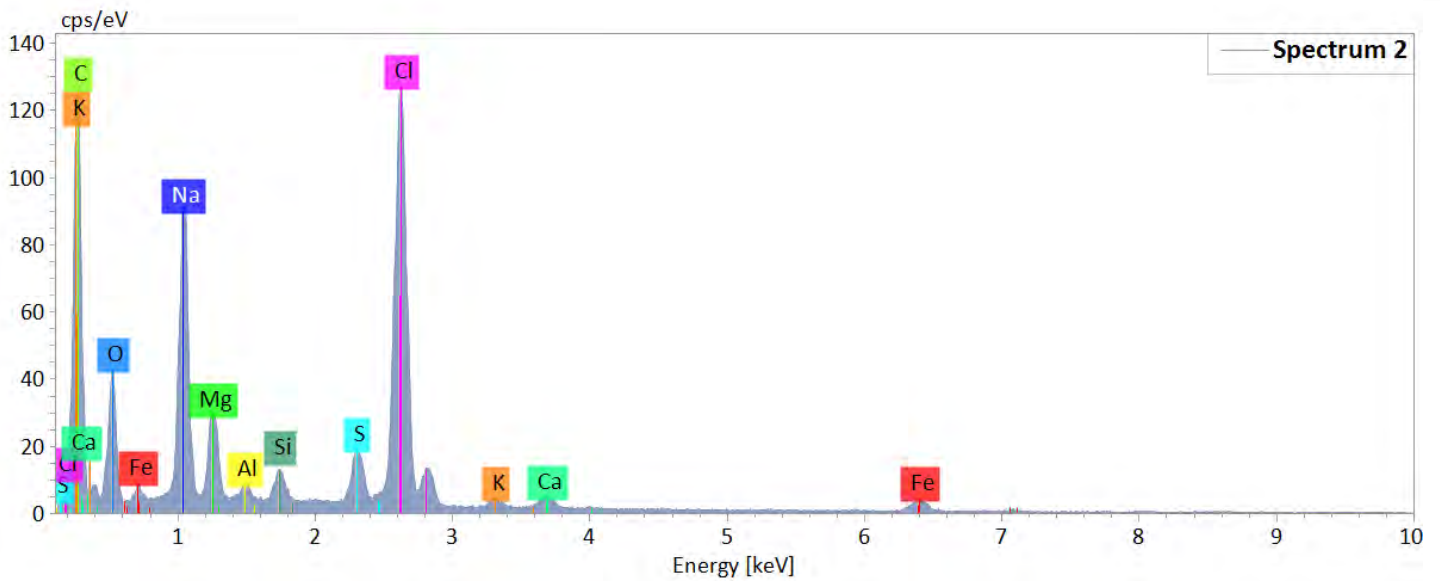
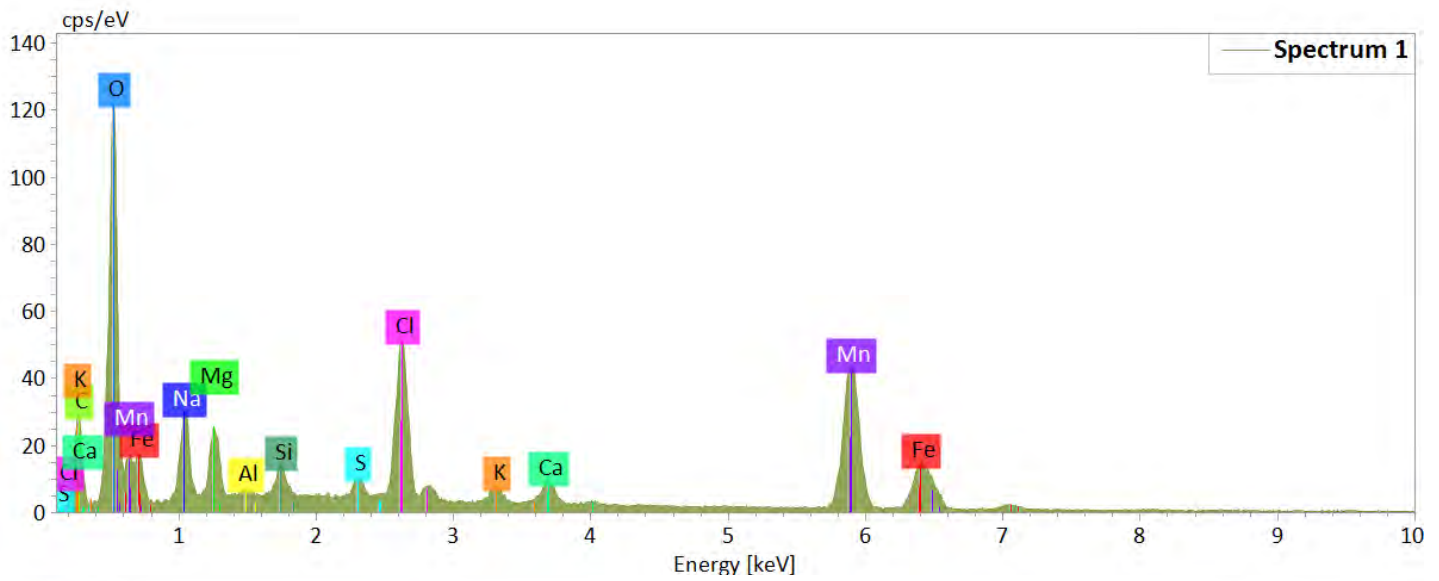
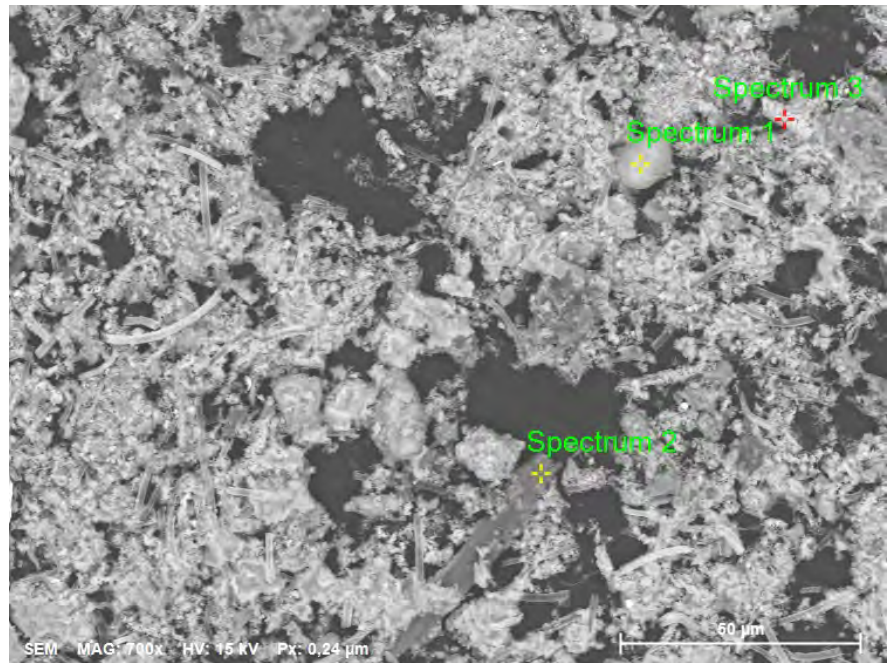
Spectrum	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Mn	Fe
Spectrum 1	12,7	57,0	3,6	1,7	0,1	0,3	0,2	4,1	0,6	1,6	18,2	
Spectrum 2	12,5	56,7	4,1	1,5	0,2	0,3	0,2	3,9	0,4	1,5	18,6	
Spectrum 3	21,9	28,6	21,9	0,8	0,5	2,1	0,4	17,0	0,2	1,0	0,3	5,3

B-1-2-02



Atomic concentration [%]

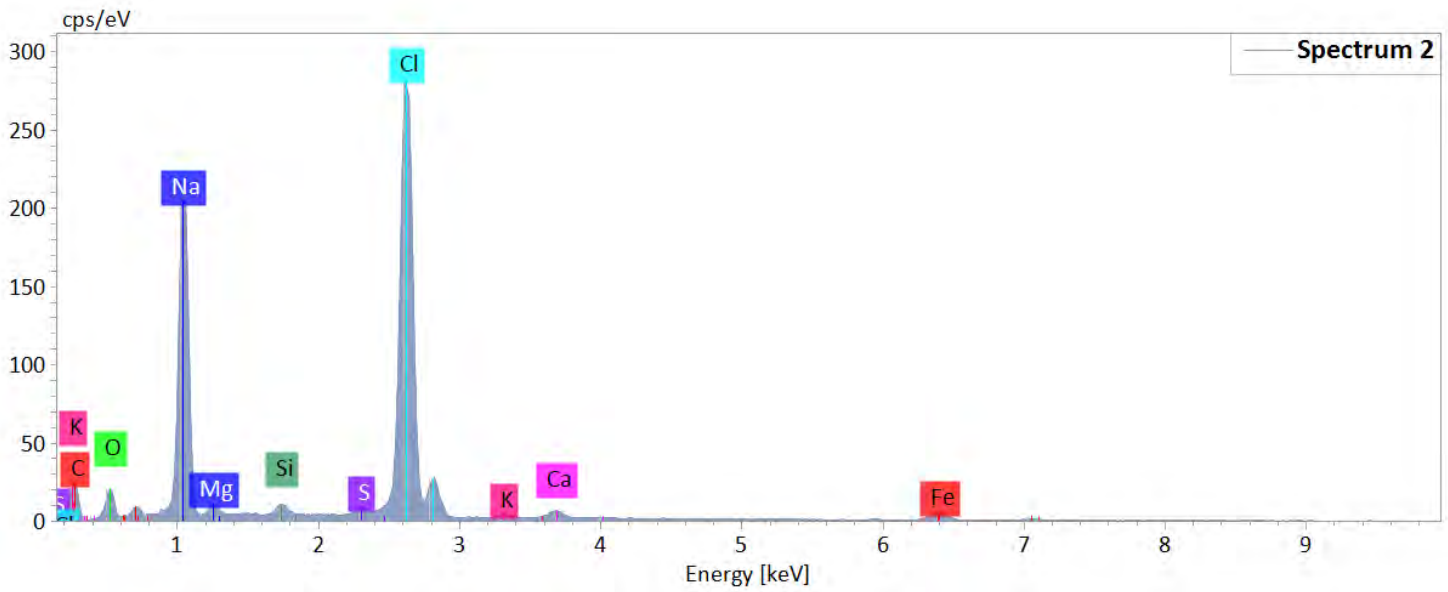
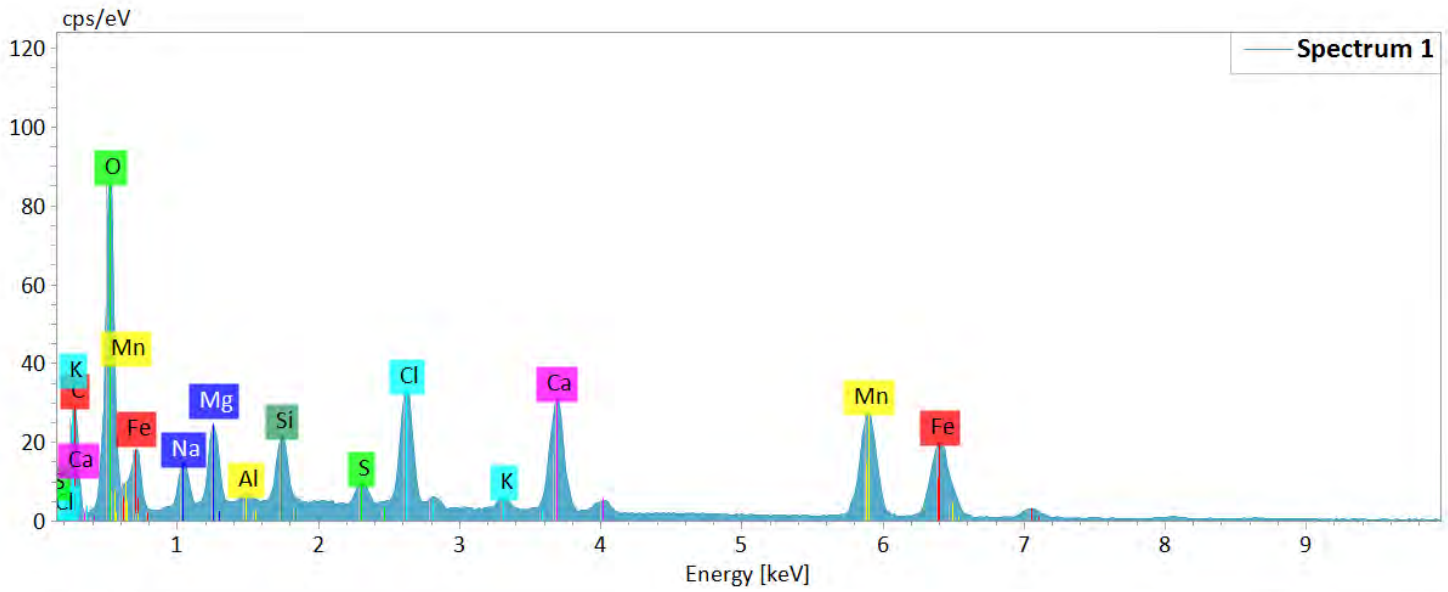
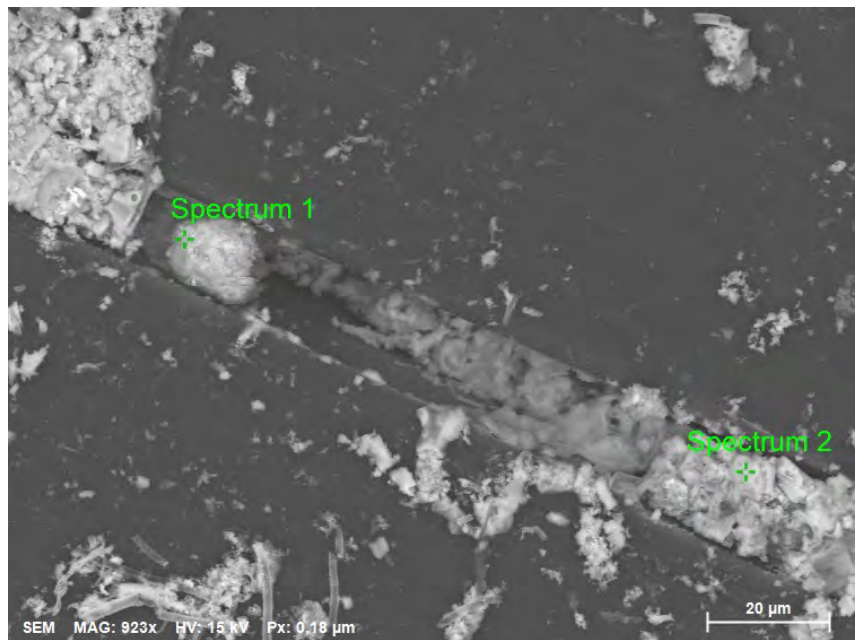
Spectrum	C	O	Na	Si	S	Cl	K	Ca	Fe
Spectrum 1	55,2	28,1			7,5			9,1	
Spectrum 2	33,1	10,5	32,7	0,7		19,2	0,5		3,3



Atomic concentration [%]

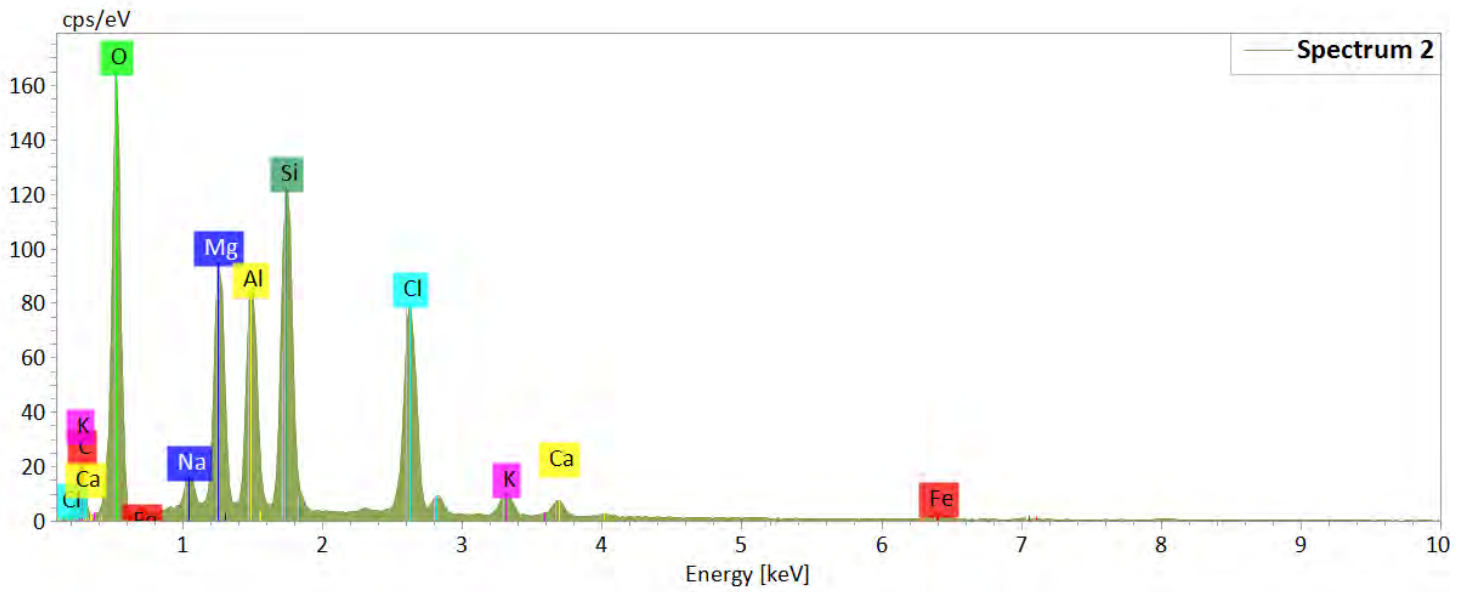
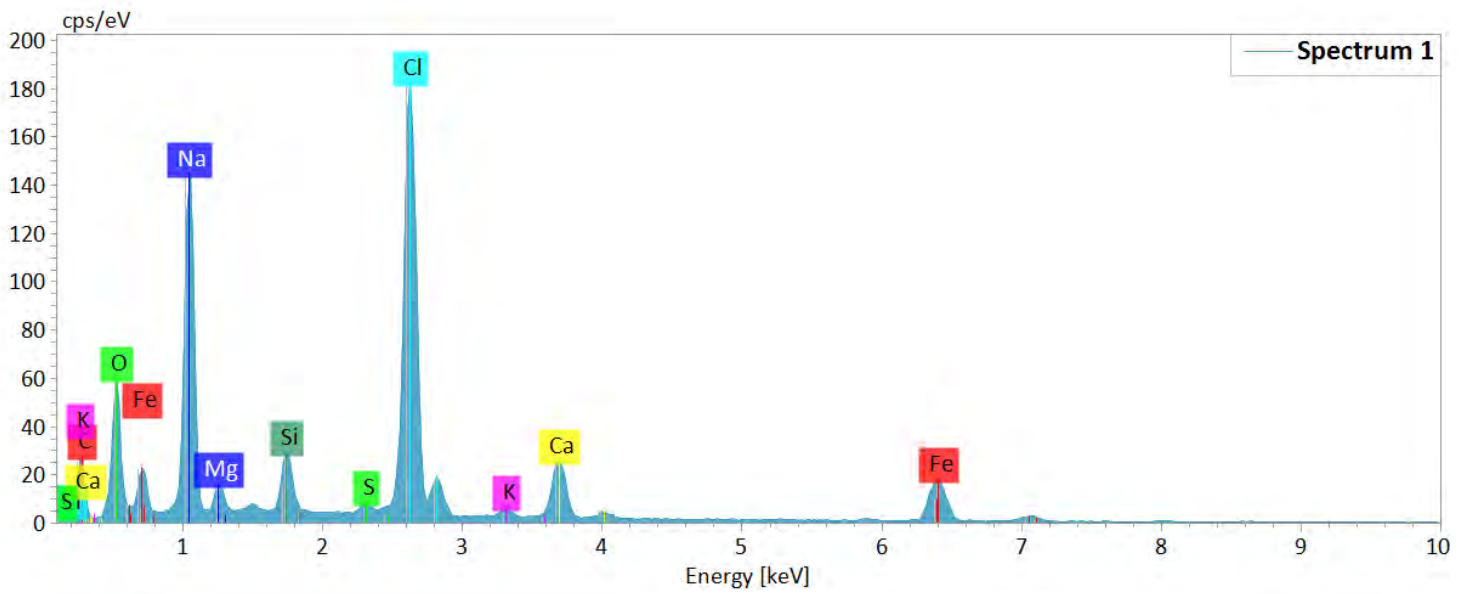
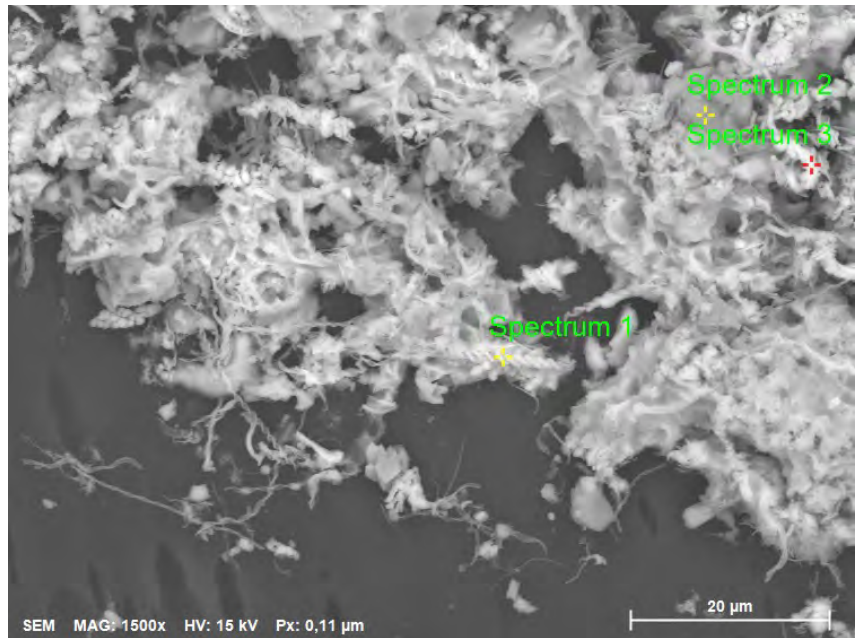
Spectrum	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Mn	Fe
Spectrum 1	20,4	46,8	4,7	2,5	0,1	0,8	0,5	4,6	0,6	1,0	13,4	4,6
Spectrum 2	62,8	19,5	6,3	1,5	0,2	0,4	0,8	7,1	0,2	0,4		0,8
Spectrum 3	17,9	51,7	1,8	1,2	0,3	4,1	0,4	2,2	0,5	1,1		18,8

A-1-3-02



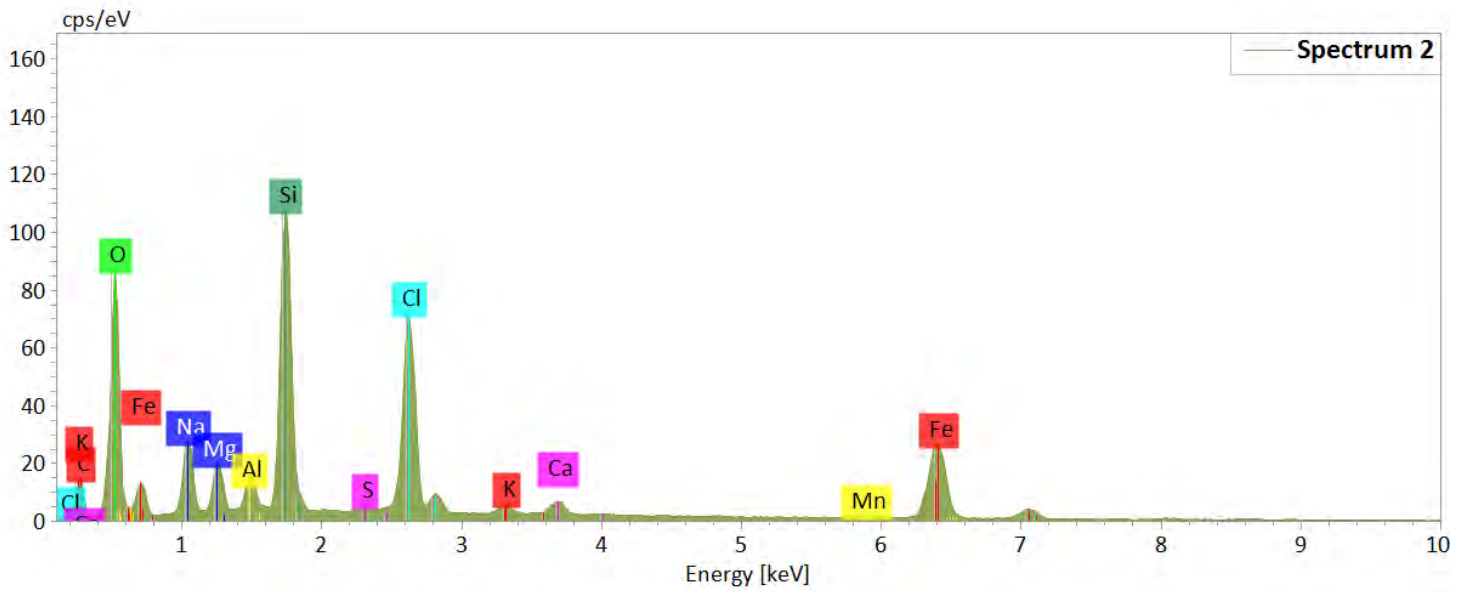
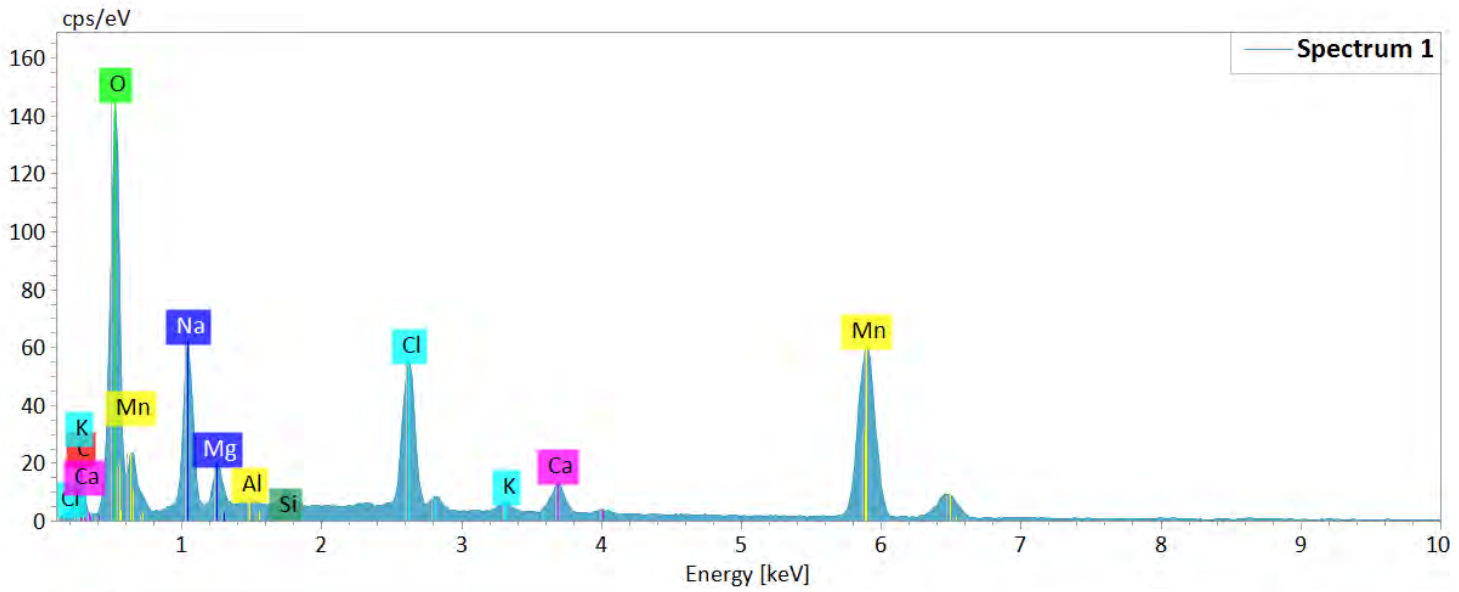
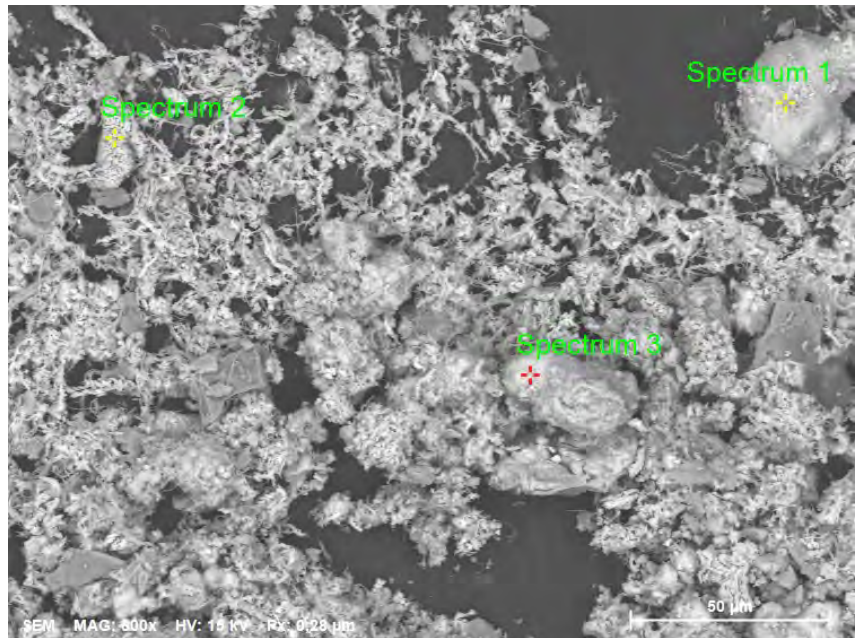
Atomic concentration [%]

Spectrum	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Mn	Fe
Spectrum 1	21,3	46,2	2,2	2,6	0,3	1,6	0,5	3,1	0,4	4,6	9,1	8,1
Spectrum 2	39,6	13,5	20,6	0,6		0,5	0,2	22,2	0,3	0,6		1,9



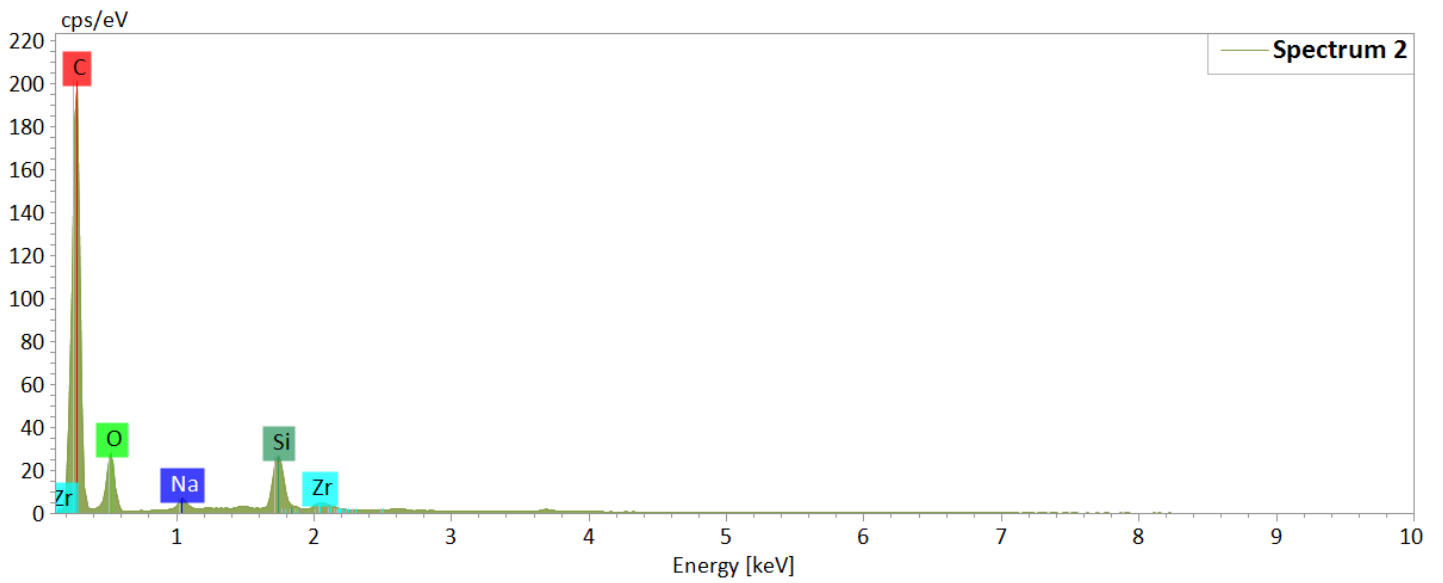
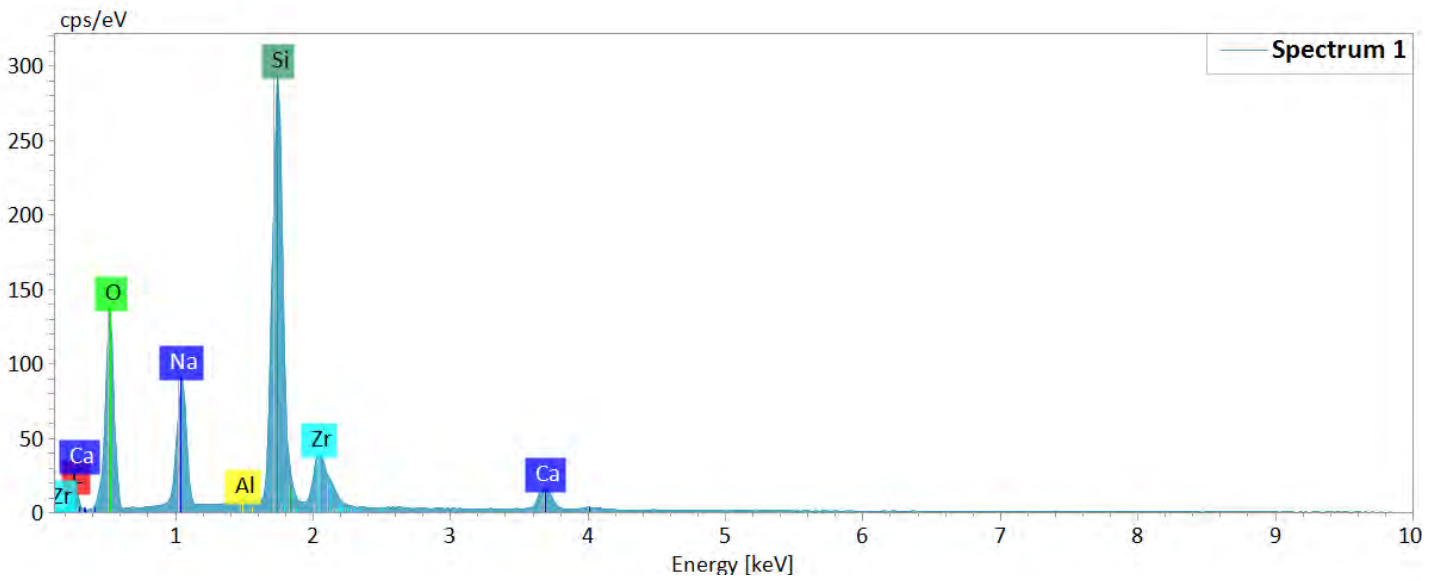
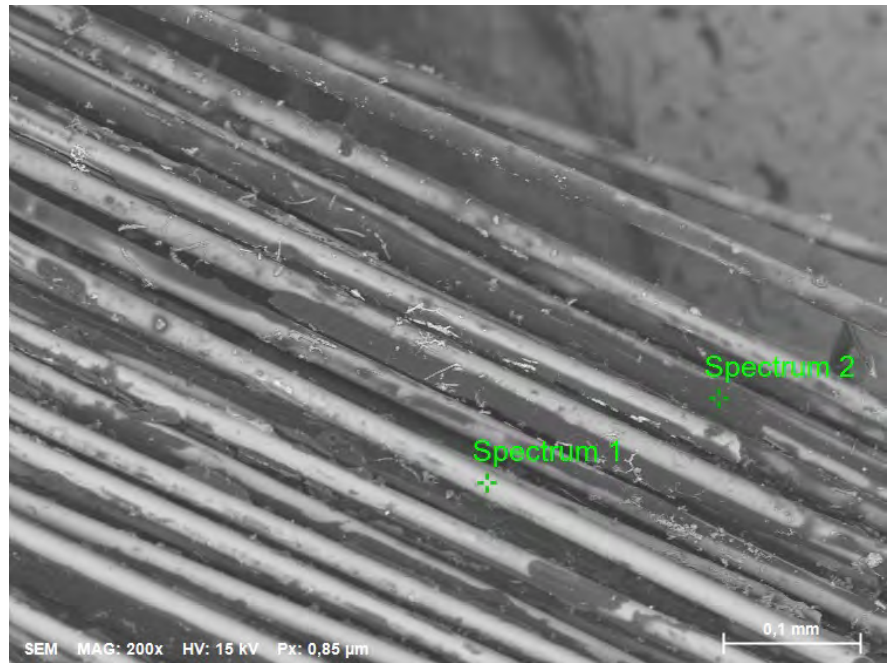
Atomic concentration [%]

Spectrum	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe
Spectrum 1	29,7	30,0	14,9	0,9		1,6		0,2	13,0	0,4	3,0	6,1
Spectrum 2	16,9	55,5	0,8	5,5	5,1	8,3			5,6	0,8	0,7	0,7
Spectrum 3	18,4	44,5	10,7	1,9	0,7	4,2	0,1	0,1	9,3	0,5	0,9	8,6



Atomic concentration [%]

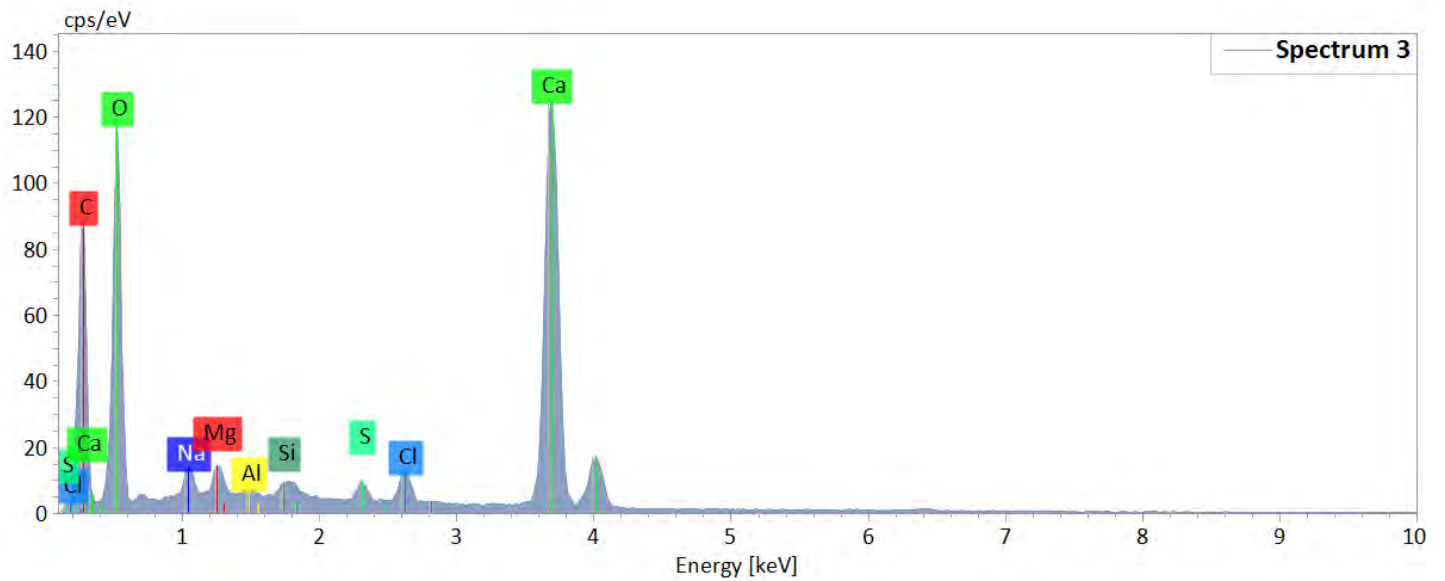
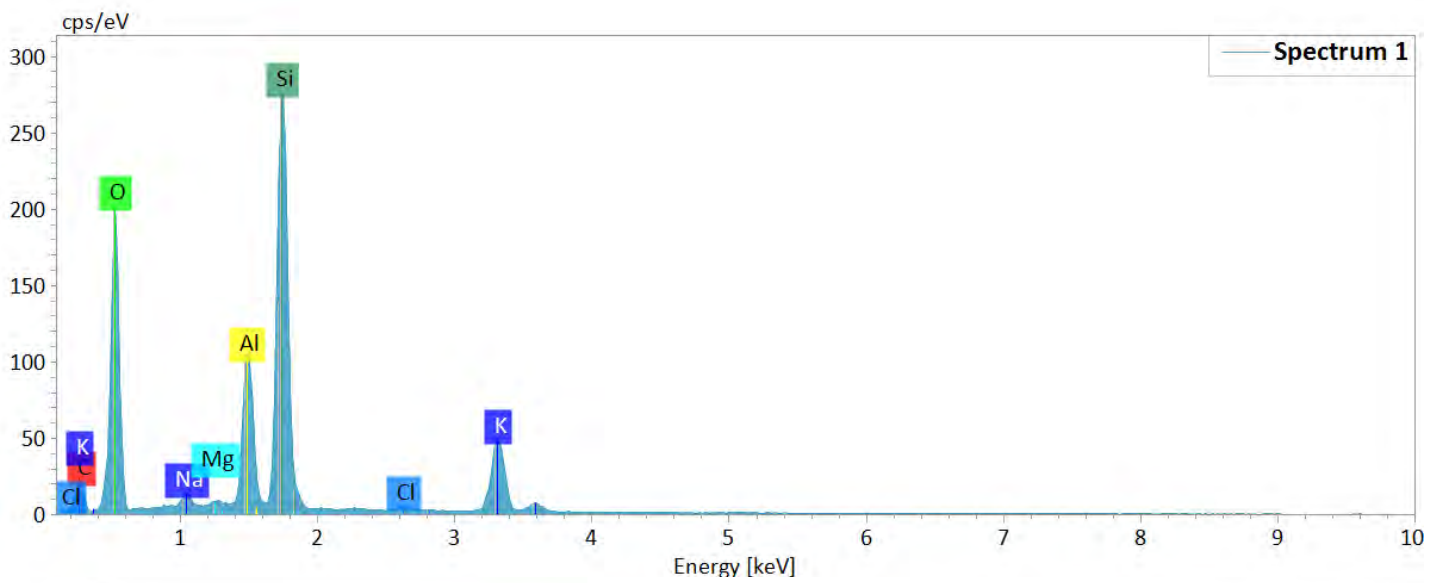
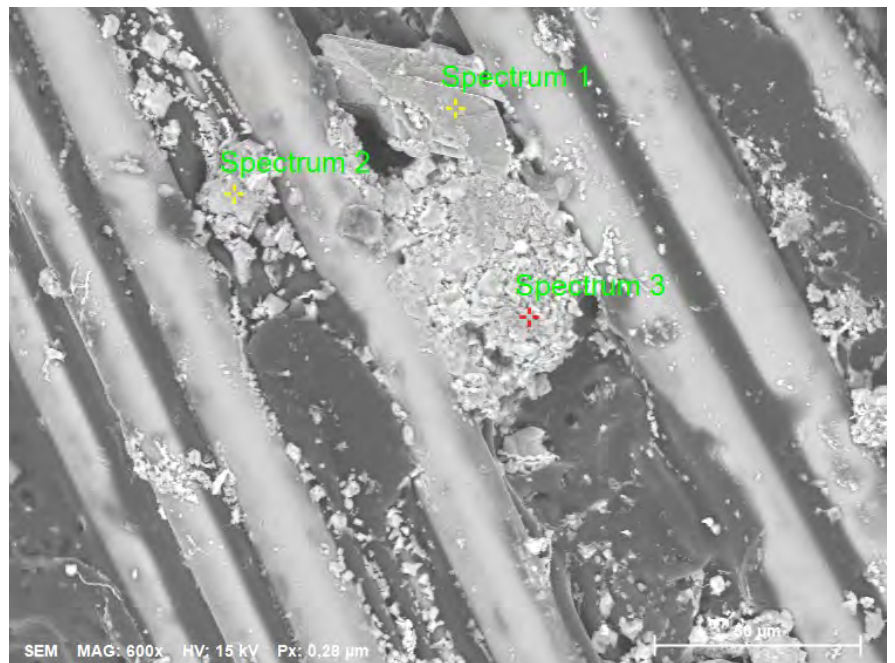
Spectrum	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Mn	Fe
Spectrum 1	14,1	50,2	7,1	1,4	0,2	0,4		4,9	0,4	1,6	19,6	
Spectrum 2	17,8	43,5	4,7	2,3	1,3	10,5	0,2	7,8	0,6	0,8	0,3	10,4
Spectrum 3	12,4	53,6	3,0	2,4	0,2	0,8		3,3	0,7	1,7	20,2	1,7



Atomic concentration [%]

Spectrum	C	O	Na	Al	Si	Ca	Zr
Spectrum 1	18,9	50,8	7,8	0,2	18,1	2,0	2,3
Spectrum 2	79,6	18,1	0,5		1,6		0,2

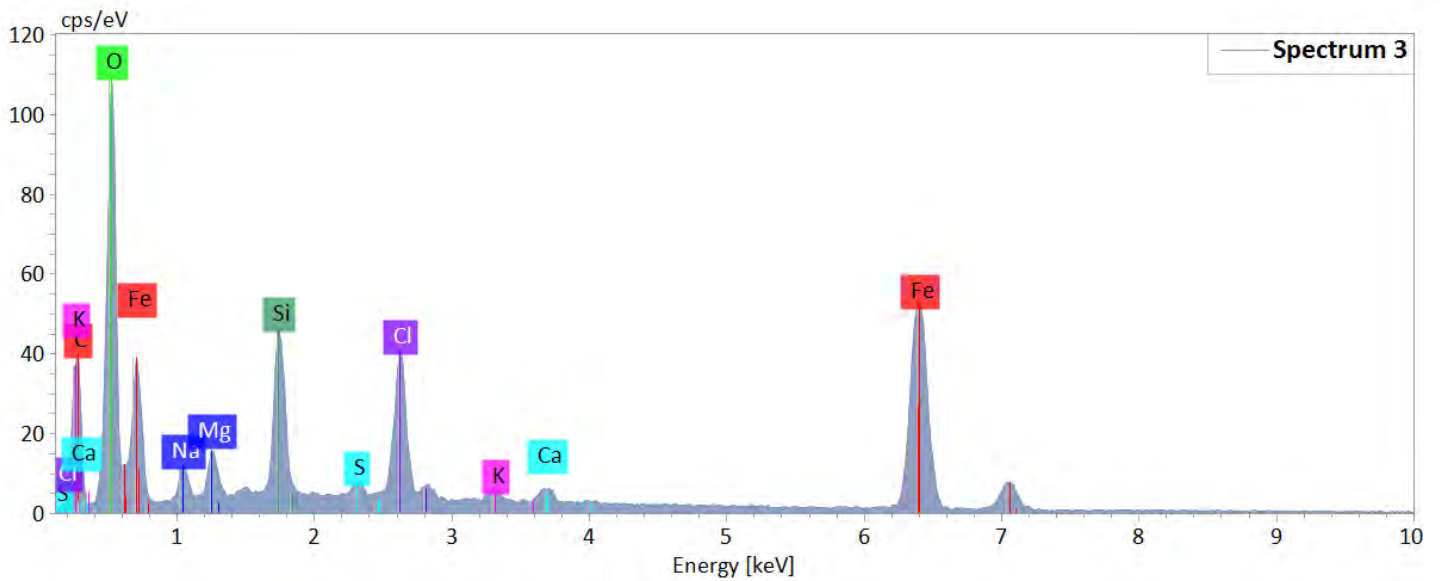
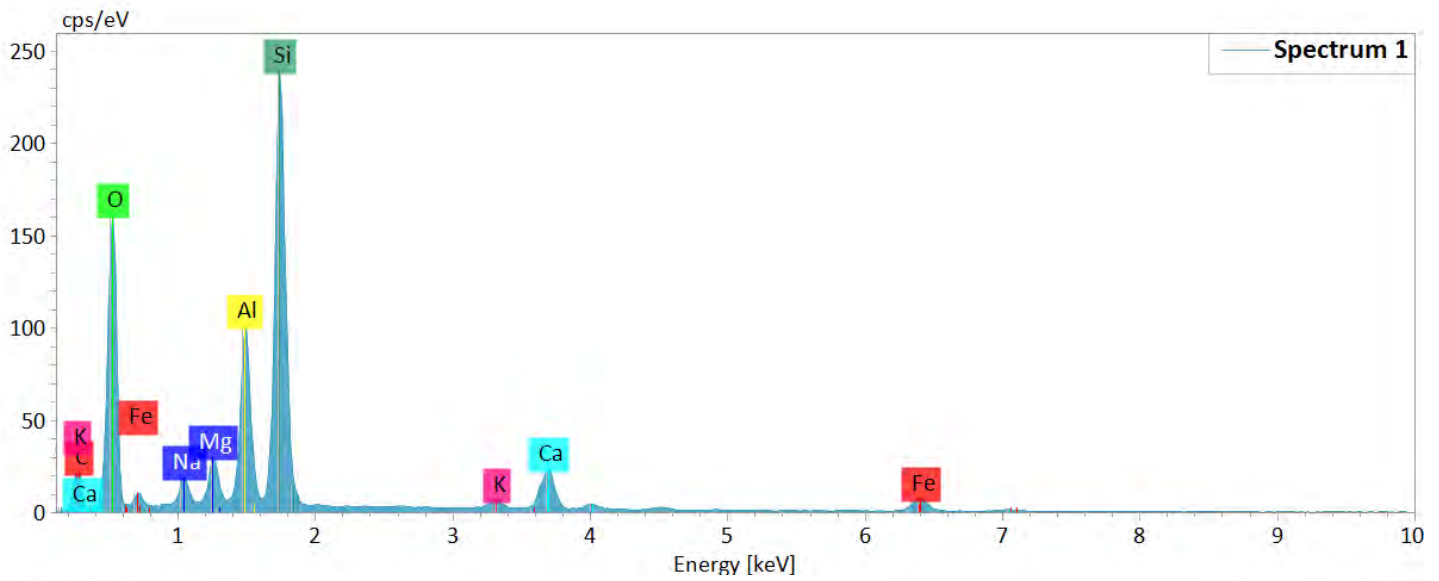
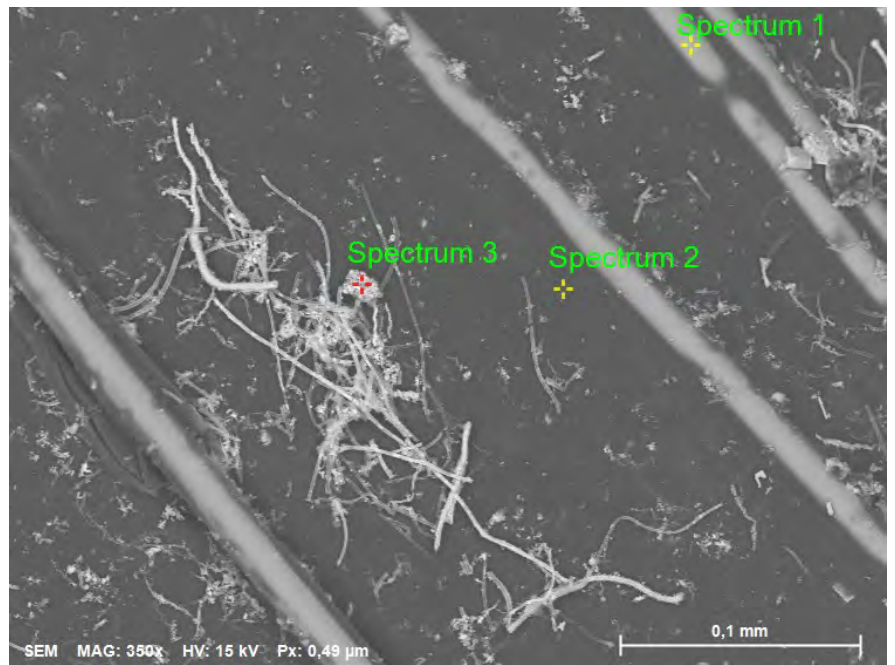
B-2-1-01b



Atomic concentration [%]

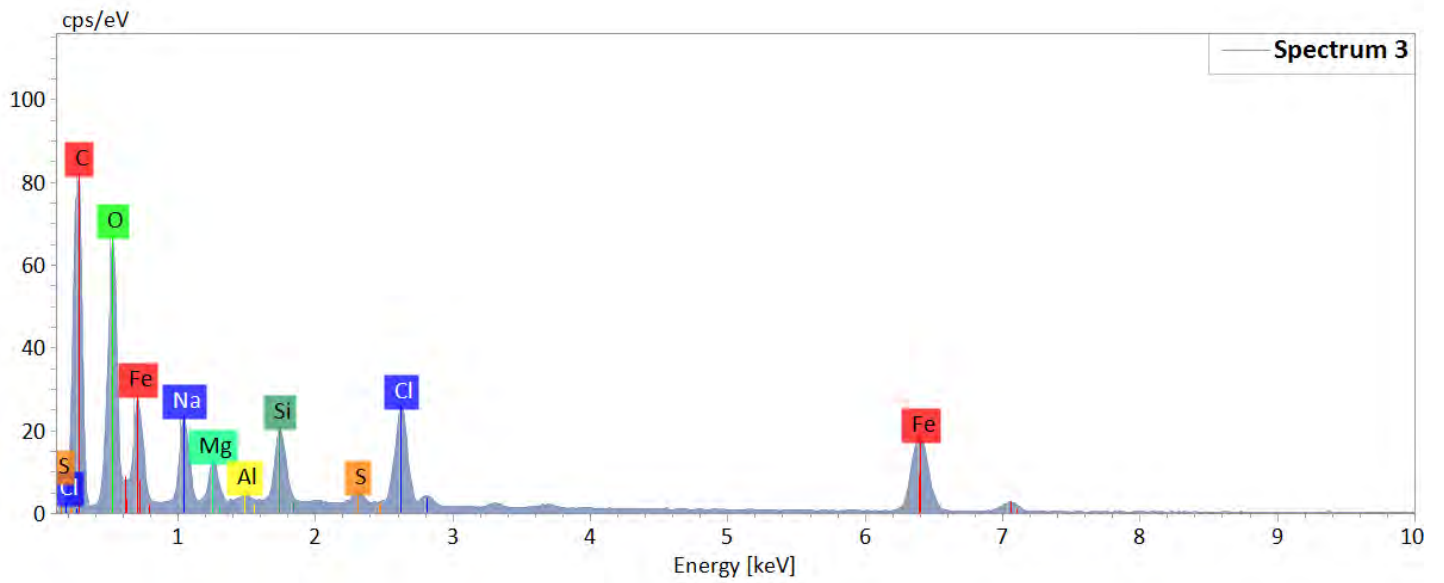
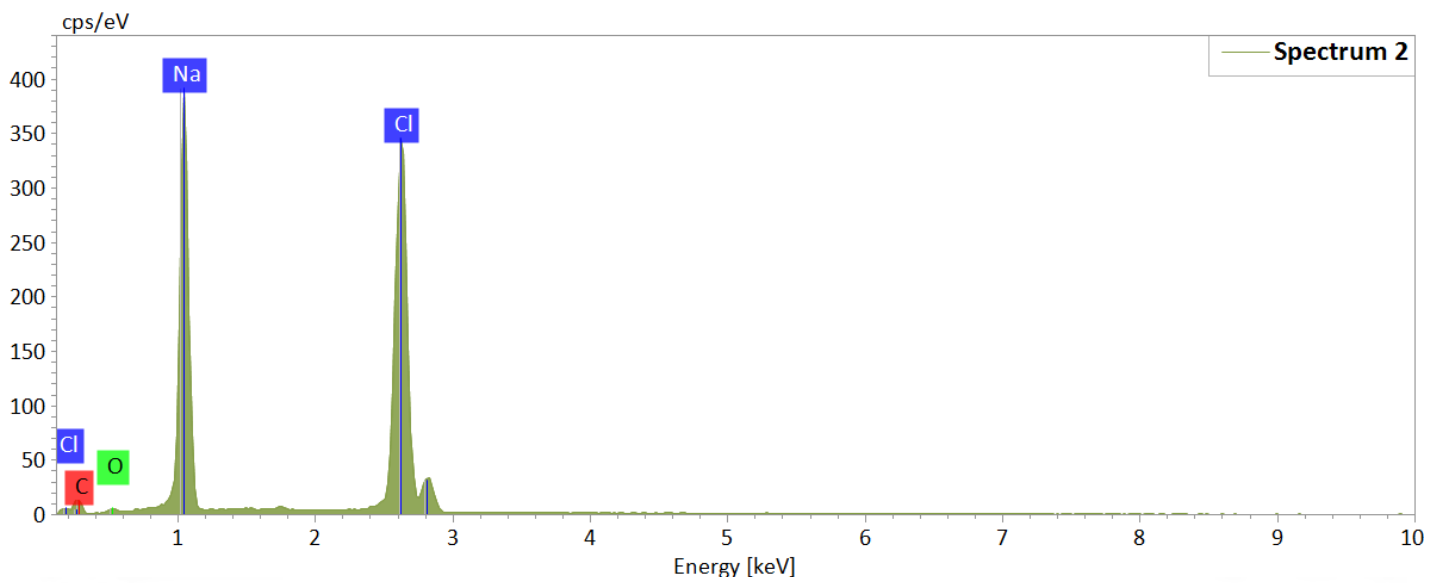
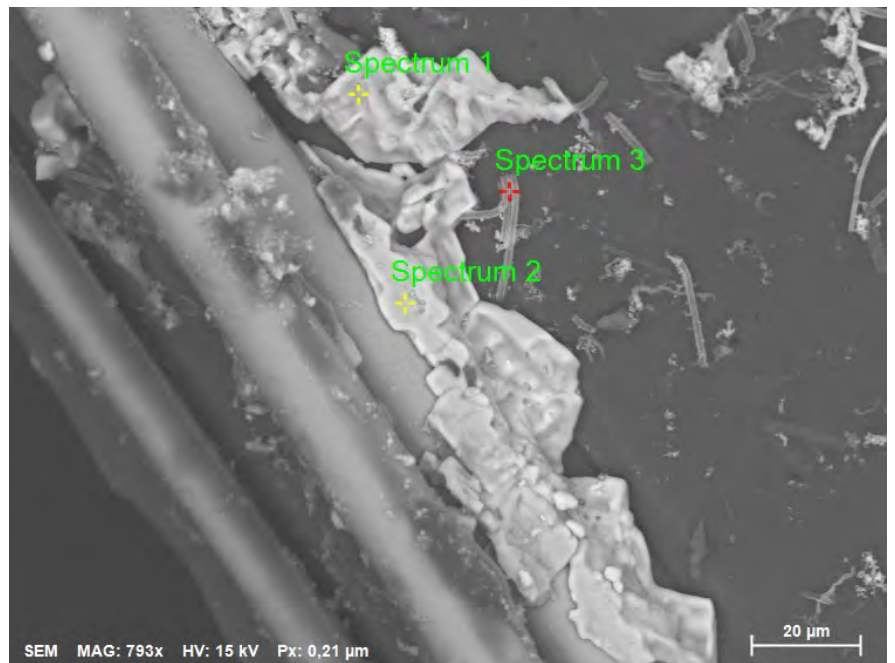
Spectrum	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca
Spectrum 1	10,4	62,3	0,6	0,1	5,2	15,9		0,2	5,4	
Spectrum 2	20,8	38,4	7,4	8,9	1,1	5,3	0,9	11,2	0,5	5,5
Spectrum 3	32,4	54,5	0,6	0,4	0,0	0,2	0,3	0,6		11,0

A-2-2-01b



Atomic concentration [%]

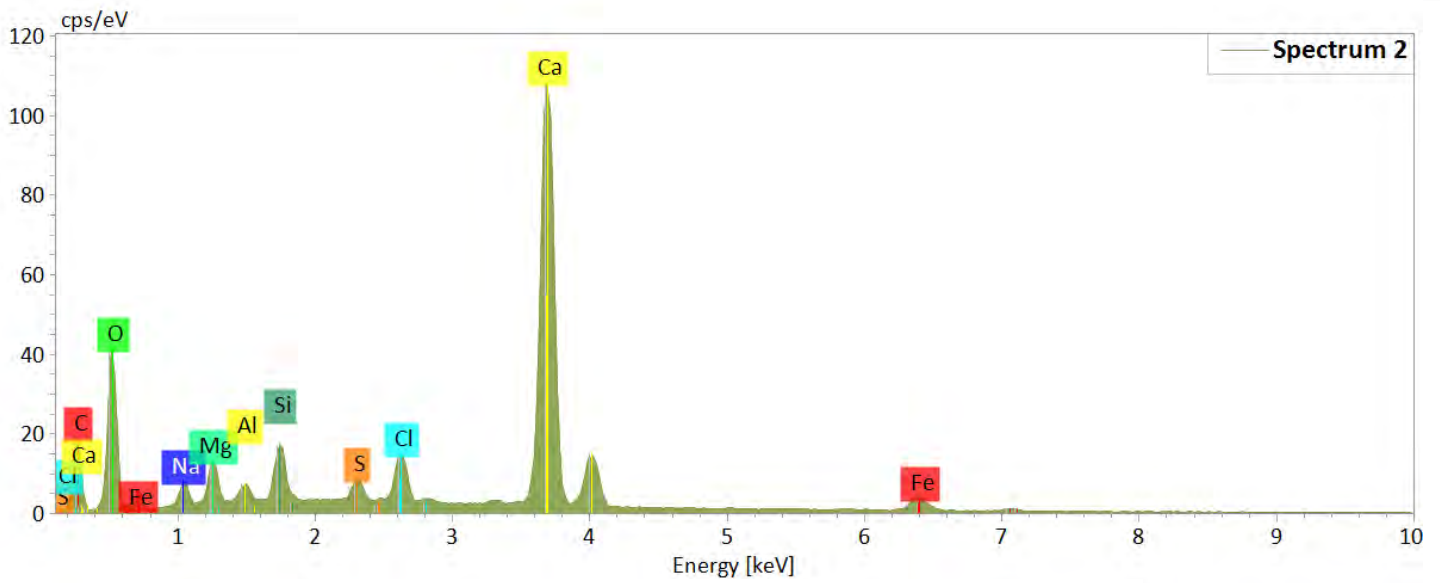
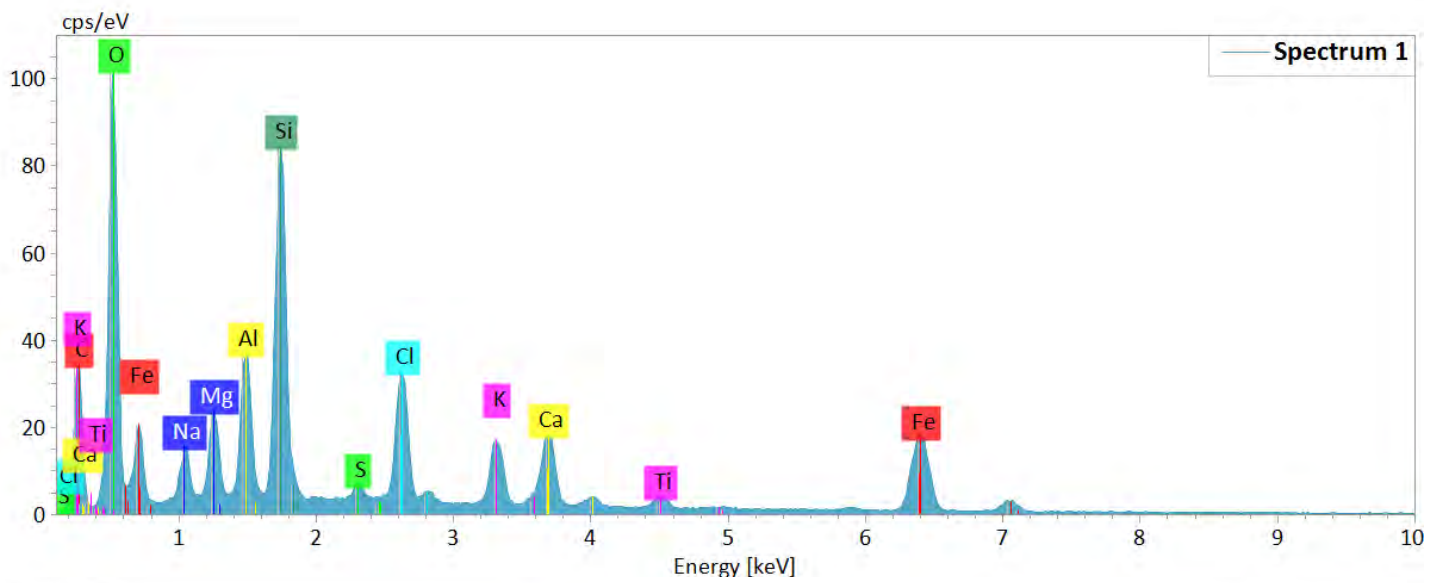
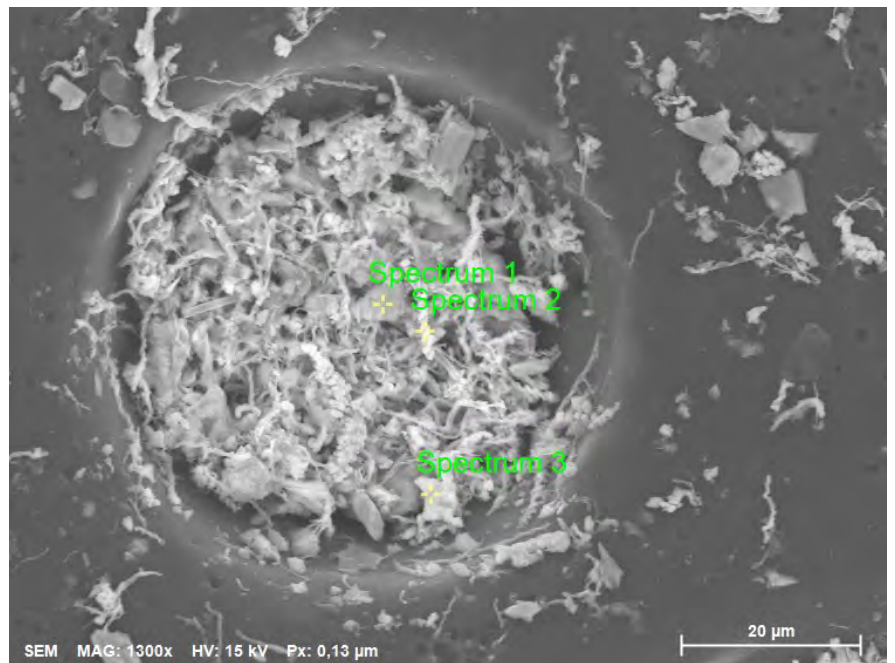
Spectrum	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe
Spectrum 1	14,4	55,1	1,5	1,8	6,2	15,5			0,6	2,8	2,2
Spectrum 2	76,5	23,5									
Spectrum 3	27,2	42,4	1,9	1,7		3,9	0,3	3,8	0,3	0,5	18,1



Atomic concentration [%]

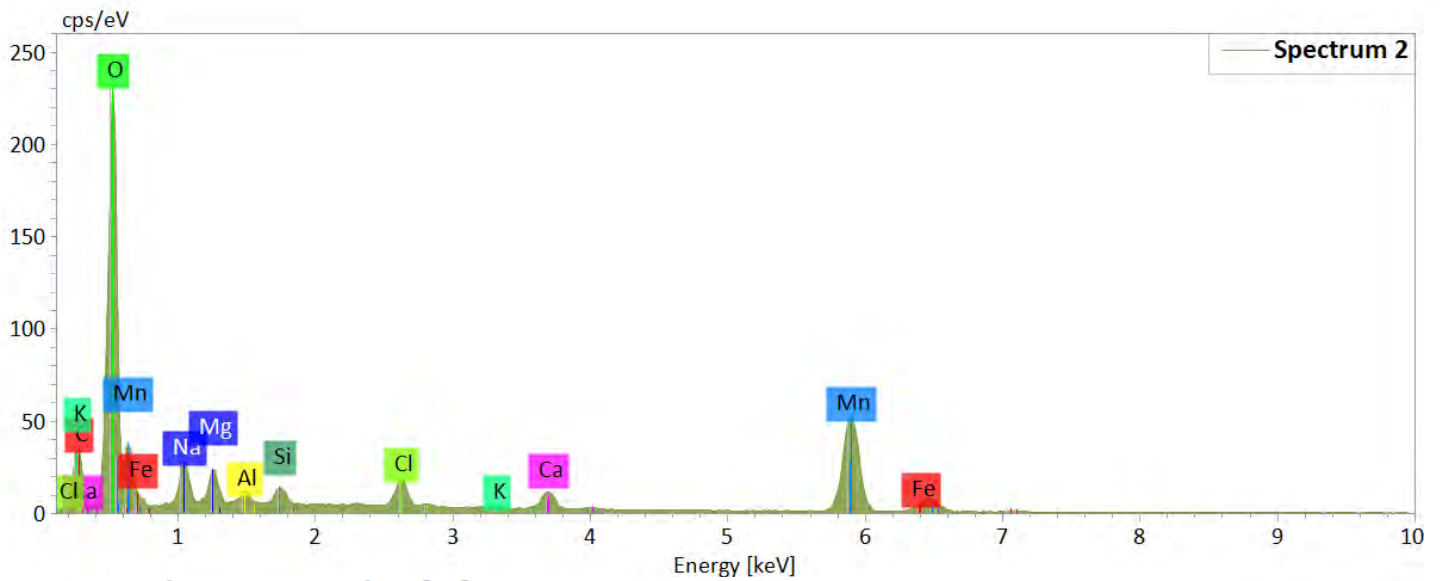
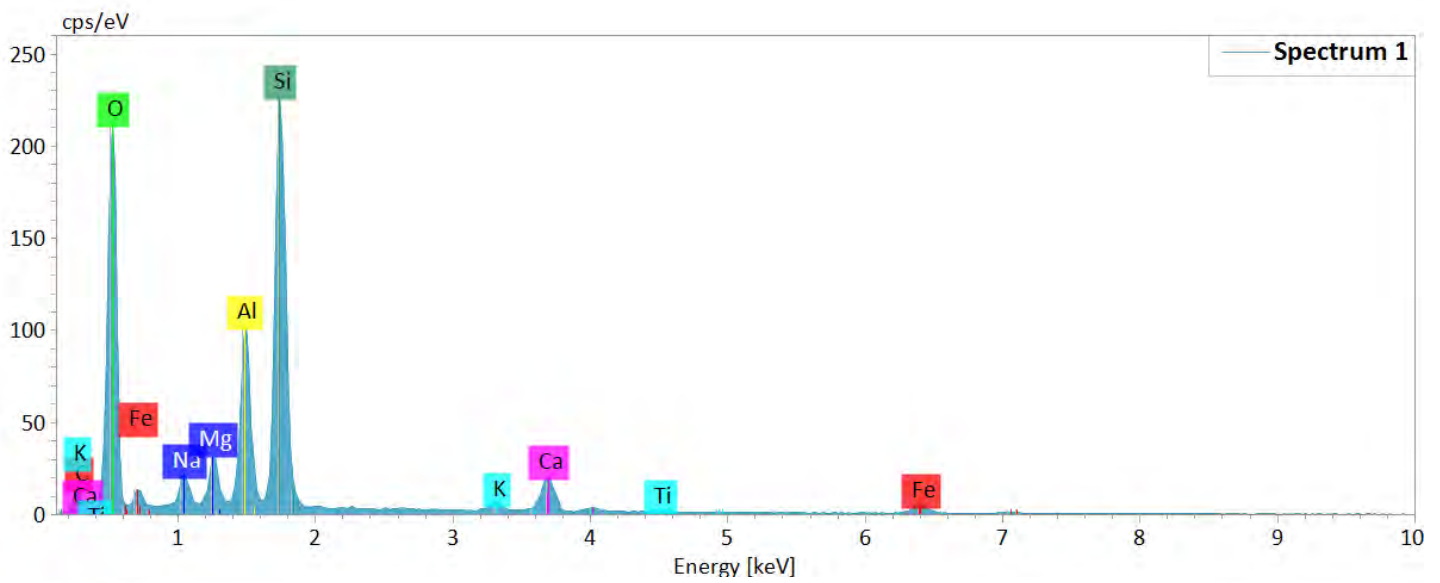
Spectrum	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	Fe
Spectrum 1	55,3	9,6	12,8		0,7	1,7		20,0	
Spectrum 2	38,4	1,9	30,1					29,6	
Spectrum 3	59,7	29,8	0,8	0,4	0,0	0,9	0,2	2,2	6,1

B-2-2-01c



Atomic concentration [%]

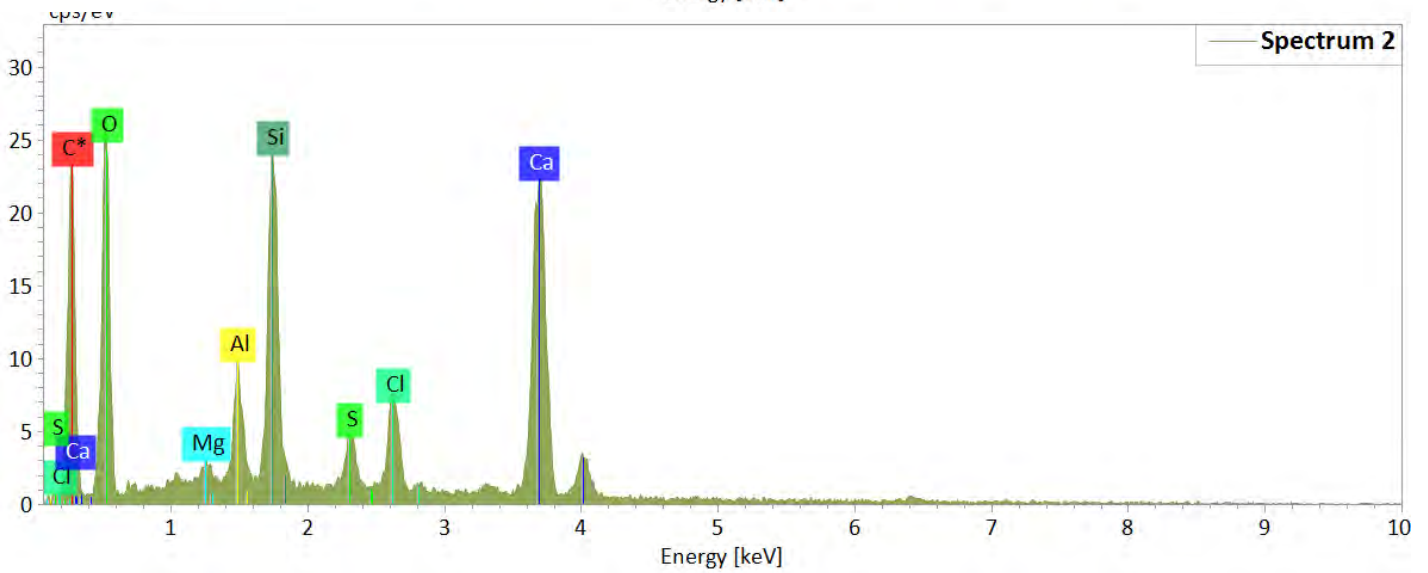
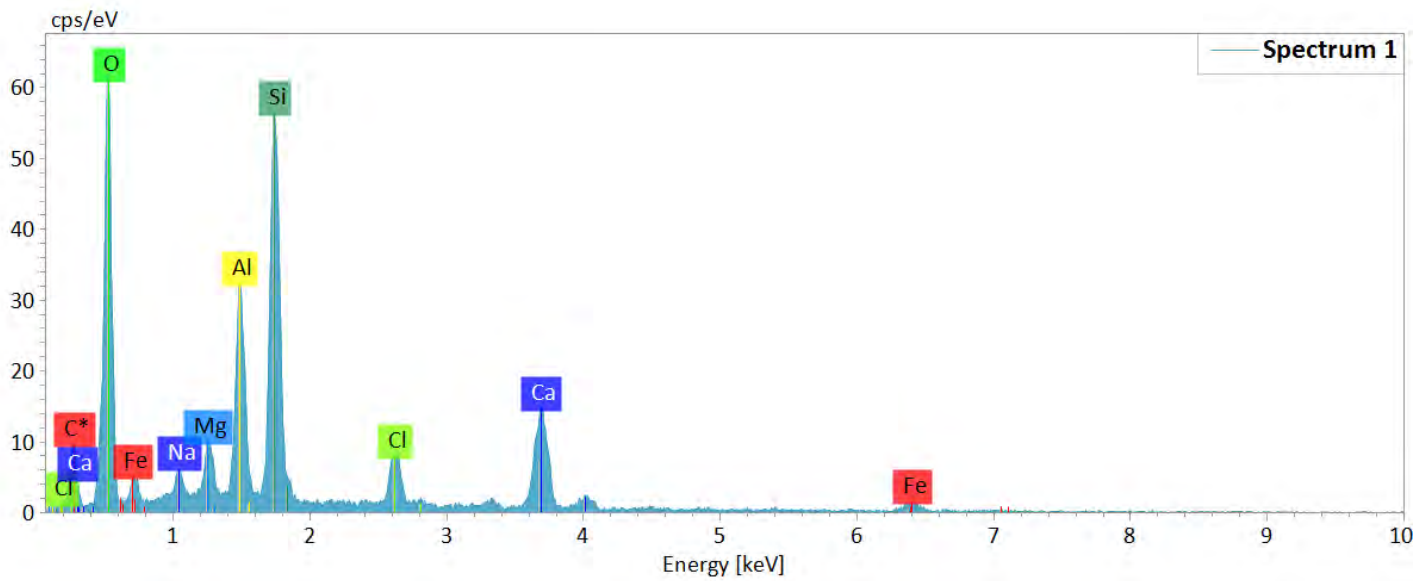
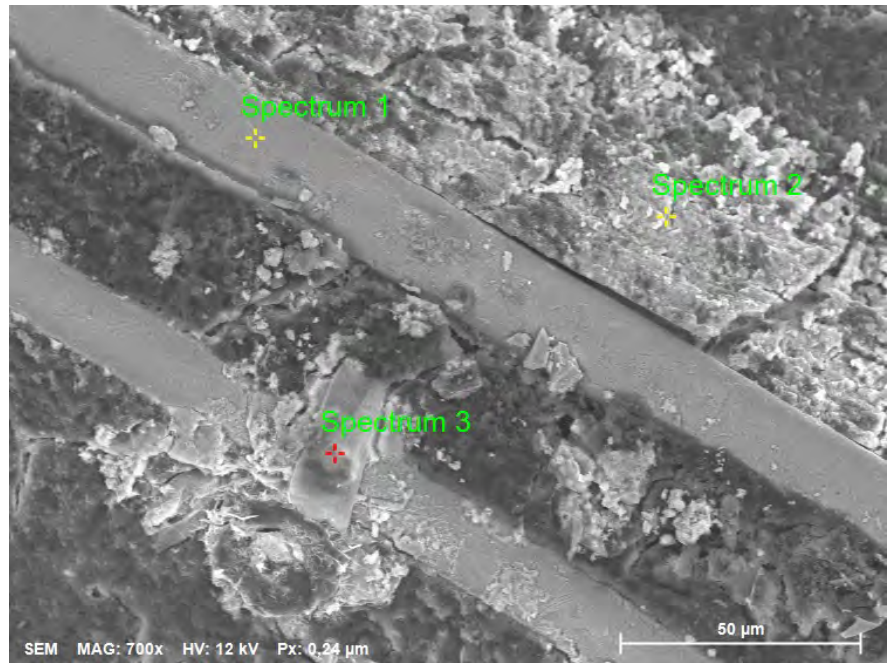
Spectrum	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Mn	Fe
Spectrum 1	25,7	47,4	1,7	2,0	2,8	6,7	0,3	2,9	1,7	2,3	0,6		5,7
Spectrum 2	20,8	50,6	1,0	1,3	0,3	1,7	0,7	1,8		19,8			2,0
Spectrum 3	22,9	52,1	4,0	1,7	1,5	2,4	0,2	4,4	0,3	5,6		2,6	2,2



Atomic concentration [%]

Spectrum	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Mn	Fe
Spectrum 1	12,7	60,5	1,6	1,7	5,7	13,4			0,5	2,1	0,2		1,6
Spectrum 2	14,9	62,1	2,3	1,4	0,4	0,7		1,2	0,2	1,3		14,7	0,9
Spectrum 3	18,2	55,7	1,5	2,1	1,1	4,6	0,2	3,0	0,5	0,9			12,2

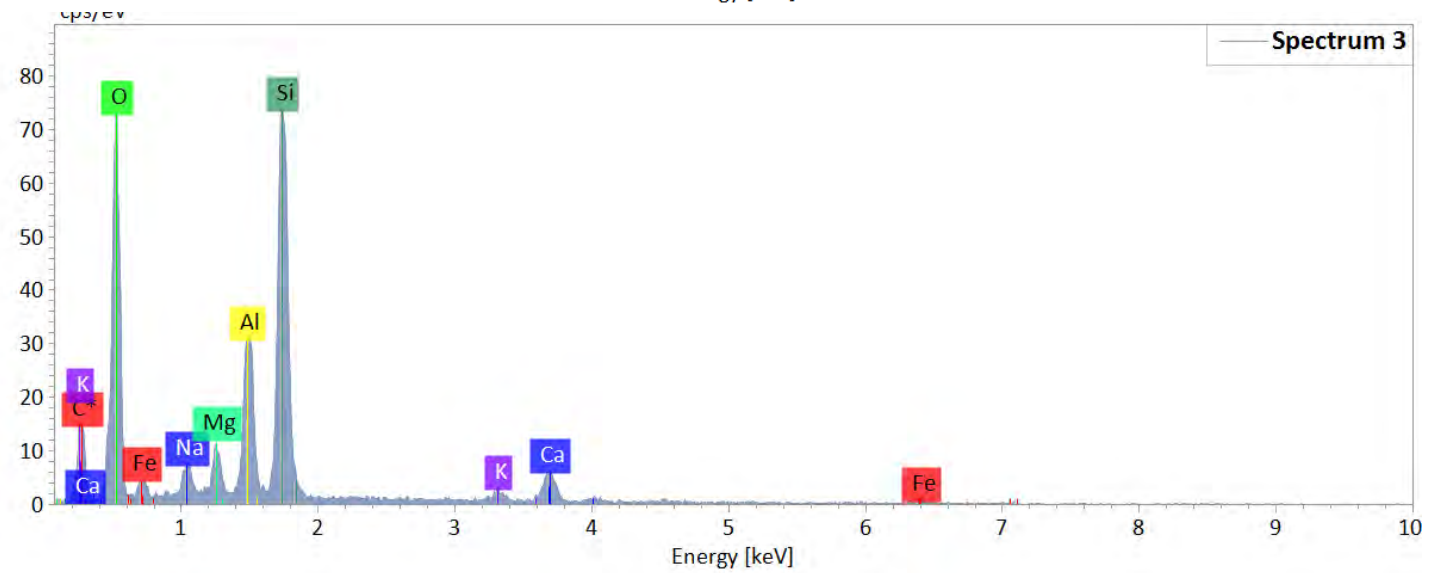
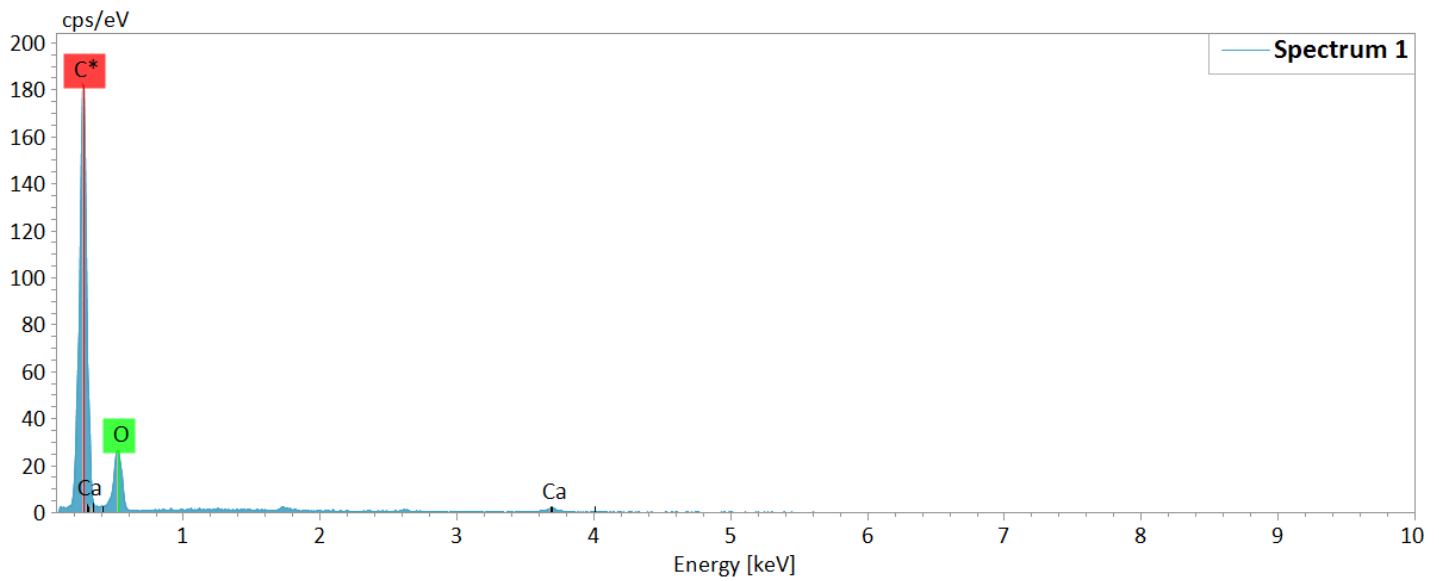
Vedlegg 10
A-Aa-1-01c



Atomic concentration [%]

Spectrum	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	Ca	Fe
Spectrum 1	16,0	54,6	0,7	1,3	4,9	11,3		1,7	7,4	1,9
Spectrum 2	38,7	40,1		0,3	1,4	5,2	1,0	2,0	11,4	
Spectrum 3	70,9	21,1			0,8	1,8	0,3	1,2	3,8	

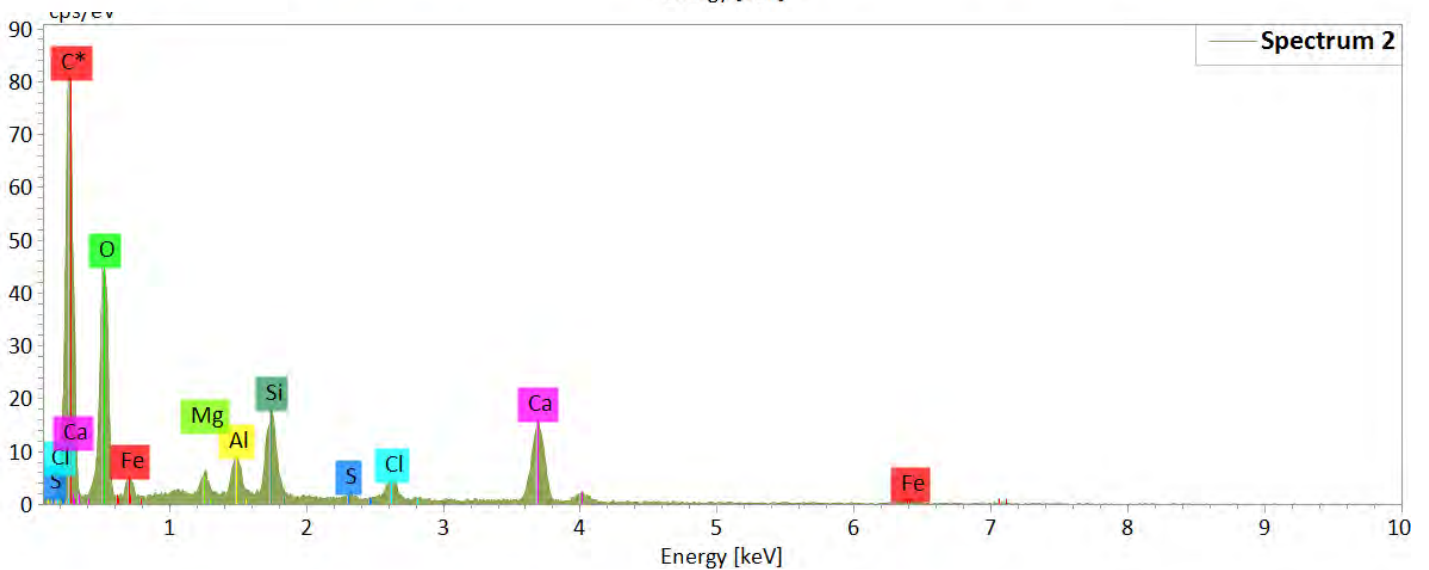
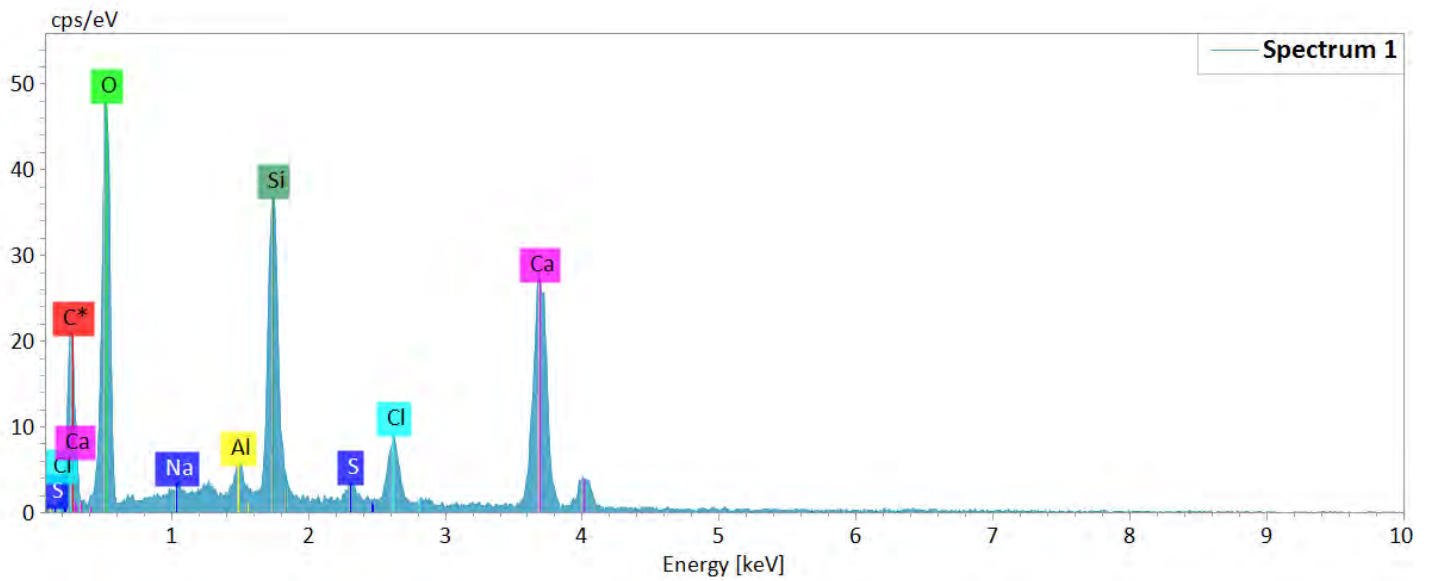
A-Aa-1-01d



Atomic concentration [%]

Spectrum	C	O	Na	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca	Fe
Spectrum 1	77,1	22,5							0,5	
Spectrum 2	77,4	17,0			1,1	3,4	0,4		0,7	
Spectrum 3	16,6	54,0	1,5	1,6	5,6	16,2		0,6	2,2	1,6

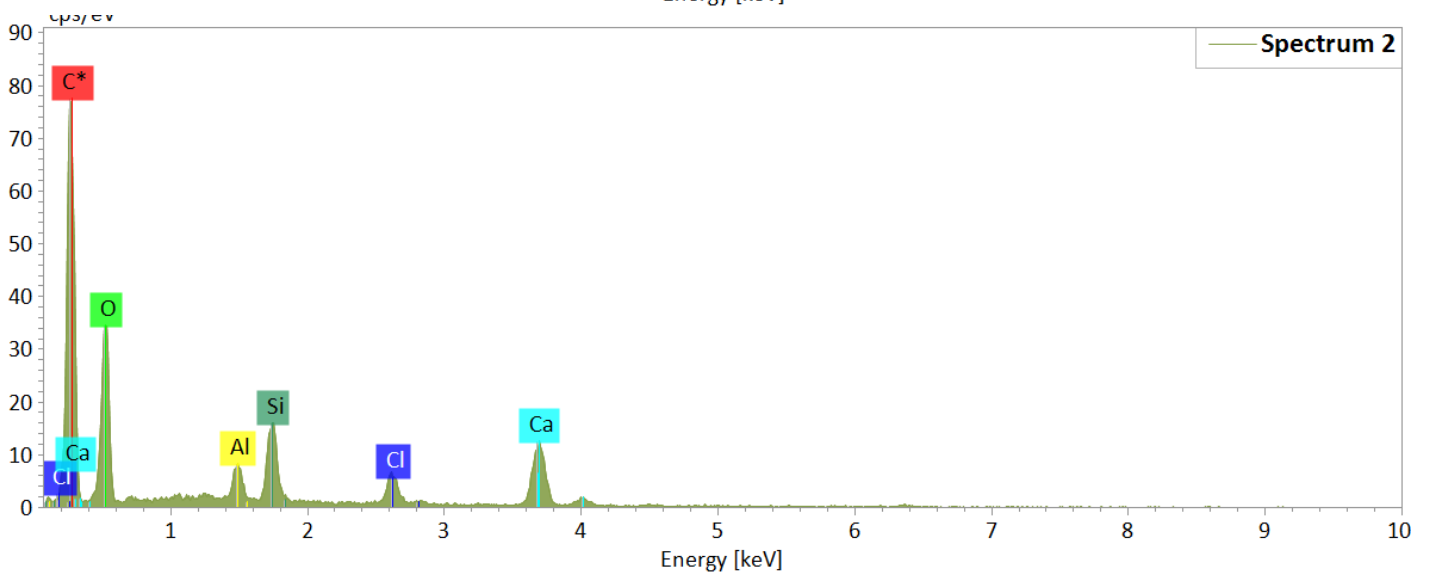
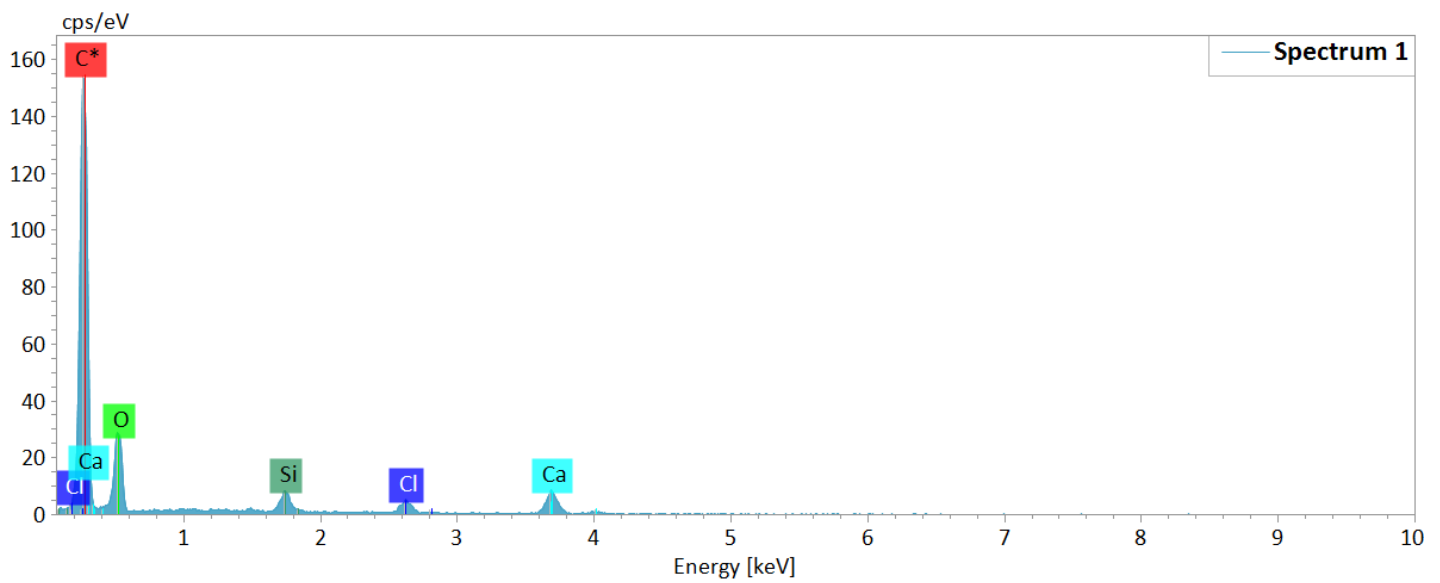
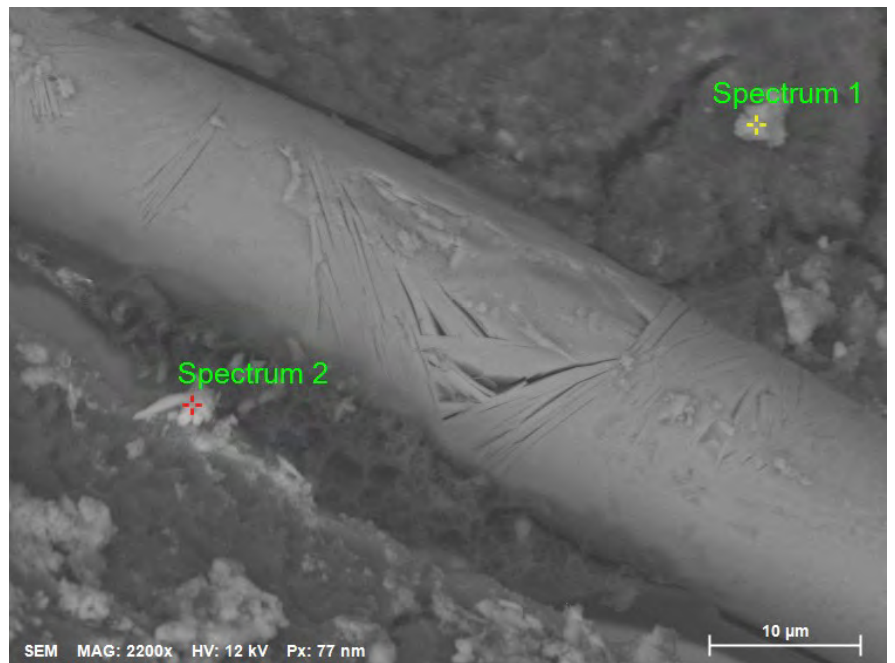
A-Aa-1-01e



Atomic concentration [%]

Spectrum	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	Ca	Fe
Spectrum 1	27,8	51,2	0,3		0,6	7,2	0,4	1,8	10,7	
Spectrum 2	57,1	33,9		0,3	0,6	1,9	0,1	0,7	4,2	1,1
Spectrum 3	14,1	44,6			2,3	11,4	1,4	4,6	21,6	

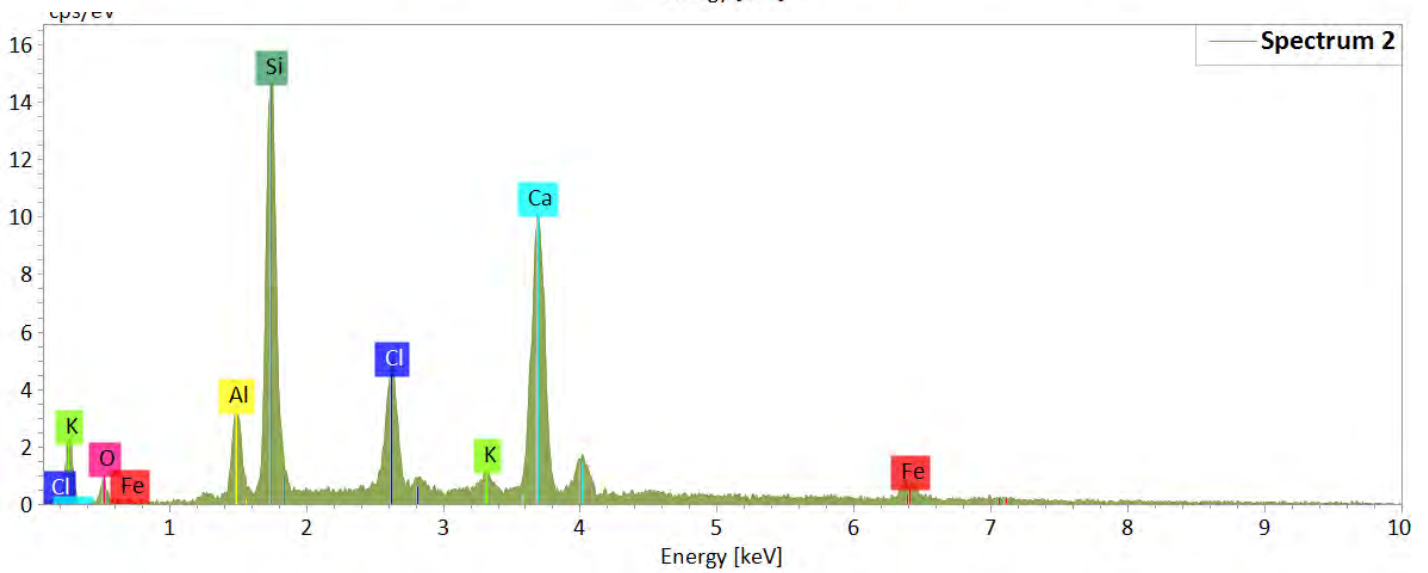
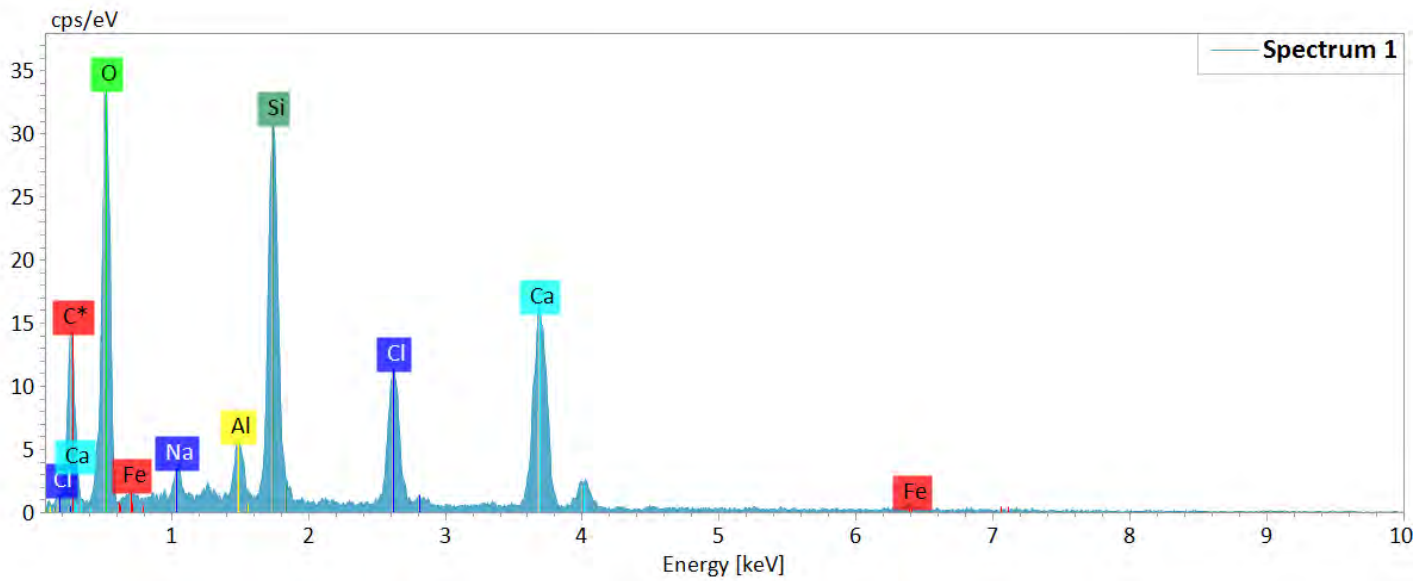
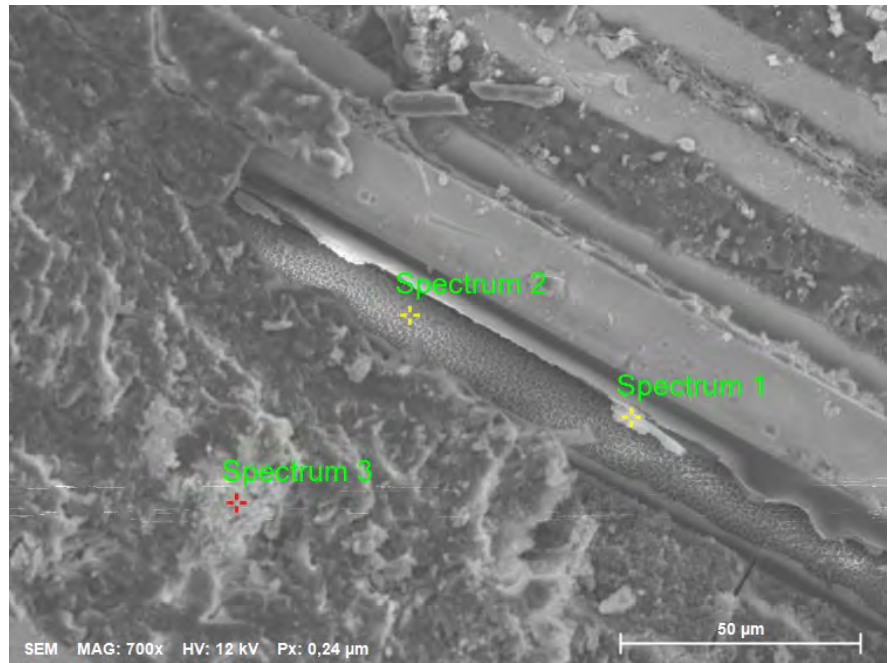
A-Aa-1-01f



Atomic concentration [%]

Spectrum	C	O	Al	Si	Cl	Ca
Spectrum 1	74,9	21,6		0,8	0,6	2,0
Spectrum 2	61,4	30,9	0,6	2,0	1,1	4,0

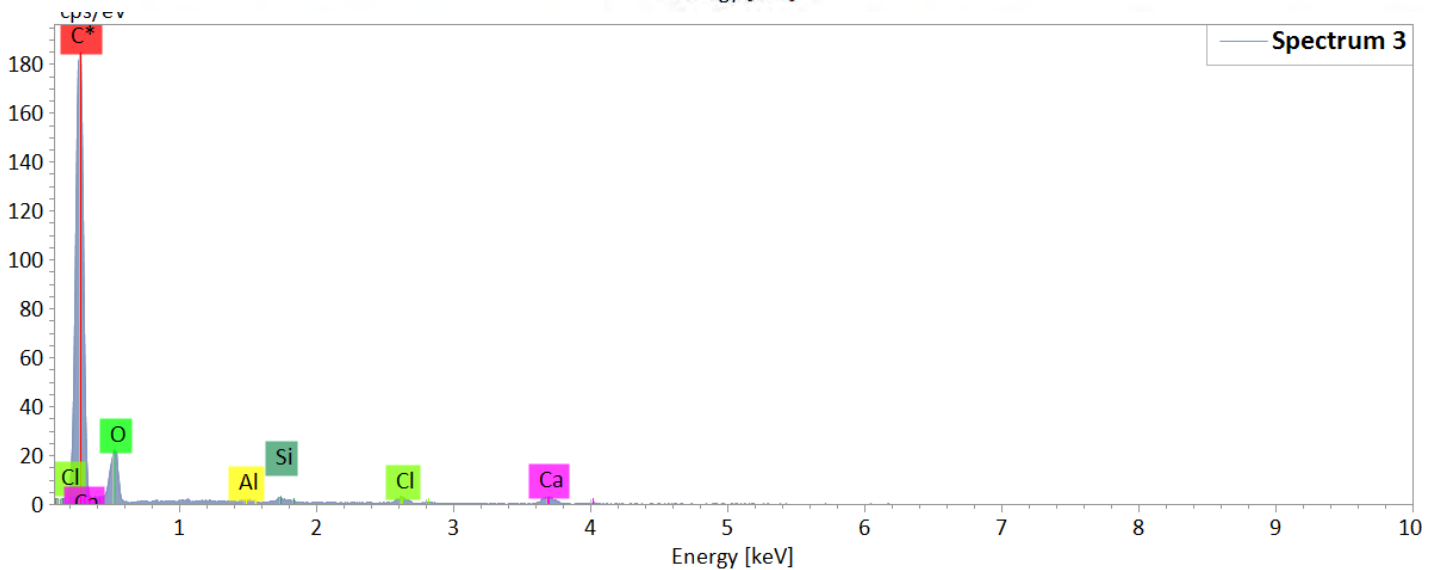
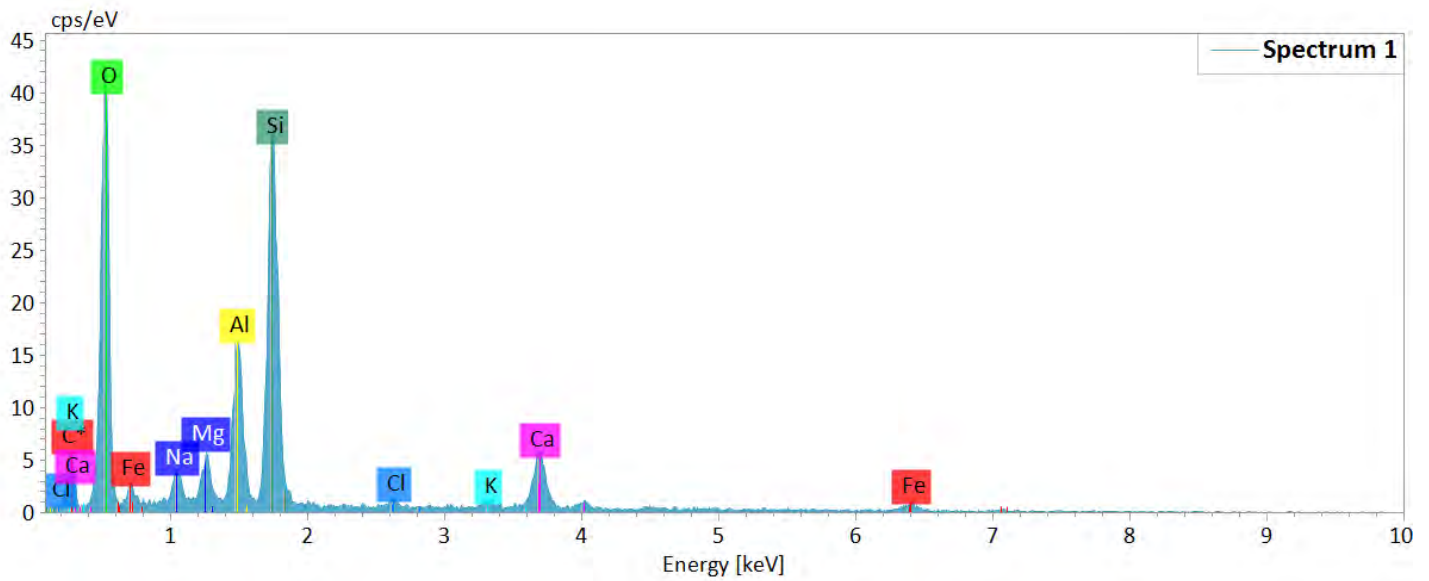
A-Aa-1-01g



Atomic concentration [%]

Spectrum	C	O	Na	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe
Spectrum 1	29,7	47,6	0,8	0,9	8,2		4,0		8,1	0,6
Spectrum 2		11,1		10,3	42,4		8,7	1,0	21,9	4,5
Spectrum 3	18,8	59,5	0,2	0,5	6,2	0,5	2,4		11,9	

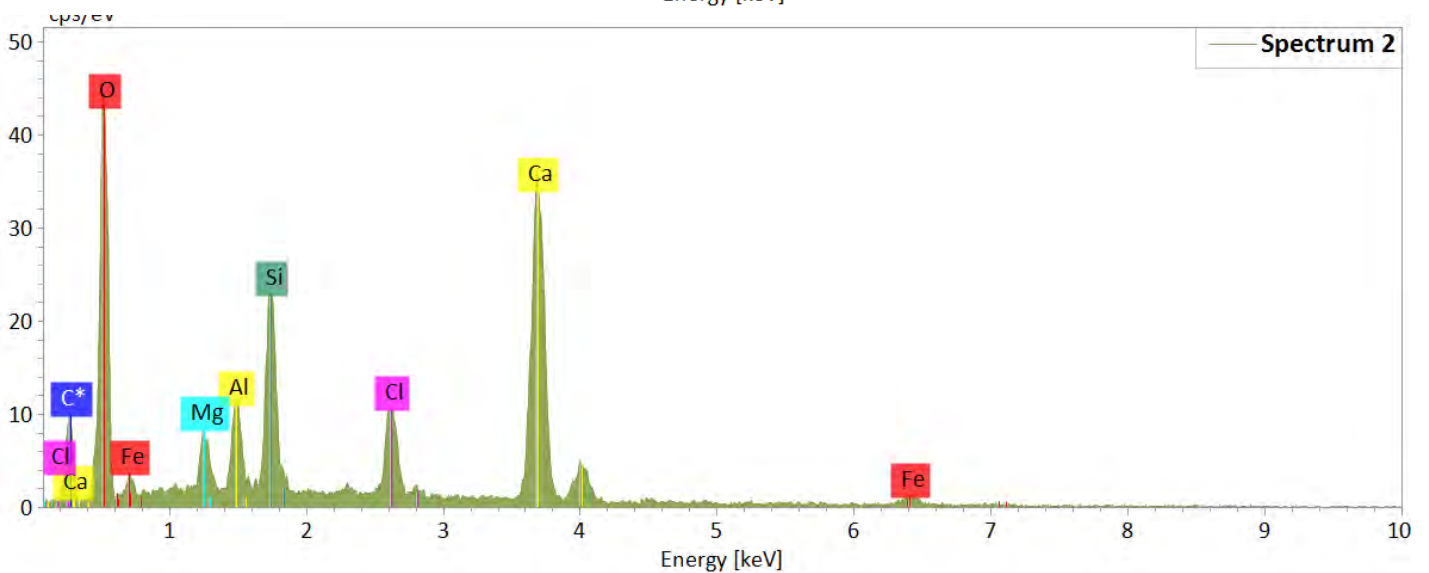
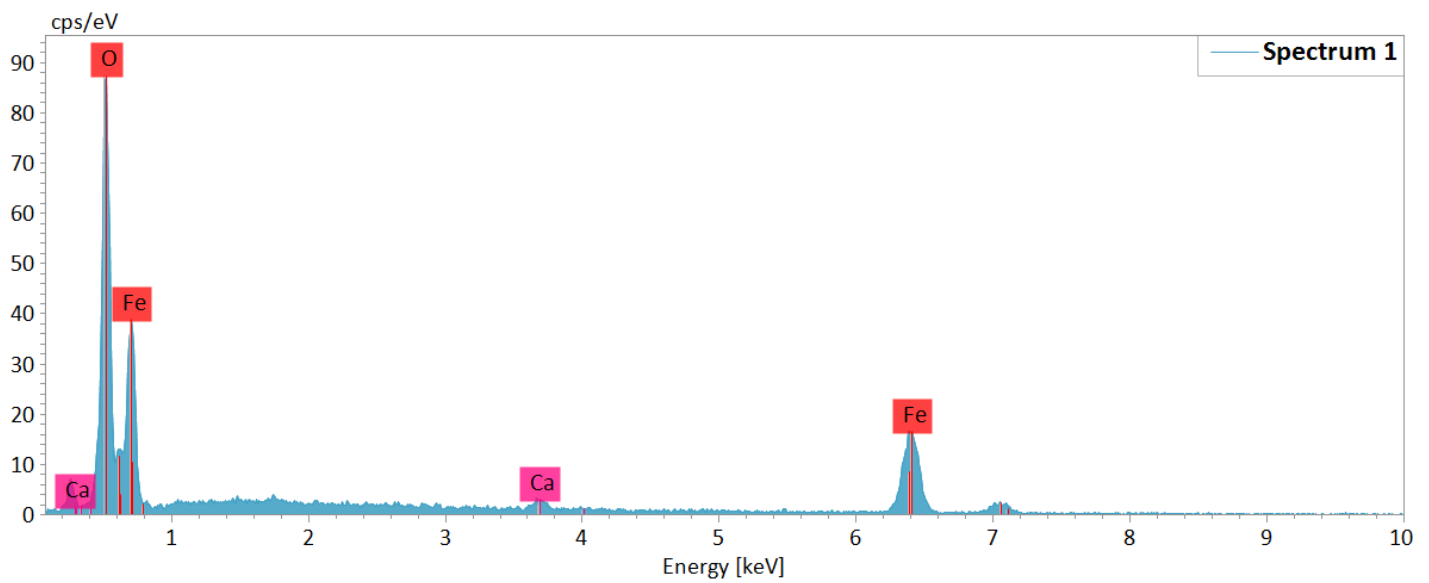
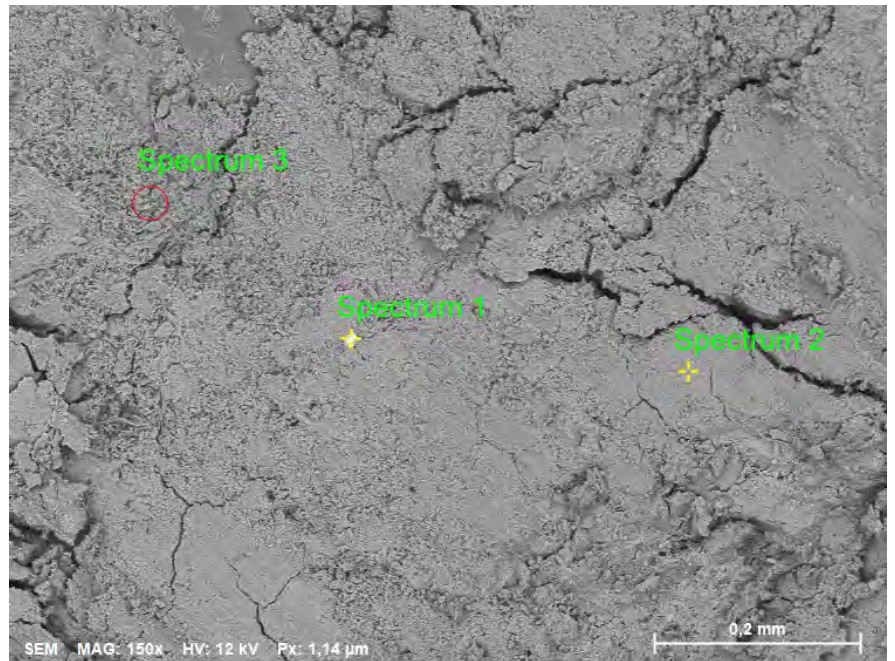
A-Aa-1-01j



Atomic concentration [%]

Spectrum	C	O	Na	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca	Fe
Spectrum 1	8,5	60,7	1,4	1,6	5,5	15,6	0,4	0,6	4,1	1,5
Spectrum 2	9,5	58,1	1,6	1,5	5,4	16,7	0,7	0,4	3,9	2,2
Spectrum 3	79,8	18,6			0,1	0,2	0,3		0,8	

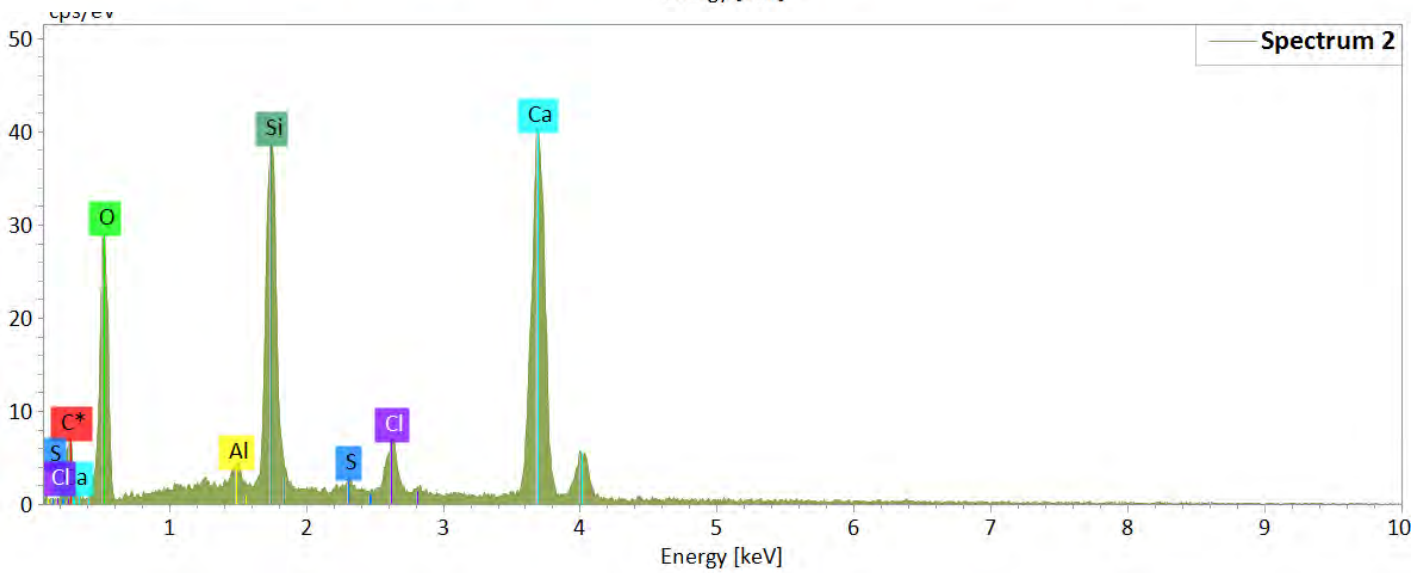
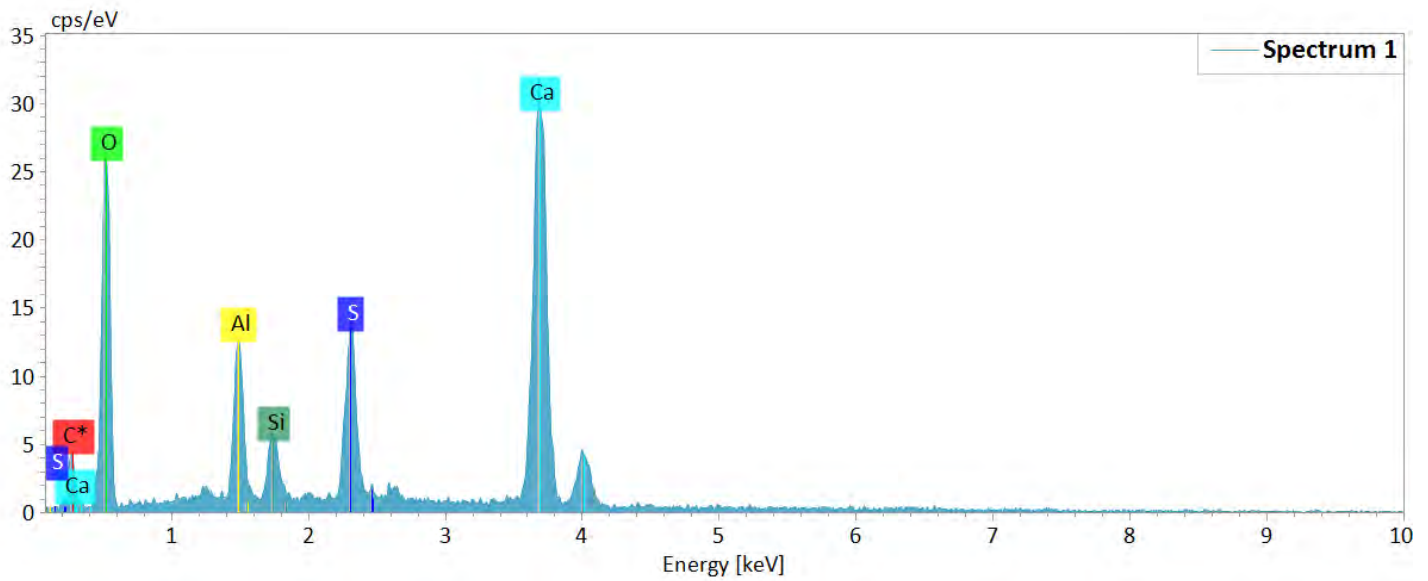
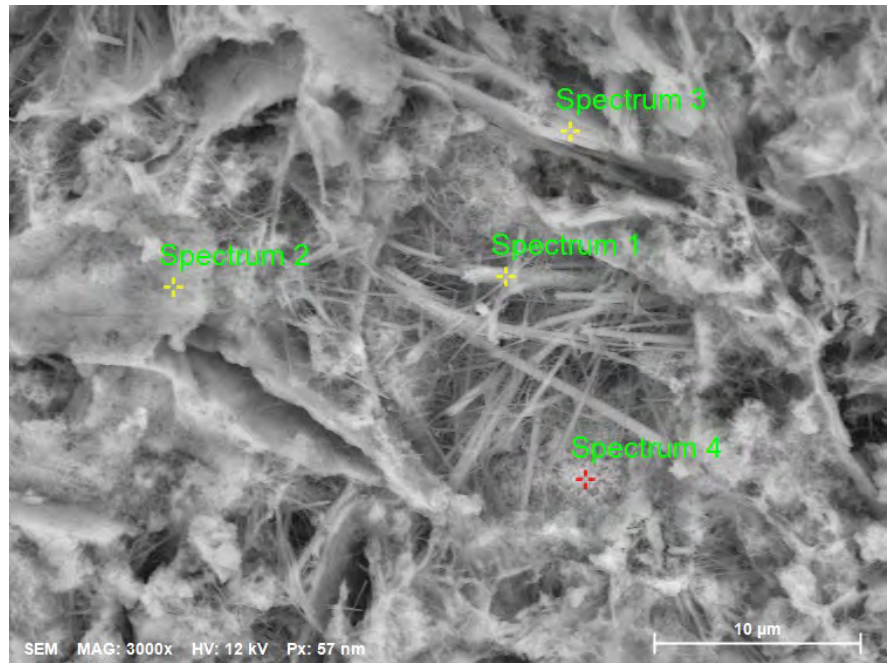
A-Aa-1-02



Atomic concentration [%]

Spectrum	C	O	Mg	Al	Si	Cl	Ca	Fe
Spectrum 1		62,0					1,3	36,7
Spectrum 2	12,2	58,5	1,4	2,0	5,7	2,6	15,6	2,0
Spectrum 3	5,8	59,2		2,1	10,0	1,4	21,5	

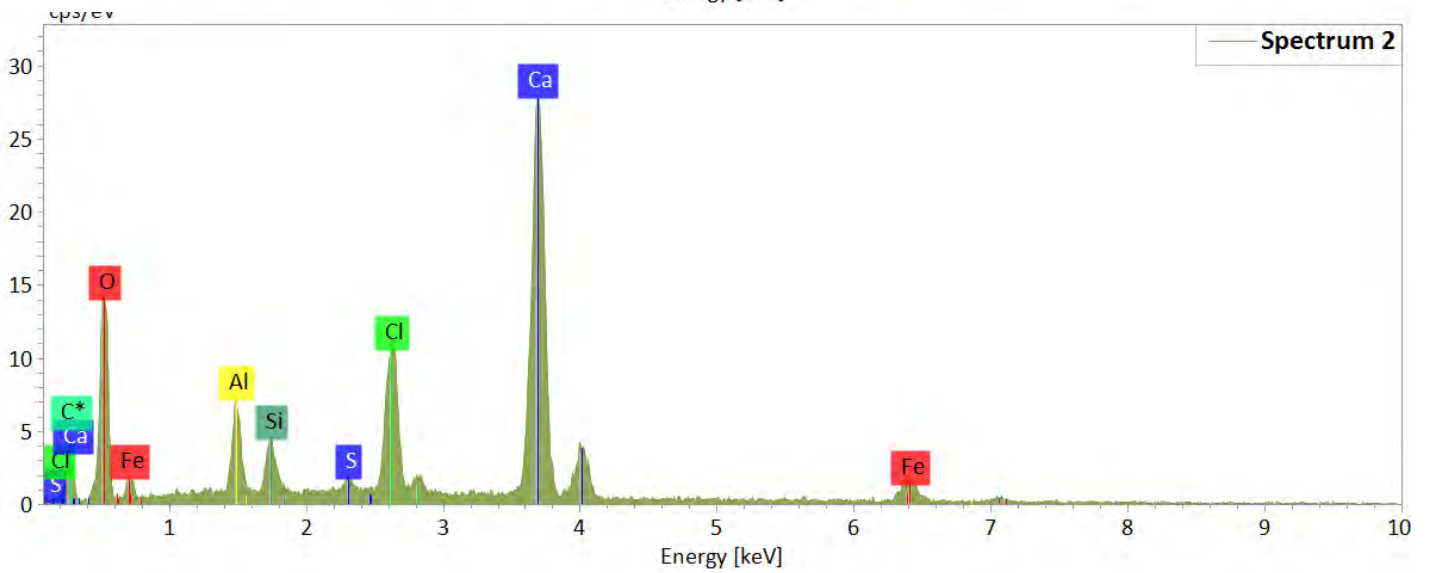
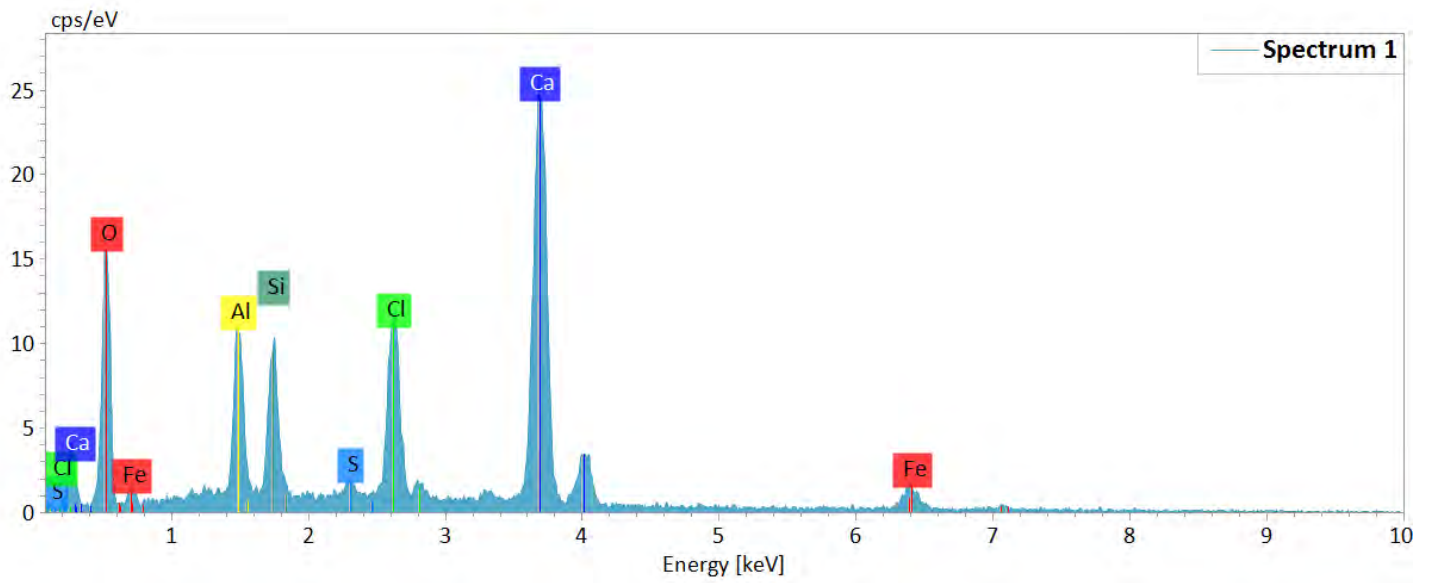
A-Aa-1-2-03



Atomic concentration [%]

Spectrum	C	O	Mg	Al	Si	S	Cl	Ca	Fe
Spectrum 1	5,2	61,5		5,1	2,2	6,0		20,0	
Spectrum 2	9,8	54,7		0,5	10,5	0,3	1,8	22,3	
Spectrum 3	1,1	47,1		5,9	6,8		5,8	30,4	2,9
Spectrum 4		38,1	3,0	4,0	11,3		1,3	34,4	7,9

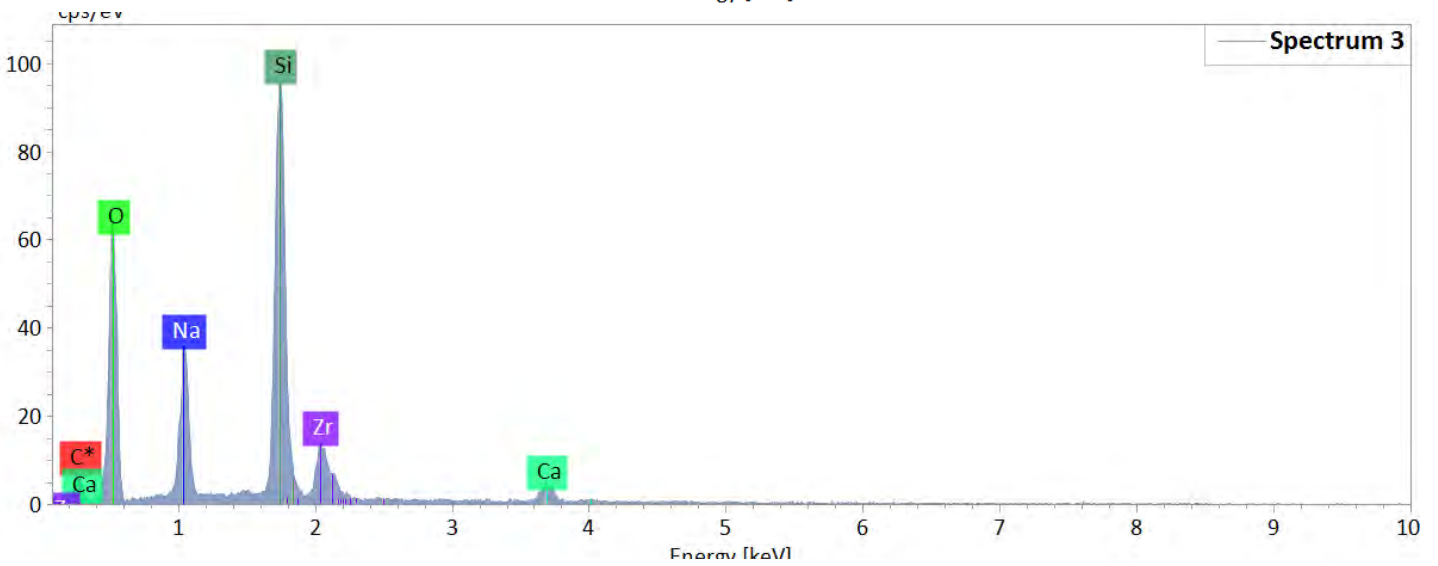
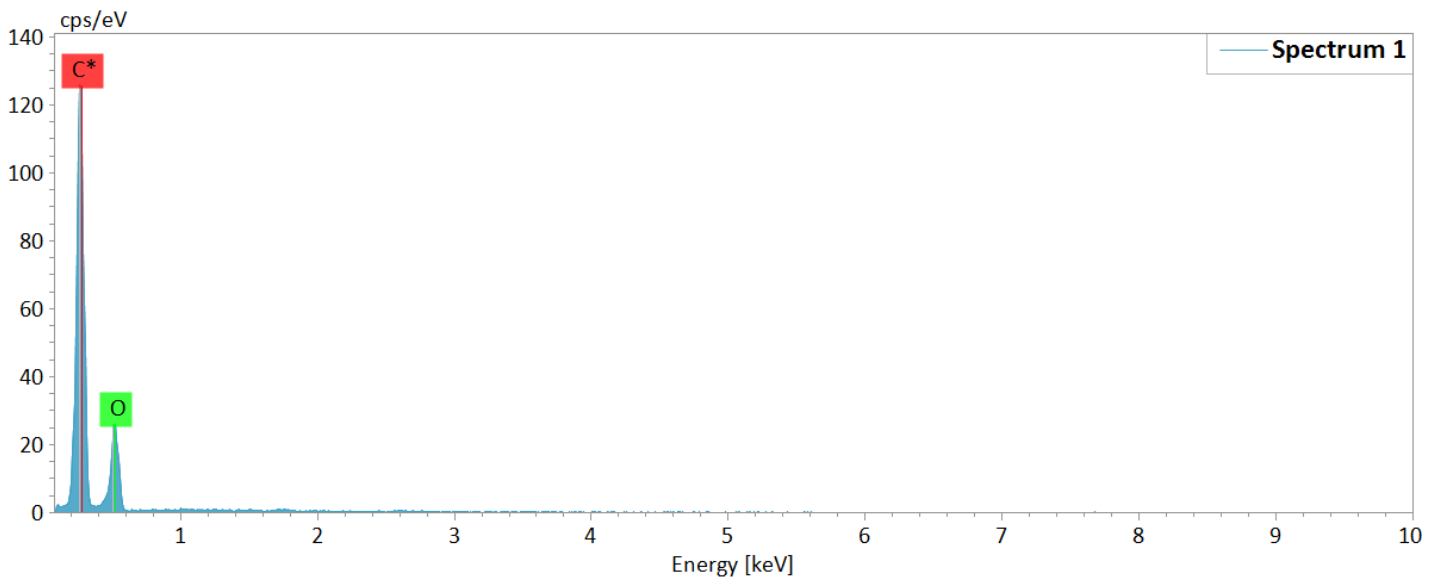
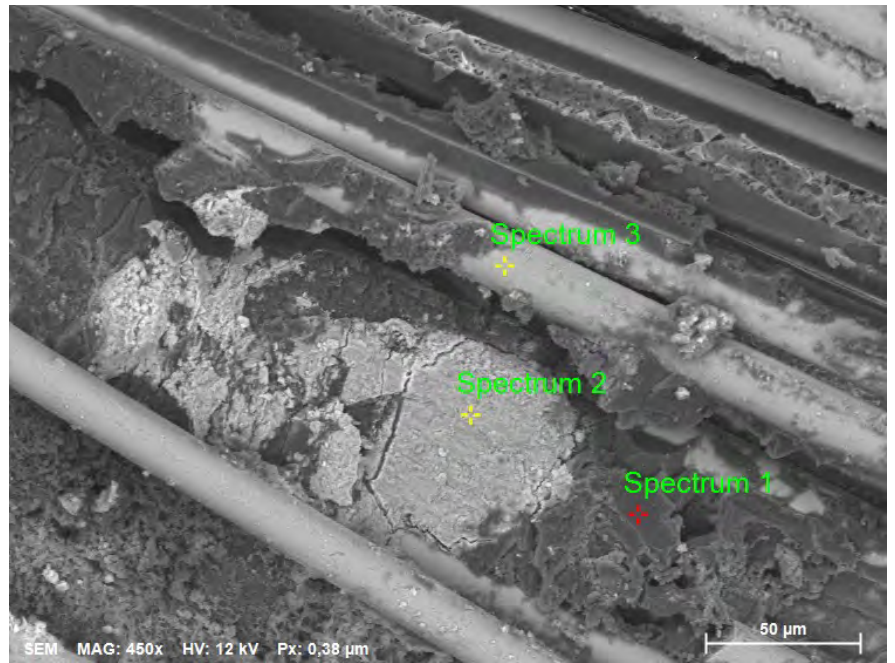
A-Aa-1-2-04



Atomic concentration [%]

Spectrum	C	O	Mg	Al	Si	S	Cl	Ca	Fe
Spectrum 1		53,2		5,1	5,5	0,5	7,2	23,6	4,8
Spectrum 2	6,0	49,9		3,9	2,6	0,4	7,0	25,1	5,0
Spectrum 3	15,2	59,5		2,0	2,3		3,7	14,9	2,6
Spectrum 4	11,9	58,8	0,3	0,9	9,9	0,3	2,8	15,1	

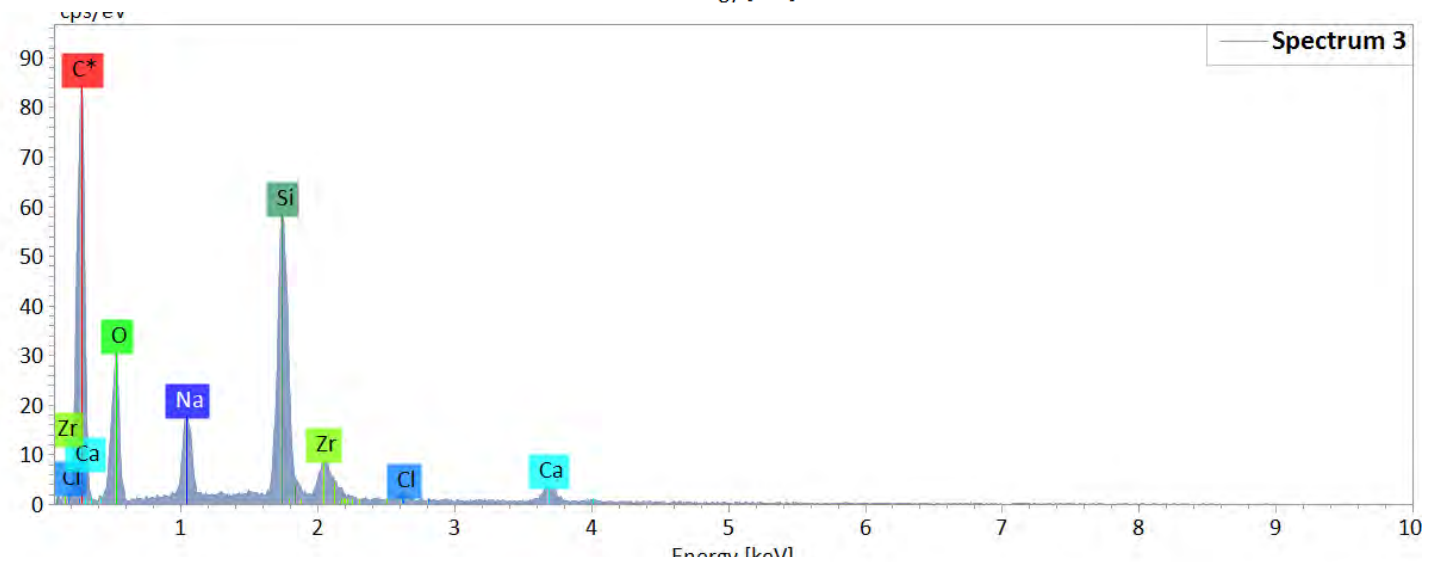
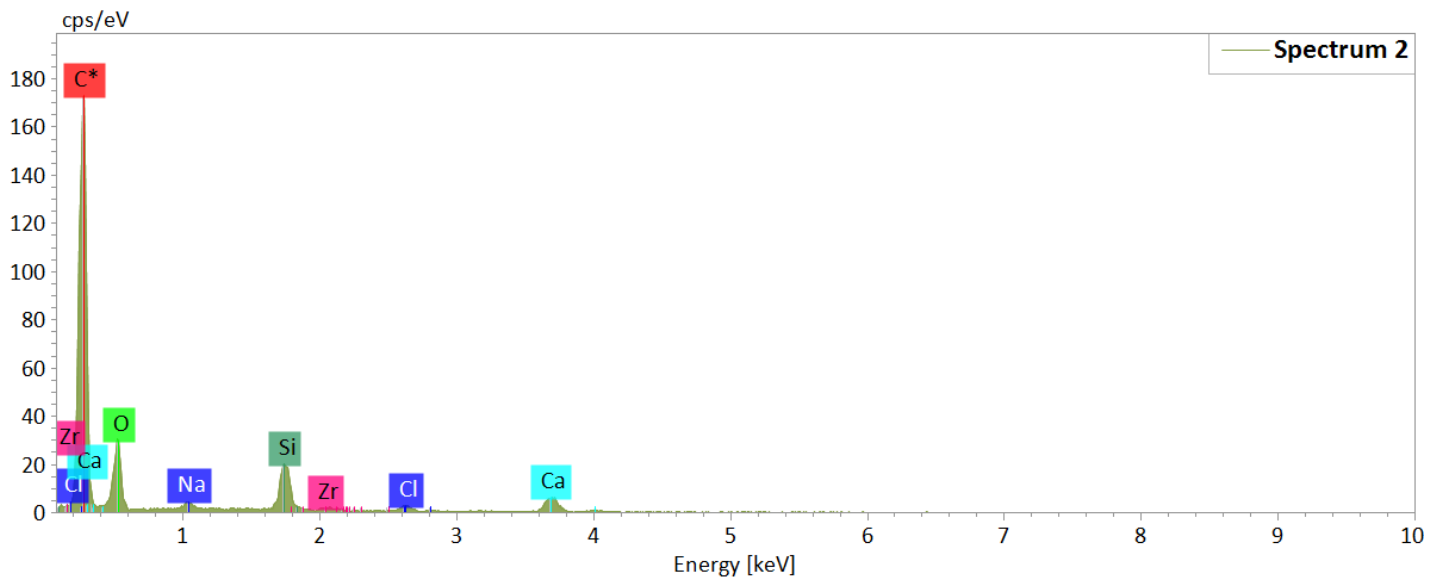
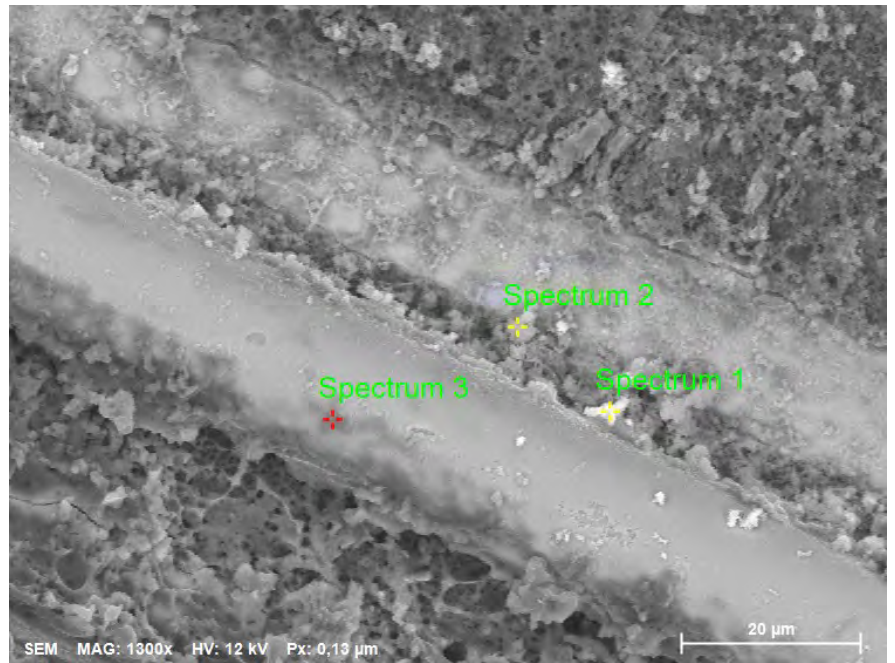
A-Aa-2-02



Atomic concentration [%]

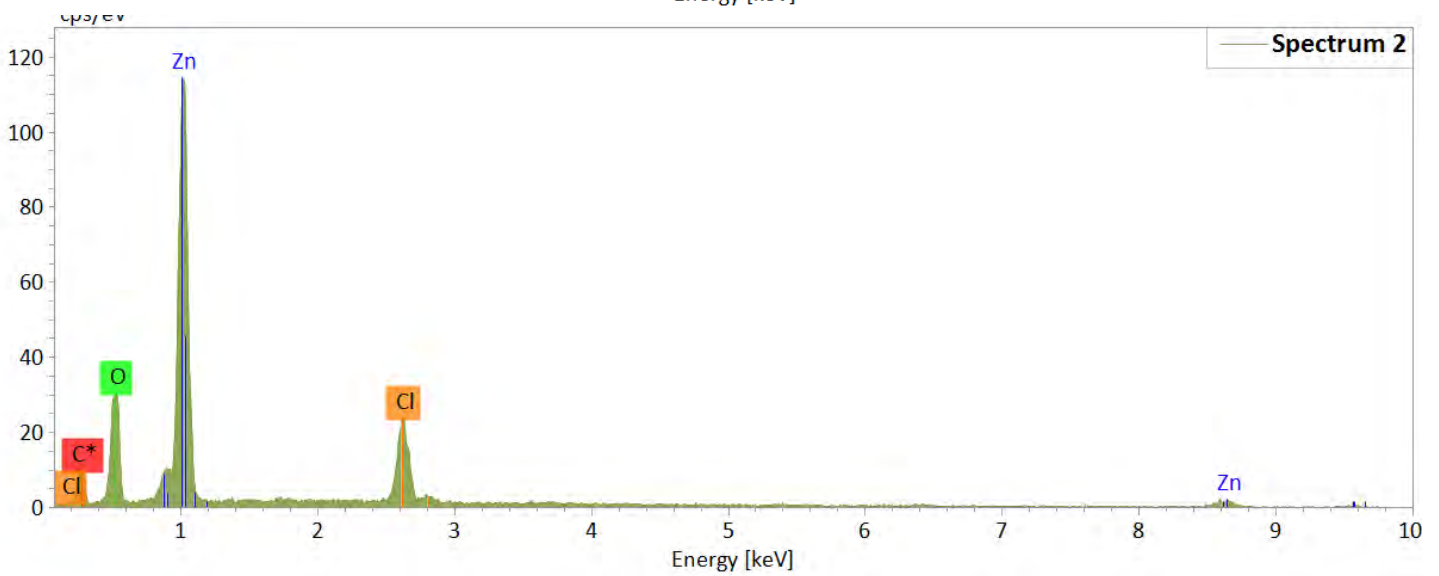
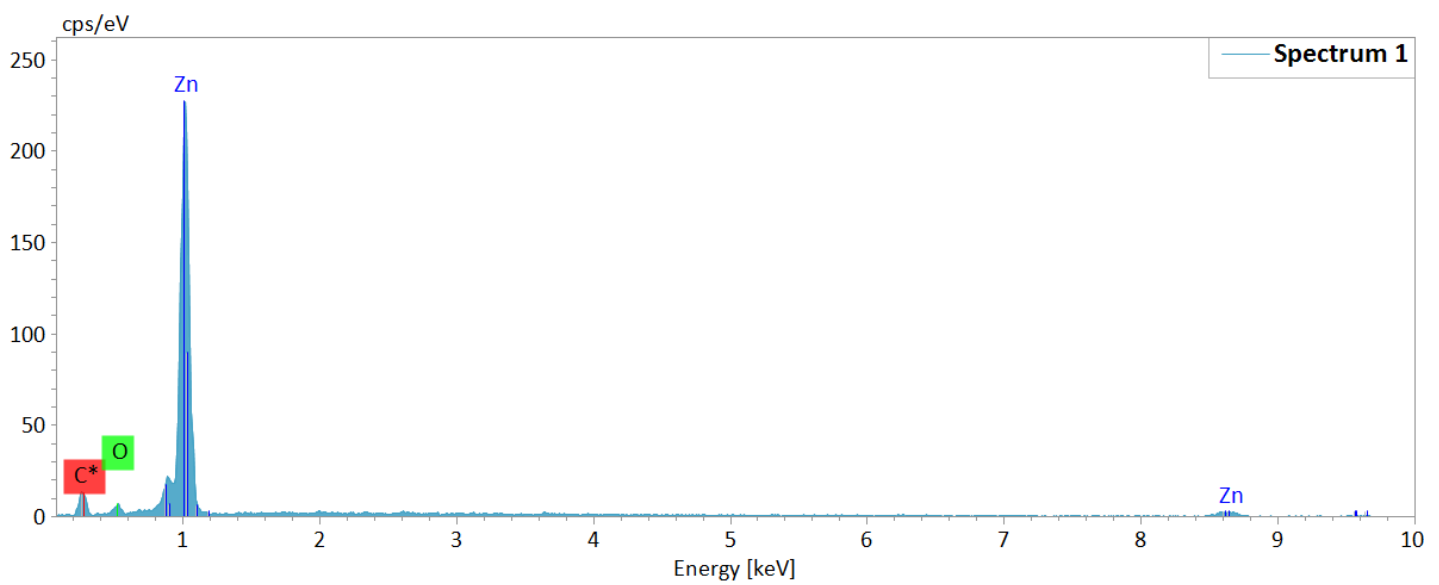
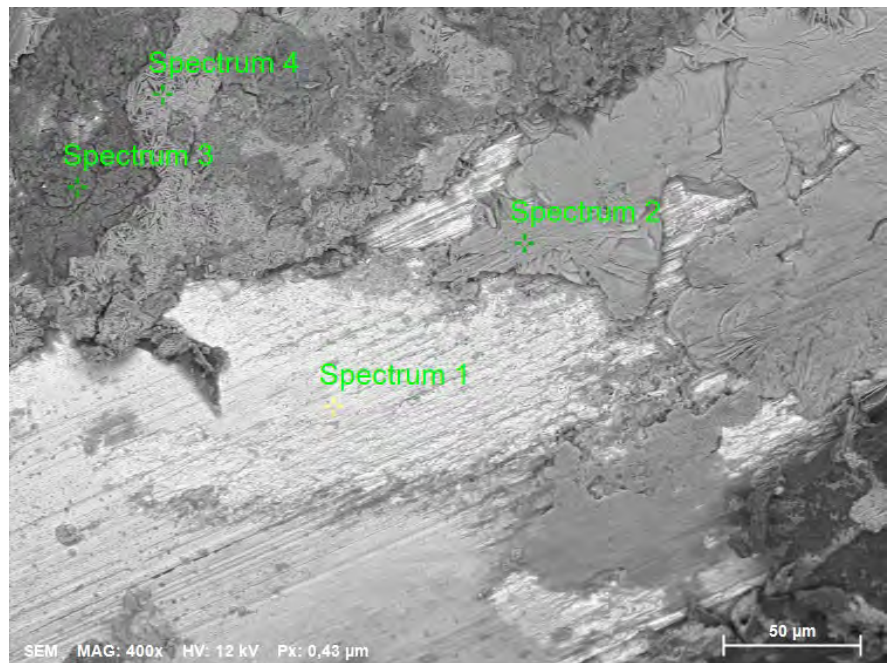
Spectrum	C	O	Na	Al	Si	S	Cl	Ca	Zr
Spectrum 1	74,1	25,9							
Spectrum 2	10,3	56,6		1,8	8,5	0,7	3,0	19,0	
Spectrum 3	14,1	53,0	8,4		19,6			2,4	2,5

A-Aa-2-03



Atomic concentration [%]

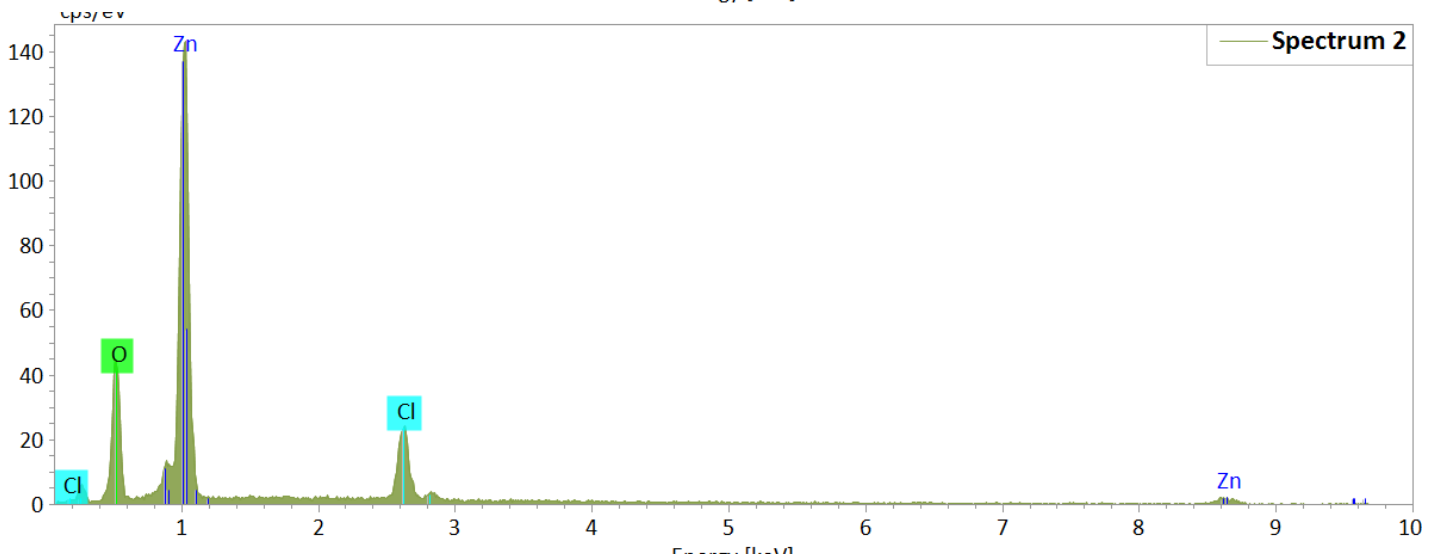
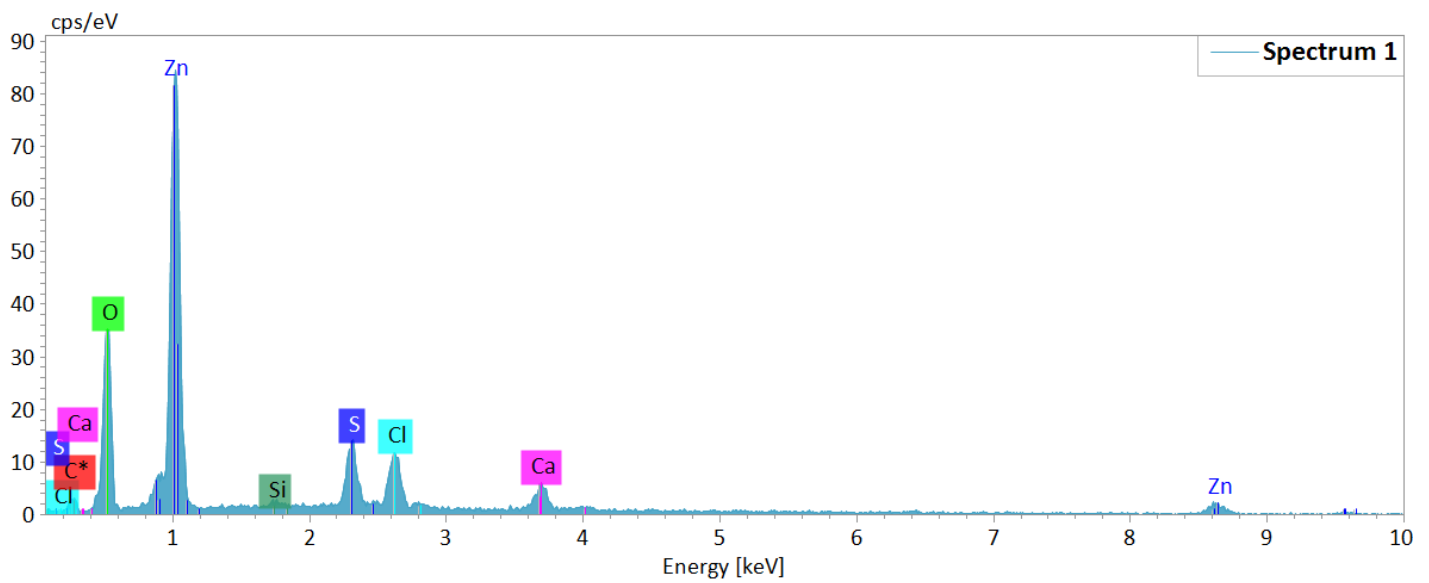
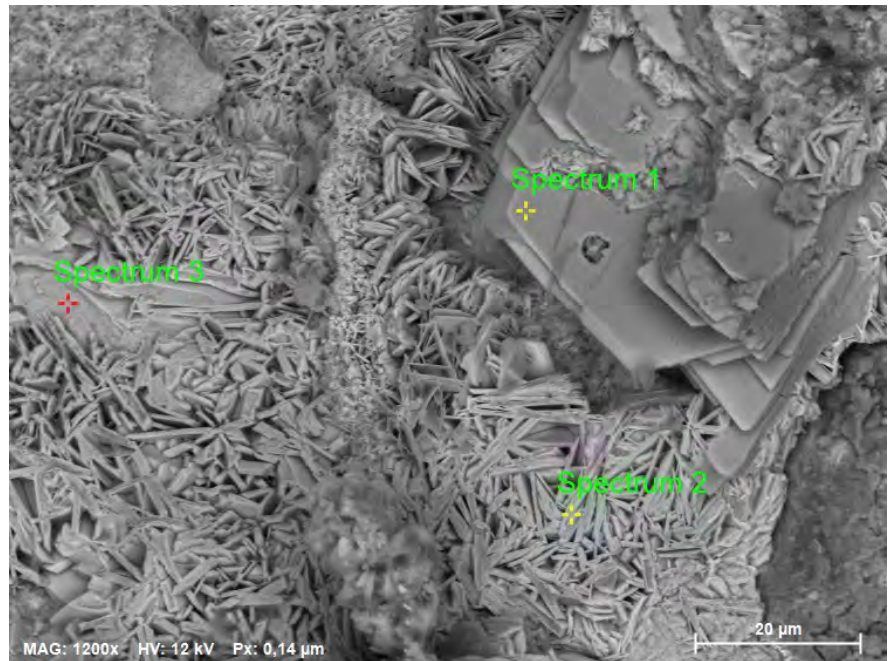
Spectrum	C	O	Na	Si	Cl	Ca	Zr
Spectrum 1	63,2	29,5	0,7	5,4	0,2	0,8	0,3
Spectrum 2	76,8	19,0	0,2	2,1	0,3	1,6	0,1
Spectrum 3	68,4	20,7	2,4	6,5	0,2	1,0	0,7



Atomic concentration [%]

Spectrum	C	O	Al	Si	S	Cl	Ca	Zn
Spectrum 1	46,4	6,9						46,8
Spectrum 2	30,0	38,9				8,4		22,7
Spectrum 3	17,2	57,4	2,9	2,9	1,0	1,6	14,5	2,4
Spectrum 4	7,8	53,1				11,4		27,7

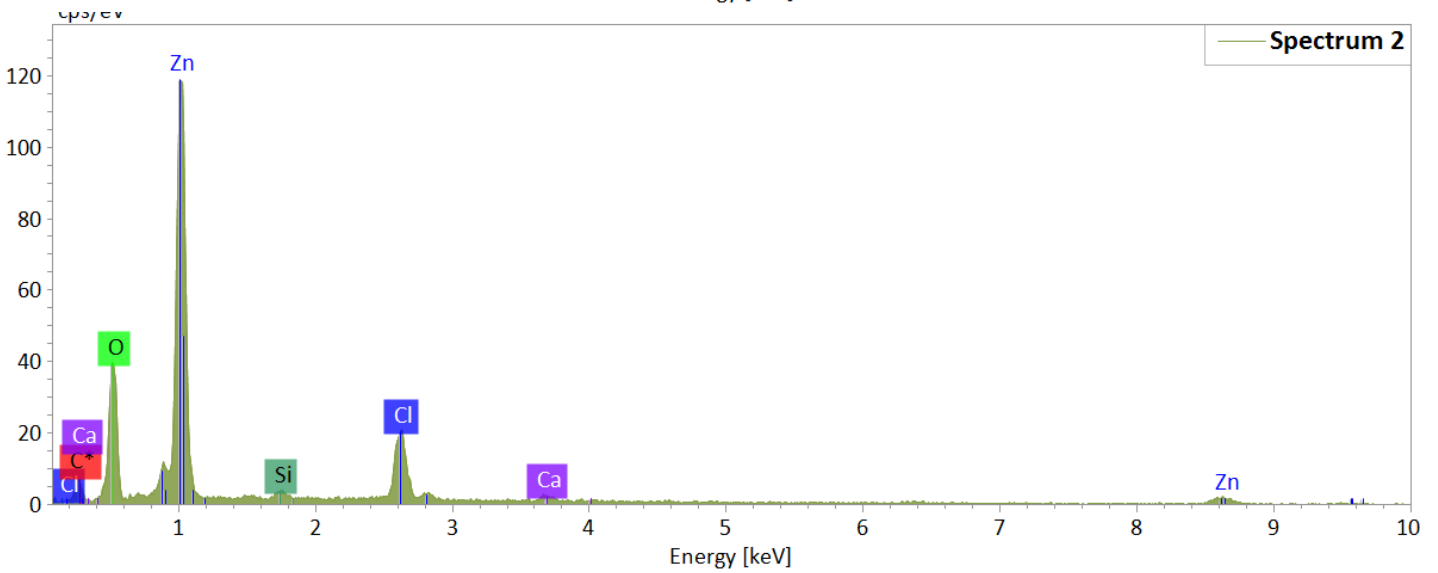
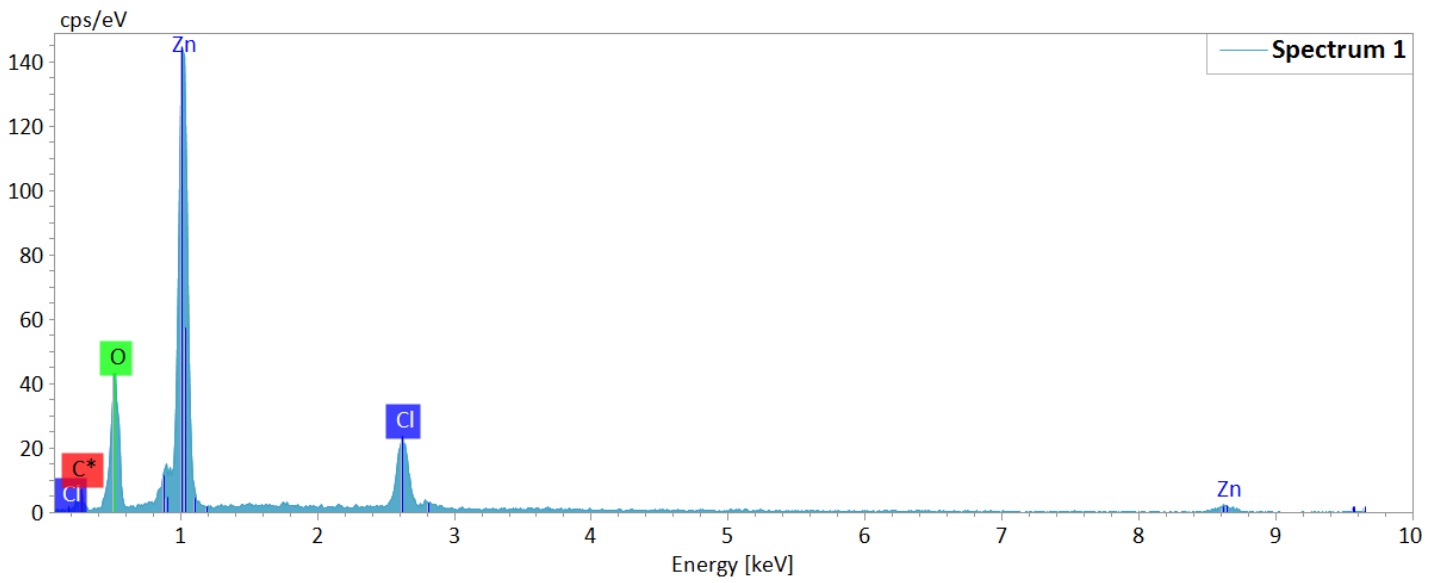
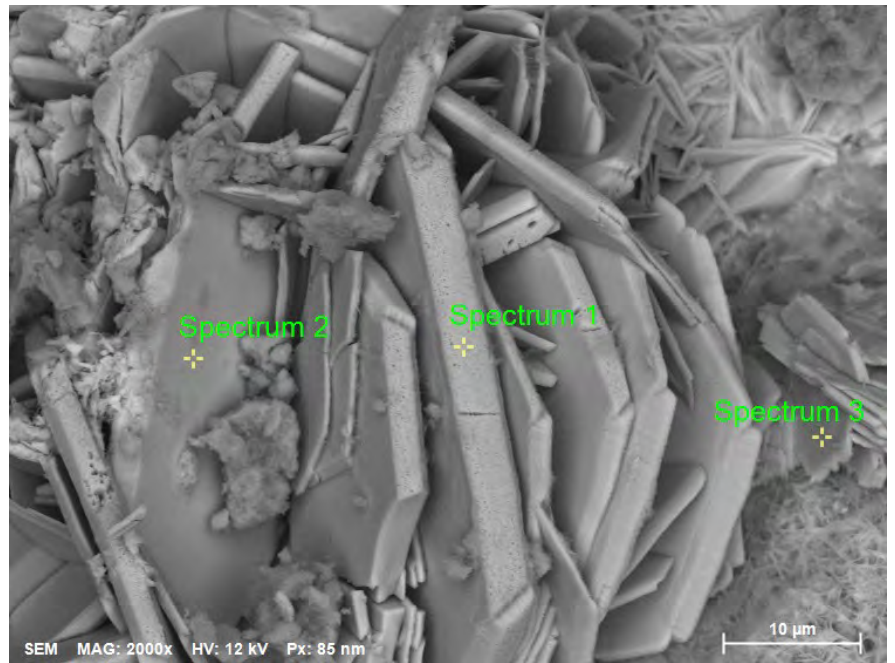
A-Aa-4-03



Atomic concentration [%]

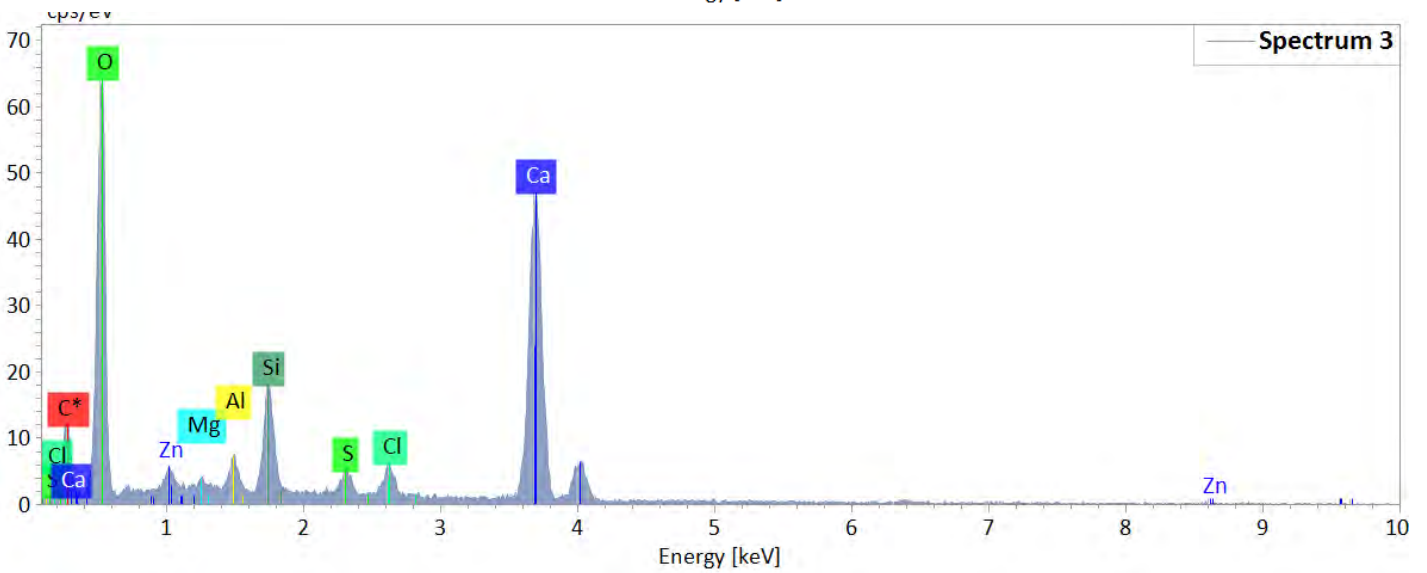
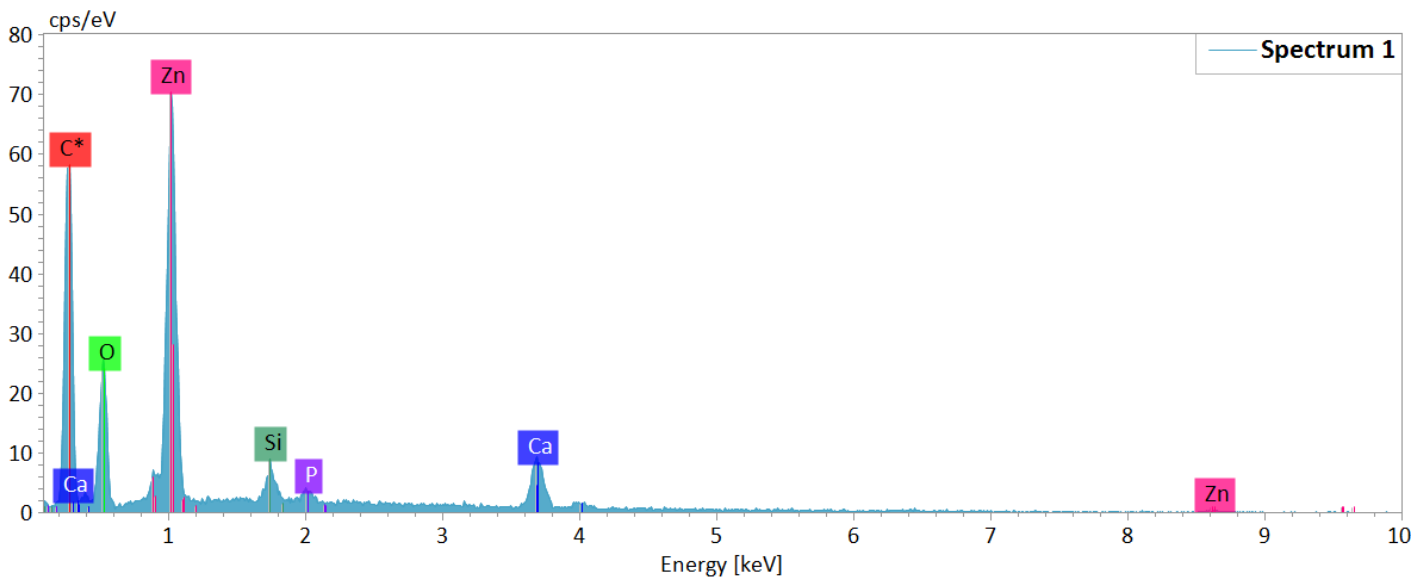
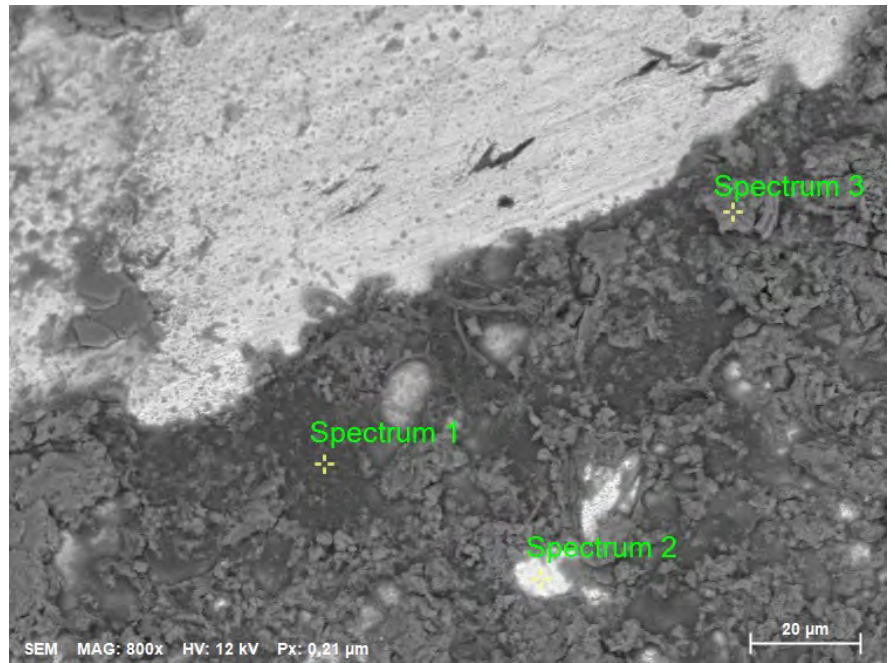
Spectrum	C	O	Si	S	Cl	Ca	Zn
Spectrum 1	3,2	58,7	0,4	5,0	5,0	3,2	24,5
Spectrum 2		55,5			11,8		32,8
Spectrum 3	26,8	42,2			9,2		21,8

A-Aa-4-04



Atomic concentration [%]

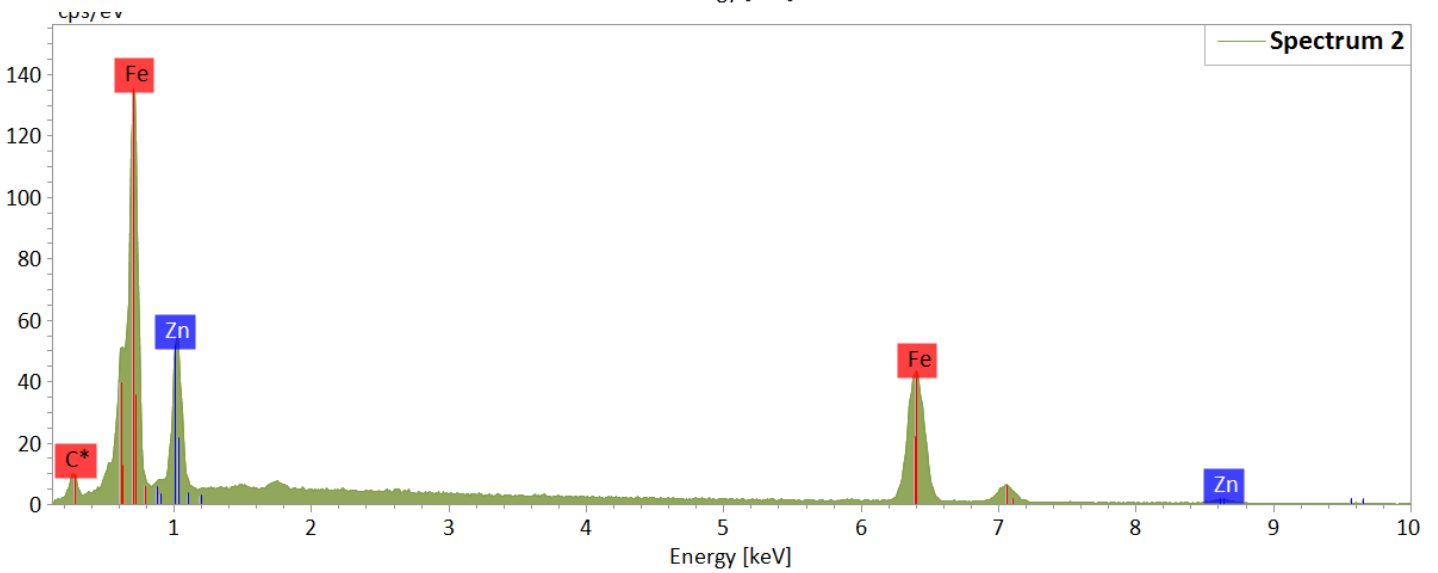
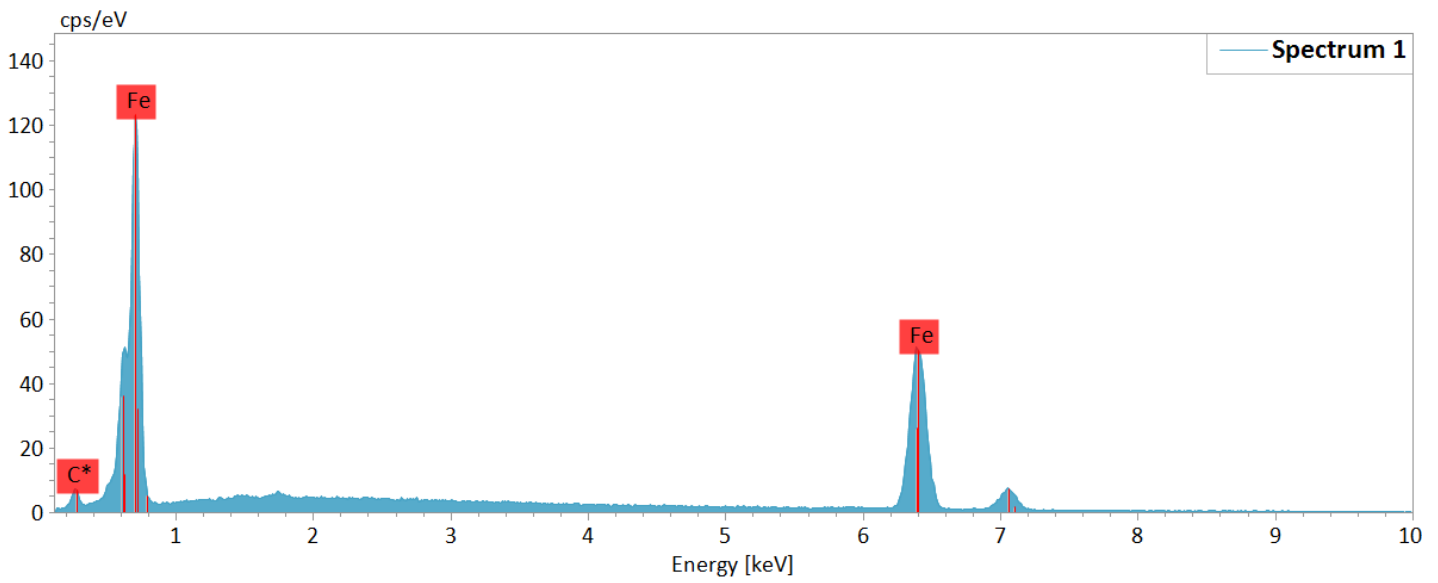
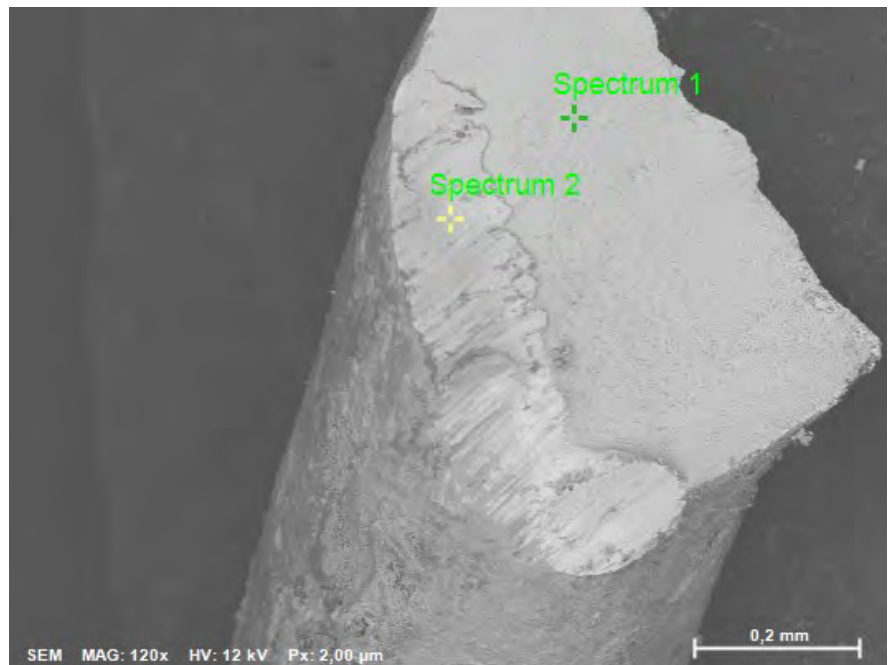
Spectrum	C	O	Si	Cl	Ca	Zn
Spectrum 1	13,7	48,5		10,0		27,8
Spectrum 2	18,6	48,5	0,9	8,3	1,0	22,8
Spectrum 3		48,4		12,3		39,2



Atomic concentration [%]

Spectrum	C	O	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ca	Zn
Spectrum 1	65,8	23,0			0,9	0,3			2,7	7,3
Spectrum 2	52,7									47,3
Spectrum 3	9,3	67,5	0,1	0,5	2,6		0,8	1,1	17,7	0,3

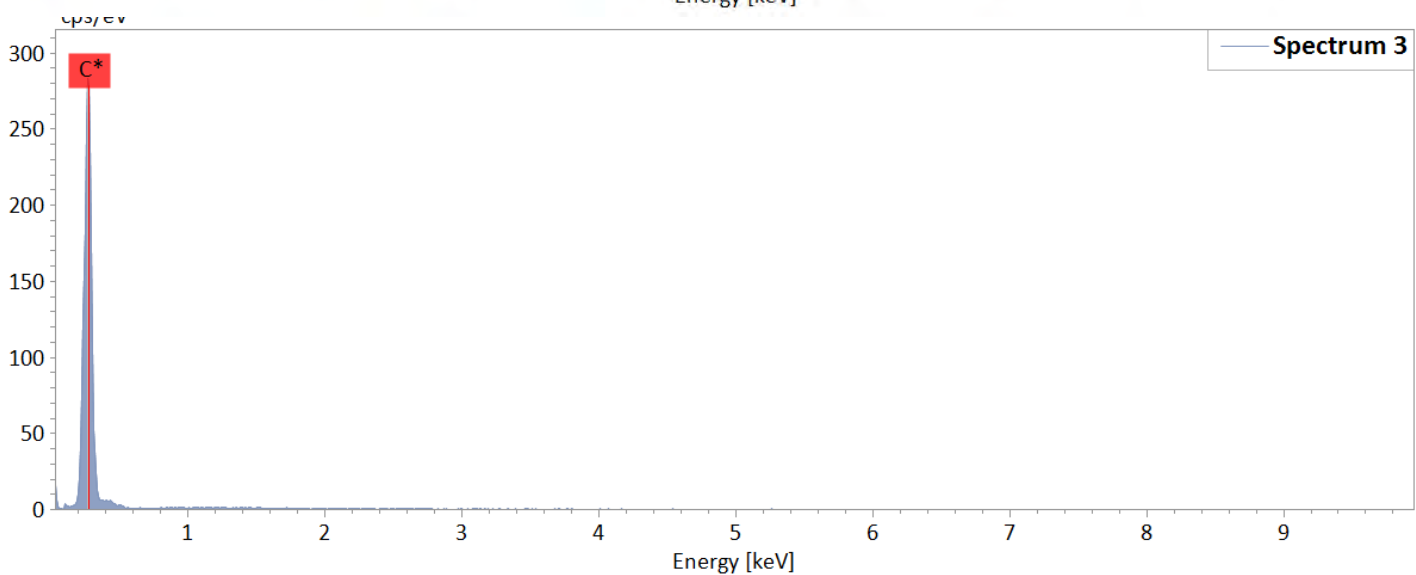
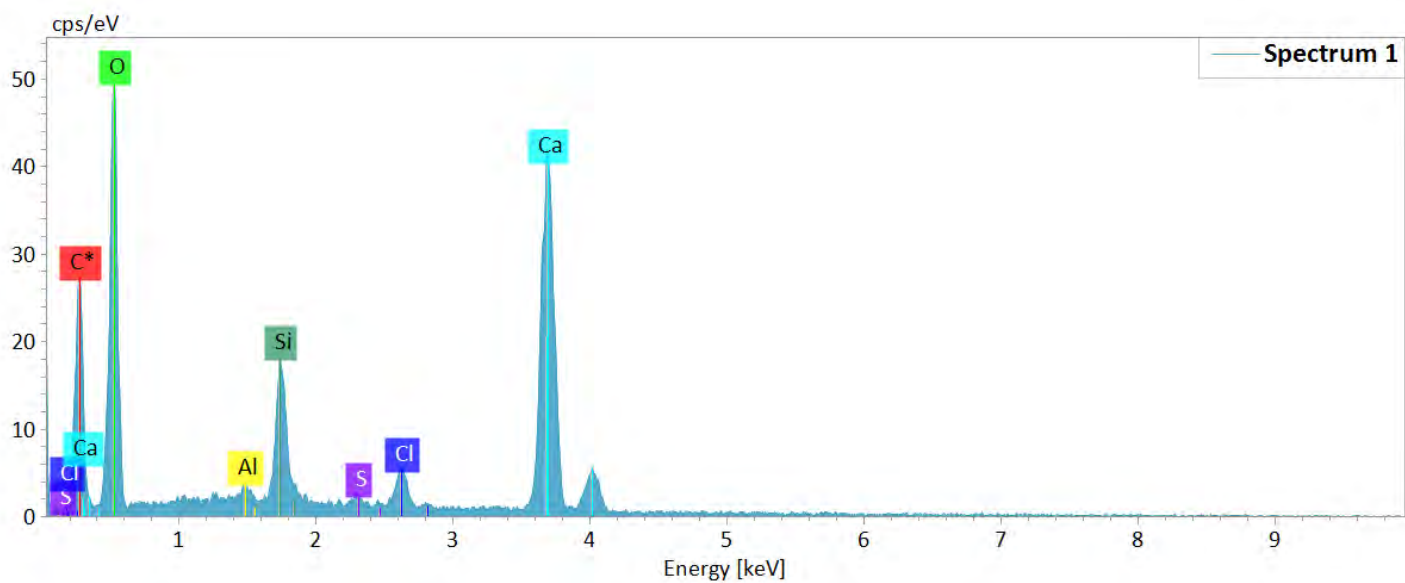
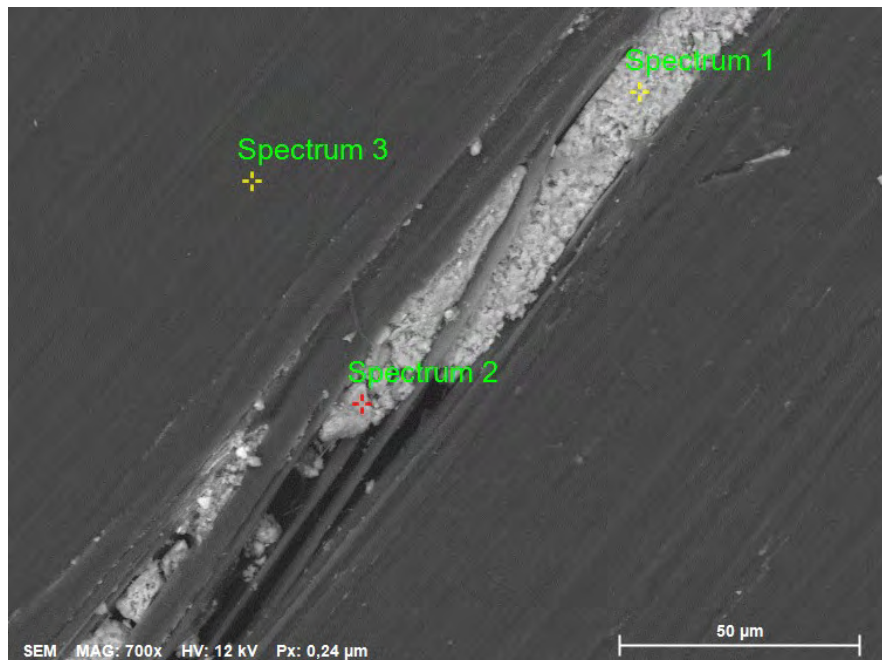
A-Aa-4



Atomic concentration [%]

Spectrum	C	Fe	Zn
Spectrum 1	0,0	100,0	
Spectrum 2	0,0	87,2	12,8

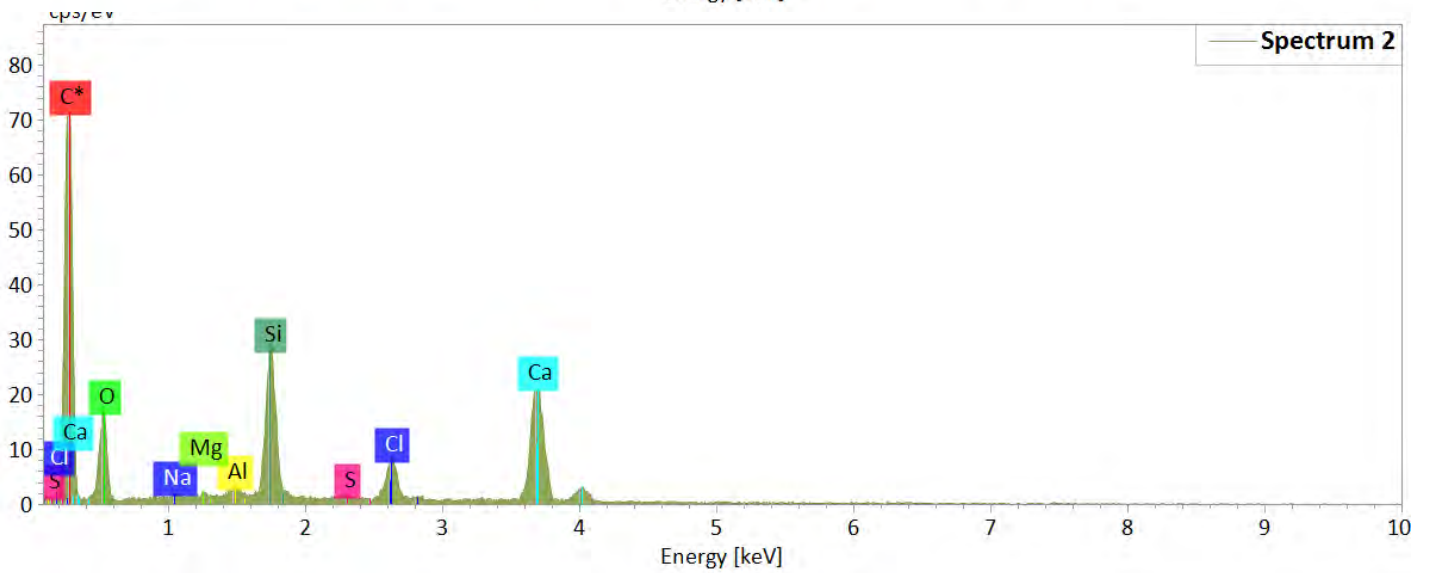
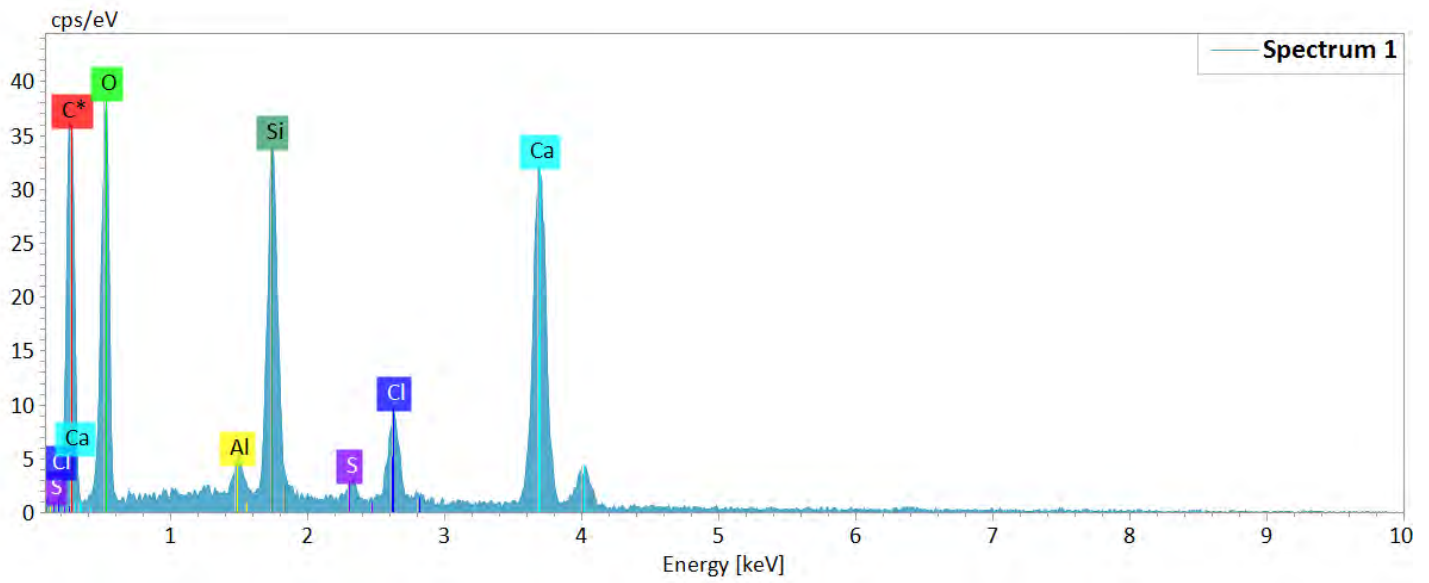
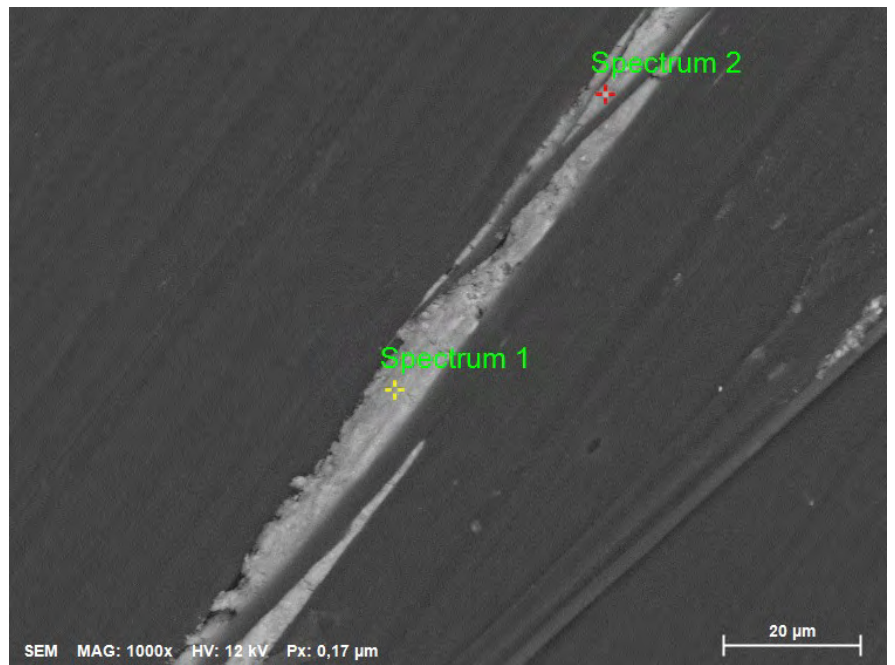
A-Aa-5-02



Atomic concentration [%]

Spectrum	C	O	Mg	Al	Si	S	Cl	Ca
Spectrum 1	24,7	56,0		0,2	3,2	0,2	1,1	14,5
Spectrum 2	29,8	50,9	0,2	0,7	5,5	1,0	1,5	10,4
Spectrum 3	100,0							

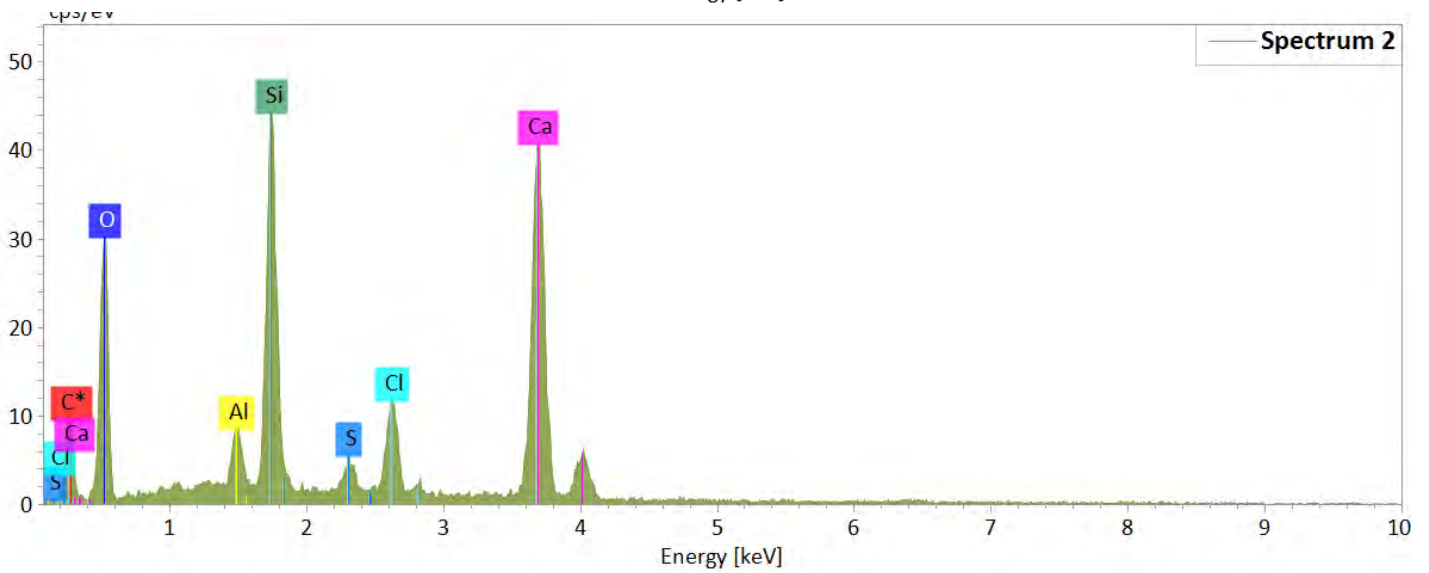
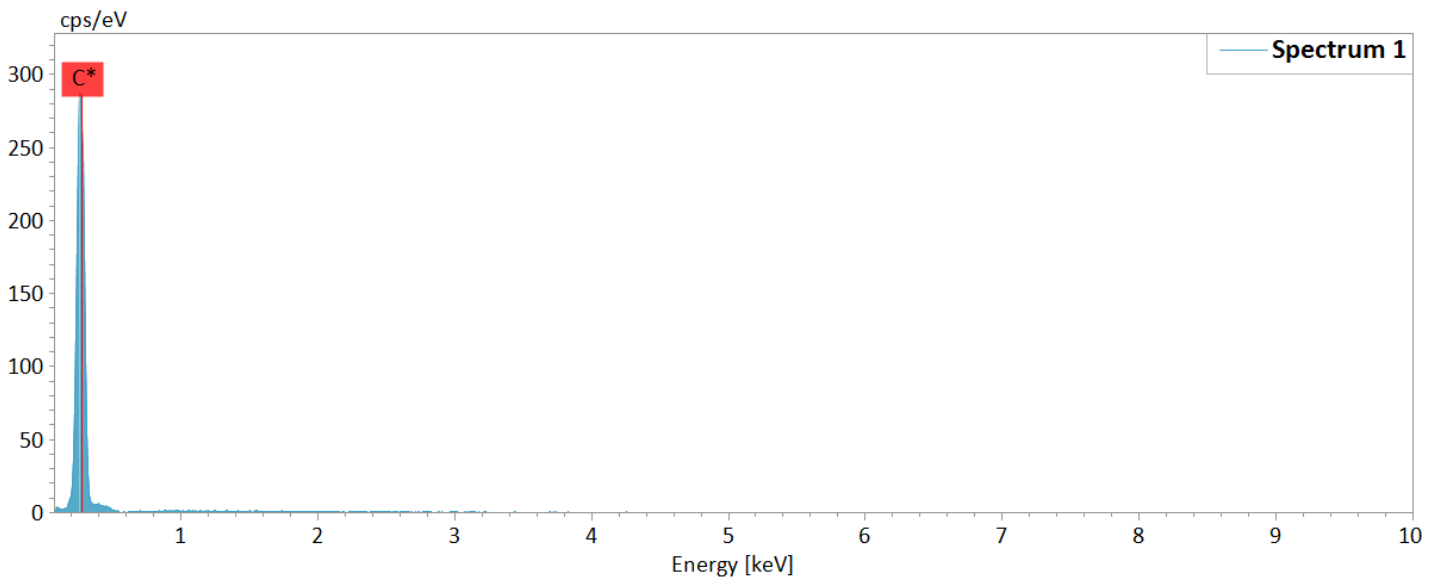
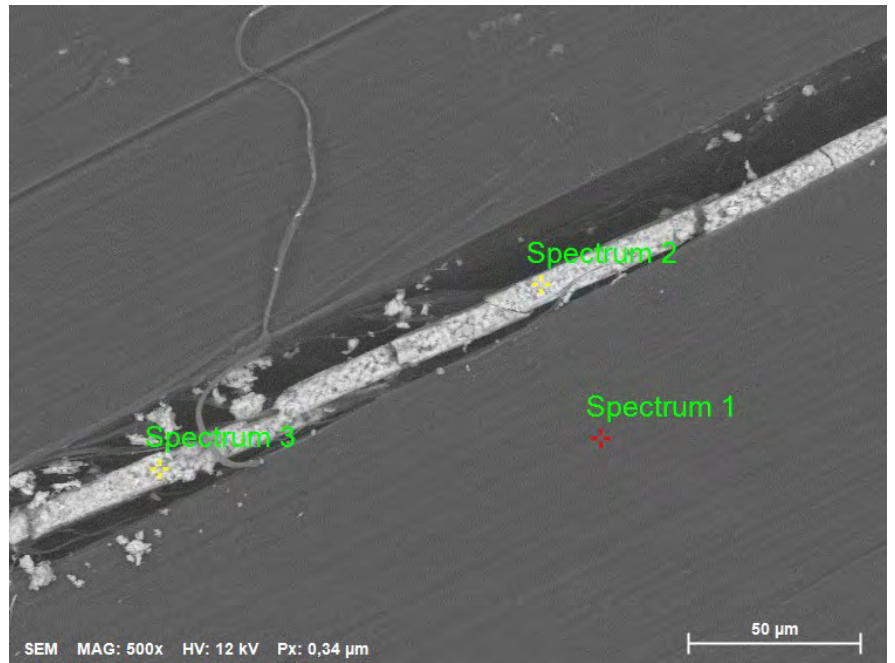
A-Aa-5-03



Atomic concentration [%]

Spectrum	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	Ca
Spectrum 1	40,8	40,4			0,6	5,9	0,3	1,7	10,3
Spectrum 2	67,2	19,2	0,1	0,1	0,3	5,4	0,1	1,5	6,1

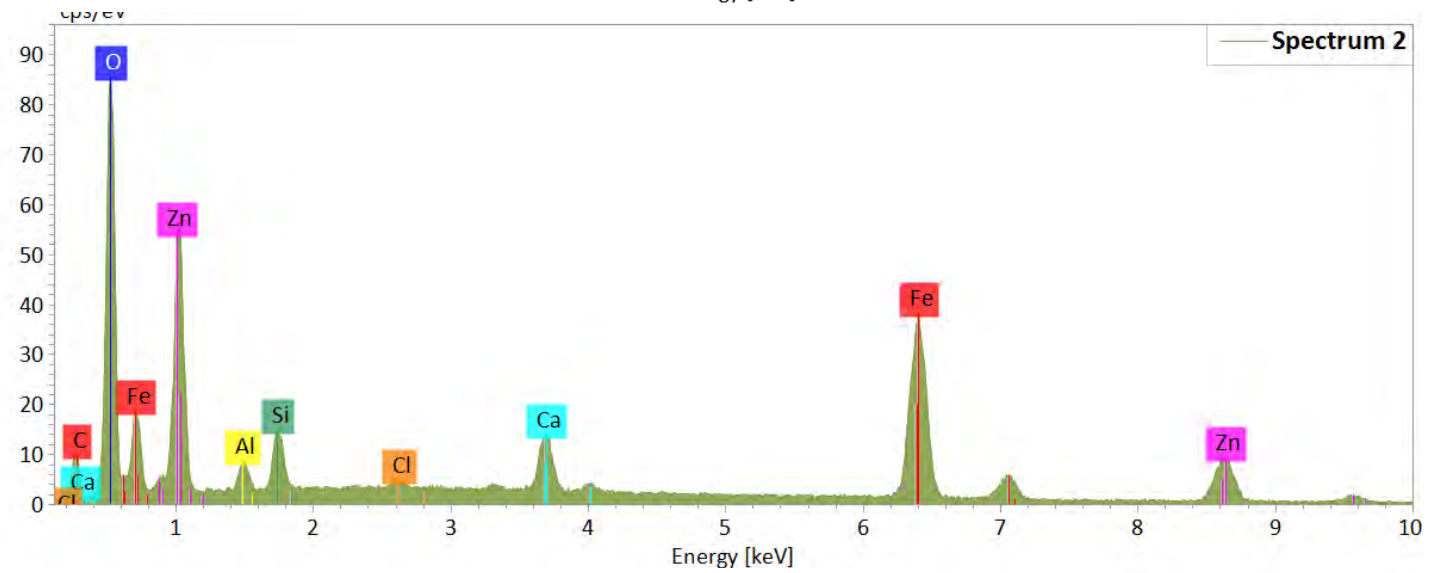
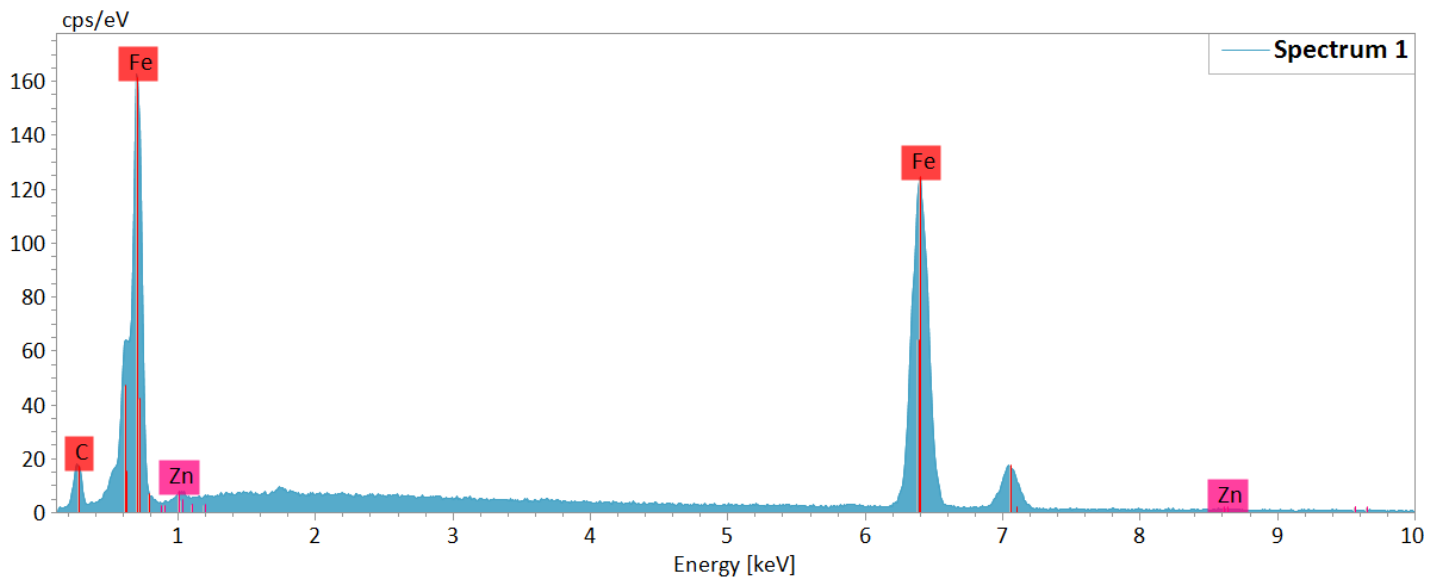
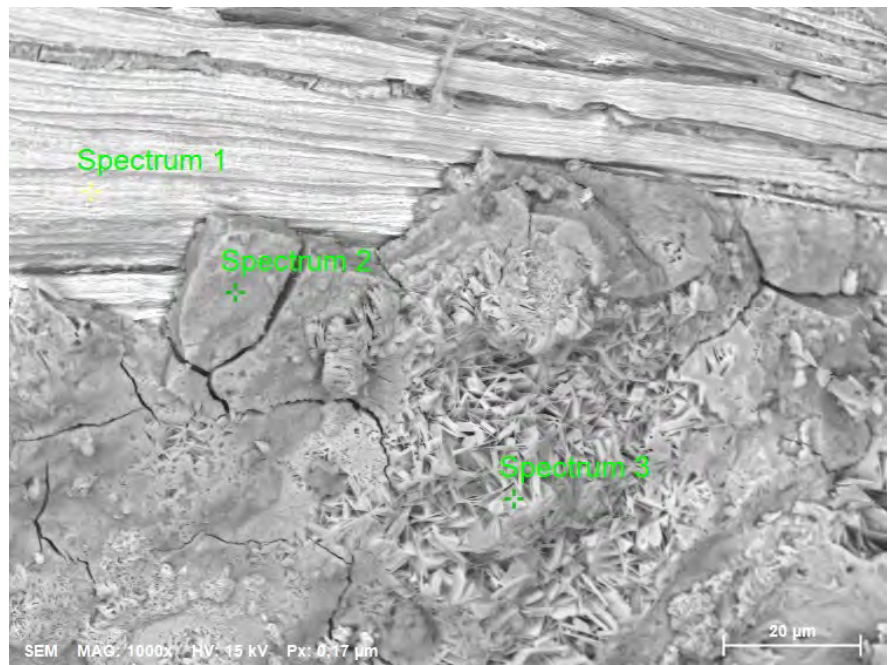
A-Aa-6-02



Atomic concentration [%]

Spectrum	C	O	Mg	Al	Si	S	Cl	Ca
Spectrum 1	100,0							
Spectrum 2	16,9	48,4		1,5	11,0	1,0	3,3	17,9
Spectrum 3	26,2	48,1	0,2	1,7	6,0	0,2	3,5	14,1

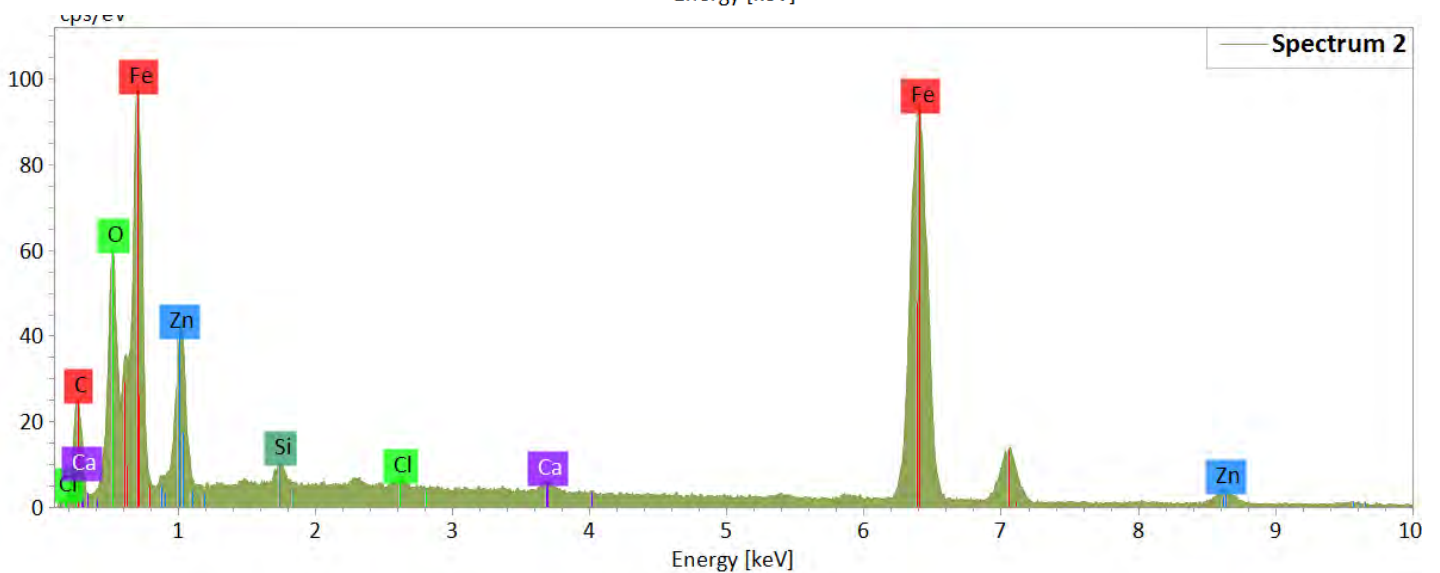
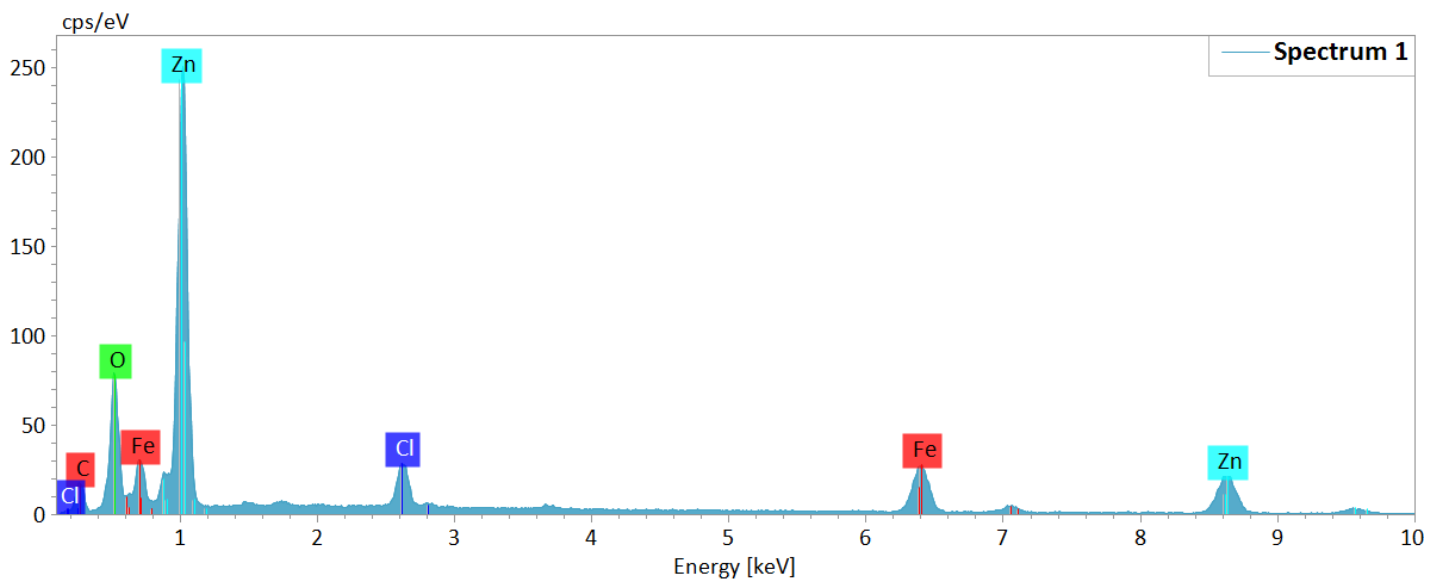
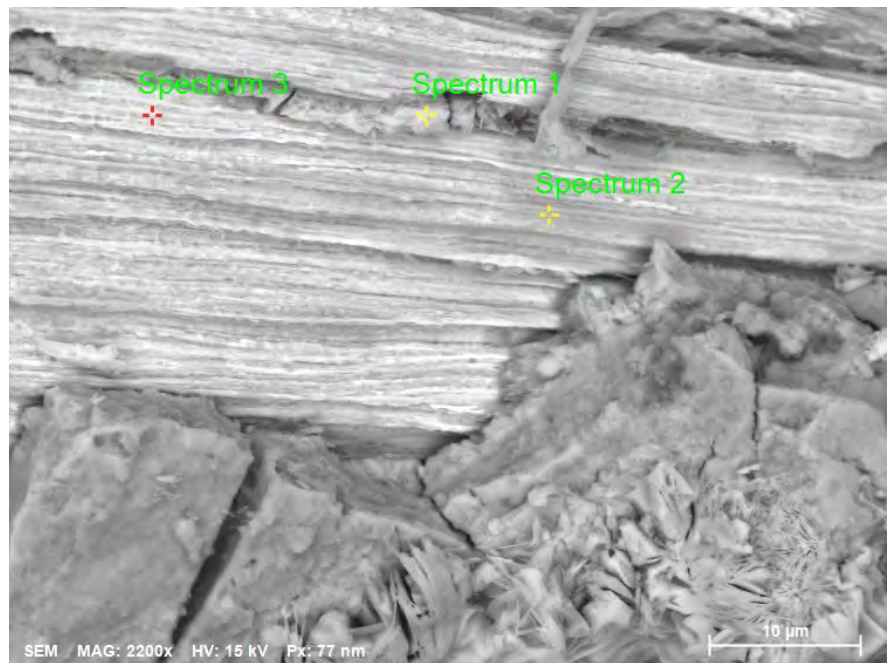
B-Aa-4-01b



Atomic concentration [%]

Spectrum	C	O	Al	Si	Cl	Ca	Fe	Zn
Spectrum 1	27,7						71,8	0,5
Spectrum 2	16,6	46,1	1,5	2,8	0,3	2,4	17,4	12,9
Spectrum 3	23,6	41,4			6,0	0,5	5,3	23,2

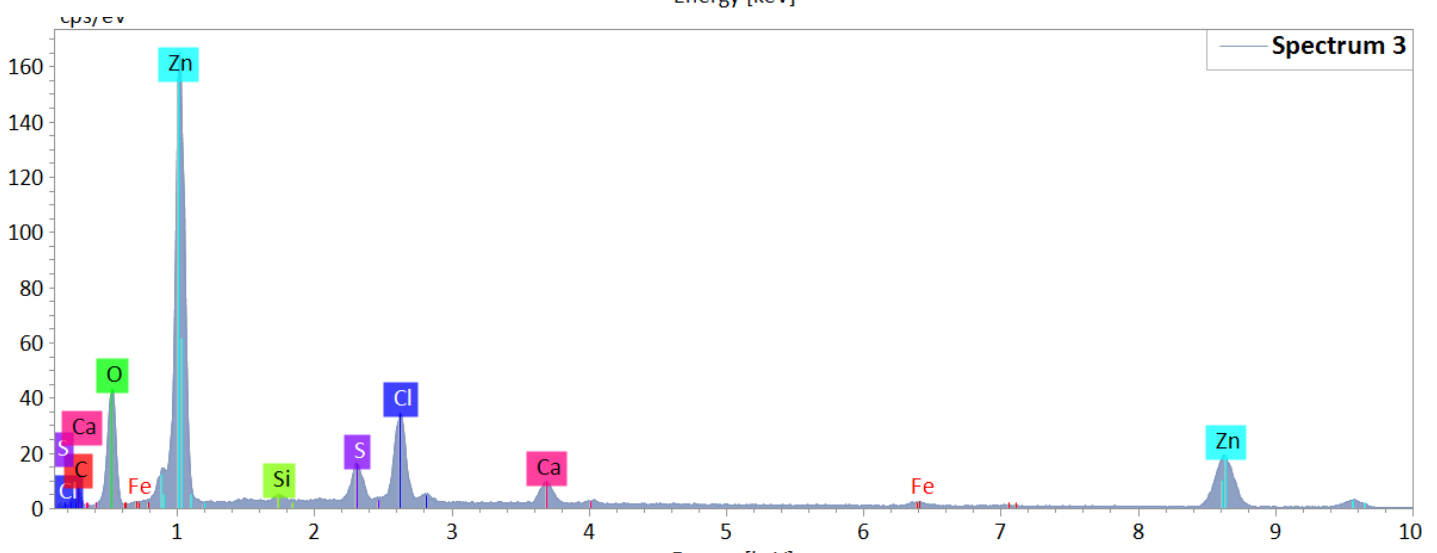
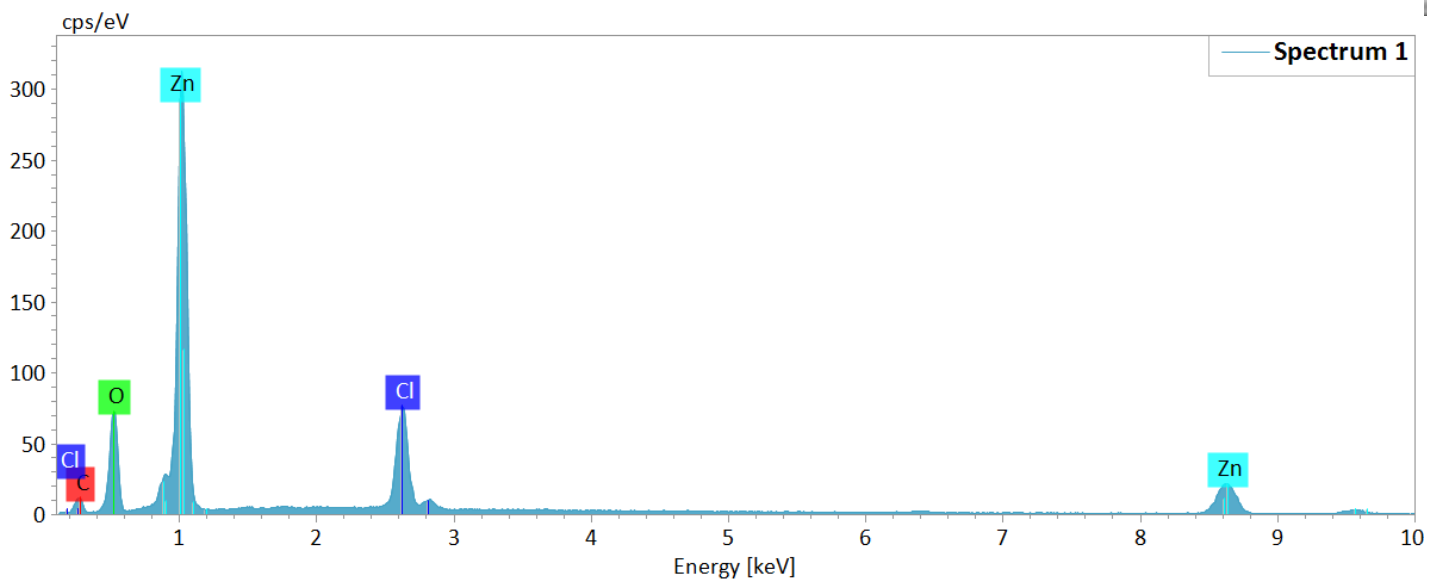
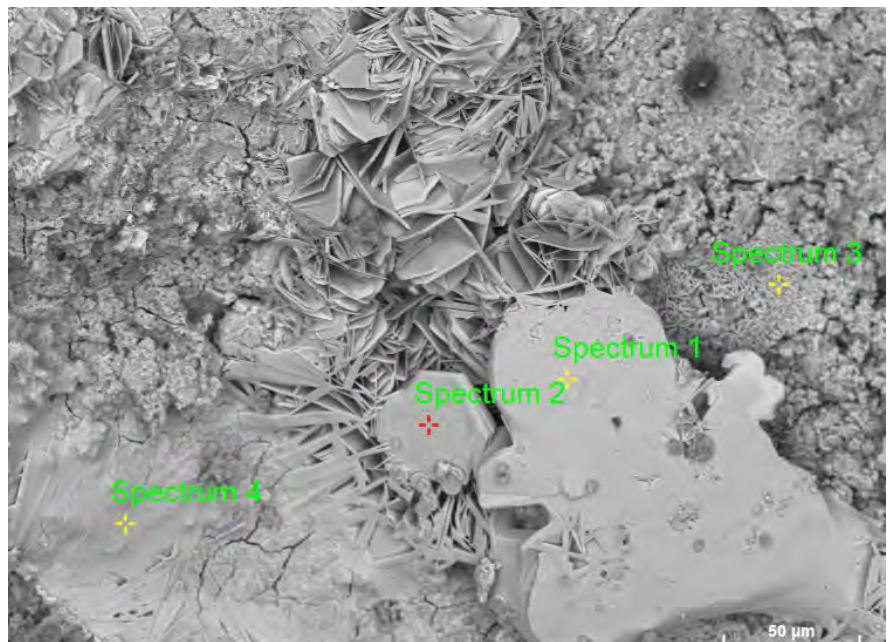
B-Aa-4-01c



Atomic concentration [%]

Spectrum	C	O	Si	Cl	Ca	Fe	Zn
Spectrum 1	28,0	34,1		3,6		10,7	23,5
Spectrum 2	31,9	24,8	0,6		0,4	38,8	3,5
Spectrum 3	23,1		0,4			75,7	0,7

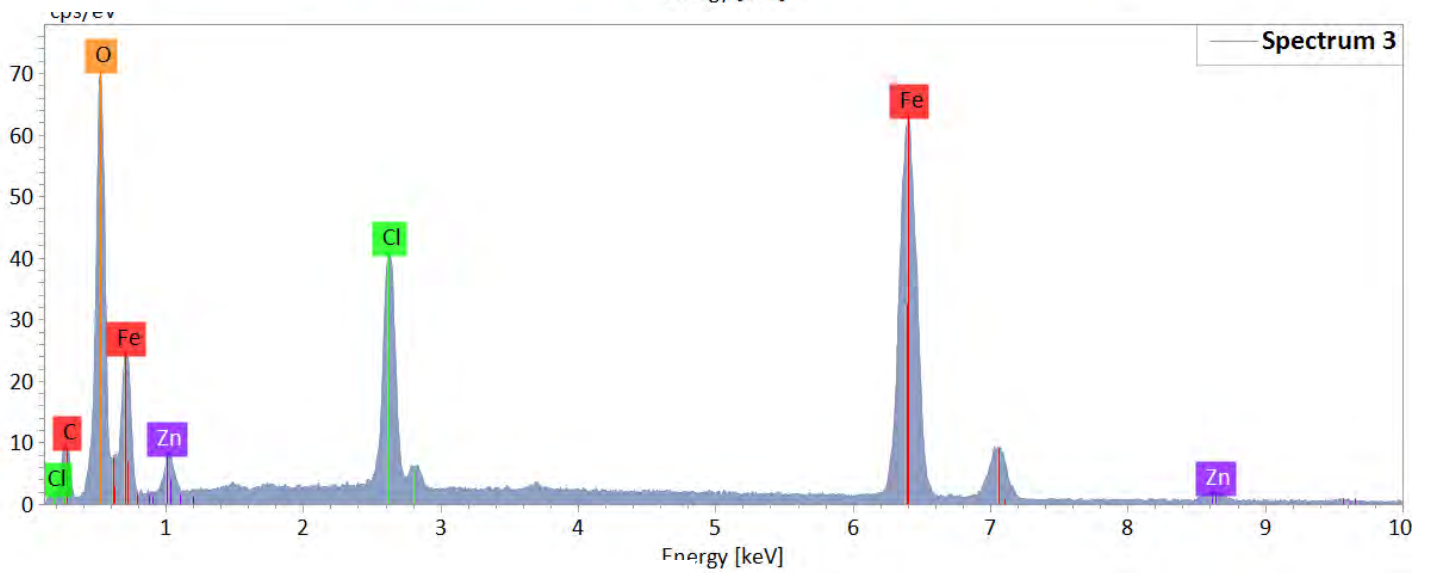
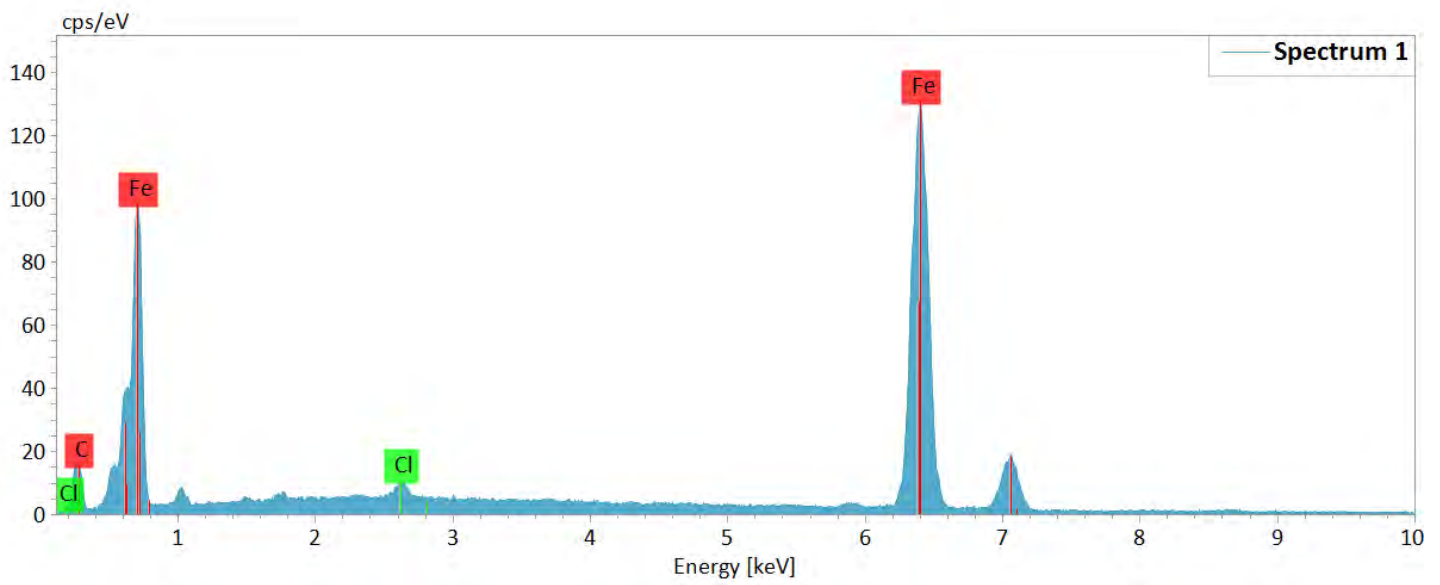
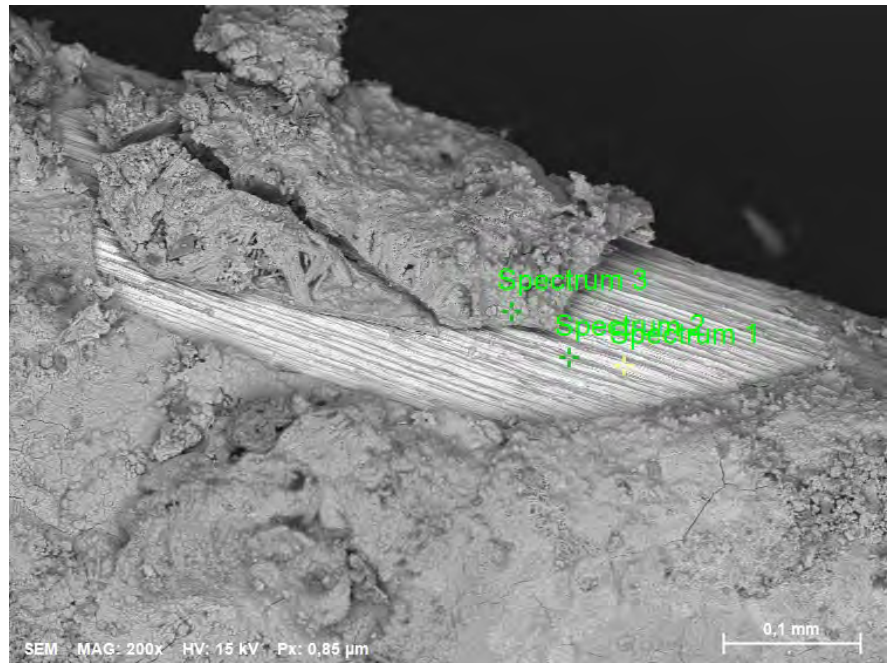
B-Aa-4-01d



Atomic concentration [%]

Spectrum	C	O	Al	Si	S	Cl	Ca	Fe	Zn
Spectrum 1	23,9	40,1				9,1			26,9
Spectrum 2		23,0				16,4			60,6
Spectrum 3	22,7	33,7		0,6	2,9	7,1	2,4	0,8	29,8
Spectrum 4	30,0	34,0	0,9			8,6		1,4	25,1

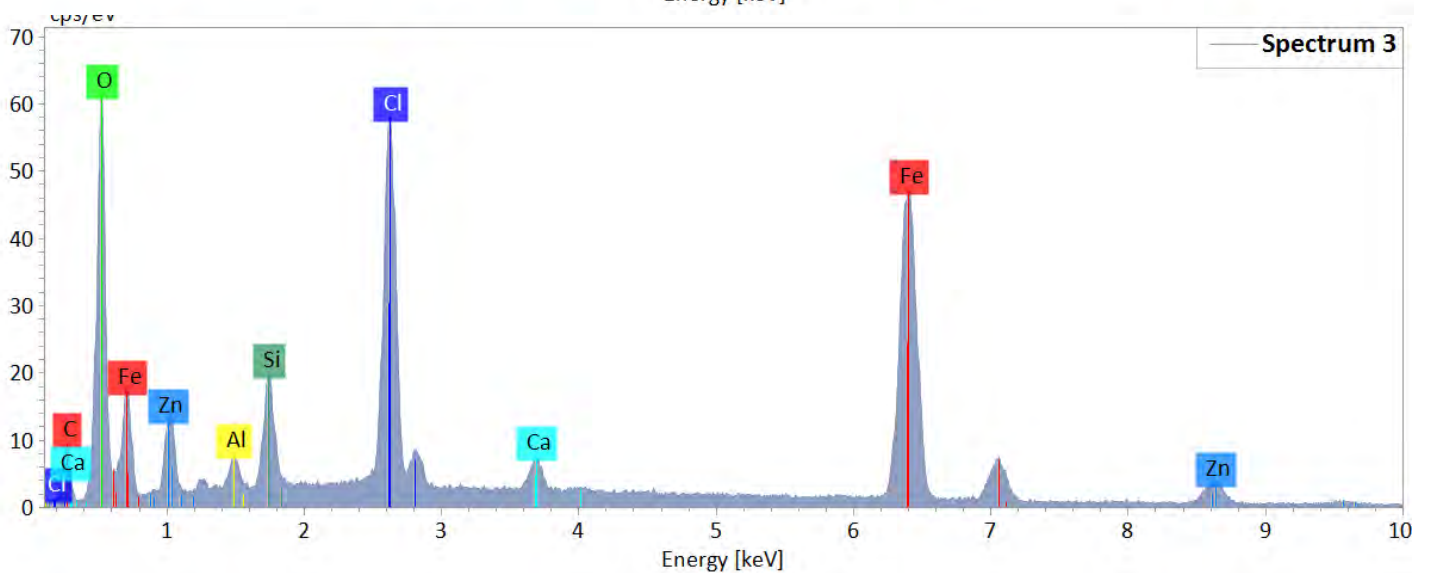
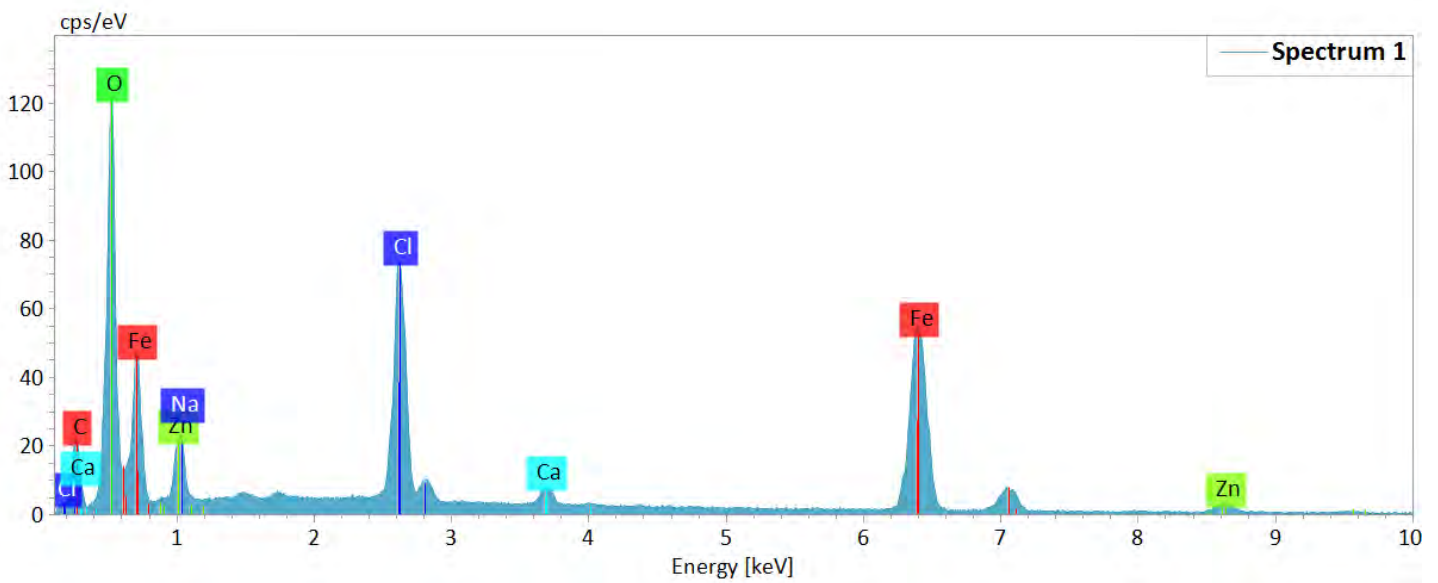
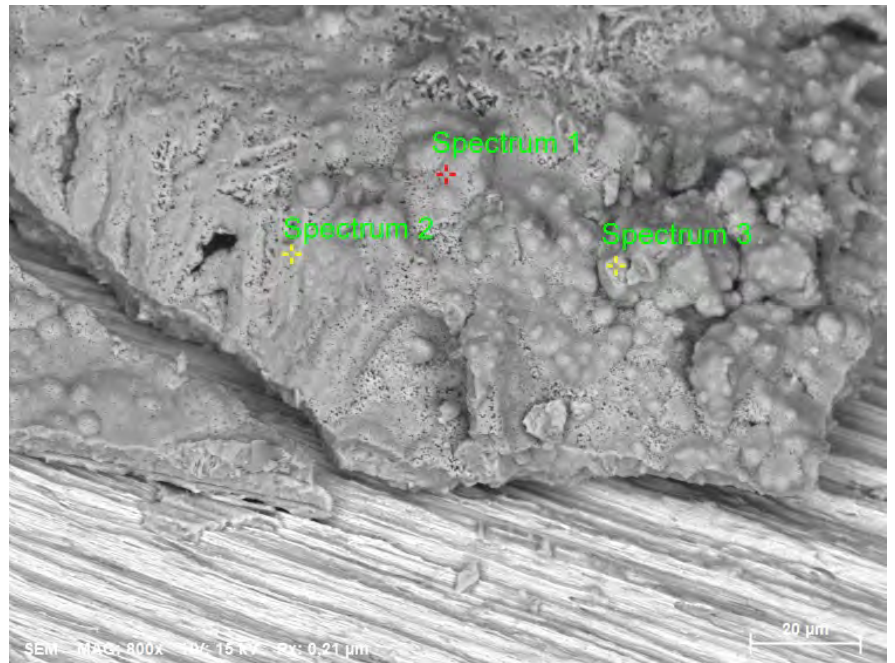
B-Aa-4-02



Atomic concentration [%]

Spectrum	C	O	Cl	Fe	Zn
Spectrum 1	27,4		0,9	71,7	
Spectrum 2	30,6	11,9	3,7	52,3	1,5
Spectrum 3	18,1	37,7	8,5	33,1	2,5

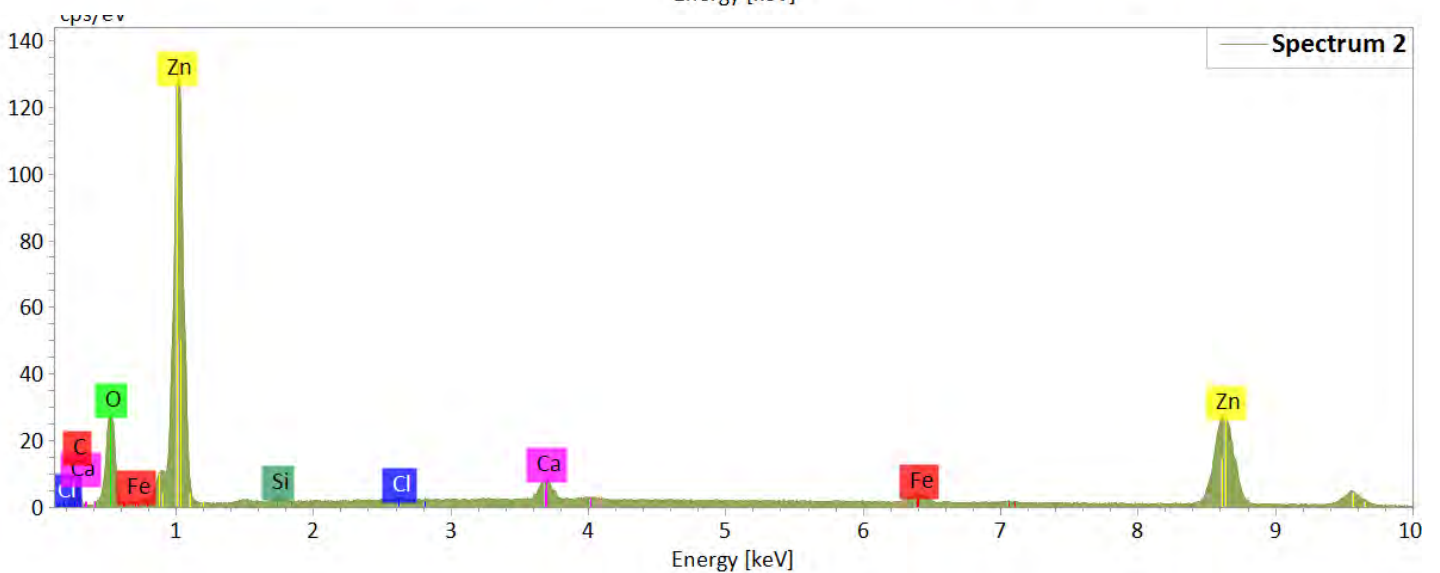
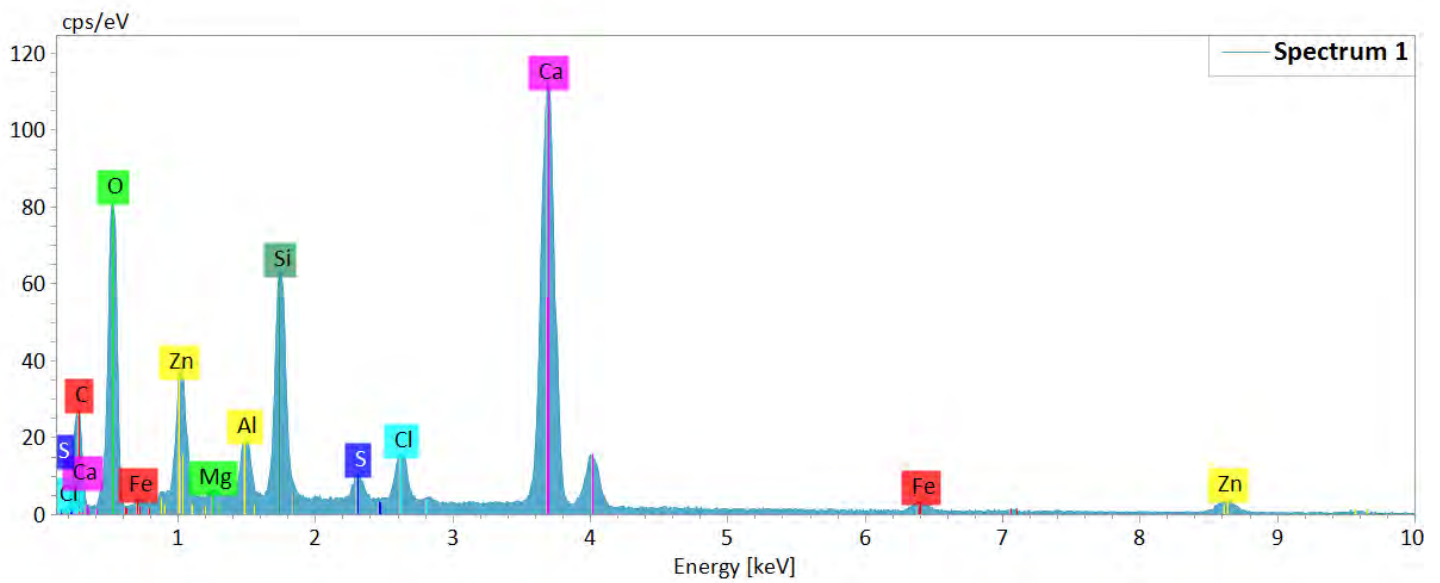
B-Aa-4-02b



Atomic concentration [%]

Spectrum	C	O	Na	Al	Si	Cl	Ca	Fe	Zn
Spectrum 1	26,8	44,9	0,6			6,2	0,7	18,5	2,3
Spectrum 2	20,6	45,1	0,6			5,8		25,9	2,1
Spectrum 3	21,5	36,3		1,1	3,5	8,8	1,0	23,1	4,6

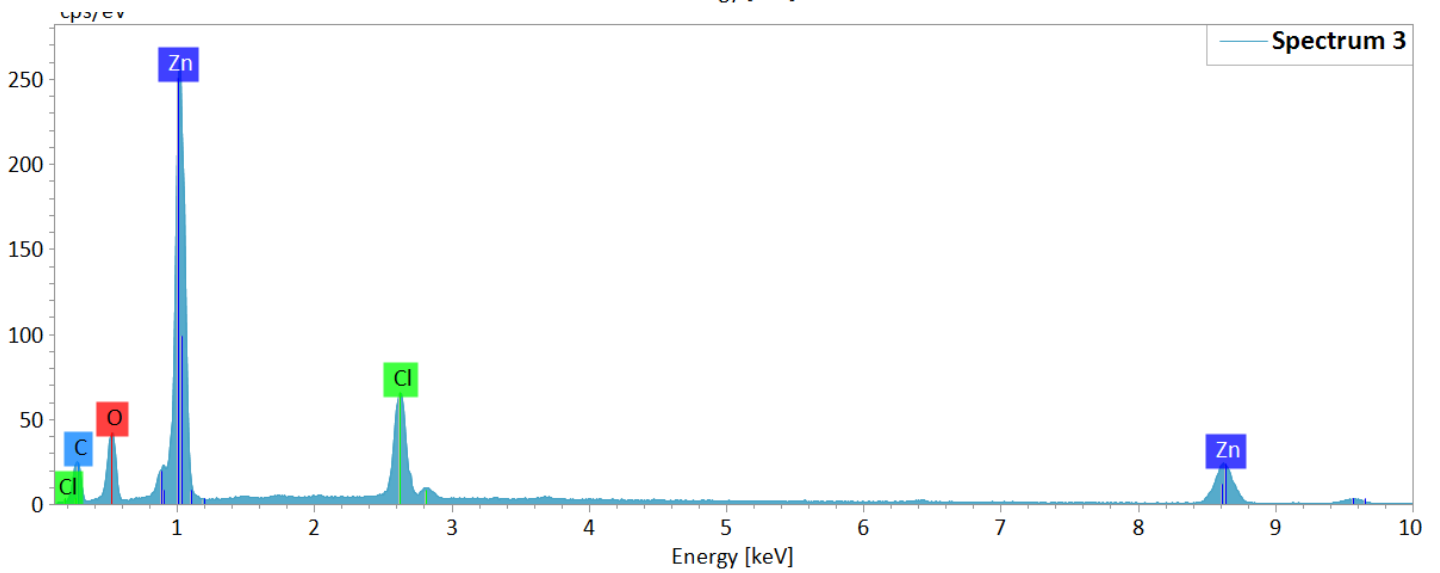
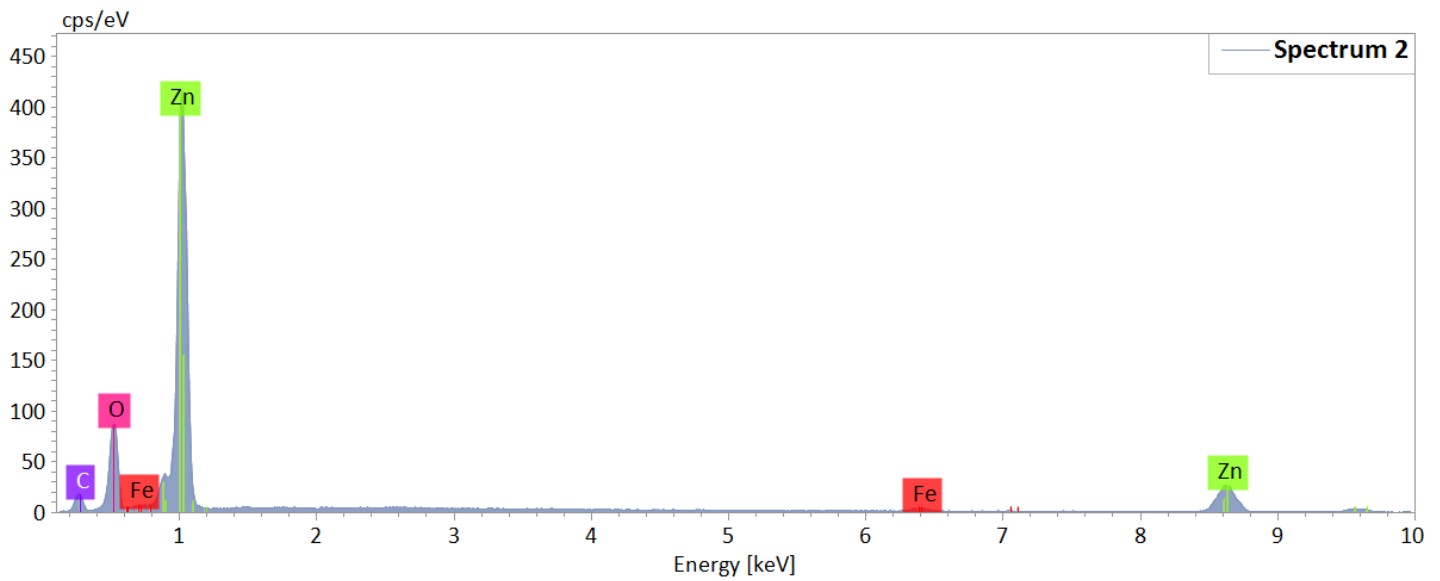
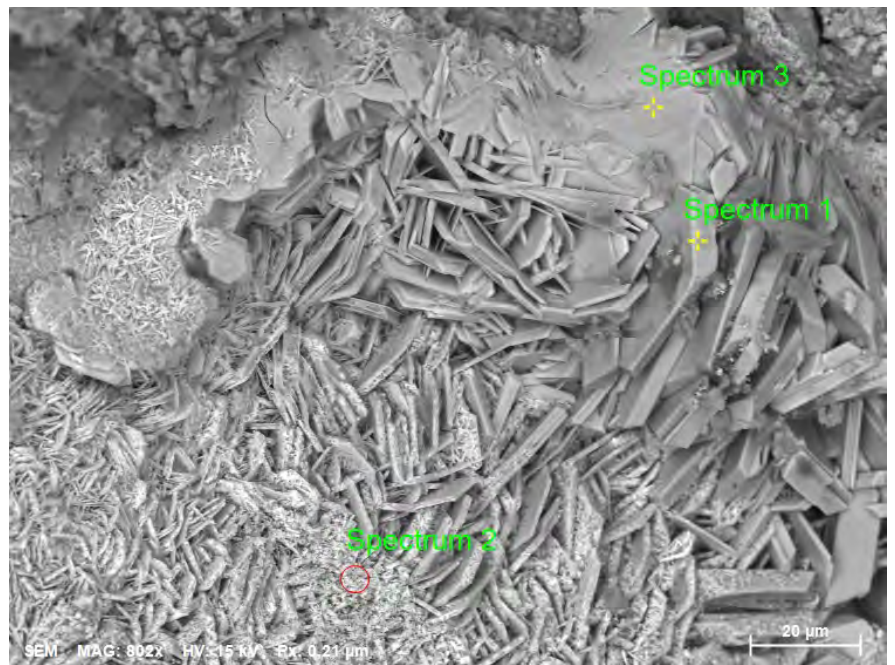
B-Aa-4-03



Atomic concentration [%]

Spectrum	C	O	Mg	Al	Si	S	Cl	Ca	Fe	Zn
Spectrum 1	21,2	53,5	0,0	0,8	4,1	0,6	1,3	14,3	0,8	3,4
Spectrum 2	21,3	23,5			0,9		0,2	2,5	1,4	50,1
Spectrum 3		48,0			0,3		11,8	0,8	0,9	38,3

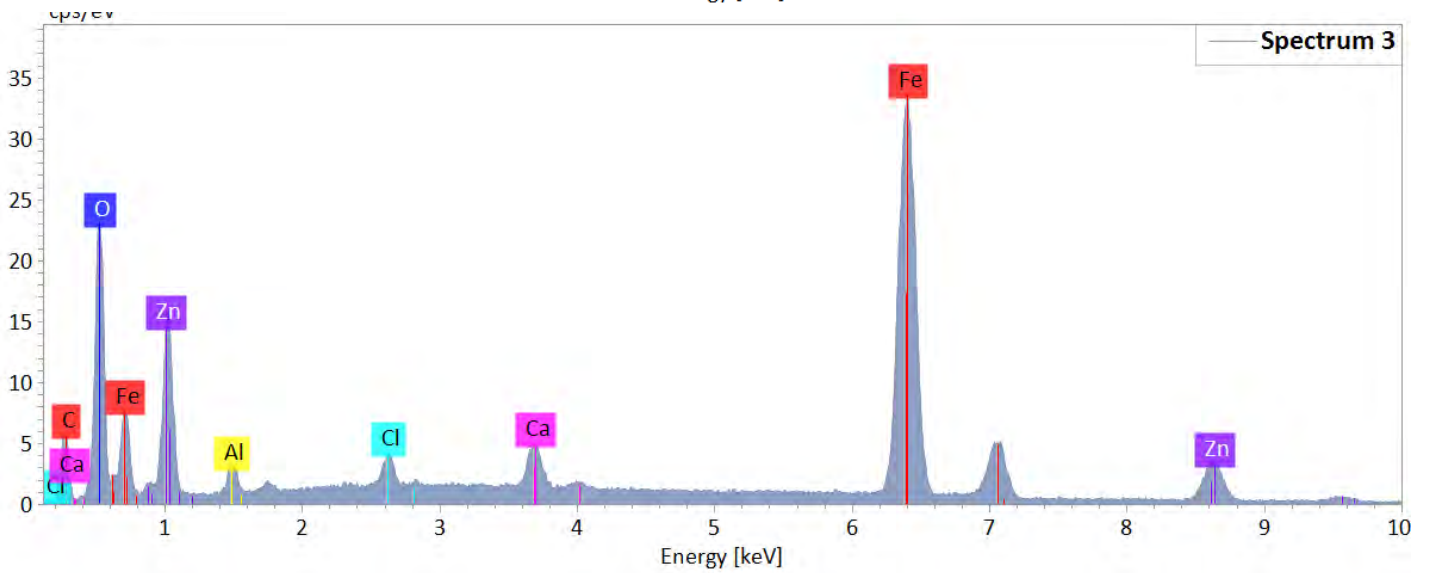
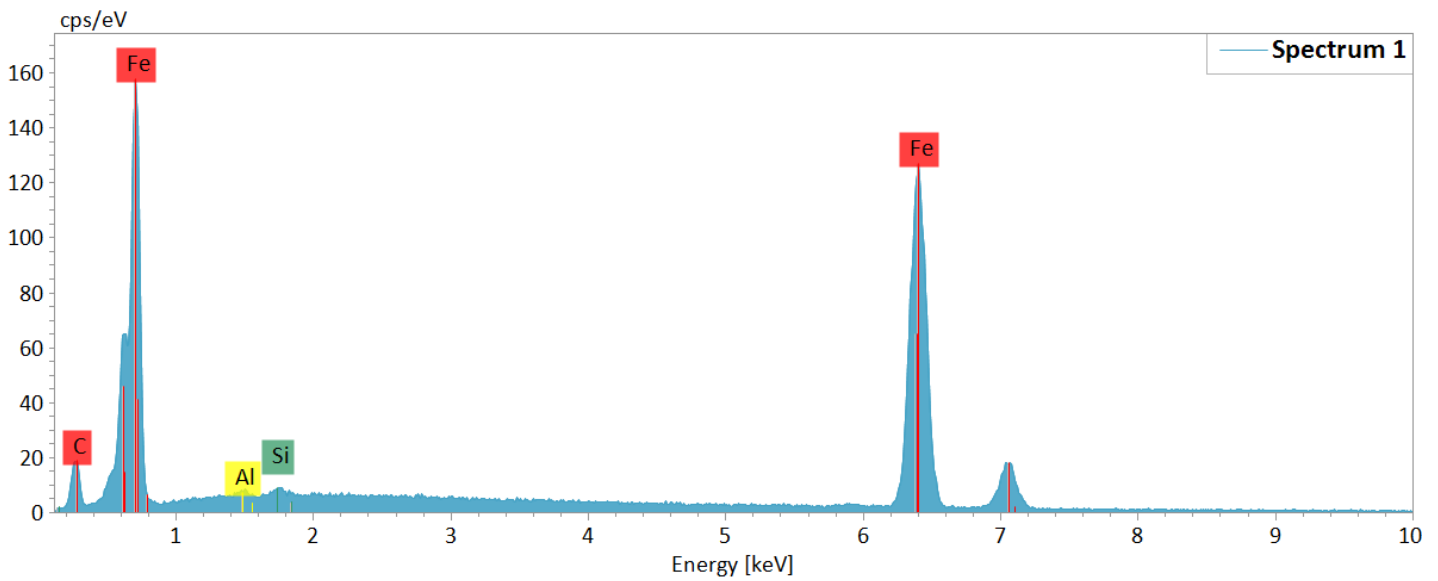
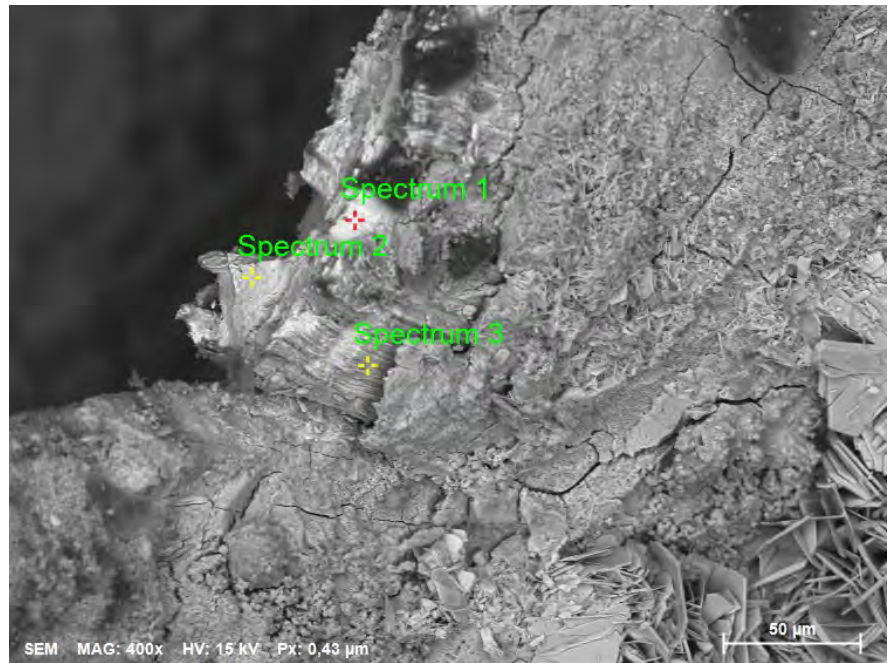
B-Aa-4-04



Atomic concentration [%]

Spectrum	C	O	Cl	Ca	Fe	Zn
Spectrum 1	34,0	29,6	8,2	0,4	0,7	27,2
Spectrum 2	26,4	40,6			1,2	31,8
Spectrum 3	45,4	21,4	8,1			25,1

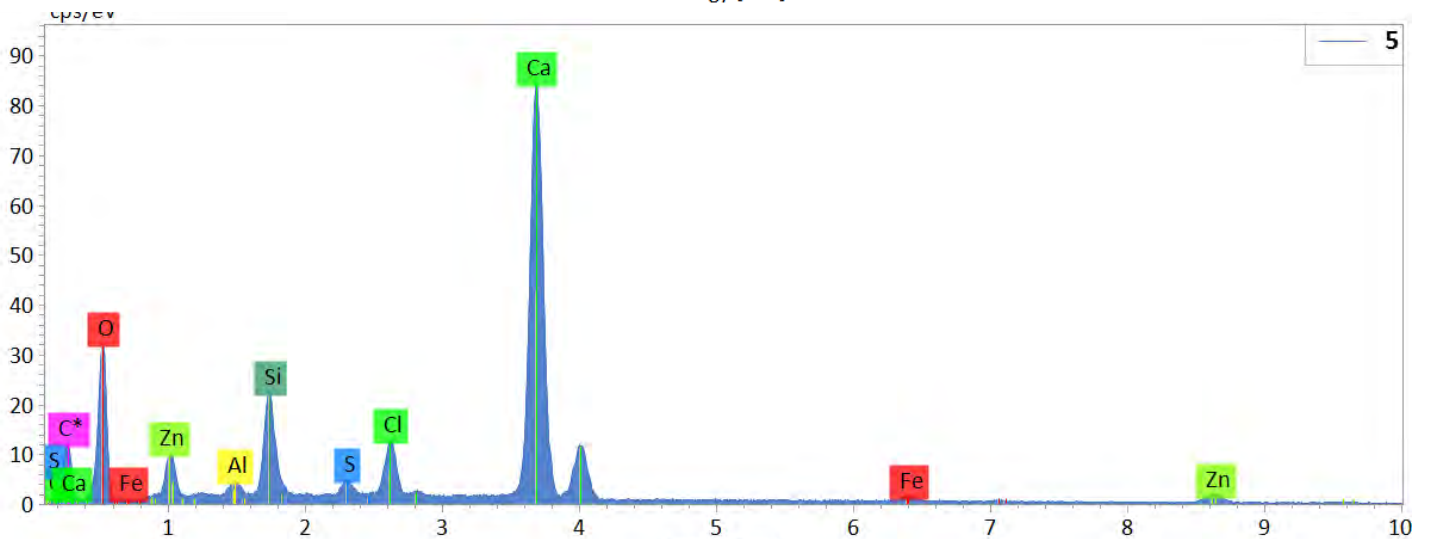
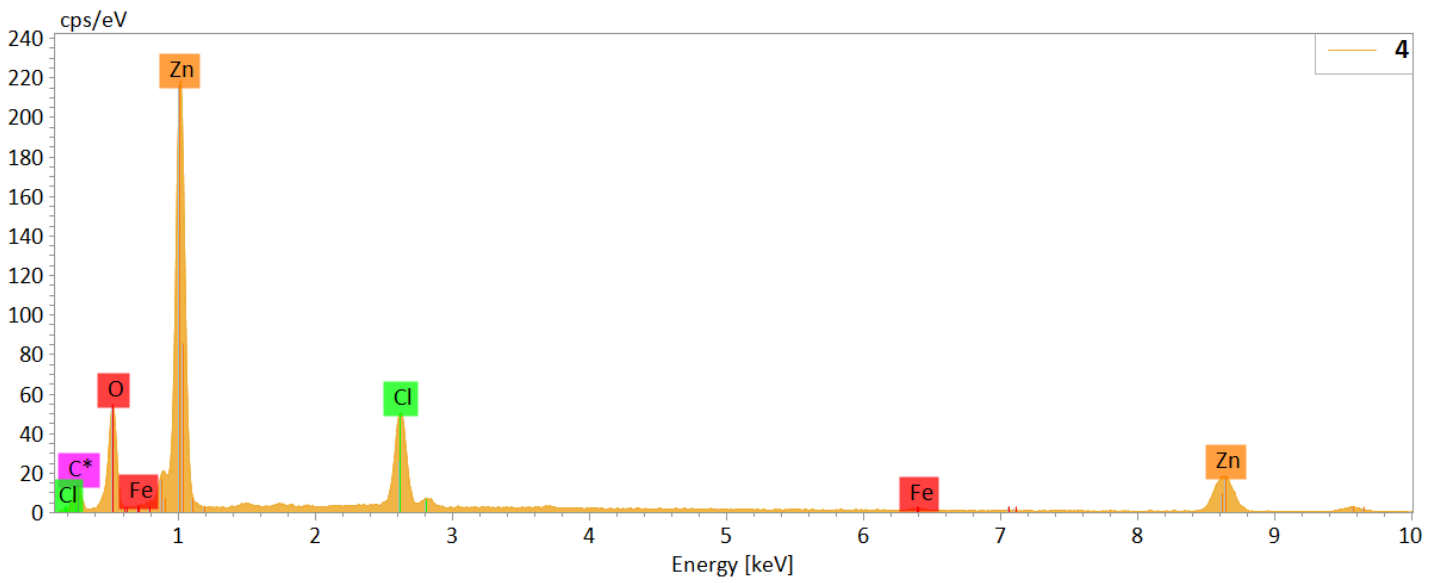
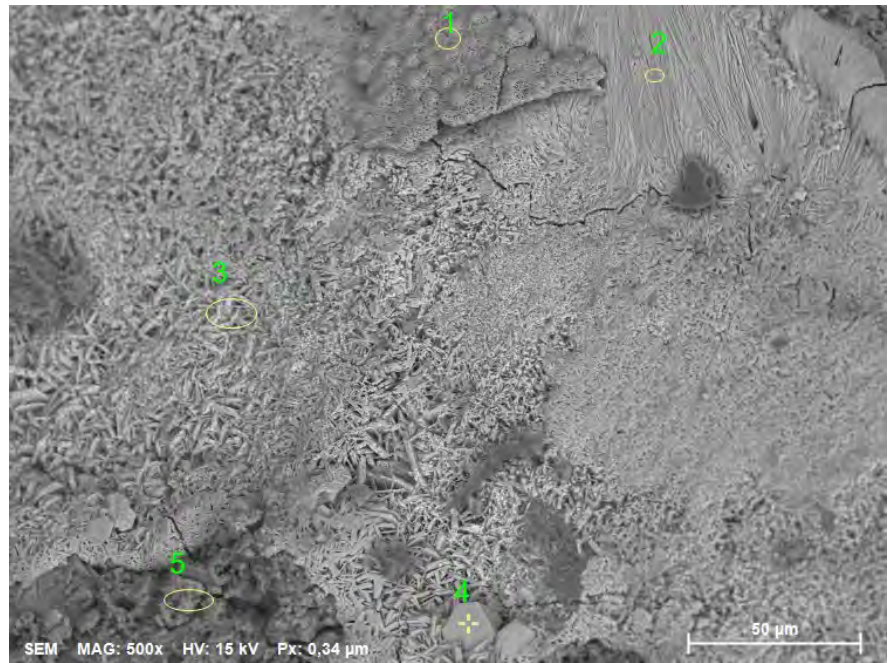
B-Aa-4-06



Atomic concentration [%]

Spectrum	C	O	Al	Si	Cl	Ca	Fe	Zn
Spectrum 1	27,7		0,4	0,5			71,4	
Spectrum 2	29,4		1,6				69,0	
Spectrum 3	21,9	26,9	2,0		1,2	2,0	34,8	11,3

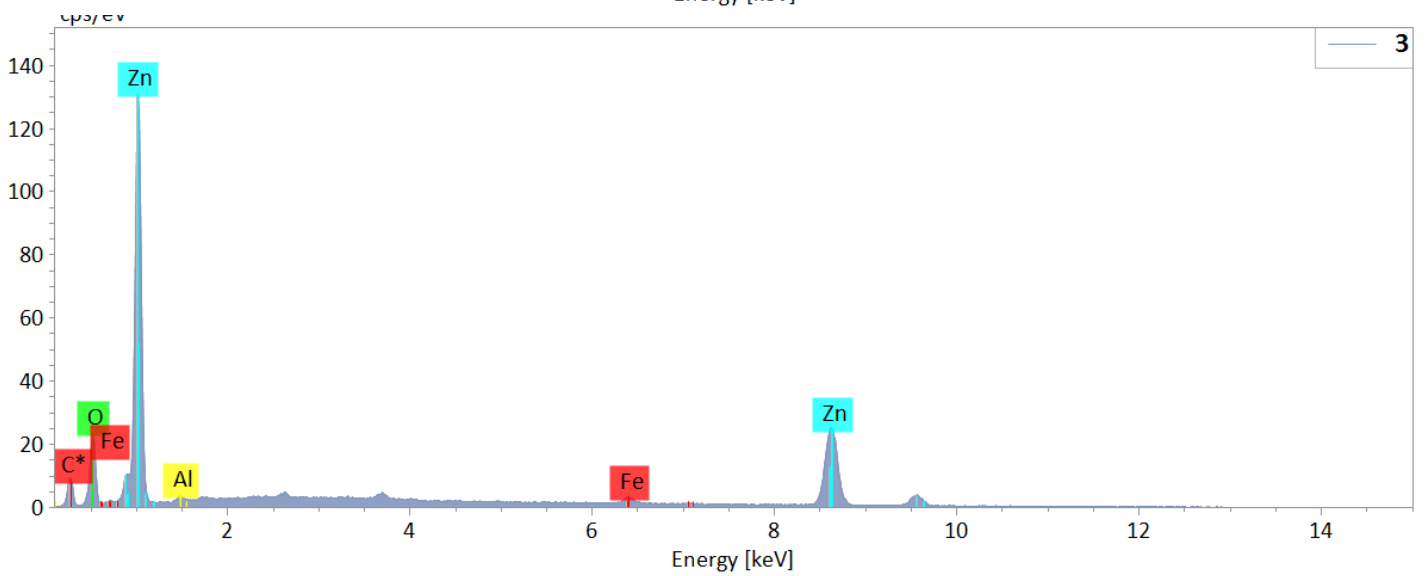
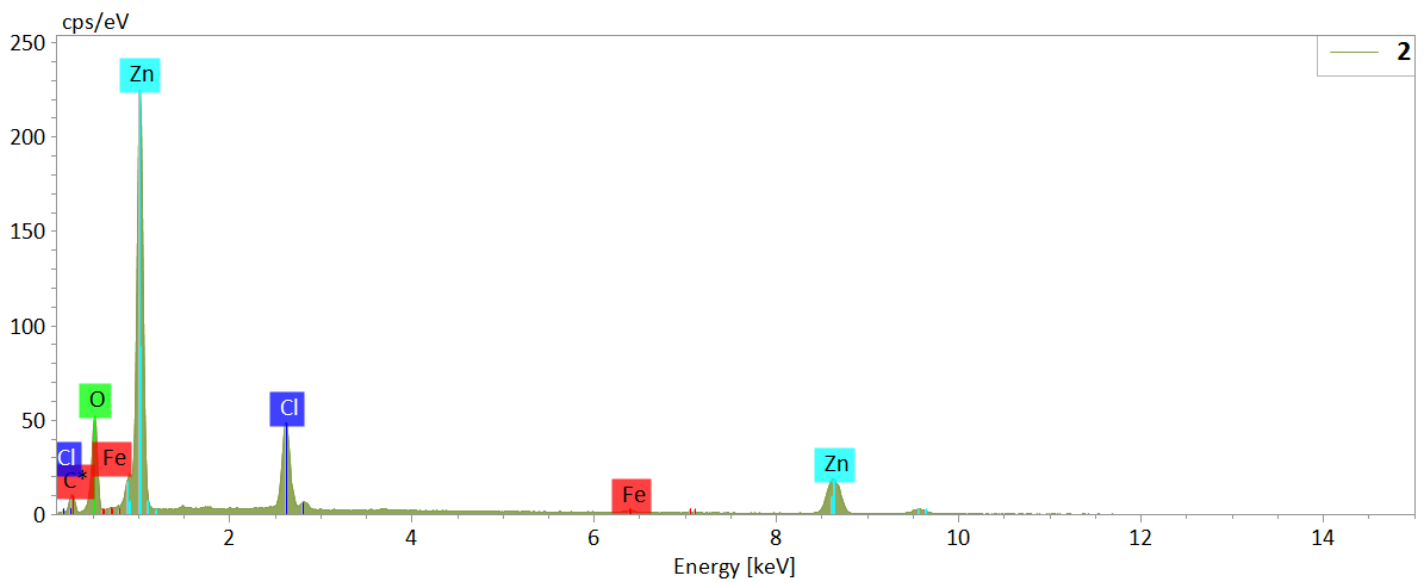
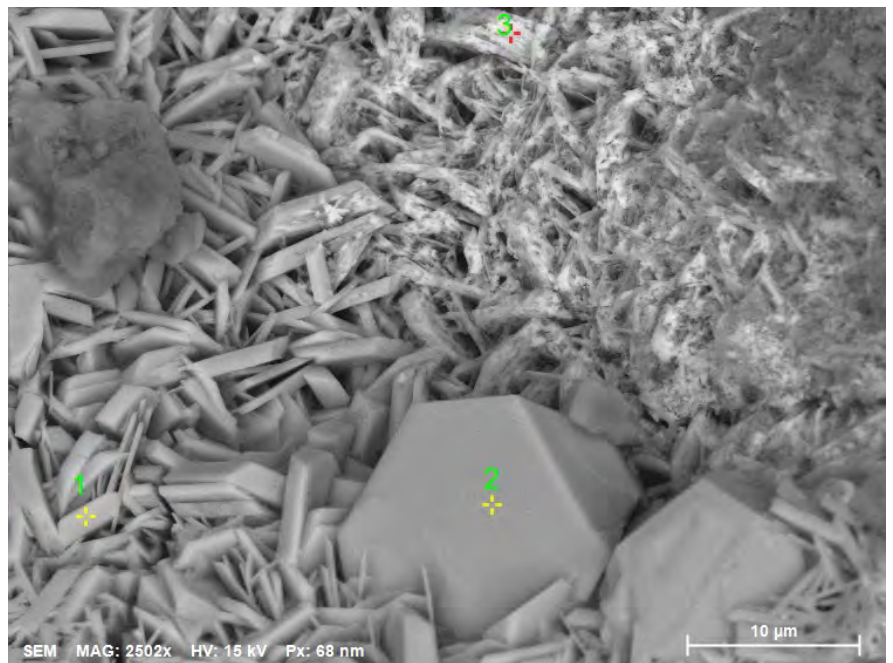
Vedlegg 16
 B-Aa-4-07



Atomic concentration [%]

Spectrum	C	O	Al	Si	S	Cl	Ca	Fe	Zn
1		57,0	0,5	0,4		4,7	0,7	35,2	1,4
2	23,3	39,0				6,9	1,8	6,5	22,5
3	19,5	35,4		0,7			1,1	2,5	40,8
4	22,8	35,7				9,9		0,6	31,1
5	16,8	49,4	0,7	4,7	0,8	2,5	21,9	0,6	2,8

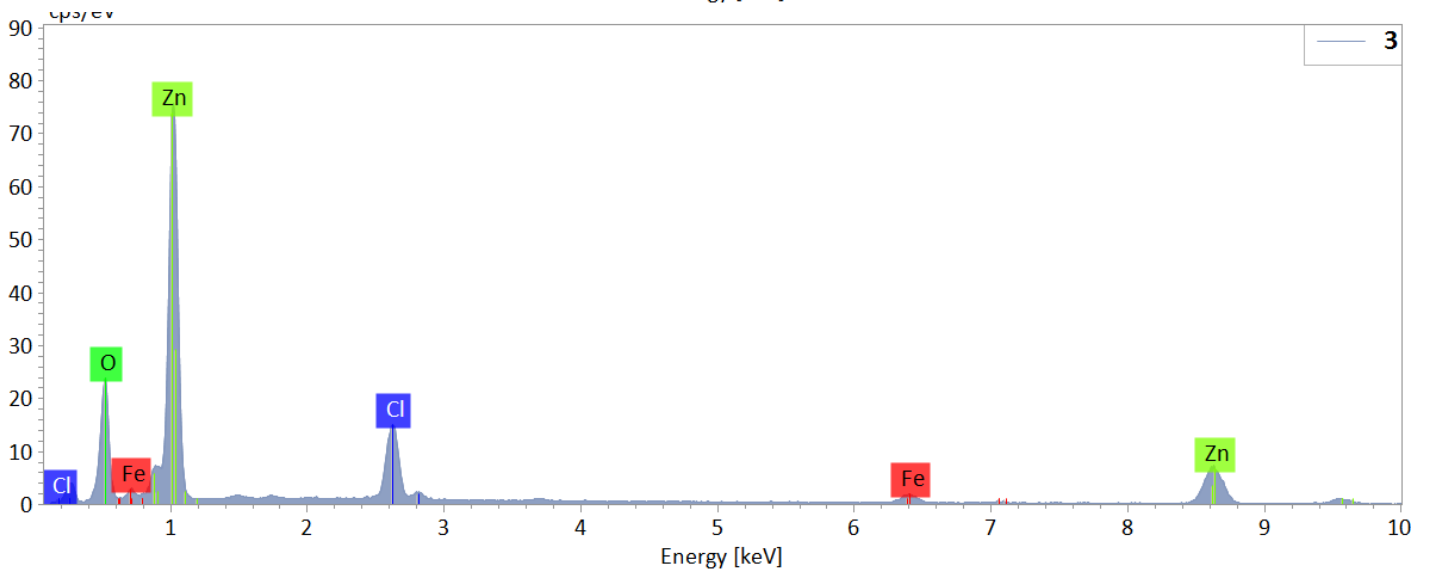
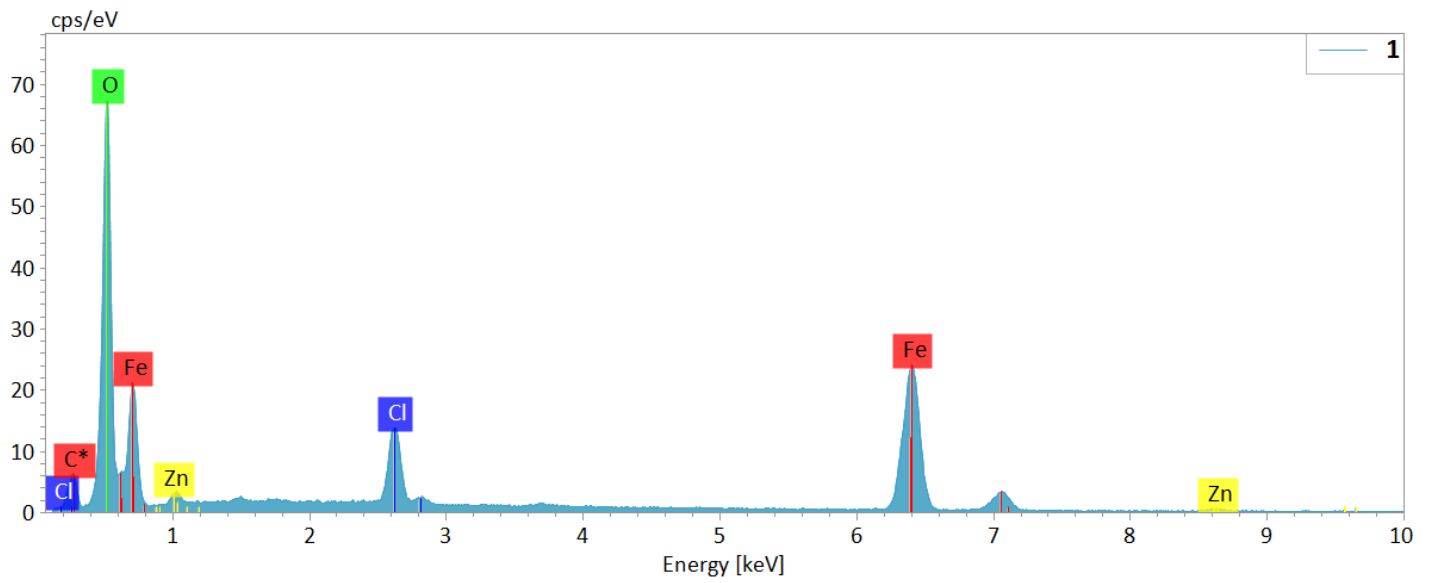
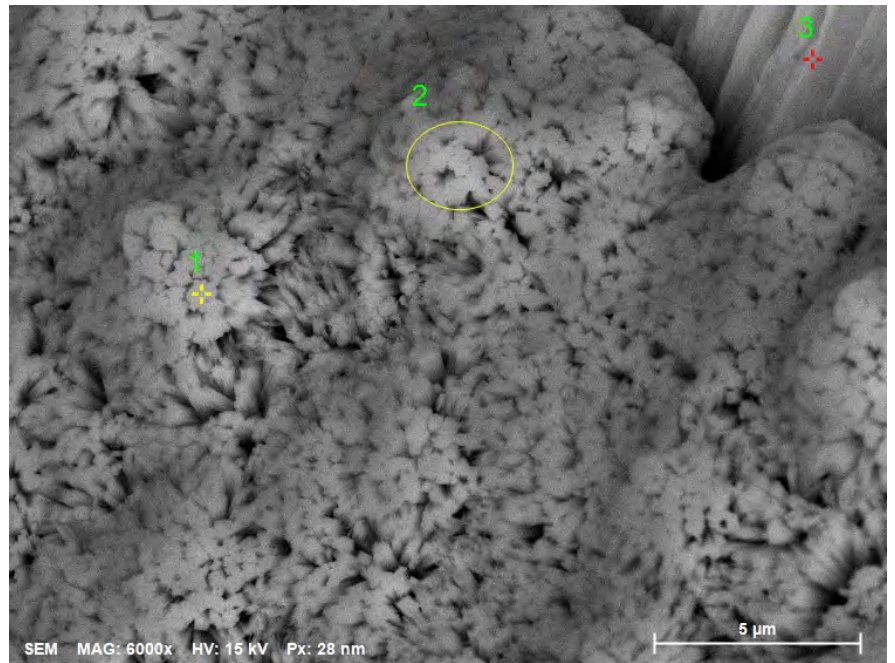
B-Aa-4-07b



Atomic concentration [%]

Spectrum	C	O	Al	Cl	Fe	Zn
1	27,8	41,6		7,3		23,3
2	16,2	37,0		10,7	0,6	35,5
3	18,8	20,3	1,0		1,6	58,3

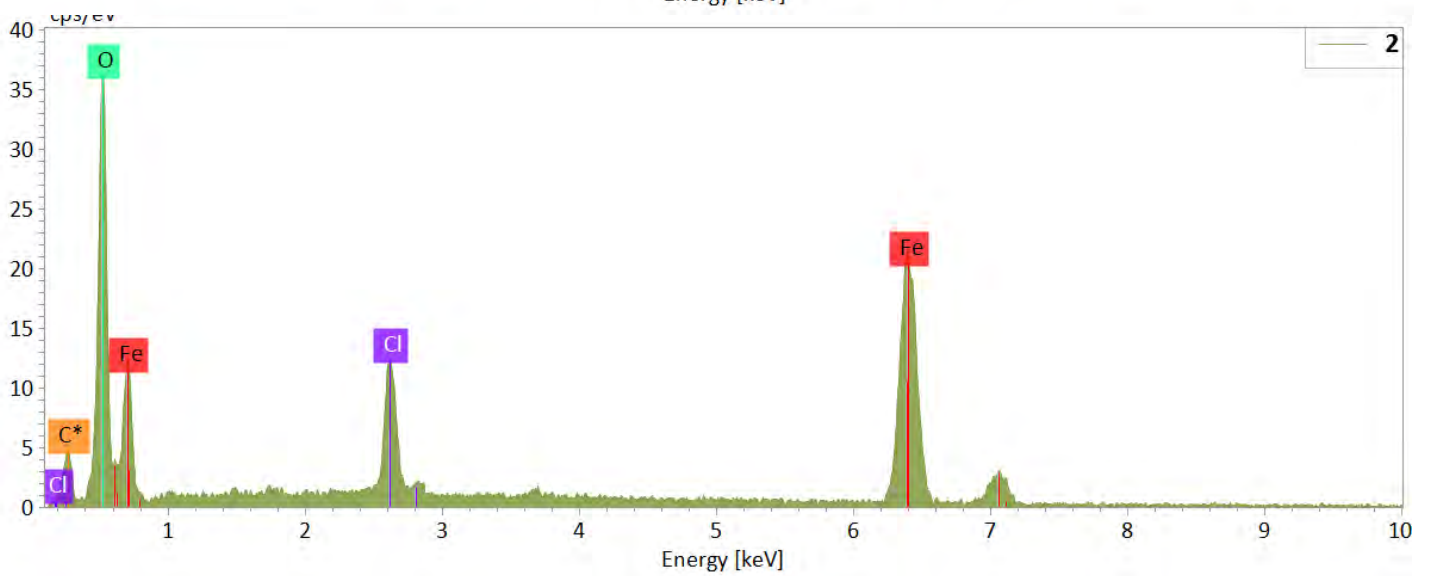
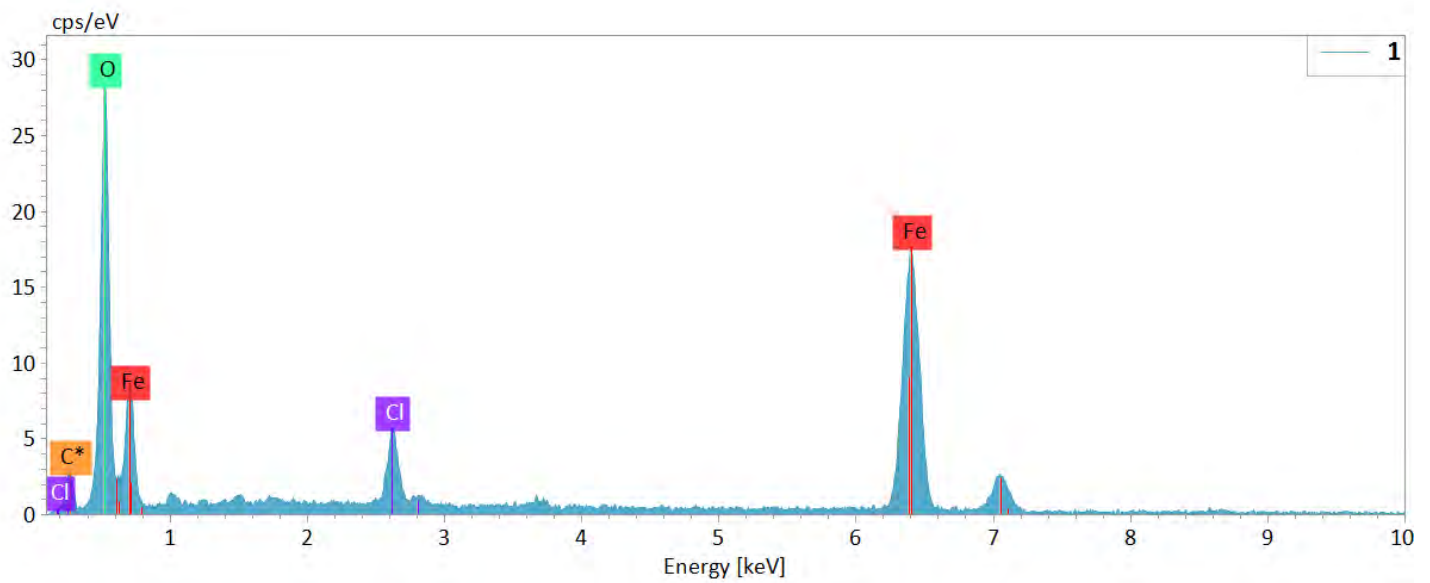
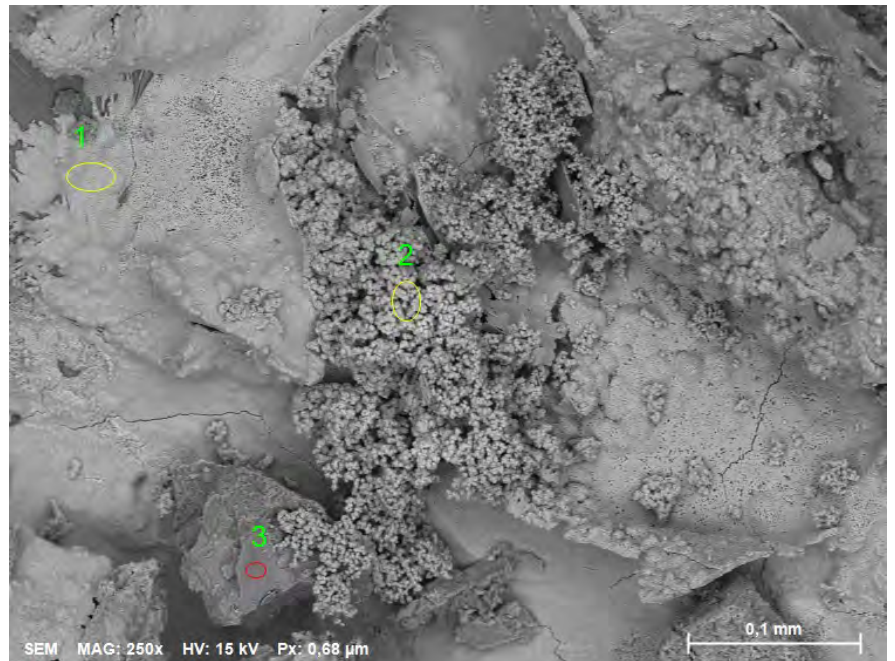
B-Aa-4-07c



Atomic concentration [%]

Spectrum	C	O	Na	Cl	Ca	Fe	Zn
1	12,6	56,8		3,6		26,0	0,9
2	13,1	58,4		3,4	0,3	23,9	0,9
3		42,8	8,7	9,5		3,0	35,9

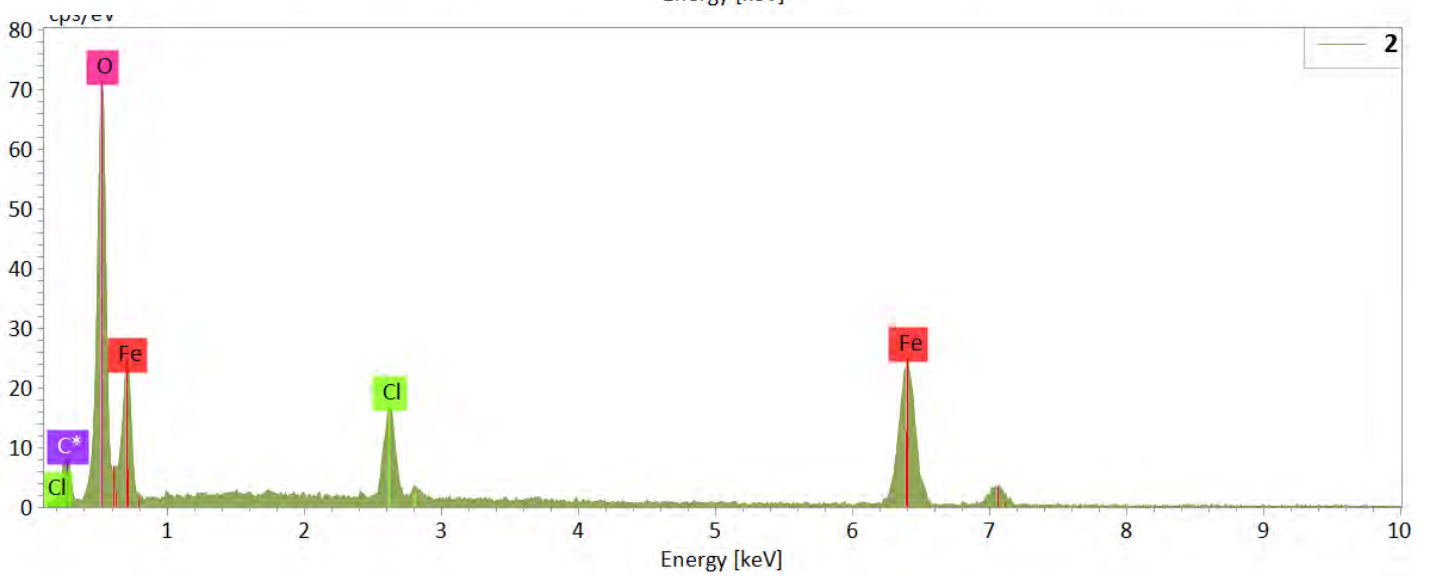
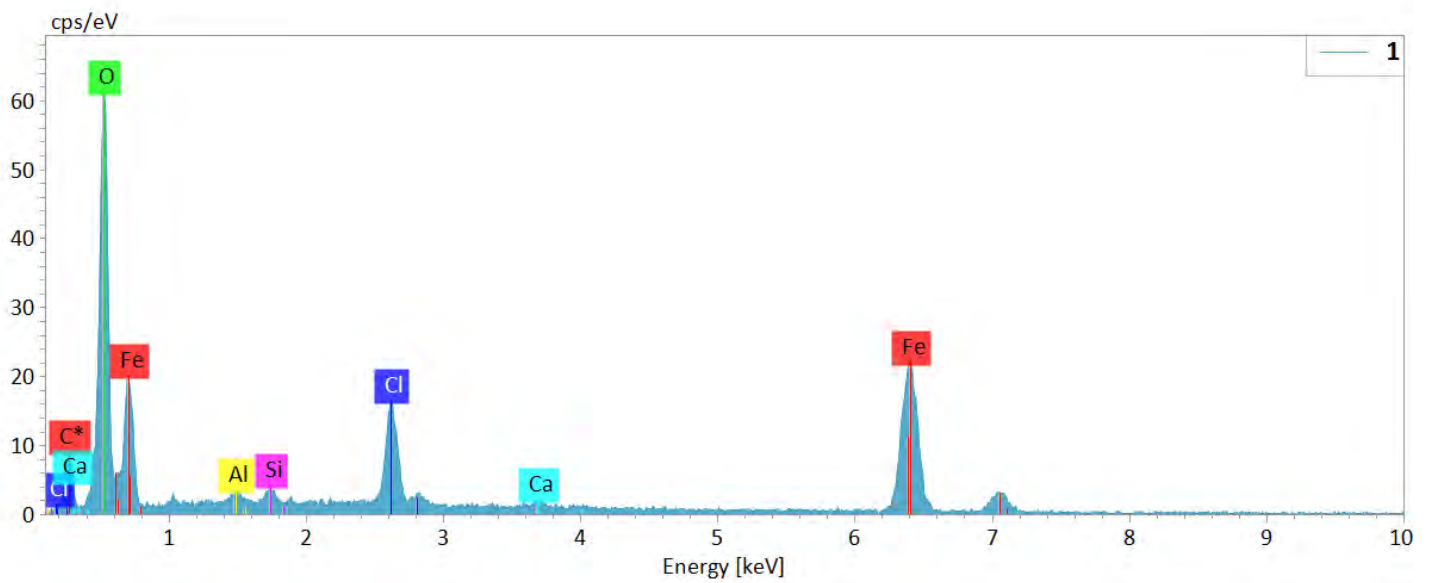
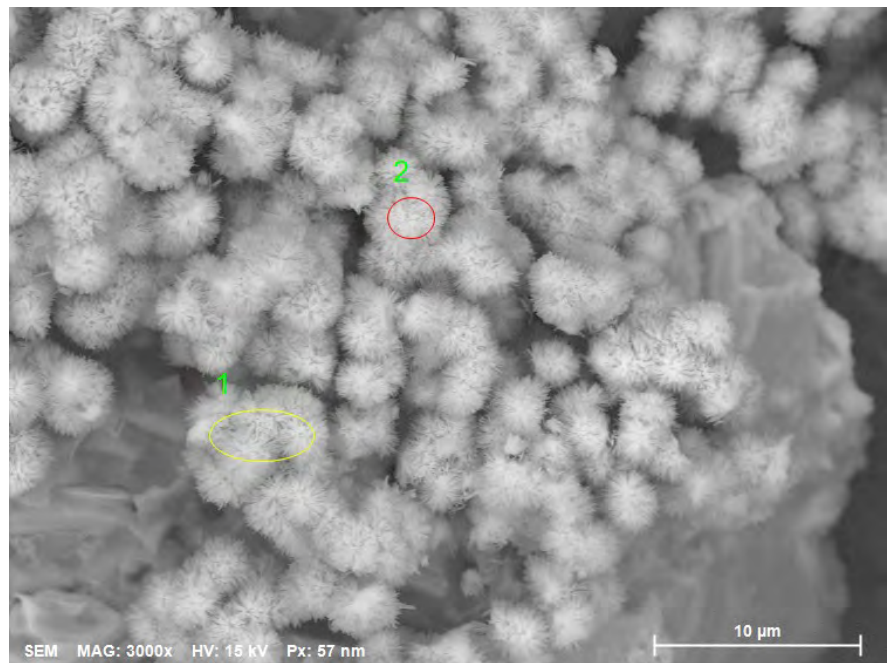
B-Aa-4-09



Atomic concentration [%]

Spectrum	C	O	Na	Mg	Al	Si	Cl	Ca	Fe
1	9,6	47,4					4,7		38,3
2	12,8	47,4					6,0		33,8
3	13,0	54,8	1,0	4,1	5,6	13,4		3,3	4,8

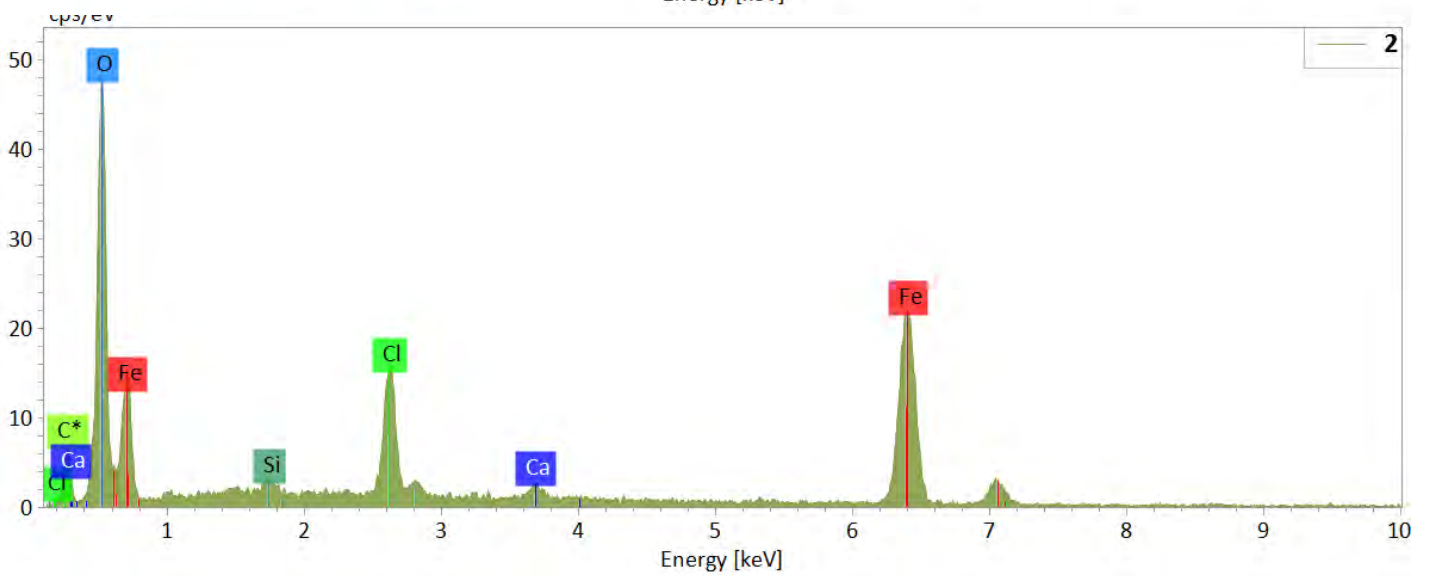
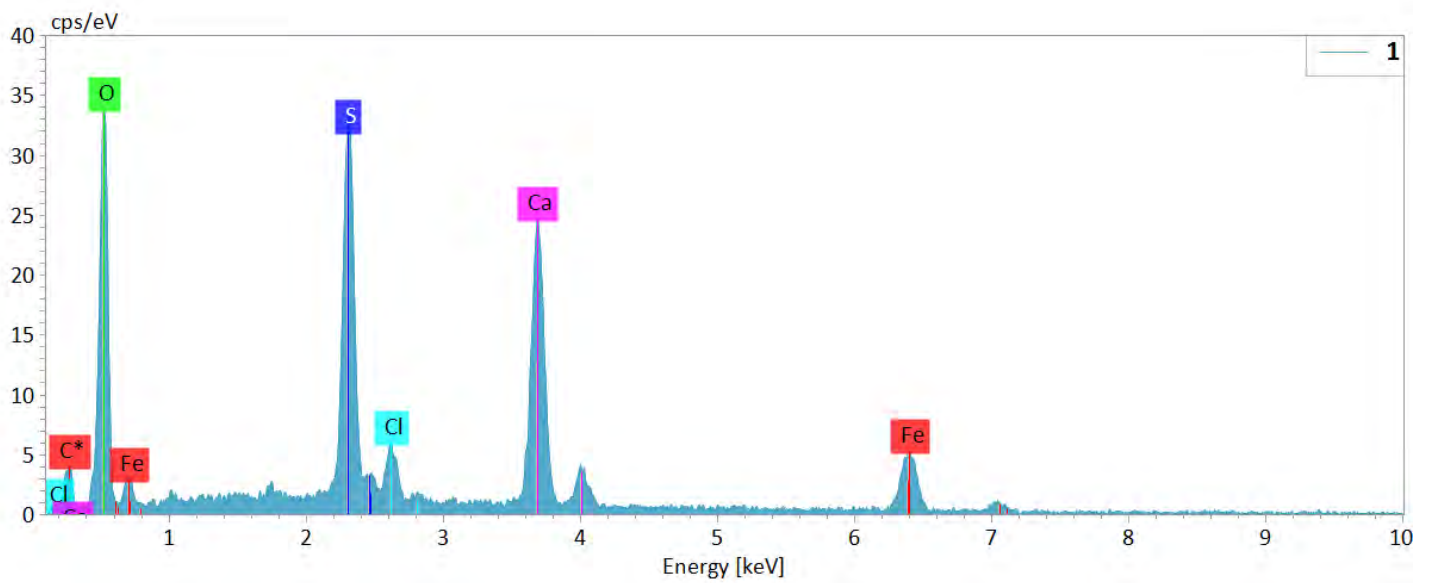
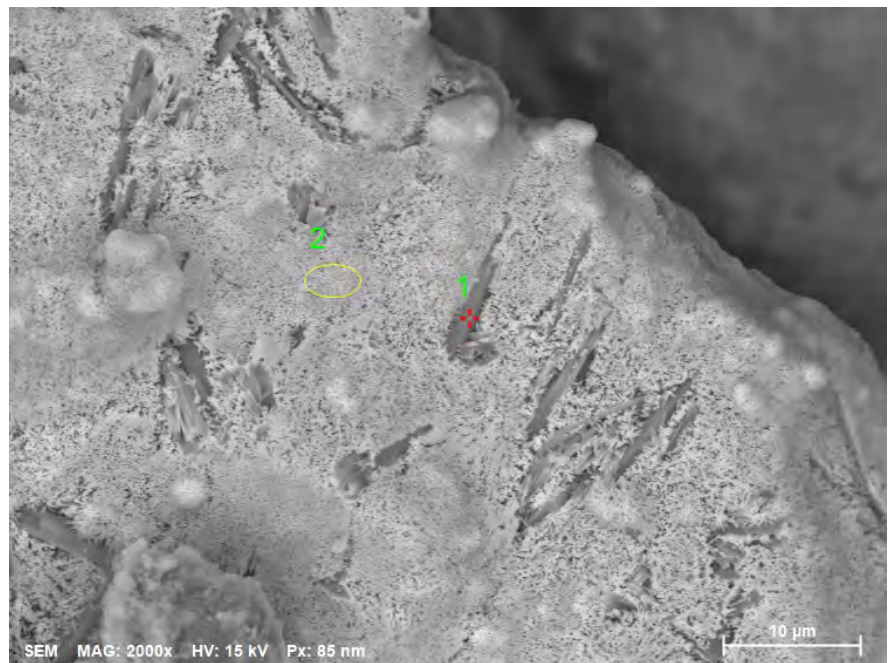
B-Aa-4-09b



Atomic concentration [%]

Spectrum	C	O	Al	Si	Cl	Ca	Fe
1	18,2	54,0	0,4	0,6	4,0	0,4	22,4
2	14,5	56,9			4,2		24,4

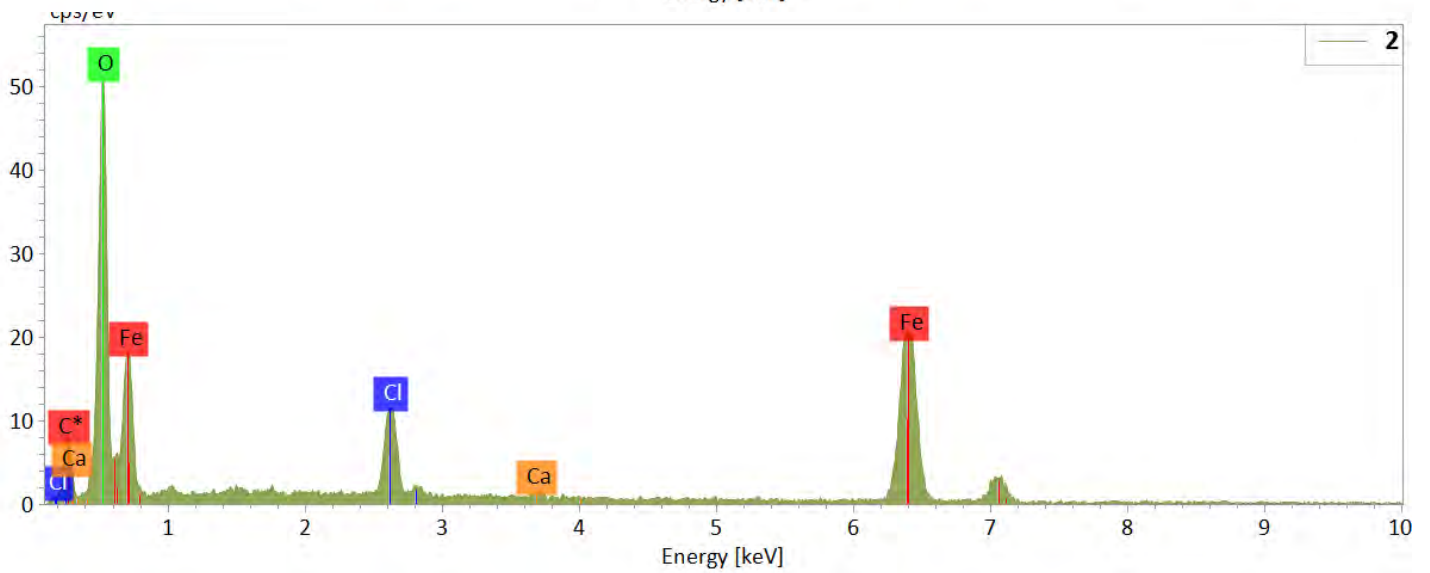
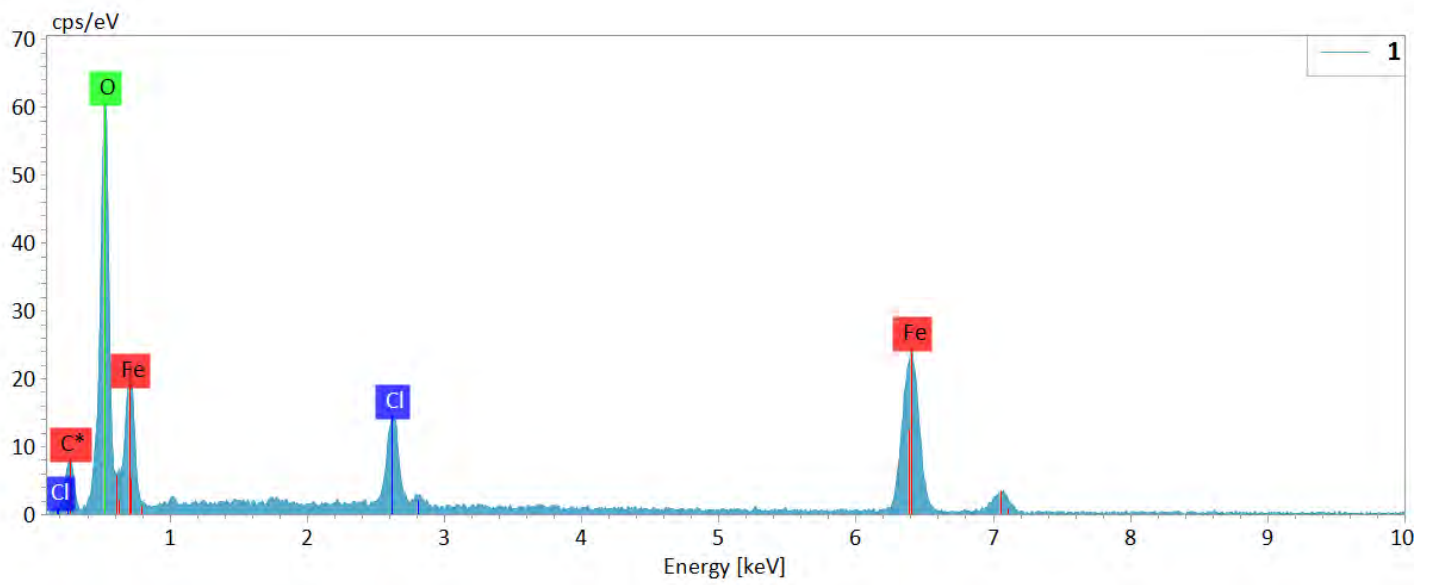
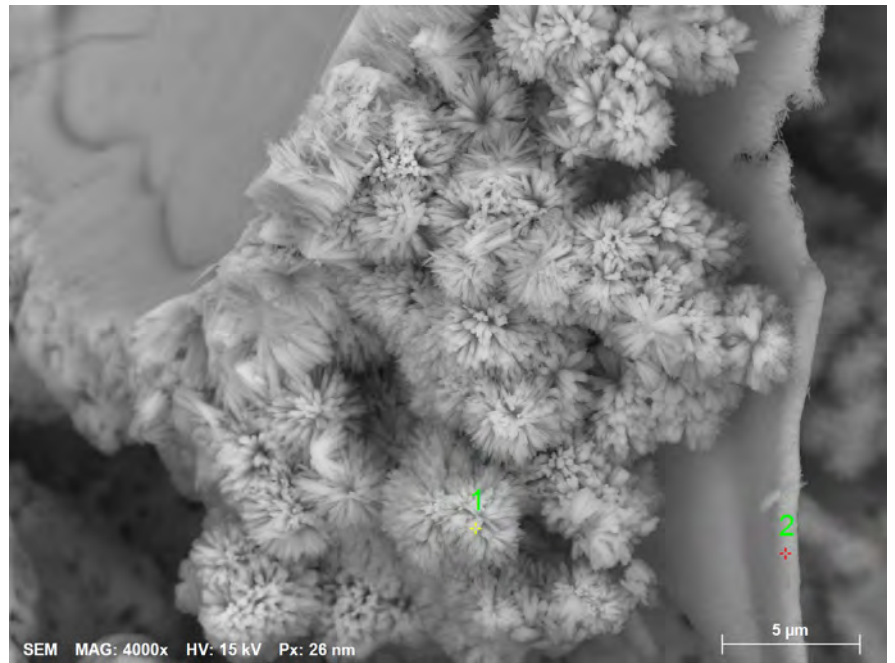
B-Aa-4-10b



Atomic concentration [%]

Spectrum	C	O	Si	S	Cl	Ca	Fe
1	8,9	63,3		9,3	1,4	11,2	5,9
2	15,3	51,7	0,6		5,1	0,8	26,5

B-Aa-4-11



Atomic concentration [%]

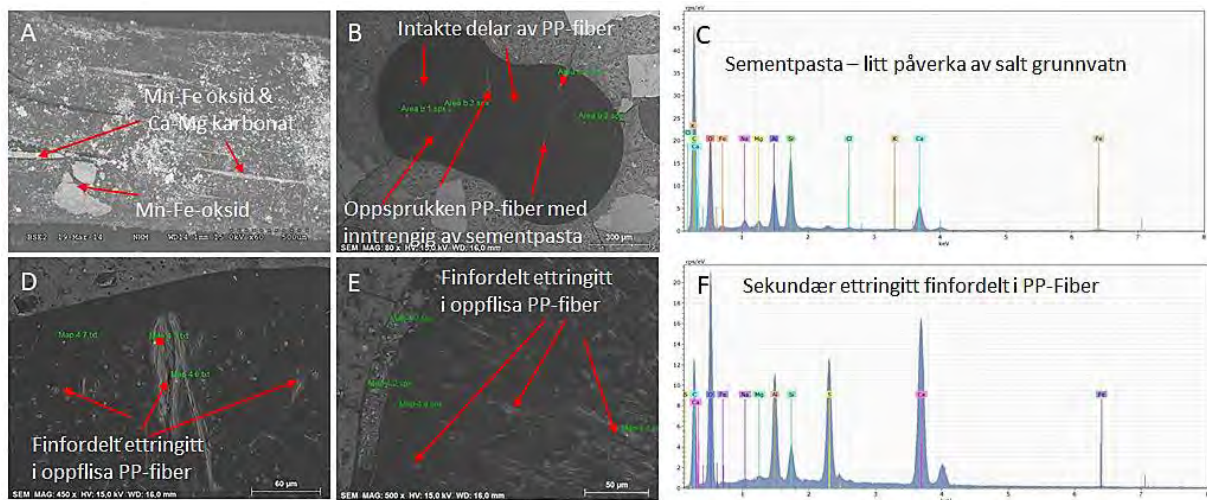
Spectrum	C	O	Cl	Ca	Fe
1	16,4	52,8	4,4		26,4
2	18,8	50,8	4,4	0,2	25,7

Vedlegg 17

Delaminert Masterbuilder polypropylenfiber (svart) med ettringitt

Undersøking av sprøytebetong frå Oslofjord testfelt har vist at ettringitt er felt ut på sprekkar i nokre delaminerte PP-fibrar. Det er også identifisert utfellingar av mangan og jernoksid samt karbonat (Hagelia 2019). Vekst av sekundær ettringitt krev stor plass og har i prinsipp ein sprengande verknad som fører til ekspansjon og skade på betong. Det er muleg at finfordelt ettringitt i stressa PP-fiber kan føre til ytterlegare oppflising av PP-fiber i undersjøisk sprøytebetong. Sekundær ettringitt er i dette tilfelle knytta til sulfatangrep i betongen.

Det er ikkje avklara om delaminering/oppflising med utfellingar (Figur V-17) kan ha innverknad på funksjonsevna til PP-fiberen i det lange løp. Vi har ikkje klart å finne litteratur om mulege effektar av delaminering, og det ser ut til at det meste av faglitteraturen betraktar plastfibrar som meir homogene og utan delaminering. Det er derfor behov for å følgje opp med tynnslipundersøkingar og mekanisk testing på seinare tidspunkt.



Figur V-17. Tilstanden til makro-PP fiber i SEM: A: handplukka fiber frå sprøytebetongoverflata (2014) viser oppflising med utfellingar av Mn-Fe oksid på fiberoverflata og tilsvarande med Ca-Mg karbonat langs interne sjikt i fiberen. B, D og E er av intern fiber i tynnslip som viser ulike grader av oppflising understress internt i sprøytebetongen (prøve T2 M45P i 2020). B: Oppsprukken PP-fiber viser inntrenging av sementpasta på sprekkar. C: EDS spektrum av sementpasta (analyse vist ved raudt punkt i B). D og E: Finfordelt sekundær ettringitt internt i oppflisa PP-fiber. F: EDS spektrum av ettringitt (analyse vist med raudt punkt i D).



Statens vegvesen
Pb. 1010 Nordre Ål
2605 Lillehammer

Tlf: (+47) 22 07 30 00

firmapost@vegvesen.no

ISSN: 1893-1162

vegvesen.no

Tryggere, enklere og grønnere reisehverdag