
NILU
OPPDRAGSRAPPORT NR 40/83
REFERANSE: O-8068
DATO:SEPTEMBER 1983

FORVITRING AV STEIN OG MULIG EFFEKT
AV LUFTFORURENSNINGER

AV

J.F.HENRIKSEN, S.E.HAAGENRUD
OG O. ANDA

NORSK INSTITUTT FOR LUFTFORSKNING
POSTBOKS 130, 2001 LILLESTRØM
NORGE

ISBN-82-7247-403-4

SAMMENDRAG

Forvitring av kalkholdig stein er et internasjonalt problem av stor kulturhistorisk betydning. En internasjonal undersøkelse ble startet i 1981 for å få større klarhet over dose/effekt-sammenhengen mellom steinforvitringen og $\text{SO}_2/\text{SO}_4^{2-}$ i forurenset luft. I tillegg til den internasjonale undersøkelsen ble det eksponert en del norske steintyper på to feltstasjoner i Oslo og Bergen.

Denne rapporten omhandler de norske steintypene og de konklusjoner en kan trekke før målingene fra det internasjonale programmet er tilgjengelig. Undersøkelsen viser at det er en betydelig SO_2 effekt ved steinforvitring av kalkholdig stein. Dette gjelder både rene kalksteiner og omformede typer med kalkholdige elementer. Andre effekter som betyr mye er avvaskingsforholdene på våte flater og sprekkdannelse på grunn av svelling på skjermede deler.

INNHALDSFORTEGNELSE

	Side
SAMMENDRAG	3
1 INNLEDNING	7
2 BAKGRUNN	8
2.1 Forvitring av stein	8
2.2 Luftforurensningenes effekt	9
2.3 Overflatebehandling	10
3 BESKRIVELSE AV FORSØKET	11
4 RESULTATER	13
5 DISKUSJON	13
5.1 Miljø	13
5.2 Forurensninger	14
6 KONKLUSJONER	17
7 REFERANSER	18

FORVITRING AV STEIN OG MULIG EFFEKT
AV LUFTFORURENSNINGER

1 INNLEDNING

"Committee on the Challenges of Modern Society" (CCMS) innen NATO, startet i 1979 et arbeid under tittelen "Bevaring/Restaurering av minnesmerker". Som et delprosjekt under dette arbeid ble det på vest-tysk initiativ i 1980 startet et måleprogram som andre nasjoner ble invitert til å delta i. Undersøkelsen besto av en felles eksponering av to ulike tyske steintyper, med samtidig måling av svoveldioksyd på en fuktet overflate med et IRMA-apparat. Apparatet og steinene montert på karuseller ble levert av Vest-Tyskland mens valg av eksponeringssted og drift av stasjonene skulle deltakerlandene stå for (se figur 1).

Med bakgrunn i NILUs arbeid med måling av luftforurensningers effekt på materialer og tidligere arbeid blant annet på Nidarosdomen (1), tok NILU et initiativ til at Norge skulle delta i prosjektet.

Riksantikvaren viste fra starten av stor interesse for prosjektet. Med bidrag fra Riksantikvaren og Det kongelige miljøverndepartement ble det mulig for Norge å delta i prosjektet. Prosjektet startet høsten 1980 på tilsammen 23 prøvesteder i 8 land: Storbritannia, Nederland, Sverige, Norge, Frankrike, Italia, Hellas og USA. I tillegg ble 5 stasjoner i det tyske prøveprogrammet inkorporert i programmet. Eksponeringene skulle opprinnelig vare i et år, men det ble tidlig i prosjektfasen besluttet å forlenge det med et år.

I Norge ble det valgt å legge undersøkelsen til Bergen i området ved Maria-kirken ved Tyskebryggen. I tillegg til det internasjonale programmet, ble det startet et norsk eksponeringsprogram med norske steintyper. Foruten stasjonen i Bergen, ble det også satt

opp prøver nær Gamle Aker kirke i Oslo.

Denne rapporten omhandler kun den norske del av prosjektet og en sammenligning med den internasjonale delen vil først utføres når resultatene foreligger i begynnelsen av 1984.

2 BAKGRUNN

2.1 Forvitring av stein

Stein deles gjerne i tre ulike grupper eller dannelsesmåter:

- 1) Avsetningsbergarter som kalkstein og sandstein
- 2) Vulkanske bergarter som granitt og basalt.
- 3) Omformede bergarter som marmor, skifer og kleberstein.

Innenfor hver av disse gruppene er det stor spredning i de fysiske og kjemiske egenskapene til steinene (2). Dette fører til svært ulik motstandsevne mot ytre påvirkninger. I tidligere tider var det ofte de tekniske muligheter til bryting og transport av bygningsstein som var avgjørende for valg av de steintypene som ble brukt i byggverk. De minst bestandige steintypene var ofte de som lettest kunne utvinnes. Problemet med steinforvitring er derfor gjerne større ved bevaring av gamle fortidsminner enn ved bevaring av mer moderne fasade og bygningsstein.

Den viktigste egenskapen for vurdering av steinforvitring vil for all utendørs bruk i Norge være steintypens porøsitet og muligheter for vanninntrengning. Dette kommer av at vann både som vann og is er den substans som påvirker forvitringen mest. Frostsprengning er den mest kjente forvitringsform i Norge, men saltkrystallisering i porene kan i enkelte tilfeller være like viktig.

Avleiringsbergarter er dessuten ofte lagdelte. Vanns mulighet til å nedbryte steinblokkene blir derfor avhengig av den orienteringen som steinen har i bygget i forhold til steinens sprekkretninger. Siden det ikke har vært vanlig å ta hensyn til dette ved byggingen

av eldre bygninger, kan dette medføre stor skilnad i de ulike steinblokkenes bestandighet.

Termiske påvirkninger er regnet som den nest viktigste forvittringsform. Termiske spenninger oppstår selv om en ikke kan se noen forandringer i volumet ved temperaturforandringer. Det er i mikroporer og i korngrenser en får belastningene og økt fare for sprekkdannelse.

Erosjon og mekaniske belastninger på grunn av setninger i grunnen er andre nedbrytningsårsaker.

Forurensningenes plass i dette bilde av forvittringsformer har ofte vært uklar og det har ofte vært reist tvil om betydningen av forurensninger i denne sammenheng.

2.2 Luftforurensningenes effekt

Luftforurensningenes innvirkning på steinforvitring vil åpenbart variere fra steintype til steintype. Det er spesielt sure luftforurensninger som SO_2 , NO_2 , HNO_3 og HCl som har vært mest diskutert og da spesielt i forbindelse med kalkholdig stein som kalkstein, marmor og enkelte sandsteinstyper.

Enkelte steder i Europa, som Athen og Roma, har en uten videre koblet den økte forvitringen på gamle bygninger og statuer sammen med den økte luftforurensningen av SO_2 . Imidlertid har det vært utført få undersøkelser for å klargjøre årsakssammenhengen mellom SO_2 -nivået og forvittringsgraden.

I Vest-Tyskland har dr Luckat i de senere år rapportert om forvitring av kalkholdig sandstein i ulike deler av Tyskland. I disse undersøkelsene er også de viktigste forurensningsparametrene som SO_2 målt. Resultatene viser at en har en sammenheng mellom økt forvitring og økt SO_2 -forurensning på prøvestasjonene (3), figur 1. En mindre undersøkelse i Sverige (4) har vist sterk økning av forvitringen i indre deler av Stockholm (Riddarhuset)

sammenlignet med samme steintype i landlig atmosfære utenfor Stockholm (Floda kirke).

Det er alment akseptert at svovelsyring og svovelsyre som dannes fra luftens SO_2 vil øke forvitringen ved å omdanne kalsiumkarbonat til kalsiumsulfat (gips). Dette øker nedbrytningen siden kalsiumsulfat vaskes betydelig lettere bort med regnvann.



Videre vil omdannelsen øke sprekkdannelsen i steinen siden gips har større volum enn kalsiumkarbonat.

2.3 Overflatebehandling

En naturlig måte å beskytte stein mot videre forvitring samt å binde sammen delvis forvitrede områder av overflaten er å overflatebehandle steinen. Overflatebehandling skal i motsetning til maling helst trenge ned i steinen og tette og omdanne steinen i dybden. I dag er de fire vanligste hovedgrupper med overflateaktive stoffer beregnet for stein: uorganiske materialer, alkoksylsilaner, organiske polymerer og voks (5).

Blant de uorganiske materialene er det silikatbehandling med alkalisilikater som har vært mest benyttet. Et hovedproblem har imidlertid vært at reaksjonen går relativt raskt slik at det ofte dannes en tynn hard skorpe som flasser av. Overflatebehandling med hydroksyder av kalsium, strontium og barium er en annen uorganisk metode som er brukt med hell på freskomalerier i Italia. På steinbygninger har den ikke vært anvendt på grunn av liten inntrengningsdybde. Nye metoder med utfelling fra homogene løsninger gjør denne metoden mer interessant i fremtiden.

Alkoksylsilan blir av mange betraktet som den mest lovende metoden i dag. Hovedgrunnen er at alkoksylsilan kan trenge dypt inn i steinen og at inntrengingen kan reguleres ved tilsetninger. Tre alkoksylsilaner er vanlig i bruk: tetraetoksylsilan, trietoksylsilan og metylsilan og trimeloksylmetylsilan. Videre er det brukt enkelte

mer typiske vannavstøtende typer som siliconester og siliconer. Dette er stoffer som er delvis eller fullt polymerisert når de tilsettes overflaten.

Blandt de organiske polymerer finner en brukt både termoplast og herdeplaster. For plastene er det igjen inntrengningsdybden som er det største problemet. Et annet problem er å få plastbelagt stein til å likne en ubehandlet stein spesielt når den er våt.

Voks er den beskyttelsen som en har lengst erfaring med og erfaringene på mindre monumenter har tildels vært gode. Voks er imidlertid bløt og vil derfor lett samle opp støv og sot og dels vil etter hvert gi monumentet en seig skitten hinne.

En kan derfor konkludere med at en ennå ikke har funnet det ideelle midlet for overflatebehandling av stein og at steintypenes egne fysiske og kjemiske egenskaper spiller en vesentlig rolle for nytten av behandlingen. En må derfor alltid utføre egen utprøving av overflatebehandling på den aktuelle steintypen før en går til et større restaureringsarbeid.

3 BESKRIVELSE AV FORSØKET

Den internasjonale delen av forsøket er planlagt av Vest-Tyskland og består av eksponering av to steintyper som en fra tidligere vet er følsom overfor sure forurensninger. Steintypene er:

kalkstein fra Krensheim
sandstein fra Baumberg

Steinprøvene, som er ca 50x50x3 mm, ble montert med en skrue gjennom midten av steinen, på to karuseller og eksponert på et frittstående stativ, figur 2. På hvert stativ var det 5 prøver av hver steintype. Den ene karusellen ble plassert fritt eksponert for regn på toppen av stativet, den andre sto under tak, men fritt eksponert mot luft. Under andre tak sto IRMA-apparatet for forureningsbestemmelsene. Apparatet måler avsatt mengde

av SO_2 og klorid i $\text{mg m}^{-2}\text{d}^{-1}$. Deponeringen skjer på en våt papphylse som stadig har en fersk elektrolytt ved at elektrolytten pumpes fra reservoaret til pappflaten og tilbake til reservoaret. Resultatene vil først bli ferdige i 1984.

Forvitringen av steinene måles ved vekttap og ved forandring i sulfatmengde i steinen. For å få en sammenligning med metallkorrosjon på de ulike forsøksstedene ble det etter norsk forslag inkludert prøveplater av stål og sink på prøvestasjonene i Nederland, Sverige og Norge. Prøvestasjonene i prosjektet er listet i tabell 1.

I Norge som i en rekke av de andre deltakerlandene, ble det startet supplerende målinger, spesielt med tanke på nevnte forvitningsproblemer. Ved siden av studier om forvitring av norske steintyper, var NILU interessert i å sammenligne den tyske deponeringsmetoden for luftforurensninger med NILUs metoder for forurensningsmålinger. På begge prøvestasjonene ble SO_2 -mengden i luften også målt i $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Det ble valgt ut to norske prøvestasjoner:

1. Bryggen Museum i Bergen (ved Mariakirken, bygd i kleberstein)
2. Statens teknologiske institutt i Oslo (nær Gamle Aker kirke, bygd i kalkstein)

Til Bergen ble det valgt ut steintyper som har vært brukt som bygningsstein på Vestlandet og stein fra helleristningsområder. I tillegg ble det satt ut 5 kalkstein fra Oslo som en norsk referanse. Totalt ble det satt ut 20 steinprøver i tillegg til de 20 prøvene i det internasjonale prosjektet. Tabell 2 gir en oversikt over steintypene.

Til Oslo ble det valgt to kalksteinsforekomster, en fra Oslo og en fra Hamar. I tillegg ble det laget til steinprøver med ulike overflatebehandlinger på kantflatene, samt noen mørtelprøver. Kleberstein fra Bergen ble også tatt med som en referansestein mellom stasjonene. Totalt ble det satt ut 40 steinprøver i Oslo, se tabell 2. Overflatebehandlingen er beskrevet i tabell 3.

Etter eksponeringen ble vekttapet til prøvene bestemt. Deretter ble en del av hver prøve knust i morter og vasket ut i 20 ml destillert vann og analysert for sulfat. Resten av prøven ble lagret med tanke på senere undersøkelser.

4 RESULTATER

Tabell 4 og 5 viser vekttapene på steinprøvene i henholdsvis Bergen og Oslo, sammen med analysene av sulfat og kloridinnholdet i steinprøvene. Tabell 6 viser forurensningsnivåene i de ulike kvartalene i Oslo og Bergen og resultatene fra to nærliggende stasjoner i det statlige overvåkingsprogram. Figur 3 og 4 viser variasjonene i SO₂-nivået på stasjonene under eksponeringsperioden.

5 DISKUSJON

5.1 Miljø

Foruten forurensningsnivå kan klimaparametere som temperatur, fuktighet, nedbør og vind påvirke forvitningsforholdene. Ut fra Det norske meteorologiske institutts klimatologiske månedsoversikter i perioden, finner en at midlere temperatur er høyest i Oslo i sommermånedene, mens resten av året er Bergen mildest. Det er spesielt mulighetene for frostsprengning som er av interesse. Temperatur under null har en i 7 måneder i Oslo, mens Bergen stort sett har 3 måneder. Faren for frostdannelse burde derfor være størst i Oslo. Imidlertid er det temperatursvingninger som gir smelting og frysing med utvidelse av sprekke som er farligst. Temperaturen hvor dette skjer er usikker, men er normalt godt under 0°C. Dessuten vil frysepunktet variere med en rekke parametre som sprekkestørrelsen, trykk og saltmengden i vannet. Vintermånedene i Oslo med konstant lav temperatur behøver derfor ikke å være spesielt skadelig for steinmaterialene. I de meteorologiske månedsoversiktene finner en dager med minimum under 0°C og maksimum under 0°C. Ut fra disse målingene er frostmulighetene i byene betydelig mer like selv om Oslo fremdeles får de fleste problemdagene.

En annen faktor er utvasking av stein med nedbør. Her er nedbørmengdene i Bergen betydelig større enn i Oslo og faren for utvasking også større. Surheten i nedbøren er imidlertid ikke blitt registrert. Dette kan forskyve bildet, da både surheten i regnet og SO₂-nivået er størst i Oslo. Totalmengden av langtransportert svovel er likevel størst i Bergen på grunn av den store nedbørmengden.

Erosjon på grunn av vind kombinert med regn, støv osv. bør ha størst virkning i Bergen, som har størst midlere vindhastighet i hele perioden.

5.2 Forurensninger

Forurensningsnivåene i Oslo og Bergen viser en typisk sesongvariasjon på grunn av fyring, med lave sommerverdier og høye vinterverdier for svoveldioksyd og sulfat.

Det synes å ha blitt en betydelig bedring i miljøet rundt prøve-stasjonen i Bergen i løpet av perioden. Den mest betydelige forandringen i området har vært fullføringen av SAS-hotellet foran Bryggen museum som gir bedre skjerming mot sentrum av byen. Om dette har noen sammenheng med det reduserte nivået for svoveldioksid og sulfat er ikke klarlagt. Kloridnivået som aerosoler er lavt og jevnt for begge stasjonene. Klorid i nedbøren er ikke målt i perioden, men er erfaringsmessig større i Bergen enn i Oslo.

Steinprøvene

For de mest homogene steintypene som ble utprøvd var det meget god reproducerbarhet mellom vektapparasjellene. For prøvene fra Vingen, Vangdal, Ausevik og Leirvåg er resultatet mer usikkert. Det er eksponert færre paralleller og spredningene betydelig større. Den grønne skiferen fra Vangdal som inneholder en del inneslutninger av kalk har nesten like stort vektapparasjell som kalkstein og markert større enn glimmerskiferen fra Ausevik. Det er imidlertid stor spredning på parallellene fra glimmerskiferen fra Ausevik og en

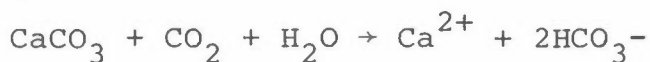
burde sannsynligvis vente også vente stor spredning ved et større prøveutvalg av den grønnlige skiferen fra Vangdal.

Granittprøvene fra Leirvåg har den største spredningen mellom parallellene, men det er spesielt prøve LGR-3 som skiller seg ut.

Generelt synes det som det er karbonatholdig stein som har de største vekttapene både i Oslo og i Bergen. Kleberstein synes ikke å være mer utsatt for forvitring enn de andre vestlandsprøvene og tilnærmet en faktor 6 mindre enn kalkstein fra Oslo på begge prøvesteder.

Sulfatinnholdet i steinen er relativt jevnt for samtlige steinprøver av samme materiale, når eksponeringen er lik. For de steintypene som en har hatt ueksponert materiale fra, finner en at svovelinnholdet har økt i perioden. Det er spesielt interessant å se på eksponeringen av kalkstein fra Hamar og Oslo, siden en i Oslo har hatt prøver både over og under tak av disse steinforekomstene. Sulfatinnholdet i steinene under tak er betydelig høyere enn over. Tilsvarende forskjeller finner en også for klorid, men nivået er lavere.

Kalkstein vil ha en naturlig forvitring i luft i kombinasjon med vann og karbondioksid.



I forurenset luft vil en i tillegg få en omdannelse av kalsiumkarbonat til gips. Dette vil medføre en vektøkning og svelling siden gipsmolekylet er tyngre og større enn karbonatmolekylet. Gips er imidlertid lettere løselig i vann og vil på regnvåte flater vaskes ut. Under tak vil mye bli akkumulert og nedbrytingen skjer ved periodisk avflaking. Den totale forvitring kan derfor skjematisk beskrives ved følgende formel:

Total forvitring = CO_2 forvitring + gipsdannelse.

Ved å bruke vekttap som et mål for den totale forvitring innfører en derfor en usikkerhet.

Målt vekttap = utvasking av CaCO_3 + utvasking av gips + avflaking - vektøkning av gips.

At gipsdannelsen har stor betydning for m-leresultatene ser en av forskjellen mellom steinprøvene over og under tak. Ved bare å bruke vekttap som et mål for forvitringen kan en derfor lett undervurdere problemene. Andre metoder som bestemmelse av økt sulfatinnhold i steinen og lignende er derfor like vesentlig.

I henhold til tidligere undersøkelser i Vest-Tyskland (3) på fritt eksponerte steinprøver så har en sett en markert økning i vekttapet med økende SO_2 -belastning, figur 2. Sammenligner en SO_2 -målingene i Bergen og Oslo, ser en at belastningen er størst i Oslo, men vekttapet er størst i Bergen. En finner samme tendens for begge steintypene, kalkstein og kleberstein, som er eksponert på begge stasjonene. Selv om vi mener at SO_2 -belastningene er viktig for forvitring av kalkstein, så viser sammenligningen med Bergen at flere faktorer spiller inn. Den mest nærliggende faktoren er regnmengden og vind. I Bergen har det regnet ca 3 ganger så mye som i Oslo, og utvaskingen synes også å være bedre, siden sulfatinnholdet i steinen også er lavere i Bergen. Om det bare er regnmengden som er av betydning, og ikke surheten, er mer usikkert. Regnvannet er normalt noe surere i Oslo enn i Bergen, men den totale mengden med sur nedbør blir størst i Bergen. En nærmere undersøkelse av dette er mulig som separat undersøkelse i klimaanlegg.

Overflatebelegg

Undersøkelser av ulike kalkmørteltyper på steiner plassert på en karusell har ikke vært helt heldig. Den mekaniske erosjonen er åpenbart større for mørtel enn for de andre prøvene. Middelaldermørtelen har det desidert høyeste vekttapet, men monteringen av prøvene med skrue og bolt i midten av prøven er spesielt uheldig for et bløtt materiale som mørtel. Vekttap og sulfatinnholdmålingene synes likevel å vise at vekttapet er uavhengig av blandingsforholdet kalk/sand.

For de overflatebehandlede kalksteinstypene er resultatene også nedslående. Det er bare kanten av prøvene som er eksponert, så en

skulle ikke forvente noen vesentlig endring i vekttapene fra ubehandlet stein og det har vi heller ikke fått. Den mikroskopiske undersøkelse (vedlegg 1) viser imidlertid at de behandlede overflatene er sterkt forvitret for alle de utprøvde typene. De typene som på enkelte flater har rester av belegget, viser at det visuelle inntrykket er vesentlig forskjellig fra naturlig stein og ingen av prøvene er gode på alle flatene. Som et aktivt beskyttelsesmiddel for steinkonstruksjoner synes derfor ingen av systemene å gi tilstrekkelig beskyttelse over tid.

6 KONKLUSJONER

Ved en oppsummering av resultater må en ta hensyn til at en videre databehandling av forurensningsdata, klimadata og vekttap fra det internasjonale prosjektet vil kunne gi sterkere indikasjoner enn det er mulig å få på det nåværende tidspunkt. Følgende hovedpunkter synes imidlertid å være relativt klare:

1. Forvittringshastigheten til karbonatholdige steinarter synes å være sterkt påvirket av svoveldioksyd i luften.
2. Det er spesielt sammenligningen av prøver eksponert over og under tak som gir de sterkeste indikasjonene på svoveldioksidpåvirkning. Ved eventuell oppfølging bør en alltid eksponere samme steinprøve under og over tak.
3. Kleberstein, devonsk sandstein (Vingen), glimmerskifer (Ausevik), gneis- og granitt (Leirvåg) synes å være betydelig mindre følsomme for SO_2 og inhomogeniteter i steinen betyr sannsynligvis mer.
4. Grønnlig skifer fra Vangdal er inhomogen og inneholder karbonatholdige bestanddeler som fører til større forvitring.
5. Avvasking av reaksjonsproduktene og vinderosjon kan være et vesentlig ledd i forvittringsprosessen.

6. Dagens kalkmørtel synes ikke å være mindre motstandsdyktig enn tidligere mørteltyper.
7. De ulike overflatebehandlingene som er utprøvd synes ikke å være tilfredsstillende.

7 LITTERATUR

- (1) Haagenrud, S.E. Steinforvitring Nidarosdomen. Lillestrøm 1973. (NILU OR 57/73.)
- (2) Conservation of historic stone buildings and monuments. Preprints. February 2-4, 1981, Washington D.C., National Academy of Science, 1981.
- (3) Luckat, S. Qualitative Untersuchung des Einflusses von Luftverunreinigungen bei der Zerstörung von Naturstein. Dortmund, Zollern Institut, 1981. (Forschungsberichte 106 08 003/02.)
- (4) Tapper, L.
Kucera, V. The effect of atmospheric sulphur pollutants on historical buildings og sandstone and lunestone. Swedish case study for the United Nations conference on the human environment. Stockholm 1972.
- (5) Clifton, J.R.
Frohnsdorff, G. Stone Consolidating Material. I: *Conservation of historic stone buildings and monuments*. Preprints. February 2-4, 1981. Washington D.C. National Acedemy of Science, 1981.

Table 1: Prøvestasjoner i NATO/CCMS prosjektet.

Storbritannia
1. St. Paul's Cathedral, London
2. Westminster Abbey, London
3. Dunstaffnage Castle, Skottland
Nederland
4. Lelystad
5. Den Burg, Texel
6. Great Church, Haarlem
7. Old Church, Delft
Italia
8. Ravenna
9. Pisa
10. Venedig
11. Roma
Norge
12. Mariakirken, Bergen
Sverige
13. Riddarhustorget, Stockholm
14. Floda kirke
Frankrike
15. Douai
16. Rouen
17. La Rochelle
18. Strasbourg
USA
19+20 New York City
Hellas
21. Acropolis, Athen
22. Eleusis, Athen
23. Hadrian's Gate, Athen

Table 2: Oversikt over steintypene i det norske delprosjektet.

Prøvetype	Antall	Kode	Eksponeringssted	Eksponering	
				Under tak	Over tak
Kleberstein, Mariakirken	5	M-1/1-5	Bergen		x
Kalkstein, Oslo	5	O-1/1-5	Bergen		x
Gneis, Leirvåg	2	LNG-1/1-2	Bergen		x
Devonsk sandstein, Vingen	2	V-1/1-2	Bergen		x
Grønlig skifer, Vangdal	1	Va-1/1-2	Bergen		x
Glimmerskifer, Ausevik	2	A-1-1	Bergen		x
Granitt, Leirvåg	3	IGR-1/1-3	hergen		x
Kalkstein Oslo	5	O-2/1-5	Oslo		x
Kalkstein, Oslo	5	O-2/1U-5U	Oslo	x	
Kalkstein, Hamar	5	H-2/1-5	Oslo		x
Kalkstein, Hamar	5	H-2/1U-5U	Oslo	x	
Kleberstein, Mariakirken	5	M-2/1-5	Oslo		x
Kalkmørtel, middel- alder	1	KM-2-1	Oslo		x
Ny kalkmørtel på kalkstein	4	K-2/1-4	Oslo		x
Kalkstein over- flatebehandlet	10	KB-2/1-10	Olso		x

Tabell 3: Oversikt over overflatebehandlingsmetoder på kalkstein eksponert ved STI, Oslo.

Antall	Kode	Middel	Behandlingsmetode
1	KB-2-1	Mikrovoks grad 80H	Prøven varmes til 80°C. Voksen smeltes og tynnes med whitespirit. Påstrykes under IR belysning
2	KB-2-2	Epoxy, Araldit AY 103 - HY 951	Prøven varmes til 70°. Herder og resten blandes ved romtemp. og påføres på varm stein
1	KB-2-3	Epoxy Maraglass	Prøven varmes til 70°C. Herder og resten blandes ved romtemp. og påføres på varm stein
1	KB-2-4	PVA, Mowilith 50	Prøven varmes til 70°C. PVA løst i 10% loluen, tilsettes ved vakuumbehandling i 2 timer
2	KB-2/5-6	Co-polymer, Metylmetakrylatetylacrylat+Paraloid B-72	Prøven varmes til 70°C. Polymeren tynnes med 10% toluen og vakuumbehandles i 2 timer
2	KB-2/7-8	Silikon Movin	Prøven varmes til 70°C. Silikon tilsettes og vakuumbehandles i 2 timer
2	KB-2/9-10	Silikon R-222	Prøven varmes til 70°C. Silikon tilsettes og vakuumbehandles i 2 timer

Table 4: Vekttap, sulfatinnhold og kloridinnhold for steinprøvene fra Bergen.

Prøve	Vekttap mg/g stein	Middelverdi mg/g stein	SO ₄ i stein ppm	Cl i stein ppm
0-1-1	9.83	9.99	37	8.1
0-1-2	9.94		34	
0-1-3	9.89		43	
0-1-4	10.04		40	6.0
0-1-5	10.27			
M-1-1	1.47	1.46	3	3.8
M-1-2	1.52		5	
M-1-3	1.47		4	4.2
M-1-4	1.36		6	3.0
M-1-5	1.49		13	1.8
LNG-1	1.59	1.26	2	1.2
LNG-2	0.93		2	2.0
V-1	1.63	1.80	8	4.0
V-2	1.96		10	3.8
VA-1	7.90	7.90	19	3.2
A-1	1.15	0.87	33	4.2
A-2	0.59		91	3.8
LGR-1	0.63	1.63	4	1.8
LGR-2	0.27		4	2.2
LGR-3	2.35		4	3.4
Blind-0			8	15

Tabell 5: Vekttap, sulfatinnhold og kloridinhold fra steinprøvene fra Oslo.

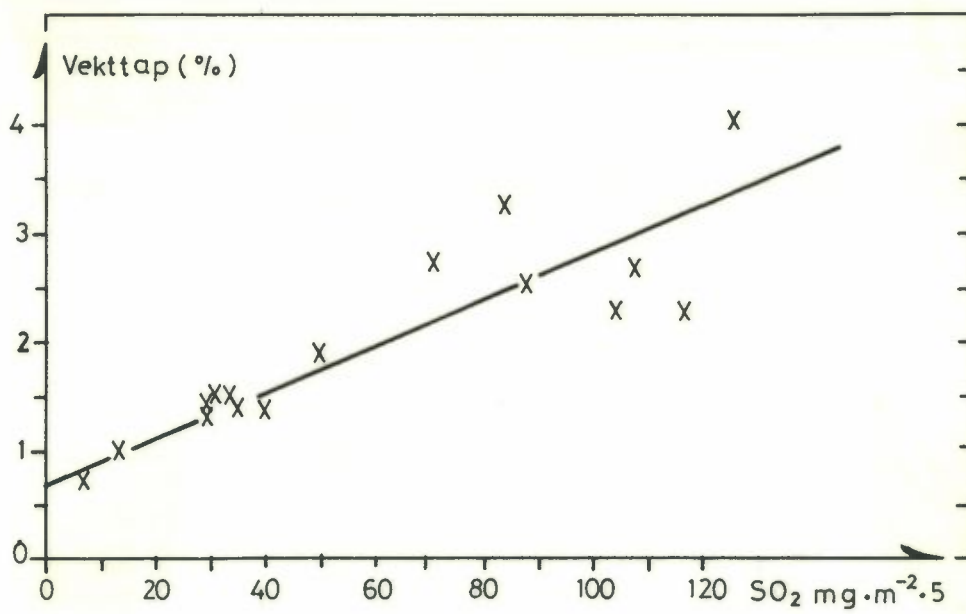
Prøve	Vekttap mg/g stein	Middelverdi mg/g stein	SO ₄ i stein ppm	Cl ⁻ i stein ppm
0-2-1	6.47	6.11	122	7.3
0-2-2	6.37		118	6.6
0-2-3	5.67		129	6.6
0-2-4	6.25		142	8.6
0-2-5	5.77		94	9.0
0-2-1 U	1.27	1.43	288	45.2
0-2-2 U	2.08		388	56.0
0-2-3 U	1.04		467	63.2
0-2-4 U	1.04		377	45.6
0-2-5 U	1.70		136	12.2
H-2-1	8.07	8.81	65	7.8
H-2-2	9.75		82	9.4
H-2-3	7.87		56	6.4
H-2-4	8.66		60	15.6
H-2-5	9.71		63	7.8
H-2-1 U	1.55	2.34	277	27.4
H-2-2 U	3.11		311	26.6
H-2-3 U	0.71		319	33.2
H-2-4 U	3.16		377	25.0
H-2-5 U	3.16		257	21.0
K-2-1	12.81	13.51	101	5.8
K-2-2	14.51		103	4.4
K-2-3	13.97		83	4.8
K-2-4	12.73		67	5.0
KM-2-4	54.17	54.17	161	6.2
M-2-1	1.09	1.11	6	2.8
M-2-2	1.16		6	3.4
M-2-3	1.04		4	2.4
M-2-4	1.13		6	3.4
M-2-5	mistet	-	-	-
KB-2-1	6.97	6.97	65	4.4
KB-2-2	6.28	6.28	38	4.2
KB-2-3	6.87	6.87	84	4.8
KB-2-4	5.52	5.52	38	5.2
KB-2-5	7.16	7.68	65	6.0
KB-2-6	8.19		62	5.0
KB-2-7	8.34	7.84	71	3.8
KB-2-8	7.33		83	4.4
KB-2-9	7.83	7.42	64	4.4
KB-2-10	7.00		39	7.6
Blind-0			8	15
Blind-M			-	-
Blind-H			25	5.5
Blind-K			14	≈5

Tabell 6: Midlere kvartalsverdier for svoveldioksyd, klorid og sulfat ved stasjonene. Svoveldioksyd fra de vanlige overvåkingsstasjonene i Bergen og Oslo er inkludert.

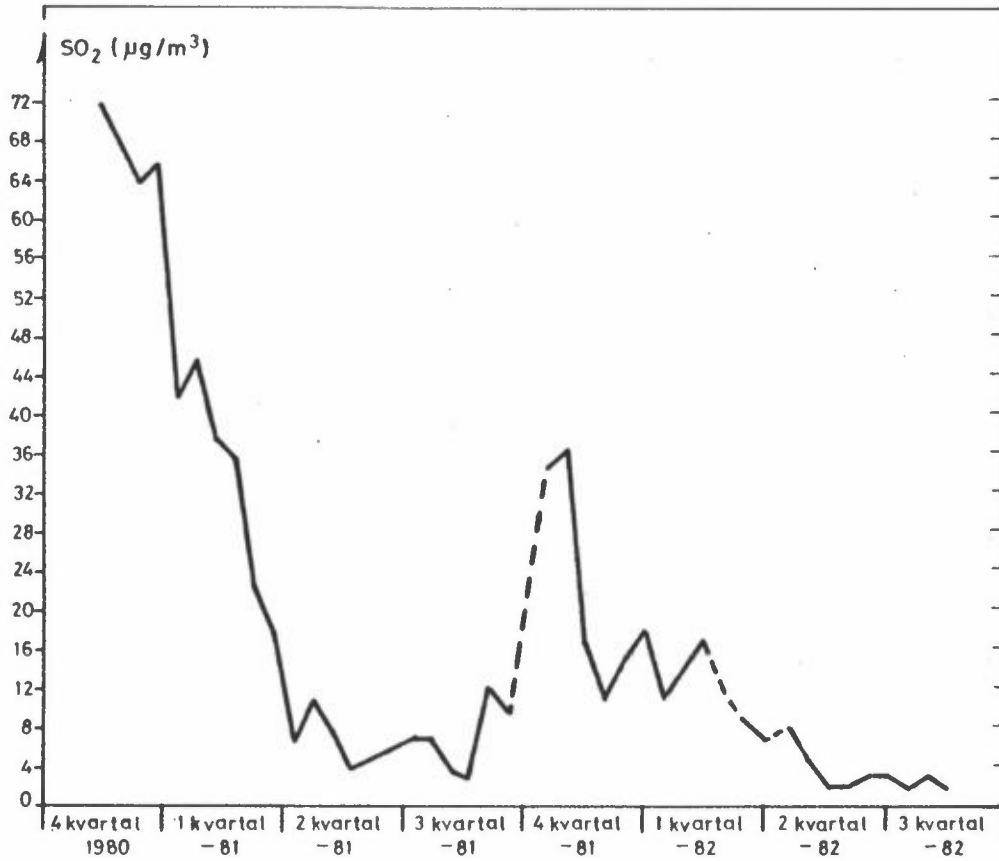
	SO ₂ µg/m ³		SO ₂ µg/m ³ St.Olavs gt	STI	Cl ⁻ µg/m ³		SO ₄ µg/m ³	
	CMI	Mariakirken			Mariakirken	STI	M.kirken	STI
3 kv 1980	8		25					
4 kv 1980	17	70 ½ kv.	70		2.1		7.2	
1 kv 1981	20	46	73	27	1.4	1.4	7.1	2.1
2 kv 1981	9	10	28	19	0.8	1.8	4.8	4.0
3 kv 1981	9	7	19	11	0.9	1.5	3.2	4.5
4 kv 1981	26	21	58	63	1.4	1.8	2.3	6.0
1 kv 1982	15	13	66	72	0.9	1.0	2.1	9.1
2 kv 1982	9	4	17	9	0.8	0.6	2.0	2.3
3 kv 1982	7	3	16	8	0.6	0.7	1.6	3.6
4 kv 1982				30		0.9		3.9
Middel totalt	13	22	41	30	1.1	1.2	3.8	4.4



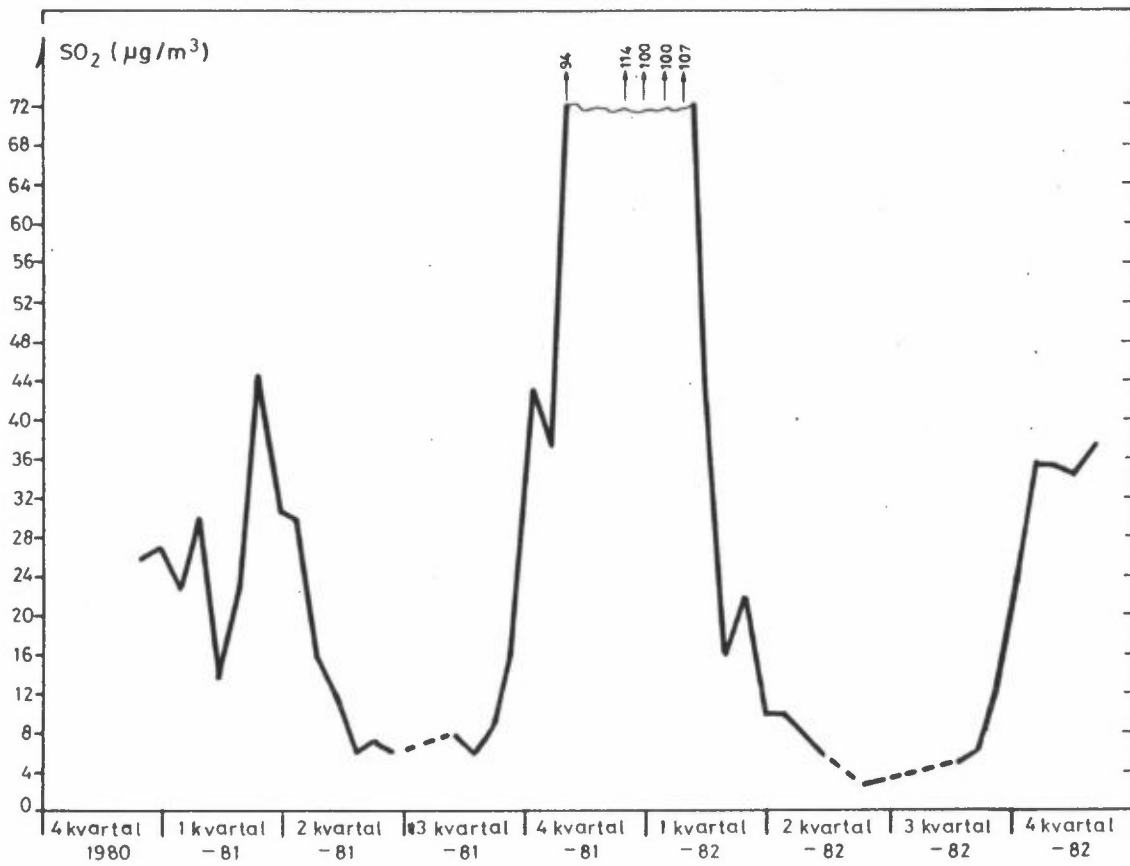
Figur 1: Bilde av forsøksopplegget på taket av Bryggen museem med de tyske steinprøvene og IRMA-apparatet montert.



Figur 2: Vekttap av Bauenberger sandstein som funksjon av årsmiddel SO_2 -belastning (etter dr. S. Luckat).



Figur 3: 14 dagers middelværdier for SO₂ ved Bryggen Museum, Bergen.



Figur 4: 14 dagers middelværdier for SO₂ i forsøksperioden ved STI, Oslo.

VEDLEGG 1

MIKROSKOPVURDERING AV OVERFLATEBEHANDLEDE OVERFLATER FØR OG ETTER
EKSPONERING

KB-2-1
Mikrovoks grad 80H

De behandlede sideflatene virker mørkere enn ubehandlet flate. På de mest utsatte sidene, horisontal-opp og vertikal-ut er belegget stort sett borte. På de andre sidene er det en del gjennomslag. Voksen flaker noe ved gjennomslagene.

KB-2-2
Epoxy

De behandlede sideflatene virker mørkere enn ubehandlet flate. Belegget er borte på $2\frac{1}{2}$ side. Nedbrytingen begynner som sprekkdannelse (krakkelering).

KB-2-3
Maraglass

De behandlede sideflatene virker mørkere enn ubehandlet flate. Belegget er borte på 3 sider. Belegget krøller på kanten. Brytes opp ved blæredannelse og krakkelering.

KB-2-4
PVA, Mowilith 5

De behandlede sideflatene virker mørkere enn ubehandlet flate. Belegget er relativt seigt og sitter tildels igjen på alle sider. Filmen løsner fra kanten og krøller seg, samtidig som en på alle flater har groper uten beskyttelse.

KB-2-5/6
Paraloid

De behandlede flatene ligner på ubehandlede flater, men er noe mer glassert. Det er noe belegg igjen på alle flater, men tildels i små mengder. Belegget er tynt og virker ikke slitesterkt.

KB-2-7/8
Silikon, Movin

De behandlede flatene er svært lik de ubehandlede. Det er vanskelig å finne rester av belegget og flatene virker normalt forvitret.

KB-2-9/10
Silikan, R222

De behandlede flatene er svært lik de ubehandlede. Det er vanskelig å finne rester av belegget og flatene virker normalt forvitret.

**NILU**

TLF. (02) 71 41 70

NORSK INSTITUTT FOR LUFTFORSKNING**(NORGES TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FORSKNINGSRÅD)
POSTBOKS 130, 2001 LILLESTRØM
ELVEGT. 52.**

RAPPORTTYPE Teknisk rapport	RAPPORT NR. OR 40/83	ISBN--82-7247-403-4
DATO SEPTEMBER 1983	ANSV.SIGN. B. Ottar	ANT. SIDER 27
TITTEL Forvitring av stein og mulig effekt av luftforurensning	PROSJEKTLEDER J.F.Henriksen	NILU PROSJEKT NR. 0-8068
	TILGJENGELIGHET** A	
FORFATTER(E) J.F.Henriksen, S.E.Haagenrud, O.Anda	OPPDRAAGSGIVERS REF.	
	OPPDRAAGSGIVER Riksantikvaren, Miljøverndepartementet.	
3 STIKKORD (å maks. 20 anslag) Forvitring	Luftforurensning	Målemetoder
REFERAT (maks. 300 anslag, 5-10 linjer) I samband med en NATO/CCMS undersøkelse av steinforvitring er det blitt utført en norsk parallell-undersøkelse med norske steintyper i Oslo og Bergen. Effekten av luftforurensninger er stor på kalkholdige steintyper og minimal på typer uten kalkinnhold.		
TITLE Detoriation of stone and its relation to air pollutants		
ABSTRACT (max. 300 characters, 5-10 lines. Together with a NATO/CCMS investigation of stone detoriation and Norwegian program for measuring detoriation effects on Norwegian stones has been carried out. Great detoriation effect has been found on calcareous stones and only minor effect on the other types of stones.		

**Kategorier: Åpen - kan bestilles fra NILU A
Må bestilles gjennom oppdragsgiver B
Kan ikke utleveres C