



**En studie i saltforvitring når
klimaet forandrer seg:
Albanustårnet på Selja
kloster 2016-2020**

Forskningsrapport

FABRICA kulturminnetjenester as

April 2020



FABRICA kulturminnetjenester as
Vøienvolden gård
Maridalsveien 120
0274 Oslo
Org. nr.: 922 632 642 MVA
www.fabrica.no
post@fabrica.no

Forfatter:
Per Storemyr
Tel: 95 330 460
per.storemyr@fabrica.no

Sluttrapport i forskningsprosjektet «Det romanske tårnet til Albanuskirken på Selja: Analyse av inneklime og forvittringsprosesser». Rapport til Stad kommune og Riksantikvarens bevaringsprogram for ruiner. Stad kommune var inntil 1.1.2020 delt i Selje og Eid kommuner. Arbeidet som framlegges i denne rapporten har pågått siden 2015 med Selje som partner.

29. april 2020

Forsidebilde: Terje Berner og George Murphy studerer forvitringen på utsiden av Albanuskirkens tårn under en murersamling i RAs bevaringsprogram for ruiner i 2015. Foto: Per Storemyr.



Forord

Selja kloster og helgeanlegg har i siden 2007 vært under konservering innen Riksantikvarens bevaringsprogram for ruiner. Som del av konserveringsarbeidet besluttet Selja kommune og Riksantikvaren i 2015 å innlemme forvitningsstudier og overvåkning av Albanuskirkens tårn i et eget forskningsprosjekt. Det romanske tårnet har en broket historie; det sto lenge som åpen ruin, men er i dag, ved siden av det overhvelvede «sakristiet» og Sunnivahulen, den eneste delen av anlegget som har tak. Tårnet har gjennomgått mange utbedringer de siste årene og står i dag fram med relativt god bevaringstilstand. Likevel forvitrer det mye innendørs.

Dette er foranledningen for forskningsprosjektet: «Det romanske tårnet til Albanuskirken på Selja: Analyse av inneklime og forvitningsprosesser». Prosjektet har pågått fra 2016 til 2020. To tidligere statusrapporter er utgitt (Storemyr 2017; 2018). Disse og foreliggende rapport bygger på undersøkelser av materialer og forvitring (Storemyr 2010a; 2015; 2019).

Foreliggende sluttrapport beskriver overvåkningsprogrammet, belyser fremtredende faktorer (spesielt salt) vi mener medvirker til hvorfor forvitringen fortsatt er så aktiv og diskuterer bevaringsstrategier. Det er et håp om at rapporten kan være til hjelp ved forståelse av forvitring (og bevaring) av også andre, tilsvarende anlegg fra middelalderen. Det er også et håp om at rapporten kan bidra til forståelse av hvordan klimaforandringer muligens vil kunne påvirke Albanustårnet – og trolig tilsvarende kulturminner i Norge. Albanustårnet har vist seg å være egnet som eksempel på hva som kan skje i de neste tiårene, om f.eks. klimaet blir preget av større vekslinger mellom tørre og våte perioder.

Prosjektet har vært utført sammen med Bjørn Jensen, prosjektleder for klosteret fra Stad kommune (fram til 1.1.2020 Selja kommune), Inger-Marie Aicher Olsrud, leder av Riksantikvarens bevaringsprogram for ruiner og Geir Magnussen fra det utførende konserveringsfirmaet Bakken & Magnussen AS, der også Erlend Frengen har hjulpet til. Diskusjoner har dessuten blitt ført med Regin Meyer fra NIKU. Christine Bläuer fra CSC Conservation Science Consulting i Fribourg (Sveits) har gjennomført saltanalysene i prosjektet. Tusen takk til alle!

Arbeidet ble fram til våren 2019 ledet av Archaeology & Conservation Services, som da ble del av Fabrica Kulturminnetjenester AS. Alle rådata fra klimaovervåkingen i tårnet er overlevert Stad kommune v/ Bjørn Jensen i digital form.

*Hyllestad, 29. april 2020
Per Storemyr, prosjektleder*

Bilde på foregående side:

Selja kloster og helgeanlegg med tårnet til Albanuskirken i bakgrunnen. I forgrunnen sentrale personer i de pågående konserveringsarbeidene – arbeider som har vart i nesten 15 år: Fra venstre: Geir Magnussen, Bjørn Jensen, og Inger-Marie Aicher Olsrud. Foto: Per Storemyr

Sammendrag

Det nær 900 år gamle, romanske Albanustårnet er et definerende element for Selja kloster- og helgenanlegg. Tårnet har en dramatisk historie: brann på begynnelsen av 1300-tallet, flere hundre år til forfalls uten tak og en gjennomgripende restaurering på begynnelsen av 1900-tallet, med betydelig bruk av sement. I dag står det under tak som klokke- og museumstårn. Det er for tiden i rimelig god stand, ikke minst takket være Riksantikvarens bevaringsprogram for ruiner og flere tiltak for å sikre stein, utbedre fuger og hindre lekkasjer (fra 2007). Likevel har tårnet store problemer med fukt her ute i det værharde klimaet ved Stad. Det foregår også intens forvitring av murverket i de tørrere deler av tårnet innvendig.

Forvitringen er utgangspunktet for denne sluttrapporten, som er utarbeidet av Fabrica Kulturminnetjenester i forskningsprosjektet «Det romanske tårnet til Albanuskirken på Selja: Analyse av inn klima og forvittringsprosesser» (2016-2020). Prosjektet har vært utført sammen med Riksantikvaren og Selje/Stad kommune. Hovedspørsmålet er hvor raskt forvitringen foregår inne i tårnet og hva som er årsakene. Viktige spørsmål er også om forvitringen kan øke som resultat av klimaforandringer og hvilke bevaringsstrategier en på lang sikt kan tenke seg for tårnet.

Rapporten konkluderer med at saltforvitring er den viktigste årsaken til at det faller ned mye forvitret material fra stein og fuger innvendig. Dette er tidligere kun antydnet for middelalderbygninger langs Norges ytterkyster, knapt dokumentert. Forvitringen er ikke enkel å observere direkte, men foregår etter alt å dømme som gjentatt krystallisering og oppløsning av salt (natriumsulfater, natriumkarbonater og trolig klorider og gips) når relativ luftfuktighet fluktuerer mellom ca. 60 og 80%, spesielt på våren/forsommeren, men også i andre sesonger. Innvendig murverk har et gjennomsnittlig tap av tykkelse på 0,5 cm pr. hundre år. Dette kan virke lite, men siden forvitringen er konsentrert til spesifikke områder, kan likevel betydelige bevaringsutfordringer oppstå i framtiden.

Ut fra tilgjengelige historiske klimadata og prognoser er det sannsynliggjort at fluktuasjoner i relativ luftfuktighet kan øke i intensitet og hyppighet i framtiden. Siden tårnet har mange åpninger og er fullstendig prisgitt værlaget, kan det medføre at saltforvitringen blir mer betydelig. Også nedbørsintensitet og -hyppighet kan øke, noe som kan ha betydning for lekkasjer, biologisk vekst og kjemisk forvitring (av mørtel). Frost vil i fremtiden miste mye av sin betydning på Selja. Klimaforandringer er imidlertid av underordnet betydning om man sammenholder med direkte menneskelig påvirkning, dvs. i form av manglende vedlikehold på den ene siden – og planmessig, godt vedlikeholdsarbeid på den andre.

Rapporten inneholder en avsluttende diskusjon om mulige bevaringsstrategier, der viktigheten av regelmessig vedlikehold og reparasjon blir understreket. Det blir også påpekt at de store mengdene med «tett», sementbasert murverk og mørtel som ble introdusert under restaureringen i 1912-15 trolig allerede nå gir problemer i form av oppkonsentrering av fukt. På sikt kan dette bli betydelig.

I tillegg til den sterke saltforvitringen, ligger problemene med sement til grunn for diskusjon av de muligheter en har for bevaring av tårnet på lang sikt (hundreårsperspektiv). Siden det er høyst sannsynlig at tårnet var kalkpusset/slemmet i middelalderen, introduserer diskusjonen de positive mulighetene som ligger i fjerning av sement, restaurering med kalkbasert mørtel og – ikke minst – bruk av kalkpuss, slemming og hvitting. Sammen med lukking av åpningene i tårnet (vinduer/ portaler), men med god naturlig ventilasjon, kan et kalkbasert murverk trolig signifikant bedre tilstanden og opprettholde den på svært lang sikt – gitt at det utføres planmessig vedlikehold.

Spørsmålet er hva slags tårn man vil ha: Et monument over restaureringen for hundre år siden? Eller et «levende» middelaldertårn som med autentiske materialer og håndverk peker på middelalderhistorien til tårnet og kloster- og helgenanlegget som helhet?

NV



NØ



Helt ny oppmåling av Albanustårnet innvendig, med ortofoto av veggene. Utført av Marcin Gladki, på oppdrag fra Riksantikvaren. Oppmålingen er nyttig som referanse ved lesing av rapporten.

En må merke seg at tårnet ikke er orientert eksakt N-S-Ø-V. Hva vi kaller «vestveggen» i rapporten er orientert mot NV – og tilsvarende for de andre veggene

SØ



SV



Innhold

Forord	4
Sammendrag	5
Innhold	7
1 Forskning om saltforvitring i et middelaldertårn	8
1.1 Hvor raskt går forvitringen?	9
1.2 Hva er årsakene til forvitringen?	11
1.3 Et mikroklima i tårnet mellom vått og tørt	12
1.4 Generell innføring i saltforvitring	17
1.5 Kilder til salt i Albanustårnet	19
1.6. Studier om salt og hypoteser for saltforvitring i Albanustårnet	20
1.7 Metoder for overvåkning	29
1.8 Hovedspørsmål, hypotese og metoder – oppsummering.....	30
2 Albanustårnets historie	31
3 Forvitring inne i tårnet fra 1915 til i dag	34
4 Målinger av ute- og inneklima	42
5 Nedfall av forvitret material	48
5.1 Øst- og sørvindene i 3. etasje	48
5.2 Østveggen i 2. etasje	50
5.3 Resultater fra studiet av nedfall	51
6 Kvantitative saltanalyser	54
7 Analyse med dataprogrammet RUNSALT	56
8 Observasjon og tolkning av krystallisering av natriumsulfater	59
9 Samlet tolkning av materialnedfall, klima og saltforvitring	63
10 Klimaendringer og prognoser for fremtiden	67
11 Oppsummering og diskusjon om bevaringsstrategier	72
11.1 Er saltforvitringen problematisk?	73
11.2 Lekkasje, kondens og sement.....	73
11.3 Preventive tiltak og inneklimajustering	73
11.4 Saltreduksjon og inneklimajustering med kalk	75
11.5 Var tårnet kalket i middelalderen?	76
11.6 Hva er Albanustårnet?	79
Litteratur	82
Vedlegg: Rapport fra kvantitative saltanalyser	87



Figur 1: Et forfallent klosteranlegg og tårn, tegnet i 1867 av F. W. Schiertz.

1 Forskning om saltforvitring i et middelaldertårn

Det middelalderske Albanustårnet på Selja kloster og helgeanlegg står ekstremt værhardt til med Stadlandet som nærmeste nabo. Det er et under at tårnet ikke ramlet ned gjennom de mange hundre år det sto uten tak, fra før reformasjonen til 1914. Tårnet brant i 1305 og ble brukt som steinbrudd i dansketiden. Før sikring og gjennomgripende restaurering fra slutten av 1800-tallet til 1915, var det fullstendig priggitt vind, regn, sjøsprøyt, snø og frost – og ikke minst betydelig vegetasjon på murkronen og i mursprekker.¹

Denne skjebnen delte tårnet med en rekke steintårn og tilsvarende steinbygninger fra middelalderen. Noen ble bevart under tak, noen forble ruiner, andre ble revet. At Albanustårnet ble reddet er en bragd. I dag er det ikke lenger mange store middelalderbygninger som ligger så kronglete til som her ute på den vesle øya Selja. Tidligere var det naturligvis helt annerledes, Selja var strategisk plassert ved leia. Den var et sentrum i middelalderen. De store restaureringsarbeidene viser med all tydelighet hvor viktig Selja var og er som tidligere bispesete for Vestlandet, benediktinerkloster, lærested, pilegrims mål, havn – og nå som kulturminne.

¹ Historien og restaureringene er gjengitt i bl.a. Enger 1949; Djupedal 1996, Hommedal 1996 og Nybø 2000. Den beskrives i mer detalj i kap. 2.



Figur 2: Selja kloster og helgenanlegg med Albanustårnet. Sett fra øst ut mot Sildagapet og Stadlandet. Foto: Per Storemyr.

1.1 Hvor raskt går forvitringen?

Den heftige historien setter fortsatt sitt preg på det treetasjes Albanustårnet. Utad kan det virke i god stand, der det kneiser over klosterruinene og identifiserer det store helgenanlegget. Flere konserveringstiltak gjennom Riksantikvarens bevaringsprogram for ruiner de siste 13-14 år har bidratt til dette. Men ser en nærmere etter *innendørs*, så kan en raskt fastslå at det «ryr» betydelig fra svært forvitrede stein og fuger, at det tidvis blir ekstremt fuktig av kondens og at det her og der finnes lekkasjer. Slike forhold er jo ikke uvanlige i gamle steintårn. Det er heller ikke så problematisk med kondens og lekkasjer i et tårn som nå knapt har dekorative detaljer som sårbare kalkmalerier, verdifullt inventar eller godt bevart steinornamentikk, så lenge tilstanden holdes i sjakk med regelmessig vedlikehold og det ikke oppstår større materialtap, råte i treverk i gulv og tak og i verste fall konstruktive problemer i murverket. Men det må påpekes at tårnet har (svært forvitrede) hogde profiler og ikke minst en runeinskripsjon nederst i vindeltrappen i det nordvestre hjørnet.

Og det ryr altså betydelig fra innendørs murverk, i de tørrere delene av tårnet som ikke er vendt mot den fremherskende slagregnsretningen. I de vestlige delene av murverket er det til dels svært fuktig. I de østlige, litt tørrere delene kan en fra tid til annen feie opp kilovis med nedfalt «sand» (pulver) fra mørtel og stein på gulvene. Mengden av nedfall er så stor at en intuitivt må spørre seg om dette på sikt kan føre til konstruktive problemer, at spesielt fuger etter hvert blir så ødelagte at enkeltstein og mindre murverkspartier kan løsne og faller ned. Hvor fort går forvitringen i de tørrere delene av tårnet? Her hvor også brannen på begynnelsen av 1300-tallet har gitt mest skader? Går forvitringen så raskt at deler av murverket står i fare for å bli ustabil? For å få svar på dette spørsmålet har det i studien blitt brukt sammenligning med historiske fotografier og regelmessig feiing på utvalgte steder, der en har kontroll på fra hvor pulveret faller ned. Slik kan en beregne nedfall for et bestemt murverksareal pr. tidsenhet og ekstrapolere tilbake i historien og inn i fremtiden, gitt at dagens tilstand opprettholdes og at klimaet ikke forandrer seg til det helt ugjenkjennelige.



Figur 3: Pulver falt ned i vindussmyget i det østre vinduet i tredje etasje sommeren 2016. Vi ser at metaolivinsteinen (brun) forvitrer mest. Dette stdet er valgt ut for overvåkning av materialnedfall. Foto: Per Storemyr.



Figur 4: Oppsamling av nedfalt material fra på steinene i det østre vindussmyget i tredje etasje. Se bilde på neste side for oversikt over hele veggen: Foto: Per Storemyr, januar 2016.

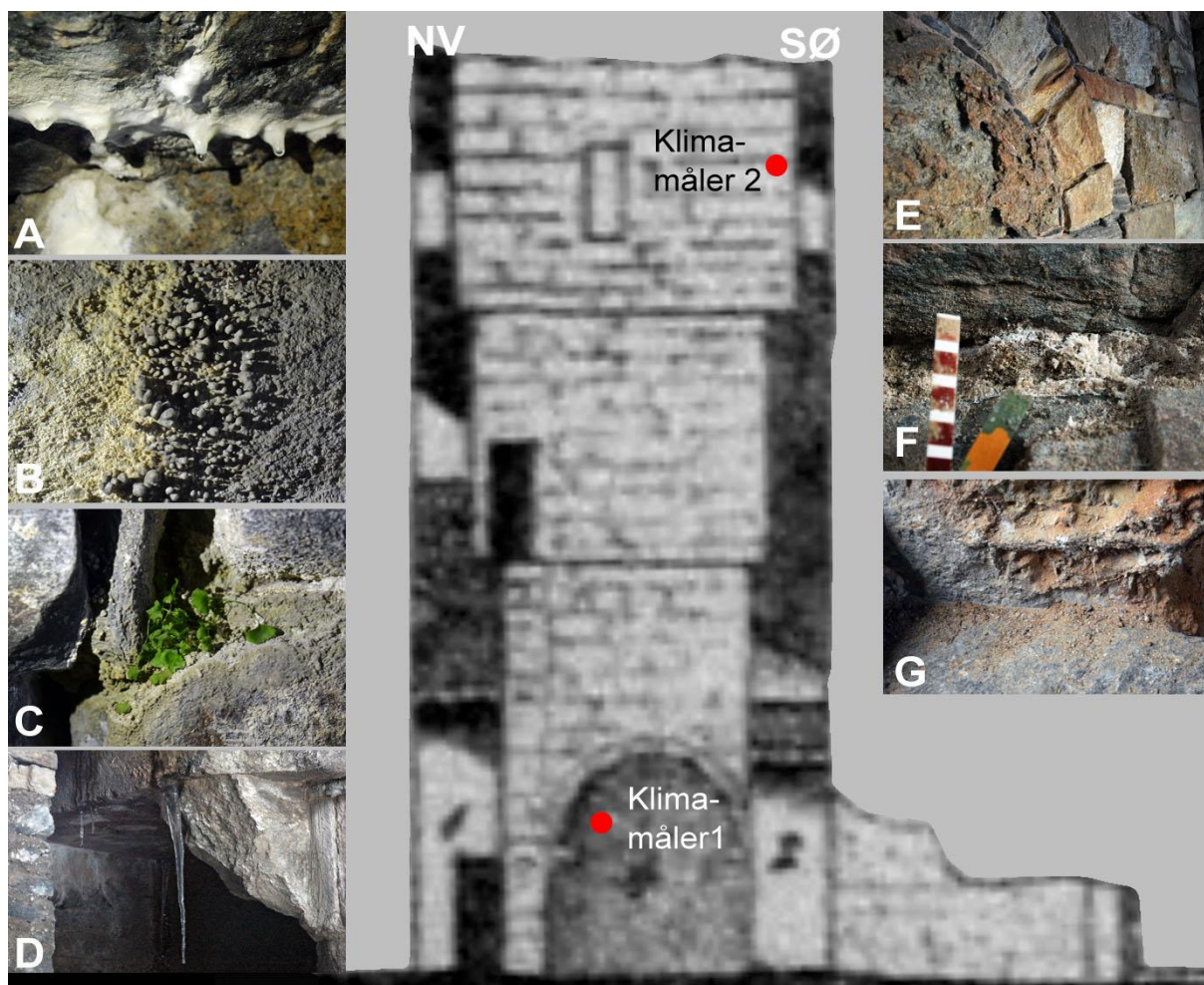


Figur 5: Østveggen i Albanustårnets tredje etasje – en god representant for tilstanden inne i tårnet. Vi ser at gneismurverket er sterkt forvitret og til dels uten mørtel i fugene. De gule steinene er forvitret metaolivinstein. Tilstanden til murverket er fortsatt preget av brannen på 1300-tallet. Foto: Per Storemyr.

1.2 Hva er årsakene til forvitringen?

Hva er årsakene til at det ryr så mye fra murverket? Inne i tårnet er det ytterst sjelden, med års mellomrom, at frost er et problem. Sist gang det ble observert litt isdannelse i fuktige områder innvendig var i 2010 (se Storemyr 2010a). Derfor kan en utelukke frost som en betydelig forvittrings-årsak. Likeledes er det på steder der forvitringen er verst ingen synlige tegn til biologisk vekst, slik som mose, alger og sopp. Det finnes algevekst, til og med planter, i de fuktigste delene av murverket inne, typisk ved vindusåpninger, der det er lyst (Figur 6). Men her ryr det lite eller ingenting fra veggene, tilstanden er noenlunde stabil. Her er heller kondens og lekkasjer et problem, og sistnevnte antyder at det særdeles viktig å opprettholde godt vedlikehold knyttet til fuger og sprekker utendørs. Men altså: frost og biologisk vekst er ikke et problem der det ryr mye fra murverket.

En annen mulig årsak er kjemisk forvitring. Det kan dreie seg om oppløsning av kalk i mørtel, både i eldre kalkmørtel og nyere sementfuger (brukt under restaureringer). Det kan også dreie seg om oppløsning og nydannelse av mineraler i den nokså ustabile metaolivinsteinen, som er så viktig som bygningsstein på Selja, og som har egenskaper som ligner kleberstein. Bruken av denne steinen og denne formen for kjemisk forvitring er beskrevet i detalj tidligere rapporter (Storemyr 2010a, 2015). Siden det trengs betydelig fuktighet for at akselererende kjemisk forvitring kan finne sted, så er den av mindre relevans for de stedene der det ryr mest fra murverket, for her er det jo noenlunde tørt. I fuktige deler av murverket er det imidlertid åpenbart at kjemisk forvitring finner sted. Men her dreier det seg om dannelse av kalk-stalaktitter, både lange og svært korte («blomkålskorper»), typisk sett i



Figur 6: Tverrsnitt av Albanustårnet sett mot nord, tegnet av Krefting i 1868. Her er lokalisering av klimamålere tegnet inn. Bilderekken på venstre side illustrerer forholdene i de vestre, fuktigere deler av tårnet innendørs: A) kalkskorper/stalktitter, B) «blomkålkorper» av kalk; C) biologisk vekst i vindussmyg; D) sjeldne istapper, her ved inngangen til tårn trappen i 1 etasje. Den høyre bilde rekken viser forholdene i de østre, tørrere delene av tårnet inne: E) forvitret metaolivinstein; F) saltutblomstringer (her natriumkarbonater); G) material som ryr fra veggene. Fotos: Per Storemyr

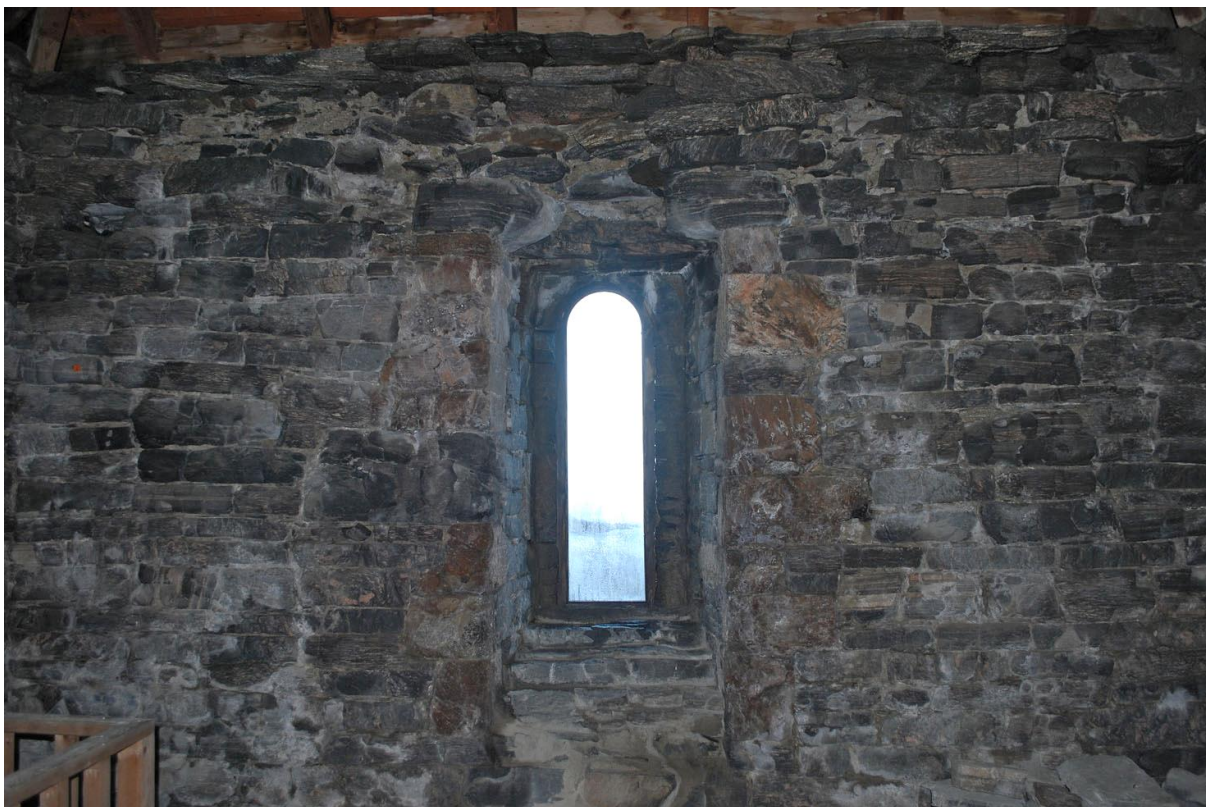
underkant av buer og i fuger. Disse har sin opprinnelse i kalk som er løst ut fra mørtelfuger. Her er det altså så mye fukt i murverket at kalken og sementen kjemisk løses opp og felles ut omtrent som i en kalksteinshule.

En siste mulig årsak til forvitringen er utvidelse av mineraler i stein og mørtel når det blir fuktig, med påfølgende kontraksjon når det blir tørt, såkalt hygrisk dilatasjon. I Norge har vi eksempler på at spesielle klebersteiner forvitrer mye av slike årsaker, spesielt på Nidarosdomen, gjerne i kombinasjon med samtidig termisk kontraksjon (rask avkjøling, f.eks. solvendte steder som blir påvirket av kraftig regnvær, se Storemyr 1997). Men på Selja kan ikke slik forvitring observeres utvendig (Storemyr 2010a) og da er den heller ikke viktig innvendig.

1.3 Et mikroklima i tårnet mellom vått og tørt

Albanustårnet har, som vi forstår, et spesielt innendørs mikroklima.² I de vestre deler av murverket er det så vått at det dannes stalaktitter, dette skjer ikke i de østre deler. Årsakene er åpenbare: Tårnet

² Dette avsnittet er basert på generell kunnskap om klimaet på Nord-Vestlandet og erfaringer gjort gjennom 10 år og ca. 20 besøk på Selja i alle sesonger.



Figur 7: En fuktig vestvegg i tredje etasje i Albanustårnet, 27. januar 2020. Foto: Per Storemyr



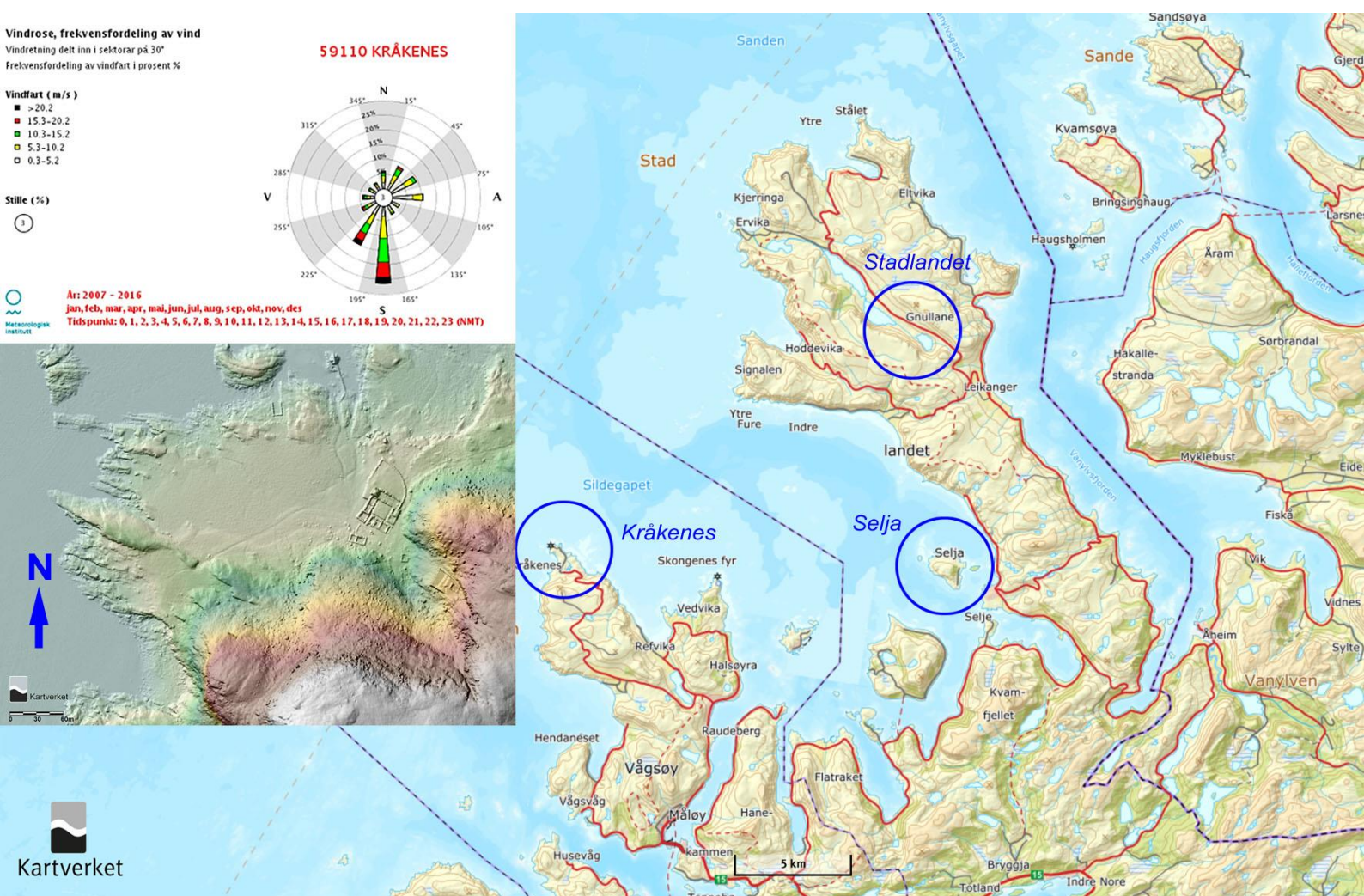
Figur 8: Det vestre vinduet i tredje etasje, 27. januar 2020. Her er det vått på grunn av en kombinasjon av lekkasjer og kondens. Foto: Per Storemyr.



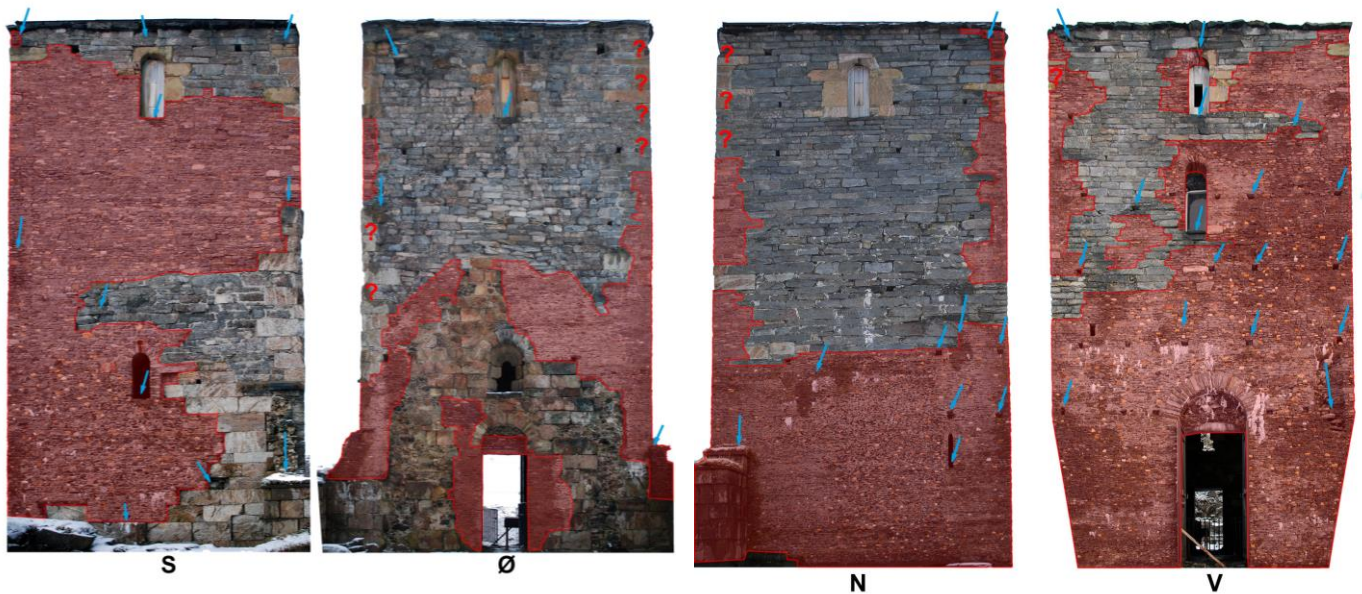
Figur 9: Det østre vinduet i tredje etasje, 27. januar 2020. Her er det helt tørt, jfr. figuren over. Foto: Per Storemyr.

er sterkt eksponert for vind og regn fra sør og vest, ved storm, så trenger slagregn inn gjennom enhver utendørs sprekke i fugene. Murverket forblir med andre ord fuktig, og da forblir det også relativt kaldt. Dermed øker sjansen for kondensdannelse når været slår om fra kaldt til mildt. Vi har en selvforsterkende situasjon: Mye nedbør gir lekkasjer, murverket blir kaldt, det blir mye kondens. Det blir veldig fuktig og vi får kjemisk forvitring (i fugene), kanskje litt frostforvitring og algevekst.

Slagregn når sjelden de østre deler av tårnet. Disse delene vender mot klosteret og helgenanlegget der det ligger under en vestvendt fjellskråning. Og øya Selja ligger i en bred fjord, i Sildagapet, inn mot vestvendte fjellskråninger på fastlandet (Figur 10). Er det østa- og sønnavind, så kan vi få en føneeffekt. Den er ikke så stor som i f.eks. fjordarmene på Sunnmøre, der temperaturen på vinterstid kan gå opp mot 20 grader når det blåser fra øst. Det er fordi fjellene på fastlandet er ikke høye nok, men en kan komme opp i 10-12 grader. Det viktige for vår del er at de østre delene av murverket ikke blir sterkt påvirket av slagregn og oftere kan tørke opp.



Figur 10: Kart over Selja med målestasjoner fra DNMI som er benyttet i foreliggende arbeid (Kråkenes – T og RH, Stadlandet – nedbør) (kart fra www.norgeskart.no). Innfelt: Vindrose fra Kråkenes 2007-2016. Legg merke til at den fremherskende vindretningen er sørlig. På Selja er den trolig mer vestlig på grunn av topografien (windrose fra DNMI, via eKlima, <http://sharki.oslo.dnmi.no>). Innfelt er også høydemodell over de nære omgivelser til Selja kloster, den viser hvordan klosteret er orientert mot NV og mot øst er beskyttet av bratte fjellskråninger. Høydemodell fra <https://hoydedata.no/LaserInnsyn/>. Illustrasjon: Per Storemyr.



Figur 11: Restaurerte deler av tårnet, der det er benyttet et «skall» av småfallen stein satt i sement (1912-15). Piler indikerer lekkasjepunkter. Illustrasjon/kartlegging: Per Storemyr.

Det finnes også en ytterligere, og sannsynlig viktig årsak til at det blir uforholdsmessig fuktig i de vestlige delene av tårnet innendørs. Store deler av vestfasaden, sørfasaden, halvparten av østfasaden og kun få deler av østfasaden er restaurert med småfallen stein satt i sementmørtel (1912-15, se videre beskrivelse i kap. 2). Det er det ytre murskallet som er restaurert på denne måten, til dels finner vi det også inne i første etasje i oppgangen til trappen i det nordvestre hjørnet.

Dette «påklistrede» murverket har en del sprekker i fuger som åpner vei for vanninntrengning. Da det trolig er nokså tett, som sementmurverk gjerne er, så kan det hindre effektiv uttørking etter regnskyll. Det kan med andre ord foregå en viss oppkonsentrering av fukt bak dette «skallet». Her kan også være kuldebroer som fremmer kondens. Indikasjonene er kalkskorper og små stalaktitter (som på innvendig murverk).

Det finnes også sementfuger i det bevarte middelaldermurverket, men i mindre grad og dessuten er mange av fugene, spesielt på østfasaden delvis åpne og med lite mørtel. Slike områder vil åpenbart ha lettere for å tørke opp etter regnvær.



Figur 12: T.v.: Kalkskorper og stalaktitter i portalåpningen på vestfasaden indikerer fukt bak det restaurerte murskallet over. Bildet er tatt i 2010 og stalaktitten har blitt lengre etter den tid. T.h.: Forvitret middelaldermurverk med delvis åpne fuger på østfasaden, et helt annerledes murverk. Foto: Per Storemyr.



Figur 13: Et resultat av mye fukt i de vestlige deler av tårnet: Store deler av runeinskripsjonen i vindeltrappen i det nordøstre hjørnet er dekket av kalkskorper, utviklet som følge av lekkasjer, kanskje kondens og sementholdig mørtel. Foto: Per Storemyr 2010.



Figur 14: Et annet resultat av fuktige forhold: Råte i treverk på gulvet under vestveggen i andre etasje. Foto: Per Storemyr 2020.



Figur 15: Salt og saltforvitring ved den østre portalen i første etasje i Albanustårnet. Her dreier det seg om natriumkarbonater. Bildet er tatt på en tørr septemberdag i 2016. Foto: Per Storemyr.

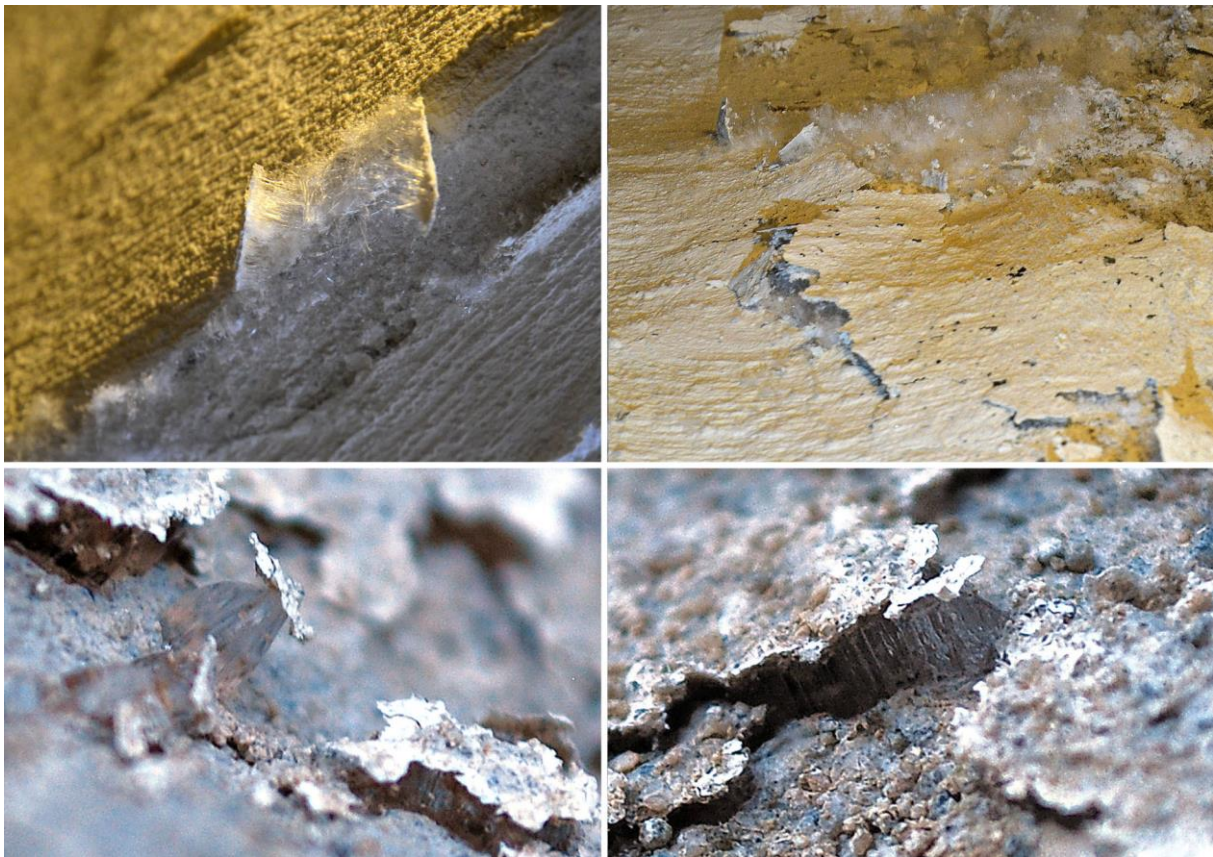
1.4 Generell innføring i saltforvitring

Vi har over antydnet at saltforvitring er den sannsynlige årsaken til materialnedfall der det ryr som verst i tårnet. Saltforvitring er litt som frostforvitring. Er det fuktig og kaldt nok, så kan iskrystaller dannes og vokse like under overflaten på mørtel og stein. Iskrystallene utøver et trykk i materialstrukturen og kan sprengte løs små og store biter.³ Resultatet er at material ryr ned som små flak og pulver. Det er tilsvarende for salt, bare mer komplekst.⁴

Dannelse av iskrystaller involverer kun en kjemisk forbindelse, vann – H_2O . Salt involverer mange ioneforbindelser; sulfater, klorider, karbonater og nitrater av natrium, kalsium, kalium og magnesium (og flere som ikke er så relevante for gammelt murverk). Felles for de ulike saltforbindelsene er at de stort sett er lettløselige. De kan derfor krystallisere ved ulike, spesifikke fuktforhold (relativ luftfuktighet), forenklet; *når det blir tørt nok*. Akkurat som is, når det blir kaldt nok. Når salt krystalliserer, så sprenger de i overflaten av murverket.

³ Det finnes lite, relevant litteratur om frostforvitring og dens likhet med saltforvitring. Ofte har en antatt at det er selve utvidelsen av vann når det fryser til is som sprenger løs stein og mørtel. Det er mye mer komplekst, se bl.a. disse internett-artiklene for en innføring, her finnes også videre referanser: <https://per-storemyr.net/2018/10/30/novel-micro-images-of-lime-mortar-destruction-by-frost-weathering/>; <https://per-storemyr.net/2018/02/09/taken-by-the-frost-the-beauty-and-destructive-force-of-ice-growth-on-historic-masonry/>

⁴ Saltforvitring er beskrevet og forklart i et enormt antall publikasjoner. En av de beste er Arnold og Zehnder 1991. Se også Charola og Bläuer 2015. For norske forhold, se Storemyr 1997. Se dessuten det store ressursnettstedet www.saltwiki.net om saltforvitringens kompleksitet. Se også relevante kapitler i Doehne og Price 2010 for nyere erkjennelser om hvordan saltforvitring påvirker kulturminner.



Figur 16: På kalkede/slemmede steinoverflater kan vi ofte best se saltforvitring (over) og frostforvitring (under) i sanntid. Bildene over er fra Rosenkrantzårnet i Bergen, der natriumsulfatet mirabilitt krystalliserer like under den slemmede overflaten og sprenger denne løs. Under ser vi det tilsvarende fenomenet når is krystalliserer like under kalkslemming på kalkovnen i Kvernsteinsparken i Hyllestad. Kalkslemmingen er i begge tilfeller ca. 1 mm tykk. Fotos: Per Storemyr.

Det er høyst sannsynlig det som skjer i Albanustårnet, på de tørreste stedene. I de fuktigere delene er det stort sett for fuktig til at saltkrystallisasjon nå kan finne sted. Det blir litt som med temperatur: Er det for varmt, så blir det ingen dannelse av iskrystaller.

Problemet i Albanustårnet er at man ikke lett kan observere de lettløselige saltene der det ryr som mest fra veggene. Men på flere andre steder, der det ryr mindre, kan vi i tørrere perioder se mye saltutblomstringer. De er tidligere analysert og det viser seg at vi har å gjøre med en rekke salter (Storemyr 2010a):

- **Mirabilitt** og **thenarditt**; natriumsulfat med ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) og uten (Na_2SO_4) krystallvann
- **Natritt** og **thermonatritt**; natriumkarbonat med mye ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) og lite ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) krystallvann (alkaliske salter, kan testes med pH-papir)
- **Trona**; natriumhydrogenkarbonat med krystallvann ($\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ((alkalisk salt, kan testes med pH-papir)
- **Gips**; kalsiumsulfat med krystallvann ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

Det er dessuten sterke indikasjoner på at **halitt** (vanlig koksalt, HCl) er en betydelig saltforbindelse i tårnet og at det finnes **nitrater** (NO_3), uten at de kan bestemmes nærmere. I tillegg finnes det naturligvis mye kalk, kalsiumkarbonat (CaCO_3) i form av bl.a. stalaktitter. Men kalk kan normalt ikke bidra til saltforvitring; det er et salt som er altfor tungt løselig til at det kan reagere med luftfuktigheten alene, slik de andre, lettløselige saltene kan. Vi kaller de lettløselige saltene for hygroscopiske salter; det er fordi de kan reagere med luftfuktigheten. De lettløselige saltene natriumsulfater, natriumkarbonater og halitt blir viktige tema i denne rapporten.



Figur 17: Stalaktitter i tredje etasje i Albanustårnet, over vinduet som vender mot vest. Stalaktittene er en indikasjon på svært fuktige forhold og har sin opprinnelse i oppløsning av kalk i sement (og delvis også gammel kalkmørtel). Foto: Per Storemyr.

1.5 Kilder til salt i Albanustårnet

Kalk, i form av stalktitter og ulike skorper, kommer fra langvarig oppløsning av mørtel, av gammel kalkmørtel⁵ og moderne sementmørtel, sistnevnte først introdusert på Albanustårnet under den omfattende restaureringen mellom 1912 og 1915 (kap. 2). Stalaktitter og kalkskorper er indikatorer på svært mye fukt. Gips kan dannes fra reaksjoner mellom luftforurensning (svoveldioksid, sulfat) og kalk i murverk, og var tidligere svært vanlig i industristrøk og i byene. Men på Selja, som i et utall andre tilfeller (ikke minst Nidarosdomen!), så dannes gips først og fremst fra reaksjon mellom svovelholdige og kalkholdige komponenter i bygningsmaterialene. Svovel frigjøres til sulfat ved forvitring av metallsulfider, som finnes som sporelementer i stein. Kalk er det nok av i murverk, ikke minst i mørtelen.⁶

Men de viktigste saltene i Albanustårnet er trolig natriumsulfater. De dannes ved reaksjoner mellom sulfat i murverket (og evt. fra havet) og natrium fra havet. Men natriumsulfater kan også dannes ved komplekse reaksjoner mellom tilgjengelig sulfat i murverket og natriumkarbonater fra forvitring/oppløsning av sementmørtel. Sement har en lei tendens til å inneholde mye natrium og gir ved slike reaksjoner opphav til mer ødeleggende salter enn de sementen selv produserer.⁷

⁵ Om kalkmørtel på Selja, se Storemyr 2019 og <https://per-storemyr.net/2019/09/06/selja-kloster-hvor-kom-middelalderens-kalkmortel-fra/>.

⁶ Kilder til salt er tatt opp i et stort antall publikasjoner, fra antikken til i dag. Se Arnold og Zehnder 1991 for en innføring. For norske forhold, se Storemyr 1997.

⁷ Arnold og Zehnder 1991. For norske forhold, se Storemyr 1997, for Albanustårnet, se Storemyr 2010a.



Figur 18: Regn og storm på Selja i november 2010. Fra sjøsprøyt blir det tilført klorid og mindre mengder av bl.a. sulfat til murverket på Albanustårnet. Foto: Per Storemyr.

Fra havet kommer natrium i form av halitt, natriumklorid. Med den sterke eksponeringen, rett ved Stadhavet, vil århundrer med sjøsprøyt ha tilført Albanustårnet mye natriumklorid (og mindre mengder av de øvrige saltkomponentene i havet, f.eks. kaliumklorid og ikke minst sulfat). Men klorid og natrium kan potensielt også komme fra gammel (middelaldersk) kalkmørtel. Det er fordi vi ikke kan være sikre på om den brente kalken ble lesket med ferskvann. Ble den lesket med saltvann, så gir det 3,5% salt. Dessuten vet vi ikke om tilslaget til mørtelen kom fra sand på strender, eller fra sand som ikke har mye salt; f.eks. gamle strender der saltet er vasket ut av regnvær gjennom lang tid. Nitrat kommer fra organiske prosesser. Den mest nærliggende kilden til de mindre mengdene nitrat vi har observert i murverket, er guano fra fugl. En må anta at tårnet var et yndet sted for reirbygging i hundreårene det sto uten tak. Guano kan også tilføre klorider og sulfater, men det er usikkert hvor viktig dette er på Selja.

1.6. Studier om salt og hypoteser for saltforvitring i Albanustårnet

Vi vet altså at det er salt i Albanustårnet, mer enn nok fukt til å transporter dem omkring i murverket, og at saltene krystalliserer som utblomstringer på overflaten (*efflorescence*) innendørs. Men vi kan ikke observere mye salt der det ryr som verst fra murverket i de tørrere delene. Vi kan likevel anta at det dreier seg om saltforvitring, at saltene krystalliserer inne i porene i stein og mørtel, nær steinoverflaten (*subflorescence*). Dette er den vanligste formen for ødeleggende saltforvitring (se bl.a. Doehne og Price 2010). Vi kjenner til en rekke gamle steintårn der vi kan se at salt, fra ulike kilder, ødelegger murene *innvendig*. Eksempler i Norge inkluderer Nidarosdomen og Erkebispegården i Trondheim, mange bygninger i Bergen (spesielt Rosenkrantzstårnet), en rekke middelalder- og senere steinbygninger i Trøndelag, f.eks. Vår Frue kirke i Trondheim, Værnes kirke og Orkdal kirke) og ikke minst bygninger i Rogaland (f.eks. kortårnene på Stavanger domkirke og Sørbø kirke). Internasjonalt ser vi det samme.⁸

⁸ Se Storemyr 1997; 2000; 2002 for norske forhold, med referanser til det internasjonale bildet. Se ellers www.saltwiki.net og Doehne og Price 2010. Se Bjelland et al. 2018 for en studie gjort på Stavanger domkirke.



Figur 19: Rosenkrantzstårnet i Bergen er sterkt preget av saltforvitring innendørs. Her er det benyttet svært mye sement under restaureringer og de viktigste saltene er, ut fra egne observasjoner, natriumkarbonater og natriumsulfater. Foto: Per Storemyr.

Vi har ingen gode studier av saltforvitring langs ytterkystene av Norge, på Vestlandet, i så måte er foreliggende studie den første. Men Mottershead (1998; 2000) har gjort interessante studier av 5-600 år gamle steinbygninger langs kystene av England som er relevante. Disse studiene går ikke i detalj om saltforvitring, men de viser et påfallende fenomen, nemlig at de bygningene som står praktisk talt «på stranda» er mye mer utsatt for forvitring enn bygninger i større avstand fra strandlinja. Mottershead forklarer dette med saltpåvirkningen fra havet og han har trolig et godt poeng.

Men vi kjenner også til kulturminner og murverk som ikke får overvettets store problemer i tilsvarende saltbelastede, marine omgivelser som Albanustårnet. Et viktig eksempel er ruinen av den middelalderiske domkirken på Kirkjubøur på Færøylene, så å si plassert midt i Atlanterhavet. Her viser det seg at mesteparten av ruinen er i god stand, til tross for ekstrem saltpåvirkning fra havet; det er først og fremst spesielle, myke og porøse vulkanske stein som forvitrer betydelig på grunn av salt (Figur 20).⁹ Det er også forbausende lite salter generelt i murverket, slik Klensz Larsen (2008) har analysert dem. Han forklarer dette med at regnvær har vasket mye salt ut av stein og mørtel i ruinen. I andre deler av verden er salt fra havet et stort problem (se bl.a. Chabas et al. 2001 og Smith et al. 2004), men i slike tilfeller har vi å gjøre med bygninger under tak i varmere strøk. Da kan ikke regnvær på samme måte vaske ut salt som i en ruin; de kan forbli i murverket og oppkonsentreres.

På Kirkjubøur er det åpenbart at noen steintyper er mer sårbare overfor forvitring enn andre. Det er litt som i Albanustårnet, der brann har medført at noen stein er mer sårbare/porøse enn andre (Storemyr 2010). Og om ikke det er så mye salt i Kirkjubøur, så er det likevel nok tilstede der de kan konsentrere seg i mer tilbaketrukne deler av murverket og gi betydelig forvitring av de porøse steinene. Vi burde kunne se saltene, men slik er det ikke. En sannsynlig forklaring er at de krystalliserer som *subflorescence* og at det er så fuktig og kjølig her midt i Atlanterhavet at saltene sjelden får anledning til å krystallisere. Halitt, for eksempel, har en såkalt likevekstfuktighet på 75%. Dette er en teoretisk verdi, den betyr at om relativ luftfuktighet er over 75%, så vil ikke halitt krystallisere, da forblir saltet i løsning i murverket og vil ikke forårsake skade. I praksis er det annerledes, ofte må luftfuktigheten ned til 65% om en skal få krystallisering, og dermed saltforvitring.¹⁰ Det er sjelden vi får så lave fuktnivåer over lang nok tid i kjølige, maritime miljøer – som på Færøylene og Selja.

Det er annerledes med natriumsulfater (og natriumkarbonater), salter som oppfører seg komplekst i området mellom 60-65 og 90% luftfuktighet. Vi kjenner til et utall steder der disse saltene gjør enormt stor skade. Natriumsulfat (mirabilitt og thenarditt) er endog kjent for å være salt som gir mest saltforvitring, ikke minst i maritime miljøer. Men det er aldri lett å direkte observere slik forvitring i kjølige, fuktige og vindfulle omgivelser. Det er mye enklere der fuktigheten er lavere, som f.eks. i oppvarmede rom i gamle steinbygninger, der relativ luftfuktighet kan gå ned til 30-60% vinterstid.¹¹

En viktig observasjon relatert til disse fenomenene er at opptørkingsraten, altså hvor raskt det tørker opp etter en fukthendelse (regn, lekkasje, kondens osv.), er av stor betydning for hvordan saltene oppfører seg. Ved svært langsom opptørking, typisk i et kjellerrom med lite luftsirkulasjon, kan f.eks. mirabilitt danne regelrette «saltskjegg» på veggene. Dette er den mest omfattende formen for

⁹ Domkirkeruinen på Kirkjubøur er stort sett bygd med hard basalt, men i portaler, vinduer og andre detaljer er det benyttet mykere, mer porøs basalt som var lettere å hogge enn den harde varianten (egne observasjoner).

¹⁰ Se Bionda og Storemyr 2002 og Storemyr 2002.

¹¹ Se Doehne og Price 2010 og www.saltwiki.net.



Figur 20: Sørportalen i skipet på ruinen av domkirken i Kirkjubøur. Selve murverket av hard basalt er i utmerket stand- De mykere og mer porøse steinene i portalen har betydelig forvitring, mest sannsynlig på grunn av salt. Saltforvitringen her kommer i en form vi kjenner som tafoni, som gir et hullet utseende. Foto: Per Storemyr.

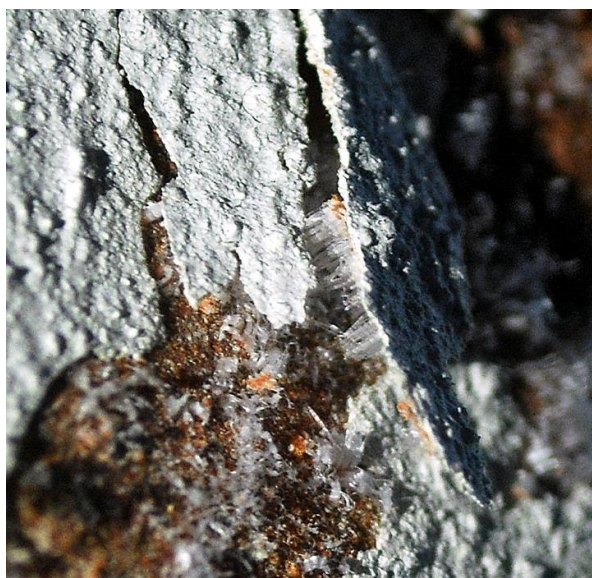


Figur 21: I myke, porøse basaltlag på Færøyene opptrer den samme tafoni-forvitringen vi kan observere på domkirkeruinen i Kirkjubøur. Foto: Per Storemyr.

efflorescence. Men slik oppblomstring på overflaten følges ikke nødvendigvis av omfattende skader, det er fordi saltene bare i liten grad krystalliserer under materialoverflaten. Motsatt vil relativt rask opptørking kunne føre til *subflorescence* (se bl.a. Selwitz og Doehne 2002, von Konow 2002). Dette er typisk utendørs (der salt ikke vaskes vekk av regn) og i rom med høy luftsirkulasjon. Dette er et fenomen med stor relevans til saltforvitringen nevnt over på Fjørøyene, der det vindfulle klimaet sørger for rask opptørking. Det er også relevant innendørs i Albanustårnet. Her har vi et tilnærmet «uteklima», ved vindfulle forhold kan opptørkingen etter fuktepisoder skje forbausende raskt (se Storemyr 2010a). Men i praktiske situasjoner har vi nok et samspill mellom *efflorescence* og *subflorescence*. Opptørkingsforhold kan variere sterkt på samme sted til ulike tid og vurderingene over viser kun noen viktige tendenser. Dog har man benyttet slik kunnskap ved utendørs restaurering, bl.a. i Port Arthur i Australia der det ble plantet trær ved siden av sterkt saltbelastede objekter. Trærne ga mer skygge og reduserte faren for rask opptørking og dermed for *subflorescence* (Thorn og Piper 1996).



Figur 22 (over): Saltutblomstringer som skjegg: I et stabilt «kjellerklima» kan mirabilitt danne voldsomme efflorescences som ikke nødvendigvis skader murverket mye. Her fra Lavetthuset i Erkebispegården i Trondheim. Foto Per Storemyr.



Figur 23: I områder med rask opptørking er det større fare for at salt kan blomstre ut under overflaten som subflorescence og – som her – sprengte løs kalkslemming. Fra domkirken i Stavanger. Foto: Per Storemyr.

En annen viktig observasjon er at nedfall av material ikke nødvendigvis skjer mens saltkrystallisasjon pågår. Tvert imot faller det forvitrede materialet oftest ned når det blir fuktig nok til at saltene går i oppløsning. Torborg von Konow (2002: 15-26, 43-79) gjorde en omfattende studie av bl.a. dette fenomenet i festningsverket Sveaborg utenfor Helsingfors fra 1990-tallet og utover. Hun benyttet seg både av laboratoriestudier i et eget innrettet testrom og feltstudier, og samlet nedfalt material regelmessig fra ulike deler av innendørs teglvegger i festningen. Alt ble fulgt av målinger av inneklimate, analyser av salt og visuelle observasjoner.

Deler av den store festningen, spesielt bygningen Tenaille von Fersen, er ekstremt saltbelastet, med natritt/thermonatritt, mirabilitt/thenarditt, halitt og natriumnitrat og som de viktigste saltene – altså salter som også forekommer i Albanustårnet, men i svært mye større mengder og i delvis oppvarmede rom. Mirabilitt og natritt startet krystalliseringen når inneklimateet vekslet fra tørt til fuktig. Når relativ luftfuktighet gikk over 80% så forsvant saltene, helt i tråd med teorien. De forble borte når fuktigheten sank igjen, og kom så tilbake ved neste økning i fukt.

I feltsituasjoner inne i den oppvarmede bygningen var det på sommeren med de høyeste fuktnivåene (omkring 80%) at det falt ned mest material, i størrelsesorden 10 ganger mer enn ved lavere fuktnivåer på 40-50% om vinteren. Forklaringen på dette fenomenet er kompleks (se Wendler 2002), men vi kan visualisere det ved observasjoner knyttet til frostforvitring (se kap. 1.4). Det er et velkjent fenomen at frosten, iskrystallene, sprenger løs stein i en brattkant når det er som kaldest. Men steinene ramler sjelden ned før det blir mildvær på våren. De blir holdt fast av frosten og løsner når mildværet kommer. I mikroskala kan det samme skje når saltkrystallene løses opp på et murverk.



Figur 24 (over): Tenaille von Fersen i Sveaborg. Dekket med salter som ødelegger puss og tegl. Foto: Per Storemyr.



Figur 25: Salt på teglvegger i Sveaborg. Foto: Per Storemyr.



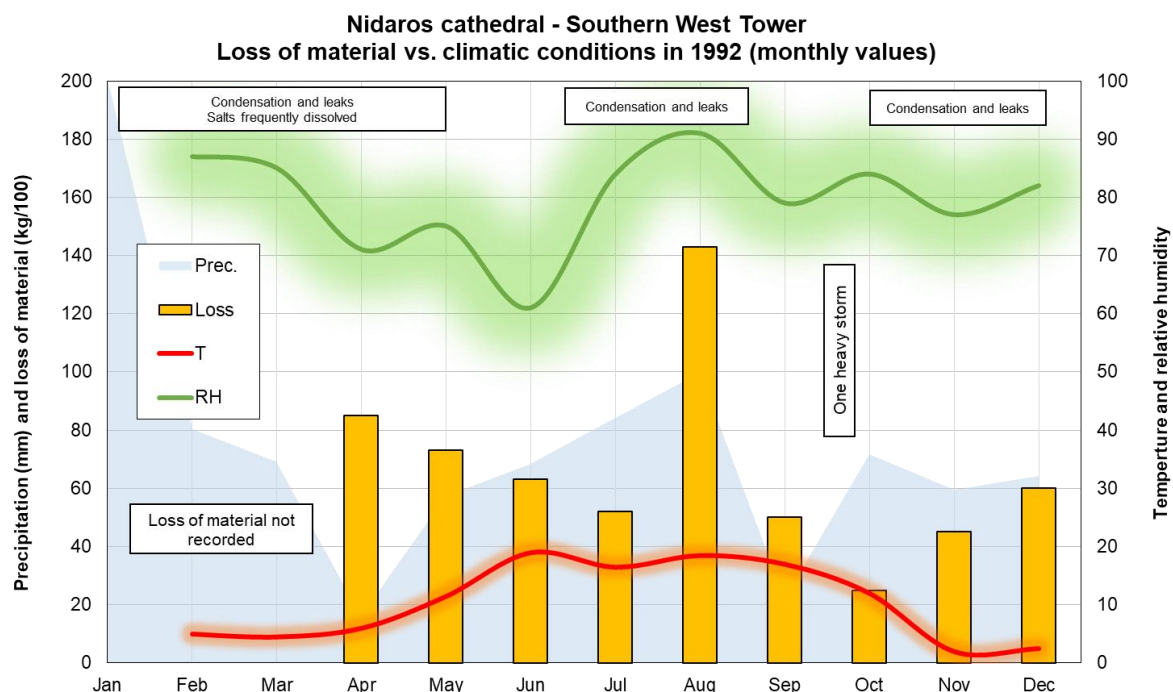
Figur 26: Nidarosdomens 50 m høye søndre vesttårn er bygd med sementmørtler og betong (øverste etasje) og kledd med kleberstein. Det var ferdig i 1969 og fikk nærmest umiddelbart store vannlekkasjer. Det har ført til massiv saltforvitring forårsaket av alkaliske natriumkarbonater i bl.a. den høye vindeltrappen. Foto: Per Storemyr.

En tilsvarende situasjon som i Sveaborg har vi i det søndre vesttårnet på Nidarosdomen. Her gjorde Storemyr (1997: 244-255) en lengre studie etter samme mønster for å forstå den massive forvitringen i den nesten 50 m høye vindeltrappen – forvitring forårsaket av store lekkasjer og alkaliske salter fra betongkonstruksjoner og sementmørtler som tårnet er delvis bygd med (ferdig i 1969).

Saltene var nesten utelukkende natritt/thermonatritt og oppførte seg svært likt de samme saltene i Sveaborg – og også mirabilitt/thenarditt i Sveaborg, men til ulike tider på året. Det er fordi vindeltrappen i Nidarosdomen ikke er oppvarmet, men får litt varme fra det store kirkerommet.

I 1992 var saltene i oppløsning i de fuktigste periodene på vinteren og krystalliserte i løpet av den tørrere våren som natritt. Da dehydrerte natritt til thermonatritt som i løpet av den fuktigere sommeren gikk helt i oppløsning. I kortere, tørrere perioder fikk man kort oppblomstring av natritt som igjen dehydrerte til thermonatritt tidlig høst, da det var tørrere. På grunn av lekkasjer og kondensasjon var det nokså kaotiske forhold i løpet av senhøsten, men natritt krystalliserte i flere tørrere perioder.

Som diagrammet (Figur 27) på neste side viser, så fant det største materialnedfallet sted i de fuktigste periodene, eller like etter disse periodene, ved relativ luftfuktighet (RH) over ca. 80%. Det vil si i perioder der praktisk talt alt salt var i oppløsning. Dette er helt tilsvarende resultatene Torborg von Konow kom frem til på Sveaborg, og som ble bekreftet av Eberhard Wendler ved laboratorieforsk.



Figur 27: Inneklima, nedbør («Prec.») og materialnedfall («Loss») knyttet til vindeltrappen i Nidarosdomens søndre vesttårn i 1992. Vi ser at materialtapet er størst i den fuktigste perioden på sommeren (august). Saltene som forårsaker tapet krystalliserer imidlertid i april/mai/juni. Alt omregnet til månedsverdier, RH-variasjoner er indikert med lysegrønn farge. Etter Storemyr (1997).

Vi kjenner flere langtidsstudier/overvåkning i bl.a. Sveits¹² som gir noenlunde tilsvarende resultater som på Sveaborg og i Nidarosdomen. Men de sveitsiske studiene har stort sett vært knyttet til middelalderse kalkmalerier, altså en type kulturminner som er svært sårbare overfor saltforvitring. Det skal veldig lite saltforvitring til før slike malerier får store ødeleggelser.

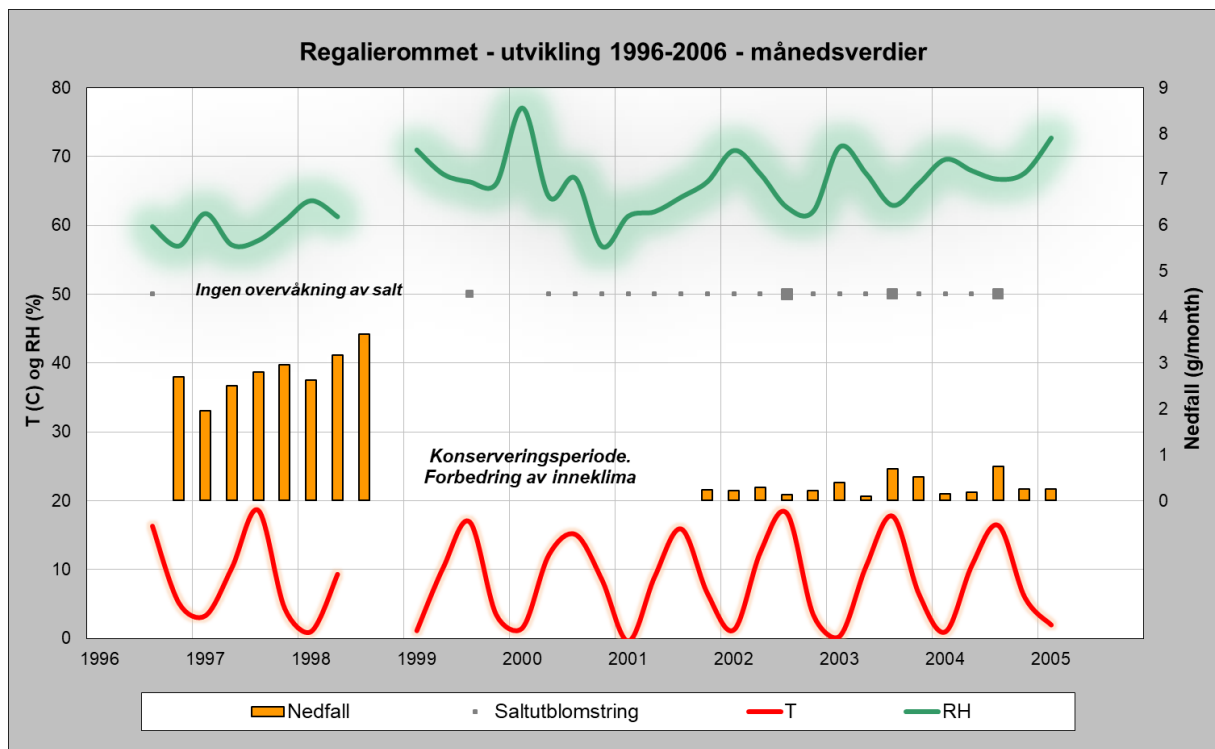
Studiene i Sveits har involvert «oppfeiling» av materialnedfall, men ikke på samme systematiske basis som på Sveaborg og i Nidarosdomen. Også langtidsstudien fra Regalierrommet i Erkebispegården i Trondheim gjorde bruk av systematisk oppfeiling (se bl.a. Franz og Storemyr 2000, Storemyr 2002, 2010b) (Figur 28-Figur 29). Regalierrommet er fullstendig utsmykket med kalkmalerier fra 1600-tallet og restaurert i mange faser frem til vår tid. På grunn av lekkasjer, et altfor varmt romklima og enorm forvitring, ble rommet på 1990-tallet gjenstand for omfattende studier som også involverte overvåkning knyttet til konserveringsarbeider. Overvåkingen kom til å vare i mer enn 10 år, hvorav nedfalt material ble samlet opp på sesongbasis i 6 år. Studiene tok også for seg hele spekteret av metoder for å forstå situasjonen (inne- og uteklima, visuell observasjon, saltanalyser og andre materialanalyser, studier av bygningshistorie, konstruksjon, materialer og maleteknikker, pigmenter og bindemidler osv.).

Hovedresultatene fra overvåkingen var at materialnedfallet sank kraftig etter ulike konserveringstiltak, inklusive reduksjon av lekkasjer og økning av relativ luftfuktighet ved hjelp av enkle midler, først og fremst reduksjon av innetemperatur. Målet var å holde saltene i løsnings ved høy nok RH (da må temperaturen ned), slik at de ikke kunne krystallisere og skade maleriene. Vi fikk dessverre ikke RH på naturlig vis høyt nok opp på et ønsket nivå over ca. 70% om sommeren og tidlig høst. Til dette er det faktisk for tørt og varmt om sommeren i Trondheim(!)

¹² Arnold & Zehnder 1991, se også litteratur om monitoring, <https://www.saltwiki.net/index.php/Monitoring>



Figur 28: Vestveggen av Regalierommet i Erkebispegården, Trondheim. Foto: Kjartan Hauglid. Innfelt hovedårsaken til at kalkmaleriene fra 1600- og 1800-tallet forvitrer, saltene halitt og natriumnitrat, fra Storemyr 2002.



Figur 29: Materialnedfall (oransje) og saltutblomstringer (firkanter – jo større, jo mer salt) sammenholdt med temperatur og relativ luftfuktighet i Regalierommet, Erkebispegården i Trondheim 1996-2006. Månedsværdier. Før konservering og styring av inneklime fra 1999 til 2001/2002 var det høyt nedfall fra en del av vestveggen, økning av RH ved enkle midler (redusert oppvarming, lukking av dører) bedret forholdene. Saltforvitring skjer likevel som følge av lav RH sommer/høst. Materialnedfallet er høyest rett i etterkant av den sterkeste utblomstringen. Etter Storemyr (2010b)

Dermed sank RH til ca. 60-65% og man fikk fortsatt en viss utblomstring av halitt og natriumnitrat (de viktigste saltene i dette tilfellet) på sommeren/høsten

Nedfallet fulgte et litt annerledes mønster enn i Nidarosdomens søndre vesttårn og Sveaborg; det var høyest under og like etter det tørreste periodene og økt krystallisering av salt. Det kan ha med salttypene og materialene å gjøre (kalkmalerier vs. tegl og stein), men også at Regalierommet har et svært «rolig» inneklima som ikke er utsatt for sterke, kortvarige klimasvingninger, ingen trekk som gir rask opptørking, ingen hyppige kondenshendelser – som er viktige på Sveaborg og Nidarosdomen. Regalierommet har et generelt moderat tørt inneklima og salter får anledning til å krystallisere over lang tid. Dermed ser det ut til at man får et nokså regelmessig forløp også når det gjelder nedfall av forvitret materiale.

*

Det er åpenbart at Sveaborg, tårnet i Nidarosdomen og Regalierommet, men også ruinen på Kirkjubøur, er av høy relevans for å studere og forstå forvitringen i Albanustårnet. Vår hypotese for den betydelige forvitringen i de tørrere områdene innendørs, er at salt krystalliserer ved fuktforhold like under overflaten (*subflorescence*). Det betyr at den relative luftfuktigheten ved visse anledninger er såpass lav at vi får nokså kortvarig (noen dager, kanskje et par uker) krystallisering av salt, før fukten igjen går mot normalt høye verdier på over ca. 80%, og salt igjen går i oppløsning. Siden saltene i Sveaborg og tårnet i Nidarosdomen er tilsvarende som i Albanustårnet, så er det sannsynlig at nedfall kommer en stund etter de tørreste periodene.

Når krystallisering av salt er kortvarig, så kan vi heller ikke nødvendigvis se dem om de så hadde krystallisert på overflaten. Da måtte vi ha observert kontinuerlig, minutt-for-minutt. Det er ikke mulig uten høyoppløselig kamera (og evt. overføring av bilder via internett, se en detaljert studie av Zehnder og Schoch 2009).

1.7 Metoder for overvåkning

Strategien for å sannsynliggjøre at saltforvitring er hovedårsaken til at det ryr så mye fra veggene i Albanustårnet følger de enkle metodene fra Sveaborg, tårnet i Nidarosdomen og Regalierommet. Det er bruk av en kombinasjon av direkte, visuell observasjon og indirekte metoder. Sistnevnte dreier seg om regelmessig oppfølging av nedfalt materiale fra veggene, på 3 ulike steder i tårnet (to i øverste etasje, ett i andre etasje). Med en pause på drøye ett år mellom 2017-2018 har vi tatt turen til Selja 12 ganger mellom januar 2016 og januar 2020. Mengdene som har falt ned gir oss indikasjoner på når forvitringen er som verst. Over har vi også nevnt at vi har tatt i bruk sammenlignende studier av tilgjengelige historiske fotos for å få et generelt inntrykk av hvordan forvitringen har utviklet seg de siste 80-100 årene.

Dessuten har vi målt saltinnholdet i materialet som er falt ned fra en av «feiestasjonene» i den øverste etasjen. Slik kan vi få et innblikk i om det er mer salt til visse tider av året. I tillegg har vi overvåket inneklimaet på timesbasis med elektroniske klimaloggere (Tinytag Plus 2, i første og tredje etasje) og sammenlignet med uteklimaet på de nærmeste observasjonsstedene for Det norske meteorologiske institutt (DNMI, Kråkenes og Stadlandet¹³). Slik har vi kunnet relatere forvitringen til de vekslende værforholdene gjennom fire år.

Under besøkene på Selja har vi gjort mange direkte observasjoner av saltutblomstringer (*efflorescence*). Slike observasjoner er gjort på etter hvert faste, kjente steder på murverket, der salt

¹³ Alle klimadata fra DNMI er hentet fra nettportalen eKlima, <http://sharki.oslo.dnmi.no>

av en eller annen grunn er lett synlig når det er tørt nok. På ett av stedene har vi fotografert tilstanden ved hvert besøk og relatert utblomstrings-periodene til de målte klimaforholdene i tårnet og utendørs.

En videre analyse er gjort med programmet RUNSALT (Price 2000, Bionda 2005, se <http://science.sdf-eu.org/runsalt/>), som gir en mulighet til å beregne ved hvilke temperatur og fuktforhold salter i komplekse systemer krystalliserer. Utgangspunktet for analysen er det målte saltinnholdet i nedfalt materiale.

De valgte metodene er i tillegg til hva som har blitt utført på Sveaborg (von Konow 2002), Nidarosdomen (Storemyr 1997) og Regalierommet (Franz og Storemyr 2000, 2001; Storemyr 2002, 2010b) også basert på grunnforskning om salt og overvåkning av saltforvitring i sveitsiske middelalderkirker med kalkmalerier fra 1970-tallet til ca. 2010, som undertegnede hadde gleden av å følge på nært hold og delvis delta i fra ca. 1990 til 2010 (se bl.a. Arnold og Zehnder 1991, Zehnder 2006). Metodene tar også hensyn til de grunnleggende spørsmålene en kan stille seg om overvåkning av saltforvitring, slik de beskrives av Laue, Bläuer og Stadlbauer på nettsiden www.saltwiki.net/index.php/Monitoring.

1.8 Hovedspørsmål, hypotese og metoder – oppsummering

Det viktigste spørsmålet fra et bevaringsperspektiv er:

- Hvor raskt utvikler forvitringen seg der det ryr mest fra veggene innendørs i Albanustårnet?

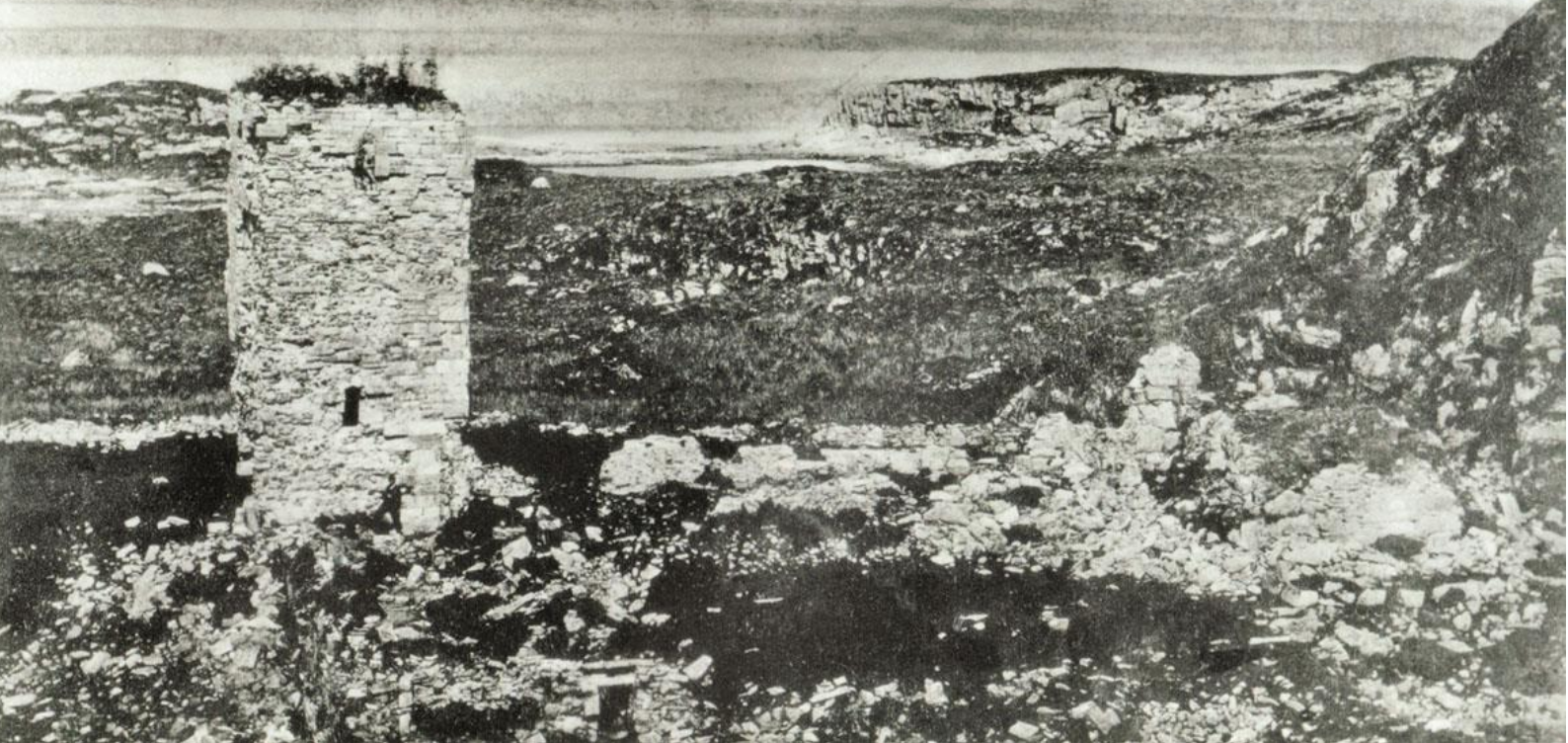
Hypotesen for den mest intense forvitringen i de tørrere, østlige deler av tårnet er:

- Salt krystalliserer i korte, relativt tørre perioder og fører til materialnedfall når fukten igjen stiger.

Siden vi vanskelig kan observere saltforvitringen direkte, har vi gjennom 4 år (2016-2020) og 12 besøk/befaringer tatt i bruk både direkte og indirekte metoder for å sannsynliggjøre at fenomenet faktisk finner sted:

- Overvåkning av områder med synlig salt
- Generelle observasjoner av forvitring, fukt og værforhold
- Sammenligning med tilgjengelige historiske fotografier
- Overvåkning av inneklimate på timesbasis
- Sammenligning av inneklimate med uteklimate på de nærmeste DNMI-stasjonene
- Regelmessig oppsamling og veiing av nedfalt materiale
- Analyse av saltinnhold i nedfalt materiale
- Beregning av saltenes oppførsel med programmet RUNSALT

Den aller viktigste forutsetningen for at regelmessig overvåkning har kunnet finne sted, er båten til Bjørn Jensen. Uten Bjørn og båten hadde det ikke vært mulig å besøke Selja 12 ganger mellom 2016 og 2020.



Figur 30: Foto av klosteruinene og Albanustårnet i 1866, det eldste fotoet av anlegget vi kjenner til. Anlegget er praktisk talt «ei steinrøys». Fotoet er tatt av Marcus W. Noodt og er gjengitt i «Husa våre» av Kolbjørn Nesje Nybø (2019).

2 Albanustårnets historie

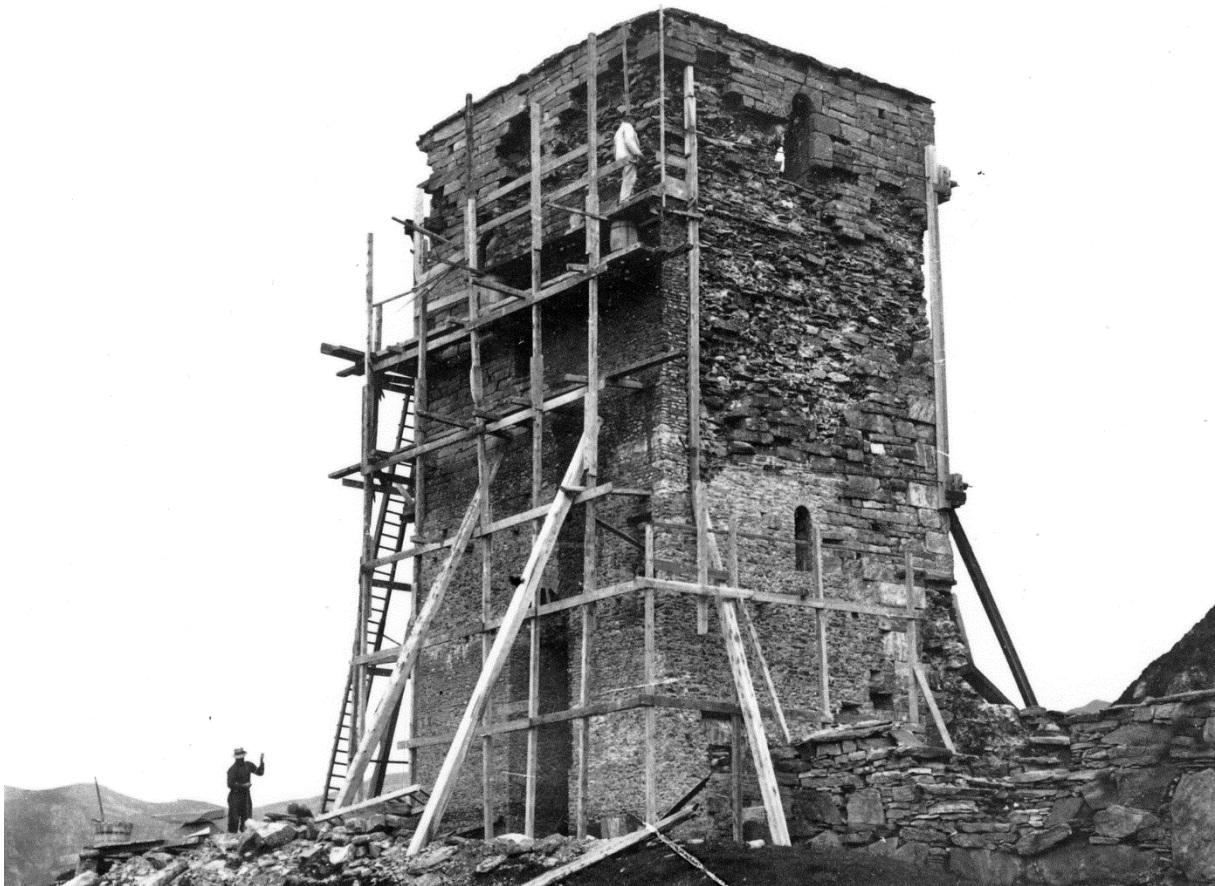
Det 14 m høye tre-etasjers tårnet til Albanuskirken ble trolig bygd i perioden 1120-1160. Det er fint bygd med kistemurer av tuktet gneis og i nedre deler delvis med tynne kvadre av metaolivinstein. Portaler og vindusomramminger, samt hjørnekvadre består også av hugget metaolivinstein (Nybø 2000). Kalken i den «feite» mørtelen i murkjerner og fuger er brent fra marmor og har tilslag av skjellsand (Storemyr 2010a; 2019). Østveggen på tårnet er samtidig vestveggen på den nå ruinerte Albanuskirken.¹⁴

Kirken og tårnet brant i 1305 og det er ennå spor etter voldsomme brannskader på steinene, spesielt på de østre veggene av tårnet, både ute og inne. Etter brannen er det sannsynlig at tårnet og kirken ble reparert, men allerede før reformasjonen (1537) gikk klosteret ut av bruk. Forfall satte inn og i «dansketiden» er det belagt at klosteret, klosterkirken og trolig også deler av tårnet ble benyttet som steinbrudd. Hogd metaolivinstein skal bl.a. ha blitt fraktet til Danmark på 1500-tallet (Djupedal 1996).

Da interessen for kulturminner våknet på 1800-tallet sto tårnet ifølge mange tegninger og fotografier (Djupedal 1996, Hommedal 1996, Nybø 2000, se også Riksantikvarens bildearkiv¹⁵) uten tak og med svært store skader i murverket, spesielt langs hjørnene og på østveggen. I følge Alf Tore Hommedal (1996), som har studert restaureringshistorien i detalj, tok de første sikringsarbeidene på tårnet til i 1880-årene og fortsatte med ujevne mellomrom fram til begynnelsen av 1900-tallet. Men det var ikke før i 1912-15 at tårnet ble skikkelig restaurert, med ny tårnhjelm på plass i 1914. Tårnet har altså nå stått under tak i 106 år.

¹⁴ For enkelthets skyld bruker vi i denne rapporten konsekvent østveggen, østportalen osv., selv om det ville vært mer korrekt å bruke f.eks. «vestportalen i skipet» om portalen som vender fra kirken og ut i tårnet.

¹⁵ Se <https://kulturminnebilder.ra.no/fotoweb/archives/5014-Bilder/?q=selja>



Figur 31: Fra restaureringen i 1912-15 før tårnhjelmen kom på plass i 1914. Legg merke til hvordan småfalne stein satt i sementmørtel supplerer manglende ytre murskall. Foto: Riksantikvarens arkiv.

Restaureringen i 1912-15 ble ledet av Egill Reimers og omfattet forsterkning av de ytre murskallene, dvs. alle hjørner og store deler av øvrig murliv, med småfalne gneisbiter satt i sement/betong. Dette har naturlig nok ført til at store deler av tårnet nå har et trolig for tett «skall» på ytre vegger, slik det er påpekt i kap. 1.3. Ellers ble løse kvaderstein og annen stein sikret med sement slik at de ikke skulle falle ned. Arbeidet kan tydelig skilles fra det gjenværende middelalderske murverket. Inne kom tre-gulvene i andre og tredje etasje på plass; ellers ble det ikke utført mye arbeid inne, annet enn spekking av fuger og sikring av løse stein. Murlivet innendørs ble ansett for å være i stort sett god stand.

I den nesten hundre år lange perioden mellom 1915 og 2007 ble det ikke utført omfattende arbeider på tårnets murverk. Cato Enger (1949) supplerte noe murverk på 1930-tallet (bl.a. trolig på vestveggen) og det har vært utført en del spekking med sementmørtel trolig i flere omganger. Et sikringsarbeid fant også sted på 1990-tallet. Da Riksantikvarens bevaringsprogram for ruiner startet omkring 2006 var derfor tårnet preget sprekker i fuger og mange lekkasjer (opplysninger fra Geir Magnussen, Bjørn Jensen og Terje Berner).

I de første årene, frem til 2009/2010 var firmaet Murmester Terje Berner & Co AS ansvarlig for arbeidet, siden den gang er det firmaet Bakken & Magnussen som har utført all konservering. Samlet har dette gitt en god forutsigbarhet i et svært omfattende arbeid, som ikke bare omfatter tårnet, men hele kloster- og helgeanlegget. Fram til 2012 ble arbeidet på tårnet konsentrert om til dels omfattende fugereparasjoner og sikring av løse stein, alt utført med kalkbasert mørtel, dessuten utbedringer av taket. Også området under murverksbuen på innsiden av østveggen i 2. etasje ble reparert.



Figur 32: Fra konserveringsarbeidene på tårnet i mai 2007. Foto: Åse Bitustøl, Riksantikvarens arkiv.

Et viktig arbeid var dessuten innsetting av nye vinduer, med mindre åpninger mot steininnfatningene enn tidligere. Dette ser ut til – fra observasjoner og erfaring – å ha redusert vanninntrengning ved slagregn, og dessuten bedret luftsirkulasjonen i tårnet og dermed bidratt til raskere opptørking av murverket etter regnvær og kondenshendelser.

I dag er det bare lite, aktiv skadeutvikling på ytre murverk (se kartlegging i Storemyr 2010a). Men ved voldsomme regnvær eller lange regnværsperioder er likevel ikke tårnet «tett». Det finnes små og større sprekker i mange fuger, både i murverk restaurert med sement og i overganger mellom opprinnelig og restaurert murverk. Dessuten finnes det stillas- og andre «åpninger» som kan samle vann. Alt dette gir små lekkasjer, verst på vestveggen.



Figur 33: Skipets vestportal etter restaureringen i 1913 (foto: Riksantikvaren) og i 2010 (foto: Per Storemyr). Det er få endringer, pilene viser noen av dem.



Figur 34: Det søndre vinduet i tredje etasje. Foto til venstre er tatt etter at tårnet kom under tak i 1914 og trolig før 1940 (Riksantikvarens arkiv). Til høyre foto fra i dag (Per Storemyr). Ved detaljstudium av bildene kan en se at forvitringen først og fremst har vært aktiv langs kantene av steiner i de øvre deler av vindussmyget.

3 Forvitring inne i tårnet fra 1915 til i dag

Foruten forvitring og oppsprekking av fuger, samt løsning av noen stein, har det ikke skjedd svært betydelig forverring i tilstanden til tårnet fra det var «ferdig» restaurert i 1915 til i dag, slik vi kan bedømme det ut fra bilder (se også Storemyr 2010a). Det er de utvendige fugene som «alltid» har vært problemet. Vi kan også se av bilder fra like etter restaureringen i 1912-15 at mange fuger i de øvre delene av tårnet ikke ble spekket med mørtel utendørs (og innendørs), bl.a. på østveggen. Det må til tider har forårsaket mye vanninntrenging.

Vi har vært inne på vanninntrenging over – at det fortsatt er lekkasjer, spesielt i vestveggen, noe som gjør at de vestlige deler av tårnet innendørs er generelt fuktigere enn de østlige delene. Det ser man på både dannelse av stalktitter, algevekst og litt plantevekst inne. Utendørs ser vi ellers at det ikke har vært mye bortfall av enkeltstein eller deler av stein. Forvitring har spesielt vært konsentrert til brannskadet metaolivinstein (østveggen) og feltene rundt portalen i østveggen som ikke ble reparert; der altså kjernen i muren fortsatt står åpen (Figur 33, se også Storemyr 2010a: 34).

Innvendig ser vi et tilsvarende bilde. Det er brannskadet metaolivinstein som først og fremst er sterkt forvitret, selv om også gneismurverket og et utall fuger forvitrer mye, spesielt der det er tørrest. I så måte er det toppetasjen som er verst skadet. 80-100 år gamle fotos fra vindus- og andre detaljer



Figur 35: Det nordre vinduet i tredje etasje. Foto til venstre er tatt etter at tårnet kom under tak i 1914 og trolig før 1940 (Riksantikvarens arkiv). Til høyre foto fra i dag (Per Storemyr). Ved detaljstudium av bildene kan en se at det har vært lite forvitring. Dette er i tråd med hva vi har sett av nedfall av material fra vindussmyget (se kap. 5).



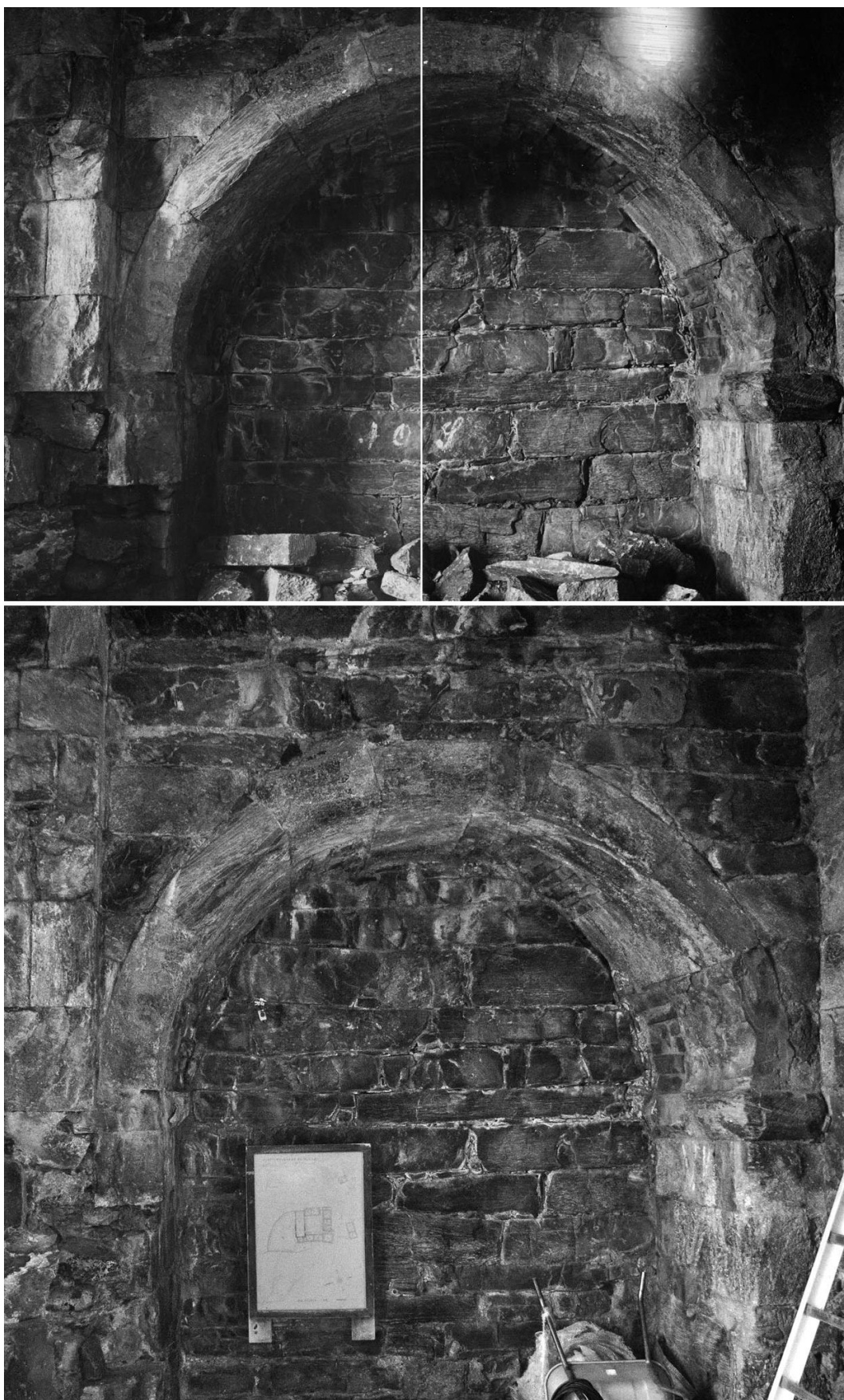
Figur 36: Det søndre vinduet i første etasje. Foto til venstre er tatt etter at tårnet kom under tak i 1914 og trolig før 1940 (Riksantikvarens arkiv). Til høyre foto fra i dag (Per Storemyr). Det er lite forandringer å spore, i tråd med at dette er en fuktig del av tårnet. Legg merke til at fugene er reparerte.



Figur 37: Buen i østveggen i andre etasje. Foto over er tatt etter at tårnet kom under tak i 1914 og trolig før 1940 (Riksantikvarens arkiv). Under foto fra i dag (Per Storemyr). «Trekanten» representerer gavlen på skipet i Albanuskirken, som er del av østveggen på tårnet. Trekanten og området omkring ble reparert av Bakken & Magnussen i 2012. Det er ingen andre påfallende forandringer, men ser en nærmere etter viser det seg at metalolivinsteinerne og fugene har forvitret nokså betydelig. Denne veggen er benyttet for oppfeing av nedfalt materiale på gulvet bak gjerdet (se kap. 5).



Figur 38: Øvre del av østveggen i første etasje. Foto over er tatt av Egill Reimers i 1912 (Riksantikvarens arkiv). Under foto fra i dag (Per Storemyr). Veggen ble sist restaurert i 2007 til 2010 (se spekking i fuger og nye pinningstein). Alle stein er kvadre i metaolivinstein som generelt har forvitret ganske mye på de mer enn 100 år det er mellom bildene.



Figur 39: Buen i nordveggen i første etasje. Foto over er trolig tatt etter at tårnet kom under tak i 1914 og trolig før 1940 (Riksantikvarens arkiv). Under foto fra i dag, på et fuktig tidspunkt (Per Storemyr). Det er relativt lite forandring å spore, men selve buen av metaolivinstein fremstår som en del mer forvitret i dag.



Figur 40: Det skadde gneismurverket slik det er å se på østveggen i tredje etasje. Legg merke til oppsprekningen og avrundingen av gneisblokkene – et tydelig tegn på brann og senere bl.a. saltforvitring. Foto: Per Storemyr.

innendørs bekrefter at metaolivinsteinen forvitrer raskest og at det faktisk ikke er så store endringer å se på gneismurverk. Vi har imidlertid få gode bilder fra selve murverket i toppetasjen og det er derfor umulig å bedømme hvor raskt forvitringen har utviklet seg her.

Forvitringen i gneismurverket, spesielt i toppetasjen, men også i andre etasje er, ifølge observasjoner, åpenbart størst der det er gamle brannskader. Steinene har flaket av i overflaten, blitt mer porøse og dermed mer tilgjengelige for saltholdige løsninger. Saltforvitring har medført at de nå står fram med avrundede hjørner og kanter. Dette i motsetning til lite skadet gneis, som er uten avflaking og med fortsatt nokså skarpe kanter og hjørner.

I tørre perioder kan vi tydelig se saltutblomstringer og saltskorper på mange steder inne i tårnet. Steder med de mest omfattende utblomstringene er bl.a. (se også Storemyr 2010a):

- Oppe omkring portalen på østveggen, i restaurert murverk
- På metaolivinstein i ved buen i andre etasje
- Flere steder på metaolivistein i tredje etasje
- I fuger på restaurerte vindusbenker i tredje etasje

På disse stedene har det vært gjennomført systematisk observasjon siden 2016, samt enkle bestemmelser av salter med Merck teststrips (for sulfat, klorid og nitrat, samt pH). Selv om dette ikke gir full bestemmelse av saltene, så ser vi en helt tilsvarende tendens som i analysene fra 2010 (Storemyr 2010a): Det er stort sett alkaliske natriumkarbonater på restaurert murverk (kilde: sement), samt en blanding av sulfat og klorid, høyst sannsynlig natriumsulfater og halitt, på eldre murverk (se kap. 1.4 og 1.5 for videre forklaringer).

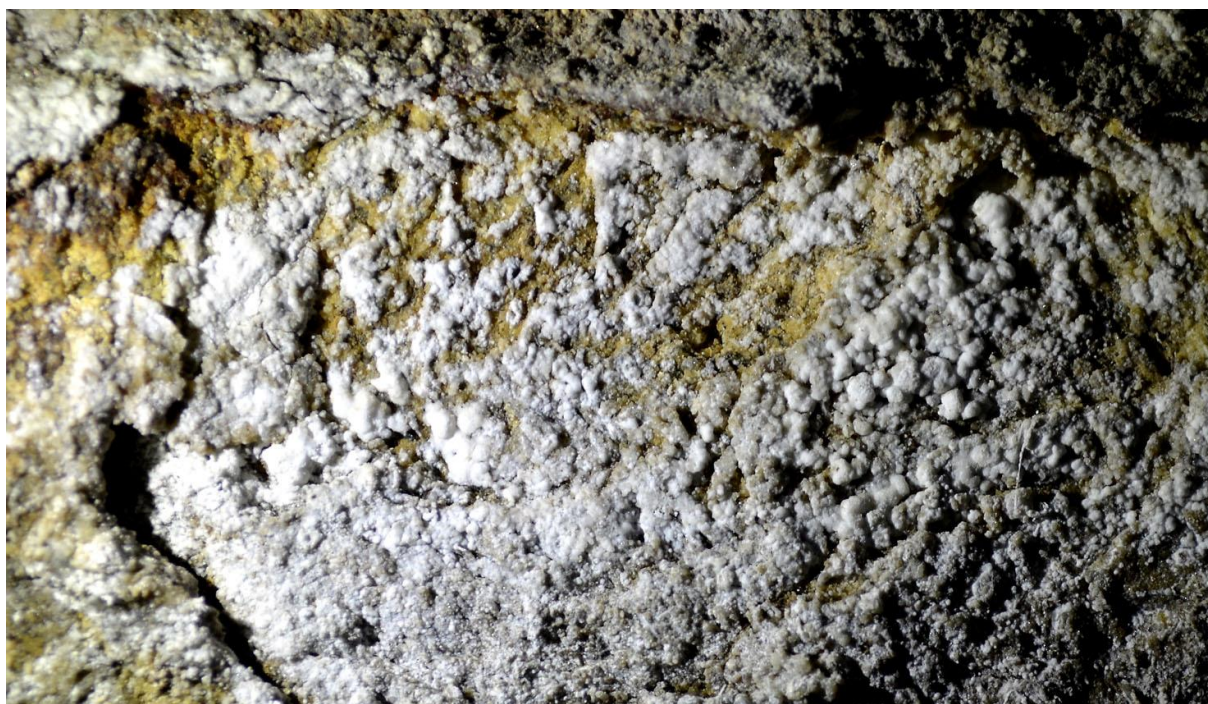
Det kan også observeres klare sammenhenger med værforholdene: Er det fuktig, så er det mindre salt – de alkaliske saltene (natriumkarbonater) kan gå helt i oppløsning, andre forsvinner aldri helt,

spesielt de som opptrer i skorpeform. Dette er en mer stabil form for salt«utblomstring» og det trengs ofte rennende vann for å få dem helt vekk.

Når vi over (kap. 1) har brukt kondens for å forklare de ofte svært fuktige forholdene på veggene inne, i perioder hvor været er fuktig og kjølig/kaldt, så er det en sannhet med modifikasjoner. Saltene vi finner i tårnet er til dels sterkt hygroskopiske og tar derfor opp fukt direkte fra luften. Det betyr at veggene kan se svært fuktige ut selv om doggpunktet ikke er nådd. Trolig har vi ofte en kombinasjon av kondens og hygroskopisk fukt, men også «ekte» kondens spesielt i perioder hvor det slår raskt om fra kald til mildt.



Figur 41: Saltutblomstring som «løse» skorper på metaolivinstein. Foto: Per Storemyr.



Figur 42: Saltskorper på metaolivinstein. Foto: Per Storemyr.



Figur 43: Saltutblomstringer (natriumkarbonat) på restaurert, småfallent gneismurverk satt i sement, første etasje. Foto: Per Storemyr.



Figur 44: Saltutblomstringer i form av «whiskers» og nåler, natriumkarbonat. Foto: Per Storemyr.



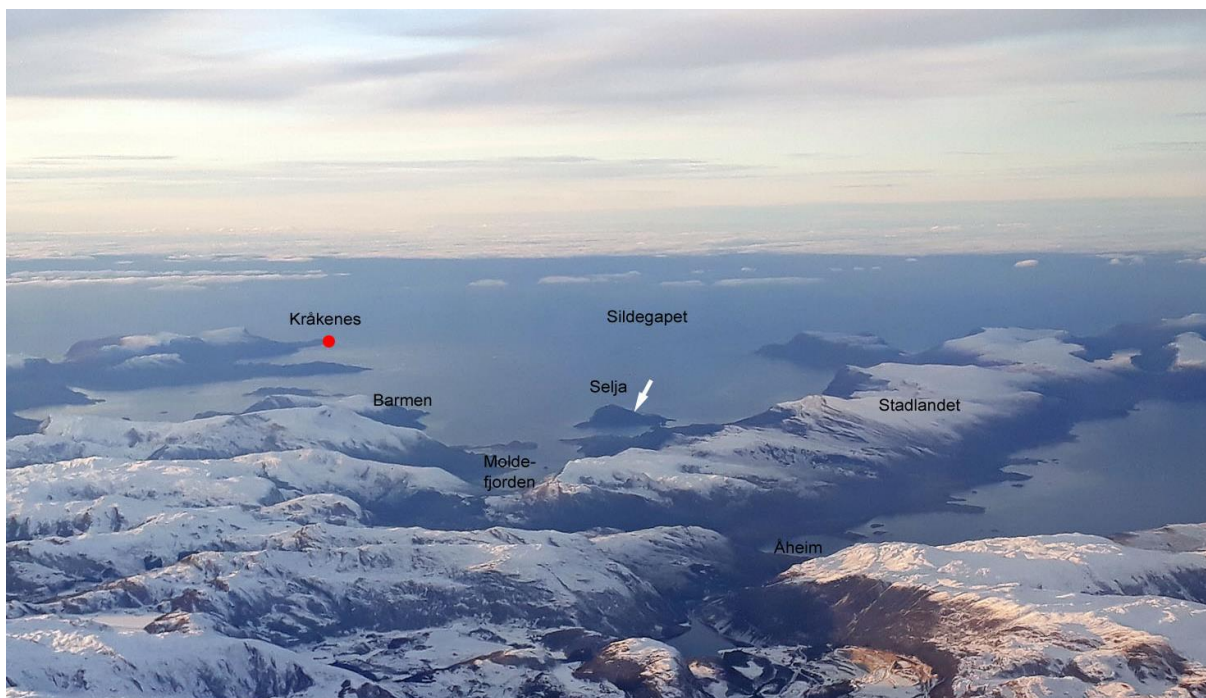
Figur 45: Et sjeldent syn på Selja: Snø! Foto: Per Storemyr i november 2010.

4 Målinger av ute- og inneklima

Klimaet på Selja er et mildt og fuktig. Den nærmeste DNMI-stasjonen er Kråkenes, på 75 m.o.h. omkring 16 km vest for øya. Klimaet her ute er omtrent som på Selja, da høyden på målestasjonen kompenseres ved at Selja, rett ved havoverflaten, ligger lengre inne i fjorden. I de siste fire årene er det sjelden døgntemperaturen har gått under 0°C på vinteren, og sjelden over 20°C på sommeren. Gjennomsnittstemperaturen har lagt på 8-9°C. Relativ luftfuktighet (RH) er høy, gjennomsnittlig snaue 80%, men det er store sesongvariasjoner og variasjoner fra år til år.

Våren er normalt den tørreste tiden; da kan RH over dager synke til under 50%. Høy fuktighet er naturlig nok avhengig av nedbør, men ikke bare; for i relativt varme, nedbørfattige somrer, kan RH også ligge relativt høyt. Her er det den varme luftens høyere innhold av fuktighet som slår inn. Nedbøren de siste 4 årene, i all hovedsak som regn, har variert fra snaue 2000 til snaue 3000 mm/år. Dette er tall fra målestasjonen på Stadlandet, ca. 13 km nord for Selja (Kråkenes har i dag ikke nedbørobservasjoner).

Vindrosen for Kråkenes (Figur 10) viser at de sterkeste vindene kommer fra sør til sørvest, men det er også et betydelige innslag av mindre kraftige nordlige til østlige vinder. Det er lite vind fra vest og nordvest. På Selja, omkranset av fjell på 400-700 m er det sannsynlig at de sterkere vindene er noe



Figur 46: Foto fra fly med Selja i sentrum. DNMI's klimastasjon på Kråkenes er også markert. Snø på toppene, men ikke på Selja – det har vært det vanlige i vinterhalvåret de siste 10 årene. Foto: Per Storemyr, november 2019.

mer vestlige enn på Kråkenes. Det betyr trolig at mesteparten av nedbøren kommer ved sørlige til vestlige vinder. Vind fra østlige retninger bringer lite regn.

Inneklimaet i tårnet har vært målt med Tinytag Plus 2-loggere på timesbasis siden 2016; en logger i første etasje, en i den øverste (tredje etasje, klokkeetasjen) (beskrivelse av målepunkter i Storemyr 2017, se også Figur 6, erfaring viser at loggerne har en nøyaktighet på $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ og $\pm 3\text{--}5\%$ RH). Som ventet er det gjennomsnittlig litt kaldere og fuktigere i den nedre etasjen, ca. $0,5^{\circ}\text{C}$ kaldere og $3\text{--}4\%$ høyere RH, men absolutt luftfuktighet er nær identisk. Siden våre stasjoner for oppfeiling av nedfalt materiale ligger i andre og tredje etasje, har vi valgt å bruke den øvre klimastasjonen for analyser og videre tolkning. Figur 51-Figur 54 viser klimakurver omgjort til døgngjennomsnitt.

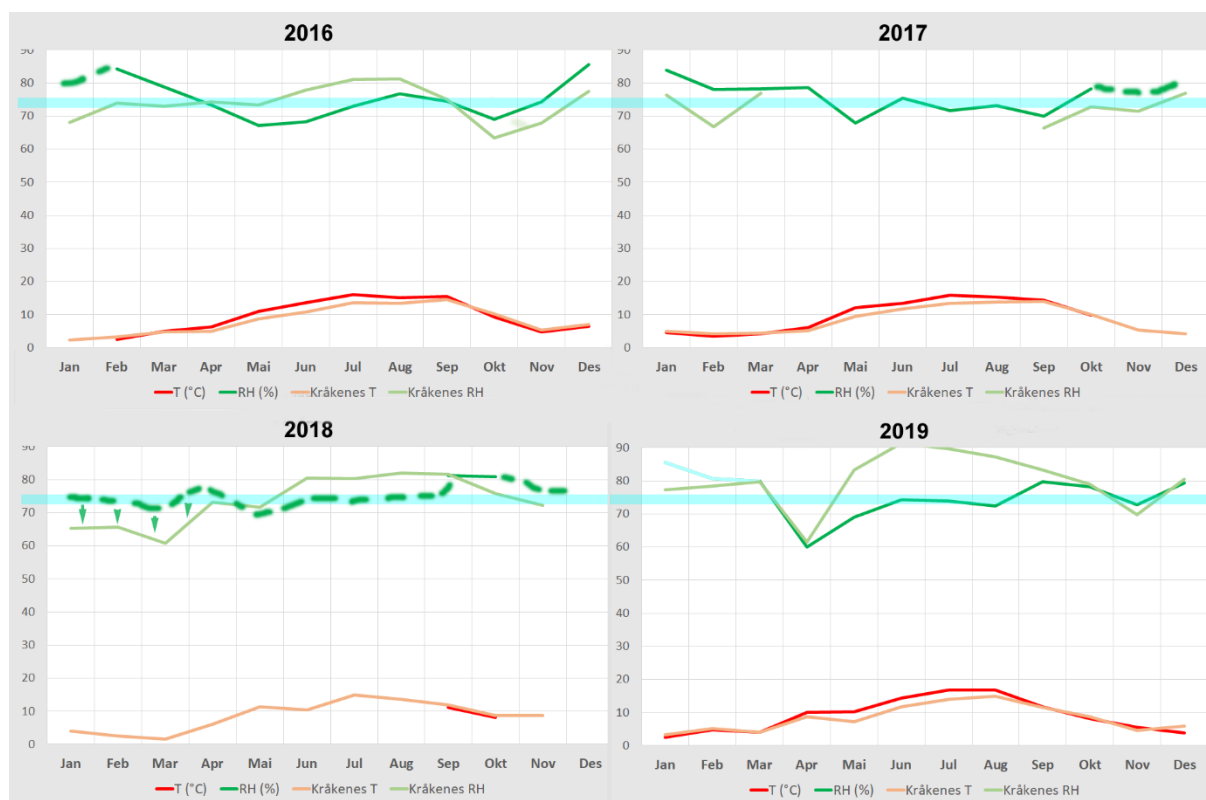
Det viser seg at temperatur og RH i den øverste etasjen i stor grad følger verdiene på DNMI-stasjonen på Kråkenes. Ikke minst følger absolutt luftfuktighet på de to steder hverandre tett. Dette er ikke overraskende, all den tid tårnet, med alle sine åpninger (2 portaler og 7 vinduer) er nær fullstendig åpent for omgivelsene. Det er åpninger mellom murverk og vindusomramminger, den østre portalen er helt åpen og den vestre portalen har åpninger mellom murverk og dørblad. I den kalde årstiden er temperaturen svært lik hva som måles på Kråkenes, i den varme $1\text{--}5$ grader over. Det er fordi varme fra solinnstråling magasineres i tårnet. For RH er det naturlig nok store avvik på times- og døgnbasis, selv om de utendørs svingningene dempes noe, men ikke mye, i tårnet. Ser vi på måneds-gjennomsnittet, så ligger vanligvis RH $5\text{--}10\%$ over utendørsverdiene i vinterhalvåret og $5\text{--}10\%$ under i sommerhalvåret. Dette skyldes om vinteren at fukt magasineres noe i murene, mens det om sommeren er temperatureffekten som slår inn; høyere temperatur i tårnet enn ute gir en lavere RH, når absolutt fuktighet er lik.

Disse relasjonene mellom Kråkenes og tårnet gjør at vi kan estimere temperatur og RH på månedsbasis i tårnet når det mangler inneklimamålinger. Dette skjedde av ulike årsaker for oss fra november 2017 til august 2018. For denne perioden har vi altså kunnet bruke estimerte månedsverdier fra Kråkenes (se Figur 47 og videre diskusjon i Storemyr 2018).

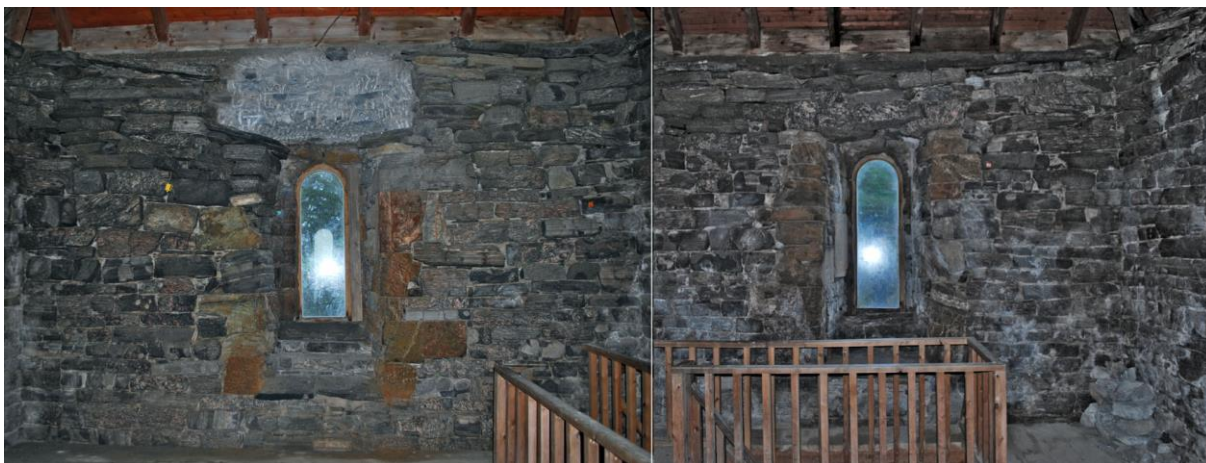
Som vi har vært inne på tidligere (kap. 3), er kondens og hygroskopisk fukt pga. salt et svært viktig fenomen i tårnet. Som vi ser av Figur 51-Figur 54 ligger doggpunktet nær innetemperaturen i store deler av den kalde årstiden, spesielt når mildt vær avløser en kaldere periode. Tilsvarende kan skje i sommerhalvåret, men er sjeldnere. Dette betyr at alle vegger, spesielt i den vestlige delen av tårnet blir til dels svært fuktige. Det kan til tider renne fukt nedover veggene, noe vi også kan se av «striper» av smuss og tynne kalkskorper på enkelte steder (se bilder av fukt, Figur 48-Figur 49).

Luftingsforholdene i tårnet er komplekse og ser ut til å være avhengig av vindretning. Det er ingen generell pipeeffekt i den trange vindeltrappen i det nordvestre hjørnet (mellom første og andre etasje); noen ganger trekker luften ned, andre ganger går den opp (testet regelmessig med røyk). Det er viktig å påpeke at ventilasjonen generelt er god; det har vi flere ganger fått inntrykk av når en tørr periode følger en våt tid: Det tar bare et par dager før murverket, spesielt i øvre etasje, er tørket opp etter kondens og små lekkasjer.

Sammen med alle åpningene i tårnet betyr dette at innklimaet vanskelig kan fullt kontrolleres uten tetting av vindus- og portalåpninger og installering av klimaanlegg. Sistnevnte er knapt ønskelig eller mulig på ei øy som Selja, der infrastrukturen er rudimentær og tilgjengeligheten vanskelig. Generelt kan vi si at det er bedre luftsirkulasjon i den øvre og nedre etasjen enn i den andre, med den øvre etasjen som en klar nummer en. Det har enkelt forklart med antall åpninger i murene å gjøre; i den midtre etasjen er det bare ett vindu i tillegg til åpningen mot vindeltrappen.



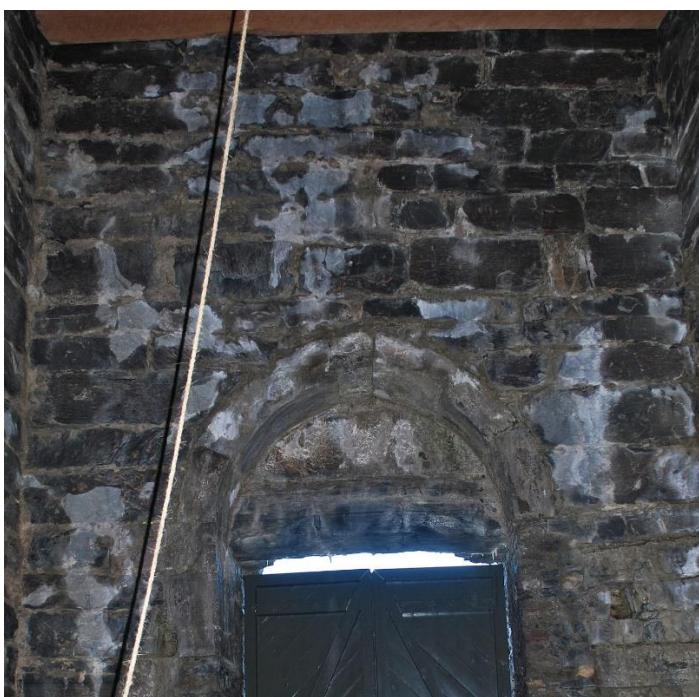
Figur 47: Gjennomsnittlige månedsverdier for temperatur og relativ luftfuktighet i tredje etasje i tårnet og på DNMI-stasjonen på Kråkenes 2016-2012. Vi ser at temperaturene følger hverandre tett, men er litt høyere i tårnet i sommerhalvåret. RH er generelt høyere på Kråkenes enn i tårnet i den varme årstiden. I illustrasjonen har vi rekonstruert manglende RH-verdier i tårnet på grunnlag av målingene på Kråkenes, spesielt i 2018. Selv om rekonstruksjonen naturligvis er noe usikker, kommer det fram at selv om sommeren 2018 var varm, så betyr ikke dette at RH sank svært mye. Det er fordi den varme luften evner å ta opp mer fuktighet. Det er imidlertid mulig at rekonstruksjonen viser litt for høye RH-verdier vinter/vår 2018, dette er indikert med piler. 2019 kan stå som et eksempel på at sommerfuktigheten kan være høy selv om det er nokså varmt.



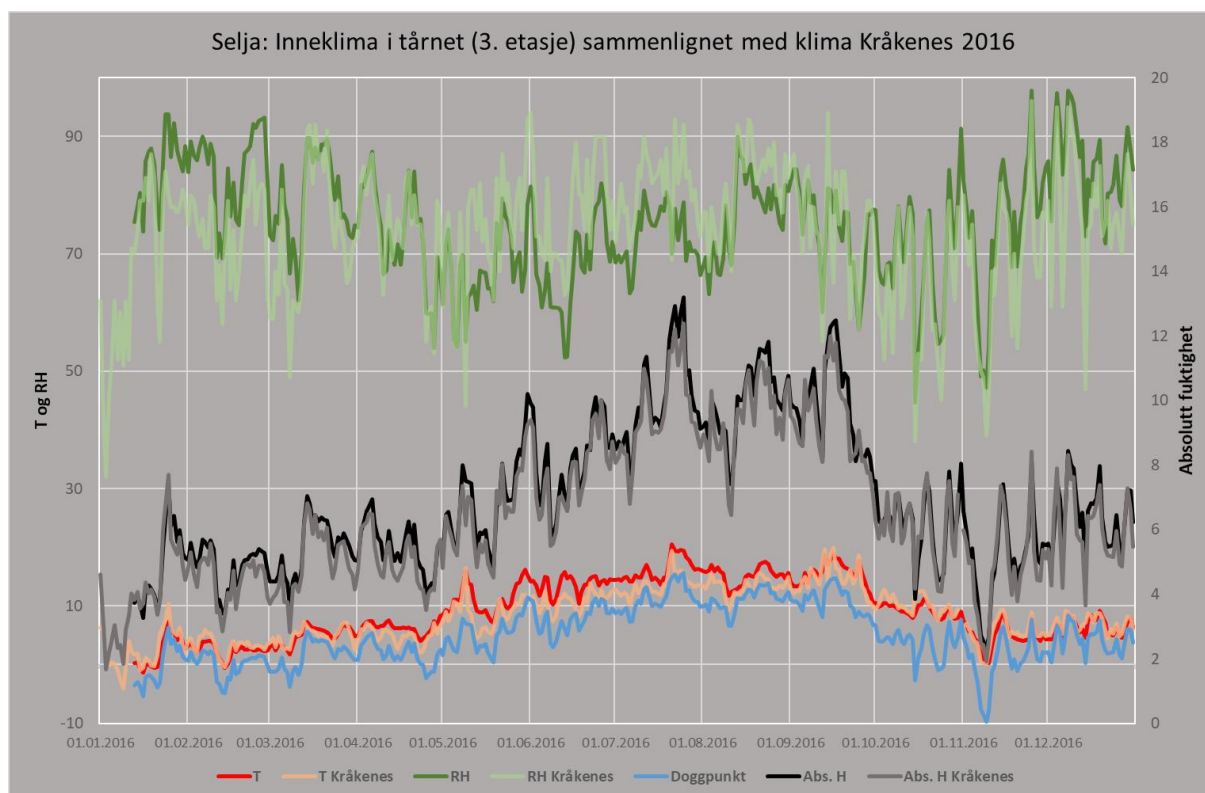
Figur 48: Kondenshendelse på øst- (t.v.) og sørveggen i tredje etasje i jan. 2020 (fuktige partier mørke. Foto: Per Storemyr.



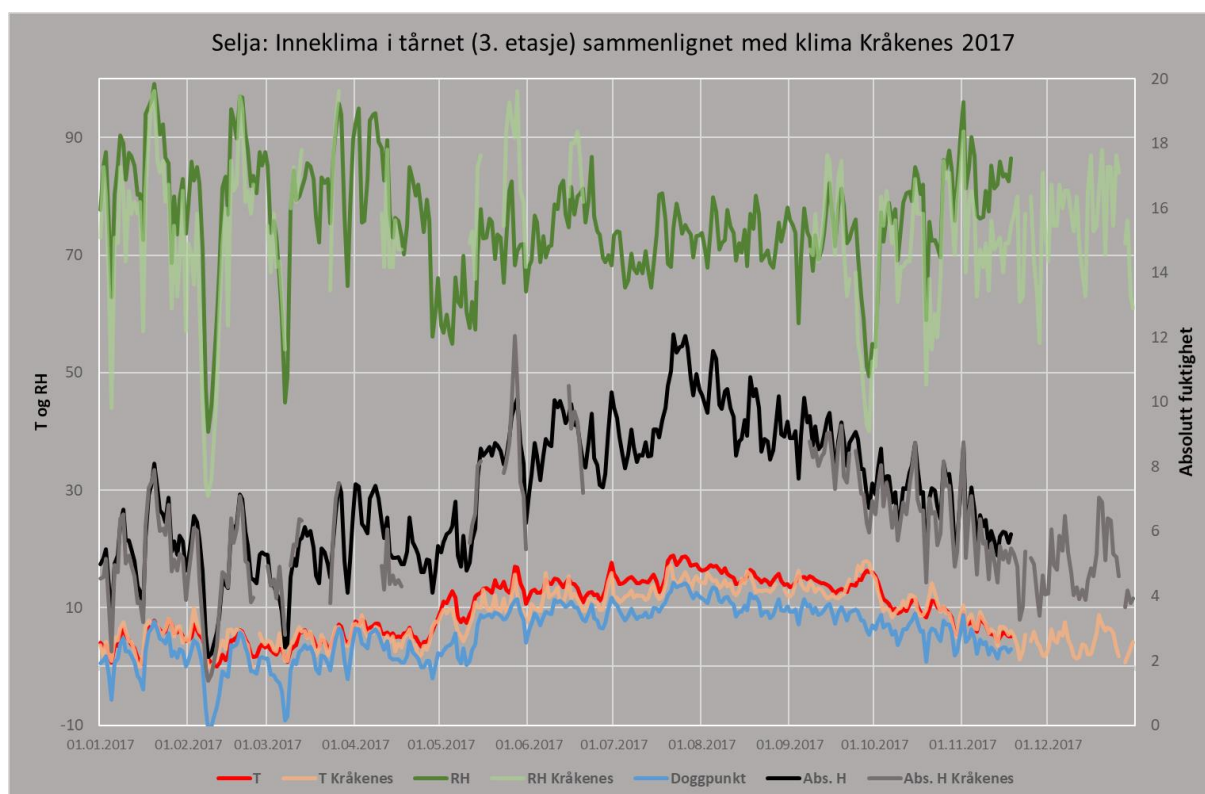
Figur 49 (over): Opptørking på nordveggen i første etasje i november 2010. Det er 5 dager mellom de to bildene. Se også Storemyr 2010a. Foto: Per Storemyr



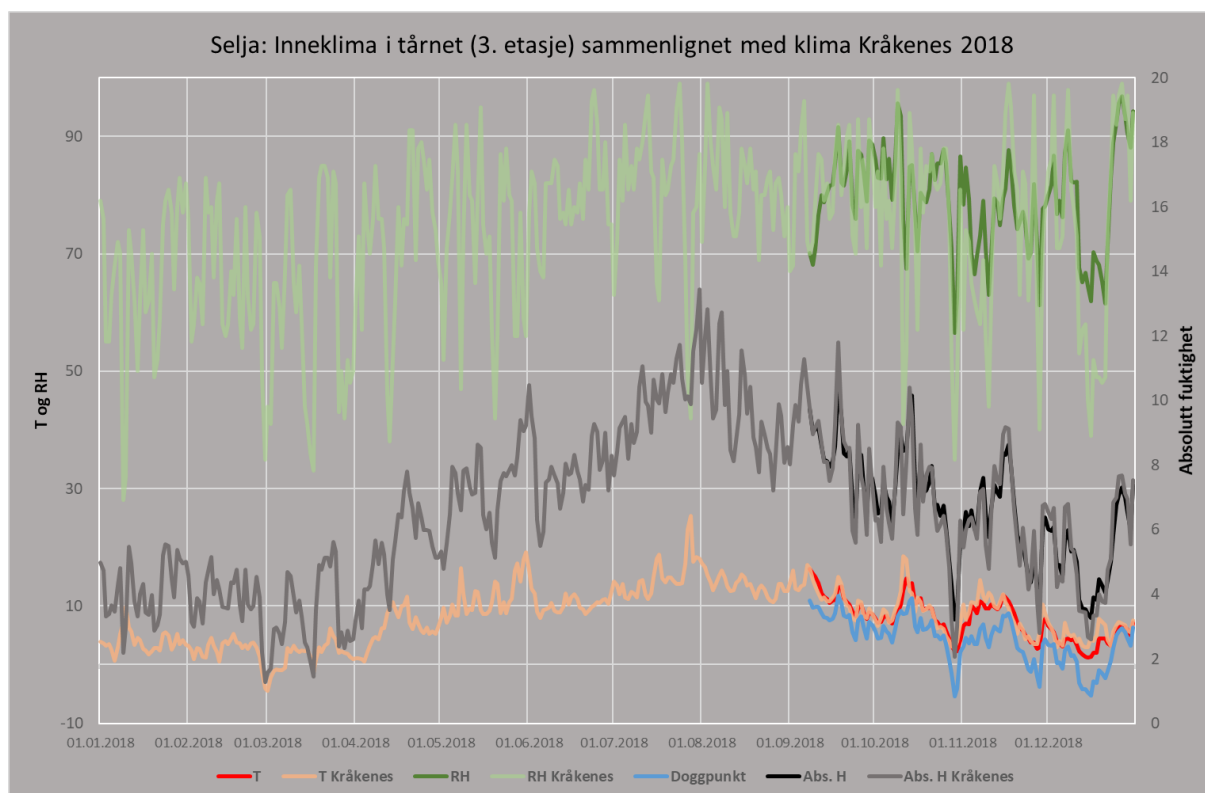
Figur 50: Kondenshendelse på vestveggen i første etasje i januar 2020. Vi ser at deler er tørre (lyse). Det er uklart om disse stedene er i ferd med å bli fuktige eller i ferd med å tørke. Foto: Per Storemyr.



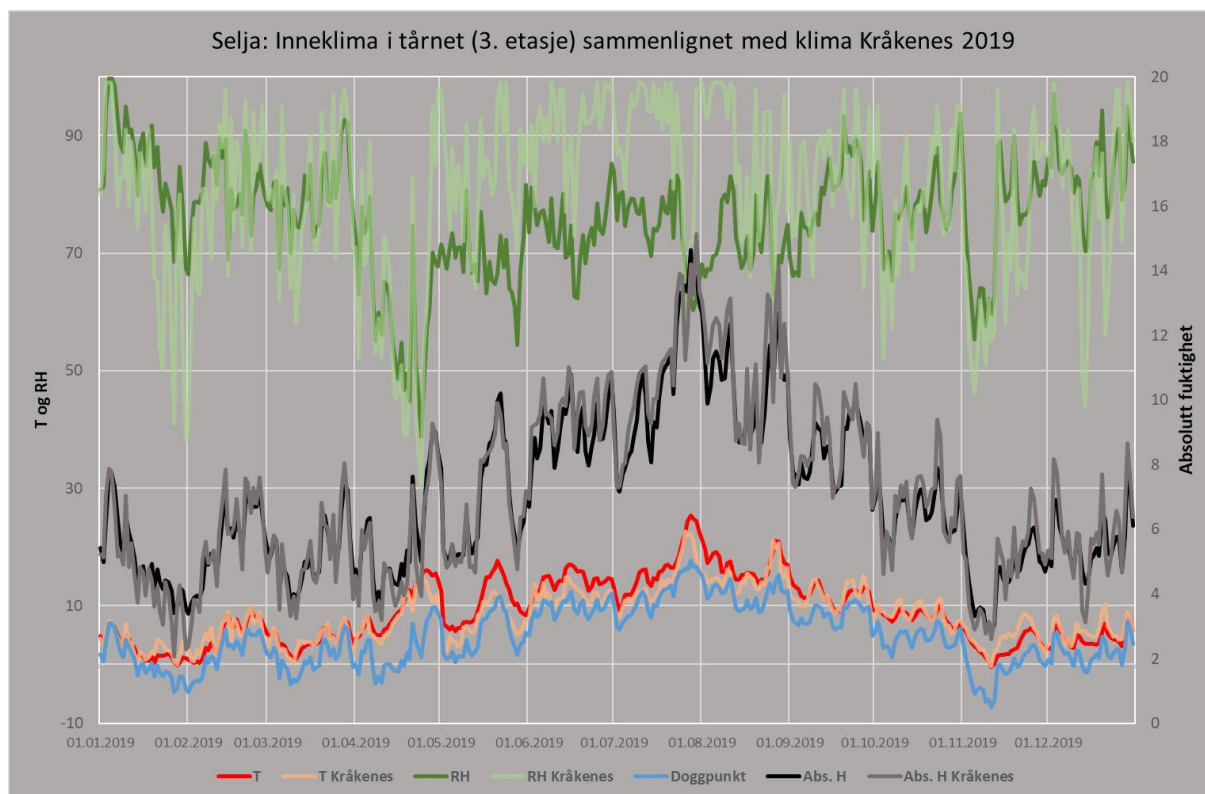
Figur 51: Inneklima i tredje etasje og på Kråkenes 2016, døgnverdier. Legg merke til at høsten hadde store svingninger i RH, men generelt var tørr. Legg også merke til at absolutt fuktighet ute og inne er svært lik. Det betyr at inneklimaet spiller uteklimaet og at det ikke er noen store fuktkilder i tårnet (som ikke tørker raskt ut etter kondens og lekkasjer).



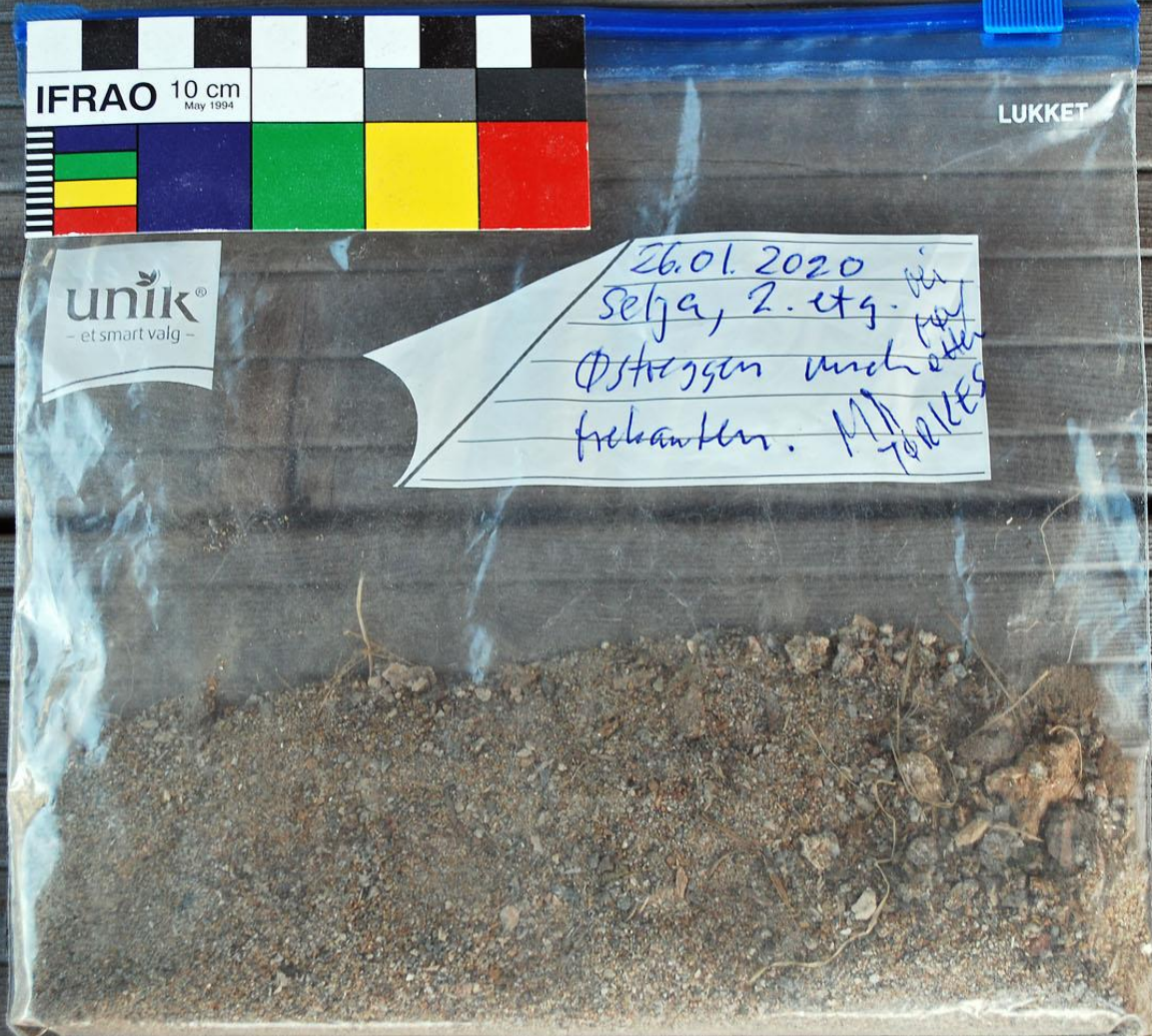
Figur 52: Inneklima i tredje etasje og på Kråkenes 2017, døgnverdier. Legg merke til de tørre forholdene (RH) da temperaturen sank vinterstid. Legg også merke til at doggpunktet lå nær innetemperaturen da det ble mildt etter disse hendelsene. Da får man typisk kondens på veggene.



Figur 53: Inneklima i tredje etasje og på Kråkenes 2018, døgnverdier. Her mangler vi målinger i tårnet for store deler av året. Men vi kan se den generelle tendensen med store svingninger, dog relativt tørrere vinterstid. 2018 var et varmt år.



Figur 54: Inneklima i tredje etasje og på Kråkenes 2019, døgnverdier. Her ser man spesielt den eksepsjonelt tørre våren (april). Også 2019 var et varmt år.



Figur 55: Nedfalt materiale fra østveggen i andre etasje, fra perioden 16.10.2019 til 27.1.2020, snaue 3,5 måneder. Totalt 180 g. Vi ser at materialet stort sett er fint som sand, men at det også er noen større biter (ca. 0,5 cm i diameter) fra gneis, metaolivinstein og mørtel. Som vi ser har «sandene» en brunaktig farge, det betyr at det er mye materiale som ryr fra metaolivinstein. Foto: Per Storemyr.

5 Nedfall av forvitret material

5.1 Øst- og sørvinduene i 3. etasje

Ved starten av studiet i januar 2016 ble alle vindusbenkene innendørs i tredje etasje valgt ut som oppsamlingssteder for nedfalt material. Vi valgte oss alltid den delen av benken som vender «mot høyre», altså den som mottar nedfall fra den høyre delen av vindussmyget når en ser rett mot vinduet. Nedfallsmaterialet, stort sett så fint som vanlig sand, med noen få grovere biter, er en blanding av nedfall fra metaolivinstein, gneis – og ikke minst kalkfuger. Oppsamlingen skjedde med vanlig feiekost og veiingen med vanlig digital kjøkkenvekt. Alle vindussmygene har et areal på ca. 2 m² hvorfra nedfall til vindusbenkene kan finne sted. Nedfallet skjer altså på godt definert område og derfor var det ikke behov for installasjon av egne remedier for oppsamling.

Selv om vinduene som sådan har gjennomgått restaurering, f.eks. i form av innsetting av en ny «overligger» i østvinduet, så har det i selve smygene blitt gjort lite. Smygene i det østre vinduet har f.eks. ingen tegn til moderne arbeid, mens fugene i det søndre har blitt delvis reparert med sementholdig mørtel. Vindusbenkene er imidlertid til dels satt i stand i 1912-1915 med sementmørtler. På disse mørtlene ser vi utblomstringer av alkaliske salter (natriumkarbonater) i tørre perioder.



Figur 56: Vindussmygene fra hvilke det ble feid opp nedfalt materiale i tredje etasje. Til venstre det østre vinduet, til høyre det søndre. Vi ser at det østre vinduet har mer metaolivinstein (brun) enn det søndre, som har mye gneis. I det søndre har også fuger blitt reparert med sementholdig mørtel. Som vi ser forvitrer ikke smygene jevnt, det er først og fremst metaolivinstein og fuger som får gjennomgå. Foto Per Storemyr, 12.1.2016.

Alle vinduene ble, ifølge Geir Magnussen, feid omkring 1. august 2014. Det har vært vanlig praksis å holde tårnet i god rengjøringsstand ved å feie opp sanden på vindusbenkene og gulvene. Etter starten av denne studien, 12. januar 2016, har det ikke vært feid noen steder i tårnet uten konsultasjon med prosjektleder. Dette for å forhindre at studien mistet sin verdi.

Ideelt burde vi ha samlet opp og veid materialet etter et strikt tidsskjema, f.eks. på sesongbasis og på samme tid hvert år. Dette ville ha kunnet gitt helt sammenlignbare resultater fra år til år. Men i praksis viste dette seg å ikke være mulig, både på grunn av praktiske og økonomiske forhold. Derfor har vi prøvd å holde en så høy regularitet som mulig, med fire besøk i 2016, ett besøk i 2017, to besøk i 2018, fire besøk i 2019 og ett sluttbesøk 27. januar 2020, til sammen 12 besøk over fire år.

Det viste seg snart at nedfall fra det vestre og nordre vinduet var så begrenset at det var vanskelig å feie opp nok material for veiing. Dette har trolig flere årsaker: 1) her befinner vi oss i de fuktigere deler av tårnet, 2) der det er lite ødeleggelser fra brannen på begynnelsen av 1300-tallet og her 3) har ikke saltforvitring så stor innflytelse, dessuten 4) er det mer gneis enn metaolivinstein i vindussmygene; erfaring tilsier at gneisen i tårnet ofte forvitrer langsommere enn metaolivinsteinen. Vi bestemte oss derfor å konsentrere innsatsen i det søndre og østre vinduet.

5.2 Østveggen i 2. etasje

I 2018 merket vi oss at østveggen i andre etasje ville egne seg godt som et ytterligere sted å feie opp nedfalt material. Denne veggen inneholder en buestruktur som ble restaurert/sikret i 2012 (Figur 37). Veggen har et mye større areal (ca. 17 m²) enn vinduene i etasjen over, og dermed ville en kunne få en god kontroll på om de begrensede arealene i tredje etasje ga statistisk relevante resultater. Alt forvitret material fra østveggen i andre etasje faller ned bak et gjerde som er satt opp for å begrense tilgang for publikum. Området er derfor egnet for oppsamling av nedfalt pulver. Viktig er også at vi her faktisk kan se en god del saltutblomstringer i tørrere perioder, spesielt i de nedre, søndre (høyre) deler av buen. Analyser med pH-papir og Merck teststrips viser at saltene ikke er alkaliske og at vi har å gjøre med store mengder sulfater. Ut fra konteksten og sammenholdt med tidligere, nøyaktige saltanalyser (Storemyr 2010a), kan det da ikke være annet enn natriumsulfater (mirabilitt/thenarditt) som først og fremst er til stede. Omkring 1. juni 2018 ble alt nedfalt material feid opp av Erlend Frengen i Bakken & Magnussen AS, siden den tid har vi fulgt programmet for oppfeiling og veiing som for vinduene i etasjen over.



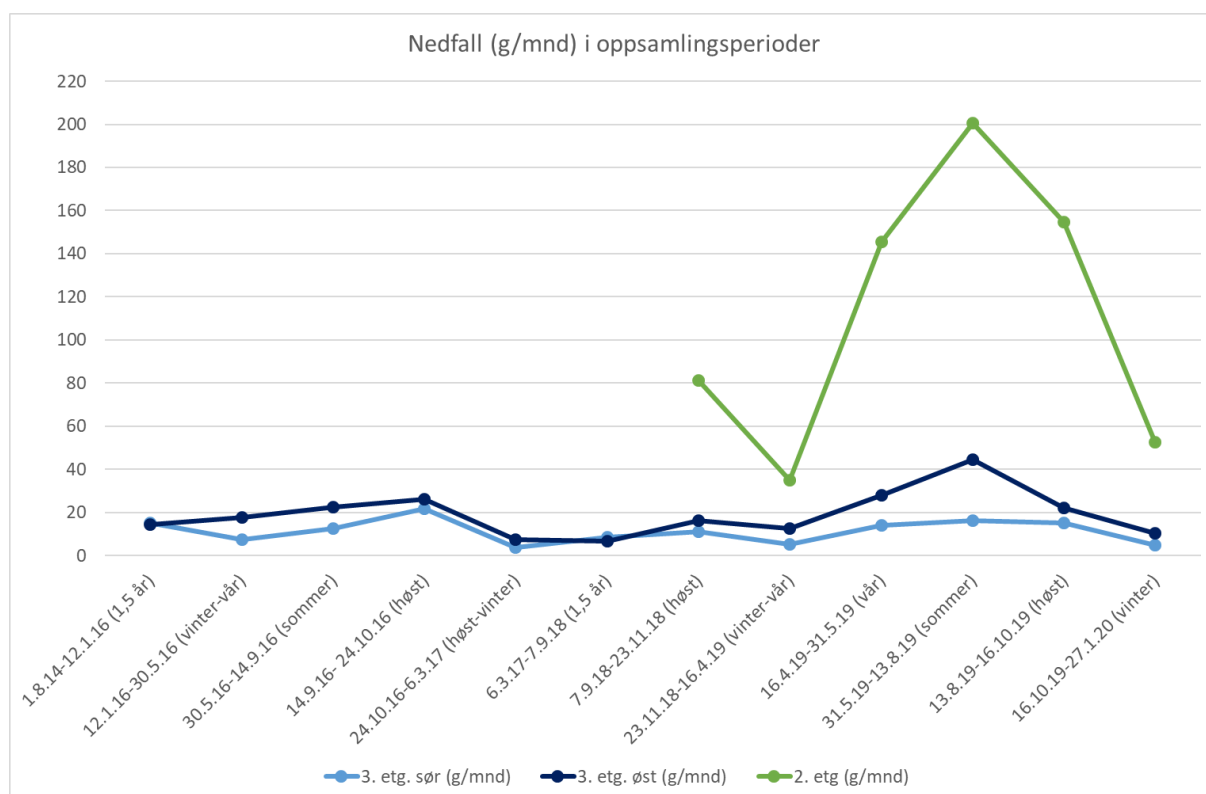
Figur 57: Oppfeiling av nedfalt material fra østveggen i andre etasje. Foto: Per Storemyr

5.3 Resultater fra studiet av nedfall

Tabellene under viser nedfalt material og mengder feid opp til ulike tidspunkt. Her finner man også beregning av nedfall pr. måned i de ulike tidsperiodene mellom hvert besøk. Slike beregninger er naturligvis beheftet med svakheter siden oppsamling ikke fulgte et strikt tidsskjema (se videre forklaringer i Storemyr 2018), men de gir likevel viktig innsikt i hvordan forvitringen foregår i de tørrere delene av Albanustårnet.

For det første er det en klar sammenheng når det gjelder mengde nedfalt material fra de tre ulike stedene vi har valgt ut. De befinner seg på ulike steder i de tørrere delene av tårnet, alle er brannpåvirket, og de viser alle den samme tendensen, relativt sett: Sørvinduet i tredje etasje har minst nedfall, deretter følger østvinduet i den samme etasjen, østveggen i andre etasje har suverent mest nedfall, men her dreier det seg om nedfall fra et mye større areal. I de ulike tidsperiodene følger imidlertid nedfallet presis det samme *mønsteret*. Dette er et svært viktig resultat av studien; det viser at forvitringen foregår på det samme viset fra sesong til sesong i de tørrere delene av tårnet. Det viser også at minimal solinnstråling i det søndre vinduet i tredje etasje ikke er spesielt viktig. De andre veggene er skjult for solinnstråling.

For det andre viser beregninger gjort på grunnlag av nedfalt material at murverket i disse tørrere delene av tårnet mister material med omtrent samme hastighet. Det kan en finne ut av ved å beregne gjennomsnittlig reduksjon av overflate på grunnlag av hva vi har feid opp. Østveggen i andre etasje viser en reduksjon på 0,5 cm pr. hundre år, østvinduet i tredje etasje 0,57 cm og sørvinduet i tredje etasje 0,43 cm. Det vil si at vi har å gjøre med en gjennomsnittlig forvitring som «skreller vekk» ca. 0,5 cm av overflaten pr. hundre år – i de tørrere delene av tårnet.



Figur 58: Nedfall i g/mnd fra de tre utvalgte veggene i periodene mellom hver oppfeing. Merk at nedfall fra de tre veggene følger det samme mønsteret. Se Tabell 2 og Tabell 4.

Ut fra tilgjengelige historiske bilder fra 80-100 år siden (se kap. 3) og med tanke på at tårnet nå er ca. 900 år gammelt, så gir en slik forvittringsrate mening. I et hundreårsperspektiv er 0,5 cm innenfor hva vi kan observere på bildene; selv om noen deler har forvitret mye, andre nesten ingen ting. Og i et tusenårsperspektiv, med 5 cm forvitring, så kan vi gjøre enkle målinger i spesielt fugene og på de mest brannskadde steinene. Da kommer vi til et tilsvarende resultat: Mange fuger er nå forvitret til et dyp på ca. 5 cm, vel å merke i de tørreste delene av tårnet innendørs. Derfor bekrefter disse tallene det vi alle kan se med våre egne øyne.

En tilsvarende projisering mot fremtiden forutsetter naturligvis at det nåværende vedlikeholdsregimet opprettholdes og at det ytre klimaet forblir noenlunde det samme. Vi skal komme tilbake til dette senere i rapporten. Det er naturligvis absolutt ikke sånn at alle deler av murverket vil forvitte 5 cm pr. tusen år. Grovt sett: I de tørrere delene av tårnet innendørs er fugene de mest utsatte delene av murverket, dernest brannpåvirket metaolivinstein, deretter brannpåvirket gneis. I de fuktigere delene av murverket, og de som ikke er brannpåvirket, har vi lite materialnedfall. Men, og det er viktig å huske på: Her er det mye fukt, mer lekkasjer, her har vi i stedet kjemisk og biologisk forvitring som forårsaker betydelig oppløsning og mulig destabilisering av murverket over tid. Med andre ord: Forvitring kommer i ulike former avhengig av (mikro)klima!

Tabell 1: Nedfalt material fra østvinduet og sørvinduet i tredje etasje i Albanustårnet.

Dato feid	3. etg. østvindu (g)	3. etg. sørvindu (g)	Dager siden siste oppsamling	Måneder siden siste oppsamling
01.08.2014	0	0		
12.01.2016	254	265	529	17,63
30.05.2016	82	34	139	4,63
14.09.2016	80	45	107	3,57
24.10.2016	35	29	40	1,33
06.03.2017	32	17	133	4,43
07.09.2018	124	154	550	18,33
23.11.2018	42	28	77	2,57
16.04.2019	60	25	144	4,80
31.05.2019	42	21	45	1,50
13.08.2019	110	40	74	2,47
16.10.2019	47	32	64	2,13
27.01.2020	35	16	103	3,43
Totalt	943	706		

Tabell 2: Nedfalt material fra østvinduet og sørvinduet i tredje etasje i perioder mellom oppfeing angitt i g/mnd.

Periode	3. etg. østvindu (g/mnd)	3. etg. sørvindu (g/mnd)	Snitt (g/mnd)
1.8.14-12.1.16 (1,5 år)	14	15	15
12.1.16-30.5.16 (vinter-vår)	18	7	13
30.5.16-14.9.16 (sommer)	22	13	18
14.9.16- 24.10.16 (høst)	26	22	24
24.10.16-6.3.17 (høst-vinter)	7	4	6
6.3.17-7.9.18 (1,5 år)	7	8	8
7.9.18-23.11.18 (høst)	16	11	14
23.11.18-16.4.19 (vinter-vår)	13	5	9
16.4.19-31.5.19 (vår)	28	14	21
31.5.19-13.8.19 (sommer)	45	16	30
13.8.19-16.10.19 (høst)	22	15	19
16.10.19-27.1.20 (vinter)	10	5	7
Gjennomsnitt (g/mnd)	19	11	15

Tabell 3: Nedfalt material fra østveggen i andre etasje i Albanustårnet.

Dato feid	2. etg. øst (g)	Dager siden siste oppsamling	Måneder siden siste oppsamling
01.06.2018	0		
07.09.2018	504	98	3,27
23.11.2018	208	77	2,57
16.04.2019	168	144	4,80
31.05.2019	218	45	1,50
13.08.2019	495	74	2,47
16.10.2019	330	64	2,13
27.01.2020	180	103	3,43
Totalt	2103		

Tabell 4: Nedfalt material fra østveggen i andre etasje i perioder mellom oppfeing angitt i g/mnd.

Periode	2. etg. øst (g/mnd)
1.6.18-7.9.18 (sommer)	154
7.9.18-23.11.18 (høst)	81
23.11.18-16.4.19 (vinter-vår)	35
16.4.19-31.5.19 (vår)	145
31.5.19-13.8.19 (sommer)	201
13.8.19-16.10.19 (høst)	155
16.10.19-27.1.20 (vinter)	52
Gjennomsnitt (g/mnd)	118

Tabell 5: Beregning av overflatereduksjon på veggene fra hvilke vi har feid opp og veid nedfall.

Sted	Totalt nedfall (g)	Antall dager	Nedfall/dag vekt (g)	Nedfall/år vekt (g)	Egenvekt nedfall (g/m³)	Nedfall/år volum (cm³)	Areal for nedfall (m²)	Overflate-reduksjon pr. år (mm)	Overflate-reduksjon pr. 100 år (cm)
3. etg. østvinduet	943	2005	0,47	172	1,5	114	2	0,057	0,57
3. etg. sørvinduet	706	2005	0,35	129	1,5	86	2	0,043	0,43
2. etg. østveggen	2103	605	3,48	1269	1,5	846	17	0,050	0,50



Figur 59: Detaljbilde av sterkt forvitret metaolivinstein i det østre vinduet i tredje etasje i Albanustårnet. Foto: Per Storemyr

6 Kvantitative saltanalyser

For å få et inntrykk av hvordan saltmengdene i det nedfalte pulveret fra veggene varierer over tid, ble materialet samlet opp ved østvinduet i 3. etasje valgt ut til kvantitativ kjemisk analyse. Analysene ble utført av Christine Bläuer ved Conservation Science Consulting i Fribourg, Sveits. I vedlegg 1 finnes alle resultatene og beskrivelse av analyseprosedyrene. Tabellen og grafen under gir en oppsummering.

Vi ser at de totale saltmengdene i oppsamlet materiale mellom 12.1.2016 og 13.8.2019 (10 prøver) varierer mellom 0,73 og 1,6%, med et gjennomsnitt på 1,12%. Dette er ikke overvettets mye, men likevel mer enn nok til å gi saltforvitring. Variasjonen over tid er ikke lett å tolke, men vi kan merke oss at det tendensielt er noe mer salt i nedfalt materiale på våren/forsommeren. Dette faller sammen med utblomstringsperioder og i senere kapitler (8 og 9) vil dette bli tolket i sammenheng med klima og mengden av det nedfalte materialet over tid.

Det dominerende kationen er natrium (Na^+), mens klorid (Cl^-) og til dels sulfat (SO_4^{2-}) er de viktigste anionene. Men vi legger merke til at pH ligger mellom 9,1 og 10,7, altså nokså sterkt alkalisk. Dette indikerer et betydelig innhold av karbonat (CO_3^{2-}) og betyr at en del av saltene opptrer som alkaliske natriumkarbonater (thermonatritt/natritt og/eller trona). Etter alt å dømme stammer disse saltene fra selve vindusbenken, den er som over nevnt reparert med sement. Vi kan i tørre sesonger se salter her, og tester med pH-papir har bekreftet at de er alkaliske. Vi vil ha fått med oss litt av disse saltene ved oppfeing av det nedfalte materialet. Det er lite trolig at de er tilstede i stort omfang i smygene.

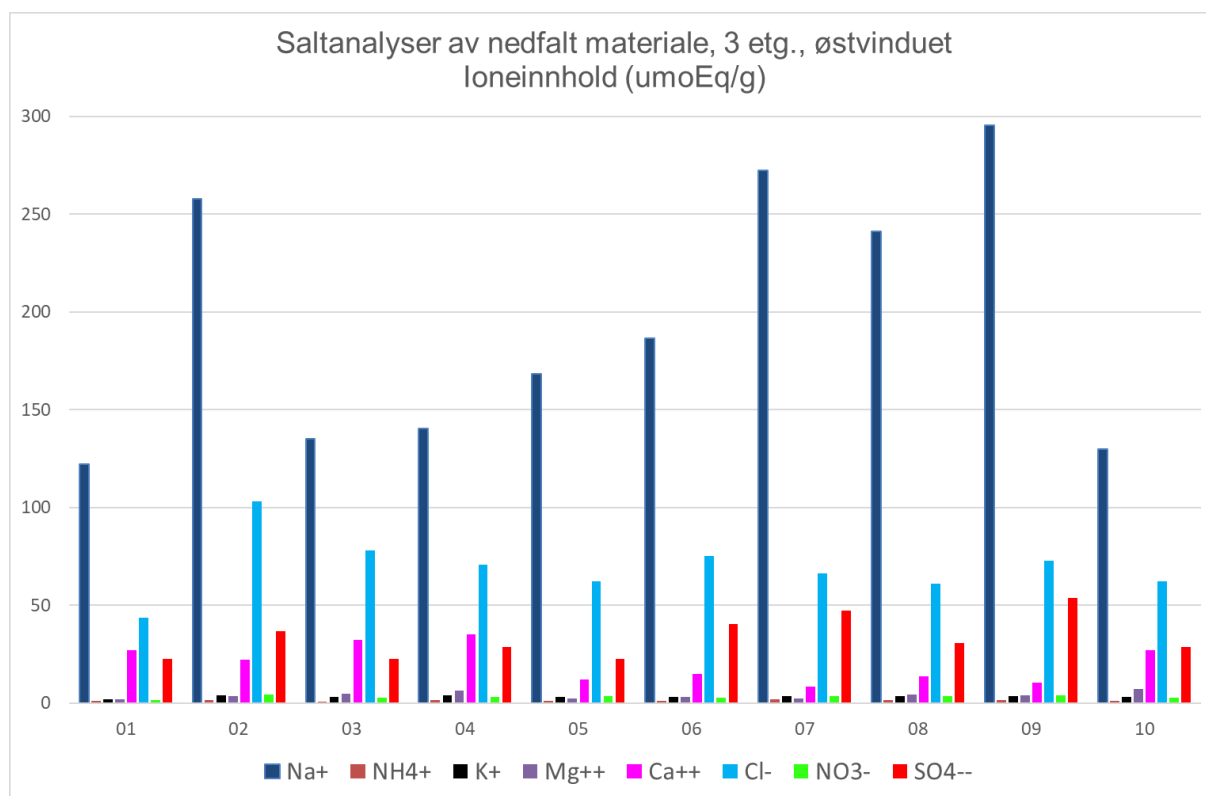
Saltene består ellers etter alt å dømme av halitt (NaCl) fra sjøsprøyt (og evt. saltvann i mørtel). Og analysene viser dessuten at natriumsulfater (thenarditt/mirabilitt) etter all sannsynlighet er svært viktige. Men noe av sulfatet kan også forekomme som gips (kalsiumsulfat) siden kalsium (Ca^{2+}) er den

fjerde viktigste analyserte komponenten. Ca kan naturligvis også stamme fra kalk i mørtel. De små mengdene av nitrat (NO_3^-) (fra organiske kilder) viser at nitratsalter ikke er spesielt viktig for forvitringen.

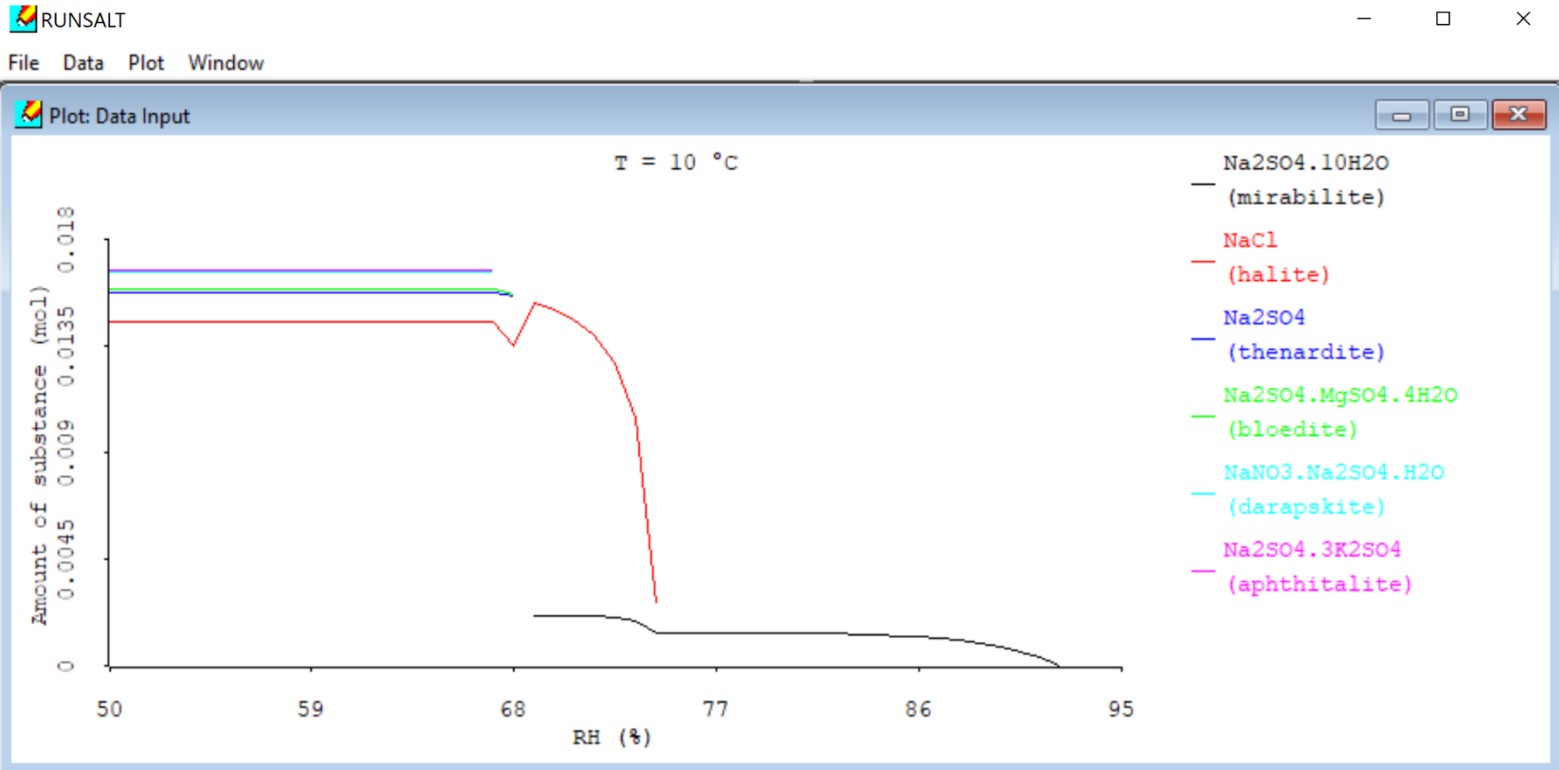
Analysene viser også at kjemisk forvitring sannsynligvis er et ubetydelig fenomen i vindussmyget. Metaolivin er en meget magnesiumrik bergart. Mineralet olivin, $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$, forvitrer lett og kan derfor frigjøre magnesium. Men magnesium finnes i kun 100 ganger lavere konsentrasjon enn natrium i prøvene. Det er nok for lite til at kjemisk forvitring kan anses viktig.

Tabell 6: Sammenstilling av kvantitative kjemiske analyser utført av Christine Bläuer, jfr. vedlegg.

Prøve	Dato feid opp	Ioneinnhold ($\mu\text{g/g}$)								Totalt saltinnhold (vekt%)	pH
		Na+	NH4+	K+	Mg++	Ca++	Cl-	NO3-	SO4--		
01	12.01.16	2808	18	70	25	540	1552	102	1086	0,63	9,7
02	30.05.16	5929	26	162	42	444	3654	266	1775	1,24	9,8
03	14.09.16	3111	12	122	61	646	2765	174	1080	0,73	9,2
04	24.10.16	3228	27	149	79	705	2505	208	1387	0,95	9,1
05	06.03.17	3867	19	127	27	246	2208	221	1091	1,11	10,0
06	07.09.18	4292	24	128	41	298	2671	173	1937	1,05	10,2
07	23.11.18	6262	33	141	29	171	2354	230	2266	1,53	10,7
08	16.04.19	5545	25	143	52	277	2160	229	1484	1,43	10,6
09	31.05.19	6789	30	149	48	211	2587	243	2575	1,60	10,6
10	13.08.19	2988	24	118	86	546	2214	162	1375	0,98	9,7



Figur 60: Sammenstilling av ioneinnhold i de enkelte prøvene. Vi ser at natrium er det dominerende ionet, med klorid som en god nr. 2. Figuren viser ioneinnhold på mol-basis og derfor kan en addere henholdsvis alle kationer og alle anioner som burde vise like høy sum. Vi ser at dette ikke er tilfelle her. Det er fordi karbonat (CO_3^{2-}) ikke er målt. Se vedlegg for ytterligere forklaring. Figur etter Christine Bläuer.



Figur 61: Skjermdump av analyseresultat ved bruk av RUNSALT. Se teksten og Figur 62 for forklaringer. Programmet er gratis og kan hentes her: <http://science.sdf-eu.org/runsalt/>

7 Analyse med dataprogrammet RUNSALT

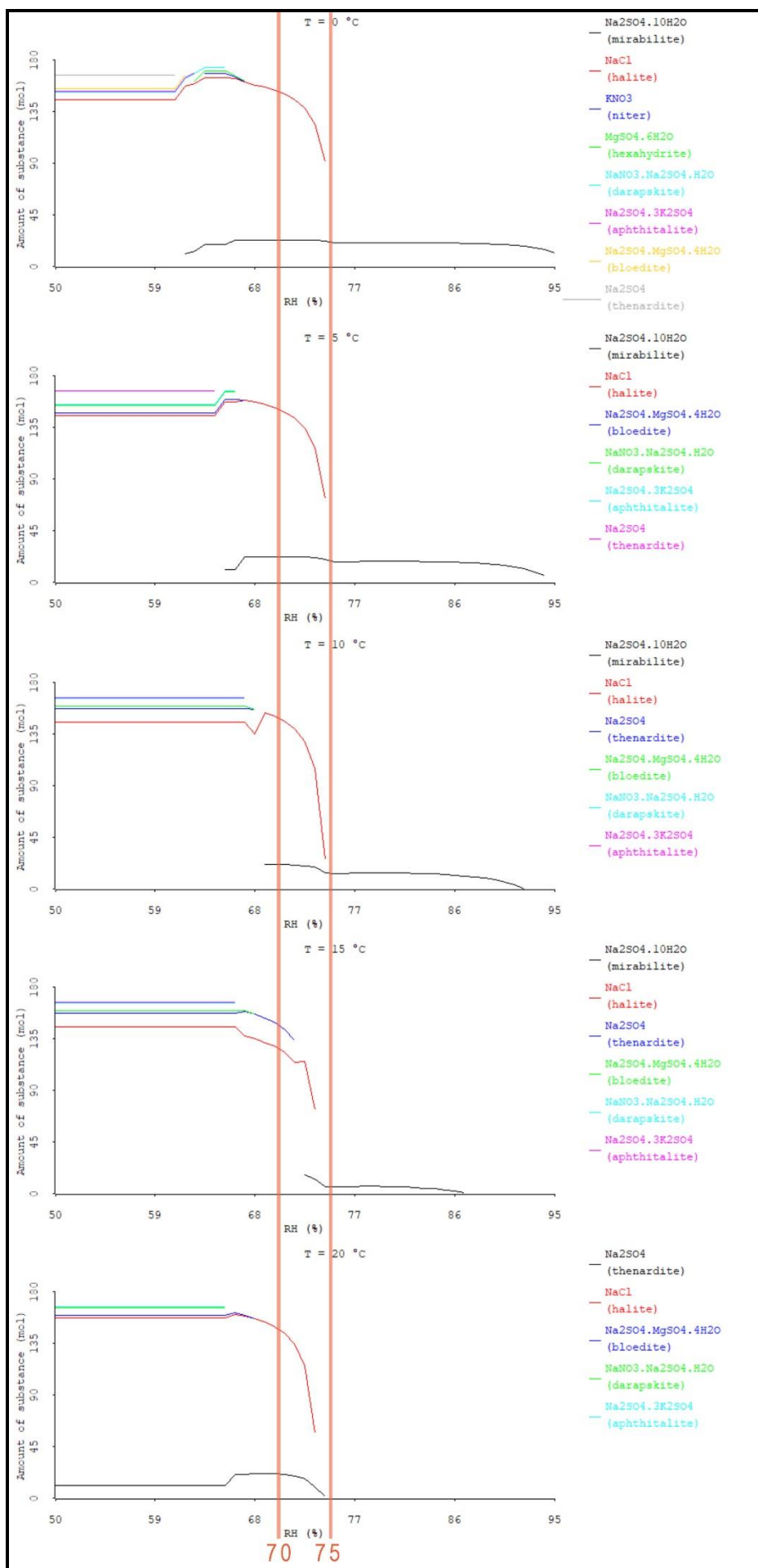
RUNSALT er et dataprogram som bruker den termodynamiske modellen ECOS for å forutsi når hvert enkelt salt vil krystallisere om man har komplekse blandinger av salt, slik vi har det i Albanustårnet. Programmene er utviklet av Price (2000) og Bionda (2005). Eksempel: Om halitt er det eneste saltet, så vil det krystallisere ved 75,5% relativ luftfuktighet ved 20°C . Dette kaller vi likevektsfuktigheten (*Equilibrium Relative Humidity*, EQRH). Når det er andre salter tilstede, så vil EQRH normalt synke.

Vi har eksempler fra Erkebispegården i Trondheim (Regalierommet), der vi har blandinger av flere salter og der EQRH for halitt med RUNSALT/ECOS er modellert til ca. 67% ved 20°C . Dette er sammenholdt med observasjoner, da det her er mulig å se saltene, og det viser seg å omtrentlig stemme, men observerte verdier ligger litt lavere, ved ca. 65% (Storemyr 2002). Dette har konsekvenser for forståelsen av saltforvitringen og ikke minst hvordan man bør styre luftfuktigheten i et rom som er lukket mot omgivelsene. Forenklet: Om man holder RH et stykke over 65%, så sjansene gode for at halitt ikke vil krystallisere i Regalierommet – og ødelegge de verdifulle kalkmaleriene. Dette er lettere enn å måtte holde RH et stykke over 75,5%, for da blir det så fuktig at man kan stå i fare for å få biologisk vekst.

Vi kan *absolutt* ikke styre RH på samme måte i Albanustårnet, da det er helt åpent for omgivelsene, men modellering med RUNSALT vil likevel gi oss en pekepinn på hvordan halitt og andre salter oppfører seg, slik at vi blir i stand til å forstå hvilken innvirkning klimaet har på saltforvitringen.

For å gjøre modelleringen har vi etter en del testing brukt et gjennomsnitt av de kvantitative ioneverdiene beskrevet i forrige kapittel (kap. 6) som «input» i programmet (verdier i $\mu\text{g/g}$):

Na+	K+	Mg++	Ca++	Cl-	NO3-	SO4--
4482	131	49	408	2467	201	1606



Figur 62: Sammenstilling av resultater ved modellering med RUNSALT. Vi ser at halitt krystalliserer ved verdier mellom ca. 70 og 75% RH, jo kaldere, jo høyere verdi. Mirabilitt har et stort spenn i oppførsel og vil først og fremst krystallisere når det er kjølig, ved verdier mellom 60-70 og opp mot 90% RH. Ved temperaturer over 15 grader reduseres viktigheten av mirabilitt.

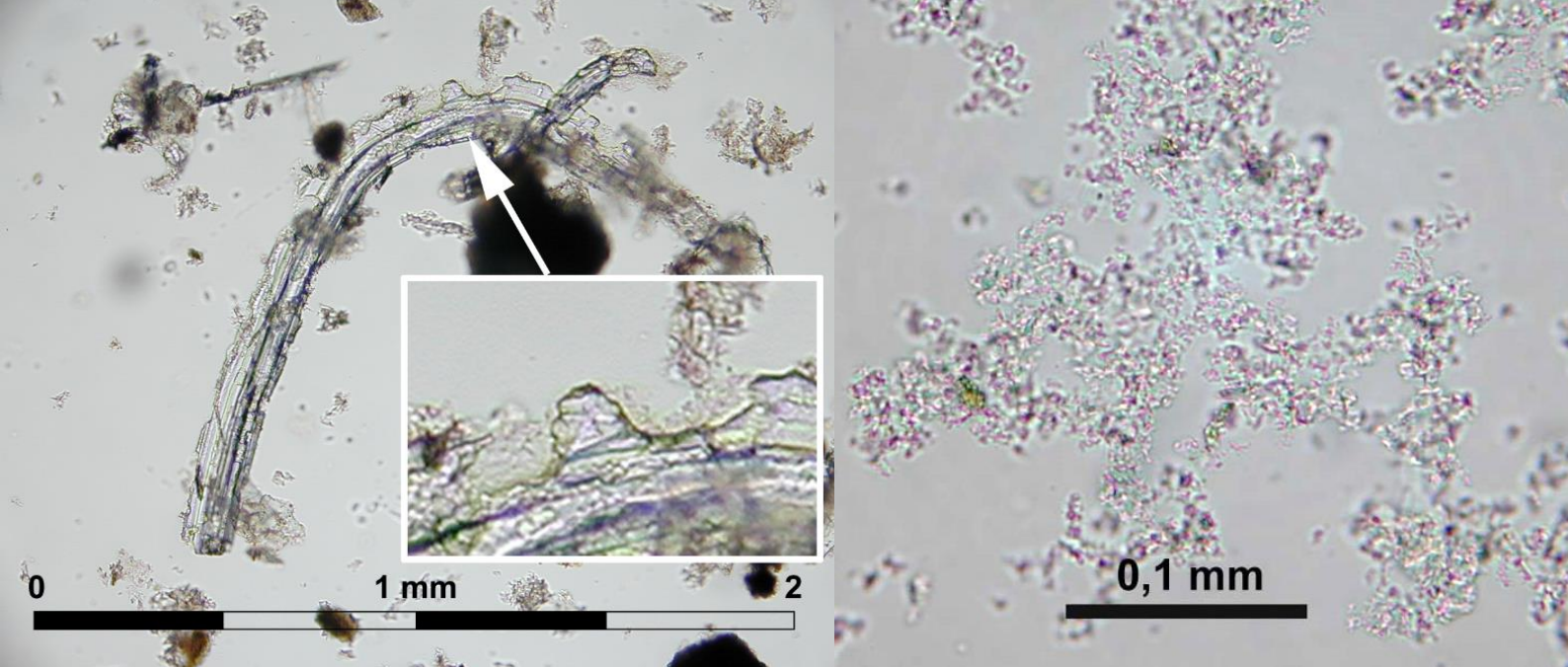
Flere andre salter er angitt i figuren, men de opptrer med så lave konsentrasjoner, eller er stabile, at de er mindre viktige.

Av tekniske grunner er ikke saltet gips tatt med som et mulig viktig salt i denne sammenstillingen. Vi kan likevel ikke utelukke at gips har betydning for forvitringen i Albanustårnet.

Deretter har vi kjørt programmet ved å velge ulike temperaturer for å få grafiske framstillinger av hvordan de ulike saltene oppfører seg ved 0, 5, 10, 15 og 20°C. Som vi ser av fremstillingen (Figur 62), går halitt i oppløsning mellom 70 og 75% RH litt avhengig av temperatur. Det er på et så høyt nivå at det bidrar til forklaringen om hvorfor det er vanskelig å observere halitt i tårnet. Selv om fuktigheten kan gå ned til under 50-60% RH i rommet, så er dette bare kortvarig i tørre perioder. Dessuten trengs det normalt noen dager for en saltkrystall å vokse så mye at den blir synlig for det blotte øyet (jfr. Zehnder og Schoch 2009). Det er imidlertid sannsynlig at det i tørre perioder vokser mikrokrystaller i/under overflaten (*subflorescence*), men slike vil være vanskelige å observere, også med mikroskop.

Vi ser også av den grafiske fremstillingen at mirabilitt er tungt tilstede ved RH over 60-70% og helt opp mot over 90%, men at mengden avtar når det blir varmere, ved ca. 15°C er dette saltet ifølge modelleringen borte. Da tar i stedet thenarditt over ved fuktforhold under ca. 70%. Mirabilitt er natriumsulfat med krystallvann; det som trolig skjer ved lave fuktnivåer og høyere temperaturer er at mirabilitt mister krystallvannet og såkalt dehydrerer til thenarditt, som ikke har krystallvann. Krystallvannet forsvinner altså når det blir tørrere og varmere (Figur 63).

Zehnder og Schoch (2009) har i en helt annen sammenheng vist at dehydrering av mirabilitt finner sted ved fuktforhold under ca. 65% RH. Uansett er det generelt så fuktig i Albanustårnet at slik dehydrering sjelden vil finne sted. Dette er et fenomen som vi bl.a. skal behandle i neste kapittel.



Figur 63: Natriumsulfater under mikroskopet. Ved krystallisering av mirabilitt dannes det gjerne nåler eller såkalte «whiskers» (t.v.), men en kan også få mere skorpeformede masser. Når fuktigheten synker vil krystallvannet i mirabilitt forsvinne og vi står igjen med en pulverformet masse – mirabilitt har dehydrert til thenarditt (t.h.). Innfelt er det vist hvordan en del av mirabilittkrystallen er i ferd med å dehydrere. Mikrofoto fra saltutblomstringer i Erkebispegården i Trondheim. Foto: Per Storemyr

8 Observasjon og tolkning av krystallisering av natriumsulfater

Selv om halitt nok bidrar til forvitringen og selv om vi absolutt ikke kan utelukke gips, har det over blitt sannsynliggjort at natriumsulfat, mirabilitt, spiller en vesentlig rolle i forvitringen, til tross for at vi vanskelig kan se salt der det ryr som mest fra veggene. I enkelte tilfeller har vi likevel godt med utblomstringer, for eksempel under buen på østveggen i andre etasje i Albanustårnet, der vi også har en av stasjonene for oppsamling av nedfalt material.

På dette stedet har vi foretatt enkel overvåkning med en serie fotos fra 2016 til 2020 (Figur 64). De viser at det er lite eller ikke noe tegn til salt ved RH over ca. 80%. Dermed har vi vist at de teoretiske verdiene fra modelleringen i forrige avsnitt kun er delvis riktige: Natriumsulfat (mirabilitt) dannes ikke ved høyere fuktnivåer enn ca. 80-85% i Albanustårnet og ikke på opp mot 90-95%, som modelleringen antyder. Muligens har dette med kondensasjon å gjøre – vi har et inn klima her ute i havgapet som er svært ømfintlig for kondens. Og blir det kondens på veggene, så går alt av salt i oppløsning, selv om romklimaet samtidig kan oppvise nokså moderate fuktnivåer.

Men saltene er godt synlige ved fuktnivåer omkring 70% og har absolutt størst utbredelse når fukten faller en del under 70%. Dette er helt typisk om våren, men det kan også skje i tørre perioder selv på høsten. Her må man huske på at temperaturen også spiller en ikke uvesentlig rolle: Det er større sjans for at mirabilitt krystalliserer ved lavere temperaturer (se kap. 7). Dette er viktig for den totale forståelsen av forvitringen i tårnet, som vi skal se i neste kapittel.

I sum vil det si at natriumsulfat-saltene er mest aktive, med størst skadepotensial, når de igjen krystalliserer etter fuktige perioder, altså når været igjen blir tørrere. Dette kan tydeligvis skje allerede mellom 70 og 80% RH, men i enda større grad når fuktigheten synker mer.

Som over nevnt er natriumsulfater svært komplekse salter, siden de kommer i to former, som mirabilitt og thenarditt (Figur 63). Likevektsdiagrammene under illustrerer dette (Figur 65-Figur 66).



12.1.2016: 80% RH, mild periode på vei



14.9.2016: Under 70% RH, varmt for årstiden



24.10.2016: Under 70% RH, tørr tid



7.9.2018: Ca. 70% RH, på vei mot fuktig tid



23.11.2018: Ca. 80% RH, fuktig tid



31.5.2019: Rundt 70% RH, på vei fra tørt til fuktigere

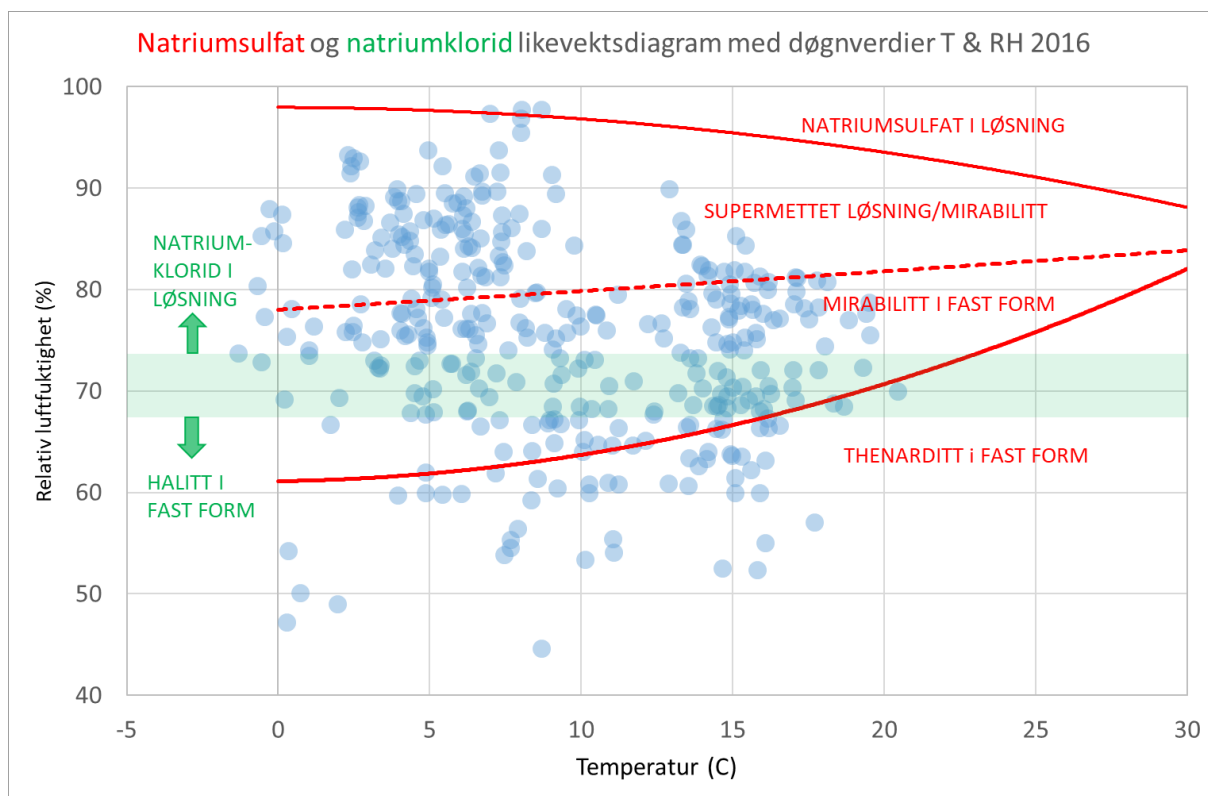


13.8.2019: Rundt 70% RH, kjølig

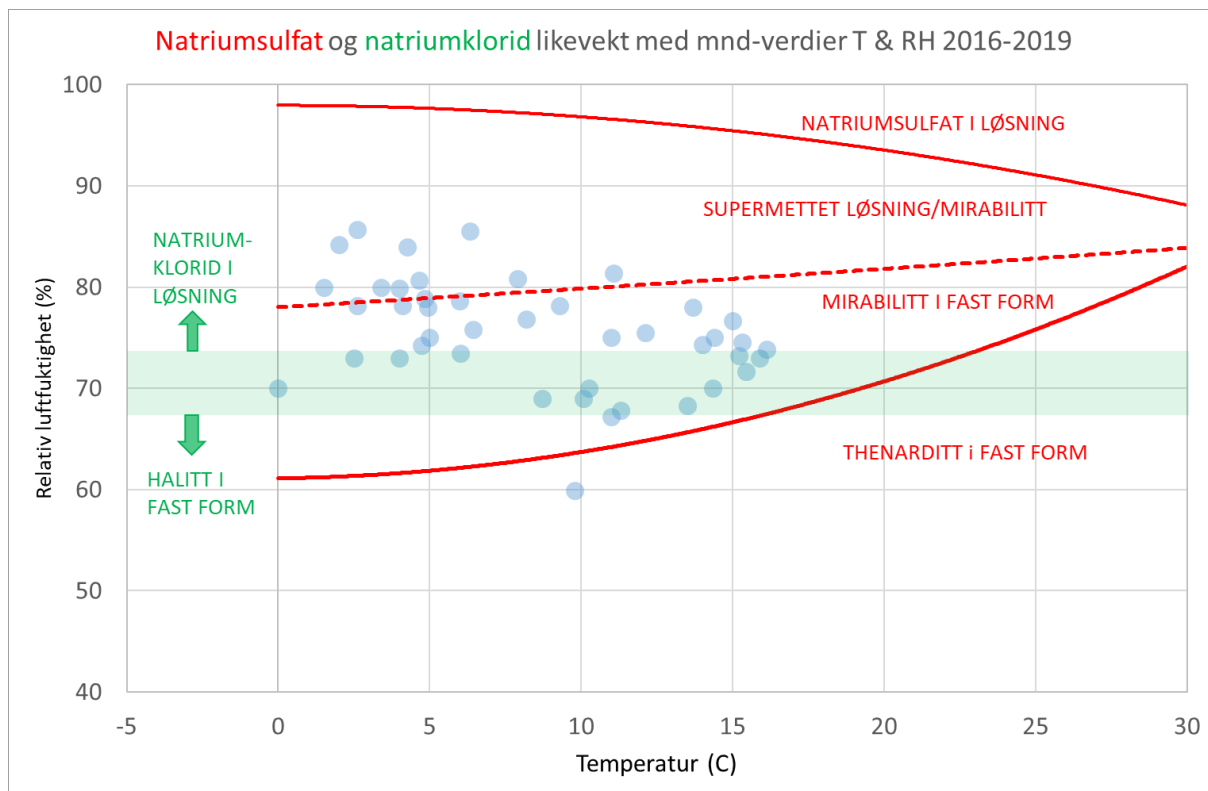


27.1.2020: Over 80% RH, fuktig

Figur 64: Krystallisering av natriumsulfater på metaolivinstein i nordveggen i 2. etasje, under buen, over oppsamlingssted for nedfalt pulver. Omtrentlig RH ved fototidspunkt (dagen) er angitt ved hvert foto. Som vi ser er saltene i oppløsning over ca. 80% RH, godt synlige ved rundt 70% og med absolutt størst utbredelse under 70%. Det er noe fuktigere i veggoverflaten enn det måles i rommet.



Figur 65: Likevektsdiagram for natriumsulfat med innplotting av **døgnerverdier** for T og RH i 2016 (blå punkter). I diagrammet er også EQRH for halitt inntegnet (bred, grønn strek). Fasediagram etter Bionda (2006), med videre referanser.



Figur 66: Likevektsdiagram for natriumsulfat med innplotting av **månedsverdier** for T og RH i perioden 2016-20 (blå punkter). I diagrammet er også EQRH for halitt inntegnet (bred, grønn strek). Fasediagram etter Bionda (2006), med videre referanser.

I temperaturområdet 0-20°C og RH-området 50-100% har vi fire såkalte «faser», fra tørrest til mest fuktig: thenarditt, mirabilitt, en supermettet vannløsning og en «normal» vannløsning. Om vi plotter våre registrerte temperatur- og RH-verdier i dette diagrammet så ser vi følgende:

For *døgnverdiene* (altså gjennomsnitt på T og RH over ett døgn) i 2016 så ligger de fleste i mirabilitt-området, mange ligger i det oppløste området, mens færre ligger i thenarditt-området. Dette stemmer overens med våre observasjoner (se Figur 64), men kun delvis. For vi har ikke observert mye thenarditt, som altså dannes ved såkalt dehydrering av mirabilitt ved lav RH og høyere T.

For *månedsverdiene* (gjennomsnitt av T og RH over en måned) i perioden 2016-2019 så ser vi en viktig årsak til at vi ikke observerer thenarditt. I dette diagrammet er verdiene sterkt konsentrert i mirabilitt-området, mindre i det oppløste området og kun med en verdi i thenarditt-området. I klartekst betyr dette at fuktigheten generelt er for høy til at det dannes mye thenarditt. Som vi over har vært inne på trengs det en viss tid, ofte noen dager, for at salter krystalliserer/transformeres, i dette tilfellet ved såkalt dehydrering av mirabilitt til thenarditt (Figur 63, Figur 64). Slike forhold oppstår åpenbart sjelden i Albanustårnet.

Men forholdene ligger svært godt til rette for gjentatt oppløsning og krystallisering av mirabilitt, i temperaturområdet 3-10°C og 65-90% RH, dvs. på etterm vinteren, våren og delvis på høsten. Her har vi et utall passeringer av grensen mellom mirabilitt i fast og oppløst form. I praksis vil det være litt annerledes, på grunn av den over nevnte tiden det tar for at et salt kan krystallisere («treghet i systemet») og ikke minst på grunn av kondenshendelser, som vil forstyrre det teoretiske bildet. I praksis vil også RH være noe høyere på murverksoverflatene enn vi kan måle i rommet.

I fasediagrammene har vi også tegnet en bred grønn strek for EQRH for halitt, mellom 70 og 75% RH (se kap. 7), dvs. grensen mellom halitt i fast og oppløst form. Vi ser også her at et utall T og RH-verdier grupperer seg på begge sider av streken, dvs. at vi i teorien vil ha et høyt antall sykluser med oppløsning og krystallisering av halitt, fortrinnsvis når det er litt varmere, 7-17°C. Men som for mirabilitt, så er det i praksis noe annerledes på grunn av treghet i systemet og kondenshendelser.

Hva modellering og fasediagrammer ikke fanger opp, er hvordan saltene oppfører seg som resultat av ventilasjons- og opptørkingsforhold. I litteraturoversikten (kap. 1.6) ble det påpekt at hurtig opptørking har en tendens til å favorisere *subflorescence*, dvs. at saltene krystalliserer like under overflaten på stein og mørtel. Vi har videre påpekt at opptørkingsforholdene i Albanustårnet er nokså gode, spesielt i tredje etasje, men også på andre steder, generelt i de østre deler av tårnet som er minst utsatt for lekkasjer og kondens (kap. 4). Som vi har vært inne på tidligere, så er hurtig opptørking en sannsynlig hovedårsak til at vi vanskelig kan se salt der det ryr som verst fra veggene. Saltene «skjuler» seg bak overflaten og løst, forvitret pulver.

I denne sammenhengen er det videre viktig å peke på alle utblomstringene vi faktisk kan se, spesielt av mirabilitt. Det er interessant å legge merke til at disse i liten grad forekommer der det er som tørrest. Det er sannsynlig at litt fuktigere forhold og lengre opptørkingstider favoriserer dannelse av *efflorescence* i form av både lett synlig skjegg og skorpelignende forekomster (se også kap. 1.6).

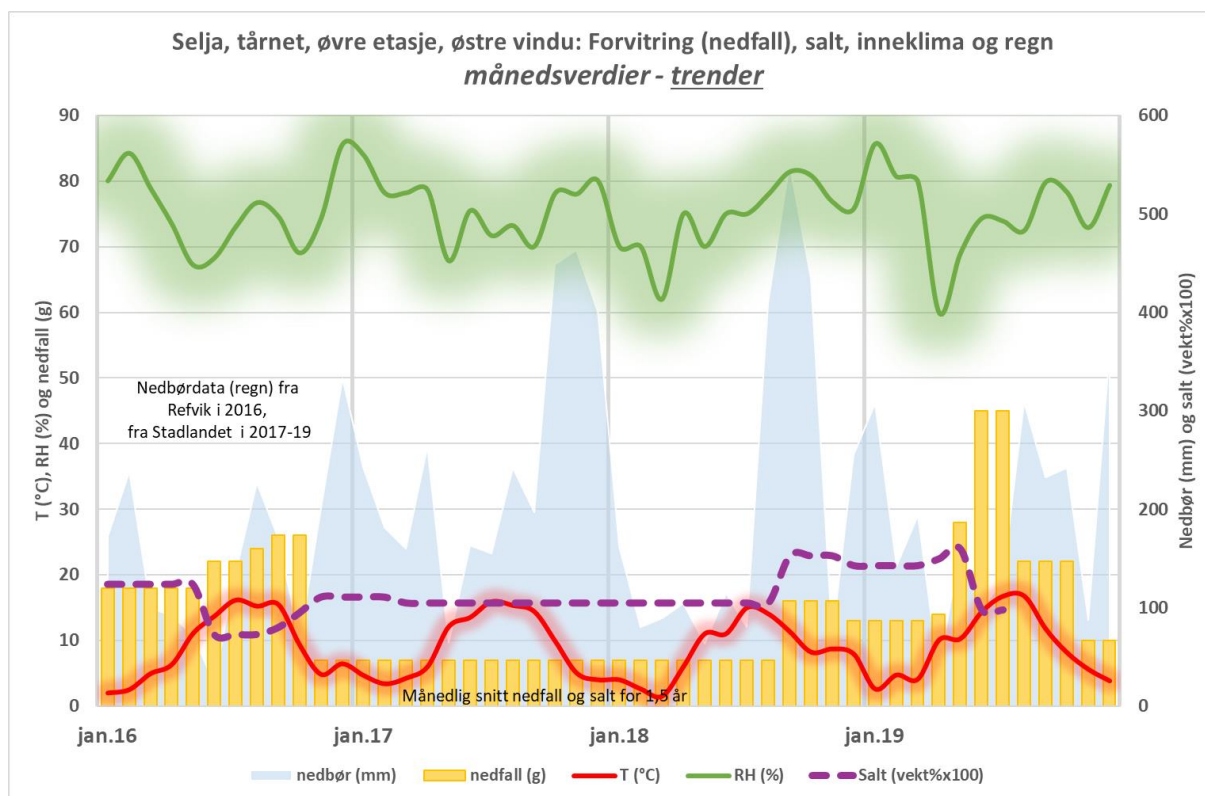


Figur 67: Store mengder nedfalt materiale fra forvitrende metaolivinstein i østveggen i andre etasje i tårnet våren 2017.
Foto: Per Storemyr

9 Samlet tolkning av materialnedfall, klima og saltforvitring

Som vi har sett, er et av de største problemene med å tolke skadeprosessene i Albanustårnet at vi ikke med det blotte øye kan se salt på steder det ryr som verst med material fra veggene. Vi har gjennom en rekke undersøkelser og teoretiske betraktninger likevel sannsynliggjort at det er mirabilitt ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) som er hovedansvarlig for forvitringen. Tolkningen er at saltkrystallene, når de blomstrer ut, stort sett gjør dette like under overflaten på stein og mørtel (*subflorescence*), ikke minst på grunn av gode opptørkingsforhold i tørre perioder. Men i noen tilfeller kan vi se – og over tid følge med på – hvordan mirabilitt oppfører seg (*efflorescence*), noe som styrker tolkningen. Vi kan imidlertid absolutt ikke utelate andre salter, spesielt halitt (NaCl) og gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) som delansvarlig for forvitringen, i prinsippet ei heller for oss ukjente prosesser.

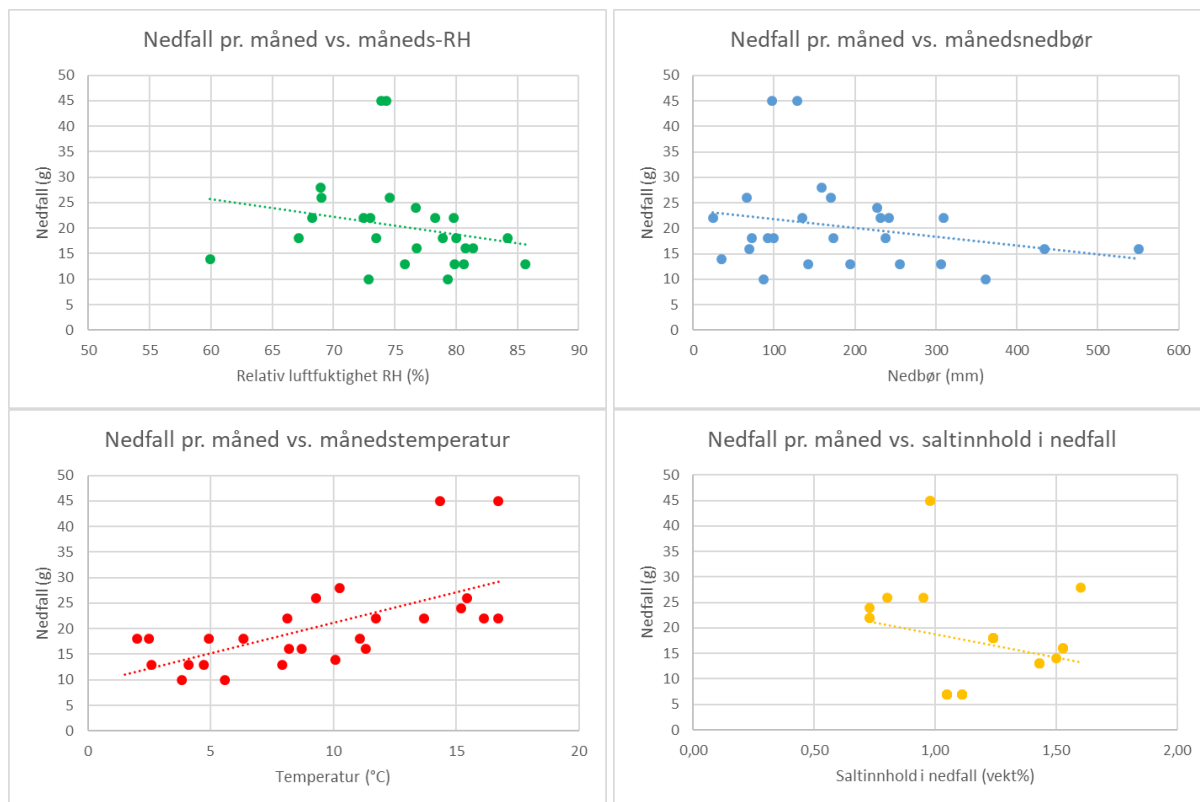
At mirabilitt og muligens halitt og gips er viktige for forvitringen i Albanustårnet kommer ikke som en overraskelse. Vi har åpenbare, store kilder til disse saltene (bygningmaterialene, sjøsprøyt). Problemet på Selja, lang ute i havgapet med et mildt, fuktig og vindfullt klima, er at været er ekstremt skiftende og sjelden holder seg på lave nok fuktnivåer over lang nok tid til at saltene krystalliserer på måter vi er godt kjent med fra andre deler av Norge, andre deler av verden. Vi har i arbeidet kunnet utelukke skademekanismer som frost, biologisk påvirkning, kjemisk forvitring og såkalt hygrisk forvitring på de stedene der det ryr mest fra veggene. Vi har også vist at der det ikke



Figur 68: Klima, nedfall og salt i Albanustårnet, tredje etasje, normaliserte månedsverdier fra jan. 2016 til des. 2019 . Hovedtrenden er klar: Det er størst nedfall av material i tørrere år, spesielt en stund etter tørre perioder på våren/forsommeren. Legg merke til at vi kun har gjennomsnitt for nedfall og salt i perioden 2017 til deler av 2018. Dette virker ikke inn på hovedtrendene. Nedfall og salt er fra østvinduet. Se teksten for videre forklaringer og tolkninger.

Tabell 7: Verdier benyttet til fremstillingen i Figur 68. Nedfall og salt er fra østvinduet. Se teksten for forklaringer.

mnd/år	nedbør (mm)	T (°C)	RH (%)	nedfall (g)	salt (wt%)	mnd/år	nedbør (mm)	T (°C)	RH (%)	nedfall (g)	salt (wt%)
jan.16	173	2	80	18	1,24	jan.18	162	4	70	7	1,05
feb.16	238	2	84	18	1,24	feb.18	81	3	70	7	1,05
mar.16	100	5	79	18	1,24	mar.18	89	2	62	7	1,05
apr.16	92	6	73	18	1,24	apr.18	104	6	75	7	1,05
mai.16	72	11	67	18	1,24	mai.18	64	11	70	7	1,05
jun.16	24	14	68	22	0,73	jun.18	115	11	75	7	1,05
jul.16	135	16	73	22	0,73	jul.18	80	15	75	7	1,05
aug.16	227	15	77	24	0,73	aug.18	409	14	78	7	1,05
sep.16	170	15	75	26	0,80	sep.18	551	11	81	16	1,53
okt.16	67	9	69	26	0,95	okt.18	435	8	81	16	1,53
nov.16	202	5	74	7	1,11	nov.18	69	9	77	16	1,53
des.16	333	6	86	7	1,11	des.18	255	8	76	13	1,43
jan.17	242	5	84	7	1,11	jan.19	307	3	86	13	1,43
feb.17	182	3	78	7	1,11	feb.19	142	5	81	13	1,43
mar.17	160	4	78	7	1,05	mar.19	194	4	80	13	1,43
apr.17	263	6	79	7	1,05	apr.19	36	10	60	14	1,50
mai.17	64	12	68	7	1,05	mai.19	159	10	69	28	1,60
jun.17	163	14	75	7	1,05	jun.19	97	14	74	45	0,98
jul.17	155	16	72	7	1,05	jul.19	128	17	74	45	0,98
aug.17	242	15	73	7	1,05	aug.19	309	17	72	22	-
sep.17	197	14	70	7	1,05	sep.19	232	12	80	22	-
okt.17	448	10	78	7	1,05	okt.19	242	8	78	22	-
nov.17	463	5	78	7	1,05	nov.19	87	6	73	10	-
des.17	402	4	80	7	1,05	des.19	361	4	79	10	-



Figur 69: Trender for materialnedfall som funksjon av nedbør, relativ luftfuktighet, temperatur og saltinnhold i nedfall, alt på månedsbasis. Nedfall og salt er fra østvinduet i tredje etasje. Vi har i diagrammene utelukket den lange perioden i 2017-2018 der vi ikke samlet opp nedfall og kun har gjennomsnittsverdier. Se teksten, samt Figur 68 og Tabell 1 for videre forklaringer.

ryr mye fra veggene der fuktigheten er høy og der vi har lekkasjer og mye kondens. Her har vi kjemisk forvitring (kalkutfelling), biologisk påvirkning og litt frost. Dette er definitivt ikke mindre viktig enn saltforvitringen i de tørrere områdene av tårnet, men i denne rapporten er det sistnevnte vi er mest opptatte av.

Om vi betrakter materialnedfallet fra de utvalgte stedene der vi har feid det opp og analysert det, så ser vi en klar sammenheng mellom fuktigere og tørrere perioder. I Figur 68 har vi sammenholdt alle tilgjengelige målinger og analyser over de siste fire år og «normalisert» dem til månedsverdier. Her har vi nedbørsdata fra Stadlandet (samlet pr. måned)¹⁶, temperatur og relativ luftfuktighet i den øvre etasjen i Albanustårnet (gjennomsnitt pr. måned), her har vi også nedfall av material fra smyget i østvinduet (normalisert til månedsverdier) og saltinnholdet i dette nedfalte materialet.¹⁷

2016 var et tørt år, med lite nedbør og nokså lav RH. 2017 var utpreget fuktig og med mye regnvær. 2018 var tørt inntil sommer/høst. 2019 var eksepsjonelt tørt på våren/forsommeren, så kom regnet. Vær oppmerksom på at begrepet «tørt» bare betyr at det regnet mindre enn normalt! Husk at det på Selja dreier seg om nedbør på 2000-3000 mm i året, det er 2-3 ganger så mye som i f.eks. Oslo og

¹⁶ I 2016 er det nedbørsdata fra Refvik i Kinn kommune. Data fra Stadlandet var ikke tilgjengelig i 2016, men tendensen er klar nok: Det var relativt lite nedbør i 2016.

¹⁷ Siden nedfall og saltinnhold i nedfall ikke er veid/analysert på månedsbasis, så har vi benyttet gjennomsnittsverdier i perioder som går ut over måneder, og normalisert dem til månedsverdier. Her har det vært nødvendig med noe estimering (se Storemyr 2018). Den største svakheten i analysen er deler av 2017 og deler av 2018, da vi utførte for få observasjoner og oppfeiling av nedfalt materiale. Men dette påvirker ikke hovedkonklusjonene i rapporten.

Trondheim. Vi ser klare trender. I de tørrere årene 2016, delvis 2018 og spesielt 2019, da våren/forsommeren var eksepsjonelt tørr, så falt det ned mye mer material fra veggene enn i 2017, som var et svært fuktig år.

Vi kan også se på trendene for materialnedfall plottet mot månedsverdier for nedbør, luftfuktighet (RH), temperatur og saltinnhold i det nedfalte materialet (Figur 69). Her ser vi at nedfallet tendensielt synker ved mer nedbør og høyere RH, mens det øker med økende temperatur. For sistnevnte dreier det seg enkelt forklart om at RH normalt er lavere ved høyere temperatur. Forholdet mellom nedfall og saltinnhold viser en uklar trend mot mer salt ved lavere materialnedfall. Dette kan forklares ved at materiale som faller ned i de viktigste utblomstringsperiodene for salt har med seg en høyere del av saltet enn når det er i oppløsning i fuktigere perioder.

De høyeste verdiene for nedfall finner vi altså tendensielt en god stund *etter* de tørreste periodene på våren, på samme måte som for tilsvarende forvitring på Sveaborg ved Helsingfors og på Nidarosdomen (se kap. 1.6). Det har å gjøre med følgende:

- Tørrere perioder: Salter krystalliserer like under overflaten (*subflorescence*) og sprenger løs material i stein og mørtel. Alt materialet ramler ikke nødvendigvis ned, mye kan fortsatt «henge» på veggene
- Våtere perioder: Saltene går i oppløsning. Forenklet: De gir ikke lenger noen «bindkraft» til pulver og biter de har sprengt løs. Materialet faller ned.

Men det er viktig å nevne at vi også kan ha så tørre perioder på høsten og vinteren at det generelle bildet blir forstyrret. Hyppige kondenshendelser gir også forstyrrelser. Dette er også i tråd med tidligere studier nevnt i kap. 1.6. Helt sentralt er også at lange perioder med regn/høy fuktighet, som i store deler av 2017, fører til mye mindre forvitring enn når det er flere svingninger mellom høyere og lavere RH. Med andre ord:

- *Den ene hovedtrenden* er at tørre perioder, med gjennomsnittlig RH under 70 og ned mot 60% trigger saltutblomstring og materialtap.
- *Den andre hovedtrenden* er at lengre, fuktigere perioder, med gjennomsnittlig RH over 70 og opp mot 80% gir mindre materialtap.

Dette betyr at et ønskemål for å begrense forvitring ville være å begrense antall svingninger mellom høye og lave fuktnivåer. Ideelt sett burde en ha hatt et «konstant» inneklimate på under 60-65% RH, eller over ca. 75-80%. Det er knapt mulig i Albanustårnet der inneklimate er helt avhengig av uteklimate og det ikke er verken ønskelig eller mulig med omfattende klimakontroll.

Men kan en likevel bedre inneklimate ved hjelp av enkle midler? Før vi kommer inn på dette, så må vi ta en kikk på hva fremtiden kan komme til å bringe. Et stikkord er klimaendringer. Vi trenger prognoser for å kunne gjøre oss opp meninger om hva som kan være nødvendige tiltak.



Figur 70: Blir det mer nedbør og storm i fremtiden? Flere fine og soltørre dager? Snø er nok snart en saga blott. Fotos: Per Storemyr

10 Klimaendringer og prognoser for fremtiden

Det er ikke skrevet mye om mulige konsekvenser av klimaendringenes påvirkning på spesifikke årsaker til forvitring av kulturminner i stein. Mesteparten av forskningen om klimaendringer og kulturminner har så langt dreid seg om temperatur og vannproblematikk, slik som flom, skred, kysterosjon og tining av permafrost, men også potensialet for mer biologisk vekst (råte osv.) i trebygninger.¹⁸ Peter Brimblecombe (2014) har oppsummert generelle og spesifikke nedbrytnings- og forvitningsstudier, med stor vekt på steinbygninger, og kommer samtidig med en advarsel. Han påpeker at det er for enkelt å basere prognoser på det vi alle kjenner til; at det på våre fuktige, tempererte breddegrader trolig kommer til å bli varmere, våtere, mer sterk nedbør og kanskje mer vindfulle forhold.

Brimblecombe introduserer begrepet «kulturminneklima» (*heritage climate*) og mener man må se på kulturminnets egenart og de spesifikke variablene som lokalt og regional trolig kommer til å påvirke forvitring i et endret klima. Han peker f.eks. på at man knapt kan se noen tegn til generelt høyere relativ luftfuktighet i London, tvert imot har RH i gjennomsnitt sunket gjennom de siste mer enn 100 år.¹⁹ Men spennet mellom høy og lav RH har økt, og det er potensielt dårlig nytt når det f.eks. gjelder saltforvitring, da det kan bety hyppigere veksling mellom krystallisering og oppløsning av salt (se også Grossi et al. 2011). I en annen sammenheng peker Brimblecombe (2000) på den store nedgangen i antall frost/tine-sykluser i England siden Den lille istid (ca. 1400-1900), noe som betyr at det *regionalt* generelt blir færre frostskafer (se også Storemyr 2004a, 2004b for middelalderkirker i Norge). Men *lokalt* kan man naturligvis oppleve at antall frost/tine-sykluser går opp når klimaet går fra kaldere til mildere.

Om vi ser på de «offisielle» klimaprognosene for Sogn og Fjordane mot 2100, så er de for oss relevante variablene beskrevet som følger:²⁰

- **Temperatur:** Middeltemperaturen for året er for Sogn og Fjordane berekna å auke med ca. 4,0 °C (låg: 3,0 °C, høg 5,0 °C). Det er tilnærma lik auke for haust, vinter og vår (4,0 °C (låg: 3,5 °C, høg: 5,0 °C)) og

¹⁸ I Norge er det gjort et stort arbeid i bl.a. Riksantikvarens «Overvåkingsprogram for å måle effekt og konsekvens av klimabelastninger på bygninger», se <https://ra.brage.unit.no/ra-xmlui/handle/11250/2428923>

¹⁹ Det samme gjelder for øvrig for deler av Canada. Se referanse til Wijngaarden & Vincent 2004 i Storemyr 2004b.

²⁰ Se «Klimaprofil Sogn og Fjordane» fra Norsk klimaservicesenter, oppdatert 2017, <https://klimaservicesenter.no/faces/desktop/article.xhtml?uri=klimaservicesenteret/klimaprofiler/klimaprofil-sogn-og-fjordane>

minst for sommaren (3,5 °C (låg: 2,5 °C, høg 5,0 °C)). Vekstsesonen er venta å auke med 2-3 månader over store delar av fylket, og mest i ytre kyststrok. Vinterstid vil dagar med særskilte låge temperaturar verta sjeldnare, medan det om sommaren vil førekoma fleire dagar med middeltemperatur over 20°C, og då særleg i dei midtre og indre fjord- og dalstroka.

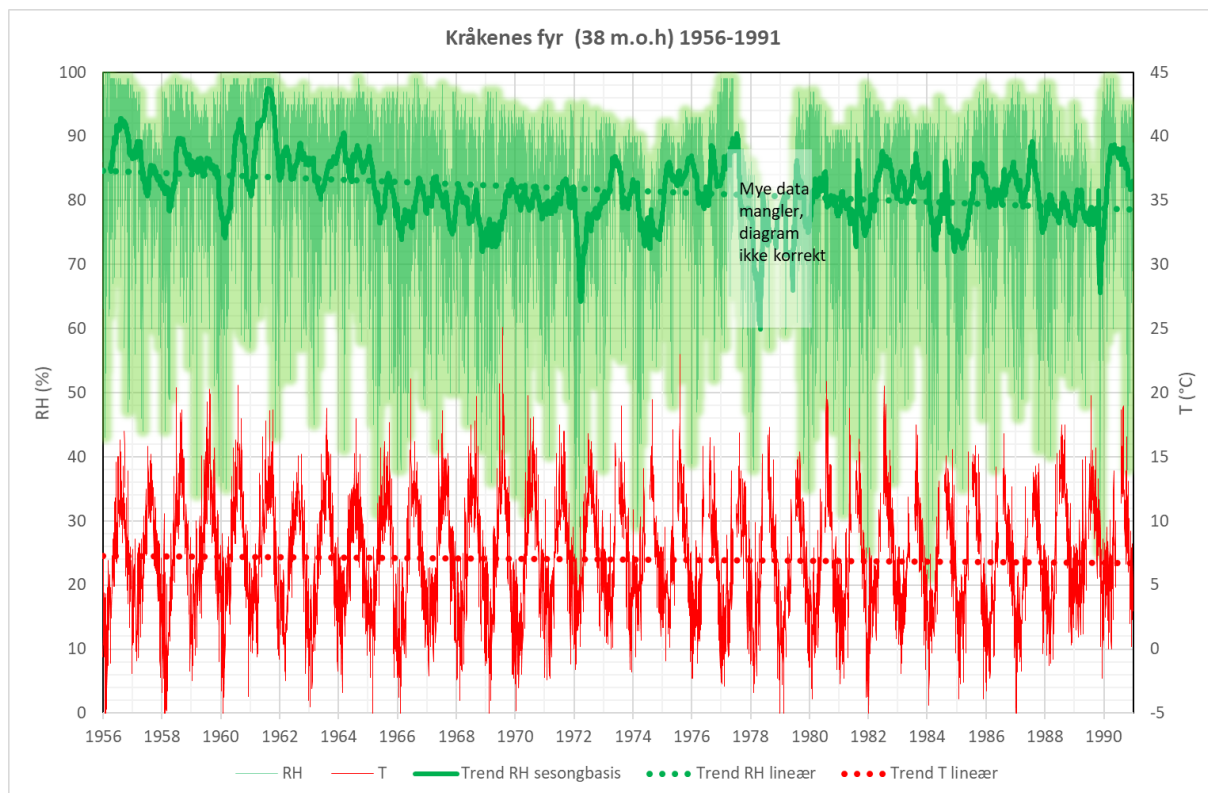
- **Nedbør:** Årsnedbøren i Sogn og Fjordane er berekna å auke med ca. 15 % (låg: +5 %, høg: +20 %). Nedbørendringa for dei fire årstidene er berekna til: • Vinter: +10 % (låg: -5 %, høg: +25 %) • Vår: +10 % (låg: 0 %, høg: +15 %) • Sommar: +15 % (låg: +5 %, høg: +25 %) • Haust: +15 % (låg: +5 %, høg: +35 %) Nedbørauken i millimeter vert størst for dei nedbørrike områda nær kysten. Det er venta at episodar med kraftig nedbør aukar vesentleg både i intensitet og frekvens;
- **Snø:** Det er venta vesentleg reduksjon i snømengdene og i talet på dagar med snø i lågareliggende område nær kysten der dagens vintertemperatur ligg kring 0 °C. I desse kystområda kan det bli lite eller ingen snø i mange år, sjølv om det einskilde år framleis vil vere vesentlege snøfall sjølv i låglandsområda.
- **Vind:** Klimamodellane gjev lita eller inga endring i midlare vindforhold i dette hundreåret, men det er stor uvisse i framskrivingane for vind. Det viktige for kommunar er at kunnskap om lokale vindforhold vert teke med i planlegginga.
- **Tørke:** Sjølv om sommarnedbøren i Sogn og Fjordane er venta å auke, vil snøsmeltinga gå føre seg tidlegare og fordampinga auke både om våren og sommaren. Dermed er det sannsynleg at ein kan få noko lengre periodar med lita vassføring i elvene om sommaren og lengre periodar med låg grunnvasstand og større underskot i markvatnet. Dette medfører noko auka fare for skogbrann mot slutten av hundreåret, og kan også gje eit auka behov for jordbruksvatning og utfordringar for settefiskanlegg.

For Albanustårnet og Selja kloster betyr dette at snø og frost vil bli så godt som fraværende, at vi altså ikke vil oppleve frostforvitring annet enn under helt spesielle forhold. Nedbørsøkningen vil ha betydning for lekkasjer (og kjemisk oppløsning av mørtel), spesielt om regnet kommer sammen med sterk vind (slagregn). Om vinden øker, så kan dette ha betydning for takkonstruksjonen på Albanustårnet. Økningen i antall tørkeperioder er interessant, da vi jo vet at tørre forhold – altså hyppigere og sterkere veksling fra fuktig til tørt – trigger saltforvitringen i tårnet.

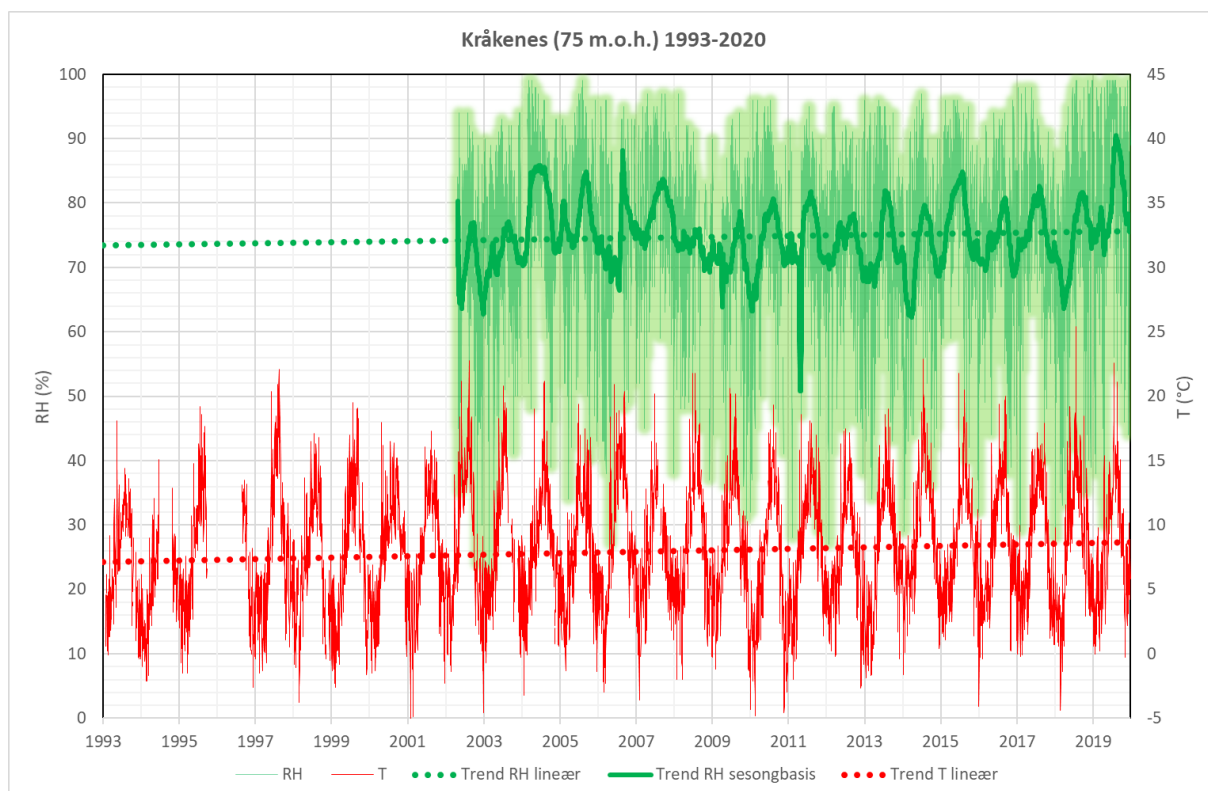
Klimaendringer vil naturligvis også på andre måter ha betydning for klosteranlegget. Høyere temperatur og mer nedbør kan gi sterkere gjengroing av landskapet omkring, sterkere vind, stormflo og springflo kan gi problemer med infrastrukturen i havna, jfr. stormen Dagmar som raserte kaia i 2011. Mer nedbør kan trigge hyppigere steinsprang og ras fra ustabile bergpartier omkring klosteret, mens økende vind kan gi problemer med å få organiske toppdekker på murkronene til å holde seg på plass.

Vi skal imidlertid se nærmere hvordan tørke og vekslinger i relativ luftfuktighet kan komme til å påvirke Albanustårnet når det gjelder saltforvitring. Det finnes ingen lokale/regionale prognoser for endring i RH, derfor vil vi se på hvilke endringer som faktisk har skjedd siden 1950-tallet. Vi har to relevante DNMI-målestasjoner med RH-data, Kråkenes fyr (1956-1991) og Kråkenes (1991-); sistnevnte avløste fyret som stasjon i 1991, men måling av RH kom ikke i gang før 2002 (og fortsetter til i dag). Stasjonene ligger nær hverandre (jfr. Figur 10 og kap. 4), men på ulik høyde over havet (fyret på 38 m, nåværende stasjon på 75 m). De er derfor ikke helt sammenlignbare; dog kan vi tolke trender fra diagrammene vist i Figur 71-Figur 72.

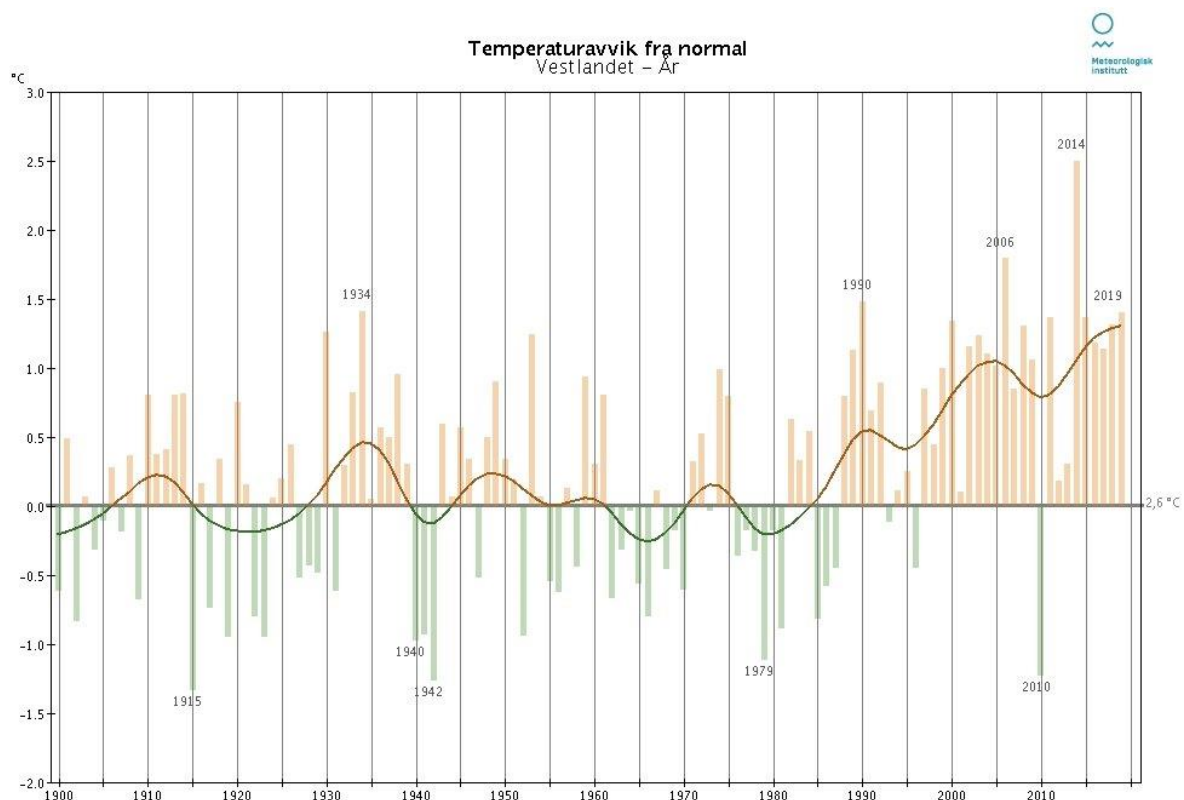
I perioden 1956 til 1991 sank gjennomsnittstemperaturen fra litt over til litt under 7°C., mens den fra 1993 til i dag økte fra ca. 7 til ca. 8,5°C. Dette er i tråd med regionale data fra Vestlandet (jfr. Figur 73). I den første perioden viste RH en nedadgående trend, fra gjennomsnittlig ca. 84 til ca. 78%, mens den i den andre perioden økte fra ca. 74 til ca. 78%. Som nevnt er ikke stasjonene helt sammenlignbare og RH er også vanskelig å måle nøyaktig. Det er godt mulig det finnes store



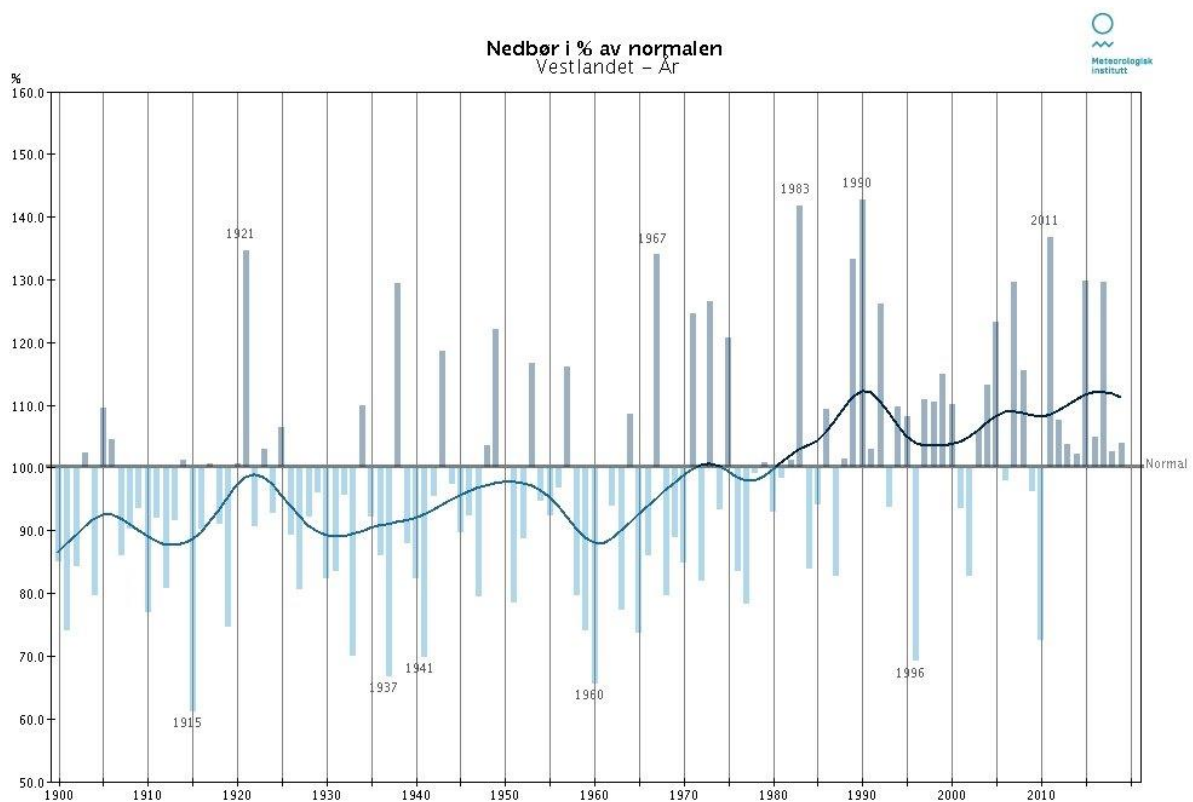
Figur 71: T og RH Kråkenes fyr 1956-1991, døgnverdier. Selv om det mangler mange RH-data, spesielt mellom 1978 og 1980, kan det se ut til at RH viste en nedadgående trend, fra ca. 84 til ca. 78%. T viser en lett nedadgående trend fra litt over til litt under 7°C. Trenden er dessuten lavere RH i den kalde årstiden, inkl. vår og høst. Rådata: eKlima, <http://sharki.oslo.dnmi.no>



Figur 72: T og RH Kråkenes 1993-2020, døgnverdier. RH viser en oppadgående trend fra ca. 74 til ca. 78%. T stiger fra ca. 7 til ca. 8,5°C. Ser en bort fra 2003 er trenden et større spenn i RH, som i perioden 1956-1992, med lavere verdier i den kalde årstiden, inkl. vår og høst. Diagrammet for Kråkenes er ikke direkte sammenlignbart med diagrammet for Kråkenes fyr, da målestasjonene ligger på ulik høyde over havet, dog svært nær hverandre. Rådata: eKlima, <http://sharki.oslo.dnmi.no>



Figur 73: Temperaturutvikling for regionen Vestlandet 1900-2019. Kilde: <https://www.met.no/vaer-og-klima/klima-siste-150-ar/regionale-kurver/vestlandet-siden-1900>



Figur 74: Nedbørsutvikling for regionen Vestlandet i perioden 1900-2019. Kilde: <https://www.met.no/vaer-og-klima/klima-siste-150-ar/regionale-kurver/vestlandet-siden-1900>

unøyaktigheter i de historiske RH-dataene. Dog er trendene noenlunde i tråd med temperaturutviklingen, dvs. at jo varmere det blir, så er potensialet for høy RH større. Dessuten var nedbøren i den første perioden moderat i forhold til normal, mens den økte i den andre perioden (jfr. Figur 74).

Om vi ser nærmere på de målte RH-verdiene, så har vi perioder med større og mindre spenn i døgnverdiene. En periode på 60-tallet var relativt tørr, en periode på 70-tallet relativt våt osv. Disse sammenfaller grovt med den regionale temperatur- og nedbørsutviklingen. Selv om de generelle endringene er små og variasjonene store fra år til år, kan vi tilsvarende fra begynnelsen av 2000-tallet generelt observere et større spenn mellom høye og lave RH-verdier. Dessuten kan vi observere at spennet er størst i den kalde årstiden, inkludert vår og høst.

I klartekst kan dette bety at antall tørre perioder, målt som RH, har en tendens til å øke i den kalde årstiden. Det vil si at mulig hyppigere tørkesommer i fremtiden ikke nødvendigvis vil ha så stor innvirkning på saltforvitringen i Albanustårnet. At det er tørke på sommeren betyr at det regner lite, men RH kan fremdeles være høy. Endringene på spesielt våren og høsten er av større interesse, noe vi jo også har observert gjennom overvåkningsperioden fra 2016 til 2020.

Vi kan selvsagt ikke ukritisk ekstrapolere denne trenden inn i framtiden, da dynamikken i endringene naturligvis er vanskelig å forutsi. Men med økende temperatur generelt, så kan vi ikke se bort fra at spennet mellom fuktig og tørt øker og at det vil bli hyppigere vekslinger. Dette kan også ha innvirkning på kondenshendelser i tårnet, altså at hyppigere vekslinger potensielt vil gi flere kondenshendelser.



Figur 75: Bare godt planlagt, regelmessig konservering og vedlikehold kan holde Albanustårnet i god stand de neste hundre år. Ikke minst gjelder det å holde fugene i orden. Her er utrettelige Geir Magnussen i aksjon på klosteranlegget. Foto: Per Storemyr.

11 Oppsummering og diskusjon om bevaringsstrategier

Selv om klimautviklingen kan gi økt saltforvitring og mer lekkasjer, så er nok dette av relativt liten betydning sammenlignet med mer direkte menneskelig påvirkning, for eksempel i form av bevaringsinnsats – eller manglende sådan. Albanustårnet og hele det sårbare bygnings- og ruinkomplekset på Selja krever svært aktiv oppfølging, uavhengig av klimaendringer. Det er nok å nevne de to aller viktigste enkelthendelsene som påvirket anlegges integritet historisk sett: Brannen på begynnelsen av 1300-tallet, som fortsatt gir et stort preg på forvitringen, samt oppgivelsen av klosteret før reformasjonen, noe som betød at det ble stående fullstendig prisgitt vær og vind i mange hundre år. På slutten av 1800-tallet, før restaureringen kom i gang var klosteret brutt ned til det ugjenkjennelige (kap. 2).

Det skal bare en sterk orkan og manglende bevaringsinnsats til at Albanustårnet igjen er tilbake til «dansketiden»: Om taket blir ødelagt og ingen kommer for å reparere det, så blir tårnet prisgitt vær og vind. Da vil det raskt brytes ned som følge av kjemisk oppløsning av fuger og groende vegetasjon. Det vil kanskje gå litt saktere enn i dansketiden (med røving av stein!), da den falt sammen med Den lille istiden og dermed sannsynlig hyppigere frost – som nesten vil bli en saga blott i de neste hundre år. På den andre siden betød manglende tak at salt ble vasket ut av regn og nok ikke hadde så stor betydning for forvitring som i dag. Etter at taket kom i 1914 endret dette seg. Nå forblir mer salt i murverket og det oppkonsentrerer seg på veggene innendørs, pga. tilførsel fra havet og bygningsmaterialene. En ny kilde til salt er dessuten sement som ble innført under restaureringen i 1912-15.

Vi forstår altså at klimaendringer kan ha begrenset påvirkning i forhold til det som virkelig er viktig: Løpende overvåkning, sikring, vedlikehold og konservering. Dette kan organiseres etter de svært gode erfaringene man har fått gjennom Riksantikvarens ruinprogram helt siden 2006-2007. Det ligger langt utenfor foreliggende rapporters mandat å skulle foreslå hvordan framtidig bevaring av anlegget bør foregå. Men det er naturlig å diskutere mulige tiltak på Albanustårnet i lys av den kunnskap som har framkommet i arbeidet.

11.1 Er saltforvitringen problematisk?

Først må en spørre seg om dagens forvittringsrate som følge av saltforvitring er problematisk. Vi har beregnet reduksjon (eller tap) av overflate innvendig til 0,5 cm pr. hundre år i de tørrere delene av tårnet. Forvitringen er på ingen måte jevnt fordelt over murverket. Brannskadde deler, samt fuger og metalolivinstein forvitrer til dels mye mer enn gneis. 0,5 cm pr. hundre år kan likevel synes lite totalt sett, spesielt i et tårn som knapt nok har godt bevarte, verdifulle dekorative elementer. Men det kan (ved opprettholdelse av dagens vedlikeholdstilstand) likevel være nok til at stein faller ut av forvitrende fuger. Slike farer vil kunne fanges opp av enkel, visuell overvåkning og normalt vedlikehold, slik det har blitt gjort mange år nå. Over lang tid har det nettopp vært sikring av stein og spekking av fuger som har stått sentralt. Men selv «normalt vedlikehold» er krevende på Selja, øya uten selv den mest grunnleggende infrastruktur, foruten havn. Det skal settes opp stillas, det skal fraktes materialer til øya osv.

Og så har vi usikkerheten om klimaendring. Vi har sannsynliggjort at saltforvitring kan øke som følge av mulig større spenn og hyppigere vekslinger mellom høy og lav relativ luftfuktighet, spesielt på våren og høsten og spesielt knyttet til mirabilitt, selv om vi ikke kan utelukke halitt og gips. Om forvittringsraten dobler eller flerdobler seg, så må det i alle fall utføres et mer aktivt vedlikehold for å unngå at fugemørtel og stein blir så forvitret at det truer den konstruktive stabiliteten.

11.2 Lekkasjer, kondens og sement

Kanskje vel så viktig som saltforvitring er lekkasjer og kondens i de fuktigere deler av tårnet og spesielt knyttet til det sementholdige, ytre murskallet som ble oppført i 1912-1915 på store deler av tårnet. Vi har sett at dette skallet trolig kan bidra til oppkonsentrering av fukt (kap. 1.3 og 2). Og i et hundreårsperspektiv kan nok sementmørtelen i skallet forvitte såpass mye, ved videreutvikling av dagens sprekkdannelse og kjemiske oppløsning, at det mister konstruktiv stabilitet. Blir det mer regnfullt, så kan prosessene akselerere.

Derfor virker det fornuftig å allerede nå utvikle strategier for hva som kan gjøres med murskallet. I «verste» fall kan en komme til at det bør demonteres og erstattes med et kalkbasert murverk tilsvarende det opprinnelige, middelalderske murverket. I denne forbindelse må en også vurdere om det vil bli nødvendig å erstatte andre sementbaserte fuger i tårnet med kalkfuger. For å kunne bedømme om slike tiltak på sikt kan bli nødvendig, så kreves det ytterligere forståelse av situasjonen, noe man kan få ved visuell kartlegging, boring for å sjekke den «indre» tilstanden, kanskje supplert med radarundersøkelser for å få klarhet i om det er hull bak skallet, om det er fare for at det kan «slippe» fra den gamle, middelalderske murkjernen.

11.3 Preventive tiltak og inneklimajustering

I lys av den nye kunnskapen om tårnet, kan en foreslå en rekke mindre tiltak for å opprettholde dagens situasjon og evt. forbedre den. De åpenbare tiltakene er av preventiv karakter og dreier seg om at:

- takskader umiddelbart blir reparert om de skulle oppstå,
- små lekkasjer fra utvendige fugesprekker etc. jevnlig repareres,
- råteskader i treverk repareres.

Et annet mulig preventivt tiltak er inneklimatejustering. Vi har sett over at det knapt er mulig og ikke ønskelig med omfattende, moderne klimakontroll, som å holde relativ luftfuktighet henholdsvis under 60-65% eller over 75-80% (sistnevnte er så høyt at det knapt er aktuelt pga. faren for biologisk vekst). Men kanskje det finnes mer tradisjonelle måter å styre inneklimate på uten store inngrep? Dvs. begrense hyppige vekslinger mellom tørt og fuktig.

Tårnet fikk nye vinduer under den siste konserveringskampanjen fra 2006-2007 til 2012. Det har som nevnt (kap. 2) bidratt til mindre direkte vanninntrengning og trolig bedret luftsirkulasjon/ventilasjon. Det vil trolig også si at tårnet nå tørker noe raskere opp etter fuktige/regnfulle perioder. Isolert sett er ikke dette optimalt for saltforvitring: Mer trekk/raskere opptørking kan trigge mer krystallisasjon like under materialoverflatene (*subflorescence*), i de tørrere områdene i tårnet, slik det er diskutert i kap. 1.6. Men ser man tårnet som helhet, er det naturligvis bra å få kontroll på vanninntrengning. Vi kan se det som et godt konserveringstiltak som trolig har en litt utilsiktet bivirkning.

Man kan tenke seg å isolere åpningene mellom vinduer og vindussmyg ytterligere, mellom tak og murkrone, samt installere tettere dører i de to portalene i første etasje. Slik kan man gjøre romklimaet til et tilnærmet «kjellerklima», *naturligvis ikke helt tett*, men nok til at gjennomsnittlig relativ luftfuktighet vil øke noe og samtidig medføre at de verste fuktighetsextremene, lave og høye, uteblir. Tårnet vil sannsynligvis få et noe mer bufret, jevnere klima og salt vil kunne krystallisere som kanskje mindre skadelig *efflorescence*.

Et slikt tiltak vil imidlertid kunne føre til at fuktnivået blir så høyt at faren for mer kondens og organisk vekst øker betydelig. Dette har også sammenheng med at det foregår en mulig oppkonsentrering av fukt på grunn av de tette, sementholdige murskallene på ytterveggene. Økt fukt må man i tilfelle justere for ved å åpne for lufting i perioder der faren er størst. I tradisjonelle kjellerklima gjør man ofte dette på vinteren, mens man på sommeren holder skalkene lukket for å hindre at den generelt høyere absolutte utfuktigheten siver inn.

Men med det svært vekslende klimaet på Selja, trenger man sannsynligvis et spesialtilpasset ventilasjonsregime for å kunne lufte optimalt. Det er vanskelig å kunne forestille seg et slikt opplegg utført på manuell basis, da Selja ikke har daglig «vaktmestertjeneste». Derfor må man i tilfelle installere enkel, automatisk ventilasjonskontroll på basis av målt fuktighet og temperatur og åpning/lukking av dører/vinduer, eller evt. ved bruk av ventilatorer som starter når visse fuktnivåer blir overskredet.²¹ Dette krever energi, noe man kan tenke seg å få fra solcellepaneler. Et slikt opplegg krever også en rekke undersøkelser og testkjøringer og det vil ikke være fornuftig å gjennomføre det før en til fulle har forstått hvilken betydning det restaurerte, sementbaserte murverket har på tårnet (kap. 11.3).

I det store og et hele er slik teknologi vanskelig å se for seg på Selja, og slett ikke ønskelig. Man må finne andre muligheter, innenfor dagens ventilasjonsregime, eller med en viss, bedre lukking av portaler, og da står trolig fjerning av sement og restaurering med kalkbaserte materialer sentralt.

²¹ Til inspirasjon, se automatisert, naturlig ventilasjonskontroll i verdensarvkirken Zillis i Sveits (Bläuer-Böhm et al. 2001). Se også: <https://zillis-st-martin.ch/kirchendecke-st-martin-zillis/>

11.4 Saltreduksjon og inneklimajustering med kalk

Det finnes en del kjemiske og elektrokjemiske metoder for saltreduksjon, men de er usikre og kan ha utilsiktede bivirkninger, som f.eks. å introdusere nye salter (ved kjemisk behandling). Også kompresser er en ikke lite benyttet metode for å redusere saltmengder i murverk og på kalkmalerier.²²

Den vanligste og sikreste metoden er imidlertid bruk av porøs kalkpuss, enten spesialtilpassede blandinger eller tradisjonelle mørtler. Om man ikke *kan* kalkpusse murverket, så vil også bruk av kalkmørtler i fuger ha en virkning fordi fukt- og salttransporten da typisk vil foregå i fugene og dermed skåne steinene noe mot forvitring,²³ altså den samme type behandling som har foregått i tårnet (2007-2012) og som foregår ellers på klosterruinene på Selja og mange andre steder – ved å først fjerne sementmørtler.



Figur 76: Et forsøk på å visualisere hvordan tårnfoten kunne tatt seg ut med kalk på veggene. Illustrasjon: Per Storemyr

Om man tenker seg å skulle kalkpusse tårnet innvendig (Figur 76),²⁴ så vil det trolig medføre at saltene vil krystallisere i pussen (om den er tykk nok), altså skåne det historiske murverket, men etter en tid skade pussen på enkelte steder der det er mye salt og fukt. Dette er hele ideen bak en slik kalkpuss, med hvitning, den skal fungere som en offerpuss og må regelmessig fornyes og vedlikeholdes.

En kalkpuss, i hvert fall om den er tykk nok, vil trolig også til en viss grad kunne fungere som en fuktbuffer, dvs. jevne ut inneklimaet noe.²⁵ En annen positiv ting med kalkpuss er at man svært lett kan se hvor skader oppstår og dermed enkelt kan reparere regelmessig. Det er ikke lett å skille mellom mer eller mindre aktive skader i tårnet slik det fremstår i dag. Et problematisk forhold er at det kanskje ikke vil være lett å få en puss til å «holde» godt på det mest forvitrede murverket.

Men bruk av kalkpuss krever at man først fjerner de fleste sementfuger innendørs, man vil jo at fukttransporten skal foregå i fugene og det skjer som kjent i liten grad eller bare

delvis med tette sementfuger. Hvor tette er egentlig de eksisterende sementfugene? Det er et spørsmål det ennå ikke finnes svar på og som dermed bør undersøkes. Å fjerne sementfugene, helt eller delvis, er et stort arbeid, men bør nok overveies, om de er altfor tette – også uavhengig av om man ønsker å ta i bruk kalkpuss.

Da er vi igjen tilbake til det tette «sementskallet» utendørs (kap. 11.3). Det er åpenbart at man også må ta undersøkelser og evt. behandling av dette med i det totale «fuktregnskapet». Om man en gang i fremtiden velger å erstatte disse murpartiene med et kalkbasert murverk og evt. puss, så kan man

²² Se <https://www.saltwiki.net/index.php/Desalination> og https://www.saltwiki.net/index.php/Salt_conversion

²³ Se <https://www.saltwiki.net/index.php/Renders/Mortars>

²⁴ Man vurderte faktisk å slemme tårnet innvendig omkring 1990, som ledd i bevaringsarbeid, se beskrivelse i Nybø 2000: 116-117

²⁵ For inspirasjon, se Padfield 1998. Se også Klenz Larsen og Brostrøms «Climate Control in Historic Buildings»: http://eprints.sparaochbevara.se/862/1/Climate_control_in_historic_buildings.pdf

også tenke seg å kalkpusse eller kalkslemme hele eller deler av tårnet også utvendig (kanskje det er fornuftig å ikke pusse den mindre værutsatte østsiden av tårnet?). I tillegg må man vurdere om det er mulig å bruke kalk på murpartier der det er gjenværende sement.

Men det er naturligvis også et annet, svært viktig spørsmål man må besvare før man vurderer å gå til slike skritt: Var tårnet pusset/slemmet/hvittet i middelalderen? Det kan være vanskelig å rettferdiggjøre ny behandling med kalk uten at man har historiske referanser.

11.5 Var tårnet kalket i middelalderen?

Gjennom alle hundreårene da klosteranlegget, Albanuskirken og tårnet sto til nedfalls, har nesten all kalk på vegger forvitret bort. Men på et slikt anlegg må en jo anta at i alle fall deler var pusset/slemmet/hvittet. Det antas f.eks. at den store terrassen i ved Sunnivakirken var behandlet og sto frem som et tydelig, hvitkalket sjømerke i gamle dager (se Nybø 2000, Djupedal 1996).

Cato Enger (1949) fant flere spor av hva han kaller «kalkslemming» i den romanske delen av Albanuskirken, både innvendig på kvaderstein og i den utvendige gavlen, den som i dag utgjør tårnets innvendige østvegg. Det skulle altså borge for at kirken var hvit, evt. med kalkmalerier innvendig. Dessuten fant Enger spor av tykk kalkslemming på en kvaderstein inne i tårnfoten, ca. 4 m over gulvnivå, men ikke andre steder inne i tårnet. Vi har heller ikke funnet andre spor, men så har vi heller ikke lett godt. Og det kan vel knapt være slik at bare *en* stein her inne var kalket i gamle dager. Vi må derfor anta at tårnfoten faktisk var pusset/slemmet innvendig.

Romansk kvadermur i metaolivinstein inn mot tårnets østside, altså det indre av kirkens vestside, har fortsatt gode spor av Engers «kalkslemming» (Figur 77). Det er imidlertid ikke en vanlig slemming *uten* tilslag, men heller en tynn kalkpuss *med* tilslag, som nå fremstår opp til 3-4 mm tykk. Den kan godt ha vært noe tykkere, da den har svært forvitret overflate.



Figur 77: Rester etter tynn puss innvendig i Albanuskirken, på murverket som er del av tårnets nåværende østre ytterfasade. Innfelt: Makrofoto av kalkpussen. Vi ser småsprekker og tilslag av sand. mm-skala. Foto: Per Storemyr.

Også den gotisk delen av kirken har spor av kalkpuss. På sørsiden, nær «sakristiet» og inn mot et av rommene i klosterfløyen, finnes en forholdsvis tykk puss vi har fått analysert (Seir 2019) (Figur 78, Figur 79, Figur 80). Det viser seg at pussen består av kalk brent fra marmor på høy temperatur og med tilslag av skjellsand (se også generelt om mørtlene på Selja i Storemyr 2019). Et romanske kapitel i steinlageret i sakristiet er for øvrig også delvis dekket av en slemming eller en tynn puss.

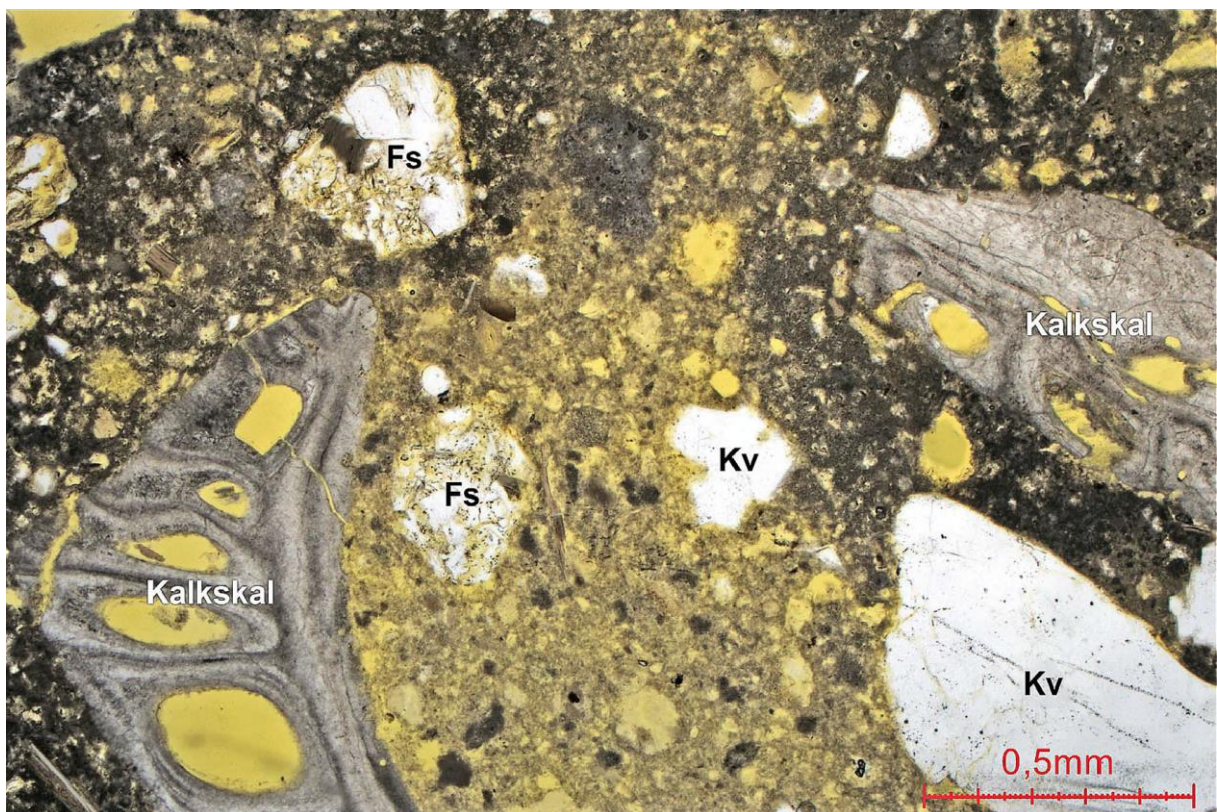
Det kan altså ikke være tvil om at kirken både ut- og innvendig i det minste var delvis kalkpusset og at tårnfoten innvendig også var enten pusset eller slemmet. Men vi vet ikke hvordan utførelsen var og om resten av tårnet innvendig var behandlet slik. Det kan bli klarere ved mer målrettet kartleggings- og analysearbeid. Det samme gjelder tårnets yttervegger, mot sør, vest og nord, der vi (ennå) ikke har funnet noen spor.



Figur 78: Bjørn Jensen viser den middelalderske kalkpussen på steinene (i ellers restaurert murverk) på sørsiden av Albanuskirkens kor utvendig. Foto: Per Storemyr.



Figur 79: Nærbilde av kalkpussen i Figur 78. En svært forvitret kalkpuss som en gang kan ha vært forholdsvis tykk. Foto: Per Storemyr.



Figur 80: Mikroskopbilde av kalkpussen i Figur 79. Her ser vi selve kalkpastaen (gullig), samt skjellfragmenter (Kalkskal), kvarts (Kv) og feltspat (Fs) i tilslaget. Foto: Torben Seir (fra Seir 2019).



Figur 81: Kinn middelalderkirke, nær nabo til Selja kloster på ytterkysten av Sogn og Fjordane. Om kalkpuss kan holde her, så kan den også holde på Selja. Foto: Per Storemyr.

Om vi ser samlet på de middelalderske steinkirkene og tårnene i Norge, så er det nok en tendens til at de fleste (alle?) bygningene med *gråsteinsmurverk* på en eller annen måte var kalkbehandlet. Det skulle altså ikke være noe i veien for at Albanustårnet hadde en kalkpuss eller slemming utvendig. Det vil i så fall åpne for spennende muligheter: Utvendig kalkpussing eller slemming vil utvilsomt bedre bevaringsforholdene, men det vil også gi vedlikehold å hankses med. Her ute i havgapet, i storm og regn, kan en ikke forvente at kalk vil holde så lenge. En må altså ha en plan for regelmessig reparasjon.

På den andre siden: Kinn middelalderkirke (Figur 81), en nær nabo på ytterkysten av Sogn og Fjordane og ikke mindre eksponert for været, har alltid vært hvitkalket. Det har gitt utfordringer, ikke minst på grunn av at man også her har benyttet en del sement ved tidligere restaureringer. For tiden er Kinn under restaurering, puss fra tidligere restaureringer er fjernet og ny kalkpuss basert på tradisjonelle metoder (hotmix) skal påføres.²⁶

11.6 Hva er Albanustårnet?

Kinn er en «normal» kirke som i motsetning til Albanustårnet alltid har stått under tak. Kirken er i motsetning til Albanustårnet «tett», dvs. normalt utstyrt med vinduer, dører i portaler og naturlig ventilasjon gjennom minimale åpninger mellom murverk og tak og mellom murverk og dører/vinduer. Den er ikke oppvarmet og har en rekke mindre skader på puss og murverk innvendig, forårsaket av lekkasjer, salt og kondens (egne observasjoner), men på ingen måte av så alvorlig karakter som i Albanustårnet. Kirken gir en pekepinn på hvordan Albanustårnet *kunne* ha sett ut om det hadde vært i en tilsvarende vedlikeholdstilstand, dvs. ivaretatt som et normalt, «lukket» tårn under tak og med overveiende bruk av kalk som bindemiddel.

²⁶ Om forberedelsene til nåværende restaurering, se:

<https://www.forsvarsbygg.no/no/radgivningstjenester/vern-av-kulturminner/referanseprosjekter/tilstandsanalyser/tilstandsanalyse-kinn-kyrkje-i-flora-kommune/>



Figur 82: Er det slik vi vil se Albanustårnet i framtiden? Med pusset eller slemmet ytre murverk? Foto og illustrasjon: Per Storemyr.

Hva er egentlig Albanustårnet? Er det en sterkt restaurert ruin som tas vare på med beskyttelsestak? Et monument over restaureringen på begynnelsen av 1900-tallet? Eller er det en levende bygning? Det er ikke helt lett å besvare dette spørsmålet. Det er klart at det er en restaurert ruin, men tårnet er også i bruk som klokketårn ved f.eks. utegudstjenester i kirkeruinen. Det er dessuten et museumstårn, åpent for besøkende – og hadde det vært en «lukket» bygning med et bedre inneliv, så kunne det ha huset enkle utstillinger.

Tårnet er dessuten landemerke, et sterkt symbol på kloster- og helgenanlegget som helhet – sammen med terrassen det første man ser når man kommer sjøveien, og det må jo alle. Og tårnet er naturligvis et monument med stor historisk kildeverdi. Det bringer opp spørsmålet om hva som var tårnets funksjon i middelalderen? Var det et allment kirketårn? Må man også se på det som et forsvarsverk for klosteret og helligdommen? Var tårnet en normannisk-inspirert donjon,²⁷ et siste tilfluktssted ved uro? Hva ble det i så fall benyttet til i fredeligere tider?

Slike spørsmål må nødvendigvis diskuteres som grunnlag for og ledd i utviklingen av en framtidig bevaringsstrategi for Albanustårnet. Legger man vekt på at det nå skal være en ruin med beskyttelsestak, kan man komme fram til at tårnet bør være preget av nettopp den «ruinmessige karakteren» i murverket, først og fremst på østsiden, som i dag. Legger man imidlertid mer vekt på at det er en levende bygning og kanskje ønsker å videreutvikle det som både klokketårn og museumstårn, så kan man komme til at omfattende bruk av kalk kan forsvares – ikke minst i et bevaringsperspektiv, men også som en videreføring av middelalderske byggetradisjoner. Som vi har sett vil eventuell inn- og utvendig bruk av kalk som ledd i bevaring medføre nokså store inngrep i restaurert murverk. Stikkord: fjerning av sement. Det vil i så fall bety at man setter mindre fokus på restaureringshistorien, og heller betrakter tårnet i lys av en mer prosessuell tankegang med middelalderhåndverk i sentrum.

²⁷ Se kort diskusjon i Djupedal 1996: 125



Figur 83: Et mulig framtidsscenario med et hvitkalket Albanustårn. For anledningen er også terrassen ved Sunnivakirka kalket. Foto og illustrasjon: Per Storemyr.

I dag opplever vi ikke lenger den sterke «estetiske» motstanden mot kalkbehandling av middelaldermurverk som for 20 år siden. Det er et resultat av den stadig større kunnskapen som er opparbeidet om kalk og ikke minst at det er gjennomført store prosjekter med kalkpussing av tidligere frilagt middelaldermurverk, først på Utstein kloster i Rogaland.²⁸ For tiden er f.eks. det søndre tårnet i Stavanger domkirke under behandling.²⁹ Det har stått upusset siden 1950-tallet, den gang det var viktig at «murene skulle tale». Det er ikke mindre viktig at murene også i dag taler, men det gjør de også utmerket med kalk, for Albanustårnets sin del ikke minst på avstand, slik man må anta det var i middelalderen – et sterkt symbol på kloster- og helgenanlegget (Figur 82, Figur 83).

*

Det vil ta tid å finne fram til de beste bevaringsløsningene for Albanustårnet. En mengde overordnede avveininger må foretas, en mengde detaljer diskuteres. Inntil videre er det særdeles viktig å opprettholde regelmessig vedlikehold og reparasjon, som diskutert over. Nå som vi har en bedre forståelse av forvittringsprosessene i tårnet, er det ikke like viktig med full vitenskapelig basert overvåking av materialnedfall, slik det er beskrevet i denne rapporten. Men som kontrolltiltak, for å forstå om f.eks. nedfall av material fra veggene øker eller minsker, så kan man enkelt feie opp det som faller ned – på de samme plassene benyttet i foreliggende arbeid. Man kan f.eks. følge utviklingen ved besøk en gang eller to i året.

²⁸ Se deler av debatten om kalking av Utstein kloster i Stavanger Aftenblad i 2001:

<https://www.aftenbladet.no/kultur/i/6lkLL/kalking-av-utstein-best> og

<https://www.aftenbladet.no/kultur/i/GjvOJ/fadese-a-kalke-utstein>

²⁹ Se rekonstruksjoner av hvordan en kan tenke seg bruk av kalk til pussing/slemming i Stavanger:

<http://www.domkirken2025.no/provefelt-for-kalkfuger-slemming-og-puss/>



Figur 84: Vestveggen i Albanustårnet i dag, etter regnvær. Tett, restaurert sementbasert murverk med småfallen stein i lag med gammelt romansk murverk. Mange åpninger, inklusive stillasåpninger, og små sprekker der vann kan trenge inn. Foto: Per Storemyr.

Litteratur

- Arnold, A. & Zehnder, K. 1991. Monitoring Wall Paintings Affected by soluble Salts. In: Cather, S. (ed.): *The Conservation of Wall Paintings: Proceedings of a symposium organized by the Courtauld Institute of Art and the Getty Conservation Institute, London, July 13-16, The Getty Conservation Institute*, 103-136.
https://www.researchgate.net/publication/285316037_Monitoring_wall_paintings_affected_by_soluble_salts
- Bionda, D. 2004. Methodology for the preventive conservation of sensitive monuments: microclimate and salt activity in a church. In: Kwiatkowski, D. & Löfvendahl, R. (eds.): *Proceedings of the 10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, ICOMOS Sweden, Stockholm, June 27 - July 2, , 627-634*.
https://www.researchgate.net/publication/265718013_Methodology_for_the_preventive_conservation_of_sensitive_monuments_microclimate_and_salt_activity_in_a_church
- Bionda, D. 2005. RUNSALT - A graphical user interface to the ECOS thermodynamic model for the prediction of the behaviour of salt mixtures under changing climate conditions. <http://science.sdf-eu.org/runsalt/>

- Bionda, D. & Storemyr, P. 2002. Modelling the behaviour of salt mixtures in walls: a case study from the Tenaille von Fersen building, Suomenlinna, Finland. In: von Konow, T. (ed.): *The Study of Salt Deterioration Mechanisms. Decay of Brick Walls Influenced by Interior Climate Changes. European Heritage Laboratories – Raphaël 1999*. The Governing Body of Suomenlinna, Helsingfors, 95-101. https://perstoremyr.files.wordpress.com/2015/11/2002_bionda_storemyr_modellingsalt.pdf
- Bjelland, T. & Jónsdóttir, S. (red.) 2018. med bidrag fra: Bjelland, T., Rohmer Bonas, A., Egenberg, I. M., Gebermariam, K., Idland, B., Jónsdóttir, S., Meeks, A., Murphy, G., Oschmann, C., Schjelderup, P., Storemyr, P. & Ytterdal, A.: Dokumentasjon av sørtårnet, Stavanger domkirke. Historiske undersøkelser, kartlegging og forslag til restaureringstiltak. Rapport, Arkeologisk museum Universitetet i Stavanger.
- Bläuer, C., Zehnder, K., Domeisen, H. & Arnold, A. 2001. Climate Control for the Passive Conservation of the Romanesque Painted Wooden Ceiling in the Church of Zillis (Switzerland). *Studies in Conservation*, 46, 4, 251-268. https://www.researchgate.net/publication/235330868_Climate_Control_for_the_Passive_Conservation_of_the_Romanesque_Painted_Wooden_Ceiling_in_the_Church_of_Zillis_Switzerland..46.10.2307/1506775.
- Bläuer-Böhm, C. 1994. Salzuntersuchungen an Baudenkmälern. *Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung*, 8, 1, 86-103
- Brimblecombe, P. 2000. Air Pollution and Architecture: Past, Present and Future. *Journal of Architectural Conservation*, 2, 30-46. <https://doi.org/10.1080/13556207.2000.10785268>
- Brimblecombe, P. 2014. Refining climate change threats to heritage. *Journal of the Institute of Conservation*, 37, 2, 85-93. <https://doi.org/10.1080/19455224.2014.916226>
- Chabas, A., & Jeannette, D. 2001. Weathering of marbles and granites in marine environment: petrophysical properties and special role of atmospheric salts. *Environmental Geology*, 40, 3, 359-368. <https://link.springer.com/article/10.1007/s002540000157>
- Charola, A. E. & Bläuer, C. 2015. Salts in Masonry: An Overview of the Problem. *Restoration of Buildings and Monuments*, 21, 4-6, 119–135. <https://repository.si.edu/bitstream/handle/10088/28009/Charola%26Bl%C3%A4uer%20%20Salts%20in%20Masonry%20RBM%202015.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Djupedal, T. 1996. *Selja - Kulturhistorisk handbok*. Selja Forlag, Førde. <https://www.nb.no/nbsok/nb/753678ccd2fbf45feefb093463f6d5f8>
- Doehne, E. & Price, C. 2010. *Stone Conservation. An Overview of Current Research*. 2nd ed. Getty Conservation Institute, Los Angeles. http://www.getty.edu/conservation/publications_resources/pdf_publications/pdf/stoneconservation.pdf
- Enger, C. 1949. Helligdommen på Selja. *Fortidsminner*, 31. <https://www.nb.no/nbsok/nb/37a91ed42f99efd8aa1255c9fc99ffe7>
- Franz, A. & Storemyr, P. 2000. The 17th Century Mural Paintings in the Regalia Room, Archbishop's Palace, Trondheim, Norway. History, Paint Technology and Weathering of the West Wall. With contribution from Küng, A. *NDR-rapport*, nr. 0001. https://perstoremyr.files.wordpress.com/2010/07/ndr_2000_1_regalia_for-pdf.pdf

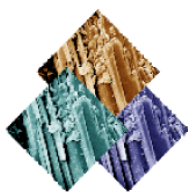
- Franz, A. & Storemyr, P. 2001. Conservation of Mural Paintings in the Regalia Room, Archbishop's Palace, Trondheim, Norway 1999-2005: Emergency Conservation of the West Wall and Scientific Investigations 2000. *NDR-rapport*, nr. 1/2001.
https://perstoremyr.files.wordpress.com/2010/07/ndr_2001_1_regalia.pdf
- Grossi, C.M., Brimblecombe, P., Menéndez, B., Benavente, D., Harris, I. & Déqué, M. 2011. Climatology of salt transitions and implications for stone weathering. *Science of The Total Environment*, 409, 13, 2577-2585. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.03.029>
- Hommedal, A. T. 1996. Selja. Helgenstad I tusen år. *Fortidsminneforeningens årbok*, 17-60.
<https://www.nb.no/nbsok/nb/a5f916c5e950fa420481bf393b6ce8ed?index=14#18>
- Klenz Larsen, P. 2008. Rapport vedrørende Magnuskatedralens bevaringsforhold. Nationalmuseet, Bevaringsafdelingen, Lyngby, Danmark. PDF fra Det færøyske nasjonalmuseet: <https://www.dropbox.com/s/578mjtbvfpfumo/00222.pdf?dl=0>
- von Konow, T. (red.) 2002. *The Study of Salt Deterioration Mechanisms. Decay of Brick Walls Influenced by Interior Climate Changes. European Heritage Laboratories – Raphaël 1999*. Helsingfors: The Governing Body of Suomenlinna
- Mottershead, D. N. 1998. Coastal weathering of greenschist in dated structures, South Devon, UK. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 31, 4, 343-346.
<http://dx.doi.org/10.1144/GSL.QJEG.1998.031.P4.07>
- Mottershead, D.N. 2000. Weathering of coastal defensive structures in southwest England: A 500 year stone durability trial. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25, 10, 1143-1159.
[https://doi.org/10.1002/1096-9837\(200009\)25:10%3C1143::AID-ESP129%3E3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/1096-9837(200009)25:10%3C1143::AID-ESP129%3E3.0.CO;2-N)
- Nybø, K. N. 2019. *Husa Våre. Arkitekturarven I Sogn og Fjordane*. Selja Forlag, Førde
- Nybø, M. 2000. *Albanuskirken på Selkja. Klosterkirke eller bispekirke?* Doktoravhandling, Universitetet i Bergen. <https://www.nb.no/nbsok/nb/0fbb90182acc02abba02c51749f79774>
- Padfield, T. 1998. The Role of Absorbent Building Materials in Moderating Changes of Relative Humidity. Ph.D. thesis. The Technical University of Denmark, Department of Structural Engineering and Materials. Utdrag:
https://www.researchgate.net/publication/267223789_The_Role_of_Absorbent_Building_Materials_in_Moderating_Changes_of_Relative_Humidity
- Price, C. A. (ed.) 2000. *An expert chemical model for determining the environmental conditions needed to prevent salt damage in porous materials*. European Commission Research Report No 11, (Protection and Conservation of European Cultural Heritage). Archetype Publications, London.
- Seir, T. 2019. Rapport Kalkprosjektet i Kvernsteinsparken Hyllestad. SEIR-materialeanalyse A/S, Helsingør, Danmark (upublisert rapport)
- Selwitz, C. & Doehne, E. 2002. The evaluation of crystallization modifiers for controlling salt damage to limestone. *Journal of Cultural Heritage*, 3, 3, 205–16.
https://www.researchgate.net/publication/215758958_The_evaluation_of_crystallization_modifiers_for_controlling_salt_damage_to_limestone
- Smith, B. J., Baptista-Neto, J. A., Silva, M. A. M., McAlister, J. J., Warke, P. A., & Curran, J. M. 2004. The decay of coastal forts in southeast Brazil and its implications for the conservation of colonial

- built heritage. *Environmental Geology*, 46, 3-4, 493-503-503.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s00254-004-1051-y>
- Storemyr, P. 1997. *The Stones of Nidaros: An Applied Weathering Study of Europe's Northermost Medieval Cathedral*. Doktoravhandling, NTNU, Trondheim.
https://perstoremyr.files.wordpress.com/2010/07/1997_storemyr_the_stones_of_nidaros.pdf
- Storemyr, P. 2002. The Regalia Room Mural Paintings Conservation Preoject, Trondheim, Norway: Conservation Measures and Monitoring of Salt Weathering 2001-2002. *Rapport*, nr. 2002.051, Expert-Center for Conservation of Monuments and Sites, Zürich.
https://perstoremyr.files.wordpress.com/2010/07/2002_051_regaliaroom_150dpi.pdf
- Storemyr, P. 2002. The Regalia Room Mural Paintings Conservation Preoject, Trondheim, Norway: Conservation Measures and Monitoring of Salt Weathering 2001-2002. *Report* No. 2002.051, Expert-Center for Conservation of Monuments and Sites, Zürich.
https://perstoremyr.files.wordpress.com/2010/07/2002_051_regaliaroom_150dpi.pdf
- Storemyr, P. 2004a. Weathering of soapstone in a historical perspective. *Materials Characterization*, 53, 2-4, 191-207. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2004.06.015>
- Storemyr, P. 2004b. Klimawandel: Wird es den historischen Bauten in Zukunft schlechter gehen? – Beispiele aus dem Alltag des Expert-Centers. *Expert-Center für Denkmalpflege, Jahresbericht 2004*, Zürich, 28-31.
https://perstoremyr.files.wordpress.com/2010/07/2004_storemyr_klimawandel_eed_jahresbericht.pdf
- Storemyr, P. 2010a. Klosterruinene på Selja – steinbrudd, forvitring og dokumentasjon. Rapport, Per Storemyr Archaeology & Conservation Services, Zurich (CH); for Bakken & Magnussen AS.
https://perstoremyr.files.wordpress.com/2017/08/2010_no_selja_stein_forvitring_dokumentasjon.pdf
- Storemyr, P. 2010b. Weathering and risk analysis of mural paintings in the Regalia room, Archbishop's Palace, Trondheim. Rapport, Per Storemyr Archaeology & Conservation Services, Zurich (CH); for Nidaros Domkirkes Restaureringsarbeider.
- Storemyr, P. 2015. Steinbruddslandskapene ved middelalderens klostre på Selja, Hovedøya og Rein. Rapport, Per Storemyr Archaeology & Conservation Services, Hyllestad (NO); for Riksantikvaren.
<https://ra.brage.unit.no/ra-xmlui/handle/11250/>
- Storemyr, P. 2017. Selja kloster og helgenanlegg: Inneklima og forvitring i tårnet. Rapport for Riksantikvaren og Selje kommune, Per Storemyr Archaeology & Conservation Services(NO); for Riksantikvaren. <https://ra.brage.unit.no/ra-xmlui/handle/11250/2454704>
- Storemyr, P. 2018. Selja kloster og helgenanlegg: Inneklima og forvitring i tårnet. Overvåkning fase 2, rapport 1. Rapport, for Selje kommune/Riksantikvaren, Per Storemyr Archaeology & Conservation Services, Hyllestad.
https://perstoremyr.files.wordpress.com/2019/10/2018_no_inneklima_forvitring_selja_rapport_til_ra_fase2.pdf
- Storemyr, P. 2019. Selja kloster: Hvor kom middelalderens kalkmørtel fra? Rapport, for Selje kommune/Riksantikvaren, Fabrica kulturminnetjenester as, Oslo.
https://perstoremyr.files.wordpress.com/2019/10/2019_no_selja_mc3b8rtel_med_marmor.pdf

- Thorn, A. & Piper, A. 1996. The Isle of the Dead: An integrated approach to the management and natural protection of an archaeological site. *Studies in Conservation*, 41:sup1, 188-192, [10.1179/sic.1996.41.Supplement-1.188](https://doi.org/10.1179/sic.1996.41.Supplement-1.188)
- Wendler, E. 2002. Laboratory Measurements on Salt-loaded Brick Samples in Periodically Changing Climate Conditions. In: von Konow, T. (red.) *The Study of Salt Deterioration Mechanisms. Decay of Brick Walls Influenced by Interior Climate Changes. European Heritage Laboratories – Raphaël* 1999. Helsingfors: The Governing Body of Suomenlinna, 81-87
- Zehnder, K. 2006. Long-term monitoring of wall paintings affected by soluble salts. *Environmental Geology*, 52, 2, 353-367. https://www.researchgate.net/publication/225735109_Long-term_monitoring_of_wall_paintings_affected_by_soluble_salts
- Zehnder, K. & Schoch, O. 2009. Efflorescence of mirabilite, epsomite and gypsum traced by automated monitoring on-site. *Journal of Cultural Heritage*, 10, 3, 319-330. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2008.10.009>

Vedlegg: Rapport fra kvantitative saltanalyser

Se neste side



CSC

Conservation Science Consulting Sàrl

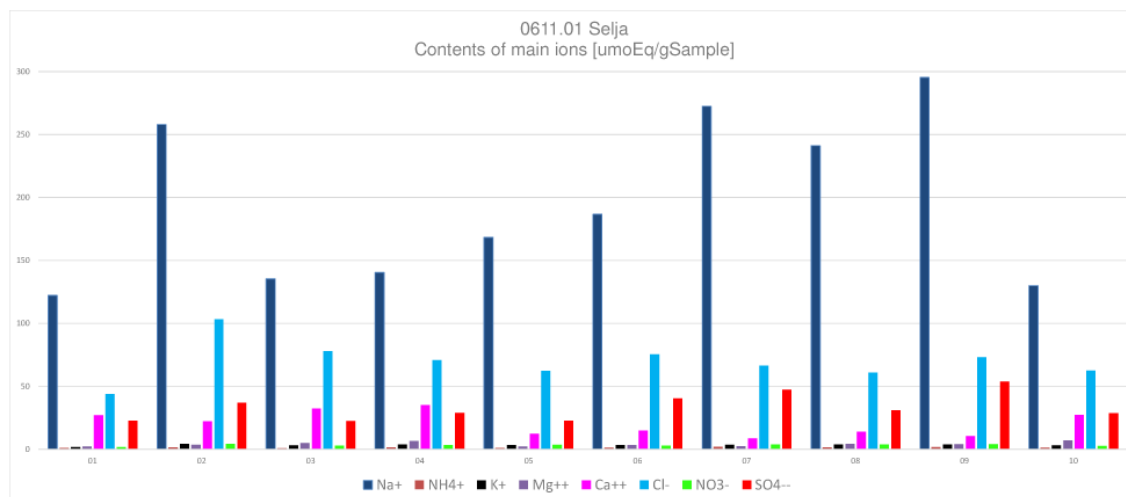
La science au service des monuments et des sites
Wissenschaft im Dienst historischer Bauten und Anlagen
Science for monuments and sites

R.0611.01 – short report

NO – SELJA MONASTERY, RUIN PRESERVATION PROJECT QUANTITATIVE SALT ANALYSIS

Client

Selje Kommune
Fakturamottak
N-6740 SELJE



Date: Fribourg, 19.9.2019
Distribution: see list at the end

Person in charge
Dr. Christine Bläuer

CSC Sàrl
Route de Beaumont 13
CH-1700 Fribourg

Tél. : +41 26 422 12 44
e-mail: csc@conservation-science.ch
www.conservation-science.ch

1 Mandate

By the end of august Dr. Per Storemyr sent us ten material samples for quantitative salt analysis.

This report gives the achieved results.

2 Analytical results¹

The results listed here after apply only to the sample material examined.

The analytical methods used are given in the annex.

The results of the salt analysis are regrouped for the main ions in the following tables.²

Table 1: Values for the main ions in µg/gSample. DL: detection limit for individual ions

µg/g	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻
01	2808	18	70	25	540	1552	102	1086
02	5929	26	162	42	444	3654	266	1775
03	3111	12	122	61	646	2765	174	1080
04	3228	27	149	79	705	2505	208	1387
05	3867	19	127	27	246	2208	221	1091
06	4292	24	128	41	298	2671	173	1937
07	6262	33	141	29	171	2354	230	2266
08	5545	25	143	52	277	2160	229	1484
09	6789	30	149	48	211	2587	243	2575
10	2988	24	118	86	546	2214	162	1375
DL	3	0.7	3	7	33	7	7	33

Table 2: Values of the main ions in µmoleq/gSample.³ DL: detection limit for individual ions

µmoleq/g	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻
01	122	1.0	1.8	2.0	27	44	1.7	23
02	258	1.5	4.1	3.4	22	103	4.3	37
03	135	0.7	3.1	5.0	32	78	2.8	22
04	140	1.5	3.8	6.5	35	71	3.4	29
05	168	1.1	3.2	2.3	12	62	3.6	23
06	187	1.3	3.3	3.3	15	75	2.8	40
07	272	1.8	3.6	2.4	9	66	3.7	47
08	241	1.4	3.7	4.3	14	61	3.7	31
09	295	1.7	3.8	4.0	11	73	3.9	54
10	130	1.3	3.0	7.1	27	62	2.6	29
DL	0.1	0.04	0.09	0.55	1.7	0.2	0.1	0.7

¹ The results will also be sent per e-mail as Excel® spread sheet

² The results for phosphates, acetates and fluorides, ions only detected in some of the samples water extractions and always in only small quantities of one to a few ppm, are only given in a separate Excel® sheet.

³ The values in µmol/gSample are given in the Excel® spread sheet

Table 3: Measured or calculated values of the ion charge balance (ICB), the sum of cation charges (SC), the sum of anion charges (SA), the sum of all ion charges (SIC), the pH value, the sum of ions (SI) in weight-%, the normalised electrical conductivity (norm.EC) and the weight loss after the extraction (WL). Analytical procedure and meaning of values see appendix.

	ICB [μmoleq/g]	SC [μmoleq/g]	SA [μmoleq/g]	SIC [μmoleq/g]	pH	SI [wt-%]	norm.EC [μS/cm]	WL [wt-%]
01	86	154	68	222	9.7	0.62	111	0.63
02	145	289	144	433	9.8	1.23	225	1.24
03	73	176	103	280	9.2	0.80	131	0.73
04	84	187	103	291	9.1	0.83	164	0.95
05	98	187	89	276	10.0	0.78	161	1.11
06	91	209	119	328	10.2	0.96	177	1.05
07	171	289	118	407	10.7	1.15	227	1.53
08	169	264	96	360	10.6	0.99	203	1.43
09	185	315	131	446	10.6	1.26	248	1.60
10	75	169	94	262	9.7	0.75	150	0.98

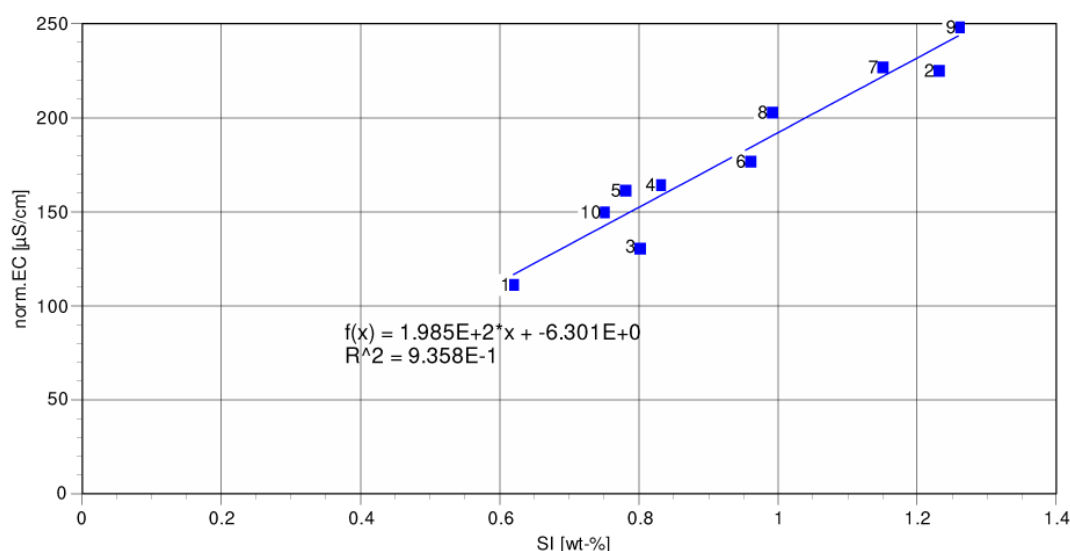


Figure 1: Graphic correlation between sum of ions in wt-% and normalised electrical conductivity of the solution in μS/cm.

The values of the normalised electrical conductivity correlate well with the sum of ions measured in the same solution.

The salt content in the samples lie between a bit more than 0.5% and 1.3% sum of ions. Including crystal water of the salts and carbonates and hydrogen carbonates, this represents a total salt content of be ween 1 and 2 % by weight.

All pH values lie between 9 and 10.7 and hence are alkaline.

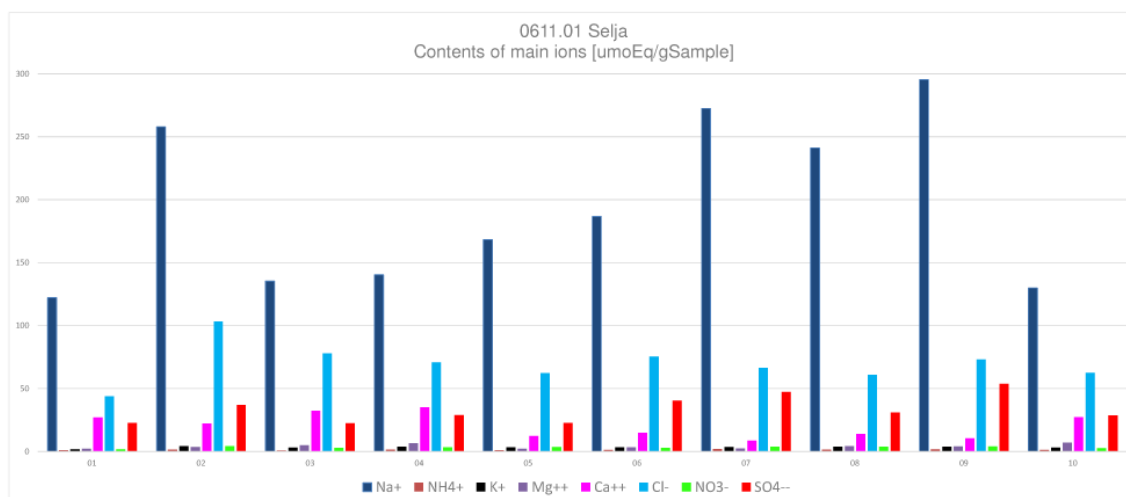


Figure 2: Graphic representation of the salt analysis in $\mu\text{moleq/gSample}$. In this type of representation equal bar length for two ions in a sample means that these two ions are present in the stoichiometric same amount.

The ion showing the biggest amount in all samples is sodium (figure 2). Chloride, the next most frequent ion, makes up between a fourth and half of the amount of sodium. The difference of sodium to chloride amounts in all samples about to the amount of the ion charge balance. Sulphates and calcium are the next frequent ions and ammonium, potassium and magnesium only make up a very small part of the salt content of the samples.

In some samples calcium contents are higher than sulphate contents but in other samples this is the opposite.

3 Hints towards an interpretation

All samples contain a certain amount of sodium chloride, with always much more sodium than chloride. The difference of sodium to chloride amounts in all samples about to the value of the ion charge balance, which, in accordance to the relative high pH values measured, could be interpreted such that the other sodium salts present would be sodium carbonates or hydrogen carbonates. However some of the sodium might also be present as sulphates.

Fribourg, den 19.9.2019

Conservation Science Consulting, Sàrl

Dr. Christine Bläuer
Mineralogist

Distribution of the report:

Report as pdf-file and related Excel® spread sheet of values sent to:

Per Storemyr, per.storemyr@hotmail.com

Bjørn Jensen, bjorn.jensen@selje.kommune.no

Appendix - Analytical methods, procedures and meaning of values

The samples were transferred from their plastic bags into glass crystallising dishes, weight and then put in the oven at 40°C. After drying the samples were left in the laboratory air to re-equilibrate⁴

The dry samples were then stirred thoroughly and one little shovel of it (about 1.5 to 3g) was weight exactly on a four digits balance. This portion, which did not contain any lumps of >5mm, was mixed with 100 mL of deionised water (the amount of water was exactly weight). The suspension was agitated several times for 10 minutes. After this it was filtered through a black ribbon laboratory filter paper. The filter residue was dried at 40°C in the oven and the weight loss of the sample (WL) determined by weighing the residue again after acclimatisation in laboratory air.⁵

The electrical conductivity (EC) and the pH of the eluate were measured. For the pH measurement a freshly calibrated WTW- pH 320 /Set 1 was used and the electrical conductivity was measured by means of a conductivity meter LF-T 3001-2 der Fa. NEUKUM-elektronik GmbH in Straubenhardt (D).

The ions sodium (Na⁺), potassium (K⁺), magnesium (Mg⁺⁺), calcium (Ca⁺⁺), chloride (Cl⁻), nitrate (NO₃⁻) and Sulphate (SO₄⁻) were measured in the eluate by means of ion chromatography. Ammonium (NH₄⁺) and phosphate (PO₄⁻⁻⁻) were determined photometrically.⁶ Acetate (Ac⁻) was determined semi quantitatively from the peaks received in the ion chromatogram.

The meaning of the determined values is as follows:

WL: the weight loss of the sample after the elution (WL) is a measure of the total amount of water soluble substances in the sample. Such substances can be salts, but also water soluble binders etc. Even if the samples contain only salts as water soluble substances WL can be much bigger than the sum of measured ions (SI) in weight-% because WL includes, apart from the measured ions, the ions that cannot be measured (see under SI) and the crystal water of the salts, which according to the specific salt can make up until 60% of the total weight of the salt.

pH: gives an indication on the type of soluble substances in the samples, i.e. the basic or acidic character of these substances.

EC: The electrical conductivity (EC in µS/cm) is an indicator of the total ion content of the solution.

Normalised EC (norm. EC): is the electrical conductivity normalised for the amount of sample used and the dilution. It is given in µS/cm*gSample.

Analysis of the ions: give the types and amounts of the individual water soluble ions.

Values in:

µg/gSample (micro gram per gram of sample) => * 10'000 for wt-% (weight-%)

µmol/gSample = micro mol per gram of sample

µmoleq/gSample (micro mol equivalent per gram of sample) = measured value of the ion in µmol/gSample times the absolute value of the ion charge number (i.e. monovalent ions times 1; bivalent ions times 2; etc.).

⁴ This is especially helpful with samples containing large amounts of hygroscopic salts or other hygroscopic materials, because weighing can become impossible for such samples, as such samples can take up humidity from humid laboratory environment so quickly that it becomes impossible to weigh with enough precision. The conditions in the laboratory were 49.7% rel. humidity and 21°C.

⁵ 54.5% rel. humidity and 21.7°C

⁶ Phosphate only for samples showing a phosphate peak in the ion chromatogram.

- SI: The sum of ions (SI) is a measure for the total salt content and gives the total of the inorganic, water soluble substances in the sample without the ions that are not measurable with the used methods, like carbonate (CO_3^{2-}), hydrogen carbonate (HCO_3^-) and hydroxides (OH^-) and without the crystal water of the salts. SI reflects the minimal amount of salts present in the sample. If SI is compared to WL the total amount of soluble substances can be estimated.⁷
- SA: Sum of anion charges (negatively charged ions) in $\mu\text{moleq/gSample}$.
- SC: Sum of cation charges (positively charged ions) in $\mu\text{moleq/gSample}$.
- SIC: sum of all ion charges measured in the sample in $\mu\text{moleq/gSamples} = \text{SA} + \text{SC}$
- ICB: If all ions present were analysed the ion charge balance (ICB) would be approximately zero. If ICB is negative this means that not all cations present have been analysed, is ICB positive not all anions have been measured. ICB's of salt extractions of building materials are hardly ever zero but usually positive, which normally has to do with the fact that carbonates (CO_3^{2-}), hydrogen carbonates (HCO_3^-) or hydroxides (OH^-) were dissolved but not analysed. Such solutions show then pH values of the eluates of greater than 7.
 $\text{ICB} = \text{SC} - \text{SA}$

⁷ Bläuer Böhm, C. (1996): Assessment of quantitative salt analysis by the water extraction method on lime mortars. 8th Int. Congr. Deterior. Conserv. of Stone, Berlin, 30.9.-4.10.1996, 1505-1519. Available at: <https://conservation-science.ch/english/publications/>