

Rekvirent:

Stiftinga Musea i Sogn og Fjordane

Avd. Norsk Kvernsteinsenter

NO-6957 Hyllestad

Sag: 181201

Dato: 13. juni 2019

Rapport nr.: R181201

Side 1 af 36

RAPPORT

Projekt:

**Kalkprosjektet i Kvernsteinsparken
Hyllestad**

Prøve(r):

Mørtelprøver (9 stk.)

Undersøgelse(r):

**Tyndslibsanalyse:
■ Mørtelanalyser**

Oplæg.....	side 2
Sammenfatning og vurdering af resultater.....	side 4
Tyndslibsanalyser.....	side 9
Fotodokumentation	side 27


Torben Seir
Geolog, Cand. Scient.


Sara E. Hoffritz
Geolog, Cand. Scient.

SEIR-materialanalyse A/S

H.P. Christensensvej 1, DK-3000, Helsingør

Tel: +45 53 58 93 11

E-mail: tsh@seir-analyse.dk

Oplæg

Rekvirent

Stiftinga Musea i Sogn og Fjordane
Avd. Norsk Kvernsteinsenter
NO-6957 Hyllestad

Kontaktperson: Per Storemyr

Tel: +47 95 330 460

E-mail: per.storemyr@misf.museum.no

Prøvemateriale

Prøvematerialet består av følgende prøver modtaget på laboratoriet den 21. december 2018:

Prøve nr.	Mærket	Prøvetagningssted (oplyst af rekvirenten)	Prøvetype/prøvebeskrivelse	Undersøgelser
P181201-1	Prøve 1	Hyllestad, testprøve fra brenning i juni 2017. Alder: 1,5 år. Helt fersk våtlesket kalk blandet med sand 1:1	Flageformet stykke af lysegrå, grovkornet mørtel. Dimensioner: 7 x 42 x 62 mm	Tyndslibsanalyse
P181201-2	Prøve 2	Hyllestad, testprøve fra brenning i juni 2017. Alder: 1,5 år. Helt fersk våtlesket kalk blandet med grov sand	Ækvidimensionalt stykke lys brungrå, grovkornet mørtel. Dimensioner: 41 x 60 x 86 mm	Tyndslibsanalyse
P181201-3	Prøve 3	Hyllestad, ad-hoc mørtel fra spekking av kalkovnen juni 2016. Alder: 1,5 år. Helt fersk våtlesket kalk blandet med grov sand	Flageformet stykke lysegrå, let brunlig, grovkornet mørtel Dimensioner: 39 x 65 x 71 mm	Tyndslibsanalyse
P181201-4	Prøve 4	Hyllestad, spekkemørtel testet på Selja kloster i september 2018. Alder: 3 mnd. Hotmix, i blandingsforhold ca. 1:2,5 (brentkalk:sand)	Aflangt stykke lys hvidgrå, let brunlig, finkornet mørtel. Dimensioner: 11 x 15 x 30 mm	Tyndslibsanalyse
P181201-5	Prøve 5	Selja, sakristi, nordsiden, pussmørtel. Alder: 1200-t. Gotisk mørtel med mye skjell	Flageformet stykke af hvidgrå, let brunlig (cremefarvet), grovkornet mørtel (puds). Dimensioner: 4-23 x 52 x 75 mm	Tyndslibsanalyse
P181201-6	Prøve 6	Selja, sakristi, østveggen, fugemørtel. Alder: 1200-t. Gotisk mørtel med mye skjell	Ækvidimensional stykke af hvidgrå, let brunlig (cremefarvet), grovkornet mørtel. Dimensioner: 54 x 50 x 65 mm	Tyndslibsanalyse
P181201-7	Prøve 7	Langøya ved Holmestrand, testmørtel fra brenning ca. 2000. Alder: ca. 18 år. Trolig helt fersk våtlesket kalk blandet med sand 1:1	Flageformet stykke hvidgrå, grovkornet mørtel. Dimensioner: 24 x 51 x 86 mm	Tyndslibsanalyse
P181201-8	Prøve 8	Hamar bispeborg. Alder: 1200-t. Trolig fra murkjerne	Ækvidimensional stykke af hvid, svagt brunlig, grovkornet mørtel. Dimensioner: 45 x 90 x 100 mm	Tyndslibsanalyse
P181201-9	Prøve 9	Frederiksberg festning, Bergen, nordveggen. Alder: ca. 1700. Prøve fra murkjerne	Ækvidimensional stykke af hvidgrå, let brunlig (cremefarvet), grovkornet mørtel. Dimensioner: 48 x 60 x 72 mm	Tyndslibsanalyse

Skema 1: Beskrivelse og registrering af prøvematerialet

Undersøgelser

Der er fremstillet og analyseret tyndslib af alle prøver. Analysen omfatter for hver prøve:

- Beskrivelse af prøvens opbygning
- Beskrivelse af mørtlens bestanddele
- Bestemmelse af mørtlens sammensætning; det vil sige bestemmelse af mængden af henholdsvis tilslag, bindemiddel og luft. Bestemmelserne er udført ved punkttælling
- Vurdering af bindemiddeltype (mørteltype)
- Vurdering af omdannelses- og nedbrydningstegn.

Resultater

Resultaterne af undersøgelsen fremgår af afsnittet: *Tyndslibsanalyser*. Resultaterne er endvidere sammenfattet og uddybende vurderet i afsnittet: *Sammenfatning og vurdering*. Fotos fra tyndslibsanalyserne er bragt under afsnittet: *Fotodokumentation*.

Forbehold

De anførte resultater er alene baseret på materialerne i de undersøgte prøver og gælder kun for de pågældende objekter/materialer som helhed, i den udstrækning de undersøgte prøver er repræsentative.

Sammenfatning og vurdering af resultater

Der er undersøgt fire mørtelprøver med kalk brændt på Hyllestad (prøve 1 til 4), to prøver af middelaldermørtel fra klosterruinen på Selja (prøve 5 og 6), én mørtelprøve med brændt kalk fra Langøya ved Holmestrand (prøve 7), én prøve af middelaldermørtel fra Hamar bispeborg (prøve 8) og én prøve med 1700-tals mørtel fra Frederiksberg festning i Bergen (prøve 9). Undersøgelsen er udført ved mikroskopisk analyse (tyndslibsanalyse). Resultaterne af tyndslibsanalyserne fremgår af efterfølgende afsnit i rapporten. I nærværende afsnit er givet en sammenfattende vurdering af resultaterne, herunder en vurdering af blandingsforholdene for de anvendte mørtler. Vurderingen er baseret på resultaterne af udførte punktællinger samt relevante materialeparametre, som ligeledes er vurderet på baggrund af tyndslibsanalyserne.

Prøve mærket: **Prøve 1. Hyllestad, testprøve fra brenning i juni 2017** (Lab nr.: P181201-1)

Prøven omfatter lysegrå, grovkornet mørtel med følgende sammensætning:

Mørtelprøve	Kalkmørtel
Bindemiddel:	Kalk (svagt hydraulisk)
Tilslag:	Naturligt sand med største kornstørrelse omkring 3 mm
Blandingsforhold:	Som 1 rummål læsket kalk til 1 rummål sand
Luftindhold:	17 vol%

Prøve mærket: **Prøve 2. Hyllestad, testprøve fra brenning i juni 2017** (Lab nr.: P181201-2)

Prøven omfatter lys brungrå, grovkornet mørtel med følgende sammensætning:

Mørtelprøve	Kalkmørtel
Bindemiddel:	Kalk (svagt hydraulisk)
Tilslag:	Naturligt sand/grus med største kornstørrelse omkring 8 mm
Blandingsforhold:	Som 3 rummål læsket kalk til 1 rummål sand/grus
Luftindhold:	2 vol%

Prøve mærket: **Prøve 3. Hyllestad, ad-hoc mørtel fra spekking av kalkovnen juni 2016** (Lab nr.: P181201-3)

Prøven omfatter lysegrå, let brunlig, grovkornet mørtel med følgende sammensætning:

Mørtelprøve	Kalkmørtel
Bindemiddel:	Kalk (svagt hydraulisk)
Tilslag:	Naturligt sand/grus med største kornstørrelse omkring 20 mm
Blandingsforhold:	Som 1 rummål læsket kalk til 1 rummål sand/grus
Luftindhold:	3 vol%

Supplerende vurderinger – prøve 1, 2 og 3

Bedømt ud fra de undersøgte prøver er den til mørtlerne anvendte kalk fremstillet ved brænding af metamorf kalksten (marmor) med silikatholdige urenheder, hvoraf der ved tyndslibsanalyserne er identificeret kvarts, feldspat (plagioklas), lys glimmer, amfibol og pyroxen samt omdannede rester af et nåleformet mineral af ubestemt type. Kvarts vurderes at være det dominerende silikatmineral.

Kalkbrændingen vurderes at være sket ved en relativt lav temperatur i alle prøver, hvilket har givet sig udslag i et stedvist højt indhold af underbrændt kalksten, som kun delvist er omdannet til brændt kalk. De underbrændte kalkstensrester udgør 8-15 vol% af bindemidlet i prøve 2 og 3. Der er ikke observeret underbrændt kalksten i prøve 1, hvilket kan indikere at brændingstemperaturen har været lidt højere i denne prøve. Den lave brændingstemperatur vurderes ligeledes at være ansvarlig for, at kalken efter læskningen har haft et meget højt indhold af udispergerede kalkklumper på mellem 22 og 43 vol% af bindemidlet.

Ved brændingen er de silikatholdige mineraler i kalkstenen helt eller delvist omdannet til hydrauliske mineraler. På baggrund af mængden og arten af de hydrauliske mineraler vurderes kalken at have haft styrkemæssige egenskaber svarende til en moderne hydraulisk kalk som NHL 2 efter EN 459-1¹⁾.

Bindemidlet (kalken) er fuldt carbonatiseret, det vil sige omdannet fra kalkhydrat til calciumcarbonat i prøve 1. I prøve 2 og 3 er bindemidlet kun carbonatiseret til en dybde af 5-15 mm målt fra prøvernes omgivende flader.

Prøve mærket: **Prøve 4. Hyllestad, spekkemørtel testet på Selja kloster i september 2018** (Lab nr.: P181201-4)

Prøven omfatter hvidgrå, let brunlig, finkornet mørtel med følgende sammensætning:

Mørtelprøve	Kalkmørtel
Bindemiddel:	Kalk (svagt hydraulisk)
Tilslag:	Naturligt sand med største kornstørrelse omkring 2 mm
Blandingsforhold:	Som 1 rummål læsket kalk til 1,5 rummål sand
Luftindhold:	9 vol%

Supplerende vurderinger – prøve 4

Der vurderes at være anvendt samme kalktype til kalkbrændingen i prøve 4, som til mørtlerne i prøve 1 til 3. Kalken bærer dog præg af at være i en væsentligt renere kvalitet med relativt lavt indhold af udispergerede kalkklumper og rester af underbrændt kalksten.

Kalkbrændingen vurderes at være sket ved samme relativt lave temperatur som i prøve 1 til 3 og kalken vurderes at have haft samme styrkemæssige egenskaber svarende til en moderne hydraulisk kalk som NHL 2 efter EN 459-1.

Bindemidlet (kalken) er ikke carbonatiseret i den undersøgte prøve.

¹ EN standard: Byggekalk – Del 1: Definitioner, specifikationer og overensstemmelseskriterier

Prøve mærket: **Prøve 5. Selja, sakristi, nordsiden, pussmørtel (1200-t)**
(Lab nr.: P181201-5)

Prøven omfatter hvidgrå, let brunlig (cremefarvet), grovkornet mørtel med følgende sammensætning:

Mørtelprøve	Kalkmørtel
Bindemiddel:	Kalk (svagt hydraulisk)
Tilslag:	Naturligt sand/grus med meget højt indhold af marine kalkskaller. Største kornstørrelse/skalstørrelse er omkring 12 mm
Blandingsforhold:	Som 2 rummål læsket kalk til 1 rummål sand/kalkskaller
Luftindhold:	3 vol%

Prøve mærket: **Prøve 6. Selja, sakristi, østveggen, fugemørtel (1200-t)**
(Lab nr.: P181201-6)

Prøven omfatter hvidgrå, let brunlig (cremefarvet), grovkornet mørtel med følgende sammensætning:

Mørtelprøve	Kalkmørtel
Bindemiddel:	Kalk (svagt hydraulisk)
Tilslag:	Naturligt sand/grus med meget højt indhold af marine kalkskaller. Største kornstørrelse/skalstørrelse er omkring 5 mm
Blandingsforhold:	Som 1 rummål læsket kalk til 1 rummål sand/kalkskaller
Luftindhold:	7 vol%

Supplerende vurderinger – prøve 5 og 6

Mørtlerne fremstår i begge prøver kraftigt omdannede med udludede partier og kalkudfældninger.

Bedømt ud fra de undersøgte prøver har den anvendte kalk været fremstillet ved brænding af let uren, metamorf kalksten (marmor). Urenhederne optræder i form af silikatminerale, hvoraf det kun har været muligt at identificere kvarts og pyroxen.

Kalkbrændingen vurderes at være sket ved en meget høj temperatur i prøve 6 og muligvis også i prøve 5. Ved brændingen er silikatholdige mineraler i kalkstenen helt eller delvist omdannet til hydrauliske mineraler, stedvis i form af cementklinker-mineralerne alit (C_3S) og ferrit (C_4AF), hvor alit normalt kun findes i portlandcement. På baggrund af mængden og arten af de hydrauliske mineraler vurderes kalken at have haft styrkemæssige egenskaber svarende til en moderne hydraulisk kalk som NHL 3,5 efter EN 459-1.

Bindemidlet (kalken) er fuldt carbonatiseret i begge prøver. I prøve 5 udviser feldspatkorn i tilslaget tegn på kraftig omdannelse/opløsning, som er forårsaget af, at tilslaget før carbonatiseringen har været i kontakt med stærkt basisk kalkhydrat ($Ca(OH)_2$) gennem meget lang tid. Omdannelsen kan karakteriseres som en langvarig pozzolan-reaktion. Frigivne stoffer fra feldspatkornene vurderes at have bidraget til mørtlernes nuværende høje styrke.

Prøve mærket: **Prøve 7. Langøya ved Holmestrand, testmørtel fra brenning ca. 2000** (Lab nr.: P181201-7)

Prøven omfatter hvidgrå, grovkornet mørtel med følgende sammensætning:

Mørtelprøve	Kalkmørtel
Bindemiddel:	Kalk (moderat hydraulisk)
Tilslag:	Naturligt sand med største kornstørrelse omkring 3 mm
Blandingsforhold:	Som 1 rummål læsket kalk til 1 rummål sand
Luftindhold:	13 vol%

Supplerende vurderinger – prøve 7

Den anvendte kalk er fremstillet ved brænding af kalksten af sedimentær oprindelse. At dømme ud fra sammensætningen og bevarede strukturer i bindemiddel-klumper kan kalkstenen stamme fra kalkstensforekomsterne på Langøya. Kalkstenen har indeholdt en del urenheder i form af ler, finfordelt kisel og finkornet silt/sand. En del af urenhederne optræder i form af skiferlignende lag.

Kalkbrændingen vurderes at være sket ved uensartet, stedvis relativt høj temperatur, hvorved de ler- og kiselholdige mineraler, inkl. siltkornene af kvarts og feldspat, helt eller delvist er omdannet til hydrauliske mineraler, stedvis i form af cementklinker-mineralerne belit (C_2S) og ferrit (C_4AF). Skiferlignende korn med sedimentære strukturer er dog også observeret, hvilket indikerer at temperaturen har været relativt lav i dele af ovnen. På baggrund af mængden og arten af de hydrauliske mineraler vurderes kalken at have haft styrkemæssige egenskaber svarende til en moderne hydraulisk kalk som NHL 3,5 efter EN 459-1.

Bindemidlet er fuldt carbonatiseret i den undersøgte prøve.

Prøve mærket: **Prøve 8. Hamar bispeborg (1200-t)** (Lab nr.: P181201-8)

Prøven omfatter hvid, svagt brunlig, grovkornet mørtel med følgende sammensætning:

Mørtelprøve	Kalkmørtel
Bindemiddel:	Kalk (svagt hydraulisk)
Tilslag:	Naturligt sand/grus med største kornstørrelse omkring 8 mm
Blandingsforhold:	Som 5 rummål læsket kalk til 1 rummål sand
Luftindhold:	5 vol%

Supplerende vurderinger – prøve 8

Kalken er fremstillet ved brænding af kalksten af sedimentær oprindelse, formentligt fra lokalområdet. Kalkstenen har haft et indhold af urenheder i form af ler og finkornet silt/sand. Urenhederne er ved brændingen helt eller delvist omdannet til hydrauliske mineraler. Brændingen vurderes at være sket ved en relativt lav temperatur. På baggrund af mængden og arten af de hydrauliske mineraler vurderes kalken at have haft styrkemæssige egenskaber svarende til en moderne hydraulisk kalk som NHL 2 efter EN 459-1.

Bindemidlet er ufuldstændigt carbonatiseret i den undersøgte prøve.

Prøve mærket: **Prøve 9. Frederiksberg festning, Bergen, nordveggen (1700-t)**
(Lab nr.: P181201-9)

Prøven omfatter hvidgrå, svagt brunlig (cremefarvet), grovkornet mørtel med følgende sammensætning:

Mørtelprøve	Kalkmørtel
Bindemiddel:	Kalk (moderat hydraulisk)
Tilslag:	Naturligt sand/grus med største kornstørrelse omkring 8 mm
Blandingsforhold:	Som 2 rummål læsket kalk til 1 rummål sand
Luftindhold:	6 vol%

Supplerende vurderinger – prøve 9

Bedømt ud fra den undersøgte prøver har den anvendte kalk været fremstillet ved brænding af let uren, metamorf kalksten (marmor). Urenhederne optræder i form af silikatminerale, hvoraf der ved tyndslibsanalysen er identificeret kvarts, feldspat (plagioklas) og glimmer samt omdannede rester af et nåleformet mineral af ubestemt type.

Kalkbrændingen vurderes at være sket ved en relativt høj temperatur, hvorved der er dannet velkrySTALLISEREDE krystaller af cementklinker-mineralerne belit (C_2S) og ferrit (C_4AF). På baggrund af mængden og arten af de hydrauliske mineraler vurderes kalken at have haft styrkemæssige egenskaber svarende til en moderne hydraulisk kalk som NHL 3,5 efter EN 459-1.

Bindemidlet (kalken) er kun carbonatiseret op til prøvens kanter og feldspatkorn i tilslaget viser tegn på kraftig omdannelse/opløsning, som er forårsaget af, at tilslaget har været i kontakt med stærkt basisk kalkhydrat ($Ca(OH)_2$) gennem lang tid. Omdannelsen kan karakteriseres som en langvarig pozzolan-reaktion. Frigivne stoffer fra feldspatkornene vurderes at have bidraget til mørtlernes nuværende høje styrke.

Tyndslıbsanalyser

Prøve mærket: **Prøve 1. Hyllestad, testprøve fra brėnning i juni 2017**

(Lab nr.: P181201-1)

Makroskopisk beskrivelse af prøven

Prøven består af et flageformet stykke af lysegrå, grovkornet mørtel af middel styrke. Største kornstørrelse for tilslaget er omkring 3 mm. Derudover ses der mange hvide kalkklumper på op til omkring 5 mm. Mørtelstykkets bund og kanter bærer præg af at være udstøbt mod en form. Mørtelstykkets overside fremstår let forvitret med frilagte (synlige) tilslagskorn. Mørtelstykkets ene kant fremstår som en brudflade.

Mikroskopisk beskrivelse af mørtlen set i tyndslıbet

Der er fremstillet og analyseret et tyndslıb, som omfatter et snit gennem mørtelstykket med orientering vinkelret på mørtelstykkets oprindeligt eksponerede overside. Set i tyndslıbet kan der udskilles følgende bestanddele i mørtlen:

Tilslag: 36 vol%

Overvejende kantrundede mineralkorn af kvarts og feldspat samt bjergartskorn af granit og gneiss. Derudover lidt mineralkorn af amfibol og glimmer. Største kornstørrelse i tyndslıbet er 2,0 mm. Enkelte af kornene har brunlige belægninger på overfladen. Tilslaget kan karakteriseres som et grovkornet, naturligt sand.

Bindemiddel: 47 vol%

Meget uensartet, kornet masse af mikrokrySTALLİNSK kalk (calciumcarbonat) med mange korn og klumper af følgende typer:

Klumper af kalk med lavt indhold af urenheder: Hvide, afrundede til kantrundede klumper på op til 3,0 mm af ren mikrokrySTALLİNSK kalk, stedvis med urenheder af bjergartsdannede silikatmineraller i form af op til 0,06 mm store indeslutninger af kvarts og op til 0,1 mm nåleformede rester af et ubestemt mineral. Korngrænser og relikte spalteplaner efter den ved kalkbrėndingen anvendte kalksten/marmor er ofte bevaret og indeholder udbredte udfældninger af calciumhydroxid i form af mineralet portlandit. Klumperne fremstår typisk med en fjeragtig struktur og stedvis anormalt isotrope med lavt indhold af carbonat. Klumperne udgør 38 vol% af bindemidlet.

Delvist omdannede bjergartskorn: Irregulære til kantede korn på op til 2,0 mm bestående af de bjergartsdannende mineraller amfibol, pyroxen, lys glimmer, kvarts og titanit, samt enkelte andre uidentificerbare silikatmineraller. Kornene udviser i varierende grad tegn på brėnding i form af nydannet mikrokrySTALLİNSK kalk, svarende til kalken i det omgivende bindemiddel, og kryptokrySTALLİNSKE kalksilikatmineraller af ubestemt type. Jernholdige mineral-faser er kun observeret i lille mængde. De delvist omdannede bjergartskorn udgør 12 vol% af bindemidlet.

Korn med nydannede kalksilikat-mineraler: Typisk afrundede til kantrundede korn af kvarts på op til 0,3 mm med en omgivende rand af kryptokrystallinske kalksilikat-mineraler af ubestemt type. Derudover en del irregulære korn med luftfyldte glas/slaggelignende faser. Kalksilikat-mineralerne (eksklusiv de underliggende bjergartsdannende silikat-korn) udgør omkring 1 vol% af bindemidlet.

Korn af underbrændt kalksten: Ikke observeret.

Bindemidlet er fuldt carbonatiseret.

Luft: 17 vol%

Mørtlen indeholder meget luft i form af let irregulære til irregulære luftindeslutninger med tværmål op til 1,0 mm. Der ses mange relativt grove svindrevner (*»svinnriss«*).

Omdannelses- og nedbrydningstegn

Der er ikke observeret tegn på anormal omdannelse eller nedbrydning af mørtlen bortset fra forvitring af den oprindeligt eksponerede overflade.

Prøve mærket: **Prøve 2. Hyllestad, testprøve fra brenning i juni 2017**

(Lab nr.: P181201-2)

Makroskopisk beskrivelse af prøven

Prøven består af et ækvidimensionalt stykke af lys brungrå, grovkornet mørtel af høj styrke. Største kornstørrelse for tilslaget er omkring 8 mm. Derudover ses der mange let brunlige kalkklumper på op til omkring 14 mm. Mørtelstykkets underside bærer præg af at være udstøbt mod et plan underlag. Mørtelstykkets kanter og overside fremstår som frie overflader og er dækket af en tynd, svagt brunlig kalkhinde. Mørtelstykkets ene kant fremstår som en skåren flade.

Mikroskopisk beskrivelse af mørtlen set i tyndslibet

Der er fremstillet og analyseret et tyndslib, som omfatter et snit gennem mørtelstykket med orientering vinkelret på mørtelstykkets plane bund. Set i tyndslibet kan der udskilles følgende bestanddele i mørtlen:

Tilslag: 18 vol%

Overvejende kantrundede bjergartskorn af granit og gneiss samt kantede til kantrundede mineral-korn af kvarts og feldspat. Derudover lidt mineralkorn af amfibol og glimmer. Største kornstørrelse i tyndslibet er 5,0 mm. Enkelte af kornene har brunlige belægninger på overfladen. Tilslaget kan karakteriseres som et meget grovkornet, naturligt sand.

Bindemiddel: 80 vol%

Meget uensartet, kornet masse af overvejende kryptokrystallinsk kalk (kalkhydrat) med mange korn og klumper af følgende typer:

Klumper af let uren kalk: Svagt brunlige, afrundede til kantrundede klumper på op til 4,0 mm af overvejende amorf til kryptokrystallinsk kalkhydrat, enkelte steder med urenheder af bjergartsdannede silikat-mineraler i form af op til 0,1 mm store indeslutninger lys glimmer. Der er endvidere observeret et enkelt korn af titanit. Korngrænser og relikte spalteplaner efter den ved kalkbrændingen anvendte kalksten/marmor er ofte bevaret og indeholder udbredte udfældninger af calciumhydroxid i form af mineralet portlandit. Klumperne fremstår typisk med en fjeragtig struktur. Klumperne udgør 43 vol% af bindemidlet.

Delvist omdannede bjergartskorn: Irregulære til kantede, stedvis flageformede korn på op til 0,3 mm bestående af de bjergartsdannende mineraler lys glimmer, kvarts, feldspat (plagioklas), titanit og apatit, samt enkelte andre uidentificerbare silikat-mineraler. Kornene udviser i varierende grad tegn på brænding i form af nydannet mikrokrySTALLİNSK kalk, svarende til kalken i det omgivende bindemiddel, og kryptokrystallİNSKE kalksilikat-mineraler af ubestemt type. Jernholdige mineralfaser er kun observeret i lille mængde. De delvist omdannede bjergartskorn udgør 2 vol% af bindemidlet.

Korn med nydannede kalksilikat-mineraler: Typisk irregulære korn på op til 0,4 mm med luftfyldte glas/slaggelignende faser med overgang til mikrokrySTALLINSKE kalksilikat mineraler af ubestemt type. Kornene udgør mindre end 1 vol% af bindemidlet.

Korn af underbrændt kalksten: Op til 4,5 mm store korn af let brunlig, finkornet marmor med tegn på brænding i form af delvis omdannelse til mikrokrySTALLINSK kalk, svarende til kalken i det omkringliggende bindemiddel, samt i mindre grad tilstedeværelsen af små luftbobler af formentlig kuldioxid. Indeslutninger af de bjergartsdannende mineraler kvarts og lys glimmer er observeret. Kornene udgør 15 vol% af bindemidlet.

Bindemidlet er kun carbonatiseret i de yderste 6-10 mm af mørtlen.

Luft: 2 vol%

Mørtlen indeholder kun lidt luft i form af let irregulære luftindeslutninger med tværmål op til 0,6 mm. Der ses mange grove svindrevner.

Omdannelses- og nedbrydningstegn

Der er ikke observeret tegn på anormal omdannelse eller nedbrydning af mørtlen bortset fra en tynd belægning af kalk på overfladen.

Prøve mærket: **Prøve 3. Hyllestad, ad-hoc mørtel fra spekking av kalkovnen juni 2016** (Lab nr.: P181201-3)

Makroskopisk beskrivelse af prøven

Prøven består af et flageformet stykke af lysegrå, let brunlig, grovkornet mørtel af høj styrke. Største kornstørrelse for tilslaget er omkring 20 mm. Mørtelstykket er omgivet af dels frie overflader, dels af kontaktflader mod formentlig tilgrænsende sten i kalkovnen. Resterende flader er brudflader.

Mikroskopisk beskrivelse af mørtlen set i tyndslibet

Der er fremstillet og analyseret et tyndslib, som omfatter et snit gennem mørtelstykket med orientering vinkelret på mørtelstykkets længste dimensioner. Set i tyndslibet kan der udskilles følgende bestanddele i mørtlen:

Tilslag: 45 vol%

Overvejende kantede til kantrundede bjergartskorn af granit og gneiss samt kantede til kantrundede mineralkorn af kvarts og feldspat. Derudover lidt mineralkorn af amfibol og glimmer. Største kornstørrelse i tyndslibet er 6,5 mm. Indholdet af korn tilhørende silt-fraktionerne er relativt højt. Siltrige klumper med højt indhold af okker forekommer. Enkelte af kornene har brunlige belægninger på overfladen. Tilslaget kan karakteriseres som et meget grovkornet, naturligt sand.

Bindemiddel: 52 vol%

Meget uensartet, kornet masse af overvejende kryptokrystallinsk kalk (kalkhydrat) med mange korn og klumper af følgende typer:

Klumper af let uren kalk: Hvide til svagt brunlige, afrundede til kantrundede klumper på op til 0,7 mm af dels krypto- til mikrokrySTALLinsk kalkhydrat (calciumhydroxid), dels mikrokrySTALLinsk calciumcarbonat. Calciumcarbonaten optræder ofte som relativt store krystaller på om 0,05 mm og kalkklumperne har her en intern, fjeragtig struktur. Korngrænser og relikte spalteplaner efter den ved kalkbrændingen anvendte kalksten/marmor er observeret og indeholder udbredte udfældninger af calciumhydroxid-mineralet portlandit. Klumperne udgør 22 vol% af bindemidlet.

Delvist omdannede bjergartskorn: Irregulære til kantrundede, stedvis flageformede korn på op til 0,2 mm bestående af de bjergartsdannende mineraler lys glimmer, kvarts, feldspat (plagioklas), pyroxen og zirkon, samt enkelte andre uidentificerbare silikat-mineraler. Kornene udviser i varierende grad tegn på brænding i form af nydannet mikrokrySTALLinsk kalk, svarende til kalken i det omgivende bindemiddel, samt kryptokrystallinske kalksilikat-mineraler af ubestemt type. Jernholdige mineralfaser er kun observeret i lille mængde. De delvist omdannede bjergartskorn udgør omkring 1 vol% af bindemidlet.

Korn med nydannede kalksilikat-mineraler: Typisk irregulære korn på op til 1,0 mm med luftfyldte glas/slaggelignende faser med overgang til mikrokrySTALLinske kalksilikat-mineraler af ubestemt type. Kornene udgør omkring 1 vol% af bindemidlet.

Korn af underbrændt kalksten: Op til 0,7 mm store korn af let brunlig, finkornet marmor med tegn på brænding i form af tilstedeværelsen af små luftbobler af formentlig kuldioxid, samt i mindre grad delvis omdannelse til mikrokrySTALLİNSK kalk, svarende til kalken i det omkringliggende bindemiddel. Små nåleformede indeslutninger af et silikatmineral af ubestemt type er observeret. Kornene udgør 8 vol% af bindemidlet.

Bindemidlet er kun carbonatiseret i de yderste 5-15 mm af mørtlen.

Luft: 3 vol%

Mørtlen indeholder kun lidt luft i form af let irregulære luftindeslutninger med tværmål op til 0,6 mm. Der ses mange grove svindrevner med revnevidde op til 0,07 mm, stedvis med udfældninger af op til 0,1 mm store krystaller af calciumhydroxid-mineralet portlandit.

Omdannelses- og nedbrydningstegn

Der er ikke observeret tegn på anormal omdannelse eller nedbrydning af mørtlen bortset fra tynde belægninger af kalk på de frie overflader.

Prøve mærket: **Prøve 4. Hyllestad, spekkemørtel testet på Selja kloster**
i september 2018 (Lab nr.: P181201-4)

Makroskopisk beskrivelse af prøven

Prøven består af et aflangt stykke af hvidgrå, let brunlig, finkornet mørtel af middel styrke. Største kornstørrelse for tilslaget er omkring 2 mm. Mørtelstykket er omgivet af dels frie overflader, dels af formentlig tidligere kontaktflader mod tilgrænsende sten.

Mikroskopisk beskrivelse af mørtlen set i tyndslibet

Der er fremstillet og analyseret et tyndslib, som omfatter et snit gennem mørtelstykket med orientering vinkelret på prøvens længste dimension. Set i tyndslibet kan der udskilles følgende bestanddele i mørtlen:

Tilslag: 49 vol%

Overvejende kantede til kantrundede mineralkorn af kvarts og feldspat samt bjergartskorn af granit og gneiss. Derudover lidt mineralkorn af amfibol og glimmer, samt et enkelt fragment af en marin kalkskal. Største kornstørrelse i tyndslibet er 1,8 mm. Tilslaget kan karakteriseres som et finkornet, naturligt sand.

Bindemiddel: 42 vol%

Ensartet, kryptokrystallinsk masse af altovervejende ucarbonatiseret kalkhydrat med følgende typer korn og klumper:

Klumper af let uren kalk: Hvide, afrundede klumper på op til 0,2 mm af ren, overvejende amorf til kryptokrystallinsk kalkhydrat. En enkelt 1,2 mm stor klump er ikke medtalt ved punkttællingen. Stedvis med urenheder af bjergartsdannede silikat-mineraler i form af op til 0,15 mm store indeslutninger af kvarts. Relikte spalteplaner efter den ved kalkbrændingen anvendte kalksten/marmor er observeret. Klumperne udgør 6 vol% af bindemidlet.

Delvist omdannede bjergartskorn: Irregulære til kantede korn på op til 0,15 mm bestående af de bjergartsdannende mineraler kvarts og lys glimmer, samt enkelte andre uidentificerbare silikat-mineraler. Kornene udviser i varierende grad tegn på brænding i form af en rand af kryptokrystallinske kalksilikat-mineraler af ubestemt type. De delvist omdannede bjergartskorn udgør omkring 1 vol% af bindemidlet.

Korn med nydannede kalksilikat-mineraler: Typisk afrundede til kantrundede korn af kvarts på op til 0,15 mm med en omgivende rand af kryptokrystallinske kalksilikat-mineraler af ubestemt type. Kornene udgør omkring 1 vol% af bindemidlet.

Korn af underbrændt kalksten: Op til 0,6 mm store korn af hvid, finkornet marmor med tegn på brænding i form af tilstedeværelsen af små luftbobler af formentlig kuldioxid, samt i mindre grad delvis omdannelse til mikrokrySTALLİNSK kalk, svarende til kalken i det omkringliggende bindemiddel. Lys glimmer er observeret i et enkelt korn. Kornene udgør 4 vol% af bindemidlet.

Bindemidlet er ikke carbonatiseret. Op til 0,03 mm store krystaller af calciumhydroxid-mineralet portlandit forekommer relativt udbredt i bindemidlet.

Luft: 9 vol%

Mørtlen indeholder noget luft i form af let irregulære luftindeslutninger med tværmål op til 1,0 mm. Der ses mange grove svindrevner med revnevidde op til 0,05 mm.

Omdannelses- og nedbrydningstegn

Der er ikke observeret tegn på anormal omdannelse eller nedbrydning af mørtlen.

Prøve mærket: **Prøve 5. Selja, sakristi, nordsiden, pussmørtel** (Lab nr.: P181201-5)

Makroskopisk beskrivelse af prøven

Prøven består af et flageformet stykke af hvidgrå, let brunlig (cremefarvet), grovkornet mørtel (puds) af høj styrke. Største kornstørrelse for tilslaget, som overvejende består af kalkskaller, er omkring 7 mm. Derudover ses der hvide kalkklumper på op til omkring 5 mm. Mørtelstykkets oprindeligt eksponerede overflade fremstår forvitret og ujævn med gråsort misfarvning og organisk begroning af grå lav. Mørtelstykkets bagside fremstår med svagt brunlige kalkudfældninger og aftryk af en sten fra formentligt pudsens underlag.

Mikroskopisk beskrivelse af mørtlen set i tyndslibet

Der er fremstillet og analyseret et tyndslib, som omfatter et snit gennem mørtelstykket med orientering vinkelret på den oprindeligt eksponerede overflade. Set i tyndslibet kan der udskilles følgende bestanddele i mørtlen:

Tilslag – kalkskaller: 23 vol%

Kantrundede fragmenter af kalkskaller, typisk med ætsninger eller borer fra svampe. Set i mikroskopet er kalkskallerne op til 12 mm store (lange). Stedvis ses brunlige jern-forbindelse (okker) og små indesluttede sandkorn. Tilslaget kan karakteriseres som kalkskaller af marin oprindelse.

Tilslag – naturligt sand: 8 vol%

Overvejende kantede til kantrundede mineralkorn af kvarts og feldspat samt bjergartskorn af granit og gneiss. Derudover lidt mineralkorn af glimmer og amfibol. Største kornstørrelse i tyndslibet er 2,0 mm. Tilslaget kan karakteriseres som et finkornet, naturligt sand (muligvis en naturlig del af de marine kalkskaller).

Bindemiddel: 66 vol%

Meget uensartet, kraftigt omdannet, mikrokrySTALLINSK masse af altovervejende kalk (calciumcarbonat) med korn og klumper af følgende typer:

Klumper af let uren kalk: Hvide, svagt brunlige afrundede til kantrundede klumper på op til 4,0 mm af mikrokrySTALLINSK kalk, stedvis med rester af op til 0,15 mm lange nåleformede korn efter et ubestemt silikatmineral samt stedvis små korn af okker. Klumperne udgør 16 vol% af bindemidlet.

Rester efter fuldt omdannede bjergartskorn: Små kantrundede til irregulære huller på op til 0,6 mm med indhold af lidt amorf kisel efter tidligere silikatholdige bjergartskorn fra kalkstenen eller muligvis korn fra tilslaget. Resterne efter de fuldt omdannede bjergartskorn udgør omkring 1 vol% af bindemidlet.

Korn af underbrændt kalksten: Et enkelt 0,3 mm stort fragment af hvid, finkornet kalksten af ubestemt type/herkomst med tegn på brænding i form af delvis omdannelse til mikrokrySTALLİNSK kalk, svarende til kalken i det omkringliggende bindemiddel, samt tilstedeværelsen af små luftbobler af formentlig kuldioxid. Kornet udgør mindre end 1 vol% af bindemidlet.

Bindemidlet er fuldt carbonatiseret.

Luft: 3 vol%

Mørtlen indeholder lidt luft i form af let irregulære luftindeslutninger med tværmål op til 0,6 mm. Der ses kun få svindrevner.

Omdannelses- og nedbrydningstegn

Det undersøgte mørtelstykke gennemskæres af revner med revnevidde op til 0,15 mm og orientering vinkelret på den oprindeligt eksponerede overflade. I revnerne, og på mørtelstykkets omgivende flader, ses op til 0,8 mm tykke lagdelte kalkudfældninger.

På den oprindeligt eksponerede overflade ses udbredt begroning af lav og alger.

Sandkornene i tilslaget viser omfattende tegn på omdannelse, hvorved mineralet feldspat er blevet mere eller mindre opløst. De mindste feldspatkorn korn er stedvis helt forsvundet efterladende et hul med en amorf, gellignende masse.

Prøve mærket: **Prøve 6. Selja, sakristi, østveggen, fugemørtel** (Lab nr.: P181201-6)

Makroskopisk beskrivelse af prøven

Prøven består af et ækvidimensionalt stykke af hvidgrå, let brunlig (cremefarvet), grovkornet mørtel (fugemørtel) af høj styrke. Største kornstørrelse for tilslaget, som overvejende består af kalkskaller, er omkring 4 mm. Derudover ses der hvide, til svagt brunlige kalkklumper på op til omkring 4 mm. Mørtelstykkets oprindeligt eksponerede overflade fremstår forvitret og ujævn med spredt begroning af grønne alger. Mørtelstykkets bagside fremstår dels som en brudflade, dels med aftryk af en sten fra formentligt underlaget.

Mikroskopisk beskrivelse af mørtlen set i tyndslibet

Der er fremstillet og analyseret et tyndslib, som omfatter et snit gennem mørtelstykket med orientering vinkelret på den oprindeligt eksponerede overflade. Set i tyndslibet kan der udskilles følgende bestanddele i mørtlen:

Tilslag – kalkskaller: 27 vol%

Kantrundede fragmenter af kalkskaller, typisk med ætsninger eller borer fra svampe. Set i mikroskopet er kalkskallerne op til 5 mm store (lange). Stedvis ses brunlige jern-forbindelser (okker) og små indesluttede sandkorn. Tilslaget kan karakteriseres som kalkskaller af marin oprindelse.

Tilslag – naturligt sand: 10 vol%

Overvejende kantede til kantrundede mineralkorn af kvarts og feldspat samt bjergartskorn af glimmerholdig gneiss. Derudover lidt mineralkorn af glimmer og amfibol. Største kornstørrelse i tyndslibet er 3,0 mm. Tilslaget kan karakteriseres som et finkornet, naturligt sand (muligvis en naturlig del af de marine kalkskaller).

Bindemiddel: 56 vol%

Uensartet, mikrokrySTALLinsk masse af altovervejende kalk (calciumcarbonat) med korn og klumper af følgende typer:

Klumper af ren kalk: Hvide, svagt brunlige afrundede til kantrundede klumper på op til 2,2 mm af ren mikrokrySTALLinsk kalk. Klumperne udgør 6 vol% af bindemidlet.

Rester efter fuldt omdannede bjergartskorn: Små kantrundede til irregulære huller på op til 0,2 mm med indhold af lidt amorf kisel efter tidligere silikatholdige bjergartskorn fra kalkstenen eller muligvis korn fra tilslaget. Resterne efter de fuldt omdannede bjergartskorn udgør omkring 1 vol% af bindemidlet.

Delvist omdannede bjergartskorn: Et enkelt kantrundet korn på 0,65 mm bestående af de bjergartsdannende mineraler kvarts og pyroxen med tegn på brænding i form af en rand af kryptokrySTALLinske kalksilikat-mineraler af ubestemt type. Det delvist omdannede bjergartskorn udgør mindre end 1 vol% af bindemidlet.

Korn med nydannede kalksilikat-mineraler: Typisk kantrundede korn af kvarts på op til 0,2 mm med en omgivende rand af amorf kisel samt et enkelt korn med de fuldt hydratiserede rester efter velkrystalliserede krystaller af cementklinker-mineralerne alit (C_3S) og ferrit (C_4AF). Kornene udgør i alt omkring 1 vol% af bindemidlet.

Korn af underbrændt kalksten: Et enkelt 0,3 mm stort fragment af hvid, finkornet kalksten/marmor af metamorf oprindelse med tegn på brænding i form af delvis omdannelse til mikrokrySTALLISK kalk, svarende til kalken i det omkringliggende bindemiddel. Kornet udgør mindre end 1 vol% af bindemidlet.

Bindemidlet er fuldt carbonatiseret.

Luft: 7 vol%

Mørtlen indeholder noget luft i form af let irregulære til irregulære luftindeslutninger med tværmål op til 1,7 mm. Der ses kun få svindrevner.

Omdannelses- og nedbrydningstegn

Det undersøgte mørtelstykke gennemskæres af tidligt dannede revner med revnevidde op til 0,7 mm og dominerende orientering vinkelret på den oprindeligt eksponerede overflade. I revnerne ses stedvis udbredte udfældninger af kalk.

På den oprindeligt eksponerede overflade ses stedvis organisk begroning af alger.

Prøve mærket: **Prøve 7. Langøya ved Holmestrand, testmørtel fra brenning ca. 2000** (Lab nr.: P181201-7)

Makroskopisk beskrivelse af prøven

Prøven består af et flageformet stykke af hvidgrå, grovkornet mørtel af middel styrke. Største kornstørrelse for tilslaget er omkring 3 mm. Mørtelstykkets bund og kanter bærer præg af at være udstøbt mod en form. Mørtelstykkets overside fremstår som en uomdannet fri overflade med et hvidt slør af udfældet kalk. Mørtelstykkets ene kant fremstår som en brudflade.

Mikroskopisk beskrivelse af mørtlen set i tyndslibet

Der er fremstillet og analyseret et tyndslib, som omfatter et snit gennem mørtelstykket med orientering vinkelret på den oprindeligt fri overflade. Der kan udskilles følgende bestanddele i mørtlen:

Tilslag: 40 vol%

Overvejende kantede til kantrundede mineralkorn af kvarts og feldspat samt bjergartskorn af granit og gneiss. Derudover lidt kvartsskifer, mylonit, kvartsit, basalt og syenit samt lidt mineralkorn af amfibol og glimmer. Største kornstørrelse i tyndslibet er 2,2 mm. Tilslaget kan karakteriseres som et finkornet, naturligt sand.

Bindemiddel: 47 vol%

Let uensartet, mikrokrySTALLİNSK masse af kalk med følgende typer korn og klumper:

Klumper af ren kalk: Hvide, stedvist svagt brunlige, afrundede klumper på op til 1,0 mm af ren mikrokrySTALLİNSK kalk. En del klumper indeholder små, delvist omdannede korn af kvarts eller feldspat på op til 0,02 mm. Klumperne udgør 6 vol% af bindemidlet.

Korn af uren kalk og korn med nydannede silikat-mineraler: Kantrundede til irregulære, stedvis flageformede korn på op til 1,4 mm som, udover mikrokrySTALLİNSK kalk, indeholder dels relativt store, svagt omdannede korn med brunlige ler/jern-forbindelser med overgang til velkrySTALLİSERET ferrit (C₄AF) samt amorf kisel med overgang til kalksilikat-mineraler af ubestemt type (CS) og typisk små korn velkrySTALLİSEREDE cementklinker-mineraler med ferrit (C₄AF) og belit (C₂S). Indholdet af sidstnævnte korn med velkrySTALLİSERET belit og ferrit er relativt højt. Kornene optræder stedvis med huller efter oprindeligt fri kalk. De store, svagt omdannede korn indeholder stedvis små omdannede korn af kvarts og feldspat på op til 0,02 mm og optræder stedvis med sedimentære strukturer som lagdeling bevaret. Kornene udgør i alt 6 vol% af bindemidlet.

Bindemidlet er fuldt carbonatiseret.

Luft: 13 vol%

Mørtlen indeholder noget luft i form af let irregulære til irregulære luftindeslutninger med tværmål op til 2,2 mm. Der ses kun få svindrevner.

Omdannelses- og nedbrydningstegn

Der er ikke observeret tegn på anormal omdannelse eller nedbrydning af mørtlen.

Prøve mærket: **Prøve 8. Hamar bispeborg (1200-t)** (Lab nr.: P181201-8)

Makroskopisk beskrivelse

Prøven består af et stort ækvidimensionalt brudstykke af hvid, svagt brunlig, grovkornet mørtel af høj styrke. Største kornstørrelse for tilslaget er omkring 8 mm. Derudover ses der en del hvide kalkklumper på op til 10 mm. Brudstykkets oprindeligt eksponerede overflade fremstår ujævn og gråligt misfarvet. Brudstykkets øvrige flader fremstår som brudflader.

Mikroskopisk beskrivelse af prøven set i tyndslibet

Der er fremstillet et tyndslib, som omfatter et snit gennem mørtelstykket med orientering vinkelret på den oprindeligt eksponerede overflade. Set i tyndslibet kan der udskilles følgende bestanddele i mørtlen:

Tilslag: 12 vol%

Tilslag bestående af overvejende afrundede korn af gråsort sedimentær til lavmetamorf skifer, enkelte bjergartskorn af granit og gneiss samt lidt mineralkorn af kvarts og feldspat. Største kornstørrelse for tilslaget i tyndslibet er 2,2 mm. Tilslaget kan karakteriseres som et grovkornet, naturligt sand.

Bindemiddel: 83 vol%

Uensartet, kryptokrystallinsk til mikrokrySTALLINSK masse af ufuldstændigt carbonatiseret kalk med følgende typer korn og klumper:

Klumper af let uren kalk: Hvide, stedvist let brunlige, kantrundede klumper af overvejende mikrokrySTALLINSK kalk (calciumcarbonat). En stor del af klumperne indeholder stedvis en del urenheder i form af op til 0,1 mm store, delvist omdannede mineralkorn af kvarts. I enkelte korn ses op til 0,1 mm store rombe-formede strukturer, som vurderes at repræsentere relikter efter dolomitkrystaller. En del klumper fremstår anormalt isotrope. Nogle af klumperne indeholder krystaller af calciumhydroxid-mineralet portlandit. Klumperne er op til 4,0 mm store og udgør 27 vol% af bindemidlet.

Korn af uren kalk: Grålige til svagt brunlige, stedvis kantrundede, stedvis flageformede korn på op til 2,9 mm med indhold af brune ler/jern-forbindelser samt amorft til mikrokrySTALLINSK kisel. En meget stor del af kornene indeholder små kantede korn af kvarts og feldspat tilhørende silt/sandfraktionen (største kornstørrelse er 0,1 mm). Sedimentære struktur i form af lagdeling er observeret. Korn af glas/slagge er observeret. Kornene af uren kalksten udgør 5 vol% af bindemidlet.

Korn med underbrændt kalksten: Enkelte op til 1,1 mm store korn af hvid, sedimentær kalksten med tegn på brænding delvis omdannelse til mikrokrySTALLINSK kalk, svarende til kalken i det omkringliggende bindemiddel, samt små luftbobler med formentlig kuldioxid. Kornene udgør mindre end 1 vol% af bindemidlet.

Bindemidlet indeholder enkelte op til 0,1 mm store fragmenter af forkullet træ. Bindemidlet er ufuldstændigt carbonatiseret.

Luft: 5 vol%

Mørtlen indeholder kun lidt luft i form af let irregulære til kugleformede luftindeslutninger (bobler) med tværmål op til 2,1 mm. Der ses nogle svindrevner.

Omdannelses- og nedbrydningstegn

Mørtlen gennemskæres af en enkel grov revne med revnevidde op til 0,5 mm. Revnens uregelmæssige forløb gennem mørtlen indikerer, at den er opstået på et tidspunkt, hvor bindemidlet kun har haft en lav styrke.

Både revner og luftbobler (luftporer) indeholder udbredte udfældninger af op til 0,2 mm store krystaller af calciumcarbonat-mineralet calcit og calciumhydroxid-mineralet portlandit. Krystaller af calcit ses også endvidere sammenblandet med sodpartikler på prøvens oprindeligt eksponerede overflade.

Prøve mærket: **Prøve 9. Frederiksberg festning, Bergen, nordveggen (1700-t)**
(Lab nr.: P181201-9)

Makroskopisk beskrivelse af prøven

Prøven består af et ækvidimensionalt brudstykke af hvidgrå, let brunlig (cremefarvet), grovkornet mørtel (puds) af middel styrke. Største kornstørrelse for tilslaget er omkring 5 mm. Derudover ses der hvide, til svagt brunlige kalkklumper på op til omkring 8 mm. Mørtelstykket er omgivet af dels brudflader, dels af en overflade med brunlige misfarvninger og dels af en skåren snitflade.

Mikroskopisk beskrivelse af mørtlen set i tyndslibet

Der er fremstillet og analyseret et tyndslib, som omfatter et vilkårligt orienteret snit gennem mørtelstykket. Set i tyndslibet kan der udskilles følgende bestanddele i mørtlen:

Tilslag: 21 vol%

Overvejende kantede til kantrundede bjergartskorn af granit og gneiss samt mineralkorn af kvarts og feldspat. Derudover lidt mineralkorn af glimmer og amfibol samt enkelte kalkskaller af marin oprindelse. Største kornstørrelse i tyndslibet er 6,5 mm. Tilslaget kan karakteriseres som et grovkornet, naturligt sand.

Bindemiddel: 73 vol%

Uensartet, kryptokrystallinsk til mikrokrySTALLİNSK masse af ufuldstændigt carbonatiseret kalk med følgende typer korn og klumper:

Klumper af let uren kalk: Hvide, stedvist let brunlige, afrundede til kantrundede klumper af dels ucarbonatiseret kalk (kalkhydrat), dels carbonatiseret kalk (calciumcarbonat). Enkelte af klumperne indeholder urenheder i form af delvist omdannede mineralkorn af kvarts på op til 0,1 samt tynde, nåleformede korn efter formentlig fuldt omdannede silikat-mineraler af ubestemt type på op til 0,15 mm. En stor del af klumperne indeholder krystaller af calciumhydroxid-mineralet portlandit. Klumperne er op til 2,5 mm store og udgør 20 vol% af bindemidlet.

Delvist omdannede bjergartskorn: Irregulære til kantrundede, stedvis flageformede korn på op til 0,8 mm bestående af de bjergartsdannende mineraler kvarts, feldspat (plagioklas) og glimmer. I et enkelt korn er observeret kubiske relikter efter formentlig svovlkis, som er fuldt omdannet til jernoxid og jernhydroxid (okker). Kornene udviser i varierende grad tegn på brænding i form af nydannet krypto- til mikrokrySTALLİNSK kalk, svarende til kalken i det omgivende bindemiddel, samt kryptokrySTALLİNSKE kalksilikat-mineraler af ubestemt type. De delvist omdannede bjergartskorn udgør mindre end 1 vol% af bindemidlet.

Korn med nydannede kalksilikat-mineraler: Kantrundede til irregulære, stedvis flageformede korn på op til 4,0 mm med overvejende kalksilikat-mineraler af ubestemt type (CS) samt stedvis velkrySTALLİSEREDE cementklinker-mineraler som belit (C₂S) og ferrit (C₄AF). Op til 0,3 mm store huller efter formentlig fri kalk er observeret. En stor del af kornene (overvejende de mindste) optræder som fuldt hydratiserede rester efter formentlig tidligere kalksilikat-mineraler. En stor del

ses som tynde, nåleformede aftegninger i bindemidlet. Derudover en er der observeret enkelte irregulære korn med luftfyldte glas/slaggelignende faser. Kornene udgør i alt 4 vol% af bindemidlet.

Korn med underbrændt kalksten: Enkelte op til 0,5 mm store korn af hvid, finkornet kalksten af formentligt metamorf oprindelse (marmor) med tegn på brænding i form af delvis omdannelse til krypto- til mikrokrySTALLINSK kalk, svarende til kalken i det omkringliggende bindemiddel. Små inklusioner af kvarts på op til 0,3 mm er observeret. Kornene udgør mindre end 1 vol% af bindemidlet.

Bindemidlet er kun carbonatiseret langs brudstykkets kanter til en dybde af max. 1,0 mm samt i tilknytning til gennemgående revner.

Luft: 6 vol%

Mørtlen indeholder noget luft i form af let irregulære luftindeslutninger til kugleformede bobler med tværmål op til 3,5 mm. Der ses kun få svindrevner.

Omdannelses- og nedbrydningstegn

Det undersøgte mørtelstykke gennemskæres af enkelte tidligt dannede revner med revnevidde op til 0,2 mm. I revnerne ses stedvis udbredte udfældninger af kalk.

Tilslaget viser omfattende tegn på omdannelse, hvorved mineralet feldspat er blevet mere eller mindre opløst. De mindste feldspatkorn er stedvis helt forsvundet efterladende et hul med en amorf, gellignende masse. Overalt i bindemidlet ses små nåleformede krystaller på op til 0,03 mm, som formentligt repræsenterer omdannelsesprodukter fra omdannelsen af feldspatten i tilslaget.

Fotodokumentation

På efterfølgende sider bringes en serie billeder fra tyndslibene, som kan være taget dels ved brug af digital skanner, dels ved brug af polarisationsmikroskop. Følgende filtre og belysningsteknikker kan være anvendt:

Filtre:	- N	Parallelle polarisationsfiltre (svarende til alm. belysning)
	+ N	Krydsede polarisationsfiltre
	+ G	Krydsede polarisationsfiltre samt gipsblad indskudt i strålegangen
	F	Fluorescensmikroskopi
Belysning:	A	Gennemfaldende lys (refraktionsmikroskopi)
	P	Pålys (refleksionsmikroskopi)
	S	Gennemfaldende lys (skannet)

Hvilken belysningsteknik og hvilket filter, der er anvendt, fremgår af hvert foto.

Det skal bemærkes, at farverne på billederne ikke er naturtro på grund af de anvendte filtre og belysningsteknikker.

Ved fremstillingen af tyndslibene er prøverne omstøbt og imprægneret under vakuum med epoxy tilsat farvestoffet fluorescein. Epoxyen har på billederne en gul farve.

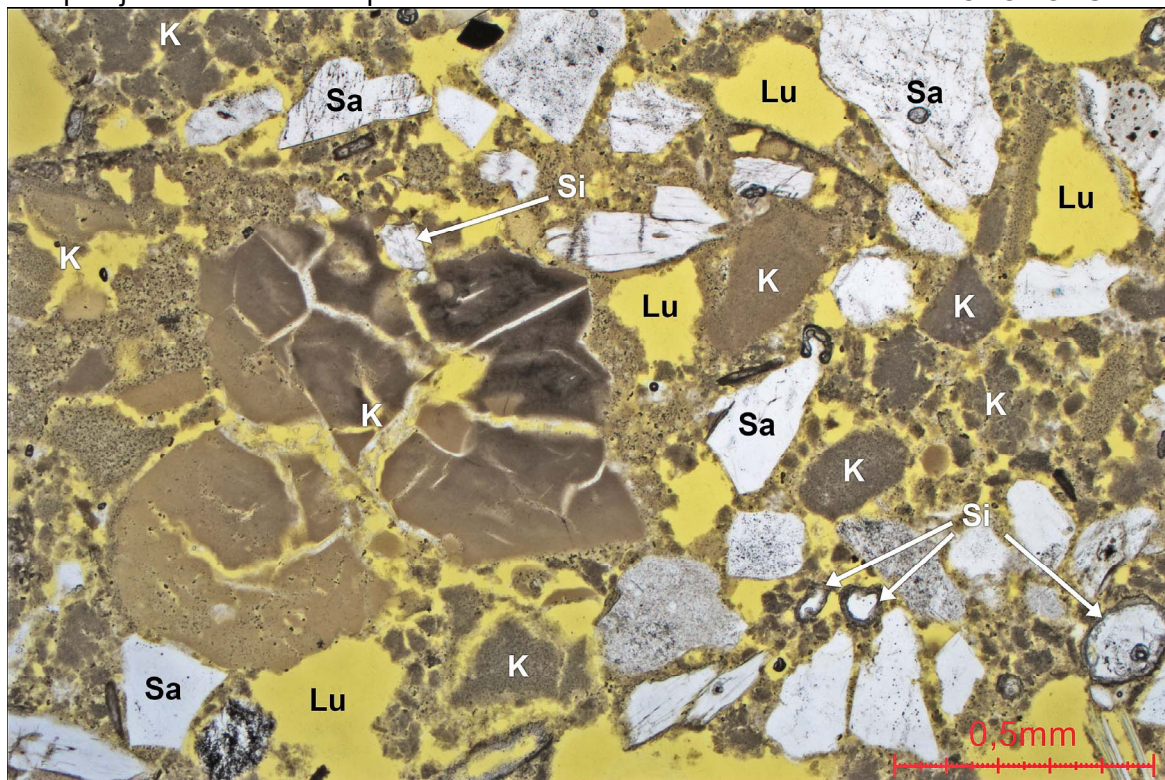


Foto: 1 (F1746-1) **Type:** Mikrofoto **Prøve nr.:** P181201-1 **Belysning:** A **Filter:** -N

Prøve mærket: Prøve 1. Hyllestad, testprøve fra brenning i juni 2017. Billedet viser et udsnit af prøven (mørtlen) set i tyndslibet. Ved fremstillingen af tyndslibet er prøven omstøbt og imprægneret med epoxy, som på billedet har en gul farve. Mørtlen har et meget højt indhold af kalkklumper (**K**) og fremstår med en kornet struktur. Delvist omdannede silikatgrain fra den til kalkbrændingen anvendte kalksten (marmor) ses stedvis (**Si**). Der ses ingen fragmenter af underbrændt kalksten. Tilslagskorn = **Sa**. Luftpore = **Lu**

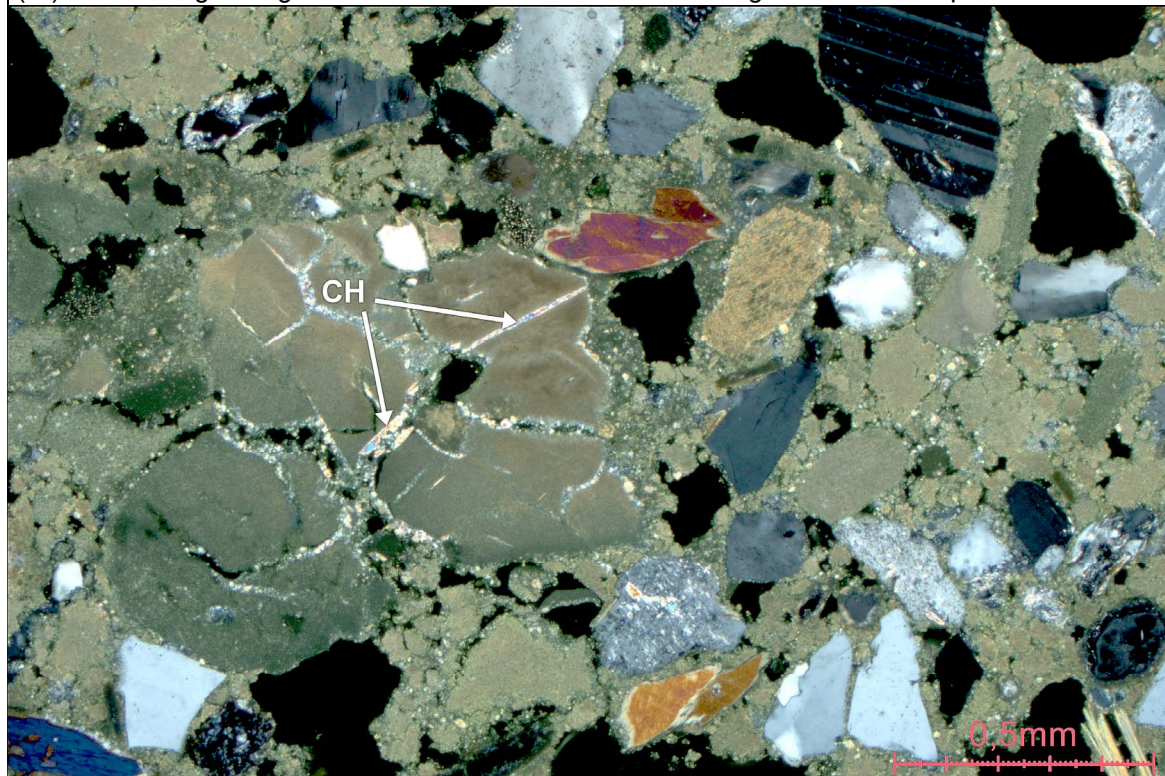


Foto: 2 (F1746-2) **Type:** Mikrofoto **Prøve nr.:** P181201-1 **Belysning:** A **Filter:** +N

Prøve mærket: Prøve 1. Hyllestad, testprøve fra brenning i juni 2017. Billedet viser samme udsnit af tyndslibet som foto 1, men en anden type mikroskopfilter er anvendt. Der ses udfældninger af calciumhydroxid i blandt andet kalkklumper (**CH**)

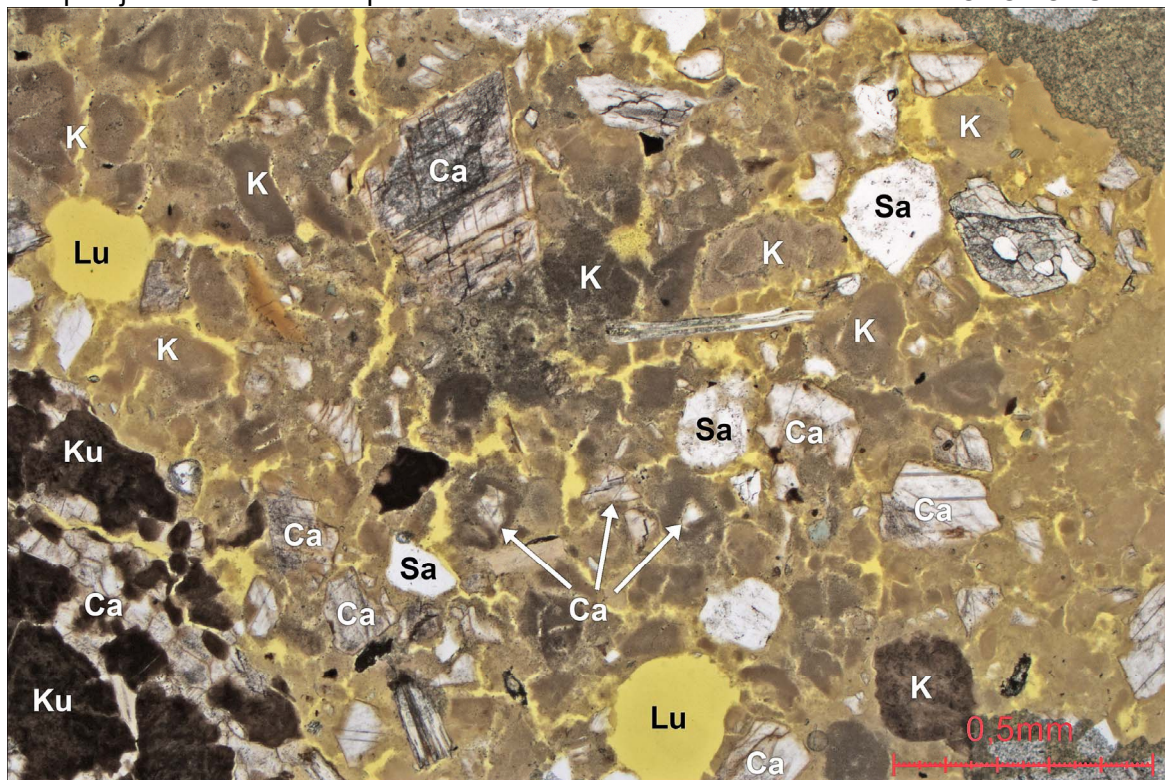


Foto: 3 (F1746-3) **Type:** Mikrofoto **Prøve nr.:** P181201-2 **Belysning:** A **Filter:** -N

Prøve mærket: Prøve 2. Hyllestad, testprøve fra brenning i juni 2017. Mørtlen har et meget højt indhold af kalkklumper (K) og underbrændt kalksten (Ca). Bindemidlet fremstår med samme kornede struktur som bindemidlet i prøve 1. I den underbrændte kalksten ses stedvis brune områder (Ku), som afviger fra kalken i de øvrige kalkklumper (K). Årsagen er ukendt. Underbrændt kalksten = Ca. Tilslagskorn = Sa. Luftporer = Lu

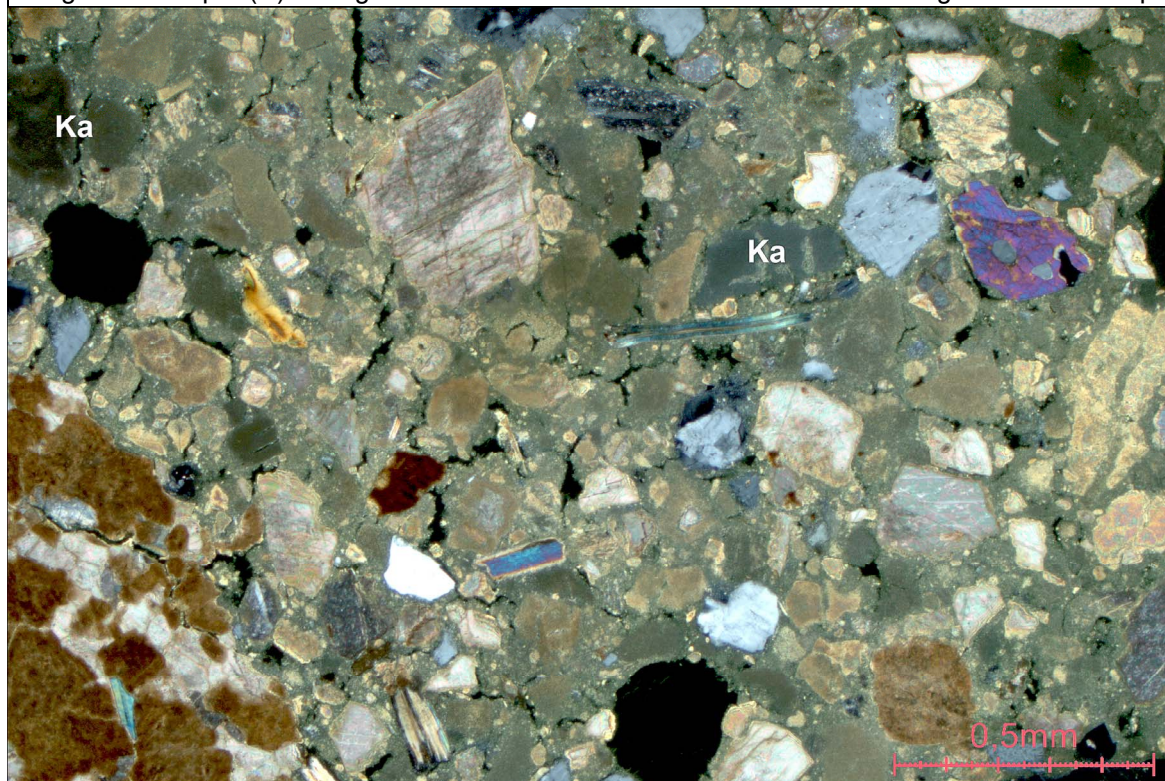


Foto: 4 (F1746-4) **Type:** Mikrofoto **Prøve nr.:** P181201-2 **Belysning:** A **Filter:** +N

Prøve mærket: Prøve 2. Hyllestad, testprøve fra brenning i juni 2017. Billedet viser samme udsnit af tynd-slibet som foto 3, men en anden type mikroskopfilter er anvendt. Der ses enkelte mørkt farvede kalkklumper (Ka), i rapporten benævnt anormalt isotrope. Lignende kalkklumper er karakteristiske for kalksten (marmor) med indhold af dolomit, som kan være vanskelig at læske

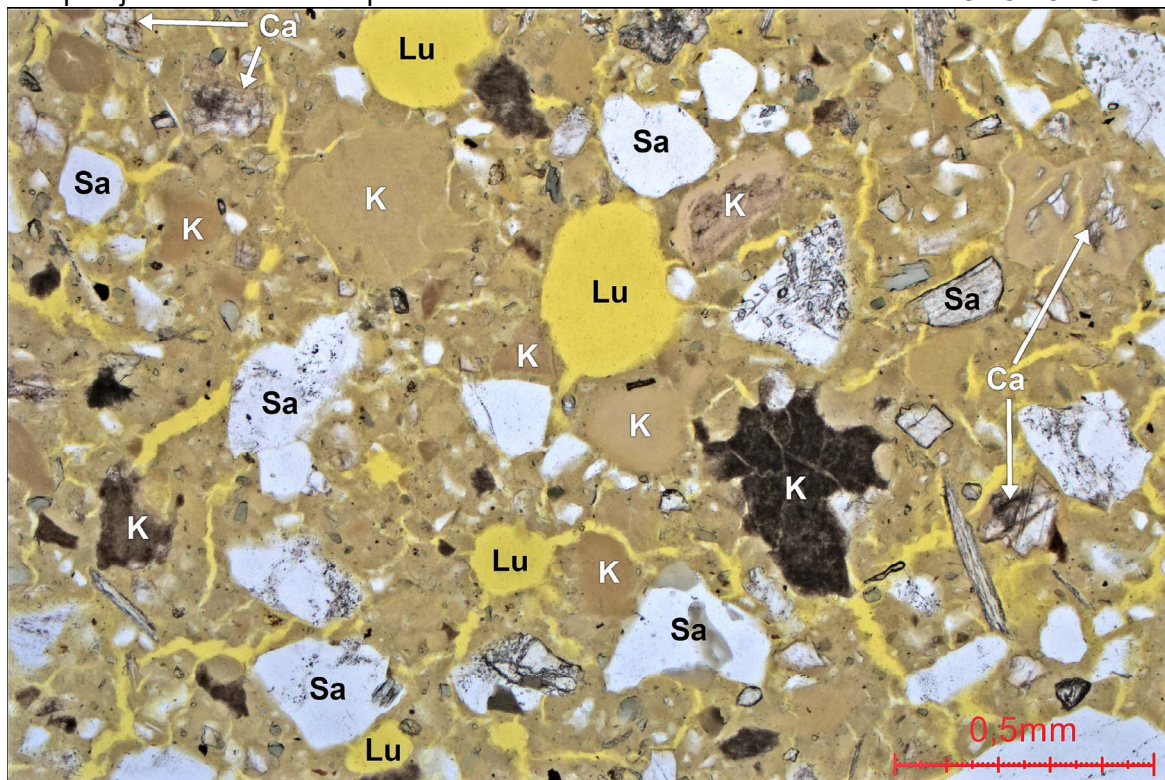


Foto: 5 (F1746-5) **Type:** Mikrofoto **Prøve nr.:** P181201-3 **Belysning:** A **Filter:** -N

Prøve mærket: Prøve 3. Hyllestad, ad-hoc mørtel fra spekking af kalkovnen juni 2016. Mørtlen har som for prøve 1 og 2 et meget højt indhold af kalkklumper (K) men med en mindre kornet struktur end i prøve 2 og 3. Indholdet af svindrevner (»svinnriss«) er højt. Tilslagskorn = Sa. Luftpore = Lu

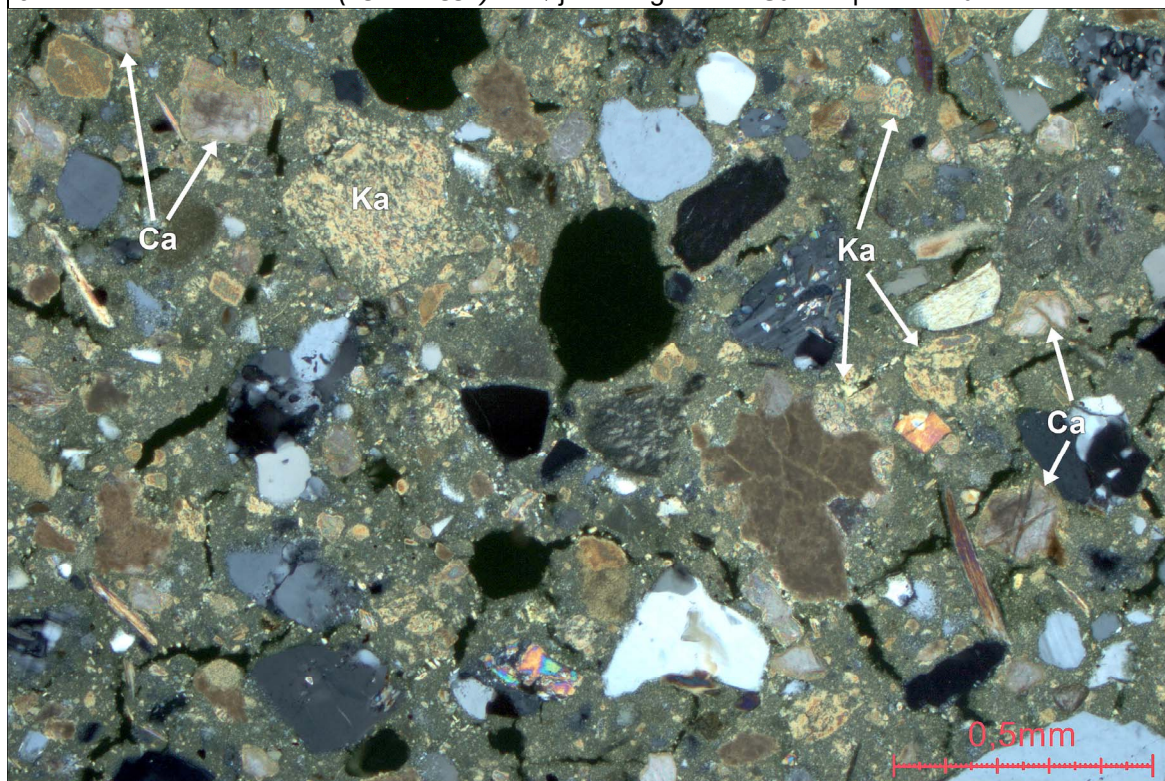


Foto: 6 (F1746-6) **Type:** Mikrofoto **Prøve nr.:** P181201-3 **Belysning:** A **Filter:** +N

Prøve mærket: Prøve 3. Hyllestad, ad-hoc mørtel fra spekking af kalkovnen juni 2016. Billedet viser samme udsnit af tyndslibet som foto 5, men en anden type mikroskopfilter er anvendt. En del af kalkklumperne (Ka) har en grovkrystallinsk, "fjeragtig" struktur som er karakterist for kalk fremstillet ved brænding af metamorft marmor. Bindemidlet er ufuldstændigt carboniseret. Der ses en del korn af underbrændt kalksten (Ca)

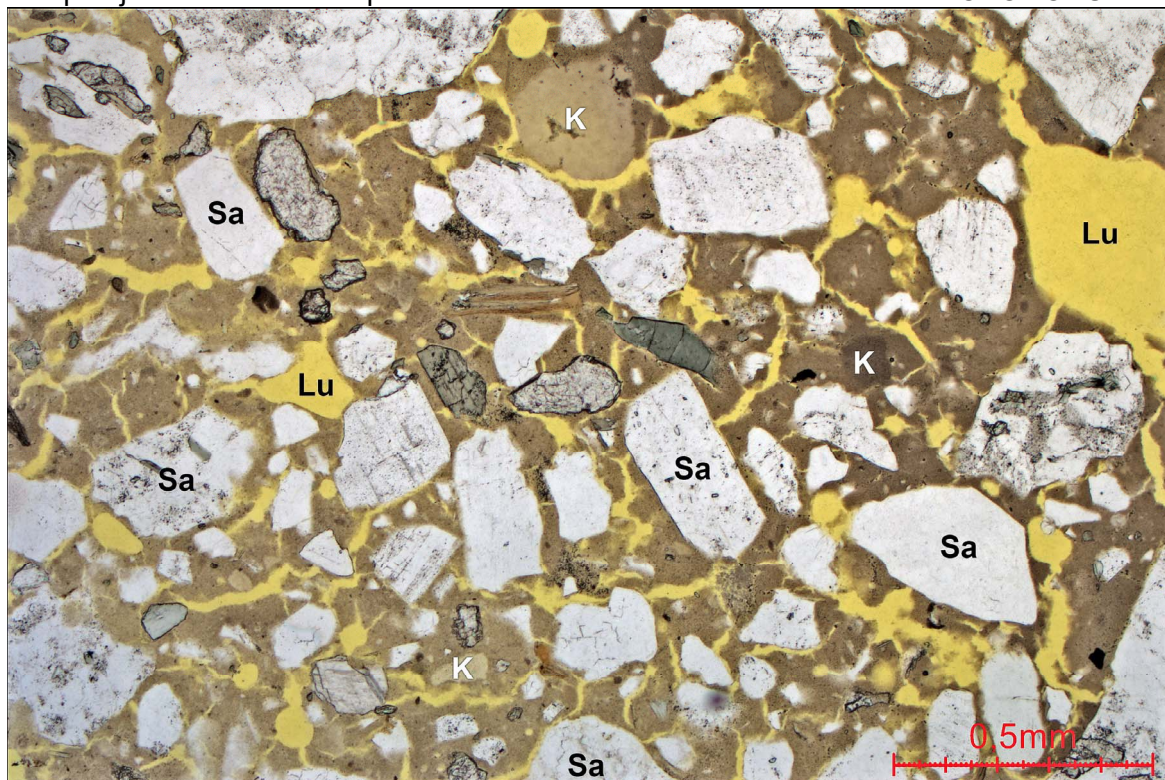


Foto: 7 (F1746-7) Type: Mikrofoto Prøve nr.: P181201-4 Belysning: A Filter: -N

Prøve mærket: Prøve 4. Hyllestad, spekkemørtel testet på Selja kloster i september 2018. Mørtlen har sammenlignet med de øvrige prøver et relativt højt indehold af tilslag (Sa) og bindemidlet fremstår relativt ensartet med kun få kalkklumper (K). Indholdet af svindrevner er højt. Luftpore = Lu

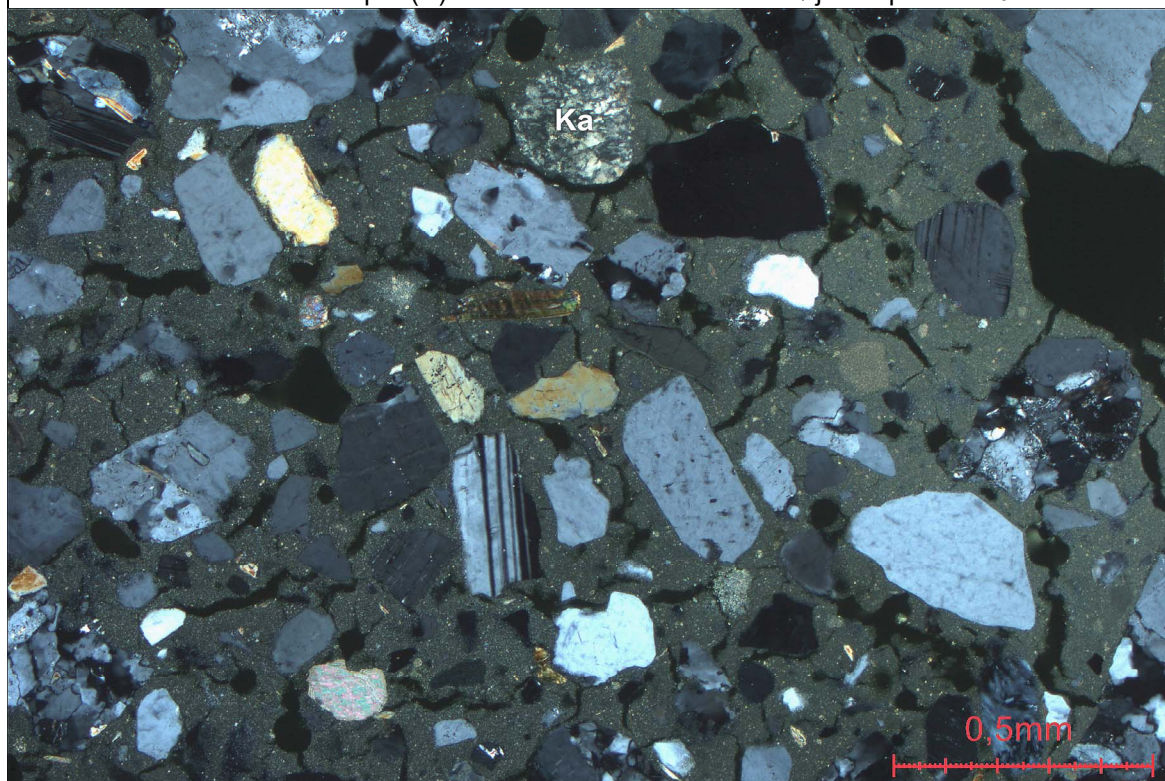


Foto: 8 (F1746-8) Type: Mikrofoto Prøve nr.: P181201-4 Belysning: A Filter: +N

Prøve mærket: Prøve 4. Hyllestad, spekkemørtel testet på Selja kloster i september 2018. Billedet viser samme udsnit af tyndslibet som foto 7, men en anden type mikroskopfilter er anvendt. Bindemidlet er stort set ikke carbonatiseret, dvs. omdannet fra kalkhydrat til calciumcarbonat. En enkelt kalkklump (Ka) fremstår med samme "fjeragtige" struktur som beskrevet for prøve 3 (foto 6)

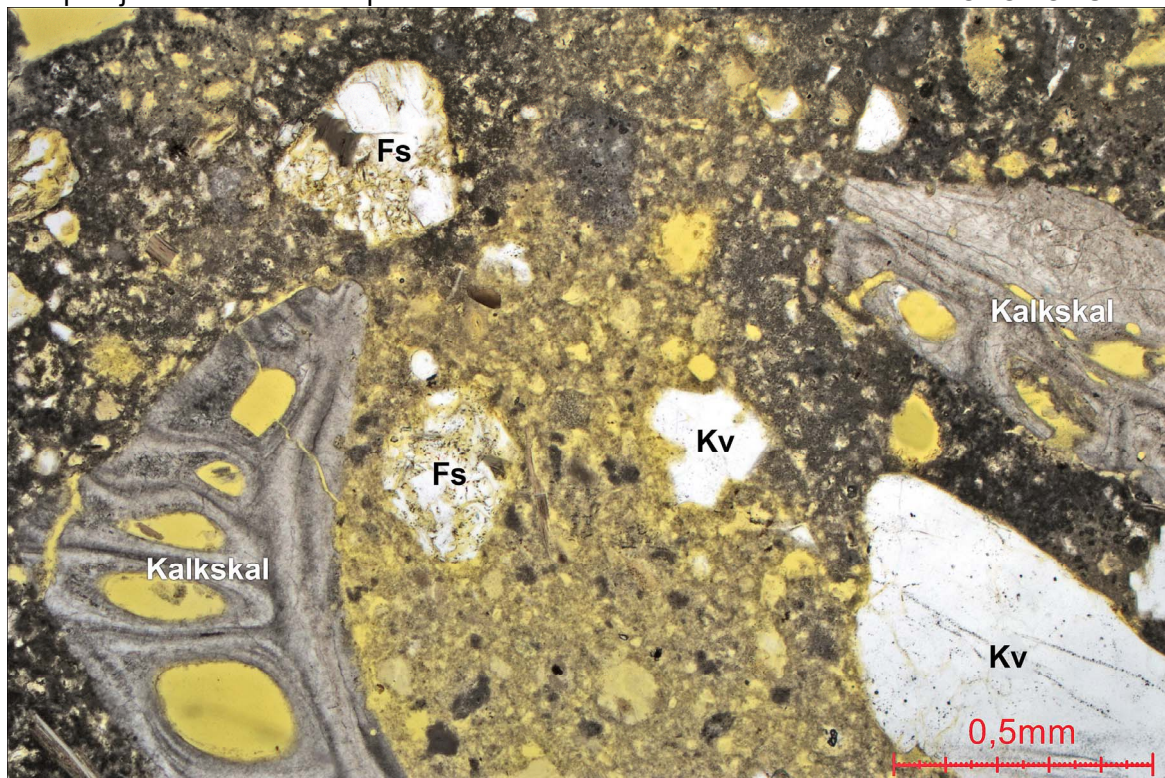


Foto: 9 (F1746-9) **Type:** Mikrofoto **Prøve nr.:** P181201-5 **Belysning:** A **Filter:** -N

Prøve mærket: Prøve 5. Selja, sakristi, nordsiden, pussmørtel (1200-t). Der er til mørtlen anvendt et tilslag med højt indhold af kalkskaller af marin oprindelse og kun lidt sand med mineralkorn af overvejende kvarts (Kv) og feldspat (Fs). Feldspatten er kraftigt opløst, formentligt som følge af langvarigt ophold i et stærkt alkalisk bindemiddel af ucarboniseret kalk før carboniseringen. De frigivne stoffer fra feldspatten er udfældet i det omgivende bindemiddel, hvor de har medvirket til mørtlens nuværende høje styrke

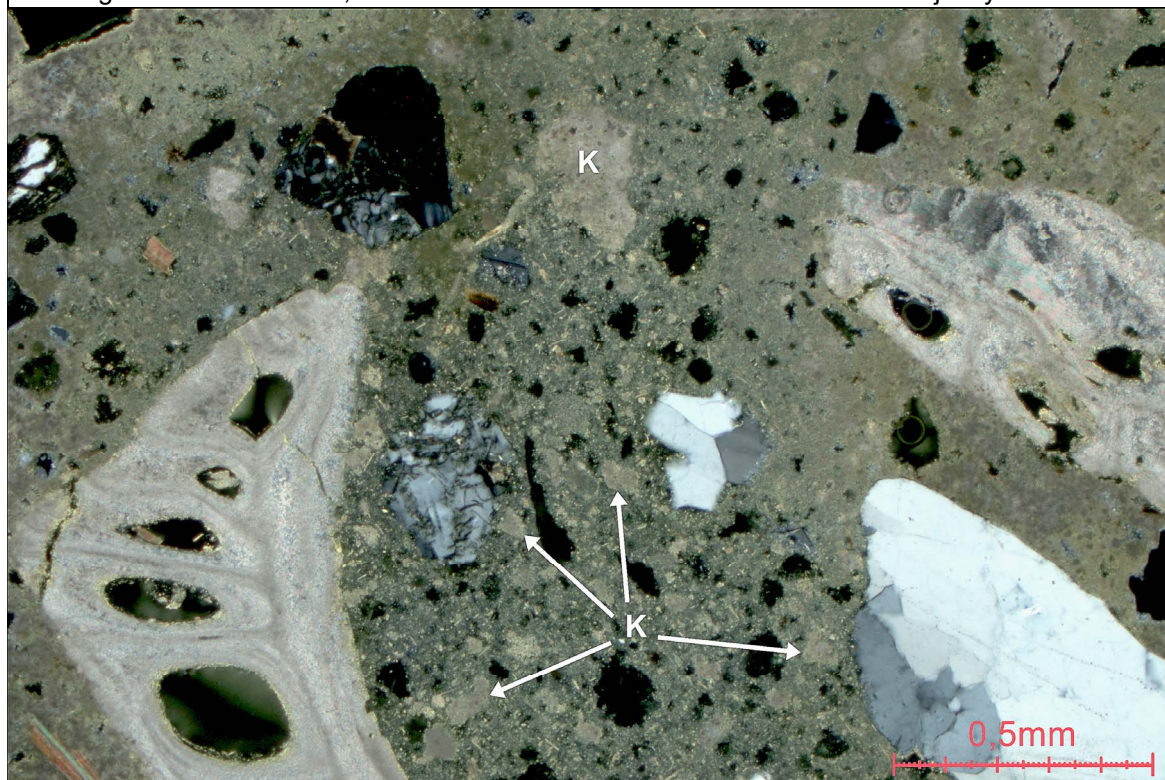


Foto: 10 (F1746-10) **Type:** Mikrofoto **Prøve nr.:** P181201-5 **Belysning:** A **Filter:** +N

Prøve mærket: Prøve 5. Selja, sakristi, nordsiden, pussmørtel (1200-t). Billedet viser samme udsnit af tyndslibet som foto 9, men en anden type mikroskopfilter er anvendt. Den ses mange kalkklumper (K) og små løsrevne fibre fra kalkskallerne i bindemidlet

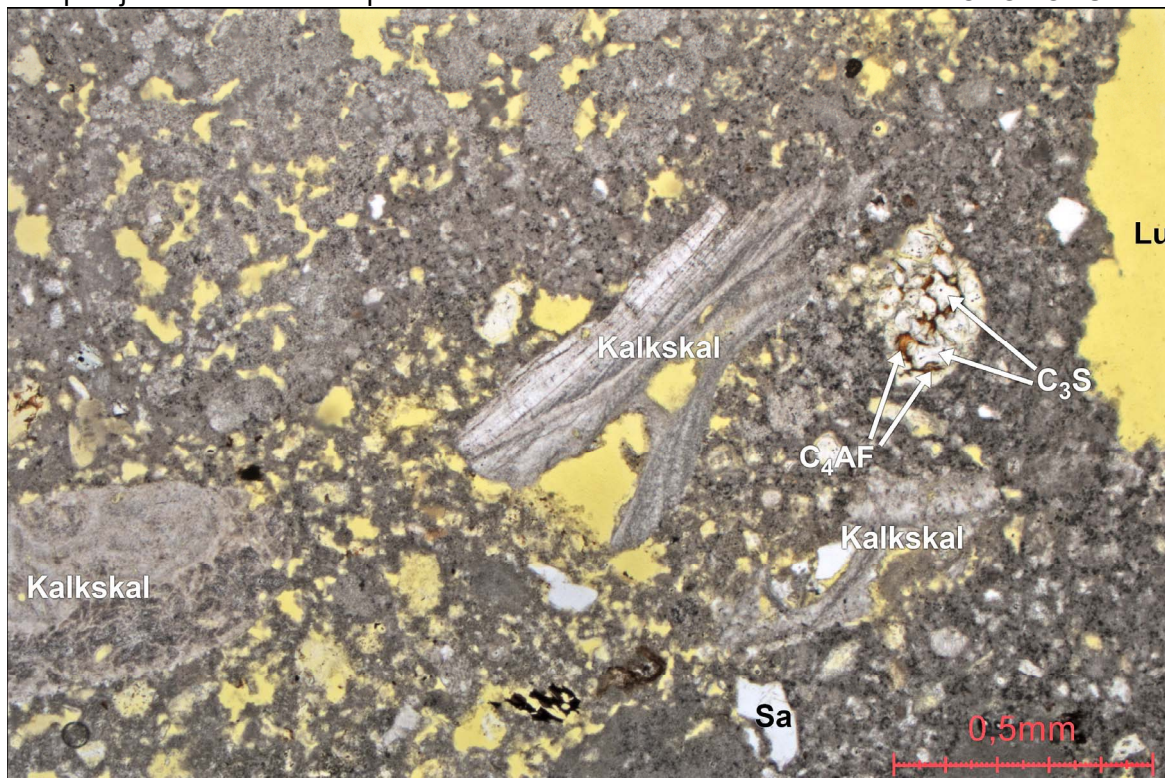


Foto: 11 (F1746-11) **Type:** Mikrofoto **Prøve nr.:** P181201-6 **Belysning:** A **Filter:** -N

Prøve mærket: Prøve 6. Selja, sakristi, østveggen, fugemørtel (1200-t). Der er som for prøve 5 anvendt et tilslag med højt indhold af kalkskaller af marin oprindelse og kun lidt sand (**Sa**). Den til mørtlen anvendte kalk vurderes at være fremstillet ved brænding af kalksten af metamorf oprindelse. Tilstedeværelsen af bindemiddeldkorn med hydratiserede rester af cementklinker-mineralerne alit (**C₃S**) og ferrit (**C₄AF**) viser, at brændingen er sket ved en meget høj temperatur på op mod 1400°C. Det på billedet viste korn har sammensætning og struktur som portlandcement. Luftpore = **Lu**

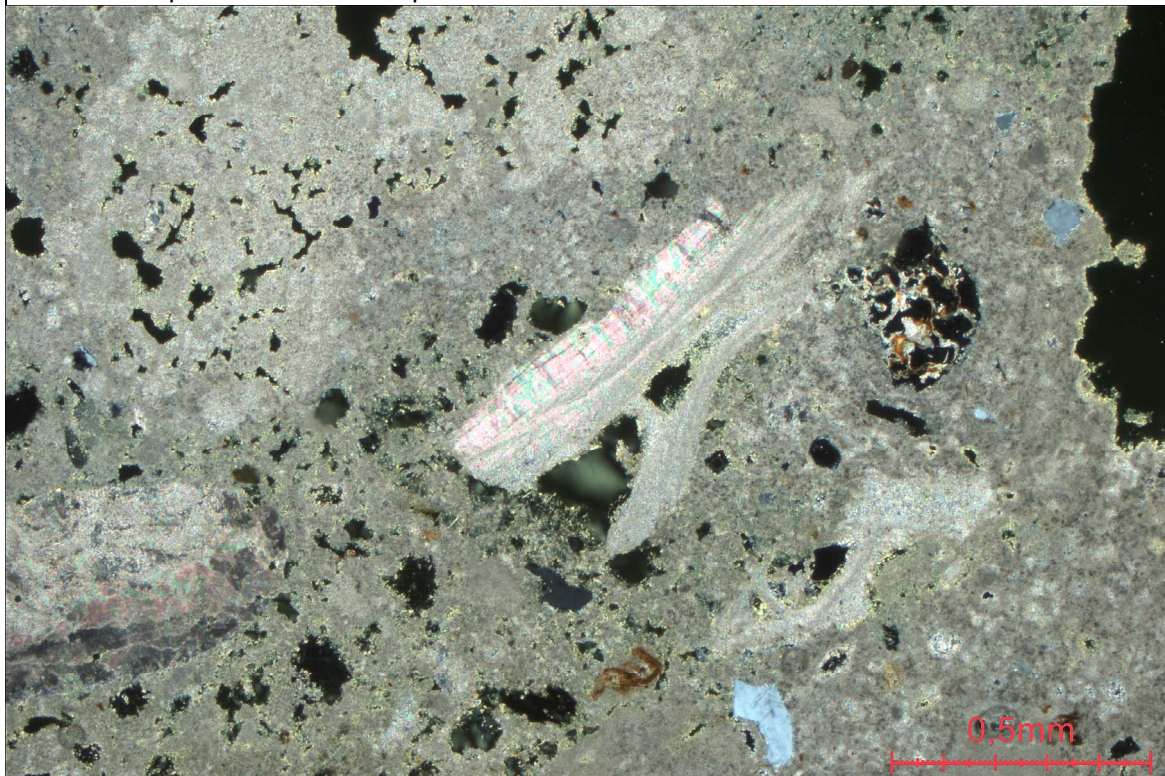


Foto: 12 (F1746-12) **Type:** Mikrofoto **Prøve nr.:** P181201-6 **Belysning:** A **Filter:** +N

Prøve mærket: Prøve 6. Selja, sakristi, østveggen, fugemørtel (1200-t). Billedet viser samme udsnit af tyndslibet som foto 11, men en anden type mikroskopfilter er anvendt

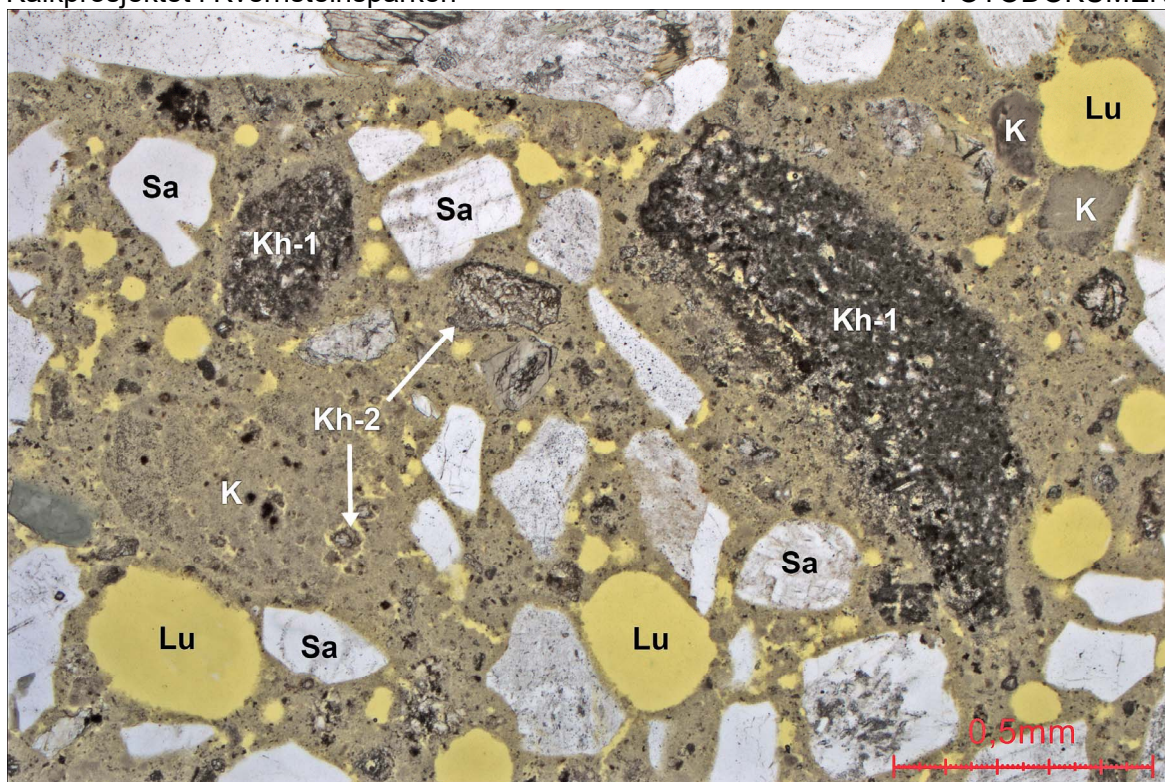


Foto: 13 (F1746-13) Type: Mikrofoto Prøve nr.: P181201-7 Belysning: A Filter: -N

Prøve mærket: Prøve 7. Langøya ved Holmestrand, testmørtel fra brenning ca. 2000. Der er til mørtlen anvendt en kalk, som er karakteristisk for kalkstensforekomsterne på Langøya. Ved brændingen er ler- og kiselholdige urenheder i kalkstenen omdannet til hydrauliske mineraler. Brændingen vurderes at være sket ved en uensartet temperatur, hvorved der ved lavere temperaturer kun er dannet svagt hydrauliske mineraler i store, typisk skifer-lignende korn (**Kh-1**) og ved højere temperaturer små korn (**Kh-2**) med stærkt hydrauliske cementklinker-mineraler som belit (C_2S) og ferrit (C_4AF). Kalkklumper = **K**. Tilslagskorn = **Sa**. Luftpore = **Lu**

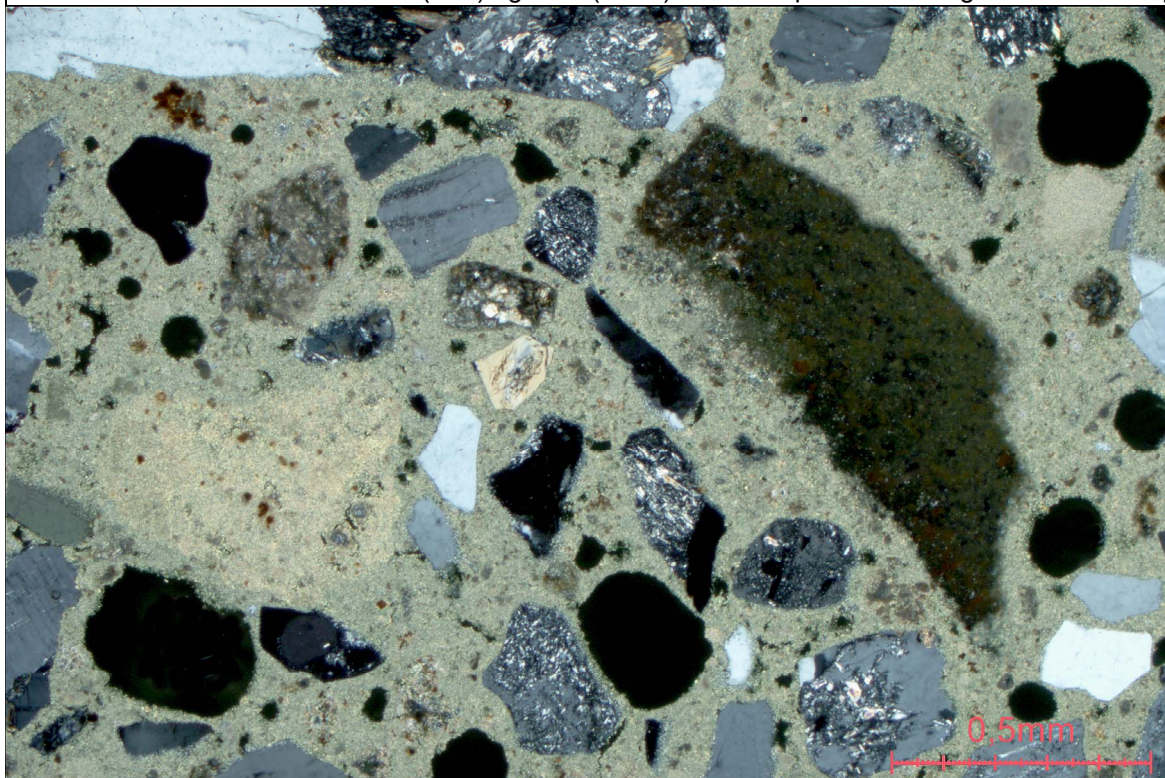


Foto: 14 (F1746-14) Type: Mikrofoto Prøve nr.: P181201-7 Belysning: A Filter: +N

Prøve mærket: Prøve 7. Langøya ved Holmestrand, testmørtel fra brenning ca. 2000. Billedet viser samme udsnit af tyndslibet som foto 13, men en anden type mikroskopfilter er anvendt



Foto: 15 (F1746-15) **Type:** Mikrofoto **Prøve nr.:** P181201-8 **Belysning:** A **Filter:** -N

Prøve mærket: Prøve 8. Hamar bispeborg (1200-t). Den undersøgte mørtel er meget bindemiddelrig med tilslag af overvejende gråsort sedimentær til lavmetamorf skifer (Sk). Indholdet af kalkklumper (K) er højt. Tilstedeværelsen af næsten kugleformede (globulære) luftporer indikerer, at mørtlen har haft en relativt flydende konsistens ved anvendelsen

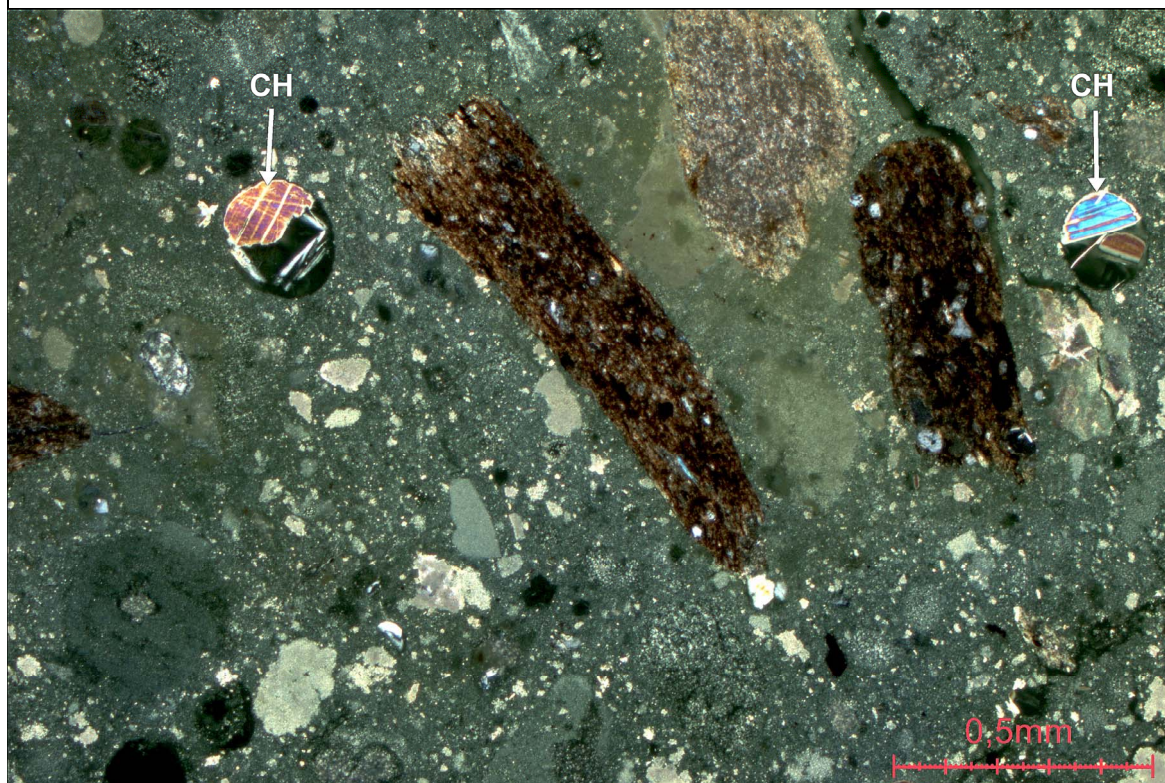


Foto: 16 (F1746-16) **Type:** Mikrofoto **Prøve nr.:** P181201-8 **Belysning:** A **Filter:** +N

Prøve mærket: Prøve 8. Hamar bispeborg (1200-t). Billedet viser samme udsnit af tyndslibet som foto 15, men en anden type mikroskopfilter er anvendt. Bindemidlet er stort set ikke carbonatiseret, dvs. omdannet fra kalkhydrat til calciumcarbonat. En stor del af kalkklumperne består dog af carbonatiseret kalk. I luftporer ses store krystaller af calciumhydroxid med mineralnavnet portlandit (CH)

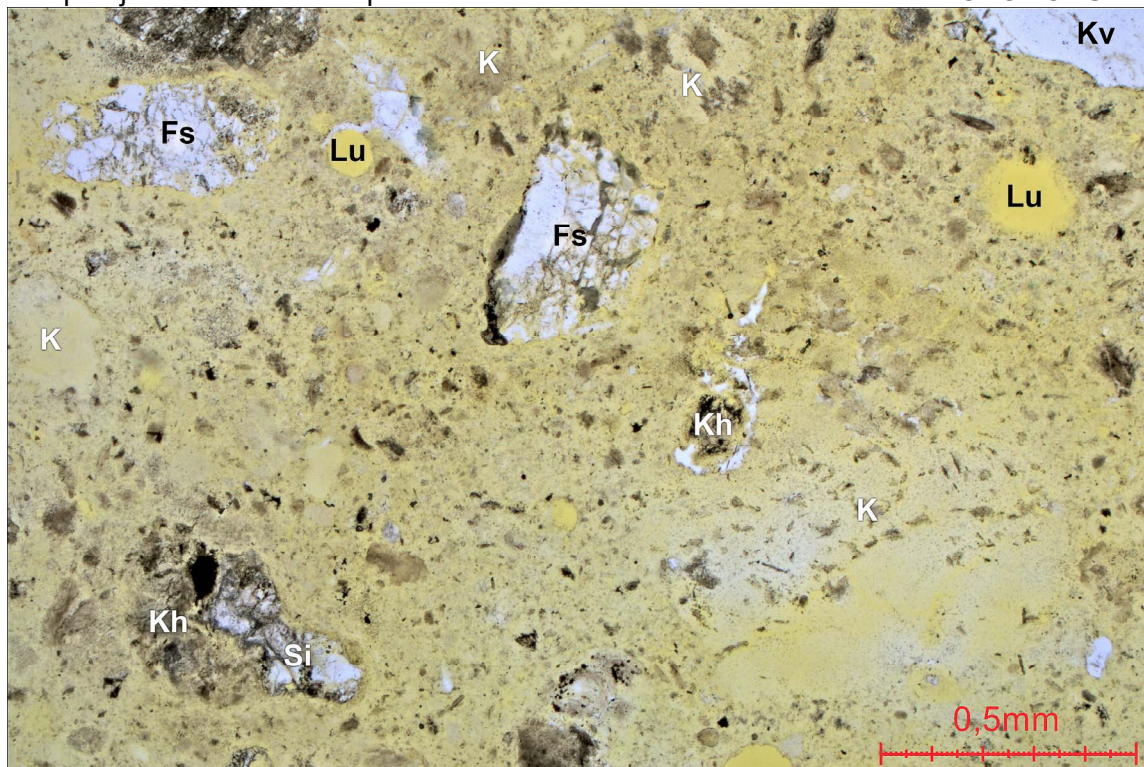


Foto: 17 (F1746-17) **Type:** Mikrofoto **Prøve nr.:** P181201-9 **Belysning:** A **Filter:** -N

Prøve mærket: Prøve 9. Frederiksberg festning, Bergen, nordveggen (ca. 1700). Den undersøgte mørtel er meget bindemiddelrig med kun lidt tilslag i form af naturligt sand med indhold af kvarts (**Kv**) og feldspat (**Fs**). Feldspatten er kraftigt opløst, formentlig som følge af langvarigt ophold i et stærkt alkalisk bindemiddel af kalk før carbonatiseringen. De frigivne stoffer fra feldspatten er udfældet i det omgivende bindemiddel, hvor de har medvirket til mørtlens nuværende høje styrke. Klumper af ren kalk = **K**. Korn med hydrauliske mineraler = **Kh**. Delvist omdannet (smeltet) bjergartskorn = **Si**. Luftporer = **K**

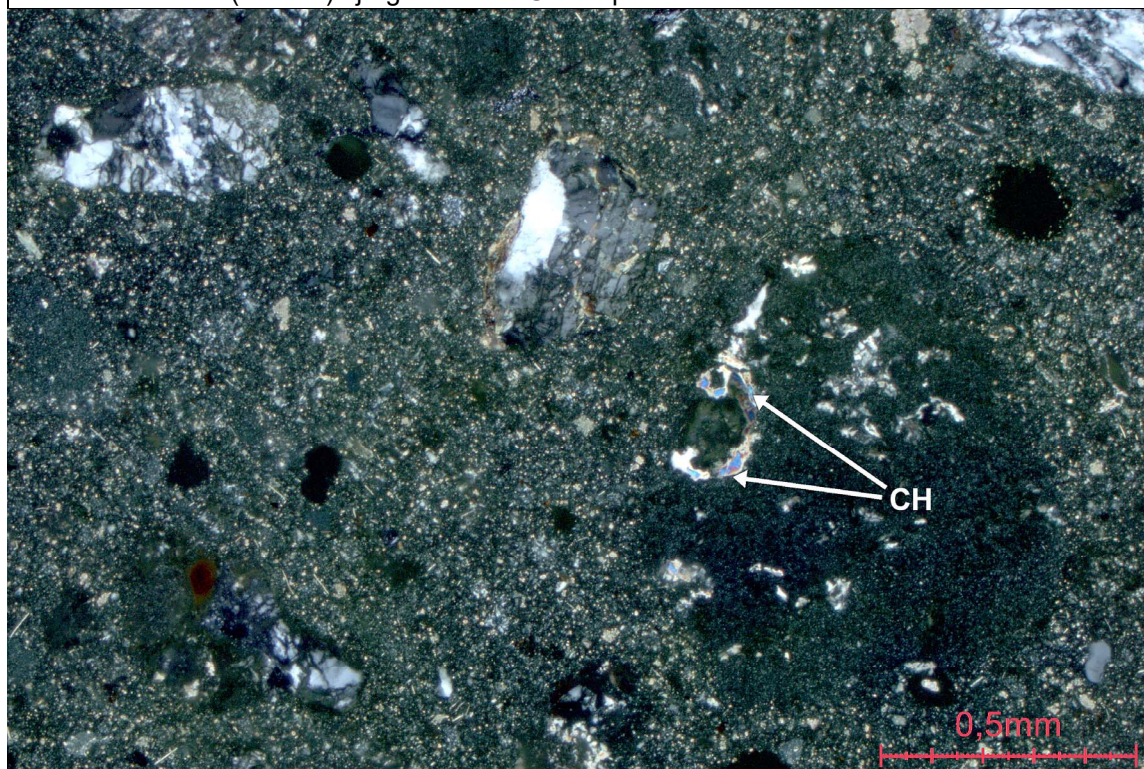


Foto: 18 (F1746-18) **Type:** Mikrofoto **Prøve nr.:** P181201-9 **Belysning:** A **Filter:** +N

Prøve mærket: Prøve 9. Frederiksberg festning, Bergen, nordveggen (ca. 1700). Billedet viser samme udsnit af tyndslibet som foto 17, men en anden type mikroskopfilter er anvendt. Bindemidlet er stort set ikke carbonatiseret i den undersøgte prøve. Der ses store krystaller af calciumhydroxid (**CH**) i kalkklump