



NATIONALMUSEET

BEVARINGS AFDELINGEN

Rapport vedrørende
Magnuskathedralens
bevaringsforhold



Rapport vedrørende Magnuskatedralens bevaringsforhold.

Sag nr. 13193-0001

Dato: 30.09.2008

Rekvirent:

Símun V. Arge
Føroya Fornminnisavn
Hoyvik
FO-110 Tórshavn

Forfatter:

Poul Klensz Larsen
Nationalmuseets Bevaringsafdeling
Brede
DK 2800 Lyngby

Resumé

Rapporten sammenfatter en række undersøgelser og delrapporter udført i perioden 1985 – 2008. Den væsentligste del af arbejdet er gennemført i perioden 2006 –2008, herunder klimamålinger og mørtelundersøgelser. Formålet med arbejdet har været at fremskaffe og sammenstille dokumentation af bevaringsforholdene for Magnuskatedralens murværk og dekorationer. Hensigten med undersøgelserne har blandt andet været at dokumentere effekten af en midlertidig afskærmning, som blev etableret i 2003-2004.

Retningslinierne for Murens bevaring blev drøftet i en ekspertgruppe på et seminar afholdt i juni 2007. Det er gruppens samlede vurdering at monumentet som helhed kan bevares ved at acceptere en kontrolleret nedbrydning. Som langsigtet bevaringsstrategi anbefales det at lade Muren vedligeholde på traditionel vis, hvilket indebærer istandsættelse af fugerne. Murkroner, hvælvlommer og andre vandrette bygningsdele skal beskyttes mod nedsvivende vand ved såkaldt 'soft capping'. Der bør iværksættes et restaureringsprogram, som også omfatter efteruddannelse af lokale håndværkere. Den midlertidige afdækning kan demonteres efterhånden som restaureringen skrider frem.

Muren er opført af Færøske basaltblokke af varierende kvalitet, som nedbrydes på forskellig måde. En hård og tæt variant er anvendt som blokke til selve murens struktur, medens blødere og mere porøse typer er benyttet til dekorative detaljer. På ca. 25% af murens blokke afspaltes overfladen i op til 1 cm tykke skiver, hvilket muligvis skyldes indbyggede spændinger opstået ved lavaens nedkøling. Overfladen på de berørte blokke bør sikres. De dekorative detaljer er forvitrede som følge af salt fra havet, samt udvaskning af jernholdige mineraler fra overfladen. Nedbrydningen af skulpturelle elementer er så fremskreden, at de ikke kan genskabes eller underkastes konserveringsmæssig behandling.

Murens originale mørtelfuger består af kalk fremstillet lokalt ved brænding af strandskaller, med tilslag af basaltpartikler og sandkorn. Der forekommer hydrauliske reaktioner mellem basaltkorn og kalk, såkaldt puzzolan virkning, men kun mørtel fra murens kerne har udpræget hydraulisk karakter. Fugerne påvirkes hårdt af vejrliget, og er i nogle områder stærkt nedbrudte. Til restaurering bør anvendes en mørteltype baseret på naturlig hydraulisk kalk, som kan modstå påvirkningen fra salt og fugt.

Mikroklimaet på murens overflade er en kompliceret sekvens af variationer i temperatur, relativ luftfugtighed, saltdeponering og nedbør. Havsalt afsættes på overfladen med uregelmæssige mellemrum, men de hyppige episoder med regn vasker saltet bort igen. Den lukkede afskærmning forhindrer direkte regn påvirkning af Muren og reducerer temperatursvingninger på Murens overflade, men forhindrer ikke saltdeponeringen på overfladen. Den perforerede afskærmning tillader en vis regn påvirkning af overfladen, hvorved saltet vaskes bort fra basaltblokkenes overflade. Men saltet kan opsuges i fugerne, som derved udsættes for saltnedbrydning. Ingen af de to afskærmninger yder sikkerhed mod fortsat nedbrydning af stenoverflader eller fuger.

Indholdsfortegnelse

Resume

Indholdsfortegnelse

1. Basalt til mur og dekoration

- 1.1 Færøsk basalt
- 1.2 Nedbrydningsfænomener
- 1.3 Undersøgelser af basalt
- 1.4 Konservering
- 1.5 Konklusion

2. Mørtel og kalk til puds og fuger

- 2.1 Kalk på Færøerne
- 2.2 Nedbrydning af mørtel
- 2.3 Mørtelundersøgelser
- 2.4 Restaureringsmørtel
- 2.5 Konklusion

3. Mikroklimaundersøgelser

- 3.1 Baggrund
- 3.2 Målinger
- 3.3 Resultater og fortolkning
- 3.4 konklusion

4. Bevaringsstrategi

5. Referencer

- 5.1 Rapporter og notater vedrørende Muren
- 5.2 Supplerende litteratur
- 5.3 Ekspertgruppe

1. Basalt til bygning og dekoration

1.1 Færøsk basalt

Færøerne blev dannet for ca. 55 millioner år siden ved vulkansk aktivitet. Den færøske basalt er næsten uden undtagelse dannet under betingelser, hvor lavaen er flydt ud gennem revner i jordskorpen og har bredt sig vandret ud over et større areal. Denne dannelsesproces er årsag til de karakteristiske vandrette lagdelinger i de færøske fjelde, hvor materialet naturligt er opdelt i 'bænke'. Den flydende lava er enten størknet over jordoverfladen eller i hulrum mellem tidligere aflejringer. Den hurtige afkøling på overfladen begunstiger dannelsen af ustabile mineraler og lufthuller, hvilket giver en porøs basalt med begrænset vejrbestandighed. Den langsomme afkøling under overfladen giver en tæt og finkornet basalt, som har stor mekanisk styrke og holdbarhed. Begge typer er repræsenteret på Muren, idet den hårde, blåsorte basalt er anvendt til byggeblokke og den blødere, porøse basalt er benyttet til dekorative detaljer.

1.2 Nedbrydningsfænomener

Nedbrydningen af Murens byggesten blev undersøgt af Helge Brinck Madsen m.fl. i 1989 (III) på den sydvendte mur, og i 1991 (V) på de øvrige mure. Konklusionen var at den alvorligste nedbrydningsmekanisme er afspaltning af stenenes overflader i op til 1 cm tykke skiver. Den såkaldte exfoliering er værst på Murens udvendige overflader, hvor ca. 1/3 af samtlige blokke er berørt. På de indvendige overflader er der kun fundet exfoliering på ca. 15% af blokkene. Exfolieringen er således ikke orienteret efter verdenshjørnerne, men relaterer sig primært til de bygningsmæssige forhold. Dette tyder på bygningens tidligere brug og eventuelle overdækning som en væsentlig faktor for afspaltning af basaltens overflade.



Figur 1.1. Eksempel på dybtgående forvitring (alveoledannelse) af basalt som følge af saltkrystallisation



Figur 1.2. Eksempel på afskalning (exfoliation) af overfladen på en basaltblok på indersiden af den nordlige mur.

Der er ingen entydig forklaring på dette fænomen, som træffes både på færøske bygninger og i naturen. For natursten som er dannet ved sedimentation (f.eks. sandsten) skyldes exfoliering stenens

lagdelte struktur, idet afspaltningen følger aflejringsretningen. Denne forklaring kan ikke direkte overføres til den færøske basalt, som ikke har synlig lagdeling i de enkelte blokke. Muligvis opstår exfoliering på grund af svaghed i den enkelte blok som følge af temperaturspændinger opstået ved lavaens nedkøling, kombineret med temperatursvingninger forårsaget af solindstråling og/eller frost. Hvis afspaltningen har relation til basaltens oprindelige orientering i de enkelte bænke, og de enkelte blokke var udvalgt til anvendelse i byggeriet netop på grund af deres naturlige plane overflade, er svagheden indbygget fra starten. Forekomsten af lav og licéner på overfladen er omtalt i (III), og angives her at have både en beskyttende og nedbrydende effekt. De biologiske forhold er ikke undersøgt nærmere.

Fra andre naturstens monumenter er der erfaring for, at exfoliering accelereres af saltkrystallisation i de yderste lag af stenen. Saltindholdet i Murens basaltblokke er undersøgt ved udboring af 4 prøver fra en blok med intakt overflade og en 4 prøver af en blok, hvor en ca. 1 cm tyk skive var spaltet fra overfladen. De to blokke sidder indvendig i det nordøstlige hjørne omtrent 2 m over terræn og er vist i figur 1.2. Der blev også udtaget en prøve fra den afspaltede skive. Prøverne blev analyseret for indholdet af natrium, som er den ene del af natriumklorid, der udgør den overvejende del af havsalt. Indholdet af natrium er under 0,05 vægtprocent i alle prøver, så det totale saltindhold er højst 0,15 % vægt. Erfaringsmæssigt skal saltindholdet være højere end 0,5 % vægt for at udvikle skader på natursten.



Figur 1.3. Eksempel på nedrydning af profilerede vinduesindfatninger.



Figur 1.4. Eksempel på nedbrydning af konsol for krydshvælv. Slutstenen har muligvis været udformet som et ansigt.

Overfladeforvitringen af de profilerede basaltblokke ved hvælvenes vederlag samt omkring vinduer og døre er ligeledes omtalt i (III). Geolog Martin Heinesen beskriver, at nedbrydningen af basalt afhænger af mange forhold vedrørende den mineralogiske sammensætning, som varierer efter lokalitet og placering i den enkelte "bænk". Ved at vælge den blødere, porøse basalt til dekorative detaljer har man uden tvivl lettet arbejdet for stenhuggeren, men måske også indbygget en hurtigere nedbrydning. Analyser af basaltprøver udboret fra klipperne tæt ved Kirkjubøur viser, at overfladen nedbrydes som følge af oxidation af de jernholdige silikater (V). Denne proces er direkte relateret til vandpåvirkning og sker derfor ikke i tørt miljø. Forvitring af overfladerne tilskrives flere steder vinderosion (II og III), dvs. mekanisk slibning af overfladen på grund af de sandkorn, vinden bringer med. Denne form for erosion er almindelig i ørkenområder (A), men har næppe relevans på

Færøerne. Sverri Dahl nævner i (I) sur regn fra industriel udledning af svovldioxid som mulig årsag til nedbrydningen. Men i betragtning af øernes isolerede beliggenhed fjernt fra industriområder er denne mulighed ikke sandsynlig.

Forvitring af ornamenterne kan rimeligvis være forårsaget af saltkrystallisation. Der eksisterer utallige eksempler på saltens ødelæggende effekt på naturstensmonumenter, og saltbetinget nedbrydning kan antage mange forskellige former. I områder med læ for regn forekommer nedbrydningen særligt voldsom med dybe kraterdannelser, som f.eks. kan iagttages på undersiden af den sydvendte portal. Fænomenet betegnes almindeligvis alveole-dannelse og skyldes ofte krystallisation af salt (A). Der findes flere forskellige teorier for, hvorfor salte er i stand til at ødelægge nogle typer natursten, medens andre forbliver upåvirkede. Stenens porestruktur har stor betydning for saltmodstandevnen, men også temperatur og RF i omgivelserne har stor indflydelse. Hyppige variationer medfører at saltet skiftevis opløses og udfældes, hvorved stenens struktur gradvis omdannes.

1.3 Undersøgelser af basalt

Basaltens evne til at modstå frost- og saltpåvirkning er undersøgt i et afgangprojekt på Danmarks Tekniske Højskole i foråret 2008 (IX). Til undersøgelserne er anvendt en basaltblok af den porøse type, som også er anvendt til dekorative detaljer på muren. Porøsiteten blev målt til ca. 13% og den kapillære vandopsugning til ca. 12% volumen. Dette betyder at den frie vandmætningsgrad er ca. 93%, hvilket er højere end 80%, som normalt anses for den nedre grænse for naturstens evne til at modstå frost. Den teoretiske grænse er 91%, idet vand udvides 9% når det fryser. Frostbestandigheden er målt i henhold til den tyske norm DIN 52 104. Ved at underkaste prøvelegemer skiftende frost- og tøj i vandmættet tilstand er fundet, at materialet taber ca. 30% af bøjningsstyrken efter 30 frysepunktpassager. Hvis det anvendte vand er tilsat 1% natriumklorid, falder styrken med ca. 65%. Rapporten konkluderer at denne stentype ikke frostfast. Ved forsøg med opsugning af salt fra en 1% opløsning i 30 dage er fundet at basalten nedbrydes ved krystallisation af natriumklorid og flere andre salte. Selvom disse forsøg ikke er direkte sammenlignelige med de aktuelle forhold, giver det en indikation af at den porøse basalt ikke er modstandsdygtig for salt.



Figur 1.5. Prøve af porøs basalt efter 30 dages opsugning af 1% saltopløsning. Overfladen smuldrer som følge af saltets krystallisation



Figur 1.6. Nærbillede af overfladen på basaltprøve forurenet med salt. De kubiske krystaller nedbryder materialets struktur.

1.4 Konservering

En stor del af ornamentikken omkring vinduer og døre, samt skulpturelle elementer ved hvælvvederlag er allerede så nedbrudte, at det ikke er mulig at genskabe det oprindelige udseende. Der er heller ingen grund til at forsøge med konsolidering af overfladerne. De enkelte dekorative elementer er dokumenteret ved afformning med silikonegummi udført i 1991 og 1993. Der foreligger en oversigt med nummerering af de enkelte afformninger. Der er udført gipsafstøbninger af en del af formene, og da silikoneformene har begrænset levetid, bør de resterende afstøbninger udføres snarest. Silikoneformene og gipskopierne opbevares på Museets magasin i Hoyvik. Der findes en del velbevarede fragmenter, fundet omkring Muren ved udgravning i 1950'erne. Disse opbevares i det lille lapidarium i kælderen under Roystogan, og udgør en vigtig del af dokumentationen for Murens bygningshistorie, der bør indgå i en samlet bevaringsplan. Det vil være hensigtsmæssigt at udfærdige en registrant over samlingen. En del af fragmenterne er opmålt og optegnet af Curt von Jessen, og er gengivet i forskellige publikationer. Originaltegningerne findes antagelig på Kunstakademiets Arkitektskole i København.



Figur 1.7. Relikvieskabet på østgavlen. Dækstenen er udført af vejrbestandig klæbersten. Kalktapet skyldes udvaskning af mørtel fra ommuringen i 1979.



Figur 1.8. Indvielseskors udført af vejrbestandig klæbersten. Mekanisk skade fornedden skyldes antagelig forsøg på at fjerne stenen.

Indvielseskorsene er udført af en norsk klæbersten og er i bedre stand end basalt dekorationerne. Dette materiale er tydeligvis langt mere vejrbestandig end den porøse basalt. Dækstenen til relikvieskabet, som sidder udvendig på østgavlen, er noget mere nedbrudt, men figurerne har fortsat en del bevarede detaljer, ligesom tekstbåndet fortsat kan læses. Både indvielseskors og dæksten blev afformet i 1991-1993. Men derudover blev dækstenen ifølge Sverri Dahl (I) bragt til København i 1956 for at blive afstøbt. Afstøbningen blev udført i gips og er opmagasineret på Museets magasin i Hoyvik. Ved sammenligning med den nuværende tilstand vil det kunne det afklares, om der har været aktiv nedbrydning af denne vigtige bygningsdetajle de sidste 50 år. En detaljeret sammenligning af overfladerne kan udføres ved fotogrammetrisk opmåling.

På de blokke, som er berørt af exfoliering, skal overfladen fastholdes i sin oprindelige position. Det er muligt at fastlægge afspaltede overflader ved injektion med en kalkbaseret binder, men der bør udføres forsøg med forskellige materialer for at finde en egnet løsning. Det er vanskeligt at forudsige holdbarheden af denne metode. Men da der ikke er tegn på flere end én afspaltning på den

samme blok, vurderes det at exfolieringen udvikles langsomt. Der synes ikke være risiko for en pludselig accelererende nedbrydning af større murpartier.

1.5 Konklusion

Basaltens forskellige former for forvitring kan dels henføres til indbyggede svagheder i materialet, dels til vejrligets påvirkning af overfladerne. Tilsvarende henfald kan iagttages i basalt formationer på Færøerne og må betragtes som en naturlig del af basaltens geologiske omsætning.

Nedbrydningen sker gradvis, og det er ikke muligt at afgøre, om hastigheden er øget i det 20. århundrede. De basalt blokke, som er ramt af exfoliering, men hvor overfladen stadig sidder på plads, bør sikres ved konsolidering. De dekorative og skulpturelle bygningselementer udført af basalt har på nuværende tidspunkt nået en grad af nedbrydning, hvor det ikke er muligt at genskabe eller konservere det enkelte objekt. I stedet udgør afformninger og afstøbninger, som blev udført i 1991-1993, en vigtig bygningsantikvarisk dokumentation. Samlingen af bygnings fragmenter, som er fremkommet ved arkæologiske udgravninger, er i betydelig bedre bevaringstilstand, og giver vigtig information om den tekniske og kunstneriske kvalitets af stenhuggerarbejdet. Dekorationer udført af klæbersten tåler bedre vejrpåvirkningen og kan bevares in situ.

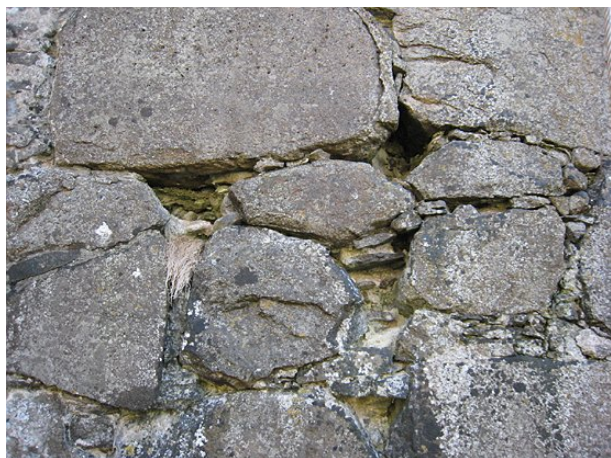
2. Mørtel og kalk til puds og fuger.

2.1 Kalk på Færøerne

På Færøerne findes ingen geologiske kalkforekomster, som kan være anvendt til fremstilling af kalkmørtel. I stedet har man traditionelt anvendt strandskaller til kalkbrænding, og der findes stadig spor efter kalkovne flere steder, dog ikke på Kirkjubøur. Alternativt kan kalken være tilført øerne udefra. I det nordiske område findes mange lokaliteter med kalkaflejringer, som blev anvendt til kirkebyggeri i samme periode. I landene omkring Østersøen er der talrige forekomster af kalk, men også Mellemsverige og Oslo-området har gode kalkformationer. Af særlig interesse er den mulige anvendelse af naturligt hydraulisk kalk, som giver en mørtel med større styrke og bedre holdbarhed. Ifølge Sølve Johansson blev hydraulisk kalk anvendt i samme periode til kirkebyggerier i Sverige (XIV). Omkring Bergen findes flere forekomster af silikatholdig kalksten, men også De britiske Øer og sågar Shetlandsøerne har egnede geologiske formationer. Det er derfor ikke usandsynligt, at der er indført kalk til byggeriet i Kirkjubøur.

2.2 Nedbrydning af mørtel

Murens indre sammenhæng og mekaniske stabilitet er afhængig af mørtlen mellem de enkelte blokke i murkernen. Der ses flere steder udfældning af kalkgardiner på murens overflade, som er tegn på udvaskning af mørtlen i murens indre. Ingeniør Søren Abrahamsen anfører i 1990 (IV) risikoen for spaltning af murkernen og efterfølgende kollaps som en realistisk mulighed, såfremt udvaskningen af kalk fortsætter uhindret. Frostsprængning af den vandmættede mørtel nævnes ligeledes som en væsentlig nedbrydningsfaktor. Murens tilstand blev undersøgt ved udboring af to kerner fra den sydvendte facade i 1990. Der var ingen tegn på spaltning af Muren, men manglende udfyldning af murkernen tæt ved murkronen. Udvasning af kalk forekommer som regel fra konstruktioner, hvor kalken ikke er fuldt carboniseret. Dette kan være tilfældet med mørtel, som ligger dybt i murværket og derfor har været beskyttet mod luftens indtrængen. Der er dog ingen oplysninger om kalken i borekernerne var carboniseret. Kalkudvasning kan også forekomme fra friske mørtelreparationer, hvilket ses tydeligt omkring relikvieskabet, som blev ommuret i 1979.



Figur 2.1. Nedbrudte fuger med løse eller manglende skærver (klipur).



Figur 2.2. Udfældning af kalk på Murens overflade som følge af udvaskning af mørtlen af gennemsivende regnvand.

Mørtelen svækkes ved tab af bindemiddel, og vil på længere sigt blive nedbrudt. Derfor er udvaskningen af kalk fra murkernen et tegn på mørtelens forvitring, men næppe den mest alvorlige. Nedbrydning af fuger på murens overflader som følge af frost og salt synes at udgøre en mere omfattende risiko. Over store flader er fugerne mellem blokkene stærkt nedbrudte, og de mindre skærver løstsiddende eller faldet ud af fugerne. Når fugerne mangler er der fri adgang for vand til at trænge dybere ind i muren. Fugerne er hårdt belastet på denne type murværk, fordi mørtelen har svært ved at binde på basaltens overflade. Dette betyder at der nemt opstår revner mellem fuge og basaltblokke, hvor vandet kan opsuges.

Basaltblokkenes ringe sugsevne gør endvidere, at den afviser slagregn, som i stedet samles ved fugerne og opsuges i den porøse mørtel. Herved belastes fugerne af både fugt og salt, som skylles af basaltens overflade. Når fugerne igen tørrer ud, aflejres saltet i overfladen og nedbryder mørtelen. Der er foretaget udbedringer af fugerne i flere perioder og tilsyneladende anvendt forskellige mørteltyper, herunder portland cement. Forhenværende landsantikvar Sverri Dahl har i sin redegørelse fra 1985 (I) samlet en summarisk oversigt over arbejder udført i perioden 1847 – 1979. Curt v. Jessen opregner i (II) de forskellige områder, hvor der er udført reparation af fuger og ommuring af murværk, men der foreligger næppe nogen fyldig dokumentation for de forskellige arbejder. Derfor er det ikke altid umiddelbart klart om fugerne er 'originale' fra kirkens opførelse eller stammer fra senere reparationer.

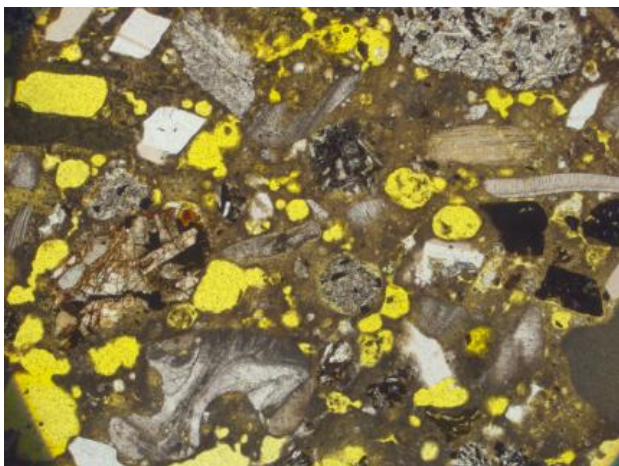
2.3 Mørtelundersøgelser

Spørgsmålet om bindemidlets oprindelse og mørtelens sammensætning blev behandlet i en uafsluttet mørtelundersøgelse af Curt von Jessen, hvis resultater foreligger i en foreløbig rapport fra 1991. Den gengiver resultaterne af 8 mørtelprøver fra hhv. Muren og Likhuset. Prøvemethoden er ikke oplyst, men at dømme efter resultaterne er der tale om såkaldt Jedrezejewski's test, dvs. opløsning i saltsyre og måling af den afgivne kuldioxid. Herved kan mørtelprøvens sammensætning beregnes som andel af ren kalk, uopløseligt tilslag og syreopløselig silikat. Alle prøver har et indhold af syreopløselig silikat på 5 – 10% vægt, som kan fortolkes som hydraulisk indhold. Dette tyder på at der kan være anvendt hydraulisk kalk som bindemiddel. Murkernens originale mørtel, som blev udtaget ved en kerneboring på sydsiden, blev analyseret af Jørn Bredahl fra Konservatorskolen, meddelt i rapport fra 1998 (VIII). Mørtlen betegnes som en kulekalksmørtel med blandet tilslag og fragmenter af strandskaller. Der er ingen oplysning om kalkens herkomst, men det anføres at der ikke er spor efter hydrauliske mineraler.

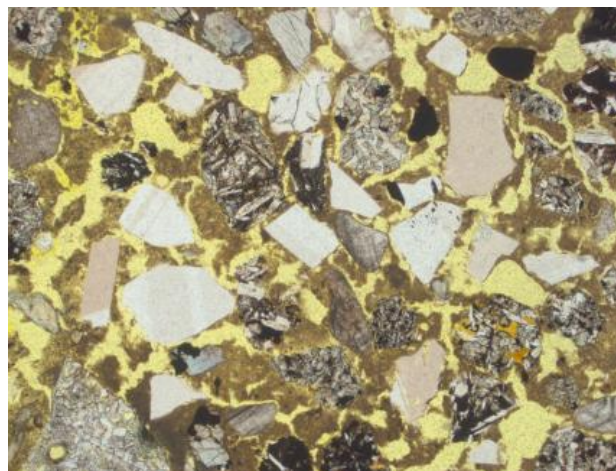
En omfattende undersøgelse af den oprindelige mørtel blev gennemført i efteråret 2007. Resultatet foreligger i rapporten "De gamle bruken i Domkyrkoruinen i Kirkjubøur m.fl. medeltida byggnadar på Färöarna" (X) udarbejdet af arkitekt Sölve Johansson (Byggkonsult, Trolldhättan) og kemiker Thorborg v. Konow (Tureida, Helsinki) samt mineralog Jan Erik Lindqvist (CBI Betonginstituttet, Borås)). Rapporten omfatter prøver udtaget fra Muren, Likhuset, Sognekirken samt Munkastovan på Tinganes i Tórshavn. Der er udført tyndslib af i alt 15 prøver, som er anvendt til karakteristik af mørtlerne. Eksempler på tyndslib er vist i figur 2.3 og 2.4.

Bindemidlet består ifølge Thorborg von Konow (XI) af rundede mørke formationer med lysere områder imellem. Dette kunne tyde på at kalken er brændt af strandskaller, som har efterladt delvis ubrændte fragmenter i pastaen. Der savnes dog referencer fra tilsvarende eksempler for at bekræfte dette. Kalk udvundet af muslingeskaller er kendt fra alle egne af verden og betegnes 'skælkalk' eller

lokalt 'skilp'. Tilslaget er en blanding af afrundede basaltkorn og skarpkantede sandkorn (kvarts). Flere steder forekommer hydrauliske reaktioner mellem basaltpartikler og kalkpasta. Det er almindeligt kendt at vulkanske materialer kan reagere med læsket kalk. Romerne benyttede f.eks. aske fra lokaliteten Puzzolo ved Vesuv som tilsætning til mørtler, heraf navnet puzzolan. Hvorvidt der bevidst er tilsat reaktivt materiale af vulkansk oprindelse kan ikke afgøres. Derudover indeholder mørtlen ubrændte skalfragmenter, som antagelig stammer fra det lokale sand, der er anvendt som tilslag. I prøver fra Likhuset og Sognekirken findes desuden rester af ben, som kan være anvendt som tilsætning ved kalkbrændingen, samt kulpartikler, som også kan komme fra brændingen.



Figur 2.3. Prøve Dom5. Gule områder er porerum, hvide felter er sandkorn, sorte felter er basaltfragmenter, brune områder er kalkpasta (bindemiddel).



Figur 2.4. Prøve Dom7. Gule områder er porerum, hvide felter er sandkorn, sorte felter er basaltfragmenter, brune områder er kalkpasta (bindemiddel).

Sammensætningen af de enkelte prøver er fundet ved mikroskopisk analyse af tyndslibene. Resultatet fremgår af tabel 1.A. Analysen opgør volumen af bindemiddel (kalkpasta) i mørtlen, indholdet af tilslag i form af sand og kalksten samt andelen af hulheder. Sammensætningen af mørtlen fra Muren varierer en del, hvilket er normalt for middelalderbygninger. Alle prøver har en forholdsvis høj andel af bindemiddel og betegnes derfor "fede" mørtler, i modsætning til moderne mørteltyper, som har et lille bindemiddelindhold og derfor betegnes "magre". I gennemsnit af alle prøver fra domkirken er indholdet af bindemiddel 43%, tilslag (sand og kalkpartikler) udgør 42% og hulrum er de resterende 15% volumenandele. På baggrund af sammensætningen i den færdige mørtel er blandingsforholdet i den friske mørtel beregnet i hhv. volumenprocent og vægtprocent. Blandingsforholdet i volumenandele varierer fra 1:1 i prøve Dom9 til 1:2,2 i prøve Dom5.

For nogle udvalgte prøver er den kemiske sammensætning af bindemidlet fundet ved opløsning af prøven i perklorisyre og efterfølgende grundstofanalyse. Heraf er det såkaldte hydrauliske index beregnet, som er et målt for hvilke mineraler bindemidlet indeholder. Ved et hydraulisk index under 0,3 er bindemidlet ren kalk, og et index over 1,1 angiver ren portlandcement. Index herimellem viser at bindemidlet er en blanding af kalk og hydrauliske (cementagtige) mineraler. Bindemidlets sammensætning er afgørende for mørtelens egenskaber. Kalk hærder ved optagelse af kuldioxid fra luften og opnår forholdsvis ringe styrke og holdbarhed. Hydrauliske mineraler hærder ved optagelse af vand og omdannes herved til et stærkt og modstandsdygtigt bindemiddel.

Prøve			Sammensætning (% volumen)					Blandingsforhold	
Nr	Type	Hydraulisk index	Pasta	Kalkklump	Kalkkorn	Sandkorn	Hulrum	Rum	Vægt
D1	fuge		43	4	21	21	14	100/143	100/300
D2	fu/pu		41	0	13	25	20	100/134	100/280
D3	fu/pu		38	2	16	31	13	100/189	100/370
D4	fu/pu	0,12 (luftkalk)	39	2	27	18	13	100/173	100/360
D5	fuge		35	1	9	42	13	100/220	100/460
D7	puds	0,09 (luftkalk)	41	2	16	27	15	100/155	100/320
D8	fuge	0,19 (subhydr)	39	1	8	33	19	100/174	100/320
D9	puds		50	3	11	11	13	100/108	100/220
D10	fuge	0,22 (subhydr)	38	4	22	20	16	100/178	100/370
D12	kerne	0,63 (hydraul)	38	6	33	7	6	100/192	100/400
D13*	kerne		33	5	49		13		
L2	pu/fu	0,04 (luftkalk)	48	6	33	7	6	100/140	100/290
S2	puds	0,02 (luftkalk)	47	3	34	3	13	100/127	100/270
S3	fuge	0,04 (luftkalk)	38	4	36	4	8	100/132	100/270
S4	puds		37	4	36	10(+7)	6	100/180	100/370
M1	fuge	0,03 (luftkalk)	58	2	18	9	12	100/73	100/150

Tabel 2.A . Sammensætning af de enkelte mørtelprøver iht. (VIII) . Hydraulisk index er beregnet på baggrund af kemisk analyse. Pasta betegner bindemidlet i mørtlen, medens sand og kalksten udgør tilslaget. D13 er analyseret ved en tidligere undersøgelse (VI).

Den eneste prøve med klart hydraulisk bindemiddel er Dom12 med en index på 0,63. Denne prøve er udtaget fra den øverste kerne, som blev udboret i sydmuren. Prøve Dom 8 og Dom 10 har index på hhv. 0,19 og 0,22, og kan dermed betegnes 'subhydrauliske' iht. Sølve Johansson, dvs. svagt hydrauliske. Begge prøver er fugemørtler. Alle andre prøver har index lavere end 0,15 og er dermed ren kalk. Resultatet indikerer at der er anvendt hydraulisk mørtel til at opbygge selve strukturen, hvor der var behov for en god mekanisk styrke og en hurtig styrkeudvikling. De svagere mørtler er benyttet til overfladebehandling hvor kravet til styrke var mindre. Antallet af kemiske analyser fra murkernen er dog for lille til at give tilstrækkelig statistisk sikkerhed for denne formodning.

2.4 Restaureringsmørtel

Organisationen Historic Scotland har gennem mange år arbejdet med undersøgelse og udvilkning af mørtel til restaureringsformål i det Nordatlantiske område. Erfaringerne er samlet i publikationen 'Preparation and use of lime mortars' (B). Det anbefales generelt at anvende rene kalkmørtler, men til bygninger med en udsat beliggenhed kan naturlig hydraulisk kalk give tilstrækkelig vejrbestandighed. Thorborg von Konow har stillet forslag til en restaureringsmørtel på Muren (XI). Mørtelen er baseret på hydraulisk kalk, og betegnes KKh 25/75/370, hvilket angiver 25 vægtdele tørlæsket kalk, 75 vægtdele hydraulisk kalk og 370 vægtdele tilslag. Den hydrauliske kalk skal sikre at mørtelen opnår tilstrækkelig vejrbestandighed. Som hydraulisk kalk kan f.eks. anvendes den franske St. Astier i styrkeklasse NHL5. Tilslaget kan enten være lokalt sand fra Færøerne eller såkaldt normsand, i begge tilfælde tilsat ca. 9 % vægt kalkfiller, dvs. kalkpulver med kornstørrelse

mindre end 0,07 mm. Kalkfilleren skal forbedre mørtelens bearbejdelse og sikre at kalken ikke får indre svindrevner, hvilket svækker vejrbestandigheden.

Valget af bindemiddel er nærmere undersøgt i et afgangsprøveprojekt udført på DTU i efteråret 2007 (XII). I undersøgelserne indgik to forskellige typer hydraulisk kalk, dels fra St. Astier, dels såkaldt Ny Jurakalk. Begge typer er klassificeret i styrkeklasse NHL5 iht. den europæiske norm for bygningskalk DS/EN 459-1. Endvidere blev afprøvet et moderne puzzolan betegnet Metastar, som produceres i England. Puzzolanen blev tilsat en kalkmørtel baseret på kulekalk. Til sammenligning indgik en mørtel med bindemiddel af læsket kalk og hvid cement. Som tilslag til alle mørtler blev anvendt en normsand 0,1 – 1,4 mm. Blandingsforhold for de enkelte mørteltyper fremgår af skemaet nedenfor. Mørtlerne blev støbt i stålforme til prøvelegemer 4 x 4 x 16 cm, og efterfølgende lagret i 'fugtig luft' ved ca. 85% RF.

Mørtlernes styrkeudvikling blev målt efter forskellige hærdningsperioder. Mørtelen baseret på kulekalk tilsat Metastar havde meget ringe styrke, næppe bedre end en ren kalkmørtel. Mørtelen baseret på kalk og hvid cement opnåede meget hurtigt en forholdsvis høj styrke, og blev ikke stærkere efter ½ års lagring. De to mørtler baseret på naturlig hydraulisk kalk havde en langsom styrkeudvikling, men opnåede højere styrke end kalkcementmørtlen efter ½ års lagring. Dette skyldes at de hydrauliske mineraler i naturlig hydraulisk kalk udvikles forholdsvis langsomt, medens portland cement opnår sin maksimale styrke allerede efter 1 måneds forløb. I egne med mange frost-tø passager om vinteren er det en fordel med en hurtig styrkeudvikling, da mørtelen ellers kan være udsat for frostskeer den første vinter.

Bindemiddel	Blanding	Styrke 14 d	Styrke 30 d	Styrke 153 d	Kapillaritet
	vægt	MPa	MPa	MPa	kg/m ² s ^{1/2}
St. Astier	1:2,6	2,0	2,4	8,3	0,2
Ny Jurakalk	1:2,6	2,0	2,5	8,7	0,2
Kalk/Cement	1:1:8	6,3	6,8	6,2	0,1
Kalk/Metastar	1:6:28	0,7	0,7	0,4	0,5

Tabel 2.B . Styrkeudvikling og kapillaritetstal for 4 forskellige mørteltyper.

Mørtlernes evne til at opsuge og transportere vand udtrykkes ved kapillaritetstallet, som er vist i sidste kolonne i figur 2.B. Metastar-mørtlen suger forholdsvis hurtigt vand op i poresystemet, medens cementmørtlens opugning er ca. 5 gange langsommere. De to hydrauliske mørtler har en moderat opugningshastighed, dobbelt så høj som cementmørtlen. Til brug på facader, som er hårdt belastet af slagregn, foretrækkes fugemørtel med moderat opugningsevne. Dette gælder især når murværkets sten er meget tætte og vandafvisende, idet fugerne da er en væsentligste årsag til vandindtrængen i konstruktionen. Fugerne må dog ikke være vandtætte, idet vand, som alligevel trænger ind gennem revner og huller, skal kunne undslippe igen. Vedhæftningen mellem sten og fuge skal være god for at undgå revnedannelser, men denne egenskab er ikke undersøgt.

Mørtlernes vejrbestandighed blev testet in situ ved opsætning af prøver på sydsiden af murens sydmur i ca. 5 meters høje over terræn. Efter 1 års exponering var Metastar-mørtelen forholdsvis hårdt medtaget, meden de øvrige tre mørtler havde holdt sig udmærket. Dette stemmer udmærket med resultatet af styrkeudviklingen.

I august 2007 blev gennemført en prøverestaurering i tre felter på nordsiden af nordmuren. Arbejdet blev udført af firmaet Nordisk Konservering ved Peder Bøllingtoft og Hans Frederiksen. Formålet var at udstikke retningslinierne for det fremtidige restaureringsarbejde på Muren, herunder hvordan nye udfyldningssten udvælges og indbygges. Der blev anvendt 3 forskellige mørteltyper. Hydraulisk mørtel fra St. Astier, kalkmørtel med Metastar og en såkaldt læskemørtel fra Skandinavisk Jurakalk. Sidstnævnte er ikke en hydraulisk kalkmørtel, men er fremstillet ved læskning af kalken sammen med tilslaget. Herved opnås erfaringsmæssigt en mørtel med god vejrbestandighed, muligvis fordi sammenhængen mellem kalk og sand forbedres (B) . Efter 1 års forløb var læskemørtlen og St. Astier-mørtlen i god stand, hvorimod Metastar-mørtlen var præget af udvaskning af kalk fra fugerne.



Figur 2.5. Mørtelprøver monteret på sydsiden af Muren for test af vejrbestandigheden. Metastar-mørtlen nederst th. var den mest nedbrudte af de fire prøver.



Figur 2.6. Prøverestaurering af fuger på nordsiden af nordmuren. Den viste prøve bestående af kalkmørtel med Metastar er ikke vejrbestandig.

2.5 Konklusion

Fugernes nuværende tilstand er meget varierende. Nogle områder er istandsat i nyere tid og fremtræder i god stand med intakt mørteloverflader og god kontakt til de mindre skærver, som fylder ud mellem de store blokke. Disse områder har intet eller kun begrænset behov for restaurering og kan bevares uændret. Andre områder har mistet både fugemørtel og de mindre udfyldningssten og står med helt åbne huller mellem de store basaltblokke. Forfaldet er sket over en meget lang periode, og det er ikke muligt at udlede konklusioner om den originale mørtels kvalitet og vejrbestandighed. Den originale fugemørtel er fremstillet af brændte strandskaller blandet med strandsand, som både indeholder basaltpartikler, kvartskorn og skalfragmenter. Til restaurering bør vælges en hydraulisk mørteltype, som har god vedhæftning til basalten, rimelig modstandsevne overfor salt og tilpas fugtledningsevne.

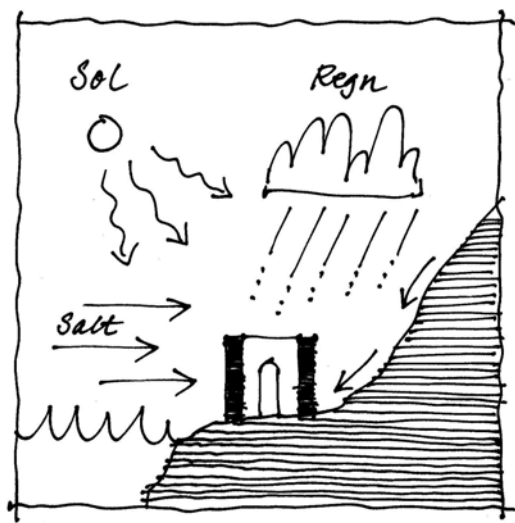
3. Mikroklimaundersøgelse

3.1 Baggrund

Det naturlige klima på Færøerne er mildt og vådt på grund af Golfstrømmens påvirkning. Temperaturen ved havniveau kommer sjældent over 20°C om sommeren eller under 0°C om vinteren. Regnvejr forekommer ofte og solen skinner tilsvarende lidt. Årsgennemsnittet for de seneste 30 år i Tórshavn er 209 regnvejrsgange med en samlet nedbør på 1284 mm og 884 solskinstimer (kilde DMI). Der er kun få frysepunktpassager, og temperaturen falder kun 1-2°C under frysepunktet i nogle få timer. Men der er store variationer fra sted til sted, så det er nødvendigt at måle klimapåvirkningen på Muren for at få et retvisende billede af mikroklimaforholdene.



Figur 3.1. Domkirkeruinen på Kirkjubøur set fra nordøst. Den midlertidige afskærmning er udført af sortmalet krydsfiner.



Figur 3.2. De vigtigste klimapåvirkninger på Muren: Salt, sol og regn

Valget af relevante klimaparametre og målemetoder er baseret på forudgående undersøgelser af Murens bevaringstilstand som refereret ovenfor. En kortvarig klimamåling blev gennemført af Tim Padfield og Bent Eshøj over sommeren 1991 (VII + VIII). Målingerne viste, at der sker en aflejring af havsalt på overflader, som er beskyttet mod nedbør, hvorimod der ikke akkumuleres salt på ubeskyttede overflader. En måling af saltdeponeringen i 2004-2005 viste, at sydsiden af sydmuren undergår store variationer i saltpåvirkningen, medens nordsiden har en mindre og mere stabil saltbelastning (XIII). Eftersom salt er en velkendt kilde til nedbrydning af bygninger og monumenter i talrige andre tilfælde, betragtes saltdeponering som en vigtig nedbrydningsfaktor også på Muren.

Formålet med undersøgelsen er desuden at dokumentere effekten af en midlertidig afskærmning, som blev opsat i 2003-2004 efter ide og oprindeligt projekt af ingeniør Søren Abrahamsen. Murkronen har været beskyttet mod nedsivende vand af en betonafdækning, som oprindeligt blev støbt i 1874, men er udskiftet flere gange siden. Erfaringen har vist, at det ikke er tilstrækkeligt at afdække murkronen foroven, fordi vandpåvirkningen i ligeså høj grad sker på Murens lodrette sider. Derfor er den nye afdækning ført delvis ned langs Muren sider og dækker hvælvlommerne og de to

sydvendte portaler. Selve kirkeskibet er ikke overdækket, men i kapellet på kirkens nordside er afdækningen udført som et halvtag. Afskærmningen er udført af sortmalet krydsfiner på en trækonstruktion, som fastholdes til Muren med rustfaste stålwirer forankret i fundamentet under terræn. Der er desuden afprøvet en perforeret afskærmning af strækmetal for at klarlægge, hvilket design der yder den bedste beskyttelse mod klimapåvirkningerne.

3.2 Målinger

En vigtig indikator for klimaets påvirkning er den temperatur, der hersker på overfladen. Temperaturen måles med termoelementer på den uafdækkede overflade, den afdækkede overflade samt på overfladen bag den perforerede afdækning. Overfladetemperaturen er en balance mellem den omgivende lufttemperatur, varmeudveksling med den bagvedliggende mur samt varmeudveksling til og fra omgivelserne i form af stråling (radiation). Desuden spiller lufthastigheden ved overfladen en rolle, fordi der i kraft af luftens bevægelse tilføres eller afgives energi fra luften (konvektion). Endelig har fugtbevægelserne ud og ind gennem overfladen effekt på temperaturen, fordi fordampning kræver energi og derved sænker temperaturen, og kondensation afgiver energi og derved hæver temperaturen.



Figur 3.3. Murens vest- og sydside med måleudstyret opsat. Feltet uden beklædning midtpå muren blev anvendt til afprøvning af en perforeret afdækning (strækmetal).



Figur 3.4. Placering af overfladefugtmåler og overfladetemperaturføler på den sydvendte overflade bag den perforerede afskærmning.

Murens fugtbalance påvirkes af den nedbør, som tilføres fra luften, enten i form af regndråber eller som tåge. Nedbøren registreres vha. en regnmåler placeret på sydsiden af muren Muren, hvilken giver et mål for den tilgængelige mængde fugt. På grund af placeringen opsamler regnmåleren også en del vand, som drypper fra overdækningen, så målingerne ligger højere end den reelle nedbørsmængde. Dette er dog ikke nødvendigvis det samme som den mængde fugt, der ville blive optaget i Murens overflade, hvis den ikke var overdækket. Dette skyldes at basaltblokkenes vandoptagelse er meget langsom, hvorfor opsugningen primært foregår i fugerne samt revner eller huller mellem stenene. Hvis vandpåvirkningen overstiger den mængde, der kan opsuges, vil den overskydende del af regnen skylle ned af muren og løbe væk. Hertil kommer at dele af muren vil

ligge i læ og derfor ikke påvirkes af regnen. Omvendt vil der være perioder med kondensation, som ikke opfanges af en regnmåler.

Fugtpåvirkningen registreres vha. kondensfølere på den afdækkede og uafdækkede mur samt på muren bag den perforerede afdækning. Kondensfølerne måler den elektriske modstand på en plan overflade, som påvirkes af fugt (og salt). Visningen er relativ i intervallet 0 –10, hvor 0 er tør overflade og 10 er fuldt opfugtet. Når det regner vil følerne give fuldt udslag, hvilket ligeledes registreres af regnmåleren. Hvis det er tørvejrs og lufttemperaturen når dugpunktet, vil luftens fugtindhold kondensere og derved danne tåge. Tågen kan afsættes på Murens overflade som følge af luftens bevægelse, hvorved overfladen opfugtes. Den tilførte fugtmængde kan være lige så betydelig som ved slagregn, men regnmåleren vil ikke registrere dette. Herved kan man skelne mellem episoder med regn og tåge. Hvis overfladetemperaturen falder under dugpunktet vil der kunne dannes frit vand alene på grund af temperaturforskellen. Fænomenet kendes fra vinduer med enkelt lag glas, hvor der dannes dug om vinteren. Kondensfølerne er mere udsat for underafkøling end selve Murens overflade. Derfor benyttes overfladetemperaturen sammen med dugpunktet i udeluften til at vurdere kondensrisikoen på Murens overflade. Dugpunktet beregnes ud fra målinger af lufttemperatur og relativ luftfugtighed.

Hvis der afsættes salt på overfladefugtføleren, bliver fortolkningen lidt mere kompliceret. En tør saltbelægning på overfladen har ganske ringe elektrisk ledningsevne og giver derfor intet signal. Men salt har den særlige egenskab, at det påvirkes af luftens relative luftfugtighed. Den såkaldt hygroskopiske fugtoptagelse sker ved ca. 70% RF og bevirker, at der dannes en saltfilm. En saltopløsning har særdeles god elektrisk ledningsevne og derfor giver fuldt signal. Når fugtføleren er forurenset med salt kan der således forekomme fuldt udslag, som ikke skyldes hverken regn eller tåge eller kondens. Ved at beregne RF ved overfladen kan man afgøre, om fugtfølerens visning skyldes hygroskopisk fugtoptagelse. Omvendt kan man benytte den hygroskopiske fugtoptagelse til at påvise perioder med saltdeponering på overfladerne.

Parameter	Instrument	Sensor	Nøjagtighed
Overfladetemperatur	Termoelement CuCo	Spænding	+/- 0,2°C
Overfladefugt	237	Modstand	-
Nedbør	TE 525	-	+/- 1%
Lufttemperatur	Vaisala HMP45C	PT 100	+/- 0,3 (0-20°C)
Relativ luftfugtighed	Vaisala HMP45C	HUMICAP 180	+/- 2% (0-90%RF)
Datalogger	CR10X	-	-

Tabel 3.A . Instrumentering til klimamåling på Muren. Alle dele er leveret af Campbell Scientific Ltd. , dog ikke termoelementer

3.3 Resultater og fortolkning

Måleresultaterne er opdelt i udvalgte uger med én uges data i tre separate diagrammer. I figur 3.5 er vist temperaturforløbet i uge 38 med tre kurver svarende til de tre overflademålinger på murens ubeskyttede overflade (rød), bag afdækningen (blå) og bag gitteret (grøn). Muren påvirkes kraftigt, når solen skinner direkte på overfladen. De voldsomste temperaturskift ses i løbet af dag 267, hvor temperaturen (rød kurve) stiger 30° indenfor få timer og derefter falder tilbage til samme udgangspunkt på 10°C. I samme tidsrum stiger temperaturen på den afskærmede mur (blå kurve)

kun til ca. 15°C, og bag gitteret til ca. 20°C. Afdækningen har således en tydelig effekt på solindstrålingen. I samme diagram er vist luftens dugpunkt med gul kurve. Dugpunktet ligger under overfladetemperaturen det meste af ugen bortset fra natten mellem dag 165 og 166. I denne periode blev registeret kraftig nedbør som vist i det midterste diagram.

Det midterste diagram i figur 2.5 viser endvidere signalet fra de tre overfladefugtfølere med samme farvekode som temperaturfølerne. De første to dage registrerer regnmåleren mindre nedbørsmængder svarende til bygevejr. I denne periode giver fugtfølerne på den uafdækkede mur samt bag gitteret uregelmæssige udslag (rød og grøn), hvorimod føleren bag skærmen (blå) ikke aktiveres. Dette viser at skærmen beskytter muren mod direkte regnpåvirkning, medens gitteret tillader en vis regnmængde at passere. Idet bygevejret ophører tørrer den uafdækkede føler (rød) ud, medens føleren bag gitteret (grøn) oppebærer signalet. Dette kan ikke være regn, tåge eller kondens, men må skyldes, at der er deponeret salt på overfladen. I nederste diagram er vist den relative luftfugtighed på overfladerne, beregnet udfra overfladetemperaturen og dugpunktet. Det ses at RF omkring dag 265 er ca. 75 %, hvilket betyder, at saltet på fugtføleren vil være i opløsning og derfor give signal.

I slutningen af dag 265 begynder et kraftigt regnvejr, hvorved alle tre følere giver fuldt udslag. Det kan overraske, at føleren bag skærmen (blå kurve) også påvirkes. Dette skyldes imidlertid ikke direkte slagregn, men at dugpunktet som ovenfor nævnt samtidig tangerer overfladetemperaturen. Der er sandsynligvis opstået kondens, hvilket viser, at den afdækkede muroverflade godt blive fugtig, selvom den er beskyttet mod regnen. Idet regnvejret hører op tørrer overfladen ud på den uafdækkede mur og bag gitteret, men ikke bag skærmen! Faktisk holder den afdækkede føler signalet i flere dage efter regnvejret, ganske vist med faldende tendens. Først i slutningen af dag 269 tørrer overfladen ud, hvilket sker samtidig med et brat fald i RF ned under 70%. Dette indikerer at føleren påvirkes af RF og som følge deraf må være forurenset med salt. Den hygroskopiske opførsel er endnu mere tydelig på den uafdækkede føler (rød kurve) som svinger flere gange mellem høj og lav visning. Udsvingene er helt synkroner med variationerne i RF, som er ganske voldsomme på grund af solindstrålingens effekt. Fugtføleren bag gitteret viser mere afdæmpede udsving, fordi variationerne i RF er mindre som følge af den begrænsede solindstråling.

Målingerne fra den følgende uge 39 er gengivet i figurerne 3.6. I de første fem dage fortsætter fugtfølerne med at give udslag på variationer i RF. Den hygroskopiske respons fortolkes som tegn på, at overfladerne er påvirket af salt. Den ubeskyttede overflade har de største udsving, hvilket skyldes at RF her er mest ustabil. Overfladen bag skærmen har en mere konstant visning, fordi RF her er mest stabil. Men på den 6. dag (275) indtræffer et regnskyl, som vasker den ubeskyttede føler ren for salt, hvorved visningen falder til nul. De to andre fugtfølere fortsætter på en konstant værdi. Dagen efter (276) kommer atter et regnskyl, som kortvarigt sender alle følere i maksimum. Herefter falder også føleren bag gitteret til nul, hvilket tyder på at saltet ligeledes er vasket bort fra denne overflade.

Resultatet af 20 ugers måling hen over efteråret 2007 og vinteren 2008 er gengivet i figur 3.7, og tilsvarende er 16 ugers måling hen over sommeren 2008 vist i figur 3.8. I hvert diagram er vist overfladefugtmålerens udslag med priksignatur. Med blød kurve er vist den relative luftfugtighed ved overfladen beregnet som et løbende gennemsnit over 24 timer. Det øverste diagram viser forholdene bag den lukkede afskærmning (blå kurver). I det meste af perioden giver fugtføleren fuldt udslag, bortset fra enkelte episoder, hvor RF samtidig falder under 70%. Da denne føler er afskærmet mod nedbør kan den vedvarende høje værdi for overfladefugt kun hidrøre fra

hygroskopisk fugtoptagelse på grund af salt på overfladen. Den uafskærmede føler (røde kurver) varierer i hele perioden voldsomt mellem fuld visning og nul, hvilket uden tvivl skyldes at overfladen påvirkes af de mange episoder med nedbør, som vist i det nederste diagram. Overfladen bag gitteret (grøn kurve) har et mikroklima, som ligger mellem den afskærmede og uafskærmede overflade. Der er mange cykliske variationer i overfladefugten, men også perioder med mere stabil visning på højt eller lavt niveau. Dette kan fortolkes som en skiftevis indflydelse af nedbør og saltdeponering.

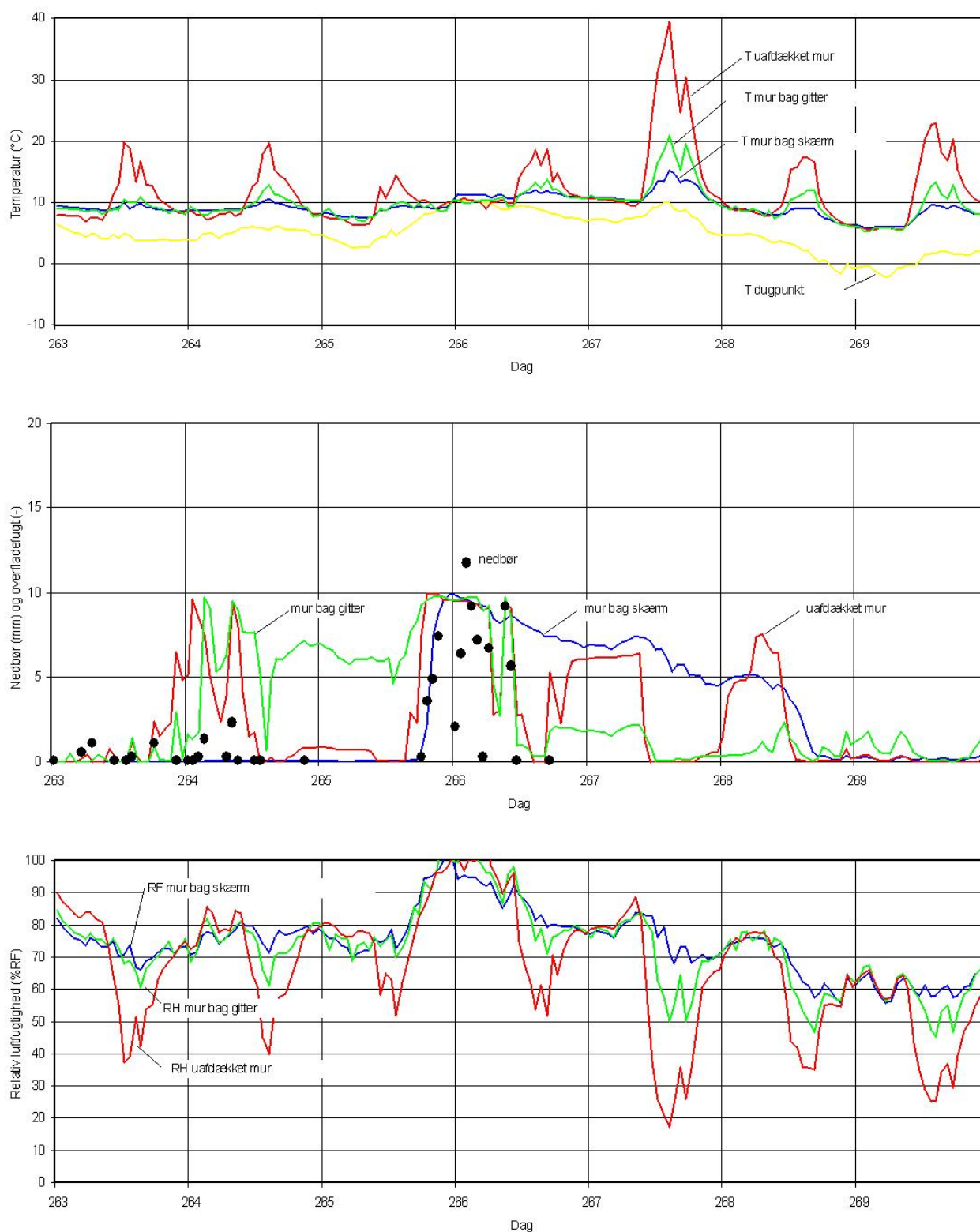
3.4. Konklusion

Fugtforholdene på Murens overflade påvirkes markant af afskærmningen. Den fuldt afskærmede overflade beskyttes effektivt mod nedbør, og den perforerede afdækning reducerer nedbøren væsentligt. Dette standser udvaskning af kalk fra mørtlen i både fugerne og murkernen og sikrer derved Murens konstruktive sammenhæng på længere sigt. Men skærmen forhindrer ikke saltdeponering, som hidrører fra luftbårne vanddråber fra havet, på overfladerne. Dette skyldes at havgusen har fri adgang bag beklædningen, hvorimod saltet ikke vaskes bort af nedbør. Der sker dog en vis afvaskning af overfladen bag den perforerede afdækning, men det er usikkert, om regnmængden er tilstrækkelig til en effektiv rengøring af overfladerne. Hvis regnmængden er begrænset, vaskes saltet ganske vist bort fra basaltblokkenes overflade, men opsuges i fugerne mellem blokkene. Salt er antagelig årsag til nedbrydning af både mørtelfuger og basalt og udgør et reelt bevaringsproblem.

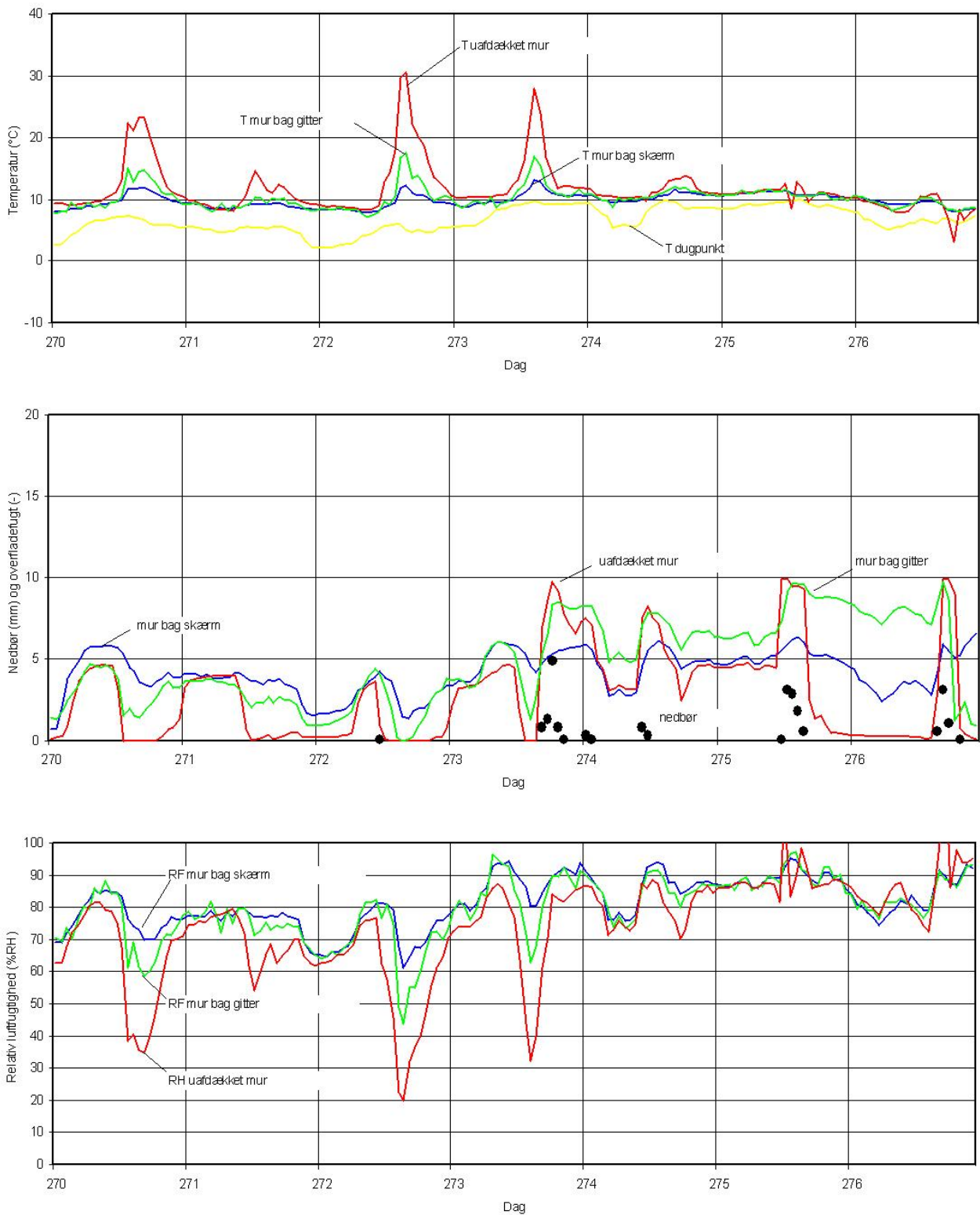
Temperaturforholdene på Murens overflade ændres væsentlig af begge typer afskærmning. Solindstrålingen på den fuldt afdækkede overflade elimineres, hvorved kortvarige temperaturstigninger i basaltblokkenes overflade undgås. Bag den perforerede afskærmning dæmpes sol påvirkningen, så temperaturstigningen på overfladen kun er ca. 30% af den uafdækkede overflade. Herved begrænses den fysiske belastning af Murens overflade som følge af termiske spændinger. Effekten er størst på de sydvendte overflader, mindre på de øst- eller vestvendte overflader, og den berører ikke de nordvendte overflader. Reduktion af solpåvirkningen dæmper også variationer i den relative luftfugtighed på Murens overflade. Herved reduceres antallet af episoder med salt-krystallisation og efterfølgende opløsning som følge af variationer i den relative luftfugtighed. Dette mindsker risikoen for saltbetinget nedbrydning af sten og fuger.

Frostbelastningen på muren påvirkes ikke væsentlig af afdækningerne. Episoder med frysepunktpassager forekommer sjældent og udgør ikke et betydeligt bevaringsproblem. Dette bekræftes af statistiske data, men forholdene kan naturligvis have været anderledes i tidligere perioder i Murens levetid. Tilsvarende kan frost på et senere tidspunkt blive et alvorligt problem i tilfælde af globale klimaændringer.

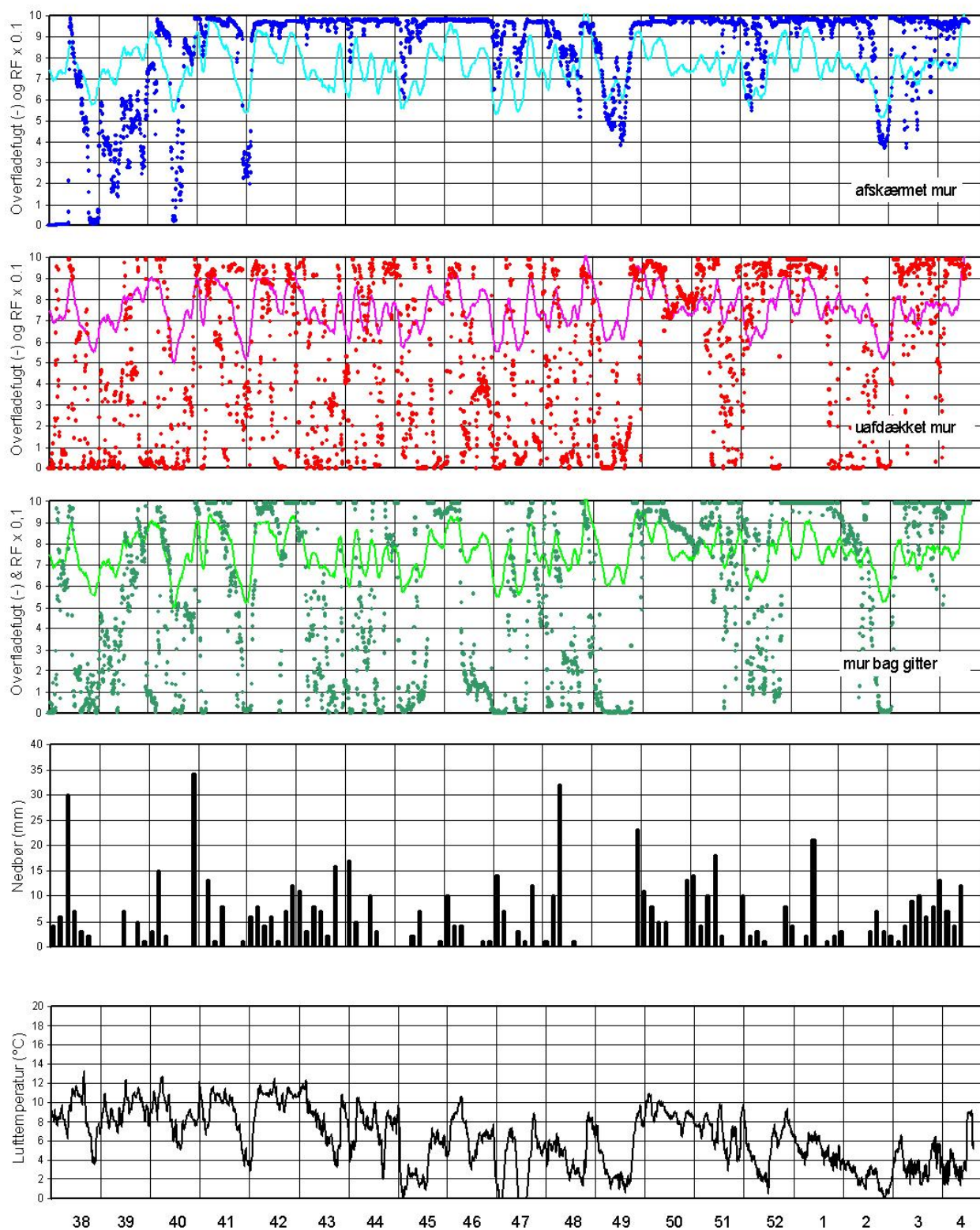
Den mikrobiologiske aktivitet på Murens overflade bliver sandsynligvis påvirket af afskærmningen. Den nuværende bestand af lav og licener kan næppe trives i halvmørket, og afløses formentlig af mindre lyskrævende arter. Det saltholdige miljø vil begrænse muligheden for visse arter, men fremme andre organismer, som bedre tåler saltet. Et eksempel herpå ses i kapellet, hvor en lyserød belægning har bredt sig foruden på murværket. Ændringer i Murens begroning er ikke dokumenteret i undersøgelsen, og de bevaringsmæssige konsekvenser er vanskelige at forudsige. Mikrobiologiens betydning for basaltens nedbrydning er ligeledes usikker.



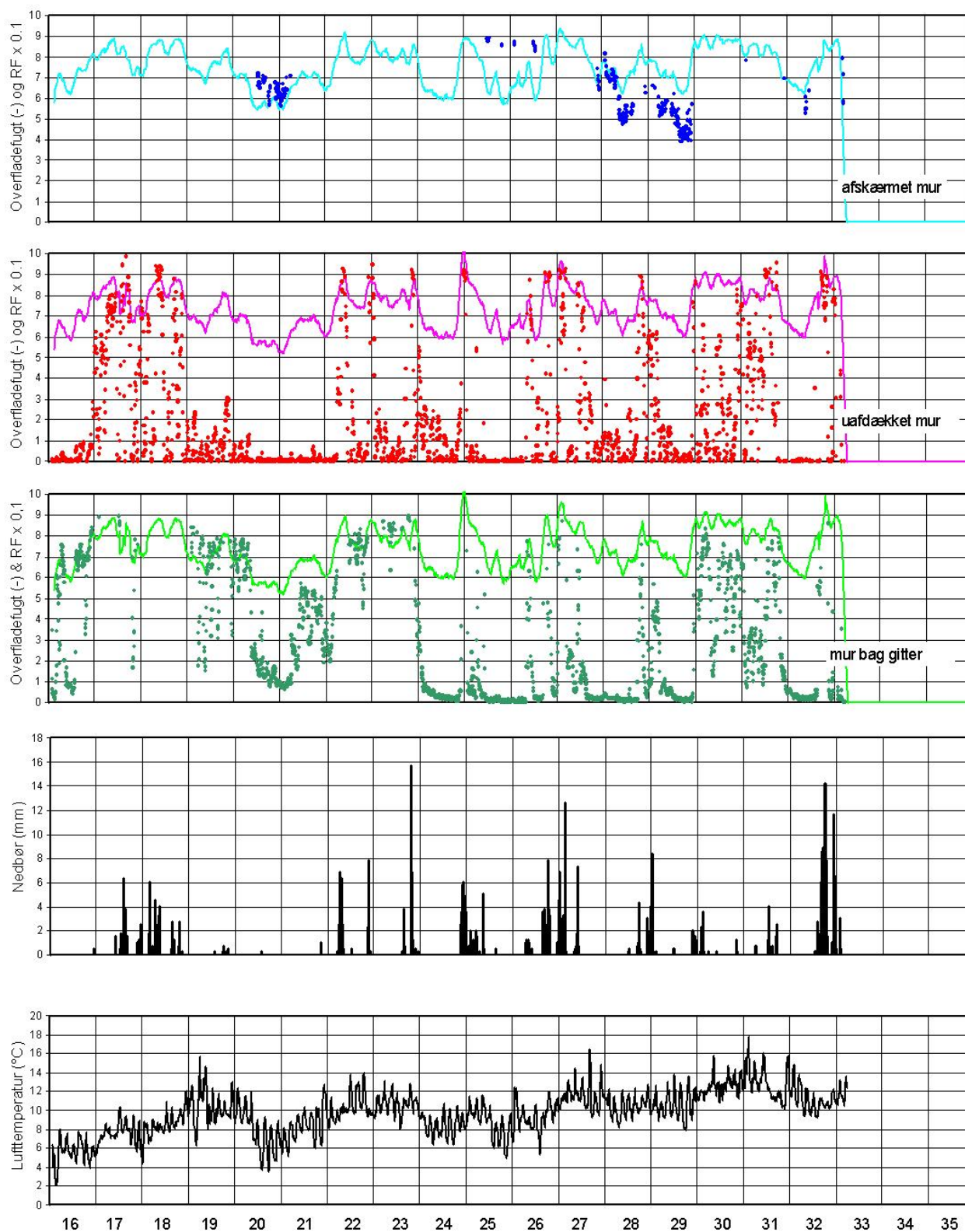
Figur 3.5 . Klimamåling fra uge 38, 2007. Øverste diagram viser overfladetemperatur på den uafdækkede mur (rød kurve), på den afskærmede mur (blå kurve) samt på muren bag den perforerede afdækning (grøn kurve). Dugpunktet i luften er beregnet ud fra målinger af lufttemperatur og relativ luftfugtighed (gul kurve). Midterste diagram viser overfladefugt på de tre positioner med samme farvesignaturer. Nedbør er vist med sort priksignatur. Nederste diagram viser relativ luftfugtighed beregnet ud fra dugpunkt og overfladetemperaturer.



Figur 3.6 . Klimamåling fra uge 39, 2007. Øverste diagram viser overfladetemperatur på den uafdækkede mur (rød kurve), på den afskærmede mur (blå kurve) samt på muren bag den perforerede afdækning (grøn kurve). Dugpunktet i luften er beregnet ud fra målinger af lufttemperatur og relativ luftfugtighed (gul kurve). Midterste diagram viser overflademøgt på de tre positioner med samme farvesignaturer. Nedbør er vist med sort priksignatur. Nederste diagram viser relativ luftfugtighed beregnet ud fra dugpunkt og overfladetemperaturer.



Figur 3.7 . Klimamåling over 20 uger fra 19. september 2007 til 28. januar 2008. Relativ luftfugtighed og overfladefugt på den afskærmede mur (blå kurve), på den uafdækkede mur (rød kurve) samt på muren bag den perforerede afdækning (grøn kurve). De to nederste diagrammer viser nedbøren og lufttemperaturen i samme periode.



Figur 3.8 . Klimamåling over 16 uger fra 14. april 2008 til 16. august 2008. Relativ luftfugtighed og overfladefugt på den afskærmede mur (blå kurve), på den uafdækkede mur (rød kurve) samt på muren bag den perforerede afdækning (grøn kurve). De to nederste diagrammer viser nedbøren og lufttemperaturen i samme periode.

4. Bevaringsstrategi

Klimaundersøgelsen illustrerer at Murens overflader på kort tid gennemgår en kompliceret sekvens af fugtpåvirkning, solindstråling, saltdeponering og hygroskopisk respons på disse påvirkninger. Målingerne er foretaget på Murens sydside, som er stærkt eksponeret for alle klimapåvirkninger, så resultaterne kan ikke direkte overføres til alle dele af monumentet. Men der kan udledes en række generelle betragtninger om miljøpåvirkningens betydning for Murens bevaring. De vigtigste nedbrydningsfaktorer vurderes at være nedbør og saltdeponering. Saltet påvirker både basalt og mørtelfuger, idet krystaldannelsen nedbryder materialernes struktur. Regnen har både positive og negative effekter. På den ene side sørger regnen for jævnlig afvaskning af salt fra overfladerne, men samtidig sker der en udvaskning af kalk fra mørtlen og visse mineraler fra basalten. Solindstråling spiller også en rolle på de berørte overflader, fordi temperaturen påvirker RF, som igen bestemmer saltets krystaldannelse. Frostbelastningen vurderes i dag at være ringe, men kan i nogle perioder have spillet en større rolle.

Undersøgelserne dokumenterer at nedbrydningen af Murens sten og fuger overvejende skyldes den naturlige miljøpåvirkning. Men selvom nogle dele af murværk og dekorationer i dag er i dårlig stand, kan man ikke heraf slutte, at monumentet som helhed ikke tåler det færøske klima. Tværtimod har Muren klaret sig udmærket, i betragtning af at den har stået ubeskyttet i et meget langt tidsrum. Der er heller ingen dokumentation for at nedbrydningshastigheden er accelereret inden for de sidste 50 eller 100 år. Der er derfor ingen grund til at iværksætte særlige foranstaltninger for at sikre Murens bevaring på lang sigt. Det er ekspertgruppens samlede anbefaling at bevaringsindsatsen bør rettes mod at vedligeholde Muren på traditionel vis. Ved denne metode bevares monumentet i våd tilstand, og der accepteres en kontrolleret nedbrydning af overfladerne.



Figur 5.1. Eksempel på 'soft capping' af murkrone som beskyttelse mod nedrivende regnvand. Kilde English Heritage.



Figur 5.2. Eksempel på restaurering af fuger på nordsiden af Muren. Mørtlen er baseret på hydraulisk kalk fra St. Astier.

Det igangværende pilotprojekt vedrørende fugernes istandsættelse skal afsluttes med en instruktiv beskrivelse af arbejdsgangen og de anvendte materialer. Metoder til fastlægning af afspaltede overflader på basaltblokkene skal afprøves og beskrives. Herefter igangsættes et egentligt

restaureringsprojekt. Der skal udarbejdes en oversigt over restaureringsbehovet på de enkelte dele af Muren, og udformes en realistisk tidsplan og tilhørende budget. Behovet for istandsættelse er stærkt varierende på de enkelte facader, og der må påregnes en vis usikkerhed mht. opgavens omfang. Arbejdet på de afdækkede overflader kan ikke prissættes før beklædningen er fjernet. De stærkt nedbrudte partier på den nordlige del af Muren skal istandsættes først, herefter vestgavlen, sydfacaden og østgavlen. På sakristiet er fugerne generelt i rimelig stand, og denne del af Muren kan derfor istandsættes til sidst. Arbejdet må forventes at strække sig over adskillige år.

En vigtig opgave består i at opkvalificere lokal arbejdskraft til at varetage restaurering og efterfølgende vedligeholdelse. Det vil være naturligt at involvere en lokal murer i det fortsatte arbejde, som herefter gradvis overtager ansvaret for Murens bevaring.

Den midlertidige overdækning kan fjernes i takt med, at restaureringen skrider frem. Samtidig nedtages resterne af den betonafdækning, som stadig ligger ovenpå murkronen. Betonpladen blev skåret i mindre dele i forbindelse med opsætning af skærmen, og kan formentlig nedtages uden større vanskeligheder. Murkroner, hvælvlommer og andre vandrette bygningsdele skal herefter beskyttes mod nedsivende vand ved såkaldt 'soft capping'. En blød afdækning består af en vandtæt membran af ler (bentonit), som beskyttes af et lag græstørv. Metoden har været anvendt på de Britiske Øer i mange år, og virkningen er dokumenteret af English Heritage i et forsøgsprojekt, som afsluttes i 2008 (C).

5. Referencer

5.1 Rapporter og notater vedrørende Muren

- I) Vedrørende Domkirkeruinen i Kirkjubø, Færøerne. Notat 1985, Sverri Dahl, forhv. Landsantikvar.
- II) Domkirkeruinen i Kirkjubøur. Tidligere restaureringer, nuværende tilstand og almen beskrivelse af kommende istandsættelsesarbejder. 1985. Curt v. Jessen
- III) Foreløbig rapport over undersøgelse af bevaringstilstanden af flade kvadre på Kirkjubøur Domkirkeruin, sydvæggen. Rapport Teknologisk Institut september 1989. M. Brandt Petersen, Damsager Madsen, Helge Brinch Madsen.
- IV) Domkirkeruinen i Kirkjubøur, Notat 12.09.1990. Søren Abrahamsen
- V) Foreløbig rapport over undersøgelse af bevaringstilstanden af flade kvadre på Kirkjubøur Domkirkeruin, Vestvæggen og Nordvæggen. Rapport Teknologisk Institut 26.03 1991. Helge Brinch Madsen.
- VI) Kirkjubøur Múrurín. Foreløbig rapport over sommerens arbejder, 10. juli 1991. Bent Eshøj og Helge Brinch Madsen. Konservatorskolen i København.
- VII) Kirkjubøur Múrurín. Rapport over udførte arbejder, ? 1992. Bent Eshøj og Tim Padfield. Konservatorskolen i København.
- VIII) Undersøgelse af mørtelprøve. Notat marts 1998. Jørn Bredal-Jørgensen. Konservatorskolen i København.
- IX) Undersøgelse af saltes nedbrydning af natursten, Bachelorprojekt DTU, Juni 2008. Ricardo Antonio Barbosa og Sidsel Juhlin
- X) De gamle bruken i Domkyrkoruinen i Kirkjubøur m.fl. medeltida byggnadar på Färöarna. Resultat af bruksundersøgning. Rapport, maj 2008. Byggkonsult Sölve Johansson AB.
- XI) Domruinen i Kirkjubøur – restaureringsmørtel. Maj 2008. Thorborg von Konow, Tureida.
- XII) Sammenlignende undersøgelse af hydrauliske bindemidler. Bachelorprojekt DTU, Januar 2008. Mette Tranberg Werchmeister & Trine Maaholm Kræmer.
- XIII) Fugt og saltmåling i Kirkjubøur – status. Notat august 2005, Poul Klenz Larsen, Nationalmuseets Bevaringsafdeling
- XIV) Hydrauliske kalktyper i medeltida byggnader. Foredrag, juni 2007. Sölve Johansson

XV) Rapport vedrørende klimaundersøgelser på Muren. Poul Klenz Larsen, Nationalmuseets Bevaringsafdeling. Ruinseminar 2007, Færøerne 17. - 21. September 2007. Indlæg fra seminaret. Símun V. Arge & Andras Mortensen red. Føroya Fornminnisavni 2008"

5.2 Supplerende litteratur

A) A photographic atlas of rock breakdown features in geomorphic environments. Mary C. Bourke & Heather Viles (editors). Copyright 2007 by Planetary Science Institution, Tucson, Arizona, USA

B) Preparation and use of lime mortars. Technical note 1. Pat Gibbons, Historic Scotland, 1995.

C) Soft Wall Capping: Development of protection of ruined masonry walls by capping with soil and turfs: Technical Advice Note. English Heritage 2008 (under udarbejdelse).

5.3 Ekspertgruppe

Thorborg von Konow
Restaurerings konsulent,
Tureida
Uudisraivaajantie 17
FIN 00730 Helsinki
Finland
358-9-346 3702
thorborg@tureida.com
www.tureida.com

Sølve Johansson
Restaureringsarkitekt
Batterivägen 12
SE-461 38 TROLLHÄTTAN
Sverige
0520-42 60 93
solve@bksjab.se
www.bksjab.se

Tim Padfield
Conservation Scientist,
May Cottage, Old Road
Harbertonford
Devon
TQ9 7TA
England.
tim@padfield.dk
www.padfield.org

Mette Marciniak
Arkitekt, stenhugger
Slots- og Ejendomsstyrelsen
Løngangsstræde 21
1468 København K
33926368
mem@ses.dk
www.ses.dk

Martin V. Heinesen
Geolog
Jardfeingi
Brekktún 1
P.O Box 3059
FO-110 Tórshavn
+298 35 70 00

martin.v.heinesen@jardfeingi.fo
www.jardfeingi.fo

Poul Klenz Larsen
Bygningsingeniør
Nationalmuseets Bevaringsafdeling
Brede, DK-2800 Lyngby
++45 33 47 35 33
poul.klenz.larsen@natmus.dk
www.natmus.dk

