

NILU : OR 10/99
REFERANSE : O-98135
DATO : FEBRUAR 1999
ISBN : 82-425-1059-8

**Identifisering og
vurdering av SFTs
overvåkingsdata sett i
relasjon til nedbrytning
av kulturminner i luft,
jord og vann.**

**Elin Dahlin, Jan Henriksen, Odd Anda,
Guri Krigsvoll, NILU,
Isabella Børja, NISK,
Richard Wright, NIVA**

Forord

Bakgrunnen for prosjektet er et samarbeid mellom Statens forurensningstilsyn (SFT) og Riksantikvaren (RA) om forurensningseffekter på kulturminner som startet i 1997.

Med bakgrunn i det pågående samarbeidet fikk Norsk institutt for luftforskning (NILU) i september 1998 en henvendelse fra SFT med forespørsel om NILU kunne identifisere og vurdere SFTs overvåkingsdata sett i relasjon til nedbrytning av kulturminner i luft, jord og vann. SFT henvendte seg i den forbindelse også til Norsk institutt for vannforskning (NIVA) og Norsk institutt for skogforskning (NISK).

NILU ble bedt om å utarbeide et prosjektforslag og med bakgrunn i dette ble det avholdt et møte hos Riksantikvaren 16. oktober 1998.

Det ble bestemt at NILU skulle ha prosjektlederansvaret, men skulle innhente nødvendige opplysninger om måleprogrammer i jord og vann, som NIVA og NISK er ansvarlige for. Riksantikvaren skulle bistå prosjektet med opplysninger om kulturminnearven i den grad det var behov for dette.

Prosjektet må betraktes som en pilotstudie da det tidligere ikke er gjort tilsvarende vurderinger av SFTs overvåkingsdata sett i relasjon til nedbrytning av kulturminner.

Elin Dahlin
Prosjektleder

Innhold

	Side
Forord	1
Sammendrag	5
1 Innledning	7
1.1 Problemets størrelse.....	7
2 Målsetting	8
3 Kulturminner	8
3.1 Oversikt over materialer brukt i kulturminner.....	9
3.2 Kulturminner eksponert i luft.....	10
3.2.1 Profane bygninger og kirker.....	10
3.2.2 Statuer og skulpturer.....	10
3.2.3 Gravminner på kirkegårder.....	10
3.2.4 Broanlegg for vei og jernbane.....	10
3.2.5 Ruiner fra middelalder og nyere tid.....	10
3.2.6 Bautasteiner og forhistoriske steinsetninger.....	10
3.2.7 Bergkunst.....	11
3.3 Kulturminner eksponert i jord/vann.....	11
3.4 Kulturminner i museer, samlinger og arkiver.....	12
4 Nedbrytningsmekanismer	12
4.1 Nedbrytning i luft.....	12
4.1.1 Biologisk nedbrytning.....	13
4.1.2 Dose – respons funksjoner.....	13
4.1.3 Forvitring av bergkunst og steinmonumenter.....	16
4.1.4 Nedbrytning av tre og trebygninger.....	18
4.2 Nedbrytning av arkeologisk materiale i jord og vann.....	19
4.2.1 Biologisk nedbrytning.....	19
4.2.2 Kjemisk nedbrytning i jord.....	20
4.2.3 Nedbrytning i vann.....	21
5 Oversikt over ulike måleprogram	21
5.1 Innledning.....	21
5.2 Overvåking av jord.....	22
5.2.1 Overvåkingsprogram for skogskader.....	23
5.2.2 Program for terrestrisk naturovervåking.....	25
5.3 Overvåkingsprogram for vann.....	25
5.4 Overvåkingsprogram for luft og nedbør.....	27
5.4.1 “Overvåking av langtransportert forurenset luft og nedbør”.....	27
5.4.2 Sur nedbørs virkning på skog og fisk.....	30
5.5 Overvåkingsprogram for materialer.....	30
5.5.1 Enkeltstående måleprosjekter.....	30
5.6 Overvåkingsprogram på lokal skala.....	31
5.6.1 Overvåkingsprogram for tettsteder.....	31

5.7 Modellberegninger.....	32
5.8 Meteorologiske stasjoner	34
6 Hva SFTs databaser kan benyttes til.....	35
6.1 Vurdering av databasen for luft og nedbør	35
6.2 Vurdering av databasene for jord og vann.....	37
7 Utvikling/trender.....	38
8 Konklusjoner	40
9 Referanser.....	43
Vedlegg A Geologisk oversikt over berggrunnen i Norge	47
Vedlegg B Biologisk nedbrytning av arkeologisk materiale	53
Vedlegg C Oversikt over tilgjengelig luft- og nedbørdata.....	59

Sammendrag

Det foreligger mangelfull kunnskap om de ulike årsakene til nedbrytningen av kulturminner i Norge. Årsaken kan være enten fysisk, kjemisk eller biologisk nedbrytning eller en kombinasjon av disse. En mulig årsak som har vært lite undersøkt her i landet, er i hvilken grad langtransportert luftforurensning og sur nedbør har påvirket nedbrytningen. Det er i den sammenheng også viktig å vurdere eventuelle lokale forurensningskilder, spesielt i byområder.

Statens forurensningstilsyn (SFT) og Riksantikvaren (RA) har gjennom en henvendelse til Norsk institutt for luftforskning (NILU), Norsk institutt for vannforskning (NIVA) og Norsk institutt for skogforskning (NISK) bedt om en identifisering og vurdering av i hvor stor grad data fra "Statlig program for forurensningsovervåking" kan benyttes til å vurdere nedbrytningen av kulturminner i Norge. Oppdragsgiver for prosjektet er SFT. SFT har gjennom sitt måleprogram et nettverk av målestasjoner som måler en rekke ulike forurensningskomponenter.

Kulturminner finnes over hele Norge, både i byer og på landsbygda. Det vil føre for langt i denne sammenheng å innbefatte alle typer kulturminner, og det er derfor gjort et forsøk på å avgrense mengden kulturminner til fysiske levninger.

Hovedmålsettingen med prosjektet er å identifisere og vurdere i hvilken grad "Statlig program for forurensningsovervåking" inneholder data som kan ha relevans for å si noe om faren for nedbrytning av kulturminner eksponert i luft eller bevart i jord eller vann. Resultatet av vurderingen er at programmet inneholder data som har relevans for en vurdering av nedbrytningen av kulturminner i Norge. Selv om en for mange målestasjoner har over 20 år med måledata, er dette imidlertid en forsvinnende kort periode av kulturminnenes levetid. For å anslå nedbrytningen i et langt perspektiv er det derfor noe begrenset informasjon i gjeldende databaser.

Langtransporterte forurensninger har betydning primært utenfor byområdene. I den utstrekning dette har påvirket vannkvaliteten og surheten i jord er det spesielt de arkeologiske gjenstandene som er påvirket. I luft er den lokale forurensningen i byene av størst betydning. Nedbrytningshastigheten er større, og mengden med kulturminner er også større. Det er tilstrekkelig data i basene til at en kan anslå nedbrytningshastigheter for materialer hvor slike sammenhenger er kjent. Databasene inneholder data som kan gi informasjon om den midlere belastningen i områdene, men kan aldri brukes til å vurdere nedbrytningshastigheten i luften i mikromiljøet på kulturminnene.

Med dagens dose-respons-ligninger er det primært ozon (O_3) i byluft som kan forbedre muligheten til bedre prediktering. Siden ligningene benytter langtidsmiddelverdier, vil kostnadene ved å inkludere dette i områder ved bruk av passive prøvetakere være overkommelig.

For skogsjord er det et betydelig nasjonalt målenett som vil være representativt for å prediktere hvilke områder som har økt risiko for nedbrytning. Det er imidlertid gjennomført få tidsstudier av forandringen i jord. Basen vil derfor bli enda bedre etter hvert som denne planlagte informasjon kommer på plass.

For jord og vann er det få kjente dose-respons-ligninger. Oksygentilgangen er imidlertid alltid viktig for nedbrytningen, og dette måles i liten utstrekning i dag. Lokalisering av kulturminnene i jord og vann er et ekstra problem som gjør det enda vanskeligere å overføre generell kunnskap ned til gjenstander som kan ligge i ulike dybder.

SFTs databaser kan brukes til å lage geografiske oversikter over risikoområder. For jord og vann kan forsurede områder avgrenses. I luft har en flere modeller for luftforurensning. Hvis en kobler forurensningskartene sammen med meteorologiske kart, så kan CorrCost-modellen til NILU gi en direkte beregning av hvor korrosjon og nedbrytningsfare er størst. Det har imidlertid ikke vært mulig å gjennomføre dette innenfor rammen av dette prosjektet.

Identifisering og vurdering av SFTs overvåkingsdata sett i relasjon til nedbrytning av kulturminner i luft, jord og vann

1 Innledning

Det foreligger mangelfull kunnskap om de ulike årsakene til nedbrytningen av kulturminner i Norge. Årsaken kan være enten fysisk, kjemisk eller biologisk nedbrytning eller en kombinasjon av disse. En mulig årsak som har vært lite undersøkt her i landet, er i hvilken grad langtransportert luftforurensning og sur nedbør har påvirket nedbrytningen. Det er i den sammenheng også viktig å vurdere eventuelle lokale forurensningskilder, spesielt i byområder.

Statens forurensningstilsyn (SFT) og Riksantikvaren (RA) har gjennom en henvendelse til Norsk institutt for luftforskning (NILU), Norsk institutt for vannforskning (NIVA) og Norsk institutt for skogforskning (NISK) bedt om en identifisering og vurdering av i hvor stor grad data fra "Statlig program for forurensningsovervåking" kan benyttes til å vurdere nedbrytningen av kulturminner i Norge. Oppdragsgiver for prosjektet er SFT. SFT har gjennom sitt måleprogram et nettverk av målestasjoner som måler en rekke ulike forurensningskomponenter.

Det er satt av begrenset med tid og ressurser for prosjektet (ca 1 måneds arbeid), og det har i den forbindelse ikke vært mulig å gi et fullstendig svar på alle de oppgitte delmål. Det vil derfor være ønskelig at arbeidet kan bli fulgt opp ved en senere anledning.

1.1 Problemets størrelse

Kulturminner finnes over hele Norge, både i byer og på landsbygda. I følge Lov 9. juni 1978, nr 50 om kulturminner, Kap.1. § 2 defineres kulturminner som følger: "Med kulturminner menes alle spor etter menneskelig virksomhet i vårt fysiske miljø, herunder lokaliteter det knytter seg historiske hendelser, tro eller tradisjon til." (Lov om kulturminner, 1996). Det vil føre for langt i denne sammenheng å innbefatte alle typer kulturminner og det er derfor i Kapittel 3 gjort et forsøk på å avgrense mengden kulturminner til de fysiske levninger hvor man vil kunne identifisere en eventuell nedbrytning av de ulike materialer, som skyldes påvirkning fra forurensning eller klimaparametre. Det vil ikke bli gjort vurderinger av nedbrytning som skyldes andre faktorer som for eksempel, naturlig nedbrytning, bruk av feil materiale, feil konstruksjon, manglende vedlikehold, fysisk slitasje med mer. Kulturlandskapet vil ikke bli vurdert innenfor rammen av dette prosjektet.

Kulturminnene er i denne sammenheng delt inn i tre kategorier:

- Kulturminner eksponert i luft
- Arkeologiske levninger i bakken og i vann
- Kulturminner oppbevart innendørs

De automatisk fredete samt bevaringsverdige kulturminner i Norge spenner over en lang tidsperiode som strekker seg tilbake til de eldste levninger og frem til moderne tid. Det vil føre for langt i en rapport som denne å gi en detaljert oversikt over det totale omfang og spredningen av kulturminnene ut over landet. Hensikten her er først og fremst å vise til hvilke forurensningsparametere som måles og har vært målt og å vurdere i hvilken grad disse dataene har relevans for å kunne si noe om faren for nedbrytning av de ulike materialgrupper som kulturminnene representerer.

2 Målsetting

Målsettingen med prosjektet er å identifisere og vurdere i hvilken grad "Statlig program for forurensningsovervåking" inneholder data som kan ha relevans for å kunne si noe om faren for nedbrytning av kulturminner eksponert i luft eller bevart i jord eller vann. En vurdering av dataene vil ta utgangspunkt i følgende delmål:

- Vurdere data både fra langtransporterte forurensninger og fra lokale forurensningskilder.
- Vurdere om måleresultater målt på grov skala kan overføres til der nedbrytningen skjer lokalt på kulturminnene.
- Vurdere om det er viktige forurensningskomponenter som kan forårsake nedbrytning, og som ikke er registret i databasen til SFT.
- Vurdere hvorvidt eksisterende målinger av forurensning i jord og vann er representative for en vurdering i forhold til bevaring av det arkeologiske materialet.
- Vurdere kunnskapen om nedbrytningsmekanismene i luft, jord og vann for materialene som er av interesse.
- Vurdere trender for økt eller redusert risiko for nedbrytning sett i relasjon til de trender en kjenner for forurensningen.
- Vurdere muligheten av å lage en beskrivelse av hvor i landet en har de største problemene, eventuelt å lage en geografisk oversikt over risikoområdene.

Innenfor de økonomiske rammer som er gitt vil ikke alle de nevnte delmål kunne bli like grundig behandlet.

3 Kulturminner

Kulturminnevernets oppgaver er beskrevet i Lov 9. juni 1978 nr 50 om kulturminner (kulturminneloven), med endringer (Lov om kulturminner, 1996). Den slår fast at det er et nasjonalt ansvar å ivareta kulturminner og kulturmiljøer, både som en del av kulturarven og som ledd i en helhetlig miljø- og ressursforvaltning.

Kulturminner kan fredes på to måter. Kulturminner fra før 1537 er automatisk fredet, mens det for de fleste kulturminner fra nyere tid må fattes vedtak om fredning i hvert enkelt tilfelle.

Det er i denne sammenheng vanskelig å oppgi nøyaktig antall for de enkelte kategorier av kulturminner samt spredningen av disse rundt omkring i landet. Vi ønsker allikevel å vise til noen tall fra Riksantikvarens oversikter:

Automatisk fredete kulturminner i Norge (fra før år 1537):

Vi har i dag 58.000 kjente fornminnefelt (300.000 fornminner) som er R-merket (rune) i Fornminneregisteret. I tillegg kommer alle ikke kjente fornminner; for hvert synlige fornminne regnes det med 20 usynlige fornminner under jorda.

Det er bevart 261 profane middelalderbygninger, hvorav 20 i stein. Av steinkirker fra middelalderen er det bevart 154, mens det kun er bevart 28 stavkirker.

Det er bevart 70 ruiner fra middelalderen.

Per i dag er det registrert ca 1100 bergkunstlokalteter (disse er registrert i Fornminneregisteret).

Vedtaksfredete kulturminner (fra etter år 1537):

Det er fattet vedtak om å frede ca. 1230 anlegg (2900 enkeltobjekter) fra etter år 1537.

Vern av kirker:

I Norge er det totalt 1300 kirker og 1000 av disse er eldre enn 90 år.

Generelt:

550.000 bygninger eldre enn 1900 er feltregistrert og kartfestet, flest på gårder (SEFRAK-registret). 200.000 av disse er "verneverdige".

I tillegg er det i Norge 54 eldre trebyer med til sammen 13 000 trebygninger.

I følge Riksantikvaren er det vanskelig å presentere en prioritering blant de fredete og verneverdige kulturminnene, det er derfor ikke gjort en slik prioritering i denne sammenheng. Det kan derimot nevnes enkelte viktige satsningsområder som: sikring og bevaring av bergkunsten, sikring og bevaring av stavkirker samt sikring og bevaring av tømmerhus fra middelalderen. I tillegg vil de 4 objekter som står på "World Heritage List": Bryggen i Bergen, Røros bergstad, Bergkunsten i Alta og Urnes stavkirke, alltid stå i en særstilling.

Mange av de fredete kulturminnene er utført i stein (f. eks. bergkunsten). Nedbrytning av stein varierer i forhold til bergartens mineralogiske sammensetning. For å få en oversikt over de ulike lokale bergarter er det presentert en oversikt over bergartsforekomster i landet i Vedlegg A.

3.1 Oversikt over materialer brukt i kulturminner

Denne oversikten viser de mest anvendte materialer innenfor de ulike kategorier av kulturminner som enten er eksponert i luft, bevart i jord eller under vann. Oversikten gir ikke et fullstendig bilde og det er i denne sammenheng heller ikke mulig å gå inn i detaljer omkring kombinasjon av ulike typer materialer brukt på

ett og samme kulturminne. Ved en vurdering av faren for nedbrytning på grunn av ulike forurensningsparametre og klimaparametre er det vesentlig å vurdere kulturminnets beliggenhet fordi forurensningsbildet er forskjellig i fra byer og tettsteder enn på landsbygda.

3.2 Kulturminner eksponert i luft

3.2.1 Profane bygninger og kirker

De profane bygningene og kirkene er for en stor del konsentrert i byer og mindre tettsteder, men finnes også spredt ut over på landsbygda.

Hovedbyggematerialet i disse bygningene er enten stein, tegl eller tre, mens noen nyere tids bygninger er bygget i betong. Av andre materialgrupper som forekommer på mindre bygningsdetaljer er ulike metaller (f. eks. kobber, jern, sink, bly), glass, ulike plastprodukter, torv, papp, takstein og keramiske fliser. I tillegg er mange av bygningene overflatebehandlet med enten kalkpuss, ulike malingstyper, tjære eller beis.

3.2.2 Statuer og skulpturer

Bevaringsverdige skulpturer og statuer finnes for det meste i byer og tettsteder, men kan også forekomme spredt ut over på landsbygda.

De mest vanlige materialene er bronse og ulike bergarter som granitt, kleberstein, marmor, syenitt med fl. I moderne skulpturer kan andre materialer forekomme.

3.2.3 Gravminner på kirkegårder

Kirkegårder finnes både i byer, tettsteder og på landsbygda. Gravminnene kan være utført i ulike materialer som: tre, jern, bronse og ulike typer bergarter (granitt, syenitt, kleberstein og marmor med flere).

3.2.4 Broanlegg for vei og jernbane

Broanlegg finnes mest på landsbygda, men kan også forekomme i byer og tettsteder.

Broanleggene kan være utført i ulike materialer som tre, jern, stål, betong og ulike typer lokale bergarter.

3.2.5 Ruiner fra middelalder og nyere tid

I middelalderbyene: Oslo, Bergen, Trondheim, Tønsberg, Skien, Stavanger, Sarpsborg og Hamar finnes det bevarte ruiner fra profane og geistlige bygg som kirker og klostre. Det finnes også bevart en del ruiner på landsbygda.

Ruinene består som regel av bergarter av lokal opprinnelse, kalkmørtel og i en del tilfeller av teglstein.

3.2.6 Bautasteiner og forhistoriske steinsetninger

Bautasteiner, forhistoriske steinsetninger, samt samiske offersteiner, finnes bevart

på spredte steder rundt omkring i landet, mest på landsbygda. Disse er utført i ulike lokale bergarter.

3.2.7 Bergkunst

Bergkunstlokaliteter finnes spredt over hele landet, men med større konsentrasjoner i Østfold, Telemark, Rogaland, Sogn og Fjordane, Trøndelag, Nordland og Finnmark. 90% av de kjente bergkunstlokalitetene er skadet.

Bergkunsten ble i stor grad utført i områdene nær havet. Landhevingen etter siste istid førte til at daværende strandlinje ligger atskillig høyere enn dagens strandlinje, se Vedlegg A, Figur 1 A.

Bergkunsten i form av helleristninger er hugget inn i lokale bergarter som varierer fra fylke til fylke; for en oversikt over de lokale bergarter vises til Vedlegg A, Figur 2 A.

Når det gjelder den malte bergkunsten, så forekommer disse enten på åpne lokaliteter/huler som har god luftsirkulasjon eller i huler som ikke er direkte eksponert for uteluft. Inne i hulene vil det ofte utvikles et miljø som bør kartlegges spesielt i de enkelte tilfeller. Erfaring fra andre land, f. eks. Frankrike, viser at huler som er åpne for besøkende medfører endringer i klima inne i hulene, noe som påvirker tilstanden til maleriene.

3.3 Kulturminner eksponert i jord/vann

Arkeologisk materiale som fortsatt ligger bevart i grunnen stammer fra forhistorisk tid, middelalder og nyere tid og materialet finnes spredt over hele landet, både i byer og på landsbygda.

Det arkeologiske gjenstandsmaterialet kan deles opp i:

- Uorganisk materiale som metaller (jern, bronse, sølv, gull med flere), gjenstander i stein (ulike bergartstyper) og keramikk
- Organisk materiale som tre, tekstil, lær, beinmateriale (både skjellletter og gjenstander), botanisk og zoologisk materiale

Videre finnes det rester etter bygningsfundamenter som kan bestå av ulike lokale bergarter, tegl, kalkmørtel og tre.

Det varierer i stor grad hvor dypt det arkeologiske materialet ligger bevart under bakken og det er derfor svært vanskelig å si noe generelt om dybden på de jordlag som det kan være interessant å undersøke i forhold til forsuring.

I enkelte tilfeller kan arkeologiske levninger også være bevart under vann i innsjøer, blant annet etter oppdemming av sjøer i forbindelse med kraftutbygging. Det kan også forekomme at fornminner av ulike årsaker har havnet under vann allerede i forhistorisk tid og i middelalderen. Kulturminner i saltvann vil ikke bli vurdert i denne sammenheng.

3.4 Kulturminner i museer, samlinger og arkiver

Det skal i denne sammenheng kun nevnes at forurensning fra utemiljø, både langtransportert og lokal forurensning kan trenge inn i bygninger som ikke har tilstrekkelig rensset inntaksluft. Disse forurensningene vil være med på å bryte ned bevaringsverdig gjenstandsmateriale i museer og samlinger (Dahlin et al., 1997). Nedbrytning av gjenstandsmateriale i innemiljø vil ikke bli behandlet nærmere i denne rapporten.

4 Nedbrytningsmekanismer

Alle kulturminner kan nedbrytes i det miljøet de befinner seg i. Forvitring (nedbrytning) av ulike typer materialer skjer både ved fysiske, kjemiske og biologiske prosesser (Thorseth et al., 1997). Viktige fysiske prosesser er vind, frost og mekanisk erosjon fra vann, vind og is. Nedbrytning av kulturminner på grunn av menneskelig aktivitet, som blant annet slitasje og hærverk, er også viktige faktorer. I luft og vann kan kulturminner bli påvirket av mekaniske, kjemiske og biologiske (bakterier, sopper og lav) prosesser. For arkeologiske levninger som er bevart i jorda er nedbrytningen stort sett biologisk (bakterier og sopper, se Vedlegg B) og kjemisk.

Nedbrytningen av materialer i ulike miljøer vil alltid oppstå ved en kombinasjon av effekter, hvor en også må vurdere belastningen, materialet som er benyttet, konstruksjonens utforming og beskaffenhet. En vurdering av nedbrytningsforholdene er derfor komplisert og en må ta hensyn til flere samvirkende faktorer for å få et komplett bilde. For fritt eksponerte materialer er det i de senere år utviklet ligninger som med rimelig sikkerhet beskriver sammenhengen mellom nedbrytningen og den ytre påvirkningen. I ligningene er det virkningene av de forurensninger som en har i vårt moderne samfunn som har hatt størst forklaringsstyrke. SFT har støttet denne type forskning i mange år og de data som SFT har samlet i sitt arbeid med overvåking av miljøet og effekter bør derfor være anvendbare for å vurdere forurensningens bidrag til nedbrytningsforløpet. På mer kompliserte konstruksjoner vil belastningen på de enkelte deler av bygget være vanskeligere å anslå. Det vil derfor alltid være områder på et bygg hvor nedbrytningen avviker fra den nedbrytningen som beregnes fra fritt eksponerte flater.

Selv om nedbrytningshastigheten i luft er forskjellig fra vann og jord så ser en ofte at det er de samme kjemiske stoffene som er med på å øke eller redusere nedbrytning. En oversikt over den kjemiske belastning fra luft til vann og jord vil derfor kunne gi økt forståelse av de prosessene som nedbryter vår kulturarv i flere miljøer. Det er ikke noe klart skille mellom nedbrytningen i de tre miljøene. Når regnet renner over en steinflate kan dette betraktes som en naturlig del av luftforurensning. For en vannforsker vil det like klart være en del av et vannsystem. På samme måte vil vannet som siger gjennom jordene være et naturlig forskningsområde for både vann- og jordforskere.

4.1 Nedbrytning i luft

Nedbrytningen av materialer i luft påvirkes alltid av klimatiske så vel som kjemiske parametere. Biologiske prosesser vil være en naturlig del av

nedbrytningen for materialer som tre og stein og mindre viktig for metaller.

4.1.1 Biologisk nedbrytning

Avsetning av organiske materialer fremmer soppvekst på historiske monumenter (Saiz-Jimenez & Samson, 1981). Organiske stoffer i støvpartikler kan stimulere soppvekst. Utslipp som f. eks. hydrokarboner eller flyktige organiske stoffer binder seg til støvet som legger seg på overflaten og gir grunnlag til soppvekst. Særlig fresker, malerier, bergkunst og steinmonumenter er utsatte for denne type skader (se Vedlegg B).

Enkelte lavsorter er svært sensitive for luftforurensing som: HF, O₃ og SO₂. SO₂ oppløst i vann danner H₂SO₃ som oksideres til H₂SO₄ og ødelegger klorofyllet i fotobionten. Den generelle bakgrunnsforurensing og sur nedbør har lite innvirkning på selve laven, men har indirekte effekt gjennom forsure av substratet (Krog et al. 1994). Nitrogen og fosfor virker generelt vekstfremmende på laver og alger. Som et eksempel kan nevnes et bergkunstfelt ved Fykanvatn i Glomfjord, som ligger øst for Kunstgjødsselfabrikken, og som i løpet av de siste 20 år har blitt helt gjengrodd (muntlig meddelelse M. Chruickshank, RA).

Sur nedbør vil påvirke organismer som bakterier, sopper og lav. Bakterier har sin optimumsvekst ved nøytral pH, og muggsoppene, som danner patina på steinmonumenter, vokser også best ved nøytral pH. Sur nedbør kan hindre nedbrytning forårsaket av disse organismene, på den andre siden kan den også fremme nedbrytning forårsaket av lav. Dette er et kompleks samspill, fordi selv om sur nedbør teoretisk kan forhindre dannelse av patina, vil den da forsure jordsmonnet og påvirke de biologiske prosessene der.

4.1.2 Dose – respons funksjoner

Når det gjelder nedbrytning av ulike materialer, så har man ved NILU spesielt studert effekten av kjemiske- og meteorologiske parametre. I mange år var forskningen fokusert på virkningen av svovelforurensninger, både virkningen av gassavsetning (tørravsetning) så vel som virkningen av sur nedbør (våtavsetningen). Ulike dose-respons-ligninger er utviklet gjennom perioden, ligninger som beskriver de mest dominerende nedbrytningsfaktorene i området som målingene ble utført i. Det første forsøk på å beskrive belastningen i et geografisk område ble utført i basisundersøkelsen i Sarpsborg/Fredrikstadområdet i 1981-83 (Haagenrud et al., 1984).

Et viktig skritt videre for å oppnå ligninger som kunne anvendes over større områder var når UN/ECE (United Nation/Economic Commission for Europe) startet et større måleprogram i 1987. Programmet "UN/ECE International Co-operative Programme on Effects on Materials, Including Historic and Cultural Monuments" (UN/ECE ICP Materials) omfattet et stort antall materialer eksponert på 36 stasjoner i Europa, 2 i USA og 1 i Canada, samt et større parallelt måleprogram for miljøparametre (Korrosionsinstituttet, 1998). Resultatene etter 8 års eksponering er visst i Tabell 1 og følgende parametre inngår i ligningene: ML = massetap i g/m³, t = tid i år, SO₂ = µg/m³, O₃ = µg/m³, RH = relativ fuktighet i%, Rain(H⁺) = sur nedbør mg/m², (H⁺) = mg/l, Cl = mg/l og T = temp. i °C.

Tabell 1: Dose-respons-ligninger utviklet etter 8 års eksponering i "UN/ECE ICP Materials- programmet".

Rusttregt stål fritt eksponert

$$\ln(\text{ML}) = 3.54 + 0.33 \ln(t) + 0.13 \ln(\text{SO}_2) + 0.020 \text{RH} + 0.059(T-10) \quad T < 10 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\ln(\text{ML}) = 3.54 + 0.33 \ln(t) + 0.13 \ln(\text{SO}_2) + 0.020 \text{RH} - 0.036(T-10) \quad T > 10 \text{ }^\circ\text{C}$$

Rusttregt stål regneskyttet

$$\ln(\text{ML}) = 2.01 + 0.66 \ln(t) + 0.24 \ln(\text{SO}_2) + 0.025 \text{RH} + 0.048(T-10) \quad T < 10 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\ln(\text{ML}) = 2.01 + 0.66 \ln(t) + 0.24 \ln(\text{SO}_2) + 0.025 \text{RH} - 0.047(T-10) \quad T > 10 \text{ }^\circ\text{C}$$

Sink fritt eksponert

$$\text{ML} = 1.35(\text{SO}_2)^{0.22} \exp(0.018 \text{RH} + 0.062(T-10)) t^{0.85} + 0.029 \text{Rain}(\text{H}^+) t \quad T < 10 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{ML} = 1.35(\text{SO}_2)^{0.22} \exp(0.018 \text{RH} - 0.021(T-10)) t^{0.85} + 0.029 \text{Rain}(\text{H}^+) t \quad T > 10 \text{ }^\circ\text{C}$$

Sink regneskyttet

$$\text{ML} = 0.058(\text{SO}_2)^{0.16} \text{RH} * \exp(+0.039(T-10)) t^{0.49} \quad T < 10 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{ML} = 0.058(\text{SO}_2)^{0.16} \text{RH} * \exp(-0.034(T-10)) t^{0.49} \quad T > 10 \text{ }^\circ\text{C}$$

Aluminium fritt eksponert

$$\text{ML} = 0.0021(\text{SO}_2)^{0.23} \text{RH} * \exp(+0.031(T-10)) t^{1.2} + 0.000023 \text{Rain}(\text{Cl}^-) t \quad T < 10 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{ML} = 0.0021(\text{SO}_2)^{0.23} \text{RH} * \exp(-0.061(T-10)) t^{1.2} + 0.000023 \text{Rain}(\text{Cl}^-) t \quad T > 10 \text{ }^\circ\text{C}$$

Kopper fritt eksponert

$$\text{ML} = 0.0027(\text{SO}_2)^{0.32} (\text{O}_3)^{0.79} \text{RH} * \exp(+0.083(T-10)) t^{0.78} + 0.050 \text{Rain}(\text{H}^+) t \quad T < 10 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{ML} = 0.0027(\text{SO}_2)^{0.32} (\text{O}_3)^{0.79} \text{RH} * \exp(-0.032(T-10)) t^{0.78} + 0.050 \text{Rain}(\text{H}^+) t \quad T > 10 \text{ }^\circ\text{C}$$

Kopper regneskyttet

$$\text{ML} = 0.00045(\text{SO}_2)^{0.28} (\text{O}_3)^{1.16} \text{RH} \exp(+0.033(T-10)) t^{0.78} \quad T < 10 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{ML} = 0.00045(\text{SO}_2)^{0.28} (\text{O}_3)^{1.16} \text{RH} \exp(+0.019(T-10)) t^{0.78} \quad T > 10 \text{ }^\circ\text{C}$$

Støpt bronse fritt eksponert

$$\text{ML} = 0.026(\text{SO}_2)^{0.44} \text{RH} * \exp(+0.060(T-11)) t^{0.86} + (0.029 \text{Rain}(\text{H}^+) + 0.00043 \text{Rain}(\text{Cl}^-)) t^{0.76} \quad T < 11 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{ML} = 0.026(\text{SO}_2)^{0.44} \text{RH} * \exp(-0.067(T-11)) t^{0.86} + (0.029 \text{Rain}(\text{H}^+) + 0.00043 \text{Rain}(\text{Cl}^-)) t^{0.76} \quad T > 11 \text{ }^\circ\text{C}$$

Støpt bronse regneskyttet

$$\text{ML} = 0.014(\text{SO}_2)^{0.41} \text{RH} * \exp(+0.063(T-11)) t \quad T < 11 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{ML} = 0.014(\text{SO}_2)^{0.41} \text{RH} * \exp(-0.053(T-11)) t \quad T > 11 \text{ }^\circ\text{C}$$

Portland kalkstein

$$\text{ML} = (2.7(\text{SO}_2)^{0.48} \exp(-0.018T) + 0.019 \text{Rain}(\text{H}^+)) t^{0.96}$$

Kalkholdig sandstein (Mansfield)

$$\text{ML} = (2.0(\text{SO}_2)^{0.52} + 0.028 \text{Rain}(\text{H}^+)) t^{0.91} \quad T < 10 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{ML} = (2.0(\text{SO}_2)^{0.52} \exp(-0.013(T-10)) + 0.028 \text{Rain}(\text{H}^+)) t^{0.91} \quad T > 10 \text{ }^\circ\text{C}$$

I tillegg til ligningene i Tabell 1, er det utviklet ligninger for rustbeskyttende

maling og for to spesielt følsomme glasstyper. Resultatene er beskrevet i dose-respons-ligninger med en annen form enn dem i Tabell 1. Nedbrytning av maling kan uttrykkes som tid mellom vedlikehold eller som verdier i en ASTM skala, mens det for glass uttrykkes som % angrepet flate. De dominerende faktorene er for maling: SO₂, relativ fuktighet (RH), temperatur og regn eller total sur nedbør. For glass: er faktorene NO₂, temperatur og RH. Glass er det eneste materialet hvor NO₂ er kommet frem som en forklaringsvariabel.

Ligningene i "UN/ECE ICP Materials-programmet" er ansett for å være de best tilgjengelige dose-respons-ligningene man har i dag. En ny effekt er oppdaget ved den siste databearbeidelsen, nemlig at virkningen av temperaturen forandrer seg ved en middeltemperatur rundt 10°C. Måleprogrammet var primært konstruert for å fange opp virkningen av SO₂. I dagens forurensningssituasjon med en blanding av NO_x og O₃ som de dominerende forurensningsparametere er det behov for andre ligninger. En har derfor fortsatt programmet med et justert stasjonsnett og et noe annet måleprogram for å oppnå en bedre beskrivelse av dagens forurensningers virkninger på materialer.

Dose-respons-ligninger vil i liten grad kunne anvendes i områder hvor belastningen domineres av andre kjemiske stoffer. I Norge er det spesielt kystlinjen som er vanskelig å inkludere. Spesielt metaller, men også andre materialer nedbrytes sterkt av klorid. Denne virkningen er ikke inkludert i "UN/ECE ICP Materials-programmet" da en med vilje holdt stasjoner med kloridbelastninger utenfor prosjektet. Likevel ser en at klorid er med for å forklare korrosjon på bronse og aluminium. Rundt aluminiumsverk er forurensningen dominert av fluorider. Fluorid og flussyre er stoffer som spesielt angriper keramiske fliser og glass. Det er derfor sannsynlig at stein også blir mer angrepet i disse områdene.

Som det fremgår av Tabell 1, er det størst kunnskaper om nedbrytningsforholdene for metaller. For bergarter er det kun to bergarter, kalkstein og kalkbundet sandstein som er med. Det er kjent at ulike bergarter har svært ulik motstand mot nedbrytning. Det kan derfor være begrenset overføringsverdi i resultatene fra de kalkholdige bergartene til andre norske bergarter. Overføringsverdien kan være betydelig større fra kalkstein til kalkholdig puss på bygninger.

I MOBAK-prosjektet fra 1986-89, som SFT støttet, ble det utviklet ligninger for levetider for vedlikehold av materialer basert på inspeksjoner av bygninger i Sarpsborg og Stockholm (Kucera et al., 1993). Her er forklaringsvariablene SO₂ og sur nedbør. Nøyaktigheten er sannsynligvis dårligere enn i "UN/ECE ICP Materials-prosjektet", men den inkluderer flere materialer som det kan være ønskelig å vurdere i kulturhistorisk sammenheng. I Tabell 2, er det gitt en oversikt over materialer hvor en kjenner dose-respons og/eller levetidsfunksjoner sammen med de parametre som inngår i ligningene. Videre er andre parametre som en mener har betydning, uten at sammenhengen er dokumentert i ligninger, listet.

Tabell 2: Oversikt over materialer hvor forurensningenes virkning er dokumentert.

Materialer	Dose-respons-ligninger	Levetids-ligninger	Parametre i ligninger	Andre reaktive parametre
Stål	ja		SO ₂ , RH, H ⁺	Cl, F, regn, SO ₄ ²⁻
Rusttregt stål	ja		SO ₂ , RH, temp., H ⁺	Cl, F, regn
Sink	ja		SO ₂ , RH, temp. regn(H ⁺)	Cl
Forsinket stål	ja	ja	SO ₂ , RH, temp, regn(H ⁺)	Cl
Aluminium	ja		SO ₂ , Cl, regn , RH, temp.	syrer
Kopper	ja	ja	SO ₂ , O ₃ , regn, RH, temp.	NO ₂ NH ₃
Støpt bronse	ja		SO ₂ , Cl, regn, RH, temp.	NO ₂ NH ₃
Kalkholdig stein	ja	ja	SO ₂ , temp, regn(H ⁺)	Cl
Glass	ja		NO ₂ , temp, RH,	HF
Malt stål	ja	ja	SO ₂ , RH, temp, regn(H ⁺)	Cl, sot
Malt forsink.st	ja	ja	SO ₂ , RH, temp, regn(H ⁺)	Cl, sot
Kalkpuss		ja	SO ₂ , temp, regn(H ⁺)	Cl, sot
Kalk/sement puss malt		ja	SO ₂ , regn(H ⁺)	Cl, sot
Sementpuss				SO ₂ , Cl, sot
Betong				SO ₂ ,syrer
Tegl stein				SO ₂ ,syrer
Båndlakkert metall		ja	SO ₂ , regn, (H ⁺)	
Takpapp		ja	SO ₂ , regn, (H ⁺)	
Malt/beiset tre		ja	SO ₂ , regn, (H ⁺)	NO ₂ , NH ₃ , temp, regn, RH
Tre				NO ₂ , NH ₃ , , UV, temp, regn, RH
Skifer				Temp, frost, regn
Gneis ,granitt				Temp, frost, regn
Kleberstein				Temp, frost, regn
Plast				UV
Asbest sement				frost

Biologisk vekst er en viktig nedbrytningsfaktor for mange materialer. Størst effekt har den på organisk og porøse materialer. Det er i de senere år registrert en økt biologisk aktivitet på materialer i Norge. En av de faktorer som en mener har betydning for denne effekten er økt tilførsel av nitrogenforbindelser til atmosfæren i form av NO_x og NH₃.

4.1.3 Forvitring av bergkunst og steinmonumenter

Kjemisk forvitring innebærer nedbrytning av bergartenes mineraler. Disse løses opp i vann eller går til dannelsen av nye (sekundære) mineraler. Mange faktorer påvirker hastigheten av kjemisk forvitring. Viktigste er typen bergart. Generelt forvitrer kalkholdige bergarter mye fortere enn silikatholdige bergarter som gneis og granitt som er typiske for store deler av Norge (for en mer detaljert oversikt se Vedlegg A). Av miljøfaktorer er fuktighet, temperatur og kjemisk sammensetning av vannet viktig. Det er vannets kjemiske sammensetning som kan påvirkes av forurensninger. Tabell 3, gir en oversikt over faktorer som påvirker forvitring av bergarter og mineraler.

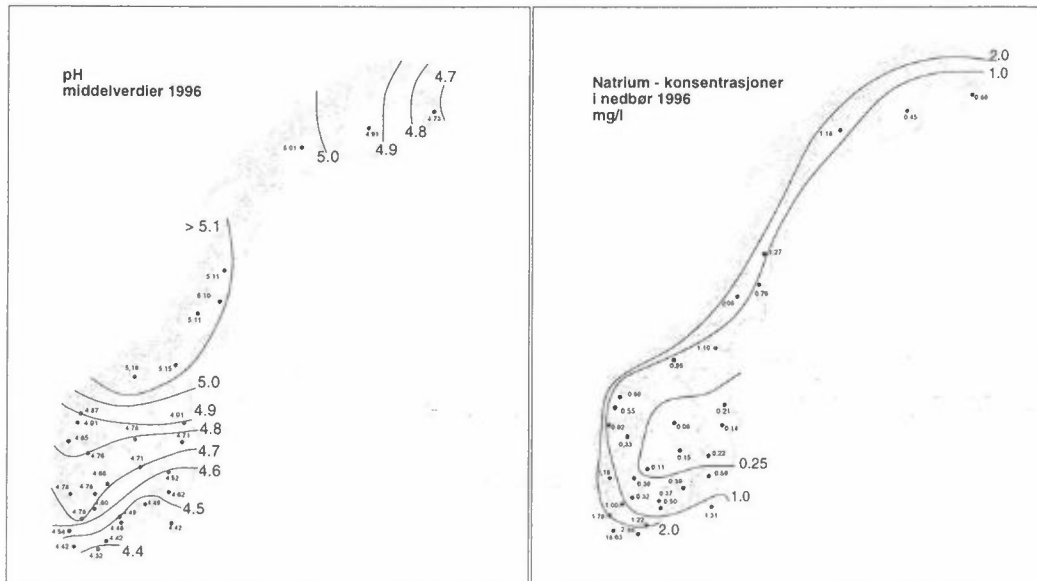
Saltholdigheten er viktig for vannets "aggressivitet" mot mineraler. I Norge er sjøsalter stort sett bestemmende for saltholdigheten i vannet. Overvåkingsdata for både nedbør og overflatevann i innsjøer og elver viser et tydelig mønster for saltholdigheten, med de høyeste verdiene nær kysten og raskt avtagende verdier innover i landet (Figur 1). Områder med stor sjøsaltpåvirkning (natriumklorid) 0-20 km fra kysten har konsentrasjoner av natrium i nedbøren på over ca. 2 mg/l (Tørseth og Manø, 1997).

Surhetsgrad (pH) er en annen viktig faktor. Kjemisk forvitring går fortere når vannet er surt (dvs. har lav pH). For bergkunst som ligger i dagen vil nedbøren treffe direkte og nedbørens pH vil påvirke forvitringshastigheten. For bergkunst som ligger under jorda, er det jordegenskapene som bestemmer pH i jordvannet, og nedbøren har bare en inndirekte effekt.

Langtransporterte luftforurensninger (sur nedbør) regulerer surheten i nedbøren i store deler av Norge. Sør-Norge er spesielt utsatt for sur nedbør. Ved pH under ca. 4,5 vil nedbørens surhet kunne føre til økt forvitring. Ved pH over ca. 4,5 er syreinnholdet så lavt at andre faktorer vil dominere. Overvåkingsdata viser at det bare er det sydlige Sørlandet som i dag får nedbør med pH under 4,5 (Figur 1). Siden 1980-årene har surheten minsket som følge av reduksjoner i utslipp av sure komponenter til luften i Europa.

Tabell 3: Faktorer som påvirker forvitring av bergarter og mineraler.

Fysiske faktorer:	Forvitring går fortere ved
Temperatur	Sterke temperatursvingninger
Frost	Hyppige fryse- og -tine sykluser
Vind	Sterk vind
Vann	Mye vannstrømning
Kjemiske faktorer:	
Saltholdighet	Høy saltholdighet
Surhetsgrad	Lav pH
Biologiske faktorer:	
Lav, sopp og bakterier	Se Vedlegg B



Figur 1: Middelkonsentrasjon i nedbør av natrium og pH på norske bakgrunnsstasjoner i Norge i 1997 (Tørseth og Manø, 1997).

Det pågår for tiden flere prosjekter, hvor det bl.a. forskes på nedbrytning av bergkunst: "Sikring av Bergkunst", som ledes av Riksantikvaren og prosjektet "Hällristningar i Gränsbygd" som er et EU/Interreg-prosjekt mellom Østfold fylke og Bohuslän. Interregprosjektet bygger mye på det tidligere svenske prosjektet "Luftföroreningarnas skadeverkningar på kulturminnen och kulturföremål" som pågikk i perioden 1985-1996. I det sistnevnte prosjektet ble det foretatt en rekke studier av ulike nedbrytningsmekanismer på bergkunst og steinmonumenter (Lindborg, 1990, Österlund, 1996). På norsk side er det foreløpig publisert resultater av naturvitenskaplige undersøkelser i rapporten "Sikring av Bergkunst" (Løvdøen et al. 1997). Som en del av Interregprosjektet vil det bl. a. bli gitt ut "State of the Art"- rapporter, foreløpig foreligger det et utkast: "Nedbrytning av hällristningar och möjliga bevarandemetoder – en kunnskapsöversikt" (Löfvendahl, 1998).

4.1.4 Nedbrytning av tre og trebygninger

Biologisk nedbrytning er den viktigste nedbrytningsprosessen for tre. Forskjellige typer av bakterier, insekter og sopp setter alle krav til tilstrekkelig tilgjengelig fuktighet, temperatur og næringsstoffer. I Norge er råte den dominerende nedbrytningsfaktoren for tre. Råte krever høyt vanninnhold i trevirke 20-30% vanninnhold sammenlignet med tørt tre (Mattsson, 1995). De biologiske nedbrytningsprosessene er gjennomgått mer inngående i Vedlegg B.

Andre nedbrytningsfaktorer som kan nevnes er:

- Fysisk nedbrytning av tre går under normale forhold svært langsomt. Hovedårsakene til nedbrytning er temperatursvingninger samt svinn og svelling på grunn av endring i fuktinnhold.
- Varierende fuktinnhold vil føre til at trevirket kan sprekke og vri seg. Dette vil sjelden bety noe vesentlig for styrken, men kan ha avgjørende betydning for trekonstruksjonens estetiske og funksjonelle egenskaper.
- Temperatur og fuktighet har størst betydning for å skape et miljø for råtedannelse.
- Kjemisk nedbrytning av treverket kan skje ved påvirkning av vann, oksygen og luftforurensninger som SO₂, gjør treverkets overflate sprø. I forhold til andre materialer er imidlertid treverkets evne til å motstå kjemisk nedbrytning meget stor.
- Ultraviolet lys (UV) vil også bryte ned treets overflate ved at treoverflatens lignininnhold forsvinner og en sitter igjen med en porøs celluloseoverflate som lett angripes av sopp.

4.2 Nedbrytning av arkeologisk materiale i jord og vann

Generelt vil tilgjengelighet til oksygen i luft og vann i jordsmonnet være avgjørende for bevaring av arkeologisk materiale. Det er alminnelig kjent at materialer blir best bevart i oksygenfrie omgivelser som f. eks. myr, sjøbunn (Wasa-skipet), og leire (Osebergskipet). Felles for slike situasjoner er at miljøet er mettet med vann og at vannstrømningen er liten. Dette gir stagnerende og oksygenfrie forhold. I slike oksygenfrie miljøer går den mikrobiologiske aktiviteten meget langsomt, og nedbrytningen går meget sakte.

Nedbrytning av arkeologisk materiale i jord er behandlet i en omfattende litteraturstudie utført i Sverige (Borg et al. 1994). Rapporten omhandler blant annet i detalj to typer av arkeologisk materiale: metaller og benmaterialer.

4.2.1 Biologisk nedbrytning

Den biologiske nedbrytning i jorda er påvirket av jordas vanninnhold og pH-verdi. Vann er essensielt for aktiviteten av alle mikroorganismer. Bakteriene er meget følsomme for tørke og kan ikke forflytte seg vekk fra tørre steder på grunn av sin begrensede bevegelighet. Soppene derimot er tilpasset tørre substrater, hvor de ved hjelp av sine hyfer kan sikre vanntransport fra et sted til et annet.

Vekst av mikroorganismer er sterkt avhengig av vannets pH og dette påvirker også deres aktivitet: nedbrytning. Væskens pH påvirker funksjon av mikroorganismenes enzymer. Enzymene er som regel ikke aktive ved enten for lave eller for høye pH verdier, derfor kan endringer i pH enten fremme eller hemme organismenes aktivitet.

Bakterier flest vokser best i miljøer hvor pH er 6-9, bortsett fra en gruppe

syretolerante (acidofile) bakterier som gror ved ekstremt lave pH (svovelsyredannende bakterier, f.eks. *Thiobacillus*) og luter aktivt ut metallsulfider fra berget.

I motsetning til bakteriene, vokser soppene best i surt miljø. Optimum for de forskjellige soppene kan variere. Muggsopper som vi finner i lag på overflater av steinmonumenter eller fresker har optimal vekst ved høyere pH, i samme intervall som bakterier (Ejechi & Obuekwe, 1996). For trenaedbrytende sopper er optimum vekst ved pH 4,5-5,5, som er den vanlige surhetsgraden vi finner inne i treet. Trenaedbrytende sopper slutter som regel å vokse nær pH 2 (Darrel, 1973) eller blir utkonkurrert av andre prosesser ved pH over 6,5 (Ejechi & Obuekwe, 1996). Ved fullstendig oksygenfrie (anaerobe) forhold i jorda er det bare bakteriene som er aktive.

4.2.2 Kjemisk nedbrytning i jord

Skogsjordas pH er normalt sur. Mikrobielle prosesser i jorda kan lede til forsuring ned til pH 5. Ved antropogen forsuring kan skogsjordas pH bli ennå lavere (Borg et al., 1994). Ved lav pH er det sopper som er mest aktive. Samtidig er pH rundt 5 ikke hemmende for de fleste jordboende sopper. Siden jorda har en enorm bufferende egenskap, og soppene er meget tilpasningsdyktige, er det lite sannsynlig at nedbrytning forårsaket av soppene vil endres dramatisk ved dagens forsurningsnivå.

I jordsmonn som er vel drenert og følgelig har tilgang til oksygen enten fra luft eller via tilstrømning av friskt vann, er forvittringshastigheten påvirket av de samme faktorer som for berggrunnen som ligger i dagen, nemlig saltholdigheten, surhetsgraden, temperatur og fuktighet. Viktig er selvsagt også materialets egenskaper, som f.eks. metallsort, steintype og overflatekarakter.

Av disse miljøfaktorene er det bare pH som påvirkes i vesentlig grad av forurensing. Data fra Sør-Sverige viser at belastning med sur nedbør over mange tiår har ført til lavere pH i jordsmonnet (høyere surhet). Slike data finnes ikke for Norge. Det er imidlertid en rekke andre faktorer som virker inn på jordas pH. Mineralogi og vegetasjon er viktig. Sur jord finnes hovedsakelig i områder med berggrunn og løsmasser av granittisk type fordi disse kalkfattige bergarter er meget motstandsdyktige mot nedbryting og forvitring.

Barskog og lyngheivevegetasjon er karakteristisk for sur jord. Disse plantetyperne produserer organiske syrer som fører til surt jordsmonn. Sur nedbør vil gi ytterligere jordforsuring, men siden jorda allerede er svært sur fra naturens side, er nedgangen i pH liten. Forsuring av jord forårsaket av sur nedbør går derfor meget sakte, og er vanskelig å påvise.

Teoretisk vil sur nedbør kunne føre til vesentlig antropogen jordforsuring bare i områder som mottar nedbør med pH godt under ca. 4,7 og det over land tid. Overvåkingsdata for Norge viser at store deler av Sør-Norge har slike tilførsel (Figur 1). Likevel er nedgangen i pH på grunn av tilførsel av sur nedbør neppe større enn noen få tiendedels pH-enheter. For metaller er det registrert økt

korrosjon når pH <5 og en betydelig økning ved pH <4 (Sederholm et al., 1992).

4.2.3 Nedbrytning i vann

Det er mange forhold som kan påvirke nedbrytning av arkeologisk materiale i ferskvann (marine forhold holdes utenfor her). Blant de viktigste er tilgjengeligheten til oksygen, sedimentering av partikler (nedslamming) og begroing. Lokale utslipp av forurensninger til innsjøer kan forverre bevaringsforholdene for kulturminner i vann. Utslipp fra industri, kommunale avløp, og landbruk kan føre til redusert oksygen, økt næringssaltinnhold og begroing i vann, samt økt partikkeltransport og nedslamming. Disse forholdene er stort sett av lokal karakter og skyldes lokale utslippskilder.

Langtransporterte luftforurensninger (sur nedbør) fører til forsuring av innsjøer og vassdrag i Norge. Verst utsatt er forsuringfølsomme områder i Sør-Norge. På Sørlandet har forsuring av overflatevann ført til nedgang i pH med 0,5 - 1 pH-enheter, økning av giftig aluminium og utbredt skader på fiskebestand. I de senere år har tilførsel av sur nedbør gått noe tilbake som følge av internasjonale avtaler om reduksjon av svovelutslipp til luft. Dette har ført til en forbedring av vannkvalitet i mange innsjøer og vassdrag.

Forsuring (lavere pH) kan føre til økt nedbrytning av metall (korrosjon), karbonat-holdige materialer og betong. Påvirkningsgrad er avhengig av mange faktorer blant annet pH, temperatur og andre kjemiske og fysiske faktorer.

Forsuring kan videre føre til indirekte forverring av vannmiljøet ved at økt nitrogentilførsel og redusert pH ofte gir økt vekst av alger, særlig i rennende vann. Dette kan føre til begroing og nedbrytning av materiale under vann, som for eksempel tregjenstander. Men her er trolig tilgang til oksygen viktigst. I oksygenfritt miljø vil nedbrytningen gå mye langsommere, og andre forhold som pH og innhold av næringsstoffer blir av sekundær betydning.

5 Oversikt over ulike måleprogram

5.1 Innledning

NIVA, NISK og NILU har hatt et betydelig engasjement i de nasjonale overvåkningsprogrammene fra det første, "Sur nedbørs virkning på skog og fisk", startet i 1972 til dagens overvåkningsprogram. Instituttene sine oppgaver har vært koordinert slik at NILU har hatt ansvar for målingene av langtransportert og lokal tilførsel av forurensning, mens NIVA og NISK har hatt ansvaret for å registrere forurensningenes virkning på vann, jordsmonn og skog. Arbeidet har i alle år vært knyttet opp mot Norges internasjonale arbeid for reduksjon av forurensninger i Europa. For NILU er arbeidet knyttet opp mot "European Monitoring and Evaluation Programme" (EMEP), hvor NILU er det kjemiske datasenteret. NIVAs og NISKS arbeid er en del av arbeidet i "UN/ECE Working group of Effects".

Fra 1977 ble overvåkingen i byer og tettsteder organisert i et eget overvåkningsprogram ved NILU. Dette arbeidet ble redefinert i 1994 hvor et større

ansvar ble lagt til kommunale miljøetater og vegkontorene, og hvor NILUs rolle ble av mer kontrollerende og rapporterende art. I tillegg til "Overvåkingsprogram for byer og tettsteder", ble det satt inn store ressurser fra SFT til kartlegging av forurensningssituasjonen i utvalgte områder; "Basisundersøkelsene," med målsetting å modellere forurensningssituasjonen. Basisundersøkelser er gjennomført i Sarpsborg/Fredrikstad-området, Bergen, Drammen og Mo i Rana, i tillegg til større undersøkelser i Oslo og Grenlandsområdet. Modellene som ble utviklet har vært basis for NILUs arbeid med å utvikle ENSIS-modellen (Environmental Surveillance and Information System).

I 1981 ble virkninger på materialer en del av det nasjonale overvåkingsprogrammet ved NILU. Arbeidet hadde helt fra starten som mål å finne dose-respons-ligninger for utvalgte materialer. I 1987 ble det nasjonale programmet omarbeidet og ble en del av UN/ECEs arbeid under "Working Group of Effects".

Som det fremgår av denne oversikten har overvåkingsprogrammene vært godt koordinert. I den følgende gjennomgang av programmene har en valgt å presentere dem adskilt, slik at instituttens ansvar og databaser kommer klart frem.

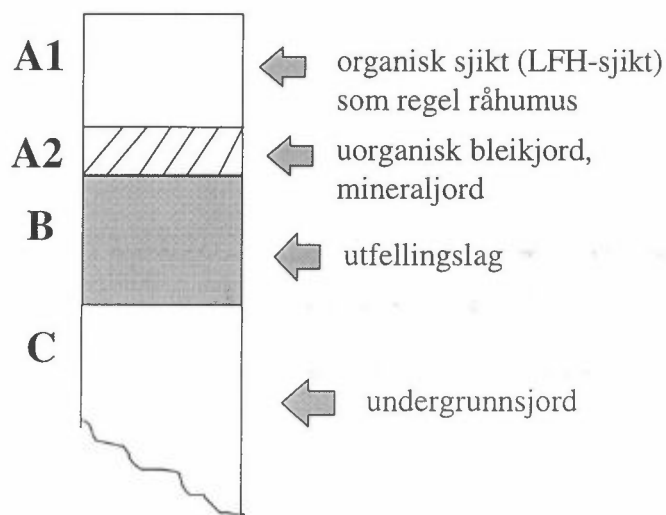
5.2 Overvåking av jord

NISK har ansvar for "overvåking" av jord på flater som enten inngår i Overvåkingsprogram for skogskader (OPS), eller Terrestrisk naturovervåking (TOV).

I vanlig norsk skogsjord (podsol) skiller man som regel mellom 4 forskjellige lag. Det øverste laget (A1, eller LFH-sjikt) kalles ofte for organisk sjikt og er råhumus som består av organiske rester i ulik grad av nedbrytning. Skogsjord (podsol) er karakterisert ved nærvær av et bleikjordsjikt (A2). Dette er mineraljord, et uorganisk sjikt, hvor det har foregått forvitring (avbleking) på grunn av sigevannet fra humus. Ofte har bleikjorda en askegrå farge. Hvis den inneholder mange humuspartikler, kan den også være ganske mørk. En del av det materialet som føres bort fra bleikjorda blir utfelt igjen like under bleikjordsjiktet, i B-sjiktet. Dette sjiktet har ofte sterk rustfarge som skrives seg fra forbindelser av Fe^{3+} . C-sjiktet, eller undergrunnsjord, er temmelig stabil og upåvirket ved forandringene som oppstår i sjiktene over.

Alle jordprøver blir analysert ved NISKs Kjemiske analyselaboratorium (Akkreditering nr. P 005). Følgende analyser blir utført:

1. Innhold av ulike elementer
2. Utbyttbare elementer
3. pH



Figur 2: Oversikt over profiler i jordsmonn

5.2.1 Overvåkingsprogram for skogskader

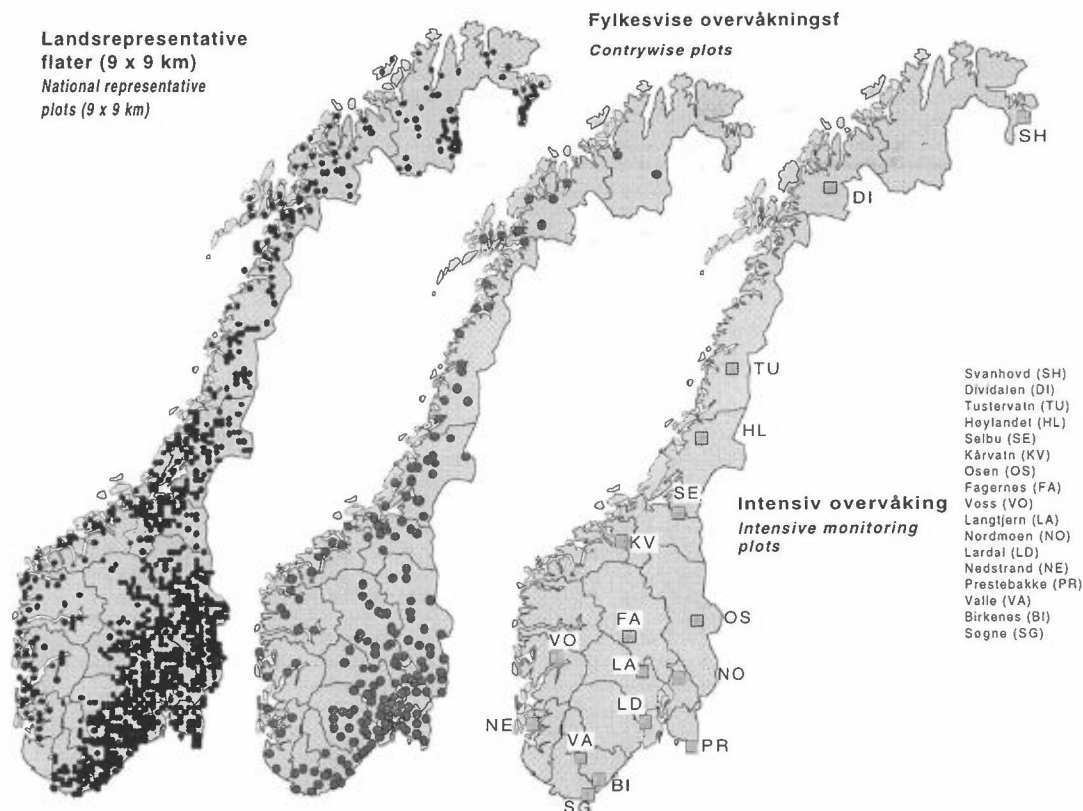
Overvåkingsprogram for skogskader (OPS) ble etablert i 1985. Programmet er forankret i FNs Genevekonvensjon fra 1979, og utformet med basis i UN-ECES 'International Co-operative Programme on Forest Monitoring' (ICP Forests). Norsk institutt for skogforskning (NISK) koordinerer programmet, og i tillegg deltar Norsk institutt for jord- og skogkartlegging (NIJOS), Norsk institutt for luftforskning (NILU), samt skogoppsynet (fylkesskogsjefer og skogbrukssjefer) i gjennomføringen av programmet.

OPS er bygd opp av to hovedtyper datasett:

1. Den landsomfattende overvåkingen foregår på to flatesett:
 - a) *Representativ overvåking* ved årlige landsomfattende undersøkelser av skogens tilstand på mer enn 800 observasjonssteder utlagt i et 9x9 km nett (Figur 3). På hver flate er det også foretatt beskrivelse og kjemisk analyse av jordsmonnet. Hvert observasjonspunkt er en sirkelflate, 250 m² (r=8,9m). Fjellbjørkeskogen overvåkes i et 18x18 km nett (1700 trær). Disse nettene opereres av NIJOS, og utgjør det såkalte *Level 1* i den internasjonale skogskadeovervåkingen (Esser & Nyborg, 1992).
 - b) *Fylkesvise lokale flater* er et nett av overvåkingsflater som ble initiert av Landbruksdepartementet og drives av skogoppsynet i samarbeide med NISK. I hvert skogbrukssjefdistrikt er det fire flater (I hogstklasse. III, IV og V og en i typisk skrantende skog. I alt er det over 700 flater (Figur 3). Også på disse flatene observeres skogens helsetilstand hvert år, og på et mindre utvalg (112) flater er det foretatt kjemisk analyse av jordsmonnet. Observasjonene utføres av skogoppsynet i september måned hvert år.

Innsamling av jordprøver har skjedd på følgende måte:

Prøvetaking av jord på disse flatene er utført på en del av flatene i 1992. Jordprøvene ble tatt fra hele det organiske sjiktet (A1-sjikt, eller LFH-sjikt) og tre prøver fra mineraljord (profilen under det organiske sjiktet) i henholdsvis i 0-5; 5-10 og 10-20 cm dyp under det organiske sjiktet.



Figur 3: De tre ulike nettverkene av overvåkingsflater i Norge (SFT, 1997).

- Den intensive overvåkingen foregår på permanente flater i eldre skog på 17 steder fordelt over hele landet (Figur 3). På disse flatene utføres det en rekke målinger med hensyn på økosystemets tilstand. Disse flatene kalles også «Level 2» flater, og er Norges bidrag til "ICP Forests-systemet" for intensive undersøkelser. De fleste flatene ble etablert i 1986/87. På flatene undersøkes **trær** og **vegetasjon**, **luft-** og **nedbørkvalitet/mengde** (i åpent lende på NILUs målestasjoner), **nedbør i skogbestand**, **strøfall**, **jordkjemisk analyse** (prøvestikk fra jordsmonnets ulike jordsjikt, humussjiktet og tre sjikt mineraljord. Prøvene forbehandles og analyseres blant annet for de viktigste elementer, pH og plantenæringsstoffer), **jordvannskjemi** (prøver av jordvann tas ut fra jordsmonnet ved hjelp av et såkalt tensjonslysimeter rett under humussjiktet, på 15 og 40 cm. Det analyseres blant annet for pH, ledningsevne, Ca, Mg, K, Na, Al, Fe, NO₃, NH₄, SO₄)

Innsamling av jordprøver har skjedd på følgende måte:

Prøvetaking av jord ble utført ved etablering og hvert femte år deretter. Jordprøvene ble tatt med slissebor, i dybde max. 10 cm ned i C-sjiktet, dvs. hele det organiske sjiktet ble tatt (A1-sjikt, eller LFH-sjikt), hele bleikjordsjikt (A2-sjikt), hele utfelligslaget (B-sjikt) og inntil 10 cm av undergrunnsjord, C-sjikt (se Figur 2). Siden dybde på sjiktene varierer, varierer også dybde på prøvene, men den nedre grensen er alltid 10 cm ned i C-sjikt.

5.2.2 Program for terrestrisk naturovervåking

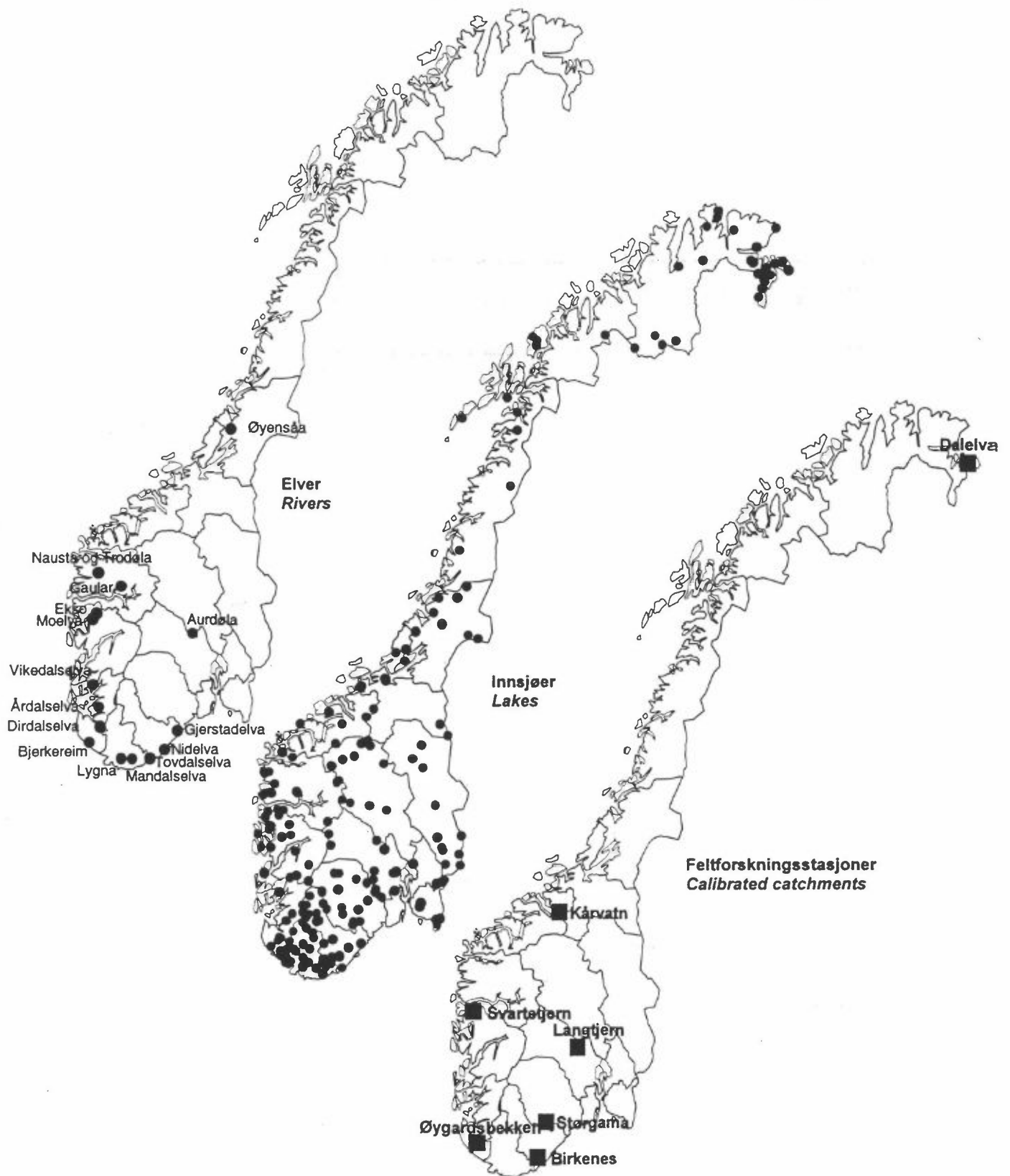
NISK har ansvar for jorddelen av "Program for terrestrisk naturovervåking" (TOV), hvor NILU på oppdrag fra Direktoratet for naturforvaltning utfører overvåking av nedbørkjemi på 6 stasjoner. Jordprøvene er tatt på samme måte som på flatene i den intensive overvåkingen.

5.3 Overvåkingsprogram for vann

Forurensningenes virkninger på vannkvalitet følges gjennom overvåking av elver, innsjøer og feltforskningsprogram. Virkninger på fisk og dens næringsdyr følges ved regionale undersøkelser av bunndyr, zooplankton og fiskepopulasjoner i elver og innsjøer. Disse aktivitetene inngår i programmet "Overvåking av langtransportert forurenset luft og nedbør". NIVA er ansvarlig for dette arbeidet.

Den vannkjemiske overvåkingen startet i 1980, og lokalitetene ble valgt ut fra SNSF-prosjektets ("Sur nedbørs virkning på skog og fisk") aktiviteter og det arbeidet som til da var utført ved det daværende Direktorat for vilt og ferskvannsfisk (DVF). Programmet omfatter undersøkelser i vassdrag, innsjøer og feltforskningsområder (Figur 4). Analyseprogrammet omfatter pH, konduktivitet, kalsium, magnesium, natrium, kalium, sulfat, nitrat, alkalitet og klorid, to former av aluminium, organisk stoff og total nitrogen. Alle analysene er foretatt for alle områdene.

14 vassdrag på Sør- og Vestlandet, ett på Østlandet og ett i Nord-Trøndelag overvåkes med en prøve hver måned, og hver 14 dag under vårflommen. Vassdragene er valgt ut fra størrelse og at de er følsomme for forurening.



Figur 4: Lokalteter som inngår i det vannkjemiske overvåkingsprogrammet i 1997 (Tørseth et al., 1997).

Transport og omsetning av sure forbindelser overvåkes i 7 feltforskningsområder. På disse stasjonene tas døgnlige eller ukentlige nedbørprøver, ukentlige vannprøver, og vannføringen registreres kontinuerlig. Alle områdene er valgt ut fra spesifikke formål.

100 innsjøer fra "1000-sjøers undersøkelsen 1986" fordelt over hele landet overvåkes med prøvetaking hver høst. I 1996 ble utvalget av innsjøer utvidet til 200. De nye innsjøene ble valgt blant de 1500 innsjøene som inngikk i "Regional innsjøundersøkelse 1995". De innsjøene som overvåkes er alle følsomme for forurening.

Oksygeninnhold registreres ikke i dette overvåkingsprogrammet. Innholdet av oksygen er stedsspesifikt og må måles separat for hvert sted. Generelt kan man si at grunt vann, 0-1m, har god tilgang på oksygen.

5.4 Overvåkingsprogram for luft og nedbør

5.4.1 "Overvåking av langtransportert forurenset luft og nedbør"

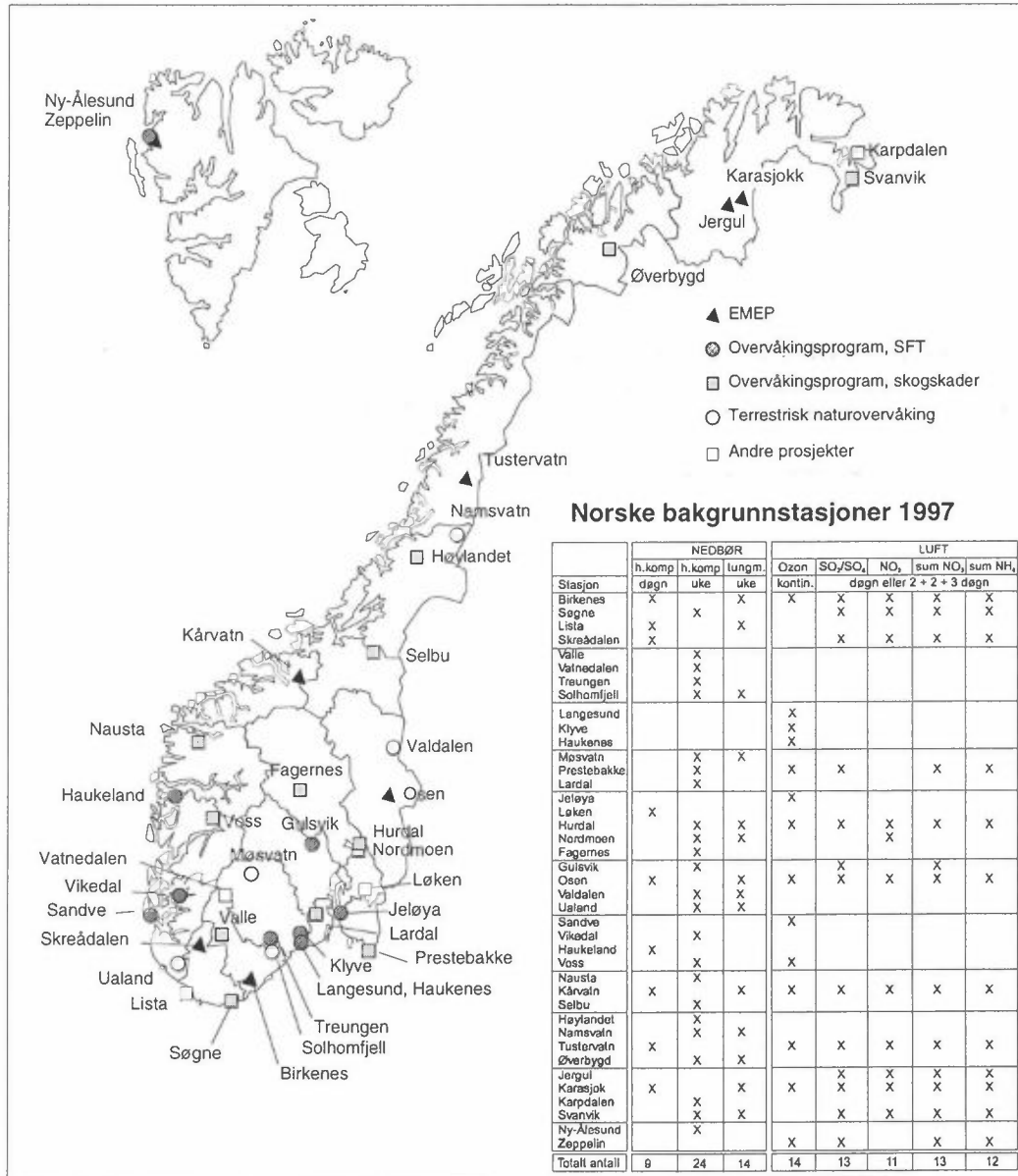
Måleprogrammet "Overvåking av langtransportert forurenset luft og nedbør" representerer et omfattende bakgrunnsstasjonsnett hvor i alt 40 norske stasjoner inngår. Programmet startet i forlengelsen av prosjektet "Sur nedbørs virkning på skog og fisk" (SNSF, nevnt nedenfor) i 1980 i regi av SFT. Nettet inkluderer bl.a. 7 stasjoner som inngår i EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme), som er et internasjonalt måleprogram.

Hovedmålet med prosjektet er:

- gi informasjon om tilstand og utvikling av forurensningssituasjonen på kort og lang sikt.
- registrere virkningen av iverksatte tiltak og danne grunnlag for vurdering av nye forurensningsbegrensende tiltak.
- påvise eventuell uheldig utvikling i resipienten på et tidlig tidspunkt.

Figur 5 og Tabell 4 gir informasjon om stasjonenes beliggenhet, tilhørende overvåkingsprogram og forurensningsparametere som måles. En komplett oversikt over NILUs målestasjoner og driftsperioder er gitt i Vedlegg C, (Tabell 1C).

Data- og evalueringsrapporter utgis årlig, og alle data foreligger i NILUs database.



Figur 5: Lokalteter som inngår i overvåkingsprogrammet for atmosfærisk tilførsel og bakkenær ozon i 1997 (Lükewille et al., 1998).

Tabell 4: Parametre som ble målt på de ulike stasjonene i 1997.

Stasjon	LUFT										NEDBØR		
	Kontin.	Døgnlig måling					2+2+3 døgn				døgn	uke	uke/mnd
	Ozon	SO ₂ /SO ₄	NO ₂	sum NO ₃	sum NH ₄	Lt	SO ₂ /SO ₄	sum NO ₃	sum NH ₄	Lt	h.komp	h.komp	tungm.
Birkenes	X	X	X	X	X	X					X		X
Søgne			X				X	X	X			X	
Lista											X		X
Skreådalen		X	X	X	X						X		
Valle												X	
Vatnedalen												X	
Treungen												X	
Solhomfjell												->1/4	->1/4
Klyve	X												
Langesund													
Haukenes	X												
Møsvatn												X	X
Prestebakke	X						X	X	X			X	
Lardal												X	
Jeløya	X												
Løken											X		
Hurdal	X		X				X	X	X	X		X	X
Nordmoen			X									X	->1/4
Fagernes												X	
Gulsvik							X	X				X	
Osen	X	X	X	X	X						X		X
Valdalen												X	X
Ualand												X	X
Vikedal												X	
Sandve	X												
Haukeland											X		
Voss	X											X	
Nausta												X	
Kårvatn	X	X	X	X	X						X		X
Selbu												X	
Høylandet												X	
Namsvatn												->1/5	->1/5
Tustervatn	X	X	X	X	X						X		
Øverbygd												X	X
Jergul		->1/4		->1/4	->1/4								
Karasjok	X	X	X	X	X						X		X
Karpdalen												X	
Svanvik			X				X	X	X			X	X
Ny-Ålesund												X	
Zeppelin	X	X		X	X								
Totalt antall	13	8	10	8	8		5	5	4	1	9	24	14

Kontin. = kontinuerlige målinger.

2+2+3 døgn = målefrekvens

sum NO₃ = NO₃ + HNO₃

sum NH₄ = NH₄ + NH₃

h.komp. = mengde (mm), pH, ledn.evne, SO₄, NO₃, Cl, NH₄, Ca, K, Mg, Na

tungm. = Pb, Cd og Zn. For stasjonene Solhomfjell, Ualand, Møsvatn, Valdalen, Namsvatn, Øverbygd, Svanvik og Karpdalen er det også bestemt As, Ni, Cu, Co og Cr.

Lt = Måling av Mg, Ca, K, Na og Cl i luft.

5.4.2 *Sur nedbørs virkning på skog og fisk*

Norges landbruksvitenskapelige forskningsråd (NLVF) og Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Forskningsråd (NTNF) startet i 1972 prosjektet "Sur nedbørs virkning på skog og fisk" (SNSF-prosjektet). Prosjektet som ble avsluttet i 1980, hadde 13 målestasjoner spredt over hele landet.

En oversikt målestasjoner og måleperioder er gitt i Vedlegg C, (Tabell 1C).

Stasjonene hadde målinger av nedbørkjemi på månedsbasis, og i noen tilfeller er tidsoppløsningen enda bedre. Dataene foreligger i database på NILU og i prosjektrapporter (Overein & al., 1981). De målte parameterne var: mm nedbør, pH samt andre viktige ioner i nedbøren (H^+ , SO_4 , NO_3 , NH_4 , Cl, Na, Ca, Mg og K). På utvalgte stasjoner (som Birkenes) startet en tidlig, (1973), å registrere SO_4 og partikler i luft, og fra 1978 også SO_2 .

5.5 **Overvåkingsprogram for materialer**

Materialer ble en del av det statlige overvåkingsprogrammet fra 1981. Programmet omfattet stål, sink, kopper og aluminium eksponert 45° mot syd, horisontalt og vertikalt under tak over 1, 2, 4 og 8 år. Parallelle målinger av nedbør og nedbørkvalitet (SO_4^{--} , Cl, pH og ledningsevne), samt SO_2 og NO_2 de fleste steder. I tillegg til de vanlige overvåkingsparametere ble aerosolavsetningen av SO_4^{--} og Cl målt, samt temperatur og relativ fuktighet.

Prosjektet startet med tre stasjoner i Østfold: Hoff, Alvim og Borregaard. Disse stasjonene var også en del av basisundersøkelsen i området. I 1982 ble programmet utvidet til Oslo og Bergen og året etter til Svanvik. Ulike dose-respons-funksjoner ble utviklet i prosjektet (Anda og Henriksen, 1988).

I og med starten på "UN/ECE ICP Materials-programmet" i 1987, medførte det at det nasjonale overvåkingsprogrammet ble revidert. Deler av det ble avsluttet, og Birkenes kom med. Programmet har samme miljømåleprogram som på en EMEP-stasjon, samt målinger av temperatur, relativ fuktighet og soltimer. Fase 1 av programmet ble avsluttet i 1995 og resultatene er presentert i Tabell 1, kap. 4.1.2.

Måleprogrammet og stasjonssammensetningen i "UN/ECE ICP Materials-programmet" reflekterte problemstillingene som var aktuelle på 1980-tallet. Dagens forurensningssituasjon medfører at en ønsker å studere effekten av NO_2 og O_3 som hovedforurensninger. Fase 2 av programmet startet derfor i 1997 med et tilpasset måleprogram på 32, stasjoner hvorav 9 stasjoner var nye.

Før "Overvåkingsprogram for materialer" startet ble det gjennomført flere større feltstudier hvor korrosjonshastighet og miljøparametre ble registrert. De nedlagte stasjonene, hvor en har data for korrosjonshastighet og miljømålinger, er listet blant korrosjonsstasjonene i Tabell 1C i Vedlegg C.

5.5.1 *Enkeltstående måleprosjekter*

For øvrig kan det nevnes at det finnes en rekke målestasjoner hvor kjemiske og meteorologiske parametre har blitt målt i tilknytning til hovedsakelig mindre

prosjekter. Måleperiodenes lengde har da variert fra under et år til flere år, og det dreier seg ofte om større industriområder. Det finnes slike data fra begynnelsen av 1970-årene. Måledataene foreligger i NILUs databaser eller for eldre prosjekter kun i rapportform.

Et korrosjonsprosjekt som kan være av spesiell interesse i denne sammenheng, er et prosjekt i samarbeid med Elektrisitetsforsyningens forskningsinstitutt (EFI) og NILU (Anda og Haagenrud, 1984). Prosjektet startet høsten 1981 og varte ca. 1¹/₂ år. En av målsetningene med prosjektet var å finne sammenhengen mellom havsaltmengde og korrosivitet som funksjon av avstand fra kysten.

5.6 Overvåkingsprogram på lokal skala

5.6.1 Overvåkingsprogram for tettsteder

Registrering av SO₂ ble startet i enkelte byer på slutten av 1950-tallet. Målingene ble gjennomført periodevis, gjerne om vinteren hvor forurensningen var størst. Fra slutten av 1960-årene ble det gjennomført mer systematiske målinger i regi av oljeselskapene. Tidlig på 1970-tallet startet NILU sine målinger på oppdrag fra kommuner og industrien.

Fra 1977 finansierte SFT et overvåkingsnett for byer og tettsteder i Norge (SFT, 1995). Fra 1977 til 1985 var hovedkomponentene SO₂, sot, bly og partikulært sulfat. Først i 1986 ble NO₂ en del av overvåkingsprogrammet og da normalt bare om vinteren (Hagen, 1995). Fra 1994 ble måleprogrammet forandret totalt. Lokale myndigheter og vegkontorene fikk da hovedansvaret for overvåkingen med en viss økonomisk støtte fra sentrale myndigheter.

De første årene var overvåkingsnettets meget omfattende. SO₂ ble målt på 35 stasjoner i 27 byer og tettsteder. I tillegg ble det tidlig igangsatt målinger av SO₂ langs grensen til nåværende Russland. Sot, bly og partikulært sulfat ble også målt på de samme stasjonene. Et eksempel på spesialmålinger er målinger av fluorid i Årdal som pågikk i perioden 1980-1994. Fluorid og flussyre kan gi angrep på flere typer materialer (dose-respons-ligninger for fluorid er ukjent for alle aktuelle materialer).

SO₂ er en spesielt viktig parameter for å evaluere nedbrytningen av materialer, men også sot og sulfat er av interesse, spesielt på porøse materialer som puss og enkelte steintyper hvor det dannes sorte skorper av gips (Nord and Tronner, 1996).

Det finnes gode oversikter med historiske data fra mange norske byer og tettsteder se Vedlegg C, (Tabell 2 C). Tabell 2 C gir en oversikt over byer og tettsteder med måleprogram. En svakhet ved datasettene er at en i den første tiden ikke hadde modeller som kunne brukes til å prediktere de romlige fordelingene av forurensningene. Et annet problem for bruken av dataene er at lite av dataene er lagret elektronisk. Dataene må derfor tas fra rapporter. For å bruke verdiene til å vurdere materialbelastningen trengs det stort sett bare års- og halvårsverdier. Disse er generert og rapportert i årsrapportene. Døgn- og månedsverdier er rapportert i kvartalsrapporter.

Dagens måleprogram er fokusert på helseproblemer og omfatter i hovedsak NO₂ og PM₁₀ (partikler). NO₂ er vist å være aggressiv ovenfor en del materialer i laboratorieforsøk. Til nå er det meget få dose-respons-ligninger med NO₂ som er utviklet fra feltforsøk. Det eksisterer en ligning for glass. Siktepunktet for nåværende fase av "UN/ECE ICP Materials-programmet" er å skaffe slik informasjon nå som SO₂-forurensningen har fått mindre betydning.

I dagens situasjon er det bare i områder med stor SO₂-forurensning, som f. eks. ved Borregaard fabrikker i Sarpsborg hvor SO₂ måles. I byer med luftovervåking med DOAS-instrumenter registreres også SO₂.

I tillegg til overvåkingsprogrammet har SFT finansiert spesielle "Basisundersøkelser". Både i Fredrikstad/Sarpsborg, Drammen og Bergen har det vært utført målinger, emisjonsstudier og modellberegninger av forurensningsforholdene. I disse undersøkelsene var eksponering av metaller med og spesielle dose-respons-ligninger ble utviklet for områdene. Emisjonsoversikter og modellering av forurensninger er også utført i Oslo. Disse undersøkelsene kan gi mye informasjon om luftens aggressivitet over større byområder. I dag kan disse beregningene gjentas med basis i emisjonsoversikter som SSB utgir.

5.7 Modellberegninger

Man kan grovt dele luftforurensningen som utgjør totalbelastningen i 4 hovedkategorier:

- langtransportert forurensning (hovedsakelig geografisk betinget)
- forurensning fra trafikk (avstand til vei, trafikkmengde)
- utslipp fra industri (spesielle utslipp fra ulike typer industri)
- utslipp fra fyring (avhengig av befolkningensmengde og boligstruktur)

I tillegg kommer klimatisk påvirkning.

I bakgrunnsområder anser en at en bare har langtransporterte forurensninger. I Norge benyttes det flere modeller til å beregne belastningen av langtransporterte forurensninger i et rutenett over landet. Modellene er:

- KRIGING er en statistisk ekstrapolasjonsteknikk basert på observasjoner
- EMEP Acid Deposition Lagrangian Model er basert på klimatiske modeller og emisjonsoversikter
- EMEP Eulerian Model er også basert på klimatiske modeller og emisjonsoversikter.

KRIGING anvendes av NILU til å modellere belastninger i et rutenett på 50 x 50 km over Norge.

EMEP-modellene benyttes av Det norske meteorologiske institutt (DNMI) for beregninger på europisk skala, men kan også benyttes nasjonalt. Den Lagrangske modellen beregner i et rutenett på 150 x 150 km og er den mest benyttede modell i EMEP. Den Eulerske modellen beregner i et rutenett på 50 x 50 km og krever

større regnekapasitet. For samme periode skal i prinsippet resultatene fra denne beregningen være lik resultatene fra KRIGING-modellen.

For modellering på lokal skala finnes det flere typer modeller som brukes til beregning av utslipp og spredning. Det er egne modeller for beregning av forurensning fra enkeltkilder som industrianlegg (eksempelvis CONCX, KILDER). Andre modeller brukes til å beregne forurensning fra trafikk.

Noen modeller regner time-til-time-verdier (EPISODE), og der brukes i størst mulig grad faktiske observasjoner for meteorologiske forhold. Andre modeller regner langtidsmiddelverdier, som f.eks uker, måned eller år (CONCX, CONDEP, KILDER). I disse modellene brukes statistiske data for meteorologien. Modellene beregner forurensningen i ulike avstander fra anlegget.

I forbindelse med nyetablering eller utvidelse av driften i ulike typer næringer eller også ved utbygging av veier og trafikkanlegg utarbeides det en konsekvensutredning. I en slik utredning er utslipp til luft og spredning og virkninger en viktig del.

AirQUIS er en del av ENSIS-systemet (Environmental Surveillance and Information System), utviklet spesielt for kartlegging og overvåking av luftkvalitet. Systemet inneholder databaser og modeller for utslipp, spredning og beregning av effekter. Systemet er fleksibelt og kan tilrettelegges for spesifiserte behov. AirQUIS er GIS-basert og gir konsentrasjoner av ulike forurensningsparametere koblet til et geografisk informasjonssystem.

Modellering av korrosjonsforholdene for et geografisk område ble første gang utført ved NILU i "Basisundersøkelsen av luftkvaliteten i Sarpsborg og Fredrikstad 1981-1983" (Haagenrud et al., 1984). Modellen er senere forbedret i flere prosjekter. I de senere år er modellen koblet opp mot ENSIS AirQUIS, blant annet i SFTs LEVE-prosjekt (Glomsrød et al., 1996). Arbeidet med å etablere modellarbeidet som en egen modul CorrCost i AirQUIS er startet og vil etter planen foreligge som en modul i ENSIS 2.0 våren 1999.

I forbindelse med utredning av veiforurensningsproblemer har NILU utviklet flere modeller. Den viktigste av disse modellene er VLUFT, som ut fra informasjon om veier, trafikk og bygninger/befolkning beregner utslipp og spredning av forurensninger, samt gir konsentrasjoner av forurensning i ulike avstander fra veiene og beregner befolkningseksponering.

VLUFT beregner forurensning av NO₂, svevestøv (PM₁₀) og CO₂ (klimagass). NILU arbeider kontinuerlig med å forbedre beregningsverktøyene. For tiden konsentreres arbeidet om å forbedre beregningsmetoden for svevestøv som følge av oppvirvling av veistøv fra kjørebane.

Beregningsverktøyet VLUFT har gjort det mulig å kartlegge forurensningsnivået langs hele veinettet i Norge. Gjennom Vegdirektoratets Veiplanarbeid (NVVP) er alle veier i Norge lagt inn i en database med data for trafikk, veigeometri,

bygninger, etc. Dette gir de nødvendige inngangsdata til beregningene med VLUFT. Resultater fra beregninger med VLUFT legges tilbake i Vegdatabanken. Det finnes enkle avstandsfunksjoner for avstander opp til 500 m fra veiens senterlinje. Disse gir bidraget fra veien ved hjelp av interpolasjon. Det antas i disse funksjonene en vindhastighet på 1m/s (høy forurensning ved lav vindstyrke).

5.8 Meteorologiske stasjoner

Som det fremgår av kapitlet om nedbrytningsmekanismer (Kap. 4), påvirkes prosessene også av de lokale meteorologiske forhold. Det er derfor naturlig at SFTs miljødata sees i sammenheng med det målenett som Det norske meteorologiske institutt (DNMI) har i Norge.

DNMI har et omfattende nett av meteorologiske stasjoner (pr. 1995 var antallet 757) spredt over hele landet. De har noe ulik utrustning, og en kan således ikke hente like mange meteorologiske parametere fra alle stasjonene. Nettet er minst tett i store deler av Hedmark, Nord-Trøndelag (unntatt rundt Trondheimsfjorden) og Finnmark, men selv i Finnmark er det 40 stasjoner (pr. 1995).

Fra DNMI foreligger stasjonskart (målestokk 1:2 mill) over samtlige stasjoner og typer stasjoner. Typer stasjoner er som følger:

- **Nedbørstasjon**
Stasjon som måler nedbør og snødybde en gang i døgnet – kl.07 eller 08, samt vurderer nedbørslag og snødekkets utbredelse. Observasjonene sendes til DNMI en gang i uken.
- **Værstasjon**
Stasjon som primært benyttes for værvarsling, men den blir også brukt for klimaformål. Stasjonen er manuelt betjent og sender observasjoner i synopkode til DNMI 3-9 ganger i døgnet. I tillegg til instrumentelle observasjoner av lufttrykk, temperatur, fuktighet, vind, nedbør og snødybde tas det skjønnsmessige observasjoner av skydekke, skytyper, skymengde, skyhøyde, sikt, værtype og markas tilstand.
- **Klimastasjon**
Stasjon som primært er opprettet for klimaformål. Den er manuelt betjent og har som regel et noe mindre daglig måleprogram enn en værstasjon. Observasjonene sendes til DNMI en gang i måneden.
- **Automatstasjon**
Stasjon som automatisk tar instrumentelle observasjoner som blant annet lufttrykk, temperatur, fuktighet, vind og nedbør. Data registreres vanligvis hver time. Stasjonen sender enten data til DNMI over telenettet eller samler data i spesielle lagringsenheter.

DNMI gir månedlig ut klimatologiske oversikter fra et utvalg av stasjonene. De meteorologiske data foreligger i dag på data, og kan bestilles fra DNMI etter eget ønske og behov.

Det finnes også andre institusjoner som kan ha meteorologiske målinger. Disse er ikke alltid lett tilgjengelige, og det er også usikkert om de lagres over lengre tid, og i hvilken form dataene finnes. Slike leverandører av meteorologiske data kan være:

- Statens forskningsstasjoner for landbruk
- Statens Vegvesen
- Enkelte kommuner, brannstasjoner og større industrier kan også ha slike målinger (eksempelvis Norsk Hydro på Rafnes).
- NILU

6 Hva SFTs databaser kan benyttes til

SFTs databaser gir informasjon om miljøets betydning i et stort geografisk område av landet. For mange formål vil databasen kunne brukes til en vurdering av miljøets og forurensningenes betydning for kulturminner. En svakhet ved bruk av databasen er at en ikke har tilstrekkelig kunnskap om nedbrytningsmekanismene for enkelte materialgrupper. En slik materialgruppe er stein. Her kjenner en dose-respons-funksjonen for enkelte kalkholdige steintyper, mens svært mange kulturhistoriske bygninger og de fleste helleristingsfeltene er av eller i andre bergartstyper.

For store deler av kysten er klorid en viktig nedbrytningsparameter. Klorid i nedbør måles i Overvåkingsprogrammet. Dagens dose-respons-ligninger er stort sett basert på et datasett hvor kloridkonsentrasjonene er små og som oftest uten betydning for nedbrytningen.

En usikkerhet er om dataene har ekstrapolasjonsverdi ut over målestedet. I luft er dette lettere enn i vann og jord. Kulturminner eksponert for luft er geografisk kjent, og forurensningene fordeler seg på tvers av topografiske ledelinjer som daler. I vann og jord er det en mindre del av kulturminnene en kjenner beliggenheten til, og forholdene kan være vanskeligere å prediktere.

6.1 Vurdering av databasen for luft og nedbør

Kulturminner eksponert for luft befinner seg både i landlige og urbane områder. Blant de parametre som måles i overvåkingsprogrammene finner en mange av de viktigste nedbrytningsparametrene som benyttes i dose-respons-ligningene. De viktigste i luft er SO_2 , O_3 , NO_2 , og sur nedbør. NO_2 er viktig for å beregne O_3 -mengden i byer siden en god korrelasjon mellom O_3 og NO_2 er dokumentert i programmet "UN/ECE ICP Materials".

Både på nasjonalt og lokalt nivå finnes det modeller som kan prediktere forurensningssituasjonen i et rutenett. I bakgrunnsområder er rutestørrelsen 50 x 50 km eller 150 x 150 km, mens nettet i byer er nede i 500 x 500 m. Konsentrasjonene i bakgrunnsområdene beregnes ut fra EMEPs emisjonsmodell ved at en kjenner til utslippsfaktorene for landene i Europa. Det norske meteorologiske institutt (DNMI), er ansvarlige for modelleringen. Ved NILU beregnes konsentrasjonene i rutene ved hjelp av KRIGING. For byer i Norge kan

konsentrasjonene modelleres i ENSIS AirQus. Denne er også basert på emisjonsoversikter og vindmodeller for området. En tidlig utgave av ENSIS er i dag i drift i Oslo og Drammen. Den nye versjonen ENSIS 2.0 er installert for Sarpsborg/Fredrikstad området. I tillegg til forurensningsparametrene er det nødvendig å ha kjennskap til midlere verdier for temperatur og relativ fuktighet i rutene. Dette kan skaffes som middelverdier i rutenett fra DNMI. Det er mer komplisert å gi nøyaktige opplysninger om klimaparametre i et tettere rutenett som 500 x 500 meter, siden topografien vil være svært avgjørende. I de fleste tilfellene hvor en har hatt behov for klimadata for et byområde, har en antatt at klimaet er likt over hele området.

I SFTs LEVE-prosjekt (Glomsrød et al., 1996) ble levetiden til materialer og kostnadene for materialskadene for hele Norge beregnet. For Oslo ble det benyttet en egen modul CorrCost innen ENSIS til å beregne levetider og kostnader. I CorrCost modulen har en hittil benyttet standard priser for vedlikehold til å beregne kostnader. Vedlikehold av kulturminner stiller som regel spesielle krav til materialer og håndverk og er derfor mer kostbart enn normalt vedlikehold. En videreutvikling av CorrCost-modulen til å omfatte kulturminner er en av målsettingene i EU-prosjektet REACH som NILU deltar i.

Overvåkingsprogrammet for tettsteder i tiden fra 1977 til 1994 inneholder tilstrekkelig med forurensningsdata til at en kan beregne korrosjonshastighet eller levetid for vedlikehold for målesteder som har vært med i programmet. Hvor representative disse er for tettstedene må vurderes ut fra målestasjonens beliggenhet i forhold til forurensningskildene. Ved NILU ble en slik vurdering utført for et stort antall byer og tettsteder i 1986 (Hagen og Schjoldager, 1986). På slutten av måleperioden for overvåkingsprogrammet var det færre store kilder i de fleste byer. Derved fikk biltrafikk og fyring større betydning for forurensningsnivået. Hvis en ser bort fra gatestasjoner, kan en anta at målingene er blitt mer representative for større deler av byene på slutten av måleprogrammet enn ved starten. På steder med lokal forurensning har langtransporterte forurensninger mindre effekt. I Overvåkingsprogrammet for tettsteder ble nedbørkjemiske data ikke registrert. De nedbørkjemiske parametrene som skal inn i dose-respons- ligningene, tas derfor fra Overvåkingsprogrammet ved beregninger med KRIGING eller med EMEP-modellene og suppleres med nedbør fra nærmeste representative DNMI-stasjon.

For kulturminner som er fritt eksponert for luft, er det mulig å modellere dose-respons-ligninger basert på de kjemiske målingene fra Overvåkingsprogrammet for langtransporterte luftforurensninger ved å benytte ekstrapolasjonmodellen KRIGING i et 50 x 50 km rutenett. EMEP-modellering i et rutenett på 150 x 150 km eller helst 50 x 50 km vil kun gi det samme bildet av situasjonen i området ut fra emisjonsoversikter. Hvis en skal vurdere virkningene på et spesifikt hus, må en ta hensyn til svært mange faktorer som ikke er i databasen og hvor spesialister på kulturarv og vedlikehold av eldre bygninger må inn. Det lokale miljøet kan også være forskjellig fra gjennomsnittet i ruten, samtidig som det vil være store forskjeller i mikromiljøet på ulike deler av bygget. Resultatet fra en modellering vil derfor primært kunne brukes til å beskrive forskjeller i risiko for nedbrytning i ulike deler av landet og kun for materialer hvor dose-respons-ligningene er kjent.

Gjennom årene har NILU bygd opp en database for nedbørkjemi på et stort antall stasjoner i landet (se Vedlegg C, Tabell 1 C). Resultatene fra disse stasjonene vil være svært nyttige hvis en skal vurdere lokale forhold innen en rute og for å vurdere usikkerheten i modellenes resultater.

For byer og tettsteder er det kun de stedene hvor målinger er gjennomført, hvor en kan justere beregningene basert på EMEPs modellarbeid. Disse stedene er visst i Vedlegg 1, Tabell 2 C. For målingene i perioden fra 1977 til 1994 er utvalget av miljøparametere vel egnet til å beregne det lokale bidraget til nedbrytningen. Etter 1994 er det svært få steder hvor SO_2 blir målt, og NILUs målinger omfatter NO_x og PM_{10} i vinterhalvåret. Siden en årsak til revurderingen i 1994 var at SO_2 -nivået var blitt mye lavere de fleste steder, vil en rimelig antagelse være at en fremdeles har et nivå nær eller lavere enn det en hadde i 1994. For mindre steder vil en slik antagelse kunne benyttes til beregninger av korrosjonshastighetene for ulike materialer. I de byer hvor ENSIS er installert er det mulig å gjøre en betydelig bedre kartlegging av belastning og korrosjon i et 500 x 500 meters nett. For det enkelte bygg vil en ha de samme reservasjonene som i landlige områder. Det viktigste vil igjen være at en kan beregne ulik risiko for nedbrytning i rutene i et rutenett.

6.2 Vurdering av databasene for jord og vann

Kulturminner i jord er primært arkeologisk materiale. Bortsett fra de arkeologiske levninger som er synlige på overflaten, så er det som regel et hovedproblem at en ikke vet hvor materialet befinner seg. Det er mange mulige nedbrytningsmekanismer i jord og biologisk nedbrytning er sannsynligvis den viktigste. Kjemisk nedbrytning er ofte avhengig av pH i jordsmonnet, men det er imidlertid ofte oksygentilførselen som vil bestemme nedbrytningshastigheten. Jordundersøkelser i Norge er for det aller meste blitt foretatt i skogsmark og pH som en del av jordsmonnets tålegrenseevaluering blir alltid målt når en foretar jordanalyser. For skogsterreng vil de landsrepresentative flatene vært velegnet til å gi en første indikasjon om risiko for nedbrytning. Siden målingene bare er gjennomført en gang, er det vanskelig å bruke dem til trendanalyser. De 17 intensive flatene vil kunne gi mer informasjon om forandringer over tid. Den tredje målekampanjen er planlagt i år 2000.

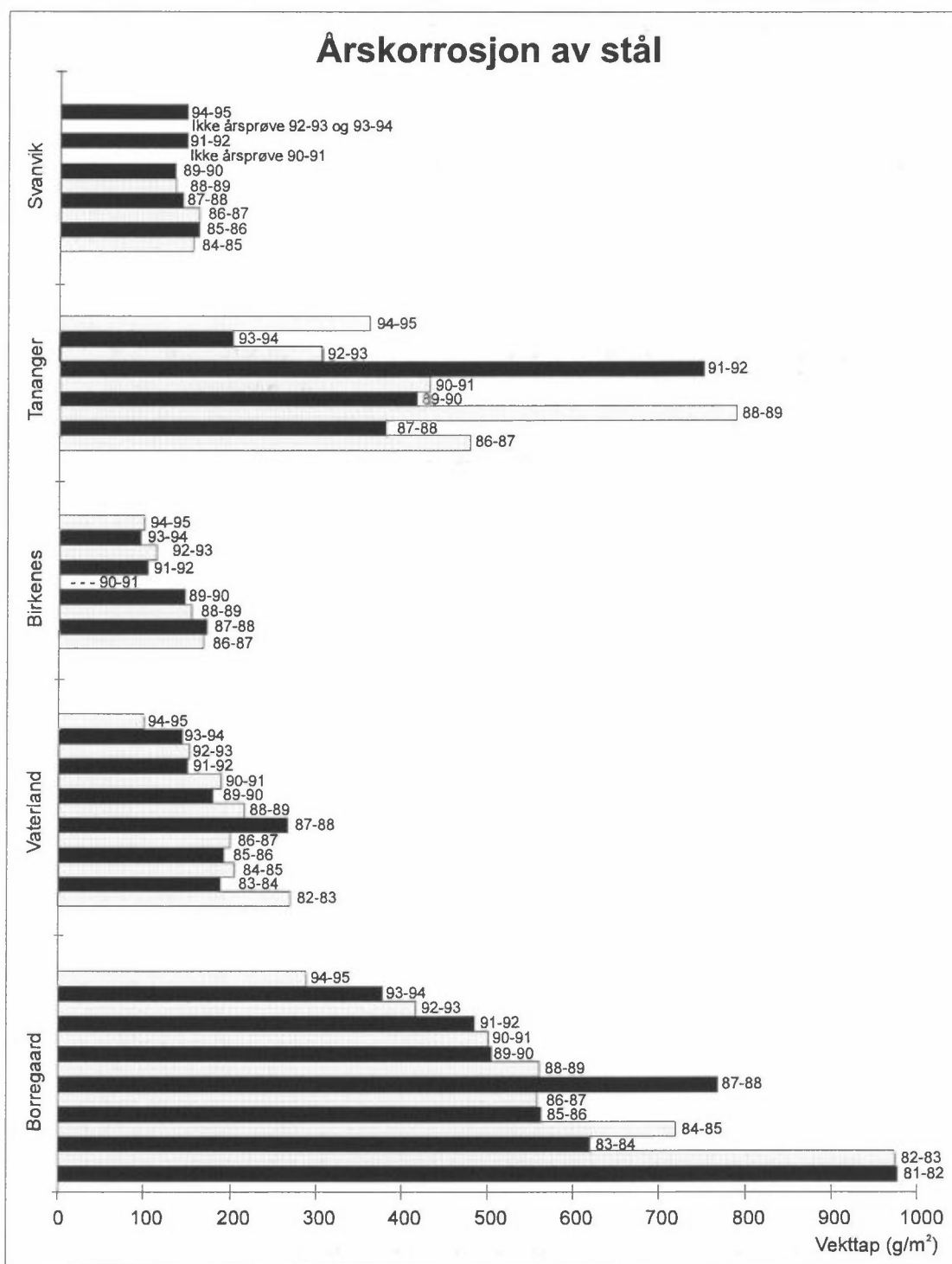
Nedbrytningshastigheten i jord vil normalt være størst i A1-sjiktet og minst i C-sjiktet. A1-sjiktets størrelse vil øke med nedbørmengden og sannsynligvis også med surheten i nedbøren. Risikoen for nedbrytning er derfor størst i Sør- og Vest-Norge hvor nedbørmengden og surheten i nedbøren er størst. Biologisk aktivitet er også avhengig av tilstrekkelig fuktighet, sopper og lav bruker dessuten nitrogen i sine vekstprosesser. Dagens forurensning gir et overskudd av nitrogen til jord og dette vil sannsynligvis øke den biologiske aktiviteten og øke risikoen for nedbrytning i de øvre lag av jordsmonnet. Arkeologisk materiale som ligger i C-sjiktet er upåvirket av nedbørens påvirkning.

En vet mindre om hyppigheten av kulturminner i vann. Ved de senere års oppdemming av innsjøer, forekommer det at kulturminner har blitt dekket av vann. Disse levningene vil ofte ligge på grunt vann lite tildekket av avleiringer og med god oksygentilgang. NIVAs målinger gir en god indikasjon på det generelle

vannkjemiske forhold i Norge. Dog er de lokale variasjoner store, og i de aller fleste tilfeller vil det være nødvendig med nye målinger på de aktuelle stedene for å kvantifisere risikoen for nedbrytning. For gjenstander som har ligget lenge i dypt vann vil forholdene ligne mer på nedbryting i jord. pH vil være mindre påvirket av sur nedbør i dette området og oksygentilgangen blir betydelig redusert. Dagens måleprogram for vannkjemi dekker dårlig disse områdene i innsjøene.

7 Utvikling/trender

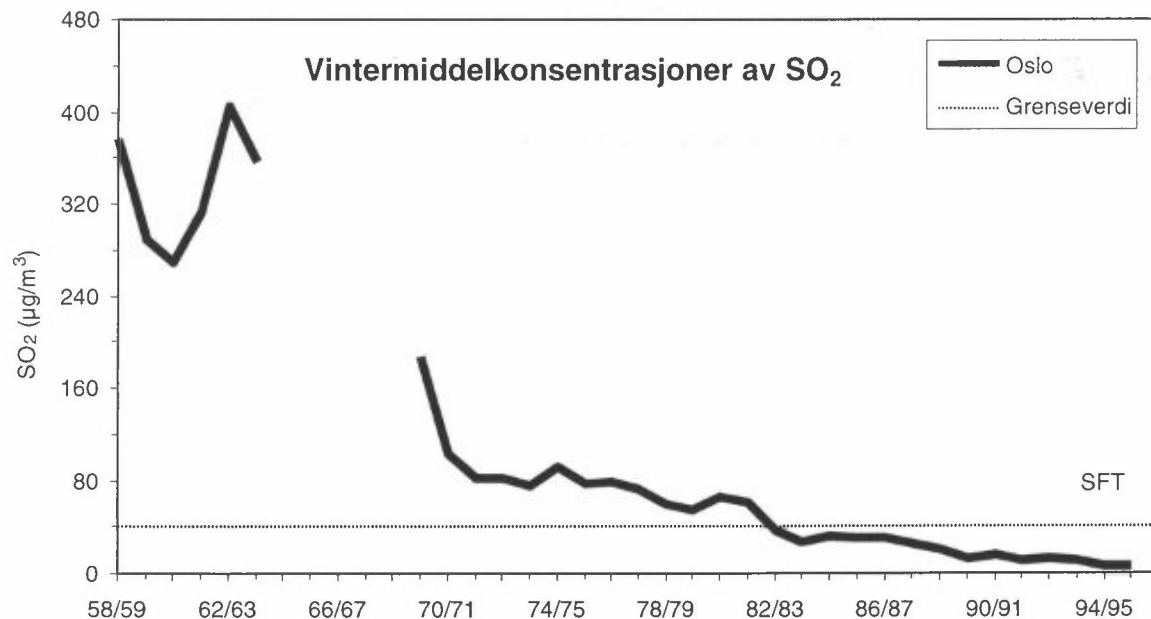
Generelt kan vi si at atmosfæremiljøet i Norge har blitt mindre korrosivt i de senere årene. Dette henger i hovedsak sammen med reduserte SO_2 -utslipp p.g.a mindre bruk av svovelholdig olje til oppvarming og industri. Figur 6 viser trenden for stålkorrosjon i løpet av de senere årene (Ofstad, 1997). Fra målestasjonen i Svanvik, Finnmark, nær grensen til Nikel i Russland har vi ingen merkbare endringer. Forurensningsforholdene for SO_2 er tilnærmet konstant i området (Hagen et al., 1998). Stedet karakteriseres ved lave middeltemperaturer og meget lite nedbør. Begge disse faktorene gir lav korrosivitet. Når en likevel får noe forhøyede verdier i forhold til f. eks. målestasjonen på Birkenes, Aust-Agder, skyldes dette innslaget av SO_2 fra russisk industri. En korrosjonsstasjon hvor sjøsalt er den dominerende forurensningseffekten, er Taranger i Rogaland.



Figur 6: Forandringer i årskorrosjon på stål på NILUs overvåkingsstasjoner for materialer (Ofstad, 1997).

Fra "Overvåkingsprogrammene for langtransporterte forurensninger" og "Overvåkingsprogrammet for byer og tettsteder" ser en at svovelbelastningen er blitt redusert de aller fleste steder i Norge. I Oslo var vinterkonsentrasjonene for SO_2 i 1960-årene rundt $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mens den i dag er under $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figur 7).

Dette har hatt en betydelig positiv effekt på korrosjonsmiljøet. Nedbrytnings-hastigheten for mange materialer er fremdeles betydelig høyere enn det en kan definere som den bakgrunnsnedbrytning som en ville ha hatt i et helt rent miljø. Langs kysten er en viktig parameter klorid. Andre parametre som vil øke den kjemiske nedbrytningen for en del materialer, er nitrogenoksider og ozon. Alle de tre nevnte parametre blir modellert i dagens luftforurensningsmodeller. Den største utfordringen i de nærmeste årene vil bli å utvikle ligninger som beskriver nedbrytningsforholdene som funksjon av disse parametre i en felles ligning.



Figur 7: Utviklingen av SO₂ konsentrasjonen i Oslo i luften fra 1958 til 1995 (Larsen og Hagen, 1998).

8 Konklusjoner

“Statlig program for forurensningsovervåking” inneholder data som har relevans for vurdering av nedbrytningen av kulturminner i Norge. Selv om en for mange målestasjoner har over 20 år med måledata, er dette en forsvinnende kort periode av kulturminnenes levetid. For å anslå nedbrytningen i et langt perspektiv er det derfor begrenset informasjon i gjeldende databaser.

Riksantikvaren har definert en del satsningsområder som for eks: bergkunst, stavkirker, tømmerhus fra middelalderen, og de fire norske objekter på ”World Heritage List”. Når det gjelder bergkunsten, vet vi at denne er spesielt utsatt og det vil være av stor betydning i nær fremtid å få en oversikt over de ulike nedbrytningsparametrene.

I prosjektet er det satt opp flere delmål (Kap.2), og med utgangspunkt i det materialet man har rukket å samle inn og bearbeide i løpet av den korte prosjektperioden, har vi kommet frem til følgende foreløpige konklusjoner:

Delmål:

- Å vurdere data både fra langtransporterte forurensninger og fra lokale forurensningskilder.

Langtransporterte forurensninger har betydning primært i områder utenfor tettstedene. Databasen for "Overvåkingen av langtransportert forurenset luft og nedbør" vil kunne benyttes til å prediktere belastningen av forurensning i disse områdene. I den utstrekning som dette har påvirket vannkvaliteten og surheten i jord, er det spesielt de arkeologiske gjenstandene som er påvirket. I luft er den lokale forurensningen i byene av størst betydning. Nedbrytningshastigheten er større og mengden med kulturminner kan være stor. Det er tilstrekkelig data i basene til at en kan anslå nedbrytningshastigheter for materialer hvor slike sammenhenger er kjent.

"Overvåkingsprogrammet for byer og tettsteder" har hatt målinger i de fleste byer med høy luftforurensning og i enkelte tettsteder med stor industribelastning, se Tabell C.2. Det er imidlertid mange byer og tettsteder i Norge uten måledata. Det finnes tettsteder med tidvis høy forurensning uten måledata, eksempelvis Svelgen som ligger i nærheten av det store bergkunstfeltet på Vingen.

Delmål:

- Å vurdere om måleresultater på grov skala kan overføres til der nedbrytningen skjer lokalt på kulturminnene.

Databasene inneholder data som kan gi informasjon om den midlere belastningen i områdene. Informasjon kan gis i ruter på 55 x 50 km utenfor tettbygd strøk og ned til 500 x 500 m i byer hvor modellgrunnlaget og modellverktøyet finnes. Innenfor ruten kan en ha områder med større eller mindre forurensning. Videre vil alle bygg og andre konstruksjoner ha et mikromiljø som kan avvike fra middelbelastningen. Databasen kan derfor bare gi veiledende verdier for området og kan aldri brukes til å vurdere nedbrytningsforholdene i luften i mikromiljøet på det enkelte kulturminnet. I vann og jord er lokalisering av kulturminnene et problem som gjør det enda vanskeligere å overføre generell kunnskap ned til gjenstander som kan ligge i ulike dybder.

Delmål:

- Å vurdere om det er viktige forurensningskomponenter som kan forårsake nedbrytning, og som ikke er registret i databasen til SFT.

For jord og vann er det få kjente dose-respons-ligninger. Forurensningen og oksygentilgangen er imidlertid alltid viktig for nedbrytningen, og dette måles i liten utstrekning i dag.

Med bruk av dagen dose-respons-ligninger er det primært O_3 i byluft som kan forbedre muligheten til bedre prediktering. Siden ligningene benytter langtidsmiddelverdier, vil kostnadene ved å inkludere dette i områder ved bruk av passive prøvetakere være overkommelig. Tilgjengeligheten til dagens data er mer usikker. SO_2 verdiene rapporteres ikke til NILU og det er en del usikkerhet knyttet til enkelte dataserier. I enkelte områder med mye nitrogentilførsel som i

Glomfjord er det behov for å registrere nitrat i nedbør og som tørravsetning.

Det er i dag ingen dose-respons-ligninger som beskriver effekten av gassene NO_2 og O_3 . En vet likevel at dette er forurensninger som nedbryter materialer. I forbindelse med dette er det behov for å opprette en database hvor NO_2 om sommeren også registreres. Tilsmussing fra partikulære forurensninger er et annet problemområde uten tilstrekkelig kunnskap, men hvor en vet at en har effekt. PM_{10} eller $\text{PM}_{2.5}$ vil bli viktige parametere i fremtiden.

Delmål:

- Å vurdere hvorvidt eksisterende målinger av forsurening i jord og vann er representative for en vurdering i forhold til bevaring av det arkeologiske materialet.

For skogsjord er det et betydelig nasjonalt målenett som vil være representativt til å prediktere hvilke områder som har økt risiko for nedbrytning. Det er imidlertid gjennomført få tidsstudier av forandringen i jord. Basen vil derfor bli ennå bedre etter hvert som denne planlagte informasjon er på plass.

I vann er lokale variasjoner i kjemiske forhold store. Overvåkingsdata gir en god indikasjon på den generelle vannkjemiske tilstanden i Norge, men det vil i de fleste tilfeller være nødvendig med nye målinger på steder hvor risikoen for nedbrytning av kulturminner skal vurderes.

Delmål:

- Å vurdere kunnskapen om nedbrytningsmekanismene i luft, jord og vann for materialene som er av interesse.

Det er svært mange materialer brukt i forbindelse med kulturminner hvor en ikke kjenner nedbrytningseffekten av forsurende komponenter. Blant de mest utsatte materialene er ulike typer bergarter hvor det er risset inn helleristninger. Det pågår for tiden en registrering av tilstanden til bergkunsten i Norge. Undersøkelser av ulike nedbrytningsmekanismer på bergkunstfelt pågår både på Vestlandet, i Østfold, og i Trøndelag.

Kunnskapen om steinforvitring i luft er liten for de fleste steintypene. En skal være klar over at stein generelt er bestandig og at andre nedbrytningsmekanismer enn sur påvirkning kan være vel så viktige. Både biologiske og fysikalske virkninger er viktige. For den biologiske forvitringen er tilførselen av nitrat og fosfor interessante parametere.

Materialer som er følsomme for sur påvirkning er kalkpuss, sementpuss, kalkholdig stein og betong. Her er det mulig å oppnå økt forståelse hvis en kan beskrive den kjemiske nedbrytningseffekten. Sot og andre partikkel-forurensninger er viktige faktorer for nedbrytningen av porøse materialer.

I Norge er det i dag mangel på dose-respons-ligninger som reflekterer dagens hovedforurensninger NO_x , O_3 og klorid. "UN/ECE ICP Materials-programmet" vil forhåpentlig gi noen svar etter år 2000. Belastningen av klorid langs kysten og

dens effekt i tettsteder vil ikke bli besvart i dette programmet.

Delmål:

- Å vurdere trender for økt eller redusert risiko for nedbrytning sett i relasjon til de trender en kjenner for forurensningen.

Korrosjon i norske byer er betydelig redusert i de senere år på grunn av redusert svovelutslipp til luft. Det er også dokumentert at reduksjonen i korrosjon ikke har hatt så stor effekt som en først antok. Dette mener en skyldes det nye forurensningsbildet med NO_x og O₃ som dominerende parametre og de derpå følgende synergetiske effekter.

Virkingen av nitrogenbelastningen er ennå ikke klarlagt i detalj. En mener å ha registrert økt biologisk aktivitet i de senere år både i luft, vann og jord og dette vil høyst sannsynlig øke risikoen for materialnedbrytning.

Delmål:

- Å vurdere muligheten av å lage en beskrivelse av hvor i landet en har de største problemene, eventuelt å lage en geografisk oversikt over risikoområdene.

SFTs databaser vil kunne brukes til å lage geografiske oversikter over risikoområder. For jord og vann vil forsuredede områder kunne merkes ut. I luft har en flere modeller for luftforurensning som kan brukes. Hvis en kobler forurensningskartene sammen med meteorologiske kart, kan CorrCost modellen til NILU gi en direkte beregning av hvor korrosjon og nedbrytningsfare er størst. Det har imidlertid ikke vært mulig å gjennomføre dette innenfor rammene av dette prosjektet.

Som nevnt i innledningen (Kap. 1), så må dette prosjektet betraktes som en pilotstudie, og det har derfor innenfor den begrensede tidsramme ikke vært mulig å utdype de enkelte delmålene mer i detalj. Det ville i den sammenheng vært ønskelig å hatt mer tid for utdypende litteraturstudier.

Det vil være ønskelig at prosjektet kunne utvides til mer konkrete studier av årsaken til nedbrytning av ulike kulturminner, samt til kartlegging av de ulike kulturminnenes beliggenhet i forhold til forurensningsnivået rundt omkring i landet, koblet opp mot de ulike klimaparametre.

9 Referanser

Anda, O., Henriksen, J.F. (1988) Overvåking av korrosjon 1981-1986. Lillestrøm (NILU OR 32/88).

Anda, O., Haagenrud, S.E. (1984) Havsaltavsetninger målt med NILUs nedbørsamler og aerosolfelle. Lillestrøm (NILU TR 8/84).

Atlas, R.M. (1984) Microbiology. Fundamentals and applications. N.Y.,

Macmillan Publishing company.

Blázquez, F., Garcia-Vallès, Krumbein, W.E., Sterflinger, K. & Vendrell-Saz, M. (1997) Microstromatolitic deposits on granitic monuments. Development and decay. *Eur. J. Mineral.*, 9, 889-901.

Borg, G.Ch., Jonsson, L. Lagerlöf, Mattsson, E., Ullen, I. & Werner, G. (1994) Nedbrytning av arkeologiskt material i jord. (Riksantikvarieämbetet och Statens Historiska Museer. Rapport RIK 9).

Child, A.M. & Pollard, A.M. (1991) Microbial attack on collagen. In: *Archaeometry '90*, red: E. Pernicka & Wagner. Basel, Birkhäuser. pp. 617-625.

Dahlin, E., Henriksen, J.F. og Anda, O. (1997) Assessments of environmental risk factors in museums and arkives. *European-cultural Heritage Newsletter on Research*, 10, 94-98.

Darrel, D.N. (1973) Wood deterioration and its prevention by preservative treatments. Syracuse University Press.

Delatorre, M.A., Gomezalarcon, G. & Palacios, J.M. (1993) In-vitro biofilm formulation by *Penicillium frequentans* strains on sandstone, granite, and limestone. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 40, 408-415.

Delatorre, M.A., Gomezalarcon, G., Vizcaino, C. & Garcia, M.T. (1993) Biochemical-mechanisms of stone alteration carried out by filamentous fungi living in monuments. *Biogeochem.*, 19, 3, 129-147.

Ejechi, B.O. & Obuekwe, C.O. (1996) The influence of pH on biodeterioration of a tropical timber exposed to mixed cultures of biocontrol and wood-rot fungi. *J. Phytopathol.*, - *Phytopathol. Z.*, 144, 3, 119-123.

Esser, J.M. & Nyborg, Å. (1992) Jordsmonn i barskog – en oversikt for Norge. (Rapport nr. 3/92).

Garg, K.L., Jain, K.K. & Mishra, A.K. (1955) Role of fungi in the deterioration of wall paintings. *Sci. Total Environ.*, 167, 255-271.

Glomsrød, S, Godal, O., Henriksen, J.F., Haagenrud, S.E., Skancke, T. (1996) Luftforurensninger - effekter og verdier (LEVE). Materialkostnader på bygninger og biler i Norge. Oslo (SFT Rapport 96:7).

Hagen, L.O. (1995) Rutineovervåking av luftforurensning april 1983-mars 1994. Kjeller (NILU OR 46/94 og SFT Rapport nr. 596/95).

Hagen, L.O. og Schjoldager, J. (1986) Klassifisering av luftforurensninger i byer og tettsteder. Lillestrøm (NILU OR 39/86).

Hagen, L.O., Sivertsen, B., Arnesen, K. og Innset, B. (1998) Overvåking av luft-

og nedbørkvalitet i grenseområdene i Norge og Russland april 1997-mars 1998. Kjeller (NILU OR 70/98).

Holtedahl, O. (1973) Hvordan landet vårt ble til. Oslo, Cappelen.

Haagenrud, S.E., Henriksen, J.F. og Gram, F. (1984) Basisundersøkelse av luftkvaliteten i Sarpsborg og Fredrikstad 1981-1983. Delrapport B. Korrosjon og miljø. Lillestrøm (NILU OR 28/84).

Korrosionsinstituttet (1998) UN/ECE International co-operative programme on effects on materials including historic and cultural monuments. Stockholm (Korrosionsinstituttet Report no. 30).

Krog, H., Østhagen, H. & Tønsberg, T. (1994) Lavflora. Norsk busk- og bladlav. Oslo, Universitetsforlaget.

Kucera, V., Henriksen, J.F., Knotková, D, Sjöström, Ch. (1993) Model of calculations of corrosion cost caused by air pollution and its application in three cities. In: *Progress on the understanding and prevention of corrosion. Vol. 1.* London, Institute of Materials. pp. 24-32

Larssen, S., Hagen, L.O. (1998) Luftkvaliteten i norske byer. Utvikling, årsaker, tiltak, framtid. Kjeller (NILU OR 69/98).

Lindborg, U. (1990) Luftföroreningar och kulturminnen. Handlingsplan 90. Stockholm (Riksantikvarieämbetet och Statens Historiska Museer. Rapport RIK 1).

Lindsay, W.L. (1979). Chemical equilibria in soils. New York, Wiley.

Lov 9. juni 1978, nr. 50 om Kulturminner (Kulturminneloven). Med endringer, sist av 24. november 1995 nr. 63. (1996) Oslo, Miljøverndepartementet.

Lükewille, A., Manø, S., Tørseth, K. (1998) Overvåking av langtransportert forurenset luft og nedbør. Atmosfærisk tilførsel 1997. Kjeller (NILU OR 33/98 og SFT Rapport 756/98).

Löfvendahl, R. (1998) Nedbrytning av hällristningar och möjliga bevarandemetoder- en kunskapsöversikt. Stockholm, Riksantikvarieämbetet (upublisert manus).

Mattsson, J. (1995) Råte- og insektsskader. Tilstandsanalyse og utbedringstiltak. Oslo, Norges forskningsråd (FOK-programmets skriftserie nr. 23).

Nord, A. G. and Tronner, K. (1996) Stone damage and chemical analysis. I: *Degradation of materials and the Swedish heritage 1992-1995. A report from the air pollution and heritage programme.* red.: E. Østerlund. Stockholm. (Riksantikvarieämbetet och Statens Historiska Museer. Rapport RIK 11).

- Ofstad, T. (1996) NILUs feltstasjoner for korrosjon. Miljø og korrosjonsmålinger 1995. Datarapport. Kjeller (NILU OR 5/97).
- Overein, L. et al. (1981) Acid precipitation. Effects on forest and fish. Final report of the SNSF-project 1972-1980. 2nd edition. Oslo, SNSF-prosjektet.
- Saiz-Jimenez, C. & Samson, R.A. (1981) Microorganisms and environmental pollution as deteriorating agents of the frescoes of the Monastery of Santa Maria de la Rabida, Huelva, Spain. In: 6th ICOM Triennial Meeting, Ottawa, Canada. London, ICOM. pp. 81.15.5-14.
- Sederholm, B, Svensson, T. og Venka, T.G. (1992) Korrosion på metaller i jorda med ulike surhetsgrad og vattenhalt. Stockholm (Byggforskningsrådet R7:1992).
- SFT (1997) Overvåking av langtransportert forurenset luft og nedbør. Overvåkingsprogram for skogskader. Sammendrag av årsrapporter 1997. Oslo (SFT Rapport 735/98).
- Sigmond et al. (1984) Berggrunnskart over Norge. Uppsala AWT.
- Thorseth, I.H., Torsvik, T. & Bjelland, T. (1997) Forvitring: Prosesser og resultat. I: *Sikring av bergkunst. Rapport fra kurs i sikring av bergkunst 14-18. april og 8-13. juni 1997*. Bergen, Bergen Museum, Arkeologisk Institutt, pp. 27-54.
- Tuor, U., Winterhalter, K. & Fiechter, A. (1995) Enzyme of white-rot fungi involved in lignin degradation and ecological determinants for wood decay. *J. Biotechnol* 41, 1, 1-17.
- Tørseth, K., Manø, S. (1997) Overvåking av langtransportert forurenset luft og nedbør. Atmosfærisk tilførsel 1996. Kjeller (NILU OR 33/97 og SFT Rapport 703/97).
- Tørseth, K., Skjelkvåle, B.L., Saksgård, R., Hesthagen, T., Walseng, B., Schartau, A.K. (1997) Overvåking av langtransportert forurenset luft of nedbør. Årsrapport-effekter 1996. Oslo (SFT Rapport 710/97).
- Österlund, E. (1996) Degradation of materials and the Swedish heritage 1992-1995. A report from the air pollution and heritage programme. Stockholm (Riksantikvarieämbetet och Statens Historiska Museer. Rapport RIK 11).
- Østeraas, T. (1973) Innføring i kvartærgeologi. Med kort tillegg om jordsmonn av Olav Prestvik. Oslo, Universitetsforlaget.

Vedlegg A

Geologisk oversikt over berggrunnen i Norge

Geologisk oversikt over berggrunnen i Norge

Nedbrytningen av bergkunst relatert til helleristninger og hulemalerier er bl.a. avhengig av den type bergart som bergkunsten er utført i. I Norge har vi et stort spekter av ulike bergarter, og deres holdbarhet overfor ytre påvirkninger kan variere sterkt også innenfor den enkelte bergartstype. Det er derfor nødvendig å kjenne til den lokale berggrunnen for å kunne vurdere hvor utsatt bergkunsten er.

De fleste bergkunstlokalitetene ble i forhistorisk tid for en stor del utformet i nærheten av kysten. Landhevningen etter siste istid fører til at strandlinjen fra disse tider ligger atskillig over dagens strandlinje (Figur 1A). Det høyeste nivå havet hadde etter siste istid kalles den marine grense. Dersom man kjenner landhevningshastigheten kan man således omtrentlig tidfeste mange helleristninger. Det forutsettes da at funnene er gjort ved gamle strandlinjer.

Generelt er det slik at den marine grense er fallende ut mot der hvor iskappens tykkelse og dermed vekt har vært minst, dvs ut mot kysten i vest og nord og i Skagerrak hvor den fremdeles ligger under havet. Den høyeste målte marine grense i Norge har vi i Oslo-området med ca. 220 moh.

I Østfold ligger grensen på rundt 200 moh. i nord, og faller når man beveger seg sørover til ca. 150 moh. ved svenskegrensen.

Langs Sørlandskysten er den fallende til ca. 50 moh. SV-over til Kristiansand. På Jæren og Vestlandet er grensen under 50 moh. Langs Mørkekysten når den opp til omkring 100 moh, og på Helgelandskysten er den for det meste i overkant av 100 moh. I Lofoten og Vesterålen samt kyststripen helt til Vardø varierer den marine grense fra noen få meter til noe over 50 moh.

I Figur 2 A (Holtedahl, 1973) er det vist et forenklet geologisk bergartskart over Norge. I gjennomgangen nedenfor er det i hovedsak lagt vekt på områdene under den marine grense, da det er der man finner det meste av bergkunsten. Bakgrunns materialet er hentet fra Norges geologiske undersøkelses (NGU) berggrunnskart over Norge 1:1 mill. (Sigmond et al., 1984).

Rundt Oslofjorden dominerer gneiser og granitter (Iddefjordgranitt) på østsiden av fjorden og syenitter og lavaer på vestsiden. Bergartene kan lokalt være gjennomvannet av gangbergarter (for det meste finkornige) og pegmatitter fra permisk og eldre tider.

Sørlandet helt til Rogaland domineres av grunnfjellsbergarter av svært varierende typer (mest gneiser, granitter, noe gabbro og i sørlige deler av Rogaland anortositt som er en lys nesten ren feltspat)

I Rogaland har vi videre glimmergneiser og fyllitter. På Vestlandet videre nordover til Fensfjorden finner vi mange forskjellige bergarter ved kysten, dypbergarter av ulike slag fra granitt til olivinstein (dvs fra sure til ultrabasiske bergarter) og sterkt omdannede bergarter.

Nord for Fensfjorden, nordre del av Vestlandet, Mørkekysten og Trøndelagskysten til litt nord for Namsos, domineres av omdannede ofte sterkt foldede bergarter (mest gneiser og granitter). Mellom Sognefjorden og Nordfjord forekommer imidlertid innslag av sandsteiner (Svelgen, Solund).

Nordlandskysten og videre til Tromsø består av omdannede bergarter hovedsakelig glimmerskifere, men også en god del diverse kalksteiner og andre kalkholdige bergarter (kalsittmarmor, kalkglimmerskifer, kalkholdig sandstein mm). I Vesterålen og Lofoten forekommer mest diverse granitter og den mer basiske bergarten monzonitt.

Fra Tromsø og nordøstover til Hammerfest har vi også omdannede bergarter, og mye av det samme som i Nordland, men med et større innslag av gabbroide bergarter. Fra Porsanger til Varangerfjorden dominerer skifere og sandsteiner, og på sørsiden av Varangerfjorden er grunnfjellsgneiser rådende.

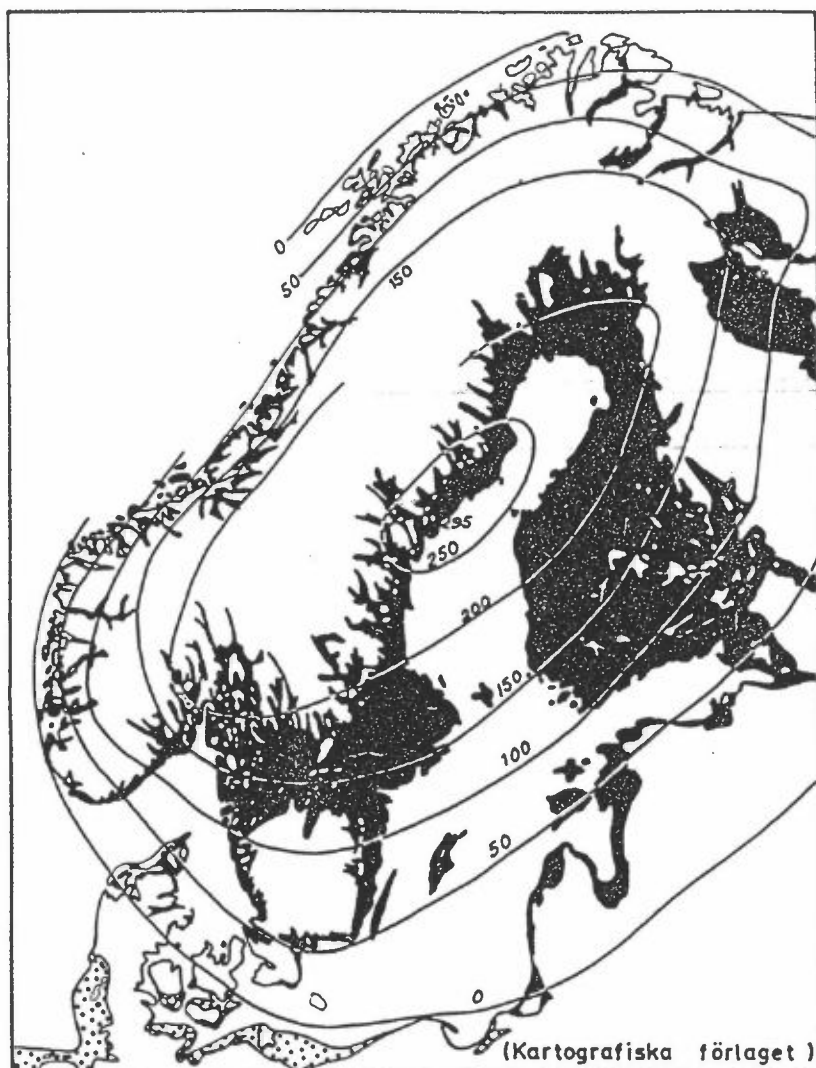
Også i de indre strøk av landet har vi mange forskjellige bergarter. I meget grove trekk kan nevnes de store gneis og granitt områdene i Sør-Norge fra omkring Hallingdalen i nord til kysten i sør. Mye av de samme bergarter (men av noe yngre alder) har vi i Østfold, store deler av Akershus og Hedmark nord til Elverum. I et større område mellom Gudbrandsdalen og svenskegrensen dominerer ulike sandsteintyper.

Jotunheimen og høyfjellsområdene sydvestover består av mer eller mindre mørke gabbroide bergarter. Videre nordover inn mot svenskegrensen i Trøndelagsfylkene og helt nord til Varanger-fjorden har man et svært variert bilde av ulike mer eller mindre omdannede bergarter, ofte skiferbergarter; men også gneiser og granittiske bergarter inn i mellom. Finnmarksvidda består hovedsakelig av gneiser, amfibolitt og kvartsitt.




Det ovenstående gir et bilde av hva en kan forvente av bergarter i ulike deler av vår kyst, men oversikten er naturligvis langt fra uttømmende.

Norges geologiske undersøkelse (NGU) utgir berggrunnsgeologiske kart i målestokk 1: 50 000 i Statens kartverks serie M711. Denne kartserie har de mest detaljrike kart som er ment å være landsdekkende. Det finnes også kvartærgeologiske kart i samme serie som bl.a. gir informasjon om dekket over fjellet.

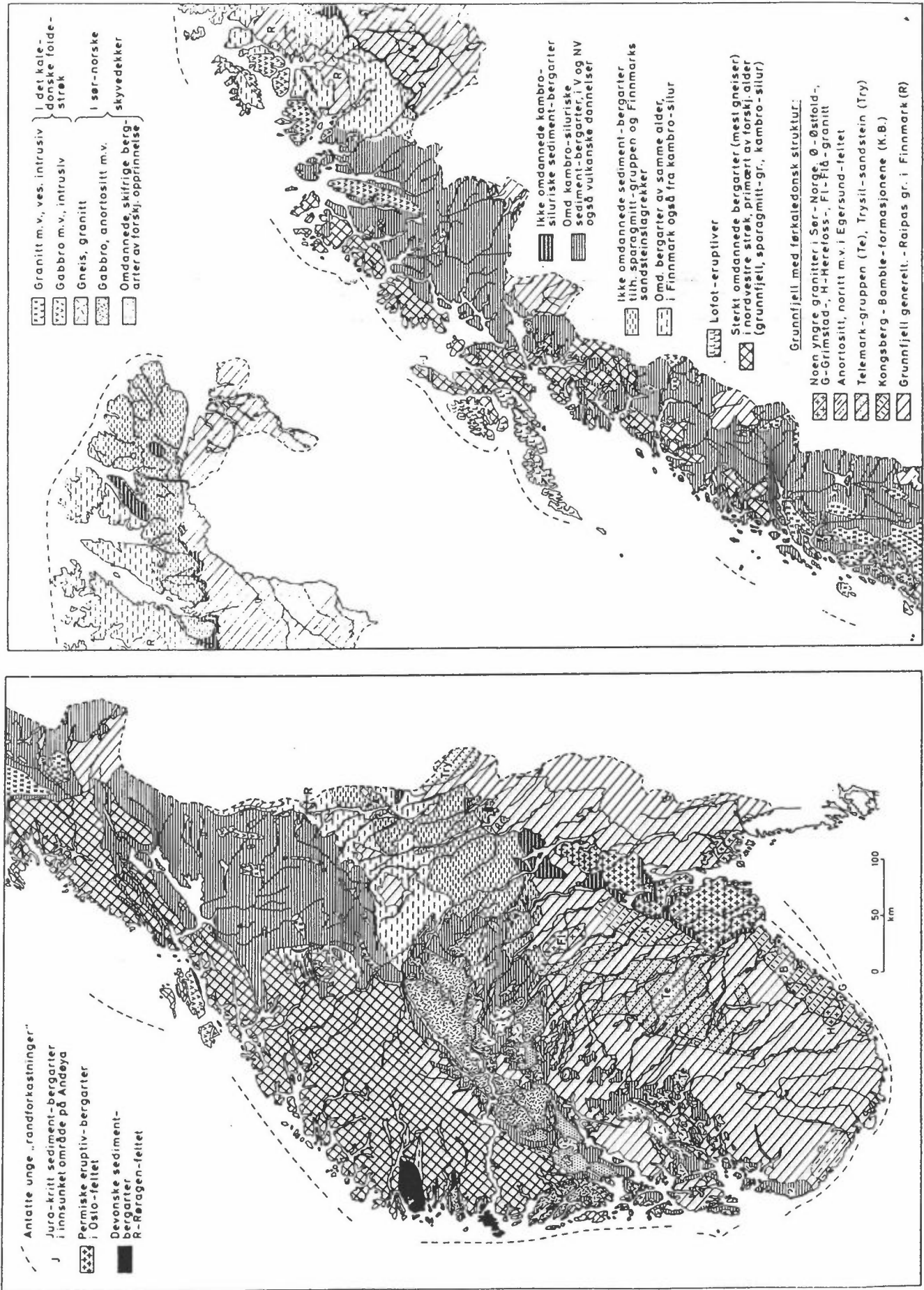
Selv om man ut fra et detaljert kart kan slutte seg til bergartstypen på et gitt sted vil det likevel være nødvendig med befaring for å kunne vurdere bergartens egenskaper som er viktige for dens holdbarhet mot erosjon (ruhet, strukturer på overflaten, sprekker, tilgrensende ujevnheter, inneslutninger, gjennomsetninger med mer). Det vil også være viktig å få informasjon om lokalitetens omgivelser (fjellflatens himmelretning, vegetasjon, jorddekke, forurensningskilder med mer).



Slik var fordelingen mellom land og hav i Skandinavia og Finland like etter istiden. Kurvene på kartet kalles isobaser og er trukket gjennom områder med like stor landhevning. Det høyeste nivå havet hadde etter istiden kalles marin grense.

-  Landområder som har steget opp av havet etter istiden
-  Landområder som har sunket etter istiden
-  Isobase

Figur 1 A: Fordelingen mellom land og hav i Skandinavia og Finland like etter istiden (Østeraas, u.å).



Figur 2 A: Forenklet geologisk bergartskart over Norge (Holte Dahl, 1973).

Vedlegg B

Biologisk nedbrytning av arkeologisk materiale

1. Biologisk nedbrytning av arkeologisk materiale

Flere grupper av organismer er involvert i biologisk nedbrytning (forvitring) av arkeologisk materiale. En rask nedbrytning kan være forårsaket av en rekke organismer som f. eks. marine mollusker eller termitter. Det er derimot bakterier, sopp og lav som har størst betydning i en biologisk forvitring over lang tid. Organismene bruker arkeologisk materiale som sin energikilde og ved sin vekst bidrar de både til mekanisk og biologisk forvitring.

1.1 Generelt om nedbrytningsmekanismene til bakterier, sopp og lav.

For at bakterier, sopp eller lav kan etableres, kreves det et visst mikroklima (fuktighet, oksygentilgang, gassinnhold, temperatur, lys). Det er kjent at materialer som er mettet med vann (dvs. uten tilgang til luft), i myrer (lav pH), i saltvann (med ekstrem høy innhold av salt) er lite utsatt for mikrobiell nedbrytning. Også ekstrem og langvarig tørke (f. eks. egyptiske pyramider) skaper ugunstige forhold for biologisk nedbrytning. Det er imidlertid blitt påvist aktivitet av nedbrytende organismer også i materialer oppbevart i slike ekstreme forhold. Bakterier har de største mulighetene til å etablere seg i ekstreme forhold og kan være aktive både i miljøer med eller uten tilgang på oksygen (aerobe eller anaerobe).

Bakterier, sopper og lav bryter ned materiale ved kombinasjon av mekanisk og kjemisk påvirkning.

Mekanisk nedbrytning ved hjelp av bakterier vises som en dannelse av lokale groper. I tilfeller av sopp og lav kan hyfene vokse inn i mikroskopiske sprekker på materialets overflate og minere det øverste laget, slik at det blir porøst. Temperatur- og fuktighetsforskjeller kan forårsake utvidelse av soppenes hyfer, som igjen kan bidra til ytterligere oppsprekking av materialet. Dette gjør det mulig for vann å trenge inn og forårsake frostsprengning.

Kjemisk nedbrytning skjer ved utskillelse av de forskjellige kjemiske substanser. Bakterier, og sopper skiller ut en rekke uorganiske (svovelsyre, salpetersyre) og organiske syrer (eddiksyre, oksalsyre, maursyre, sitronsyre, ketoglutarsyre), og spesifikke enzymer, rettet mot nedbrytning av materialer, særlig tre og stein. Lav er også kjent for sin evne til å danne en rekke reaktive substanser som bryter ned substrater som de vokser på.

1.2 Bakterier

Bakterier er encellede organismer og vi finner dem i alle økologiske nisjer, til og med i ekstreme miljøer som varme kilder med temperaturer over 100⁰C. Noen bakterier er ekstremt syretolerante og vokser ved pH 1,0, mens andre vokser i mettede saltlaker (f. eks i Dødehavet). De har mye enklere celleoppbygging enn sopper og lav. Bakterier mangler klorofyll og kan derfor ikke benytte lys som energikilde, og kan vokse uavhengig av nærvær eller fravær av lyset. De er i stand til å leve enten under aerobe eller anaerobe forhold. Bakterier er ofte de første organismene som etablerer seg og baner vei for inntog av andre organismer, f. eks. sopper.

1.3 Sopp

Sopp er en gruppe heterotrofe organismer, dvs. at de ikke klarer å nyttiggjøre seg fotosyntesen som energikilde, men trenger tilførsel av ferdige organiske stoffer for sin overlevelse. Soppene har derfor i løpet av evolusjonen utviklet de mest sinnrike og avanserte måter for å anskaffe seg organiske materialer på. Siden de ikke er avhengige av fotosyntesen, kan de vokse i fullstendig mørke.

To grupper sopp er deltakende i nedbrytningen av arkeologiske materialer. Den ene gruppen er sopper som ofte kalles for «Muggsopper». Med denne betegnelsen menes en rekke sopper som tilhører de såkalte ufullstendige soppene (mitosporiske sopper), som fremstår bare i sin ukjønnet form og aldri danner fruktlegemer med kjønnet sporer (askosporer eller basidiosporer). Muggsoppene legger seg på overflater av monumenter eller fresker og lager en lett synlige biofilm eller «patina». Den andre gruppen er tredobrytende sopper (eller råtesopper), som har spesialisert seg på å bryte ned de viktigste kjemiske bestanddelene av ved: cellulose, hemicellulose eller lignin.

1.4 Lav

Lav er en sammensatt organisme som består av sopp (mykobiont) og alger eller cyanobakterier (fotobiont) som lever i symbiose. Siden soppen mangler klorofyll, besørger fotobionten i lav for fotosyntese. Dette krever tilgang på lys som energikilde og derfor kan lav ikke vokse i mørke eller under jorda. Lav er kjent som pionerarter i plantesuksesjon, men de er konkurransesvake. Derfor finner vi dem på steder hvor ikke andre organismer klarer å etablere seg, som f.eks. på stein eller på bark. Lav bidrar til jordsmonndannelse i ekstreme miljøer som ørkener, arktiske og alpine strøk, ved frigjøring av en rekke elementer fra bergarter som transporteres videre ved avrenning. Forvitring av mineraler og bergarter ved lav skjer både fysisk, hvor sopphyfene sprenger opp substratet, og kjemisk, hvor lav produserer oksalsyre og andre reaktive stoffer (Thorseth, Torsvik & Bjelland, 1997).

2. Materialer som brytes ned

2.1 Tre

Tre brytes ned hovedsakelig av sopper, mens bakterier kan bidra som «hjelpere» i enkelte prosesser (f.eks. anaerob nedbrytning av vannmettet tremateriale). Mekanismer for bakteriell aktivitet inni treet er følgende:

1. Bakterier forårsaker strukturelle forandringer i treet slik at treet er mer gjennomtrengelig for væsker (f.eks vann). Dette kan skje uten at selve trestrukturen brytes ned.
2. Bakterier er lite bevegelige og selv om de, i forhold til sopp, forårsaker bare ubetydelig nedbrytning, kan de erodere trevirke ved å lage etsegroper. Disse bakteriene er anaerobe og befinner seg inni treet, på steder som er uten oksygen, eller hvor den ble oppbrukt av andre organismer. Slike bakterier kan bryte ned tre også under vann i fullstendig anaerobe forhold. For nedbrytning er bakteriene utstyrt med effektive enzymer som bryter ned cellulose og pektin inne i treet.

Bakteriene inngår i et samspill med soppene ved at de skiller ut organiske stoffer som kommer til nytte for de nyankomne soppene som næring.

Av alle organismer er det bare råtesopper som har evne til effektivt å bryte ned alle tresubstanser ved sine høyst spesialiserte prosesser. Dette er stort sett «storsopper» som tilhører gruppe stilksporesopper (Basidiomycetes). I denne gruppen kjenner vi såkalte hvitråtesopper, som bryter ned lignin inni treet, men kan bryte ned cellulose i en viss grad også. Disse soppene skiller ut en del enzymer (lignin peroxidase, mangan peroxidase, lakkase) som bryter ned ligninbestandet i treet. Nedbrytning av lignin er påvirket av omgivelser som f. eks. temperatur, fuktighet, gassinnhold på stedet eller nitrogeninnhold i substratet. Lignin nedbrytningen kan pågå i forhold med meget lite oksygen tilstede, hvor CO₂ har høye verdier (30 %), og er stimulert ved lav N-konsentrasjon i substratet og lavt pH (pH 4). Uten lignin mister treet sin styrke og smuldrer i stykker.

Brunråtesopper, på den annen side, har spesialisert seg på å bryte ned cellulose og hemicellulose inne treet, uten å røre ved lignin. Detaljer i denne prosessen er fremdeles uklare.

En tredje råte type er såkalt «softrot», som er typisk på tre i fuktig miljø, hvor treet får brun farge og myk struktur. Denne råten forårsakes av sekksporesopper (Ascomycetes). Slik råte finner man på steder som virker ekstreme for både brun- og hvitråtesopper, f. eks. i ekstremt tørre steder, i vedmaterialer nedsenket i vann eller jord, men også i materialer som er utsatt for harde klimatiske påvirkninger f.eks. totem påler.

2.2 Stein

I mange tilfeller er det mikroorganismer som er ansvarlige for steinmonumenters (sandstein, granitt og kalkstein) forvitring ved å danne et lag, eller biofilm (patina), på overflaten. Disse bidrar signifikant til steinens forvitring ved at organismene mekanisk minerer stein (biopitting) eller kjemisk ved å skille ut organiske syrer (oksalsyre, sitronsyre, ravsyre). Biofilmene består som regel av soppmycel (f. eks. *Penicillium frequentans*), mineralpartiklene som soppene frigjør fra substratet og organiske salter (f.eks. oksalat og sitrat) utskilt av soppene (Delatorre et al, 1993). Soppene som danner patina tilhører som regel muggsoppene, særlig svartsoppene med mørke, pigmenterte hyfer som inneholder melanin (Dematiaceae). Disse soppene kan vokse til og med flere millimeter under steinens overflate (Blazquez et al. 1997).

2.3 Fresker og malerier

Soppvekst på malerier er betraktet som hovedgrunnen til deres forvitring. De viktigste faktorene for sopp som vokser på fresker er fuktighet (soppene vokser raskere når luftfuktighet overstiger 65%) og tilgang på næring. En temperatur på 20-35 °C er optimal for soppene, men soppene er i stand til å utstå temmelig store temperatursvingninger og derfor finner vi sopp på fresker nesten overalt (Garg, Jain & Mishra, 1995). Næringskrav til soppene er oppfylt ved organiske stoffer inni maling (eggeplommer, kasein) og lim (gelatin) eller i veggens gipsmaterialer (cellulose, stivelse, melk). I tillegg er det organiske stoffer inni støvet som samles på freskenes overflate. Organiske stoffer kan også komme fra bakterier som

vanligvis etablerer seg først og skaper forholdene for vekst av soppene senere. Støvlaget oppå freskene kan holde på fuktigheten og virke som grobunn for sporer som lander på overflaten. Det viser seg at soppene som vokser på freskenes overflate kan bryte ned ikke bare materialer som fester maleriet på veggen, men også selve pigmentene. Resultatene er misfarging og nedbrytning av overflaten. Soppene produserer ofte sine egne pigmenter (f.eks. svarte, røde og grønne soppigmenter på veggmalinger fra Japanske gravkammere), som endrer fullstendig det originale verket.

I tillegg kan selve soppveksten under freskene, i form av hyfer eller fruktlegermer, svekke freskematerialet mekanisk slikt at det oppstår små blemmer eller hulrom, som til slutt kan løsne i store flak.

Sopper som vanligvis assosieres med fresker er de vanlige muggsoppene, som finnes overalt og som produserer store mengder sporer som bæres og spres omkring ved luftstrømninger.

2.4 Metaller

Av alle de nedbrytende organismene er det bare bakteriene som deltar indirekte i korrosjon av metaller. Uten tilgang på luft kan sulfatreduserende bakterier (f. eks. *Desulfotomaculum desulfuricans*) sette i gang metallens korrosjon. De angriper ikke metaller direkte, men i sulfatholdige jordsmonn katalyserer de reduksjon av SO_4^{2-} til S^{2-} . Denne reduserende reaksjon muliggjør videre oksydering av jern - en korrosjonsprosess. Disse bakteriene er aktive utelukkende i miljøer uten luft, ved pH 6-8, og derfor er fare for metallkorrosjon størst i anaerob jord, eller inne i stillestående vann ved nøytral pH.

Under aerobe forhold er det de høyt spesialiserte, svovelsyredannende bakterier (f.eks. *Thiobacillus* sp.) som ved sin virksomhet påvirker metallkorrosjon. Disse bakteriene gror best i ekstremt sure omgivelser, ved pH 1-2. Andre bakterier som er i stand til å oksydere metaller (f.eks. *Gallionella*, *Crenothrix*, *Leptothrix*) i aerobe forhold er aktive ved høy pH, 8 (Atlas, 1984). Metoder som brukes for å hindre metallkorrosjon er bl. a. å høyne miljøets pH over 9,5 for å stoppe bakterienes aktivitet.

2.5 Benrester

Benstruktur består for det meste av et uorganisk stoff, apatitt, som er pakket inn i fibrøs, organisk collagen. Apatitt gir benet hardhet og er beskyttet av collagenfibrene. Bare collagen brytes ned ved mikroorganismenes aktivitet. Det er fremdeles usikkert i hvilken grad soppene deltar i nedbrytning av collagen. Bakterier derimot angriper collagen ved hjelp av enzymer collagenaser. Disse bakteriene (f. eks. *Clostridium histolyticum*) er en naturlig del av jordas mikroflora, men finnes også i dyrenes munn eller fordøyelsestrakt (Child & Pollard, 1991). Ved bakteriell nedbrytning av collagen dannes det aminosyrer, som forsurer omgivelsene. Når beskyttelsen av collagen forsvinner, blir apatitt utsatt for påvirkning av det sure miljø. Nedbrytning av apatitt er hovedsakelig en kjemisk prosess og det er jordas pH som regulerer dens nedbrytningshastighet. Allerede ved pH 6,5 løses apatitten opp og ved pH 6 skjer nedbrytningen raskt (Lindsay, 1979).

Vedlegg C

Oversikt over tilgjengelig luft- og nedbørdata

STASJONER	Eksp.periode	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	
Troms, Dividalen	1/77-4/79							apr																						
Troms, Frihetsli	8/93-12/94																						apr	apr	apr					
Troms, Øverbygd	2/87-																													
Vest-Agder, Finstrand	10/71-7/75																													
Vest-Agder, Lista	11/71-																													
Vest-Agder, Skredalen	11/71-																													
Vest-Agder, Søgne	9/88-12/94																													
Vestfold, Lardal	8/89-																													
Vestfold, Folehaven(Sandefj.)	7/75-8/82					jul																								
Vestfold, Ramnes	4/93-12/95																													
Vestfold, Vasser	4/72-5/79																													
Østfold, Jeløya	5/79-																													
Østfold, Prestebakke	11/85-																													

Tabell C.2: Oversikt over tilgjengelig luftdata i byer og tettsteder.

			-78	-80	-82	-84	-86	-88	-90	-92	-94
Østfold	Halden	Rådhuset									
	Halden	Stubberudveien									
	Sarpsborg	Alvim									
	Sarpsborg	St Olavs Vold									
	Fredrikstad	Brochs gate									
	Jærløya	Jærløya radio									
Akershus	Lillestrøm	Torget 5									
	Lillestrøm	Kirkegaten									
	Slemmestad	Berger									
Oslo fylke	Oslo	Bryn skole									
	Oslo	St. Olavs plass									
	Oslo	Nordahl Bruns gate									
Hedemark	Hamar	Vangsveien									
	Hamar	Bekkeliveien									
Oppland	Lillehammer	Brannstasjonen									
	Gjøvik	Blinken									
	Gjøvik	Syrehaugen									
Buskerud	Drammen	Helserådet									
	Drammen	Engene									
Vestfold	Larvik	Ø Bøkellgate									
	Larvik	Haraldsgate									
Telemark	Porsgrunn	Rådhuset									
	Skien	Falkum									
	Skien	Kongens gate									
	Notodden	Helserådet									
	Notodden	El. kjøling									
Vest-Agder	Kristiansand	Tøllbodgaten									
	Kristiansand	Festningsgaten									
Rogaland	Stavanger	Handeliens Hus									
	Sauda	Rådhuset									
Hordaland	Bergen	CMI									
	Bergen	Krogstad									
	Odda	Sykehuset									
	Odda	Brannstasjonen									
	Ålvik	Villabyen									
Sogn og Fjordane	Øvre Årdal	Farnes									
	Årdalstangen	Lægreid									
	Svelgen	Rådhuset									
Sør-Trøndelag	Trondheim	Brattøra									
	Trondheim	Torget									
Nordland	Narvik	Rådhuset									
	Mo i Rana	Sentrum kino									
	Mo i Rana	Svømmehallen									
	Mo i Rana	Mo									
	Sulitjelma	Lomi									
	Sulitjelma	Charlotta									
	Sulitjelma	Furulund									
Troms	Tromsø	Strandtorget									
	Tromsø	Strandveien									
Finmark	Kirkenes	Rådhuset									
	Passvik	Svanvik									
	Passvik	Holmfoss									
	Jarfjord	Jarfjordbotn									
	Jarfjord	Karpdalen									



Norsk institutt for luftforskning (NILU)
Postboks 100, N-2007 Kjeller

RAPPORTTYPE OPPDRAGSRAPPORT	RAPPORT NR. OR 10/99	ISBN 82-425-1059-8 ISSN 0807-7207	
DATO 25/2-99	ANSV. SIGN. <i>P. Byg</i>	ANT. SIDER 66	PRIS NOK 105,-
TITTEL Identifisering og vurdering av SFTs overvåkingsdata sett i relasjon til nedbrytning av kulturminner i luft, jord og vann.		PROSJEKTLEDER Elin Dahlin	
		NILU PROSJEKT NR. O-98135	
FORFATTER(E) Elin Dahlin, Jan Henriksen, Odd Anda, Guri Krigsvoll, NILU, Isabella Børja, NISK, Richard Wright, NIVA		TILGJENGELIGHET * A	
		OPPDRAGSGIVERS REF. Ola Glesne, SFT	
OPPDRAGSGIVER Statens forurensningstilsyn Postboks 81 Dep 0032 OSLO			
STIKKORD Overvåkingsdata	Nedbrytning	Kulturminner	
REFERAT Det foreligger mangelfull kunnskap om de ulike årsakene til nedbrytningen av kulturminner i Norge. En mulig årsak som har vært lite undersøkt her i landet, er i hvilken grad langtransportert luftforurensning og sur nedbør har påvirket nedbrytningen. Målsettingen med prosjektet har vært å identifisere og vurdere i hvilken grad "Statlig program for forurensningsovervåking" inneholder data som kan ha relevans for å si noe om faren for nedbrytning av kulturminner eksponert i luft eller bevarer i jord eller vann. Resultatet av vurderingen er at programmet inneholder data som har relevans for en vurdering av nedbrytningen av kulturminner i Norge. Selv om en for mange målestasjoner har over 20 år med måledata, er dette imidlertid en forsvinnende kort periode av kulturminnenes levetid. For å anslå nedbrytningen i et langt perspektiv er det derfor noe begrenset informasjon i gjeldende databaser.			
TITLE Identification and Assessment of Environmental Surveillance Data in Relation to the Deterioration of Cultural Property Exposed to the Atmosphere or Buried in Soil or immersed in Water.			
ABSTRACT The aim of the project has been to identify and assess to what degree environmental surveillance data from the Norwegian State Pollution Control Authority contains data, which could be of relevance to assess deterioration of cultural property exposed to the atmosphere or buried in soil or immersed in water. The result of the assessment is that the data is relevant for assessing the deterioration of the cultural property in Norway.			

* Kategorier:
A Åpen - kan bestilles fra NILU
B Begrenset distribusjon
C Kan ikke utleveres