



Det här verket har digitaliserats vid Göteborgs universitetsbibliotek och är fritt att använda. Alla tryckta texter är OCR-tolkade till maskinläsbar text. Det betyder att du kan söka och kopiera texten från dokumentet. Vissa äldre dokument med dåligt tryck kan vara svåra att OCR-tolka korrekt vilket medför att den OCR-tolkade texten kan innehålla fel och därför bör man visuellt jämföra med verkets bilder för att avgöra vad som är riktigt.

This work has been digitized at Gothenburg University Library and is free to use. All printed texts have been OCR-processed and converted to machine readable text. This means that you can search and copy text from the document. Some early printed books are hard to OCR-process correctly and the text may contain errors, so one should always visually compare it with the images to determine what is correct.



**Rapport**

**R22:1983**

## **Saltvittring**

**Saltvandring och saltnedbrytning  
– en hypotes**

**Josef Pühringer**

R22:1983

SALTVITTRING

Saltvandring och saltnedbrytning

- en hypotes

Josef Pühringer

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 800508-3  
från Statens råd för byggnadsforskning till Josef  
Pühringer Innovationskonsult, Stockholm.

I Byggforskningsrådets rapportserie redovisar forskaren sitt anslagsprojekt. Publiceringen innebär inte att rådet tagit ställning till åsikter, slutsatser och resultat.

R22:1983

ISBN 91-540-3892-8

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Spångbergs Tryckerier AB, Stockholm 1983



## INNEHÅLLSFÖRTECKNING

INLEDNING	5
0 LIVSLÄNGD, TILLSTÅND OCH FÖRLOPP	8
1 VITTRING AV MINERALISKT BYGGNADSMATERIAL - PROBLEM - PROBLEMLÖSNINGSMETODIK	9
2 SALTVANDRING OCH SALTSKADOR - ETT KONVENTIONELLT BETRÄKTELSESÄTT	11
2.1 Fuktvandring och fuktskador	11
2.2 Saltvandringar	12
2.3 Saltsprängningar	13
2.4 Nedbrytning genom värmeutvidgning	14
2.5 Tolkning av saltsprängningsfenomen	15
3 ETT SKADEFALL - NÅGRA REFLEKTIONER	17
3.0 Allmänt	17
3.1 Tegelkräfta i historiska byggnader	18
3.2 Saltutfällningar på tegel	19
3.3 Sveaborg och Tavastehus - saltskador i tegelmurverk	20
4 SALTBIKDNING PÅ TEGEL - KOMMENTARER TILL NÅGRA FÖRSÖK	25
4.1 Saltförekomst i tegel	25
4.2 Saltbildning, fukt och temperatur	25
5 SALTÖSNINGARS FUKTFYSIK - NÅGRA MYCKET ENKLA SYNPKUNKTER PÅ KÄNDA FAKTA	31
5.1 Allmänt	31
5.2 Salttransporter - förutsättningar	32
5.3 Uttorkning på och kondens från fria vattenytor	33
5.4 Saltlösningar och luftfuktighet	36
5.5 Uttorkning från och kondens på saltlösningssytor	37
6 SALTBITTRING	41
6.1 Saltvandringar	41
6.2 Kritiska salthalter	50
6.3 Experiment - saltvandring	50
6.4 Saltnedbrytning	57
6.4.1 Allmänt - saltvittring och porfyllnad?	57
6.4.2 Saltstrukturändringar	57
6.4.3 Saltvittring	65
6.4.3.1 Primärvittring	65
6.4.3.2 Sekundära vittringsförlopp	70
6.4.3.3 Saltvittring - sammanfattning	70
6.4.3.4 Kapillärsprängning?	70
6.5 Experiment - saltnedbrytning	72
6.5.1 Strukturändringar	72
6.5.2 Nedbrytning	75
7 KOMPLEXA SALTBIKDNINGSFÖRLOPP	87
7.1 Saltstrukturer och materialreaktioner	87
7.2 Saltstrukturer och fysikaliska processer	87

8	SALTSTRUKTURER I SKADAT MATERIAL	93
8.0	Allmänt	93
8.1	Saltstrukturer	93
8.2	Undersökningsmetodik	95
8.3	Materialundersökningar	95
8.3.1	Jämförelse tegel/betong	95
8.3.2	Tegel från Sveaborg	96
8.3.3	Betongkonstruktioner	96
8.4	Materialomvandling	109
9	ÅTGÄRDER MOT SALTBITTRING	117
9.1	Förutsättningar för saltvittring	117
9.2	Åtgärder mot saltvittring	117
9.3	Saltextraktion	122
9.4	Experiment - åtgärder	122
10	HYPOTESERNAS ANVÄNDBARHET	125
10.1	Tegelnedbrytning i gamla källarvalv	125
10.2	Tösaltskador	125
10.3	Sfinx	125
11	APPENDIX - ÖLANDSBRON	127
12	SKISS TILL FORTSATT TERORETISKT UT- VECKLINGSARBETE	129
12.1	Konventionella saltsprängningsteorier	129
12.2	Variant av saltsprängningsteori	129
13	ETT AXPLOCK UR LITTERATUREN	131
13.1	Citat	131
13.2	Referenser	134
14	FÄRGBILDER bilaga	137
	I texten hänvisas till denna med (Fig nr *)	

## Inledning

1979 redovisade Thorborg Perander, Statens Tekniska Forskningscentral, Esbo, Finland, resultatet av sina undersökningsarbeten över saltskadat tegel i finska kulturminnesmärken, såsom t ex byggnaderna och konstruktionerna på Sveaborg och i Tavastehus slott i Finland, i ett arbete, "Suomenlinnan Tenalji von Fersenin Rakenuuksen Tiulukirien Rapantuminen" (Ref 2). Syftet med detta arbete var att lista förutsättningar för och effekter av saltvittringar i tegelmurverk. Även om arbetet inte redovisar några möjliga förlopp, indikerar det med all tydlighet att konventionella förloppshypoteser för saltvittring inte kan användas för att förklara dessa saltnedbrytningar i teglet. Därför formulerades nya hypoteser för salttransporter och saltnedbrytning av poröst mineraliskt material.

Hypotesernas användbarhet för att förklara transport- och nedbrytningsfenomen i i första hand finskt modernt och historiskt tegelmaterial kontrollerades av T Perander i några delprojekt inom projektets ram hos Statens Tekniska Forskningscentrals laboratorier i Esbo, Finland.

Den konventionella byggnadsfuktfysiken behandlar helst vatten i icke vattenlösligt (fin)poröst material. En modern användbar salttransport- och saltnedbrytningsmodell borde dock kunna beakta effekten av lösningar av varierande koncentration (och mikrosuspensioner?) i (eventuellt grov-)poröst lösningsbart material. Så länge den teoretiska fysiken inte kan ställa upp på dessa villkor, kan hypoteserna varken bevisas eller skjutas i sank med matematiska formelapparater. Hypoteserna måste därför förklaras med några mycket enkla försök. Resultaten av dessa mycket enkla försök redovisas i rapporten. Det skall understrykas att rapporten enbart redovisar en bråkdel av materialet som erhållits i dessa undersökningar. (Så kan t ex resultaten av Peranders grundläggande arbete om saltförekomsten i historiskt finskt tegel och hennes undersökningar inom ramen för föreliggande projekt enbart redovisas med ett fåtal fotografier och en tabell.)

I princip har arbetet med föreliggande uppsats varit slutfört redan för två år sedan. De sista två åren har gått åt att sälla fram material som kan pressas in i en begränsad ekonomisk, admi-

nistrativ och teknisk ram. Rapporten har nu sammanställts för att inte fördröja starten av en kanske fruktgivande diskussion om resultatens giltighet. Sammanställningen uppfyller inte de krav som normalt brukar ställas på rapporterna, framför allt inte de estetiska kvalitetskraven.

Det bör understrykas, att de salttransporter och saltnedbrytningar som har kunnat observeras på Sveaborg och i Tavastehus slott, och naturligtvis i många källarlokalerna i medeltidsbebyggelse, förmodligen även saltnedbrytningar i Aten, Rom och Egypten, och Mellaneuropas domkyrkor, kan bringas på samma nämnare som saltnedbrytningen i hypermoderna betongkonstruktioner (som i och för sig inte heller har fått en vettig förklaring hittills, om man bortser från några eleganta laboratoriekriterier, som inte torde vara relevanta för verklighetens förlopp).

Några ytterst enkla försök har därför utförts, som tycks bevisa (eller åtminstone inte motbevisa) att den utvecklade hypotesen för saltvandringar och saltnedbrytningar även gäller för modern konstruktionsbetong.

Med hjälp av föreliggande hypoteser för saltvandringar och saltnedbrytningar har även behandlingsmetoder formulerats. Th Perander har redan i ytterst grova drag testat effekten av några behandlingar som skulle ha till syfte att retardera eller stoppa saltnedbrytningsprocesser i modernt och historiskt tegelmurverk. Dessa sanerings- och konserveringsförsök har av teknisk/ekonomisk/administrativa skäl varit av ytterst begränsad omfattning. Även om resultatets detaljer är av diffus kvalitet, är tendensen ganska entydigt positiv.

Ur det omfattande utredningsmaterialet har en bråkdel utvalts, som inom ramen för denna rapportskiss skulle kunna belysa tankegångarna och arbetsmetodiken. Än en gång: Av de omfattande resultaten som Perander redovisar i delrapporter har enbart ett begränsat antal kunnat medtagas i rapporten - Peranders utredningsmaterial - såväl eget som i anslutning till det aktuella projektet - har betecknats med ThP. Vissa SEM-undersökningar av egna prover har utförts på Institutet för metallforskning i Stockholm och av Axel Johnson Institutet för Industriforskning i Nynäshamn samt av Bengt Hedberg vid Chalmers Tekniska Högskola. Fotografierna

är betecknade med MF respektive AJI och BH. Övriga fotografier är eget material, varvid assistans vid fotografering har kunnat erhållas från Tomas och Caroline Pühringer och Leif Lundgren. Leif Berntsson, Byggmaterial, Chalmers, har lämnat värdefulla synpunkter. Resultatet av hans undersökningar från kalciumklorid-skador i högkvalitetsbetong skulle kunna tolkas så att volymutvidgningsmodellen för salthydratation med komplexbildning kräver ytterligare facetter för att verkligen i detalj kunna förklara saltsprängningsmekanismerna vid kloridskador i högkvalitetsbetong. Den föreliggande modellen för saltsprängning skulle kunna leverera denna facett. Inger Westerberg har kämpat med ut- och renskrifterna av en trave banddiktamen.

Under utredningens gång konstaterades att vissa materialtekniska problem och vissa fuktfysikaliska frågeställningar, som hittills inte har fått en nöjaktig förklaring eller som har fått en krystad förklaring, eventuellt utan svårighet skulle kunna inrangeras i de presenterade hypotesskisserna för saltvandringar och saltnedbrytning.

Några av dessa frågeställningar har noterats i en speciell arbetsrapport, vars resultat av administrativa skäl inte har kunnat vidarebearbetas och därför inte heller beaktas vid utskriften av den föreliggande rapportskissen.

Täby 1982-05-01

Josef Pühringer

Anm. Figurer med numrering och asterisk har sammanställts i kapitel 14.

Inom projektet har följande arbetshandlingar utarbetats:

Tegelkräfte i historiska byggnader	1980-06-01 (JP)
Tegelvittring	1980-12-31 (JP)
Saltbildning-Saltvittring I	1980-12-22 (ThP, JP)
Saltkristallisation II	1981-06-08 (ThP, JP)
Saltkristallisation III	1981-06-08 (ThP, JP)

## 0. Livslängd, tillstånd och förlopp

Byggnadsmaterial, i synnerhet poröst sådant, har mer eller mindre begränsad livslängd. Livslängden är i många fall inte resultatet av ett kritiskt sluttillstånd utan effekten av kritiska förlopp (eller förloppscyklar), som försiggår i materialets mikrostruktur, dess por- och kapillärsystem.

Dessa förlopp kan vara av fysikalisk och kemisk art, om nu några strikta gränsdragningar dessa två områden emellan överhuvud taget kan göras.

Metoder för materialtillverkning och åtgärder för att förlänga konstruktionens livslängd måste baseras på kunskaper om förlopp. Det räcker ej med kunskapen om - eventuellt ur något avseende kritiska - tillstånd (eller ännu värre om icke relevanta kriterier).

Livslängdsaspekten kan anläggas på en mängd egenskaper. Livslängden kan vara ekonomisk, teknisk, estetisk, social m m. Därför kan livslängden begränsas av allt mellan estetiska subtila kvalitetsförsämringar av en yta och teknisk/konstruktiv kollaps av material, komponenter och konstruktioner. En speciell typ av materialpåverkan är vittringsförlopp. Dessa är ett resultat av fysikalisk/kemisk (företrädesvis fuktfysikalisk) samverkan mellan olika material och en angränsande miljö.

Syftet med den föreliggande uppsatsen är att skapa förutsättningar för att styra, påverka eller rent av förhindra nedbrytningsförlopp av vittringskaraktär, dvs förlänga livslängden av material utsatta för vittringspåverkan.

## 1. Vittring av mineraliskt byggnadsmaterial - problem - problemlösningsmetodik

---

Livslängden (ur någon eller några aspekter) av material, komponenter och konstruktioner begränsas genom förlopp som är effekter av en samverkan mellan material och en mer eller mindre aggressiv miljö. Miljöns aggressivitet härrör från ämnen, vilka genom påverkan eller samverkan kan ändra byggnadsmaterials (egenskaper och) verknings sätt i ogynnsam riktning.

Problemet med vittring av byggnadskonstruktioner har bestått sedan urminnes tider. Antika byggnadsmonument av natursten angrips och förstörs genom inverkan av moderna industriavgaser eller i samverkan mellan salter och lösligt material ur marklager. Byggnadsverk från medeltiden av natursten och tegel förstörs genom motsvarande nedbrytningsmekanism, förutom att materialets ytskikt under inverkan av fukt även kan brytas ned genom omlagring av dess vattenlösliga beståndsdelar (Fig 1\*). Moderna byggnadsverk av högkvalitetsbetong bryts ned - eventuellt till teknisk kollaps - under inverkan av tö- och vägsalter (Fig 2\*).

Många av dessa problem är inte lösta - de flesta är knappast formulerade. Orsaken ligger förmodligen däri, att man har försökt att påtvinga den bistra verkligheten resultatet av - visserligen korrekta men tyvärr icke relevanta - hyperintelligenta teoretiska resonemang samt resultatet av otaliga laboratorieförsök och tester. För att slippa formulera hypoteser har man i extremfall faktiskt försökt att utveckla material mot icke relevanta testkriterier, erhållna genom sofistikerade laboratorieförsök. (Det är inte alls säkert, att en viss nedbrytningsmekanism i laboratoriet har en motsvarighet i verkligheten.)

Till skillnad mot det historiska sättet för problemformuleringar och problemlösningar inom saltvittringskomplexet, att i verkligheten finns motsvarigheter till modeller (i form av beräknings- och laboratorieresultat), har syftet med den föreliggande uppsatsen varit det "diametrala": Man har försökt att - sedan man först har formulerat några nya hypoteser - i enkla laboratorieförsök och med hjälp av enkla tester efterlikna förlopp som förekommer i verkligheten, deras förutsättningar och deras effekter. Det

har inte funnits några andra möjligheter att testa några nyformulerade hypoteser - den teoretiska byggnadsfysiken tycks för närvarande sakna nödvändiga begrepps- och formelapparater för att beskriva (och förhoppningsfullt beräkna) vissa speciella nedbrytningsförlopp.



## 2. Saltvandring och saltskador - ett konventionellt betraktelsesätt

### 2:1 Fuktvandring och fuktskador

(Kapillärtransport och issprängning berörs här enbart på grund av deras påstådda analogi med salttransport- och saltsprängningsfenomen.)

Skall större mängder material förflyttas i porösa material, måste transporten förmodligen ske i form av lågviskösa vätskor. Om man bortser från några sofistikerade transportmekanismer, såsom exempelvis elektrokines, Knudsen-diffusion och liknande, står för dessa typer av vätsketransport enbart två transportmekanismer till förfogande, nämligen Darcy-flödet och kapillärtransporten. Många modeller har byggts upp på grundval av termodynamiska funderingar kring materialens fuktrelaterade egenskaper och verknings-sätt i "mikroområdet", bl a beskrivande vattnets samverkan med i första hand mikroporösa mineraliska material (som i de flesta fall är lättvätbara genom vatten). "Rent" vatten kan ändra materialets egenskaper och verknings-sätt: Fuktsvällning, torkning, krympning, frostsprängning är kända och beskrivna genom ganska många olika hypoteser.

Någon enhetlig modell för frostsprängning av poröst byggnadsmaterial har ännu ej kunnat presenteras (Ref 9).

Mättnadsgradsfilosofin anger villkoren för issprängningen av poröst material - eller åtminstone några kriterier härför: Issprängning av poröst till mättnad fyllt material är ett resultat av vattnets volymutvidgning vid frysning (i grovporer?). "Frostsprängningseffekter" lär även ha noterats vid vätskor som minskar sin volym vid temperatursänkning eller bibehåller sin volym (Ref 9) (Fig 3\*). Motsvarande volymutvidgningshypotes räcker inte vid frysning i mikroporsystemet. Några förklaringar till issprängningen i materialets mikroporsystem (fryspunktsfördröjning!) har formulerats: På grund av vissa termodynamiska överväganden har man ansett sig kunna konstatera, att adsorbatskiktets verknings-sätt i mikroporsystemet resulterar i tryck i vatten/isvolymen i porsystemet (Ref 9).

Konventionella fukttransport- och fuktskadehypoteser baseras uteslutande på någon form av massiv porfyllnad (Ref 1). Även om det är lätt att matematiskt/fysikaliskt formulera villkoren för materialets beståndskritiska tillstånd, är det inte alltför lätt att beskriva eller åstadkomma de förlopp som leder till dessa tillstånd.

## 2:2 Saltvandringar

Många effekter i materialets ytor och ytskikt har en omfördelning av saltkoncentrationen som orsak. I sin negativa form kan dessa effekter spänna över ett vitt fält, från rent estetiska kvalitetsförsämringar till konstruktiv kollaps. En slutgiltig - eventuellt hög - saltkoncentration behöver i princip inte vara orsaken till nedbrytning utan skulle kunna vara dess konsekvens.

Mekanismer för salttransporter enligt konventionella modeller har i stort sett övertagits från den "rena" fukttransporten och har därvid ansetts enbart vara kapillärtransport av saltlösningar (Ref 1). De regler som man med hjälp av många instrument och klyftiga teorier har kunnat fastställa gällande för kapillärtransport av vatten i fasta kroppar, har utan vidare extrapolerats att gälla även saltlösningar i fasta kroppar och, vad ännu värre är, för vattentransporter respektive saltlösningstransporter i kroppar med vattenlösliga beståndsdelar i kapillär- och por-systemets väggar. Har man verkligen förfinat modellen med kapillärt inlagrat vatten eller kapillärt transporterat vatten, innehållande lösta ämnen, har man som orsak till saltdiffusionen angett koncentrationskillnaderna av det lösta ämnet (koncentrationsgradienten i kalklösningen vid karbonatisering i betongkonstruktioners ytskikt) som förklaring till transporter (Ref 1:4). Dessa koncentrationsgradienter kan inte ha en alltför stor transportkapacitet eller transporthastighet, åtminstone inte i små porer och kapillärer.

Det är givetvis möjligt att transportera saltlösningar i kapillärt sugande material (de skadefall som i litteraturen finns beskrivna från Tower-byggnaden i London tycks kunna vara av den typen, vissa salttransporter i grundmurar kan ha denna mekanism som del av transportmekanismen för salter). Att saltskador uppträder tillsammans med kapillärtransporter behöver inte betyda, att

kapillärtransporten är den enda transportmekanismen. I samband med salttransporter och saltskador uppträder saltformationer långt utanför grundmaterialets yta. Vilka krafter trycker i så fall ut saltet eller saltlösningen utanför porsystemet?

Det borde alltså finnas några alternativa mekanismer för salttransport och koncentrationsändringar än den konventionella kapillärtransporten. Eller åtminstone borde den konventionella kapillärtransportmodellen förses med en eller några ytterligare facetter, som tar hänsyn till andra parametrar än kapillärväggens vätbarhet (randvinkel 0!) och lösningens ytspänning.

### 2:3 Saltsprängningar

Det blir alltså förmodligen svårt att täcka alla transporteffekter (lägesändringar) med en enda "konventionell" kapillärtransportmodell. Då är det kanske lättare att förlika sig med de modeller som finns och som försöker förklara orsaken till nedbrytningar genom att beskriva kritiska (slut-)tillstånd.

Många av dessa modeller har byggts upp på grundval av termodynamiska funderingar kring materialens egenskaper och verkningssätt i "mikroområdet" (Ref 1:2).

Ur hypoteser eller teorier som försöker förklara tillståndsändringar (förlopp), paradoxalt nog genom att beskriva kritiska tillstånd i porösa material under inverkan av saltlösningar och salter, kan i stort sett följande typer särskiljas:

- (.1) Vissa salter förekommer i olika varianter, som skiljer sig bl a avseende mängden till saltet bundet kristallvatten. En och samma salttyp kan förekomma i ibland förhållandevis många varianter. Salt kan under vissa fukt- och temperatur-betingelser uppta och avge kristallvatten. Uptagning och avgivning av vatten resulterar i volymändringar. Vid vatten-uptagning resulterar volymökningar i tryck mot omgivande material i kapillär- och porsystemets vägg. Dessa tryck skulle kunna vara i storleksordningen 100 Pa. I den moderna litteraturen anges alltid kristallvattenupptagning och -avgivning som resultat av enbart temperaturändringar (Ref

1:1). Enbart i en äldre litteratur finns uppgifter beträffande vattenupptagningsmekanismer som resultat av ändringar i miljöns fukthalt (ångtryck) (Ref 3).

- (.2) I (övertättade) lösningar uppstår enligt termodynamikens lagar stora tryck. Dessa tryck uppstår innan kristaller har bildats ur lösningen. Storleksordningen av dessa tryck kan vara några hundra Pa. Dessa tryck bildas även vid sådana salter, vilka inte ändrar volymen vid kristallbildningen, dvs sådana som inte kan uppta kristallvatten (såsom t ex koksalt vid temperaturer över  $0^{\circ}\text{C}$ ).
- (.3) Stora tryck skulle även kunna uppstå på grund av osmotiska fenomen. För att osmotiska tryckskillnader skall kunna byggas upp, krävs i princip ett membran. Enligt tillgänglig litteratur skulle detta membran kanske kunna utgöras av t ex kiseloxidgel i vissa mineraler och enligt speciella litteraturuppgifter "av själva kapillärväggen"!!!!? Förekomsten av osmotiska fenomen betvivlas på många håll. (Självklart är osmotiska fenomen med i spelet vid biologisk nedbrytning av poröst material.)

Vid de klassiska saltnedbrytningshypoteserna kan vid idealporfyllnad enormt stora tryck i porfyllnaden beräknas. Hypotetiska enorma tryck kan spränga sönder ett material - men hur påverkar hypotetiskt stora tryck kristallbildningsprocessen och motsvarande volymutvidgning?

Även om det finns några vettiga och användbara hypoteser som förklarar några typer av mer eller mindre "kritiska" tillstånd på grund av koncentrationer och eventuella koncentrationsskillnader, kan lägesändringar, dvs själva koncentrationsuppyggnaden, inte utan vidare förklaras med hjälp av dessa hypoteser: Påkänningar och motsvarande nedbrytningseffekter är effekter av ett visst "kritiskt" sluttillstånd (Ref 1:2). Hur detta sluttillstånd har uppkommit tiger hypoteserna om.

#### 2:4 Nedbrytning genom värmeutvidgning

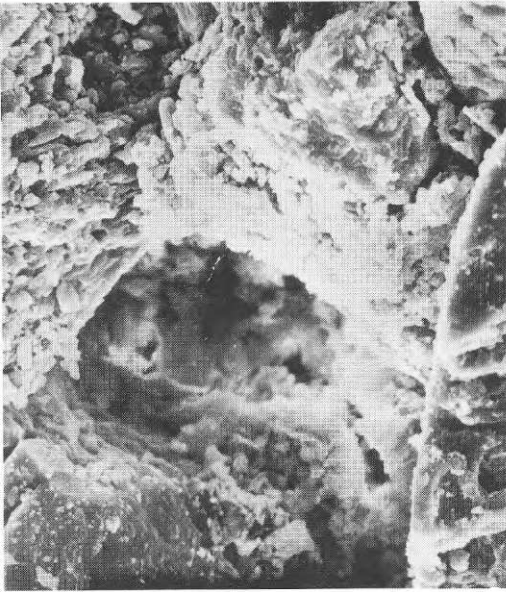
Naturligtvis kan mekaniska tryck - som förutsättningar för tillståndsåändringar - åstadkommas genom olika (värme)utvidgning eller

elasticitet i grundmaterial och kapillärfyllning. Så skulle t ex gipssprängning av mineraliska porösa ytskikt i vissa fall kunna vara följden av uppvärmning och nedkylning (E-modul, värmeutvidgningskoefficient). Den i litteraturen härvid antydda påkänningstypen är att i hålrum inneslutet salt vid utvidgning påverkar porväggarna med normalkrafter. Porväggen skulle således i princip spräckas på grund av upprepade dragpåkänningar i väggen. Man förutsätter i princip att nedbrytningsmekanismen är densamma som vid issprängning, när ett material har fyllts över en kritisk mättnadsgrad.

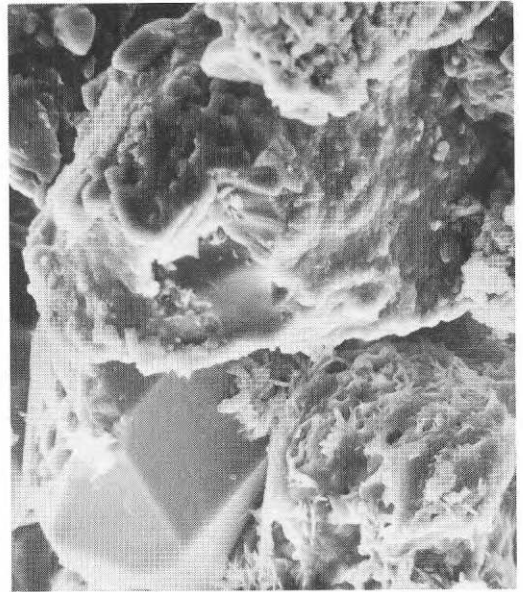
### 2:5 Tolkning av saltsprängningsfenomen

Man har ansett sig ha stöd för många av dessa teorier för saltbildningar och saltnedbrytningar som är baserade på volymändringar av en porfyllnad i de fenomen man kan konstatera i verkligheten. I verkligheten yttrar sig saltsprängningar i stor utsträckning i form av avflagningar, avspjälkningar, blåsbildningar, avsandning och liknande fenomen. Analogt med frostsprängningen, varvid materialnedbrytning åstadkommes genom utvidgning av is i till mättnad med vatten fyllda porösa material, har man tolkat "sprängnings"-resultaten i närvaro av saltformationer så, att de åstadkommes genom volymändringar.

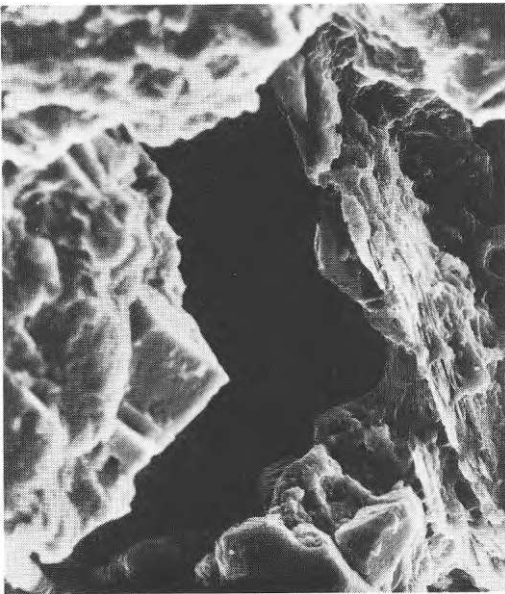
En ibland förekommande saltformation i hålrum under ett avsprängt ytskikt har tagits som intäkt för att saltnedbrytning är en följd av volymändringen av i porrummet inneslutna saltformationer. Blåsor i ytskikt i samband med saltnedbrytningen är dock ytterst sällan fyllda med salt. Det behöver inte vara en massiv saltbildning som sådan som åstadkommer en nedbrytning av materialytskiktet genom blåsbildning, utan det skulle även kunna vara materialnedbrytningen i form av blåsor som möjliggör saltbildningar i de härvid uppkomna hålrummen. (SEM-fotografier med massivt saltfyllda kapillärer och porer i saltskadat material är dessutom ytterst sällsynta.) (Fig 4)



:1 Por i yta av vittrad sandsten  
gipshalt 2 % vikt



:2 Por i ytskikt 5 mm under ytan



:3 Ren por i materialets inre

10  $\mu\text{m}$  

Fig 4 Stockholms slott Gotlandssandsten (AJI)

### 3. Ett skadefall - några reflektioner

#### 3:0 Allmänt

- Närvaron av små mängder lösliga salter i byggnadsmaterials porsystem kan ha katastrofala konsekvenser.
- Förekomsten av stora mängder lösliga salter i byggnadsmaterial kan under vissa omständigheter vara fullkomligt betydelselöst för en konstruktionsdels livslängd.

Moderna konstruktioner av högkvalitetsbetong har brutits ned genom tösaltning. Det har räckt med kloridhalter av ca 1/2 % av bindemedelsvikten för att byggnaderna komplett har brutits ned.

Ett annat exempel som åskådliggör saltlösningars inverkan på porösa mineraliska byggnadsmaterial är den konventionella tö-salt/frostsprängningstesten: Poröst byggnadsmaterial, företrädesvis betong, utsättes för uppvärmning/nedkylningscykler (mellan +20°C och -20°C) samtidigt med att en 3- till 4-procentig koksaltlösning insuges i provkroppen. (Frys punktsfördröjning av en 3-procentig koksaltlösning är några få grader C!) Resistensen av ett poröst material mot denna provbelastning i laboratoriet anses utgöra ett kriterium för en konstruktions förmåga att motstå frost/tösalt-nedbrytning i verkligheten.

På Amerikas västkust står sedan snart 100 år tillbaka ett fyrtorn av betong. Fyrtoronet står i ett rent havsklimat. Betongen i fyrtoronet har tillverkats in situ, dvs havsvatten har använts som blandningsvatten. Miljön består i princip av saltvattenaerosoler. Blandningsvattnet innehöll säkert några procent klorider, dvs lika mycket som saltlösningen använd vid det ovan givna förfarandet för att bestämma ett kriterium för frost/tösaltnedbrytning. Enligt litteraturuppgifter har fyrtornets yta fortfarande skarpa kanter, som inte har nedbrutits av det aggressiva havsklimatet.

Koncentrationen av lösliga salter i byggnadsmaterial är tydligen inte det enda kriteriet för materials verknings sätt vid saltbelastning.



### 3:1 Tegelkräfta i historiska byggnader

Porösa ytskikt av mineraliskt material kan "direkt" nedbrytas genom förlopp, i vilka "rent" vatten (eller svaga saltlösningar) är inblandade. Nedbrytningen, förvittringen, sker mekaniskt-fysikaliskt.

Saltutfällningar i sin enklaste form, dvs estetiska kvalitetsförsämringar av en yta genom missfärgning, utgör inga större problem. Dessa saltutfällningar av lösliga salter försvinner i många fall av sig själva genom miljöpåverkan eller tas bort med några enkla metoder. Saltutfällningar, bestående av från början vattenlösliga salter, kan vara besvärliga, om det är ett första steg i en krustbildningsprocess. Dessa båda materialtypers (grundmaterial och kruster) differerande rheologiska och övriga materialtekniska beteenden är - förmodligen sekundära - nedbrytningsorsaker.

I historiska byggnader och härvid framför allt i deras tegelyta förekommer en speciell nedbrytningsprocess, som har betecknats med tegelkräfta.

Härvid nedbrytes teglet - ofta till fint pulver - skiktvis utifrån och detta ibland utan synlig krustbildning, varvid nedbrytning sker i olika cykler (Fig 5:2\*). Dessa cykler lär uppträda årsvis, varvid det inte kan uteslutas att dessa överlagras av t ex dygnsvariationer.

Nedbrytningsprocessens olika faser följer dock i stort sett årstidsväxlingen. Saltutfällningar och därmed sammanhängande nedbrytningar av ytskiktet uppträder ej enbart i historiska byggnader utan har även blivit påvisade i några enstaka moderna tegelfasader (Fig 5:1\*).

Saltutfällningen och nedbrytningen visar i regel inga direkta samband med byggnadens konstruktiva utformning. Saltutfällningen och materialnedbrytningen är i enstaka fall koncentrerad till murverkets tegelyta - den förekommer då, om över huvudtaget, i mindre utsträckning i bruksfogarna. Nedbrytning av fasadtegelytor i några äldre historiska byggnader kan förekomma i en form, i vilken tegelytan har förstörts intill ett djup av någon millimeter, varvid motsvarande bruksyta inte har förstörts alls.



Bruksfogen "sticker ut" utanför tegelytan - bruket är hygroskopiskt, teglet ej, bruket är mikroporöst och starkare än teglet. Dessa saltutslag förekommer i väggytor i markkontakt men i de flesta fall långt ovanför grundläggningsnivån såväl inom- som utomhus. Dessa saltutslag förekommer i valvkonstruktioner, i golv på mark och väggar. Saltutfällningar kan förekomma på enstaka mycket väl avgränsade partier i tegelmurverk eller tegelgolv. Saltutslagets intensitet kan variera inom vida gränser inom en och samma tegelsten. Många gånger är enbart enstaka delar av teglet angripna.

En annan extrem variant av saltutfällningar i historiska byggnaders murverk är skägg-, vadd- eller vårtliknande saltformationer, som kan uppträda i form av en tjock matta med en tjocklek i storleksordningen upp till några centimeter, men egendomligt nog i många fall utan nedbrytning av underlaget (Fig 5:3\*).

Det har på några håll förmodats, att nedbrytning av tegelmurverk i gamla byggnader och konstruktioner är en följd av byggnadernas modernisering eller återanvändning under senare tid. Man har härvid även förmodat, att nedbrytningen har accelererat den senaste tiden. Några belägg härför har dock ej kunnat lämnas. Det är dock klart, att extrema miljöförhållanden och deras variationer kan påverka art och omfattning av nedbrytningsförlopp i gamla tegelmurverk. Detta skadefall, nämligen tegelkräfta, skulle kunna vara ett typexempel på saltvandringar och saltnedbrytningar i konstruktioner av poröst mineraliskt byggnadsmaterial, från söndervittrade lerhyddor i salthaltig ökensand till kollapsade tösaltskadade moderna brokonstruktioner av högkvalitetsbetong.

### 3:2 Saltutfällningar på tegel

Det har skrivits ofantligt mycket om saltutfällningar (t ex Ref 1:1). Mycket som har skrivits är mer eller mindre självklart. Förutsättningar för uppkomsten av saltskador har inventerats. Effekten av saltskador har beskrivits. Däremot saknas beskrivningen av den fysikalisk/kemiska mekanismen för salttransporter och -nedbrytningar, dvs hur förutsättningar och effekter verkligen hänger ihop.

### 3:3 Sveaborg och Tavastehus - saltskador i tegelmurverk

Den ovan beskrivna tegelkräftan förekommer i stor utsträckning på några byggnadsverk från medeltiden på Sveaborg i Finland.

Omfattande undersökningar och analyser från icke skadat och salt-skadat tegel föreligger i form av Th Peranders arbete citerat i inledningen. Undersökningarna har haft till syfte att dels inventera tegelmaterialets fysikaliska egenskaper och verknings sätt och dels att bestämma olika tegelmaterialets mineraliska sammansättning, bl a även det brända teglets halt av lösliga salter. Även om denna undersökning redogör för förutsättningar och effekter (och inte förlopp) har den kunnat användas till att konstatera vilka förlopp som inte kan förekomma.

Resultatet av den omfattande undersökningen skulle i stora drag kunna sammanfattas enligt följande (Fig 6, Tab 1).

Några signifikanta skillnader mellan det skadade ytskiktet och icke skadat grundmaterial och icke skadade ytskikt:

- (.1) Skadat material har något lägre densitet och högre porositet, två egenskaper som förmodligen korrelerar och skulle kunna vara avhängiga av bl a bränntemperaturen.
- (.2) Det skadade materialet innehåller, till skillnad mot det icke skadade materialet, en högre halt av glimmermaterial (biotit och liknande).
- (.3) Icke skadat tegelmateriale har den för tegel typiska "flacka" adsorptionsisotermen. Det skadade materialet har en mycket brantare adsorptionsisoterm vid högre fukthalt än det icke skadade materialet - som om det vore hygroskopiskt. Tegel är inte hygroskopiskt, det är grovporöst. Saltformationen är däremot hygroskopisk och förmodligen finporös.
- (.4) Däremot skiljer sig inte de båda materialtyperna åt avseende vattenupptagningsförmåga och vattenmättnadsgrad!!! De har tydligen i stort sett samma "öppna" porvolym (makroporer).

Tabell 1. Tegelprovrens fysikaliska egenskaper

Prov grupp 1 vittrad	grupp 2 oskadad	Vattenuppt.		Täthet g/m <sup>3</sup>	Fukthalt		RF 70 %	Fukthalt		RF 90 %	Salthalt totalt vikts-%
		förmåga vikts-%	vatten- mättnads- grad		vikts-%	RF 80 %					
S2		8,3	13,9	1,88	0,91	4,6	9,0	13,9	2,2		
S7		12,3	12,9	1,92	0,89	4,8	8,8	12,9	5,0		
S9		3,0	5,1	1,98	0,86	1,0	3,3	5,1	1,0		

Tabell 2. Tegelprovrens vattenlösliga salter i % av teglets torrsvikt

Tegelprov 1 vittrat	Tegelprov 2 oskadat	Total- halten	Saltinnehåll (%)						
			Na	K	Ca	CO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Cl	NO <sub>3</sub>
S2		2,2	0,4	0,1	0,2	0,1	0,02	0,7	0,2
S7		5,0	1,2	0,3	0,01	1,9	0,2	0,8	0,4
S9		1,0	0,2	0,03	0,01	0,3	0,04	0,1	0,06

Tabell 3. Tegelprovrens vattenlösliga salter omräknade i molförhållanden där Na = 10 mmol

S2	Molförhållanden					
	Na	K	Ca	CO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Cl
S2	10	2	2	1	1	10
S7	10	2	1	1	6	4
S9	10	1	1	1	6	3

Fig 6 Tegelanalyser Sveaborg, Finland

ThP  
Eget arbete  
Referens 1  
(utdrag)

(.5) Den mest signifikanta skillnaden dessa båda materialtyper emellan är naturligtvis salthalten och dess konsekvenser och i viss mån även saltsammansättningen. Det tycks finnas ett kritiskt värde för salthalten avseende materialnedbrytning. Det lär i detta fall ligga omkring 1 % av materialvikten. Icke skadade partier har denna salthalt (och lägre). Skadade partier har avsevärt högre salthalt, dvs några få procent, och egendomligt nog inte mycket mera heller. Dessa salthalter finns dokumenterade även i annan litteratur (Ref 1:2).

Man skall inte utan vidare förledas tro, att salthalten eller högre salthalter är orsaken till nedbrytningen. Rent logiskt skulle även nedbrytningen kunna vara orsaken till höga salthalter.

Sammansättningen av salterna i Sveaborg är lite egendomlig (Fig 6, Tab 2 och 3). När den konventionella litteraturen om saltutfällningar mest handlar om sulfater och berör karbonater och koksalt mer eller mindre som en parentes, är det i det speciella fallet karbonat-, klorid- och även nitratdelen som utgör den mest markanta andelen av salterna i de analyserade saltproverna. Sulfater förekommer endast obetydligt, cirka 0,01 % av grundmaterialvikten. (Detta skulle betyda, att den "klassiska nedbrytningsmekanismen", nämligen gipssprängningar och sulfatsprängningar, i detta fall inte torde utgöra en dominerande del av nedbrytningsmekanismen.)

Man kan naturligtvis spekulera lite om salterna har tillsatts frivilligt eller om det är något resultat av ett olycksfall i arbetet, som t ex olämpligt val av grundmaterial, olämplig brännmetod eller liknande. Beroende på byggnadens användningsform, som t ex stall, förrådsrum för koksalt, fängelse med dåliga sanitära förhållanden, kan en mängd olika salter ha kommit in i murverket. Salterna kan under årens lopp ha förflyttats inom murverket. Ett mycket intressant fenomen kan konstateras vid dessa skadefall, nämligen att teglet är nedbrutet intill ett djup av någon eller några millimeter, fastän några synliga saltformationer ej uppträder, ej ens vid komplett kollaps av tegelytan.

Men de utförda analyserna visar tydligt följande:

Fukthalten i det skadade materialet är så låg, att kapillärtransporter av saltlösningar absolut inte kan förekomma.

Saltvolymen i det skadade materialet är så liten (högst en tredjedel av porvolymen), att saltsprängningar i det grovporösa teglet genom porfyllnad och volymökning inte kan ha förekommit.

Törs man ge sig på en hypotes beträffande egenskaper och verknings-sätt av saltutslaget i porsystemet, kan man göra det med hjälp av de uppmätta adsorptionsisotermerna för skadat och icke skadat material.

Det icke skadade materialet har en adsorptionsisoterm som liknar de i litteraturen förekommande isotermerna för tegelmaterial (Ref 1:3). Även adsorptionsisotermen för saltbemängt och skadat tegelmaterial har en likhet med adsorptionsisotermerna för saltlösningsdränkt material, som förekommer i litteraturen (Ref 1:3). (I litteraturen förklaras den "branta" adsorptionsisotermen med en "större hygroskopicitet" (?) - tegel som sådant är inte hygroskopiskt!)

Alla de kristallformationer som bildas består förmodligen av ett otal mycket små partiklar - de är i alla fall inte massiva.

Det kan inte vara några massiva sprängningsmekanismer av typ hårdnande gips eller utvidgande is som spräcker materialet. Det måste vara några andra fenomen.

Tegelkraften i historiska byggnader dokumenterad genom massiv nedbrytning av murverksytter i Tavastehus och på Sveaborg i Finland kräver andra förklaringar till salttransporter och -nedbrytningar än de konventionella hypoteserna.

- Salttransporter åstadkommes inte genom kapillärtransporter.
- Saltnedbrytning sker ej genom volymutvidgning av ett massivt porfyllande salt.



#### 4. Saltbildning på tegel - kommentarer till några försök

##### 4:1 Saltförekomst i tegel

Som tidigare påpekats förekommer en omfattande litteratur (Ref 1:1, 10 t ex), som redogör för förekomsten av vattenlösliga och icke vattenlösliga salter i tegelmaterial. Salterna kan vara ett resultat av materialtillverkningsprocessen, val av salthaltiga utgångsmaterial, speciella förhållanden under tillverkning, bränning och lagring. Salter kan härvid bildas genom samverkan av tegelmaterialets beståndsdelar (tillsammans med fukt). Salter kan även bildas genom reaktioner mellan teglets beståndsdelar och komponenter i en angränsande mer eller mindre aggressiv miljö (vatten, svavel, kväve i gasform, klorider i saltvatten, aerosoler m.m m.m).

Analyserna av medeltidstegel från Sveaborg och Tavastehus slott uppvisar höga halter av natriumklorid, natriumkarbonat och nitrater, salter som inte förekommer i den "konventionella" litteraturen över saltutfällningar på tegelytor. Det bör påpekas, att natriumkarbonater i och för sig skulle kunna delta i några saltsprängningsprocesser av volymutvidgningstyp, om man bortser ifrån att temperaturen i de berörda konstruktionsdelarna, som till stor del var inomhuskonstruktioner, delvis var mycket jämn och delvis förhållandevis låg, något som skulle betyda, att omkristallisation omkring 30°C inte skulle behövt förekomma. Natriumklorid som sådan bildar vid temperaturer ovanför 0°C inga hydratsalter överhuvud taget.

Det låg förhållandevis nära till hands att intressera sig för sättet på vilket de porösa saltstrukturerna på tegelmaterialets yta bildas. Därför har det föranstaltats om några försöksserier.

##### 4:2 Saltbildning, fukt och temperatur

Redan i ett förberedande skede av denna undersökning formulerades, utgående ifrån att bildandet av de speciella saltstrukturerna inte berodde på kapillärtransporter och porfyllnad, en hypotes att såväl saltvandringar som saltsprängningar är resultat av miljöns eller porvolymens fukthalt och/eller temperatur (och framför allt ändringar i dessa!). Saltbildningens avhängighet

från i första hand relativ fukthalt samt givetvis även avhängigheten från salttypen undersöktes (Fig 7\*, 8\*).

(Förmodligen skulle en termodynamisk behandling av problemkomplexet leda till att "konventionella" parametrar, såsom ångtryck, partialångtryck, mätnadsångtryck och liknande, skulle vara adekvata storheter, med vars hjälp man kunde precisera förutsättningar för och effekter av salttransport- och saltsprängningsfenomen.)

I avvaktan på en teoretisk fysikalisk/ytkemisk formulering av dessa hypoteser får några "grovparametrar" räcka, nämligen

- miljöns (relativa) fukthalt och miljöns temperatur,
- mätnadsfukthalt över mättade saltlösningar i relation till miljöns mätnadsfukthalt, dvs "100 % RH" över vatten- respektive saltlösningar.

Resultatet av dessa förförsök skulle kunna sammanfattas enligt följande:

- (.1) Fällning av den porösa saltstrukturen på tegelytan förekommer enbart vid miljöfukthalter under mätnadsfukthalten över saltets mättade lösning.
- (.2) Saltbildningshastigheten ökar med sjunkande fukthalt i den till tegelytan angränsande miljön.
- (.3) Saltbildningshastigheten ökar med stigande koncentration av saltlösningen.
- (.4) Saltbildningshastigheten ökar med temperaturen i den omgivande miljön, motsvarande en ökning av mätnadsfukthalten, dvs en sänkning av RF.

I samband med dessa försök kunde även bekräftas, att nedbrytning av ytskikt även förekommer hos salter, vilka inte innehåller kristallvatten, såsom koksalt i temperaturintervallet ovanför 0°C. Dessa förförsök visar dessutom, att grovstrukturen i dessa salter observerade i stereomikroskop inte har något släktskap med de respektive salternas idealkristallform enligt kristallografins allmänna regler.



Grovstrukturen varierar ej enbart de olika salterna emellan, den är för ett specifikt salt dessutom beroende på den relativa luftfuktigheten i vilken salterna "kristalliserar" (Fig 9).

Dessutom kunde vid dessa förförsök även det i och för sig redan kända faktumet konstateras, att det inte finns några samband mellan kristallformen av blandsalter och kristallformerna av de i blandningen ingående respektive salterna.

Vid dessa förförsök kunde även konstateras, att det förutom temperatur och luftfuktighet och lösningskoncentration även finns ytterligare en dominant parameter, nämligen saltlösningens alkalitet (Fig 10).

De i dessa försök åstadkomna saltformationerna vid uttorkningen av fuktigt salthaltigt grovporöst tegelmaterial liknar i princip de saltformationer som har kunnat konstateras i historiska byggnader, härvid i första hand i utrymmen med konstant fukthalt och konstant temperatur. Ur grovstrukturen av dessa finfasriga saltformationer kunde inte några slutsatser dras om de nål-, vadd- och trådliknande formationerna växer på toppen eller på botten (tegelpulver finns nästan alltid på den porösa kristallformationens topp!!!) - förmodligen på toppen (Fig 11\*).

Man kunde provocera bildandet av porösa saltformationer på materialytorna utan att tegelmateriallets porsystem var mättat eller fyllt med saltlösningar. Förutom fukthalten i miljön inverkar även temperaturen på bildningshastigheten av högporösa saltformationer utanför materialytan. Att själva saltbildningsprocessen inte är ett resultat av kapillärtransporter framgår av det faktum, att salterna bildas utanför kapillärerna och utanför kapillärernas mynning mot materialytan. Salttransporten kan i extremfall ske några centimeter utanför materialytan med skägglänkande formationer som följd.

## 1. Salterna sedda under stereomikroskop







Salt	relat. fukt.		Kommentarer
NaCl	45 %		mycket små kristaller, ej kompakt ihoppresade
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	45 %		kompakt kristallstruktur, relativt hårda. Kristallerna delvis tomma innuti
"	70 %		fina tunna och långa band
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	45 %		alltignom små kristaller
"	70 %		stora klara kristaller
NaCl + Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	45 %		mindre kompakt kristallstruktur än ren Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> . Innehåller fina nålar och kristallerna är mjukare än ren Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> .
NaCl + Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	45 %		kristallstrukturen som bollar och innuti bollarna små genomskinliga kristaller.

Fig 9 Salters och blandsalters grovstrukturer under olika fuktförhållanden i miljön (ThP)

## 2. Salterna sedda under stereomikroskop




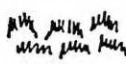
Salt	relat. fukt.		Kommentarer
NaCl	45 %		mycket små kristaller, ej kompakt ihoppressade
NaCl alkalisk	45 %		ingen väsentlig skillnad till ren NaCl, men något porösare
NaCl, sur	45 %		större kristaller än i ren NaCl, bättre ihopkittade
NaCl alkalisk	70 %		mycket stora kristaller, ej tydligt kubiska utan rektangulära
NaCl sur	70 %		tunn fin kristallstruktur, (eventuellt karbonatiserad)

Fig 10 Saltbildningar i avhängighet från pH-värdet (ThP)



## 5. Saltlösningars fyktfysik - några mycket enkla synpunkter

---

### 5:1 Allmänt

Det finns redan många varianter beskrivande möjligheter att transportera vattenlösliga ämnen. Det finns redan många varianter beskrivande mer eller mindre hypotetiska möjligheter att åstadkomma sådana normaltryck mot porväggar att materialet kan krossas sönder "inifrån" (eller även dras sönder!!!).

Det borde finnas några varianter till.

Förutsättning för en speciell typ av materialförflyttningar och strukturförändringar är följande.

### 5:2 Salttransporter - förutsättningar

En speciell typ av material- och salttransporter i porösa material och på fria materialytor är inte tvåfastillstånd utan fyrfasförlopp.

De faser som deltar i eller påverkar transportprocessen är

- ett vattenlösligt material (t ex salt) eller/och vattenlösningar (saltlösningar)
- ett icke vattenlösligt material eller/och vatten
- blandningar luft-vattenånga ovanför salt- eller saltlösningssytor
- blandningar luft-vattenånga över icke lösningsbara material eller ovanför vattenytor (Fig 12:1).

Dessa fyra faser kan enbart undantagsvis stå i entydig jämvikt. Står de i jämvikt, är denna jämvikt förmodligen mycket labil. Utjämningsprocesser med åtföljande transporter kan förekomma mellan respektive gasfaser, bland båda vätskefaserna och mellan respektive vätskefaser och de angränsande gasfaserna (Fig 12:2).

Motsvarande utjämningsprocesser medger i stort sett följande materialtransporter:

- vattentransport ånga/vätska från respektive gasfas till vätskefas och vice versa
- vätsketransporter mellan de respektive vätskefaserna på grund av osmotiska fenomen, koncentrationsgradienter, den s k Knudsen-

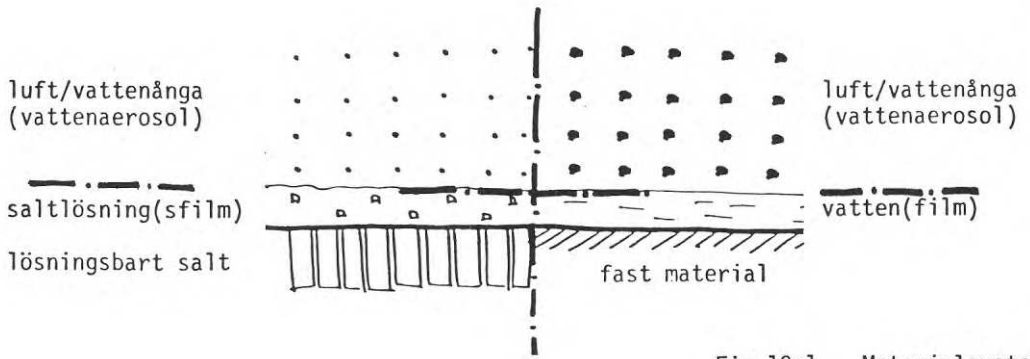


Fig 12:1 Materialsystem

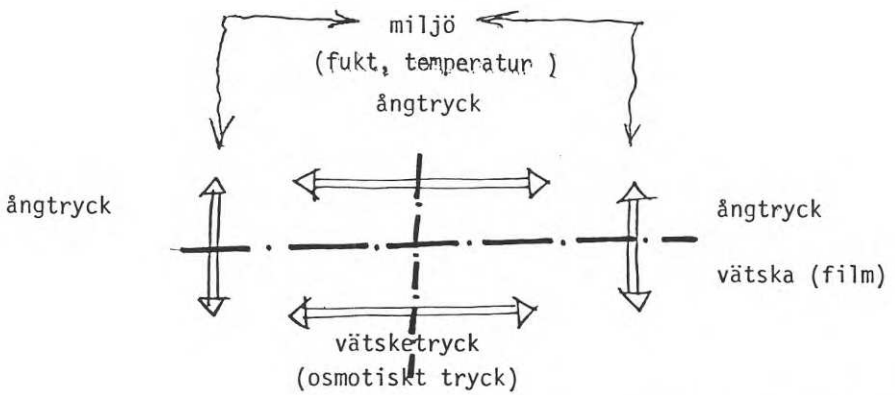


Fig 12:2 Jämviktssystem

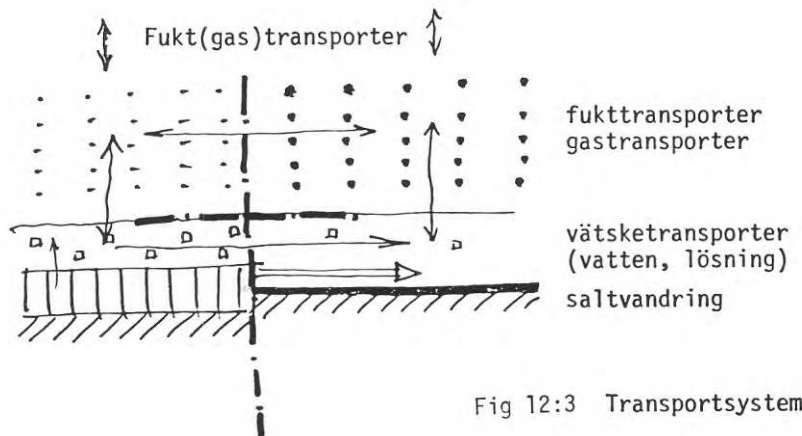


Fig 12:3 Transportsystem

Fig 12 Förutsättningar för saltvandrings- och saltnedbryt-hypotes

diffusionen eller liknande och koncentrationsutjämnning i vätskan

- gastransporter (och aerosoltransporter) mellan och i gasfaserna
- samt slutligen salttransporter som konsekvens av labiliteter i en speciell form av vätsketransport (Fig 12:3).

Med termodynamikens hjälp kan, åtminstone i grova drag, formen av en vätskeyta beskrivas som inställer sig dels som följd av en jämvikt mellan trycket i vätskefasen och trycket i den angränsande gas/ångfasen och (eventuellt) dels som resultat av den ömsesidiga påverkan mellan vätskefasen och ett till vätskefasen angränsande ickelösligt material. Detta gäller små ytor och små volymer - det gäller ju differentialekvationer. Detta gäller dock ej större ytor och volymer och förlopp - om man inte integrerar i volym och tid!

Uttorknings- och fuktupptagningsförlopp av vatten och saltlösningar är mer komplexa än termodynamikens tillståndsdifferentialekvationer kan redogöra för.

### 5:3 Uttorkning på och kondens från fria vattenytor

Umedelbart ovanför en fri vattenyta är luften alltid fuktmättad. Denna mätnadsgrad är avhängig av temperaturen, temperaturen styr mängden vattenånga som kan upptas i gränsskiktet mellan luft och vatten.

En vattenyta kan avge fukt till en angränsande luftvolym antingen tills luftvolymen är mättad med vattenånga eller tills vattenvolymen har torkat in.

Innehåller en luftvolym mera vatten än mätnadsfukthalten, kondenserar vattenångan i form av aerosoler i luften eller på fasta ytor eller vätskeytor. Detta försiggår så länge vatten/vattenånghalten i luften är större än mätnadsfukthalten eller tills luften blir fuktmättad.

Dessa uttorknings- och nedfuktningsförlopp är på olika sätt temperaturberoende. Uttorkning sker lättare från kalla till varma volymer. Kondens uppträder lättare från varma till kalla volymer.

De respektive förloppen kan överlagras av konvektions- och gravitationsfenomen.

En speciell typ av förlopp är torkning från och kondens på - tillräckligt stora - vattenfilmer med begränsad utsträckning. Transportmodellen förutsätter att underlaget är vätbart och inte sugande - en förutsättning som även torde vara uppfylld i mikroområdet av grovporöst sugande material.

Vid uttorkning är fukthalten "ovanför" och "bredvid" en vattenfilm, dvs i vattenfilmens mittzon och i dess randzon, olika (Fig 13).

I gränsskiktet mellan vattenfilm och luften är luften vattenmättad. I gränsskiktet mellan filmens - vätbara - underlag (omedelbart utanför filmkanten) och luften är fukthalten lika med luftens fukthalt. Det finns en fukthaltsgradient ovanför vattenfilmen från filmens innerzon till filmens randzon. I randzonen är fukthalten lägre än mättnadsfukthalten omedelbart ovanför filmens innerzon: Avdunstningen sker snabbare i filmens randzon. Vätskeförlusten vid avdunstning är större i filmens randzon. På grund av vattenfilmens viskositet sker en vätsketransport från innerzonen mot randzonen. Denna vätsketransport förutsätter en viss tjocklek av vattenfilmen. Vätsketransporten avstannar så snart bindningskraften mellan filmen och vätbart underlag har blivit för stor (dvs när filmen har blivit tunn).

Vid kondens på vattenfilmer med begränsad utsträckning förekommer "samma förlopp, fastän tvärtom". Kondens sker först på ett redan fuktigt underlag, dvs sker först i en vattentäckt eller fuktig innerzon.

Om dessa transportfenomen i vattenfilmen vid uttorkning och kondens ska förekomma, förutsätter det, att vattenfilmen har en viss minimiutsträckning. Är vattenfilmen för liten, är fukthaltsgradienten mellan innerzon och randzon för liten för att kunna initiera vätsketransporter i "filmen".

Motsvarande fenomen vid uttorkning från och kondens på vattenfilmer gäller även vid uttorkning från och kondens i kapillärer och porer (Fig 14).



## Fukthaltsgradient ovanför filmen

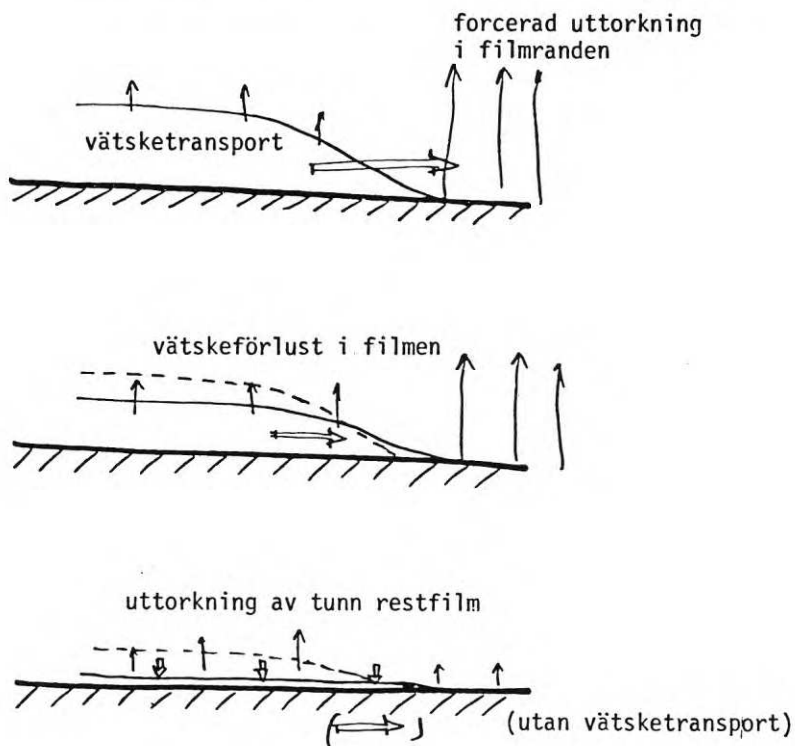


Fig 13 Uttorkning av vattenfilm på vätbart underlag

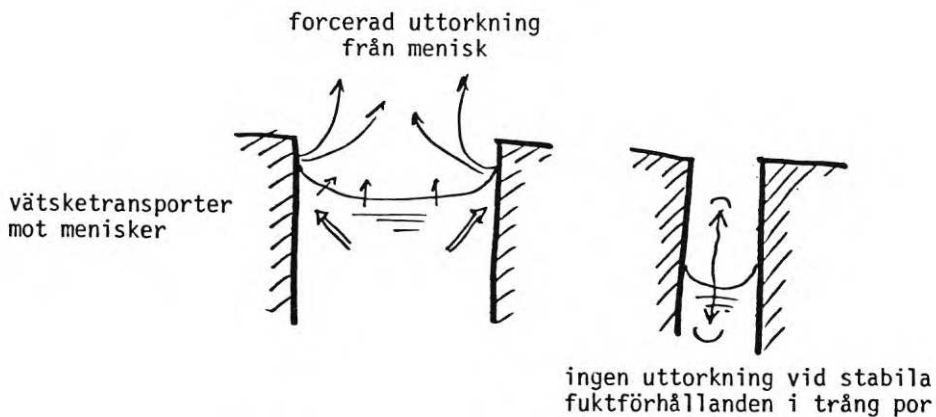


Fig 14 Uttorkning av porfyllning

Att en forcerad uttorkning eller kondens kan åstadkommas i materials ytskikt förutsätter, att förhållanden i vätskemenisken mot den våtbara porväggen inte influeras av förhållanden omedelbart ovanför vätskeytan i poren. Detta förutsätter, att poren är tillräckligt stor eller/och att randvinkeln av vätskan mot porväggen är tillräckligt liten (eller att poren är tillräckligt grund).

Uttorkning från eller kondens i små porer och kapillärer (diffusion) följer däremot termodynamikens gaslagar (Ref 8).

#### 5:4 Saltlösningar och luftfuktighet

Den "konventionella" byggnadsfuktfysikens lagar gäller inte tillstånd och förlopp med fixering och transport av lösningar (i synnerhet saltlösningar) på och i material bestående av eller innehållande lösliga, i synnerhet vattenlösliga, delar.

Mättnadsfukthalten ovanför saltlösningar är - ibland avsevärt - lägre än mättnadsfukthalten ovanför vattenytor vid i övrigt samma förhållanden.

Mättnadsfukten över saltlösningen är beroende på salttyp och -koncentration samt temperatur.

Mättnadsfukthalten över lösningar av saltblandningar eller bland-salter kan icke direkt härledas ur de respektive enstaka salternas mättnadsfukthalt.

Kondens på och avdunstning från saltytor eller på saltlösningsfilmer sker vid lägre fukthalt och vid högre (daggpunkts-)temperatur än på våtbara icke vattenlösliga ytor eller på rena vattenfilmer.

Avdunstning från vattenlösliga salter eller från saltlösningar sker långsammare, kondens sker snabbare, än motsvarande avdunstning från och kondens på vatten eller fuktiga våtbara ickelösliga materialytor.

Över mättade saltlösningar i slutna kärl åstadkommes alltid en för saltlösningen specifik fuktmättnadsgrad ovanför saltlösningen under förutsättning att fuktavgivningen från saltlösningen kan mätta luften, dvs att den mättnadsbara luftvolymen inte är för stor i relation till lösningsvolymen.

Sammanfattningsvis skulle man lite klumpigt kunna uttrycka det så att 100 % RF ovanför saltformationen betyder mindre fukthalt än 100 % RF ovanför vätbart icke vattenlösligt material. Motsvarande resonemang gäller även för vätskor: 100 % RF ovanför saltlösningar betyder mindre fukthalt än 100 % RF ovanför rent vatten. Det är dessa fakta som styr en speciell typ av saltvandringsprocess.

### 5:5 Uttorkning från och kondens på saltlösningssytor

Avdunstning från och kondens på saltlösningssytor sker i princip på samma sätt, fastän mer komplext, som vid vattenytor.

Kondens på saltformationer eller saltlösningssytor sker redan på fukthalter under luftens mättnadsfukthalt, dvs under 100 % RF. Fuktupptagning på salter sker tills saltlösningen är mättad eller tills luftens fukttinnehåll motsvarar mättnadsfukthalten ovanför respektive saltlösning.

Uttorkning från utspädda saltlösningar sker så snart luftens fukthalt är mindre än mättnadsfukthalten över respektive saltlösning. Uttorkningen av saltlösningen försiggår tills saltlösningen är koncentrerad, givetvis under förutsättning att luften kan uppta motsvarande fukt eller tills luftens fukthalt har kommit i balans med saltlösningens mättnadsfukthalt.

Vid extrema fuktförhållanden, dvs när luftens fukthalt är större än luftens mättnadsfukthalt eller lägre än saltlösningens mättnadsfukthalt, kan speciella fenomen uppträda. Saltlösningen kan spädas ut till mindre koncentration än mättnad. Saltlösningen kan torka in tills fasta saltformationer har bildats. - I och för sig självklarheter. Alla dessa förlopp kan förekomma vid uttorkning av och kondens på saltformationer eller saltlösningssytor.

Även på saltfilmen på ett vätbart icke lösligt underlag finns det olika fuktförhållanden ovanför filmen och ovanför underlaget (utanför filmens kant). Det finns alltså gradienter för fukthalten i gränsskiktet mellan luft och saltfilm/underlag.

På en film med övermättad saltlösning kondenserar vid luftfukthalter mellan 100 % RF (vatten) och 100 % RF (saltlösning) fukt på salt-

filmen samtidigt med att vatten avdunstar från underlaget i filmkanten (Fig 15).

Vatten som avdunstar från underlaget kan omedelbart kondensera på saltfilmens rand. Några större materialtransporter i filmen förekommer inte, trots att luftens fukthalt är lägre än mättnadsfukthalten 100 % RF (luft).

Däremot uppträder en speciell materialtransport vid uttorkning av saltlösningfilmer, när luftfuktigheten är lägre än saltlösningens mättnadsfukthalt (Fig 16).

Även här förekommer i gränsskiktet mellan luft och saltfilm/underlag en gradient. Avdunstningen i saltlösningens randzon sker snabbare än i saltfilmens innerzon. Saltlösningfilmer är viskösa. Olikheter i avdunstningen medför en väsketransport mot randzonen till. Vid fortsatt uttorkning fälls saltet ut i filmens randzon. Materialtransporten försiggår så länge som filmens tjocklek i innerzonen blir så liten att vätskan fixeras på underlaget.

En mindre del av lösningens saltinnehåll fälls ut i filmens innerzon. Saltfilmer torkar ut mot randzonen till dels om filmen är tillräckligt tjock så att filmen tillåter väsketransporter och dels om filmytan är tillräckligt stor så att det kan finnas olika fuktförhållanden över filmens randzon och filmens innerzon. Uttorknings- och saltbildningsförloppet kan påverkas av konvektion och gravitation.

Även vid uttorkning i porer och kapillärer genom uttorknings- (och kondens-)förlopp är det samma förlopp som förekommer under förutsättning att de saltlösningssydda porerna är tillräckligt stora och att inte förhållanden intill menisk och över vätskeytan influerar varandra (Fig 17).

#### Sammanfattning:

Vid uttorkning av saltlösningfilmer torkar randzonen (menisker) alltid snabbare än innerzonen. Så länge lösningsmedlet i innerzonen inte har avdunstat, förekommer vätske- och härmed salttransporter mot filmens rand (menisker) (fria ytor). (Analogt gäller detta även vid uttorkning ur stora porer med vätskefyllda porer.) Salt fälls ut koncentrerat i filmkanten (Fig 18\*).

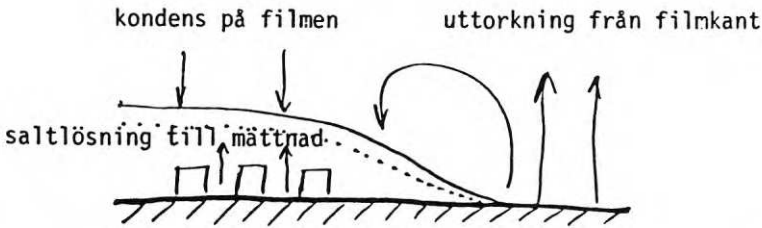


Fig 15 Materialtransporter vid fukthalter under mättnadsfukthalten i miljön och över mättnadsfukthalten över saltlösningen

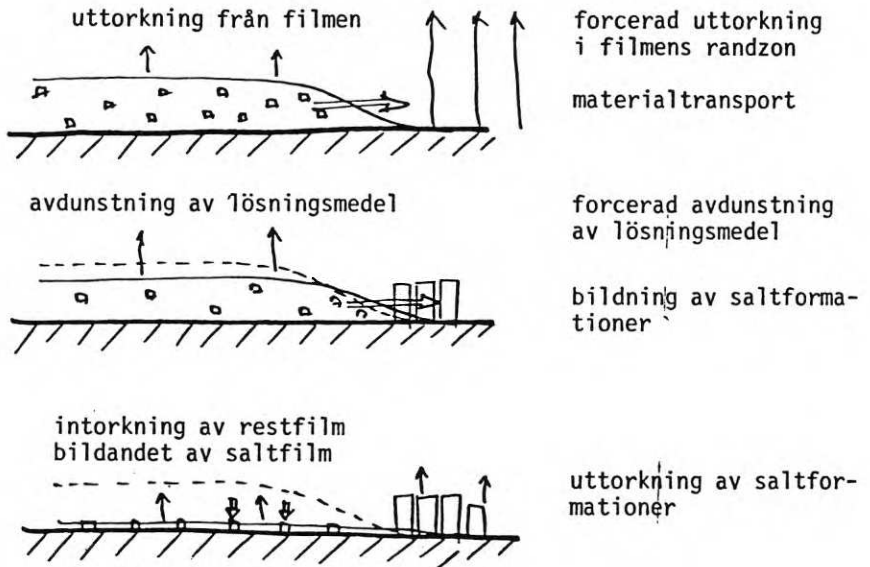


Fig 16 Uttorkning av saltfilmer

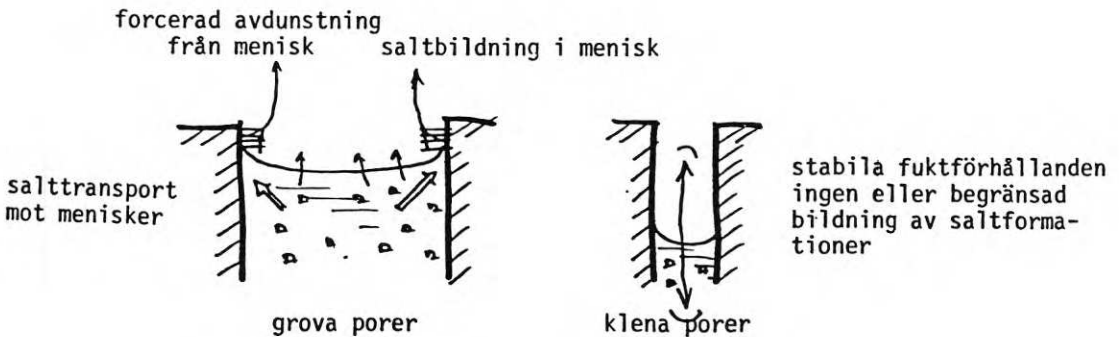


Fig 17 Uttorkning av saltlösningar från porer



## 6. Saltvittring

I det nedanstående skisseras en enkel hypotes för saltvandringar och saltnedbrytning av porösa material. Det är självklart, att denna skiss inte tillnärmelsevis uppfyller de kriterier man kan ställa på en väl formulerad hypotes.

### 6:1 Saltvandringar

Uttorkningen av begränsade saltlösningssfilmer är ett speciellt fenomen. I filmens randzon är fukthalten över lösningen lägre än i filmens innerzon. Detta betyder att fuktavgivningen är större i filmens randzon. Detta i sin tur betyder att vätsketransporten sker från filmens inre till randzonen. Dessa vätsketransporter resulterar i salttransport. Under uttorkningsförloppet faller salt ut i randzonen ur övermättade lösningar. Så länge lösningsmedlet i innerzonen inte heller har avdunstat, förekommer således vätske- och härmed salttransporter mot filmens rand. I randzonen av en övermättad saltlösningssfilm faller kristallerna - till att börja med - ut i idealform. Saltformationerna avlagras i princip i randen av vätskefilmen, i menisken. Förhållandet är annorlunda när vätskeflödet mot filmkanten inte avstannar vid uttorkningen, när i randzonen avdunstat lösningsmedel ersättes med mer eller mindre koncentrerad saltlösning (Fig 19).

Detta kan ske t ex med hjälp av kapillär "eftertransport" eller genom att filmens deformation vid uttorkning leder till dynamiska fenomen med vätskeflöden utanför den ursprungliga filmkanten som följd.

Detta resulterar i turbulenta strömningsförhållanden i filmranden. Saltlösningen i filmranden kan således dels bli utspädd och dels bli överkoncentrerad, salt fälls ut i filmranden, salt löses igen och fälls ut igen. Härvid uppträder små fluktuationer i lösningens koncentration kring mättnadshalten, resulterande i att salt delvis utfälls ur en övermättad lösning och dels löses i en något utspädd lösning under lösningssfilmens transport på underlaget. I detta fall sker ej enbart en omlagring av saltlösningen mot filmkanten utan även filmkanten vandrar mot områden med låg fukthalt samtidigt med att saltformationer bildas i den vandrande

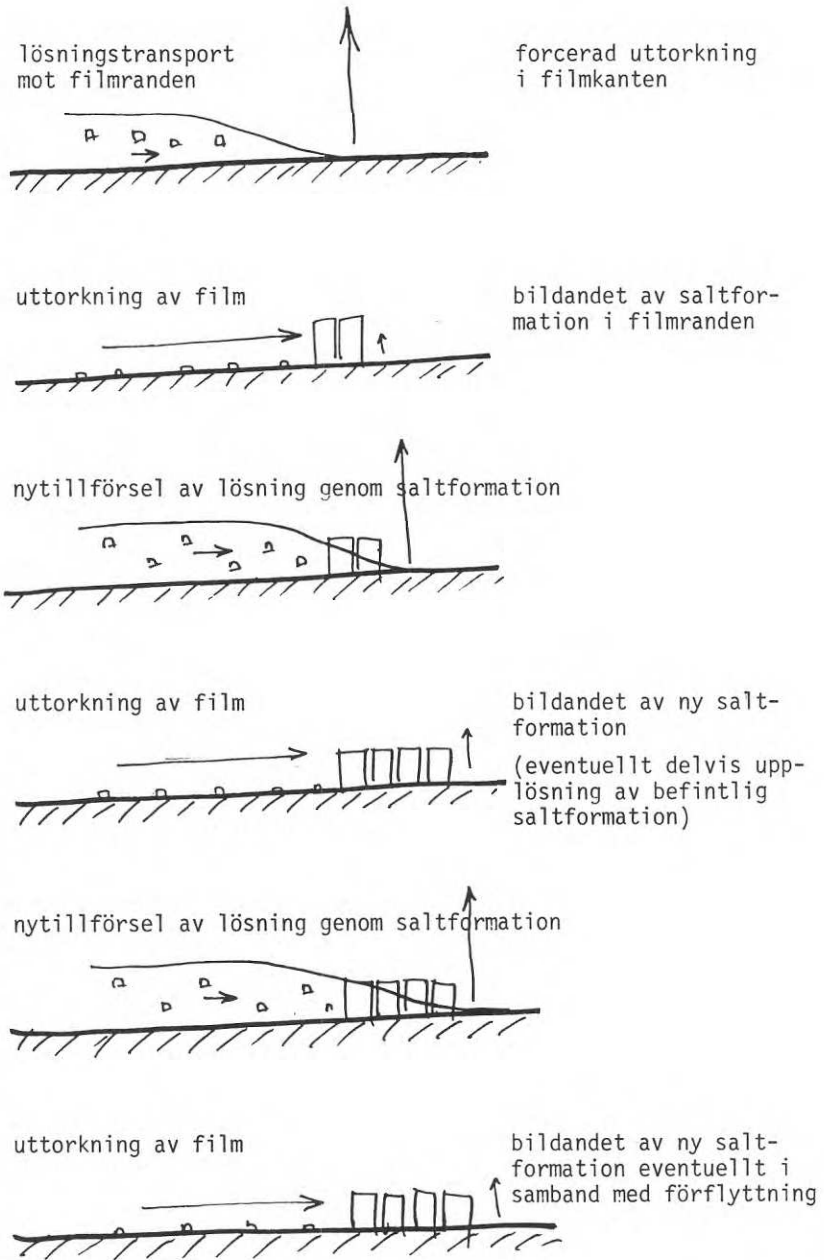


Fig 19 Princip för saltvandring



lösningensfilmen. (Saltbildning sker faktiskt "framför" lösningen.) Detta betyder att saltformationen inte bildas av ideala kristaller utan är en porös struktur (Fig 20).

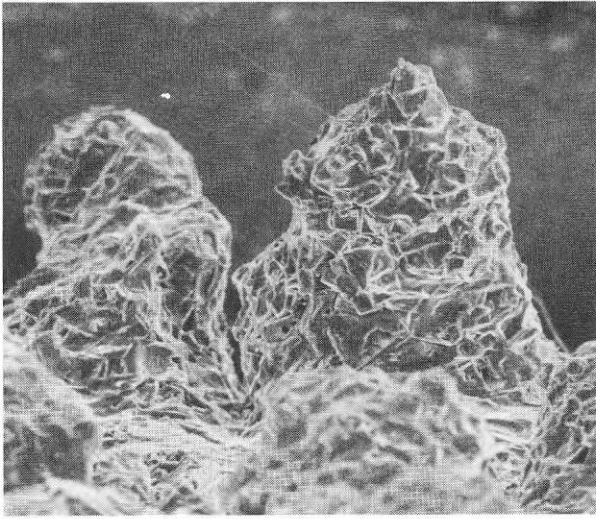
Filmens förflyttningshastighet och härmed saltformationens utseende är avhängig av luftens fukthalt: Ju lägre fukthalt desto större förflyttningshastighet och desto mindre saltpartiklar (ångtryck!) (Fig 21).

Dessa saltförflyttningar uppträder när avdunstat lösningsmedel kan ersättas med eftertransporterad saltlösning. Dessa saltförflyttningar kan uppträda i förhållandevis stora och tjocka filmytor eller ur konkava mensiker av fria vätskevolymmer.

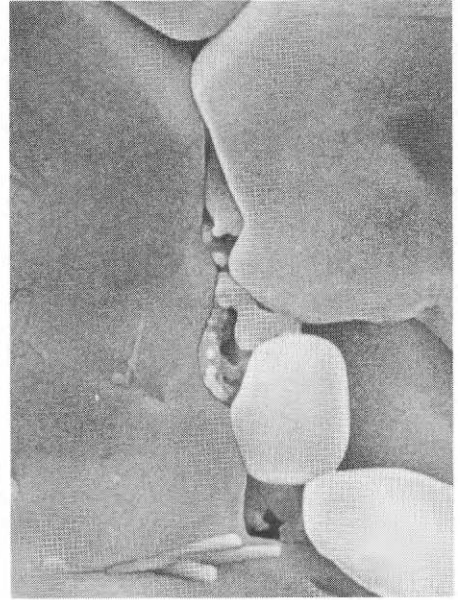
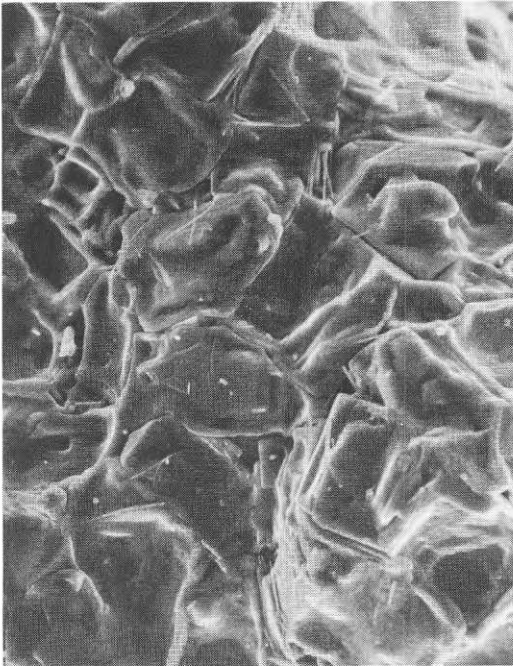
Den ovan beskrivna varianten av salt/saltlösningförflyttningar uppträder ej enbart på mer eller mindre plana ytor utan även i porer och kapillärer under förutsättning att dessa är tillräckligt stora (Fig 22).

Det finns ytterligare en variant av saltförflyttningar, nämligen när saltförflyttningar sker vinkelrätt mot ett underlag (Fig 23\*). Denna variant av saltförflyttningar uppträder företrädesvis vid upprepade uttorkningar och nedfuktningar, där vätskefilmen i ett tidigt skede i princip har "släppt" från en redan bestående saltformation i vätskefilmens randzon. Som tidigare påpekats torkar vätskefilmer bestående av saltlösningar ut mot randzonen till. Detta betyder, att randzonen på grund av dess salthalt är fuktig längre och mera hygroskopisk än den uttorkade filmens saltfattiga innerzon. Vid upprepad vandring av saltlösningen är fuktförhållandena i filmfronten intill den tidigare uttorkade saltzonen ganska stabila.

Fukthalten i den mer eller mindre uttorkade fortfarande fuktiga saltrandzonen är förmodligen högre än fukthalten ovanför filmens innerzon. Detta betyder, att salttillväxten inte sker i filmriktningen utan vinkelrätt mot filmen: Fukthaltsdifferensen och -gradienten mellan saltfilm och luften ovanför filmen är större än mellan en uttorkande saltfilm och en zon intill filmranden med fuktiga saltkoncentrationer. När en sådan process har initierats, kan den fortsätta tills långa tunna kristallnålar har bildats - eller tills filmen har förtjockats.



:1 Profil

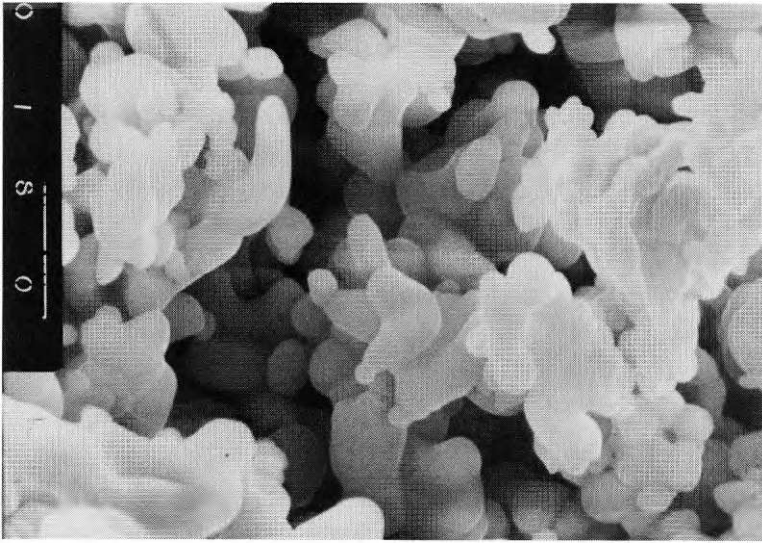
100  $\mu\text{m}$  2  $\mu\text{m}$  :3 Detalj anläggningsyta

:2.1 Anläggningsyta

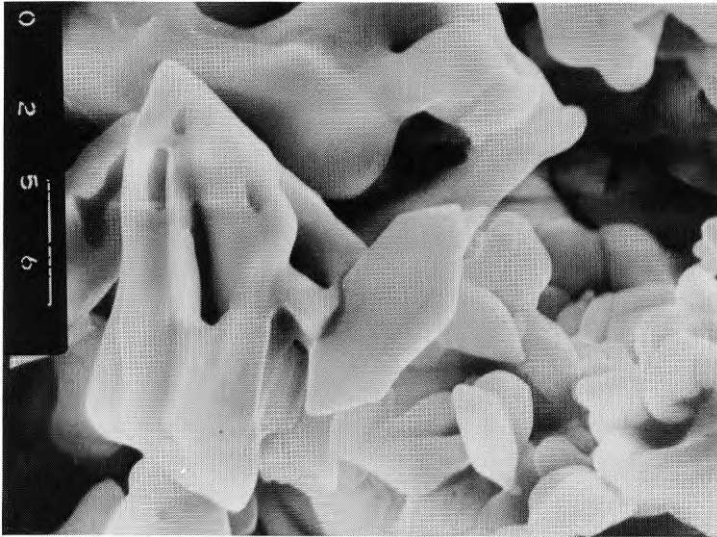
100  $\mu\text{m}$  

:2.2 Fri överyta

Fig 20 Saltfilm efter saltvandring (koksalt) på vätande, icke sugande underlag (glas) (MF)

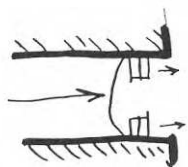


:1  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$  vid 45 % RF 10  $\mu\text{m}$

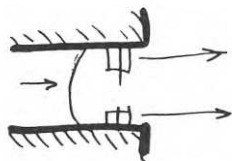


:2  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$  vid 70 % RF 10  $\mu\text{m}$

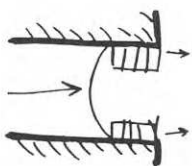
Fig 21 Karakteristiska strukturer vid bildning av saltformationer (ThP)



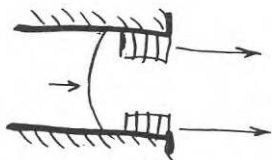
Utfällning av saltformationer  
i menisken av saltlösningen



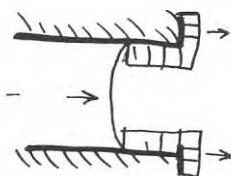
Bildning av saltformationer  
vid lämpliga fukt- och tem-  
peraturbetingelser i miljön



Nyttillförsel av saltlösning  
Tillväxt av saltfilmen på  
porväggen



Uttorkning av saltlösning  
genom saltformation



Nyttillförsel av saltlösning  
Tillväxt av saltfilmen utanför  
pormynningen

Lösningens menisker ligger innanför pormynningen. Salttransporter ur lösningen förekommer utanför pormynningen.

Fig 22 Utfällning av salter på porösa materials yta vid verkliga kapillärtransporter av saltlösningar

I praktiken förekommer dessa salttransporter - nämligen på en icke löslig materialyta och vinkelrätt mot denna materialyta - samtidigt (Fig 20:1).

Som styrparametrar för dessa materialförflyttningar har för enkelhetens skull olika (relativa) fukthalter angetts. Det är självklart inte fukthalten utan ångtrycket respektive ångtrycksdifferenser som styr de respektive processerna. Ångtrycket är temperaturavhängigt såväl ovanför vätskeytor (vatten, saltlösningar) som ovanför materialytor (salt, icke lösligt material). Ångtrycksdifferenser kan åstadkommas genom temperaturvariationer. Temperaturvariationer kan initiera och styra saltvandringsprocessen. Det kritiska temperatur/fuktintervallet för saltvandringsprocesser är området kring daggpunkten ovanför mättade saltlösningar. Vid daggpunktsgenomgångar ovanför saltformationer kan salter gå i lösning och "åt andra hållet" falla ut och migrera (Fig 24). Vid upprepade daggpunktsgenomgångar kan material förflyttas i någon form av "pumpeffekt" (Fig 25).

Finfördelade salter - hur finfördelade de än är - kan lösas i fritt vatten eller i kondensvatten. Dessa finfördelade salter transporteras sedan vid uttorkning alltid mot filmkanten eller en menisk, de koncentreras efter förflyttning.

Temperaturförändringar kan "indirekt" initiera saltförflyttningar.

Villkoren för daggpunktsgenomgång är ändringar i temperatur, luftens fukthalt och saltlösningens koncentration. Även här finns det många variationsmöjligheter för de olika förloppen. I princip hör förlopp och förloppsförutsättningar ihop på något sätt: "förloppen influerar sina egna randvillkor". Det är dessutom ej enbart ändringar i vissa förutsättningar som styr de enstaka förloppen utan även ändringshastigheten ("systemtrögheten").

Konventionella salttransporter och saltlösningstransporter förutsätter, att det är vätskan som transporterar saltet. Den ovan relaterade salttransportmekanismen har en förutsättning till, nämligen att saltet transporterar vätskan.

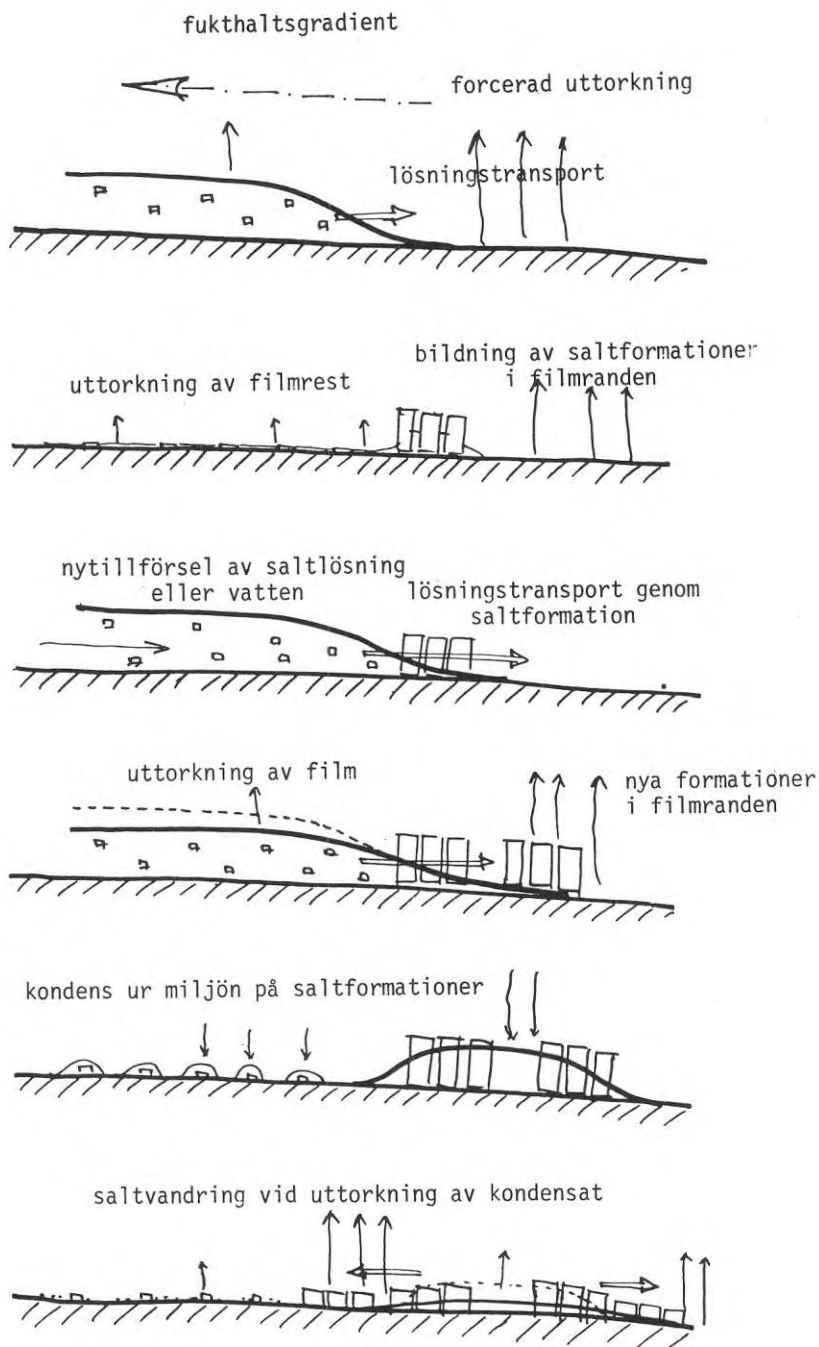


Fig 24 Principer för saltförflyttningar

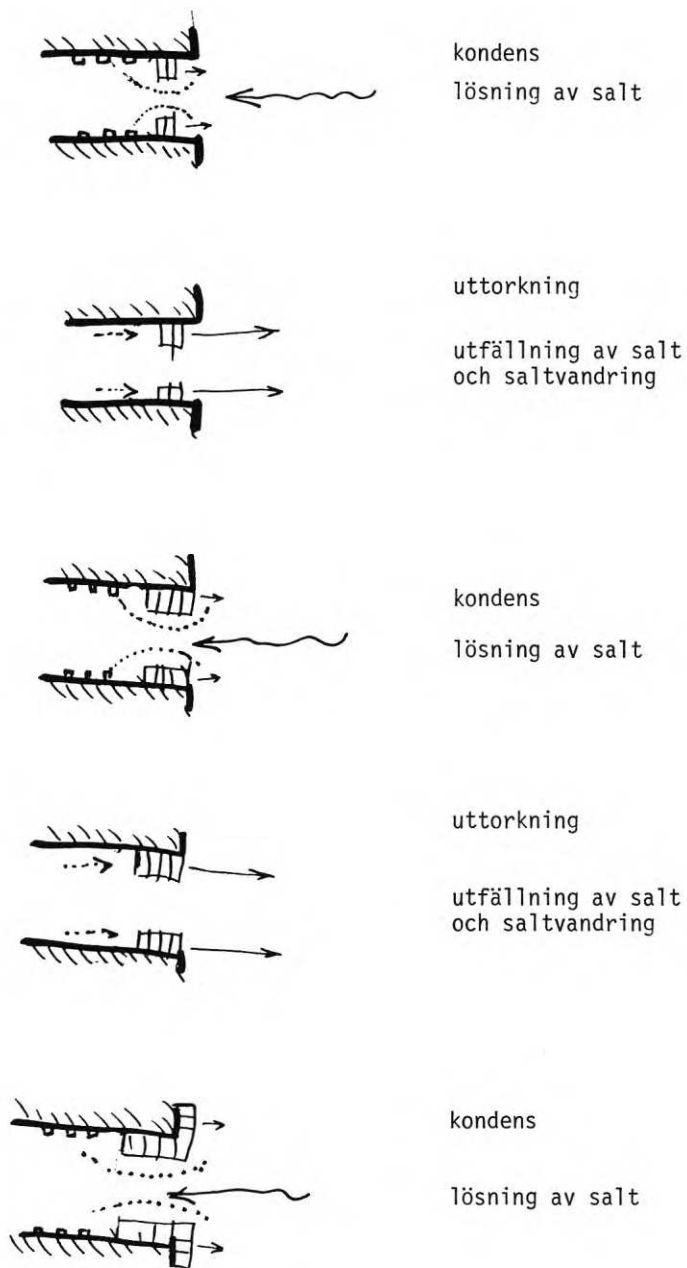


Fig 25 Saltförflyttning utan kapillärfyllning vid daggpunkts-  
genomgångar

### 6:2 Kritiska salthalter

Lösnings- och salttransporter av den beskrivna typen kan enbart förekomma om det finns en utpräglad fukthaltsdifferens och -gradient mellan området ovanför saltformationen och -lösningen och miljön och möjligheter till instabilitet. Detta kräver i stort sett följande:

- att saltkoncentrationen är tillräckligt hög
- att utrymmet skall vara tillräckligt stort för att tillåta fukthaltsdifferenser och -gradienter, dvs
- att utrymmet får inte vara vätskefyllt eller materialfyllt, det skall vara öppet
- att saltkoncentrationen i ett utrymme inte får vara för hög, annars blir fukthalten ovanför saltet stabil, nämligen omkring mätnadsfukthalten av den aktuella saltlösningen (Fig 26).

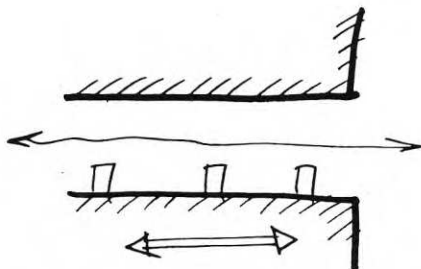
### 6:3 Experiment - saltvandring

Den eventuellt strikt matematisk/fysikaliska/materialtekniska eller strikt "ytkemiska" formuleringen av även denna hypotes för saltvandringar får anstå tills vidare. I avvaktan på denna formulering har ansatser gjorts att försöka bevisa de enstaka komponenterna i hypoteskomplexet med några enkla experiment.

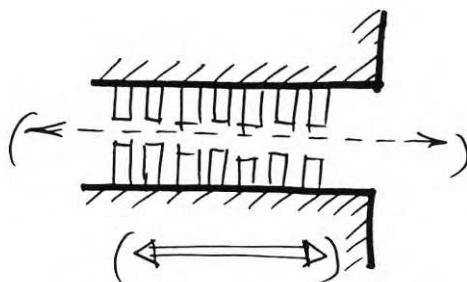
Flyttning av salter genom lösning och utfällning av salter enligt ovan beskrivna delhypotes kan åskådliggöras med några exempel. Beteende hos mättade saltlösningar i olika utrymmen framgår av några experiment. Därvid fylles några kärl med saltlösningar. Salttransporten är avhängig av i vilken utsträckning instabiliteter kan uppträda i menisken mellan saltlösning och den angränsande miljön (Fig 27\*).

En droppe av en koncentrerad saltlösning på ett vätbart icke sugande underlag torkar ut mot droppkanten till, resulterande i massiva kristallbildningar (Fig 30:1\*). Kristallbildningarna fälls ut ur mättade lösningar i droppkanten. Vattendropparna torkar ut vid relativa luftfuktigheter mindre än 100 % RF. Droppar av mättade saltlösningar torkar ut vid relativa luftfuktigheter mindre än mätnadsfukthalten över koncentrerade saltlösningar.





:1 Saltvandring och saltnedbrytning förutsätter labila fukt-förhållanden kring formationerna av de lösningbara salterna. Detta betyder att saltkoncentrationen inte får vara för hög.



:2 Vid höga saltkoncentrationer är fukthalten förhållandevis stabil (åtminstone i små porer).

Fig 26 Maximal kritisk salthalt för saltvandring (och saltnedbrytning)

Anm: Det förekommer även en minimal kritisk salthalt.

Ur mättade saltlösningar kryper saltformationer och saltlösningar på vertikala släta, icke sugande och vätbara ytor (glas!) (Fig 28\*).

Stighöjden är karaktäristisk för saltarten och i viss mån även den relativa fuktigheten i miljön (temperatur och fukthalt, ångtryck). Stigningen av saltlösningen/saltformationen fortsätter (intill en viss kritisk höjd) så länge filmen står i förbindelse med fria lösningsfaser (Fig 29\*).

Självklart kan väsketransporten på horisontella ytor ske avsevärt längre än den maximala vertikala stighöjden. Gravitations- och konvektionsfenomen kan även förstärka vandringstendensen av lösningsfilmen och bildandet av saltformationer på vertikala ytor (Fig 31).

SEM-fotografier visar dels att saltstrukturen differerar de olika saltarterna emellan och dels att saltstrukturen är avhängig av den "aktiverande" relativa fukthalten i miljön: Saltpartiklarna är mindre ju lägre den relativa fuktigheten i miljön är - saltpartiklarna bildas på något sätt i jämvikt med miljöns fukthalt (Fig 21, 32).

Av SEM-fotografierna framgår även att bildandet av partikelbeläggningen på ett icke kapillärsugande vätbart underlag måste ha skett i flera etapper, varvid partiklarna i senare etapper fyller ut partiklarna som har bildats i salttransportens första skede (Fig 33). SEM-fotografierna visar även att partikelbildningen i filmytan har skett i etapper samt att partiklarna som bildas utan direkt kontakt med substratet är mera jämnstora och i vissa fall betydligt större än partiklarna mot underlaget (Fig 30\*, 34).

Det är givetvis den "aktiverande" fuktdifferensen som är primärstyrparametern för saltlösningens filmvandring och saltformationsbildning, framför allt hastigheten i dessa bildningar. Fukthaldifferensen påverkar, som redan påpekats, utseendet på saltformationerna. En annan parameter som influerar saltformationens utseende är lösningsmedlets alkalitet (Fig 35\*).

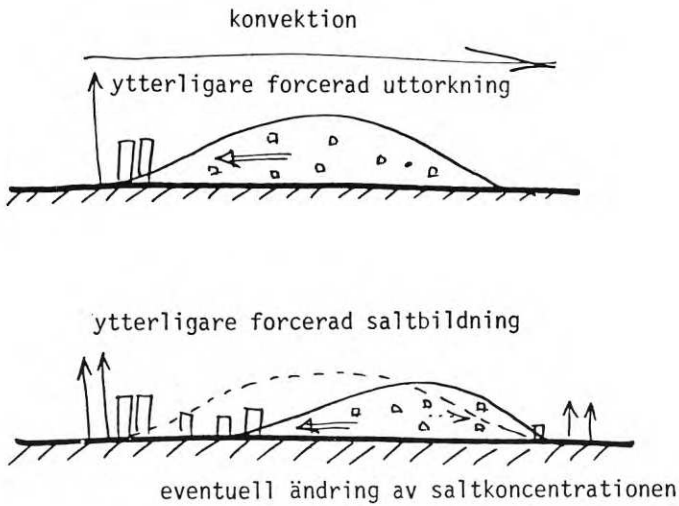


Fig 31:1 Inverkan av konvektion på saltbildningsförloppet

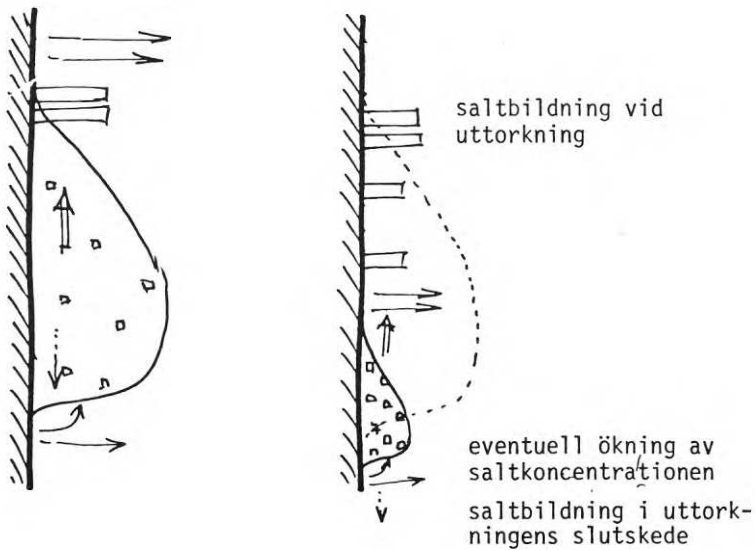
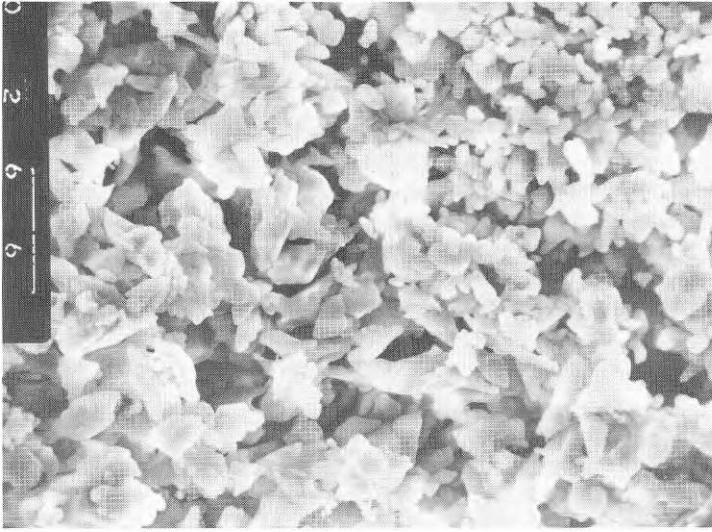



Fig 31:2 Inverkan av gravitation på saltbildningsförloppet (vid fixering av droppen eller filmen på underlaget)  
(Flyttas filmen vid tillräcklig tjocklek och tyngd bildas saltformationen över en större yta)



:1  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$  vid 45 % RH

10  $\mu\text{m}$  



:2 NaCl i 45 % RH


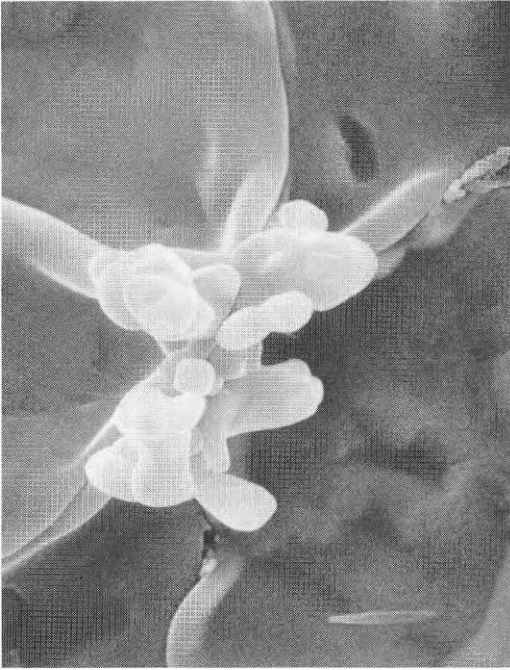

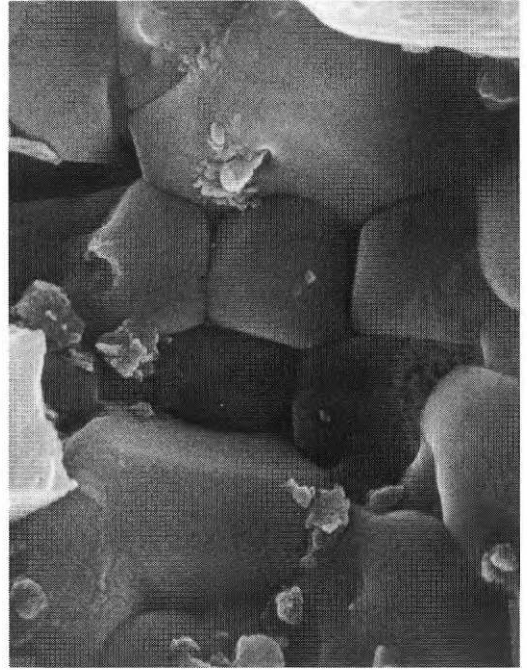
10  $\mu\text{m}$  

Fig 32 Karakteristiska strukturer vid bildning av saltformationer (ThP)



10  $\mu\text{m}$  



1  $\mu\text{m}$  




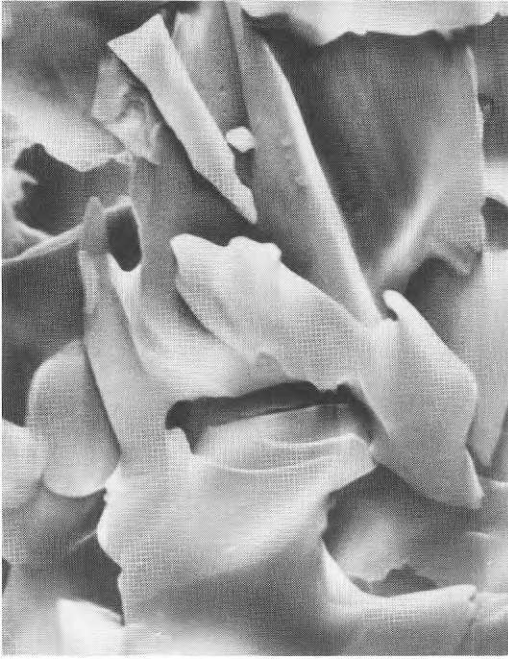
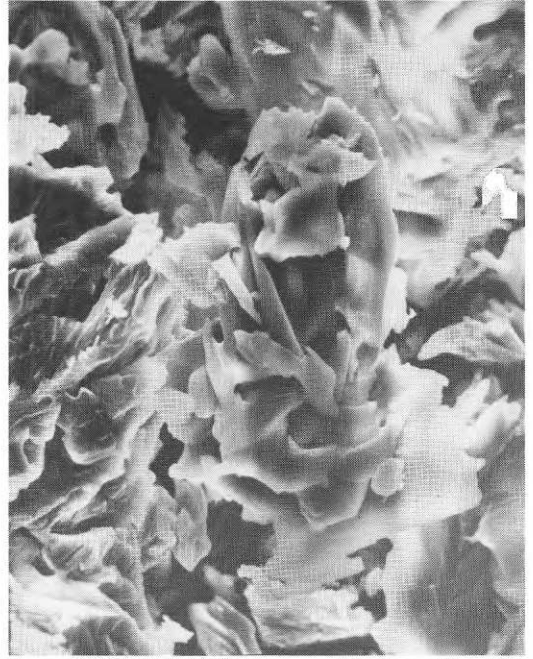
1  $\mu\text{m}$  

Fig 33 Saltfilm efter saltvandring. Anligningsyta mot substratet, detaljer (MF)



SEM 3000 x

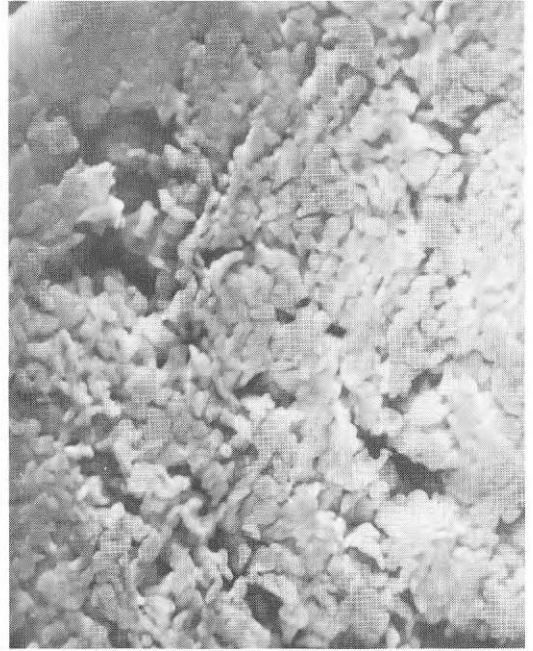


Saltformationer på filmytan

SEM 1000 x



SEM 3000 x



Saltformationer mot underlaget

SEM 1000 x

Fig 34 Filmbildning av  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  på glas (ThP)

En enklare försöksuppsättning med alkaliska, (sura) och neutrala koksaltlösningar visar olikheter i utfällningsbilden beroende på lösningsmedlets pH-värde.

Resultatet av några undersökningar, som har utförts beträffande salter och saltblandningar dels på historiskt tegelmaterial och tösaltskadad konstruktionsbetong och dels under olika laboratorie-förhållanden finns redovisat i kapitel 8.

#### 6:4 Saltnedbrytning

##### 6.4.1 Allmänt - saltvittring och porfyllnad?

Konventionella salt- och frysnedbrytningshypoteser förutsätter, att mekanismen bakom nedbrytningen av porösa material är en volymutvidgning av i porsystemet inneslutet material (Ref 1:2, 9:). Porerna anses vara fyllda. För vissa - kanske hypotetiska - nedbrytningsmekanismer har en kritisk porfyllnadsgrad kunnat anges. Det finns många sätt att förstöra poröst material: En volymutvidgning av en mer eller mindre komplett porfyllnad är ett av dessa sätt. Detta utesluter inte att det finns andra mekanismer för materialnedbrytning. Det är visserligen känt att vattnets volymutvidgning vid frysning under vissa speciella villkor kan spräcka materialet inifrån. Däremot uppvisar saltvittrat poröst material i de flesta fall inte med saltformationer fyllda porer. Det är förmodligen inte uteslutet att det finns andra mekanismer att spräcka poröst material med salter utan att mer eller mindre komplett porfyllnad förekommer.

##### 6.4.2 Saltstrukturändringar

Salt som kristalliserar ur överkoncentrerade lösningar på kristallisationskärna bildar i de flesta fall ideala kristaller. Som i det föregående visats, är saltformationer som bildas ur vattenfilmer (eller deras menisker) som följd av fukt- och temperaturgradienter, -differenser och -fluktuationer ytterst finporösa. Denna porositet är, som påpekats, en följd av instabiliteten i en kraft- och materialjämvikt i en saltlösningfilms randzon.



Saltpartikelformen är i första hand avhängig av saltarten (eller arterna). Partikelstorleken däremot är avhängig av uttorkningshastigheten (Fig 36). Uttorkningshastigheten i sin tur är avhängig av fukthaltsdifferensen ovanför saltlösningens filmen och den därtill angränsande miljön. En grundförutsättning är att miljöns fukthalt är lägre än saltlösningens mättnadsfukthalt.

Speciella saltformationer bildas i en saltlösningens randzon. I mellanrummen mellan saltpartiklarna är vid bildning av saltformationer mättad saltlösning kapillärt inlagrad. Vid uttorkning av dessa saltpartikel/sandlösningensblandningar uppträder två typer av fenomen. För det första uppträder i den finporösa saltformationen de deformationer och motsvarande krympningskrafter som uppträder vid torkning av fuktigt finkornigt eller finfasrigt material.

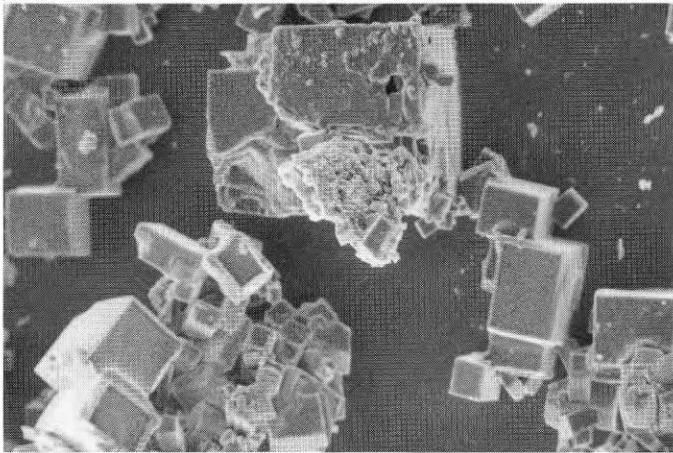
För det andra torde några fenomen uppträda, vars teoretiska bakgrund (och praktiska konsekvenser) inte lär ha behandlats tidigare. Den ovan relaterade saltvandringsmodellen redogör för hur salter under speciella uttorkningsförhållanden fälls ut i randzonen av en saltlösningens film. På saltformationen som har fällts ut ur saltlösningen kan vid labila fuktstillstånd luftfukt kondensera tills saltlösningen är mättad. Vid uttorkning av saltlösningar från ytan av dessa saltformationer bildas återigen saltformationer "av en andra generation" intill den ursprungliga saltformationen (Fig 20:3).

Redan av geometriska skäl måste dessa saltformationer ha en finare struktur än den ursprungliga. Vid upprepade daggpunktsgenomgångar, antingen åstadkomna genom ändringar i fukthalten i luften eller genom temperaturvariationer, bildas sedan en saltstruktur med allt mindre dimensioner. (Detta gäller även vid labiliteter kring ett jämviktstillstånd.) (Fig 37-42) Denna strukturändring mot en större yta har naturligtvis konsekvenser avseende fuktfixering och fuktavgivning.

Vid fukthaltsökningar uppträder sedan analogt en tillväxt i partikelstrukturen.

Det är dessutom inte omöjligt att det uppträder speciella ytterst komplexa fenomen i mikroutrymmen i skarven mellan ett icke vattenlösligt (kanske mikroporöst) substrat och en mikroporös beläggning





:1 NaCl

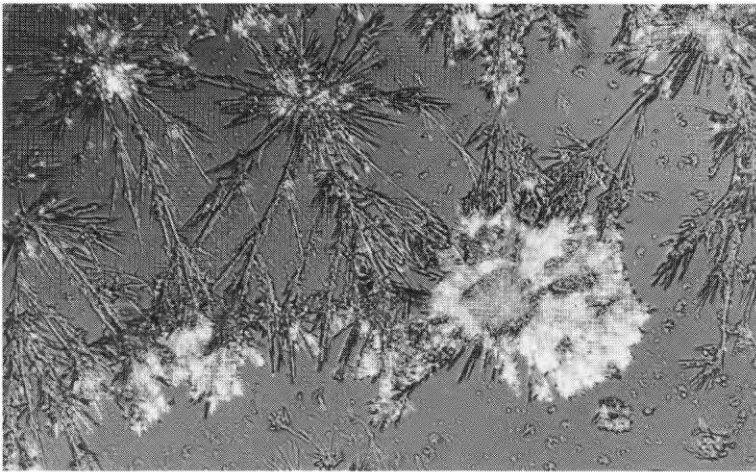
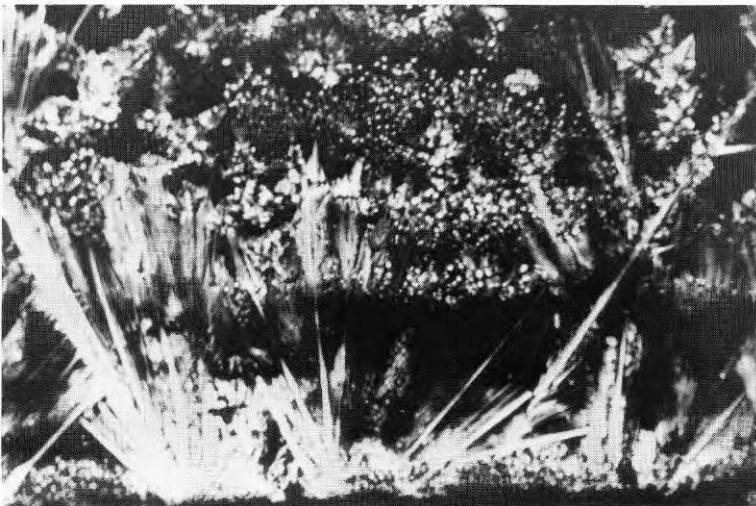
:2 NaCl + Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:3 NaCl + Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>

Fig 36 Koksalt och blandsalter (16 x) (MF, ThP)

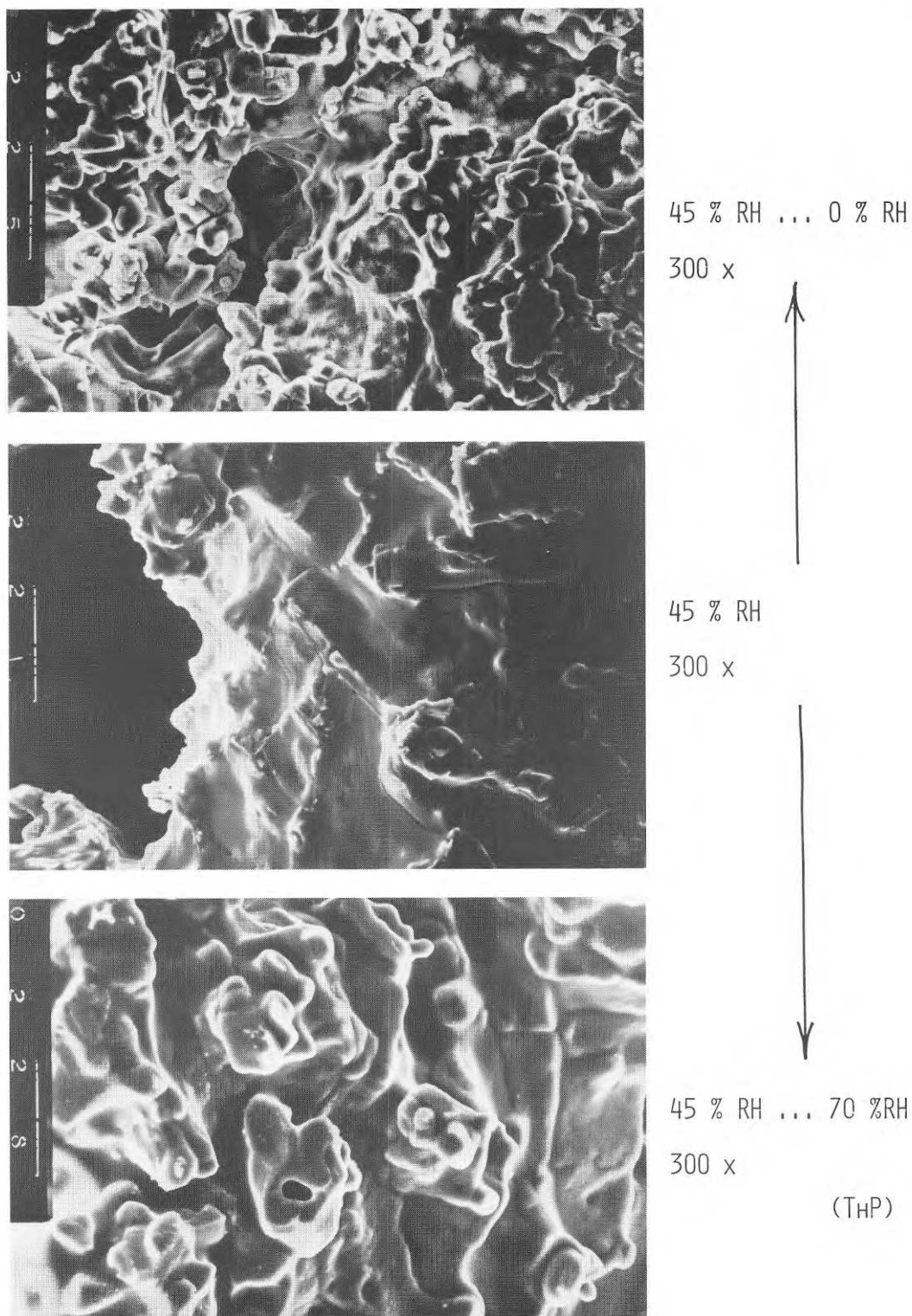
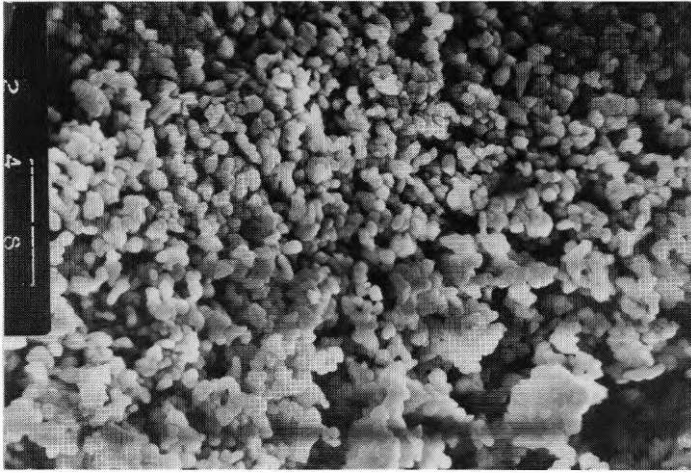
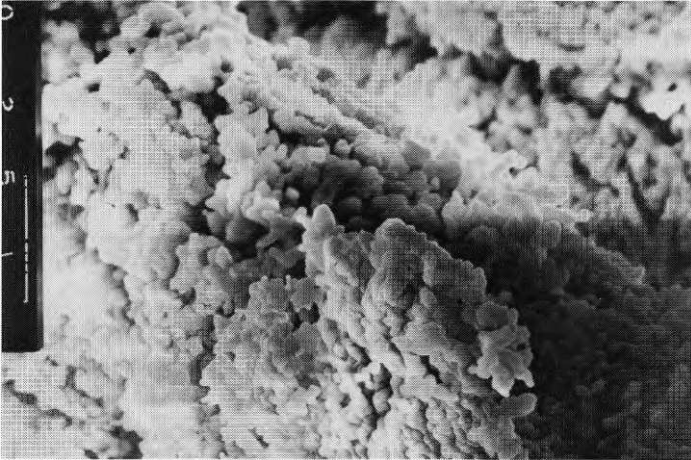


Fig 37 NaCl kristalliserad i 45 % RH, strukturändring vid ändring av RH (ThP)



70 % RH ... 0 % RH

1000 x



70 % RH ... 45 % RH

1000 x

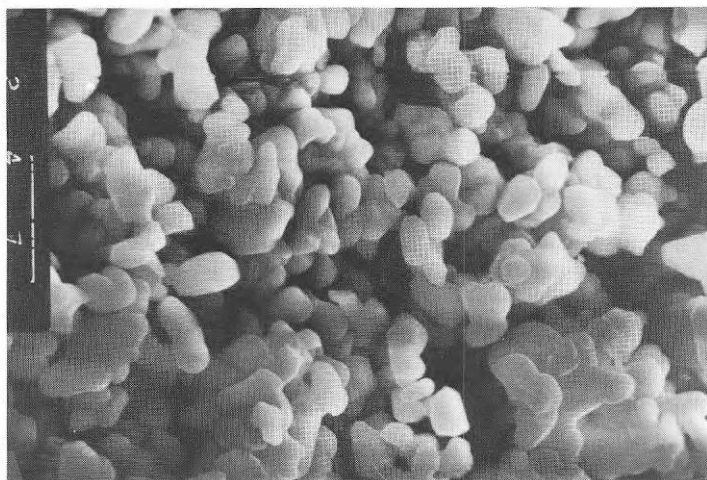


70 % RH

1000 x

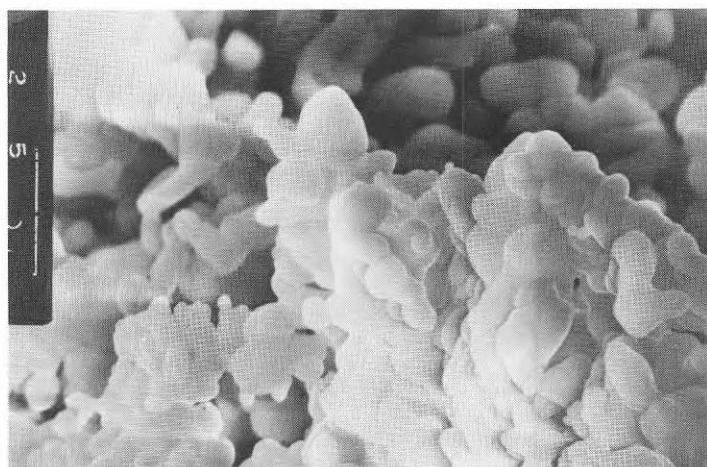
(ThP)

Fig 38  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  kristalliserad i 70 % RH, strukturändring vid ändring av RH (ThP)



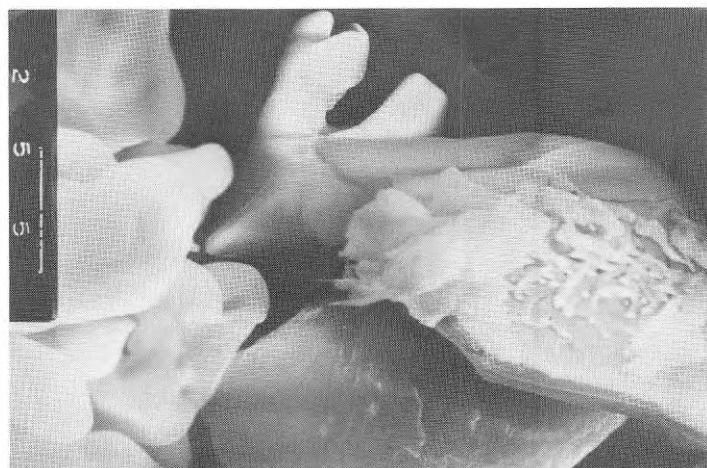
70 % ... 0 % RH

3000 x



70 % ... 45 % RH

3000 x



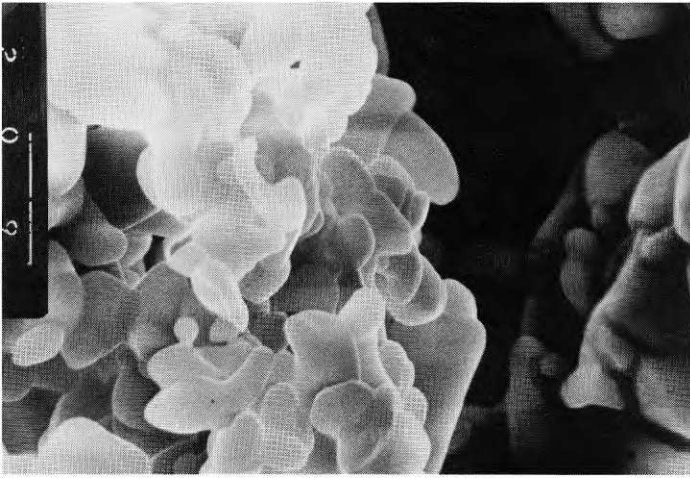
70 % RH

3000 x

(ThP)

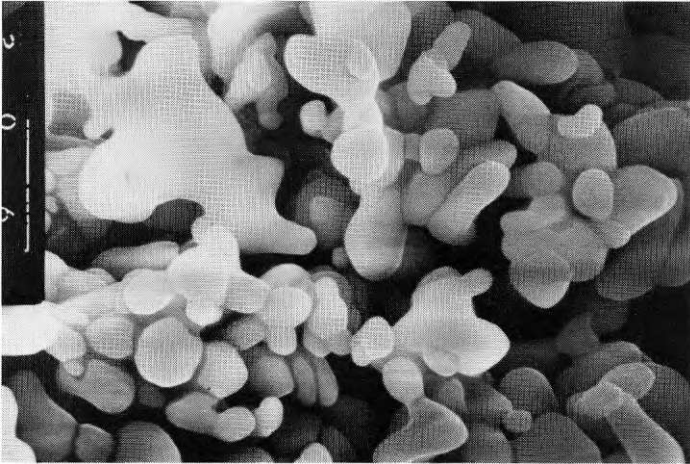
Fig 39  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  kristalliserad i 70 % RH, strukturändring vid ändring av RH (ThP)





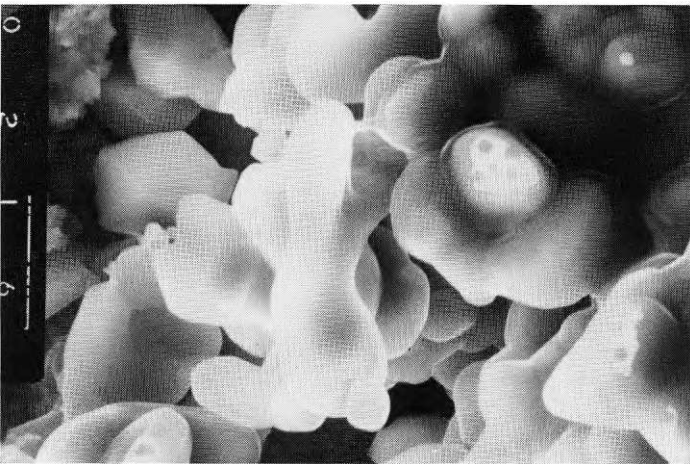
45 % RH ... 0 % RH

3000 x



45 % RH

3000 x

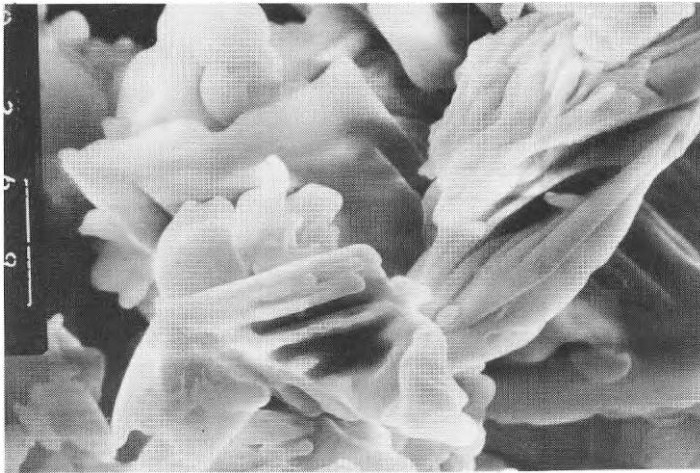


45 % RH ... 70 % RH

3000 x

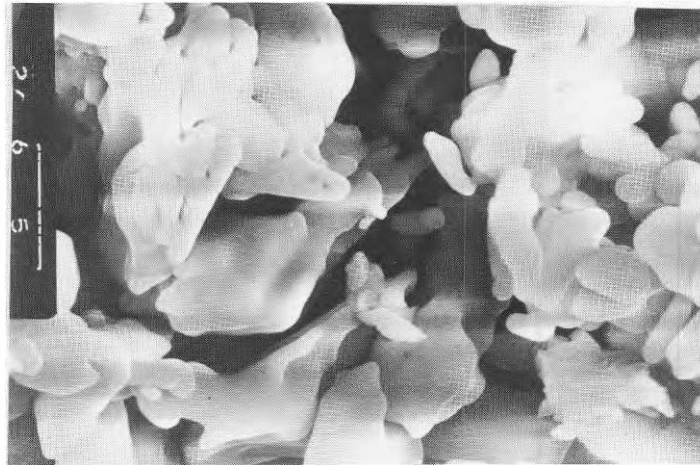
(ThP)

Fig 40  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$  kristalliserad i 45 % RH, strukturändring vid ändring av RH (ThP)



70 % RH ... 0 % RH

3000 x



70 % RH ... 45 % RH

3000 x



70 % RH

3000 x

(ThP)

Fig 41  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$  kristalliserad i 70 % RH, strukturändring vid ändring av RH (ThP)

av vattenlösliga salter som har fukthalts- och materialomlagringar i gränsskiktet dessa materialtyper emellan till följd.

För fasta material gäller speciella regler, nämligen ett samband mellan  $s$   $k$  kapillärkondensation och luftfuktighet och motsvarande uttorkningsförlopp (med hysteresis). (Men i princip inga strukturändringar.) I små utrymmen förekommer här även andra fenomen som fryspunktsfördröjning och kokpunktsfördröjning (men i princip inga strukturändringar).

När det gäller förlopp i (mikro-)poröst material, såsom salt, blir förhållandena mera komplexa: Med största sannolikhet går strukturomvandlingar och förändringar i fukthalt (och temperatur) på något sätt parallellt. (SEM-fotografier!)

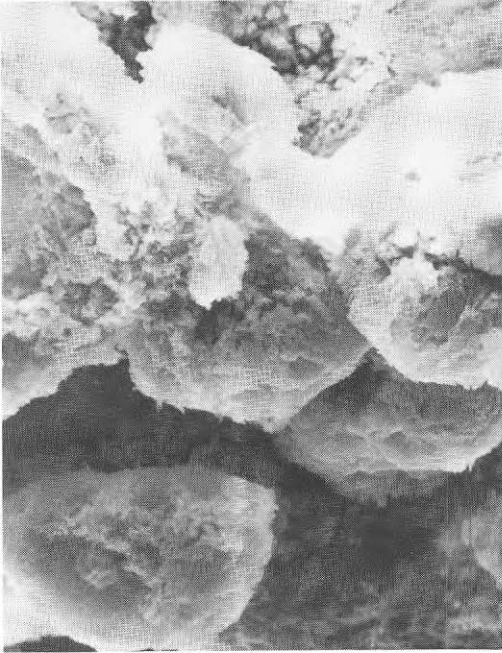
Till de fenomen som gäller i mikroporsystemet i fasta material, såsom fryspunktsfördröjning och kokpunktsfördröjning, kommer säkert sådana fenomen som lösningsacceleration (eller retardation?) och liknande. (Det måste finnas skillnader mellan upplösningshastighet och formationsbildningshastighet mellan stora och små utrymmen, mellan grovstruktur och finstruktur.)

### 6.4.3 Saltvittring

#### 6.4.3.1 Primärvittring

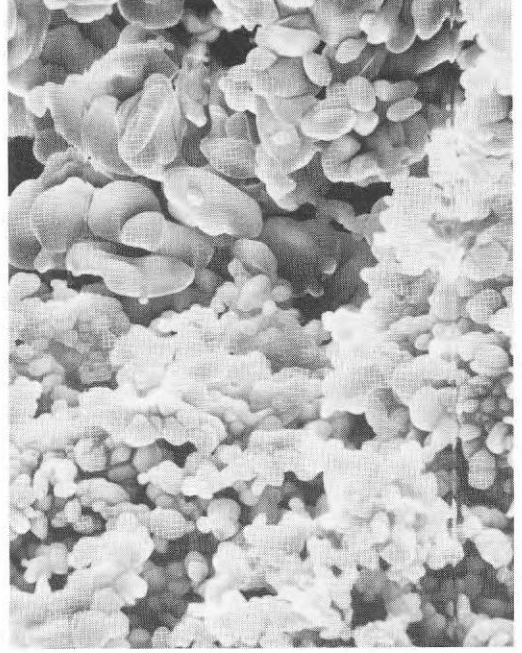
Till de krympnings- och svällningsrörelser (och motsvarande krafter) som förekommer hos finporösa fasta material kommer sedan en ändring av materialstrukturen (och motsvarande krafter vid uttorkning och nedfuktning och finporösa vattenlösliga material (med motsvarande koncentrationsändringar) (Fig 37-42).

- (.1) En mikroporös saltformation ändrar sin struktur mot finare partiklar och större ytor vid uttorkning under påverkan av fukthalter och temperaturer (ångtryck). Strukturändringen medför volymändringar.
- (.2) En mikroporös saltformation ändrar sin struktur mot grövre partiklar och mindre ytor vid nedfuktning under påverkan av fukthalt och temperatur. Även denna strukturändring medför volymändring.



:1  $\text{Na}_2\text{SO}_4$

Ändring vid 90 % RF



← Ändring vid 70 % RF

:2  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$

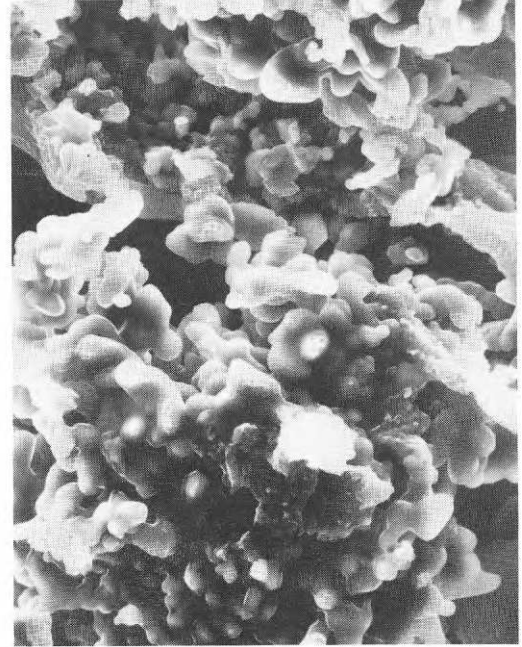
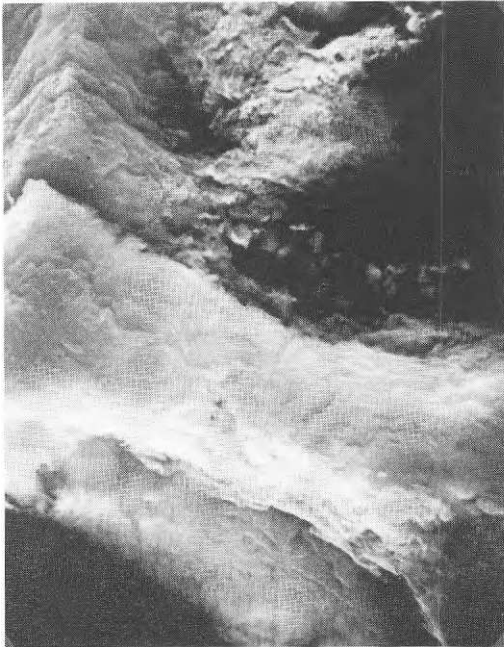
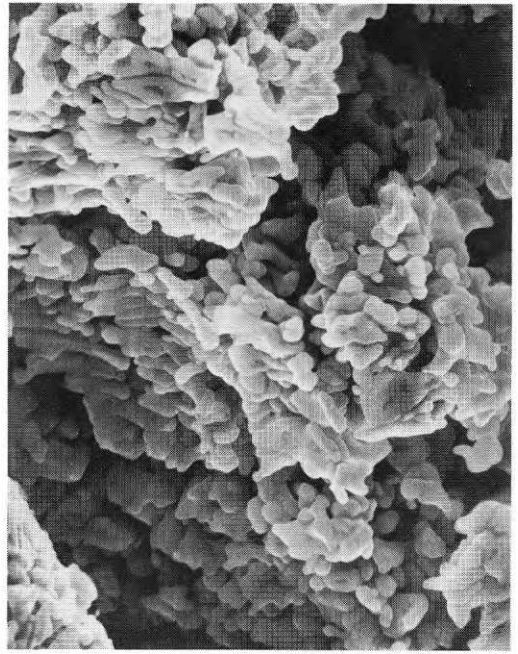
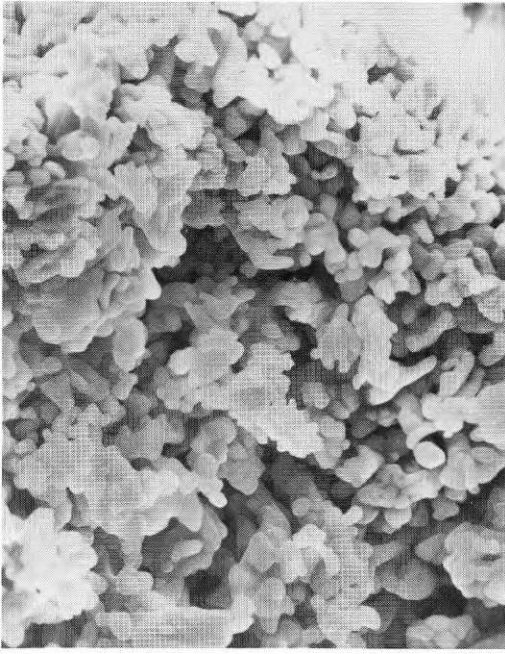


Fig 42 Strukturbildning och -ändring, bildning vid 45 % RF (ThP)

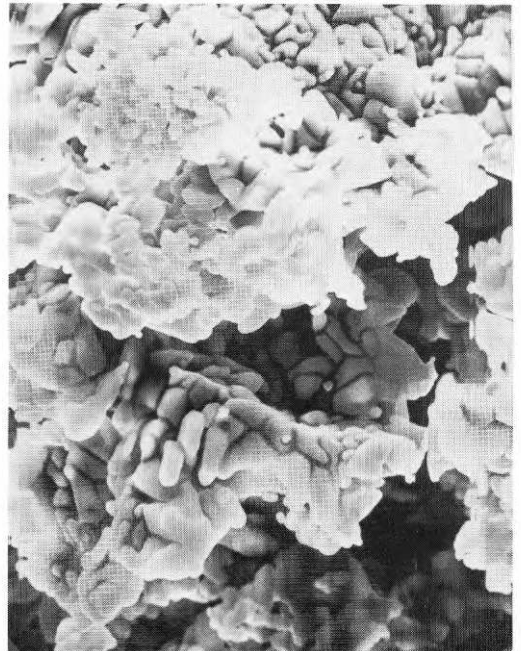
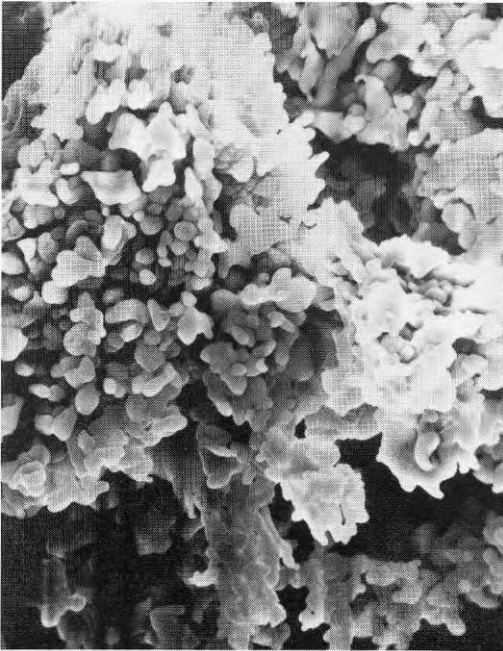





Bildning vid 45 % RF



Ändring vid 0 % RF



10  $\mu\text{m}$  

(.3) Den mest markanta strukturändringen förekommer vid daggpunkts-  
genomgångar eller i dess närhet.

Såväl fuktupptagning som fuktavgivning resulterar i volymändringar  
i saltstrukturen (Fig 43:1).

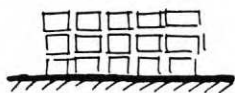
Såväl fuktavgivning som fuktupptagning resulterar i strukturändring  
i den mikroporösa saltstrukturen. Såväl fuktavgivning som fuktup-  
ptagning resulterar i deformationer i den mikroporösa saltstrukturen.  
Alla dessa fenomen resulterar i att någon form av "volym/ytkrafter"  
uppträder i saltformationer. Har saltformationen formen av en  
hinna av en beläggning eller liknande, uppträder normalkrafter  
i hinnan som resulterar i skjuvkrafter mot ett underlag som varken  
ändrar sin struktur eller sina dimensioner. Dessa skjuvkrafter  
kan ha en sådan intensitet att ytskiktet i underlaget avskjuvas  
(Fig 43:2).

Med hjälp av termodynamiska funderingar kan storleksordningen  
på tryck- och dragkrafter i saltlösningar inneslutna i hålrum  
uppskattas. Dessa krafter är vid små hålrumsdimensioner ytterst  
stora, åtminstone om hålrumsväggen är av icke vattenlösligt material.  
Motsvarande krafter skulle kunna uppstå i en vätskefylld saltfilm  
och i och på mikroporösa saltstrukturer. Dessa stora krafter  
i saltlösning mellan mikroporösa saltformationer på ett fast  
underlag leder till avflagningsbrott i grundmaterialytan.

Vittringsbrott i material är i de flesta fall inte resultatet  
av en enda påverkan utan en följd av påverkanscykler.

Fluktuerande strukturändringar och motsvarande påverkansfluktua-  
tioner i underlagets yta kan åstadkommas genom ändringar i miljöns  
(relativa) fukthalt. Denna fukthaltsändring kan åstadkommas isotermt,  
dvs utan temperaturändring.

Ett annat sätt att variera den relativa fukthalten i miljön är  
att ändra temperaturen. Temperaturfluktuationer kan (över omvägen  
över ångtrycksändringar) leda till strukturvariationer i saltbelägg-  
ningen. Strukturvariationer kan leda till påkänningar och i kritiska  
fall till avflagningsbrott. Dessa temperaturvariationer förekommer  
ganska tätt - de skulle kunna vara dygnsvariationer. Det är alltså  
utan vidare möjligt att utsätta material för utmattande påkännings-  
ändringar med stor intensitet genom dygnsvariationer av temperatur  
och fukthalt (ångtryck). Intensiteten av dessa fluktuationer  
stys i viss utsträckning av materialets värmeledningsförmåga  
och öppna porositet.



porös saltformation

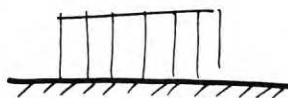
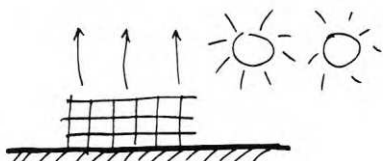
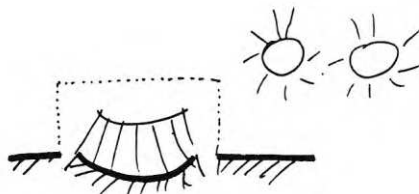
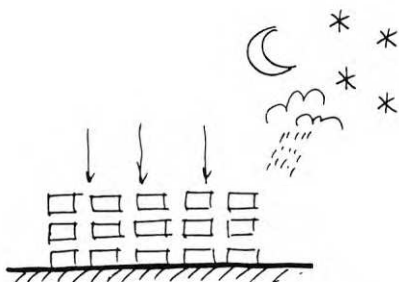
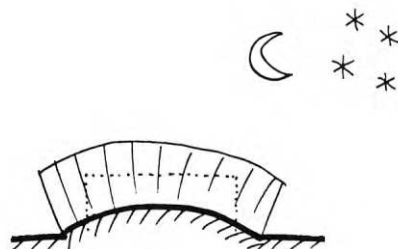
ingen åverkan på  
materialytankrympning vid  
torka och värmeavskjuvning av material-  
yta på dagen och under  
sommarhalvåretsvällning vid  
fukt och kylaavskjuvning av material-  
yta under natten och  
under vinterhalvåret

Fig 43:1

Fig 43:2

Fig 43 Nedbrytning av materialyta genom deformation i saltfilm  
på grund av fuktinlagring

#### 6.4.3.2 Sekundära vittringsförlopp

En nedbrytning av ett ytskikt genom avflagning kan åstadkommas genom minimala saltmängder (Fig 44). Saltmängden kan i lösningsform adsorberas till det skadade underlaget. Partikelstorleken i ytskikts-avflagningen måste vara i samma storleksordning som saltbeläggningens tjocklek, dvs måste vara ytterst liten. Avlagring av dessa partiklar på ett ännu icke skadat underlag ändrar ytans struktur radikalt. Ytskiktet blir genom beläggning med finporösa nedbrytningsprodukter mera finporöst, det blir mera hygroskopiskt, saltet kan lätt fixeras i detta ytskikt. Salt kan på detta sätt anrikas på ytan - ett fenomen som kan konstateras i verkligheten. Effekten är bl a att nedbrytningsförloppet accelererar.

Förutsättningarna för saltnedbrytningar av den skisserade typen är identiska med förutsättningarna för salttransporter. Salterna måste bildas och förändras i utrymmen som tillåter en viss labilitet av fukthalt ovanför och i saltformationen. Detta betyder, att saltmängden dessutom skall vara så liten att fuktfixeringen till saltet inte resulterar i en stabil fukthalt i porsystemet.

Den skisserade saltnedbrytningsprocessen förutsätter därför

- att poren inte är fylld varken med vätska eller salter samt
- att salthalten i poren inte överstiger ett visst kritiskt värde
- och självklart att materialet (ytan) har låg hållfasthet (skjuvning).

Ett extremfall för ett sådant porsystem är den mot miljön fria materialytan.

#### 6.4.3.3 Saltvittring - sammanfattning

Fuktmättnads(ångtryck)variationer är förutsättningar för saltvandringar och saltnedbrytning i de flesta förekommande vittringsprocesser, de kan vara avhängiga av temperaturvariationer. Fukthaltsändringar (ångtrycksvariationer) kring saltlösningens daggpunkt (fukthalt, temperatur) tycks ha den största nedbrytningseffekten.

#### 6.4.3.4 Kapillärspängning?

Saltlösningar kan visserligen transporteras med hjälp av kapillärkrafter. Salttransporter i kapillärer med grova dimensioner kan

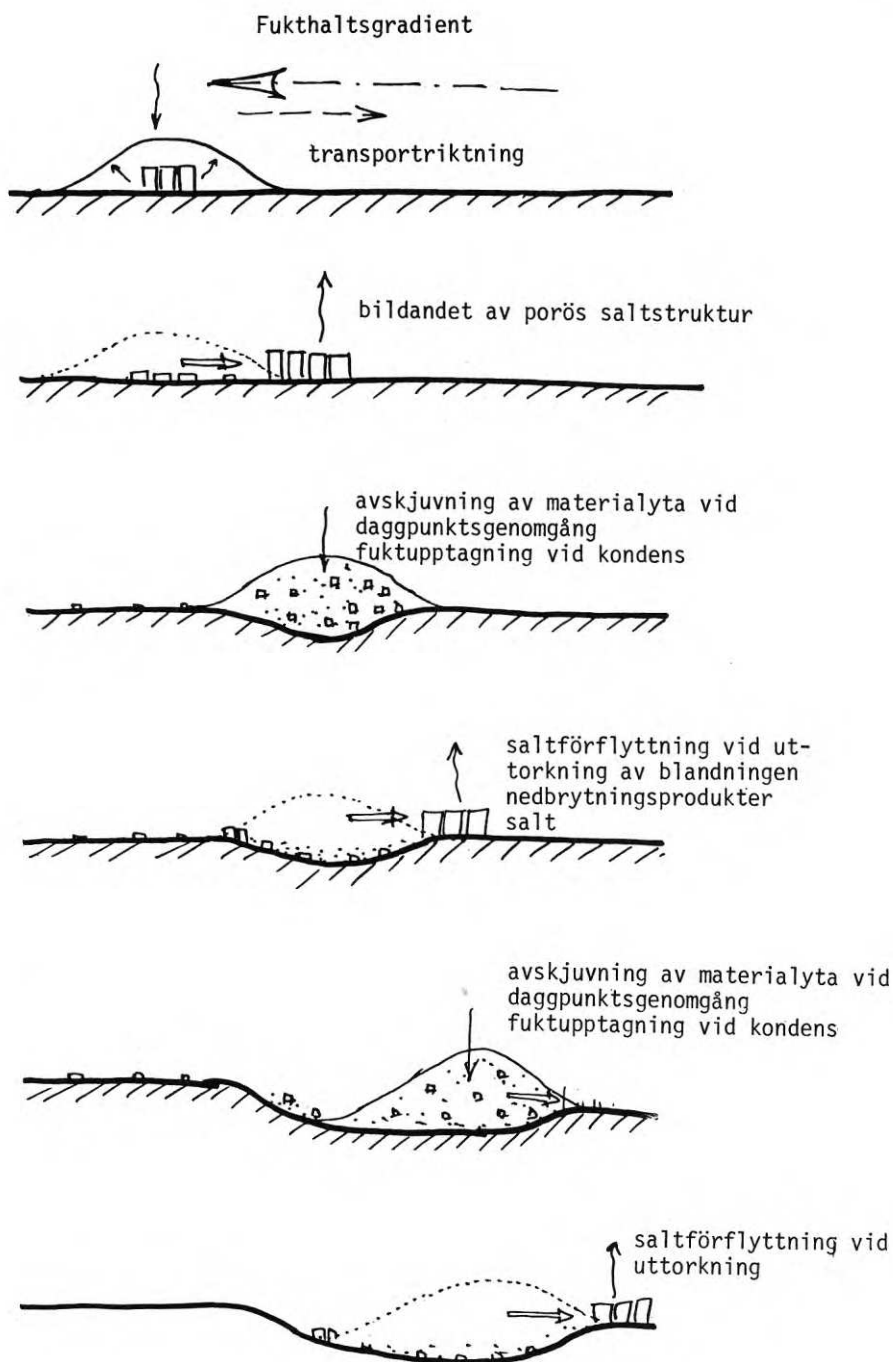


Fig 44 Nedbrytning av yta genom salt(film)vandring vid upprepade daggpunktsgenomgångar och fukthaltsgradient

åstadkommas i anslutning till menisker till fria saltlösningssytor eller i randzonen (menisken) av en saltlösningssfilm och kan åstadkommas genom fukthaldtsdifferenser och temperaturdifferenser mellan filmytan och den angränsande luftvolymen.

I likhet härmed kan salt"sprängning" i anslutning till kapillärtransport åstadkommas med hjälp av den avskjuvningsmekanism som har skisserats ovan. De saltformationer som bildas i menisken påverkas av fukthaldts- och temperaturvariationer, varvid fukthalten varierar mellan mätnadsfukthalten ovanför den fria lösningssytan och miljöns fukthalt. Saltbildningar uppträder på porväggen utan att fylla pormynningen (Fig 45).

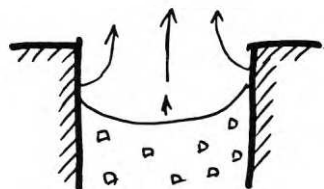
Vid uttorkning och nedfuktning uppträder krafter mellan saltfilm på porväggen och själva porväggen. Dessa krafter leder till avskjuvning av porväggen utåt. Nedbrytning av en avdunstningszon under en materialyta behöver inte bero på tryckkrafter åstadkomna av massiva, sig utvidgande salter i pormynningen utan på skjuvkrafter av saltfilmer mot porväggen (och inte heller på kapillärtransporter av saltlösningar) (Fig 46).

En nedbrytningsmekanism enligt ytavskjuvningprincipen kräver avgjort mindre saltmängder än processen enligt volymutvidgningsmodellen.

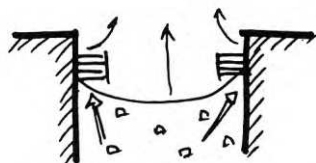
## 6:5 Experiment - saltnedbrytning

### 6.5.1 Strukturändringar

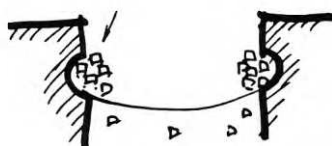
Saltstrukturändringar vid ändringar av miljöns fukthalt kan observeras i elektronmikroskop. Det bör dock understrykas, att själva preparasjonstekniken för saltformationerna i vakuum är en radikal uttorkningsprocess. Även om man tar hänsyn till osäkerheten i denna observationsteknik, kan strukturförändringar vid uttorkning och nedfuktning entydigt konstateras. Den mest radikala strukturförändringen sker vid respektive salts daggpunktsgenomgång (Fig 42, 43).



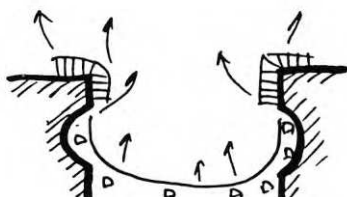
avdunstning från menisker



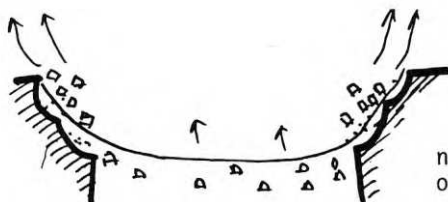
saltbildning i menisker  
vid hög temperatur och låg  
fukthalt



nedbrytning av porväggen vid  
låga temperaturer och hög  
fukthalt



saltvandring vid uttorkning



nedbrytning av porvägg  
och pormynning

Fig 45 Nedbrytning av ytskikt vid verklig kapillärtransport av saltlösningar i grovporer (motsvarande nedbrytningsförlopp förekommer i princip även vid enbart filbildningar på porväggen)

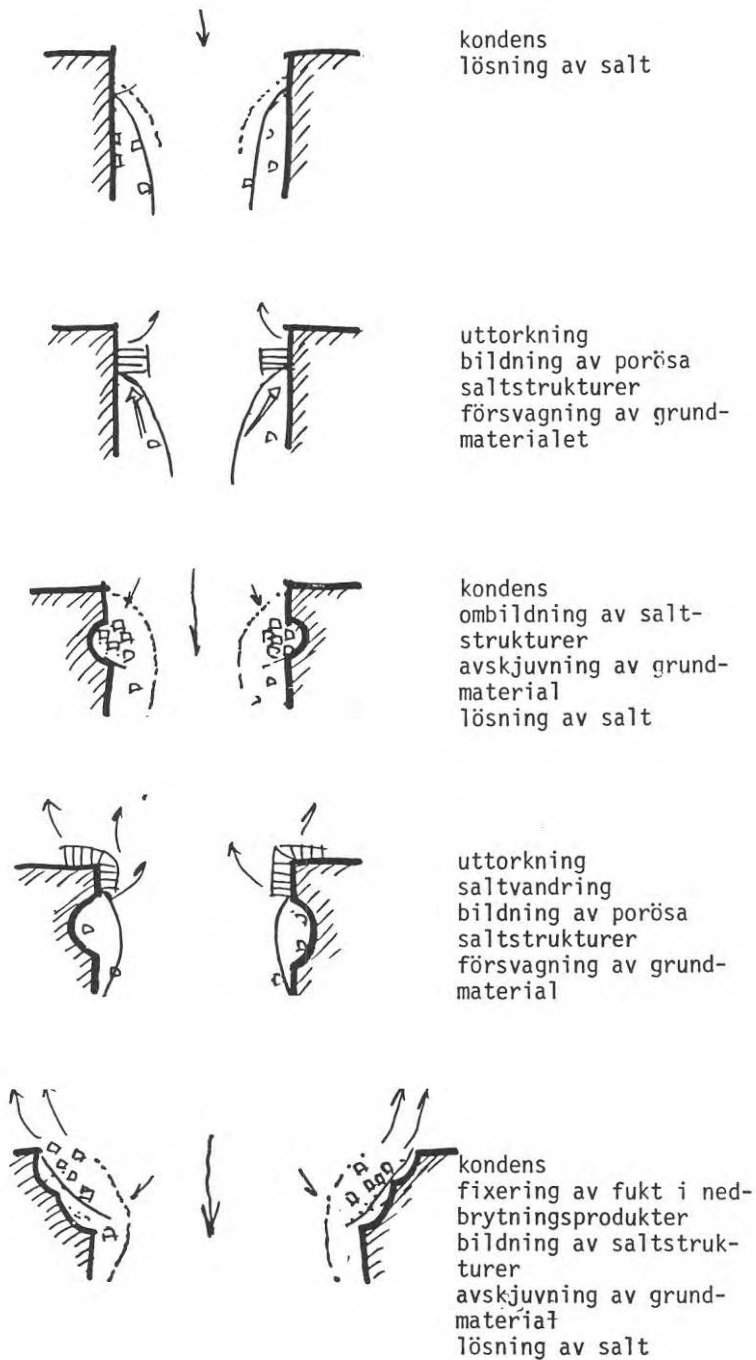


Fig 46 Nedbrytning, vittring av materialyta (ytskikt) utan kapillärfyllning vid dagpunktsgenomgångar



(För att eliminera de osäkerheter som preparationstekniken av saltformationer för elektronmikroskopobservation medför har en metodik diskuterats, som går ut på att man preparerar fuktiga saltformationer i flytande kväve. Definitiva resultat från dessa undersökningar föreligger ej.)

Formationsändringar av saltformationsbeläggningen kan studeras vid "odlade" beläggningar på icke sugande icke vattenlösligt underlag. Det verkar som om nedfuktning medför en sammandragning och uttorkningen resulterar i utvidgning av en finporös beläggning (Fig 47\*). (Verkar visserligen paradoxalt och har ej kunnat detaljkontrolleras.) - Och detta som eventuell skillnad mot "konventionell" torkningskrumpling och fuktsvällning??? (Fig 48, 49)

### 6.5.2 Nedbrytning

Saltvittring av poröst byggnadsmaterial kan simuleras med några enkla försöksuppsättningar.

Prismatiska materialprover ställes i en behållare med mättad saltlösning. I saltlösningens menisk mot provkroppen bildas finporösa saltformationer, som vandrar på ytan ifrån lösningsytan. Denna saltvandring på ytan kan vid gorpörösa kapillärsugande material förstärkas genom en kapillärtransport i materialet och omedelbart under ytan. Saltformationer som bildas i skarven mellan saltlösning och en torr miljö är karaktäristiska, de är finporösa. Om man fuktar dessa saltformationer efter uttorkning, exempelvis genom att sänka provkroppen i vatten, avskjuvas materialets yta i tunna flagor. Dessa tunna flagor eller detta finpulvriga material kan separeras från vatten och observeras i optiskt och elektronmikroskop.

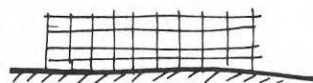
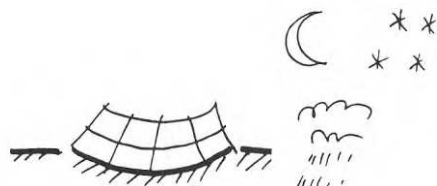
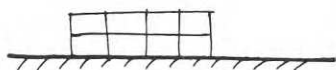
Saltavskjuvningar med vidhängande materialpartiklar från grundmaterialets yta kan observeras i många nedbrytningsprocesser (Fig 50\*, 51).

Dessa försök har gjorts med

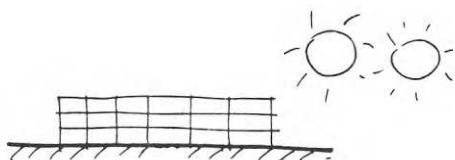
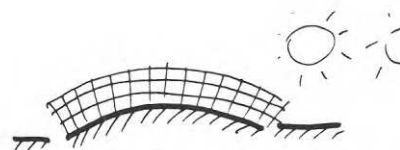
- modernt tegel med en bränntemperatur av 960°C (Fig 52\*, 53\*, 54)
- högkvalitetsbetong med luftporer (Fig 55\*, 56\*, 57).



porös saltformation

ingen åverkan på  
materialytanökning av partikelstorleken  
vid fukthaltsökningar (rel)  
krympning av saltfilmen (hypotes)avskjuvning av material-  
ytan på natten, under  
vintern och vid fuktig  
väderlek

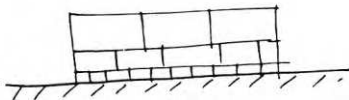
porös saltformation

ingen åverkan på  
materialytanminskning av partikelstorleken  
vid fukthaltssänkningar (rel)  
svällning av saltfilmen (hypotes)avskjuvning av material-  
ytan på dagen, under som-  
maren och vid torr väder-  
lekFig 48 Nedbrytning av materialyta genom ändring av partikel-  
storleken i saltformationen vid fukthaltsändringar  
(hypotes)

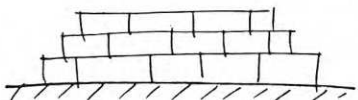
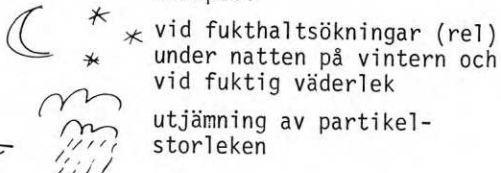
stora saltpartiklar i salt-  
filmyta

salt

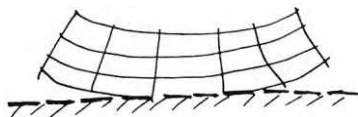
små partiklar mot underlaget



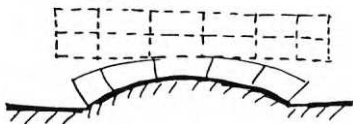
exempel:



krökning av saltfilmen på  
grund av ändring av film-  
dimensioner på grund av  
utjämning av partikelstor-  
leken

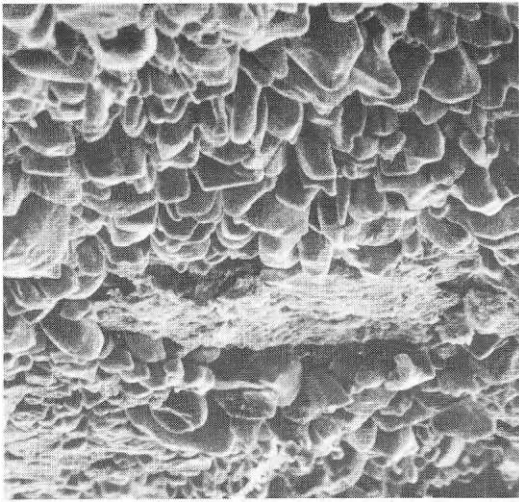


krökning av saltfilmen på  
grund av deformationsändringar  
mot underlaget på grund av  
svällningen av anliggnings-  
skiktet

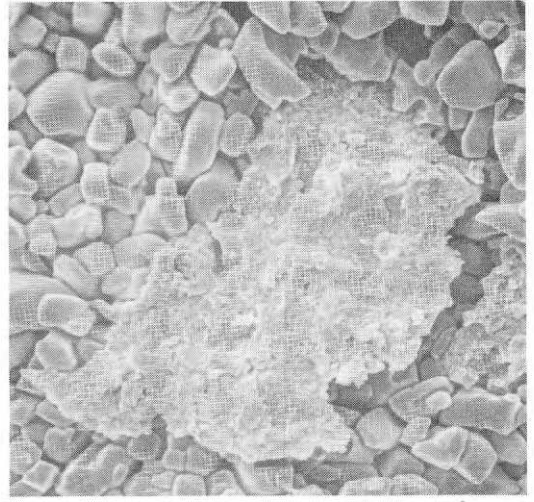


Anm: Förmodligen (eller kanske) förekommer dessa två deformationsprinciper inte samtidigt utan i följd. Detta skulle innebära, att en avskjuvning av underlaget genom svällning av anliggnings-skiktet följes av en avlyftning av filmkanterna från underlaget (detta skulle kunna förklara kantutformningen av saltfilmer i SEM-fotografierna). (OBS hypotes)

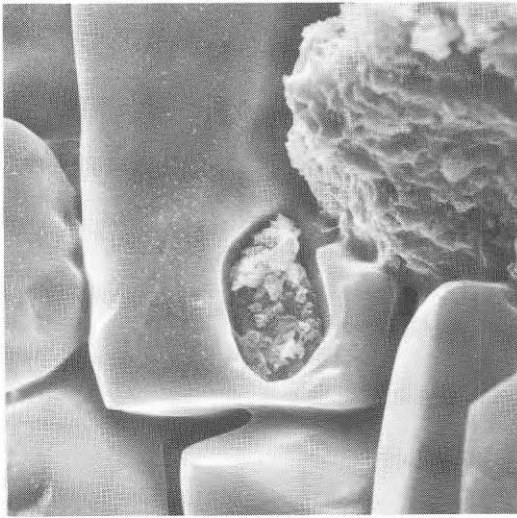
Fig 49 Komplexa deformations- och påkänningsförhållanden vid tjocka saltfilmer (finporös struktur på anliggningsyta mot underlaget och grovporös struktur mot miljön)



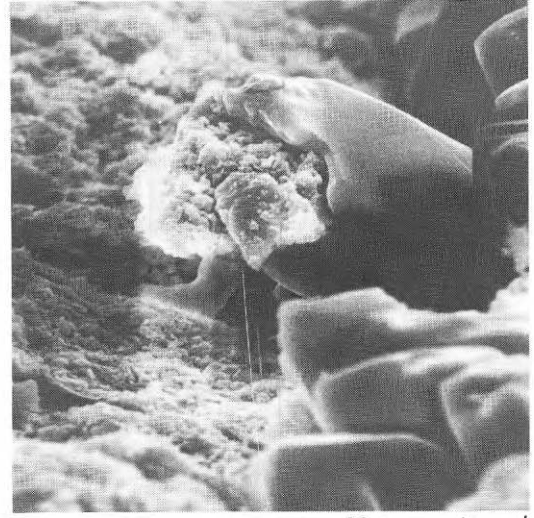
50 μm



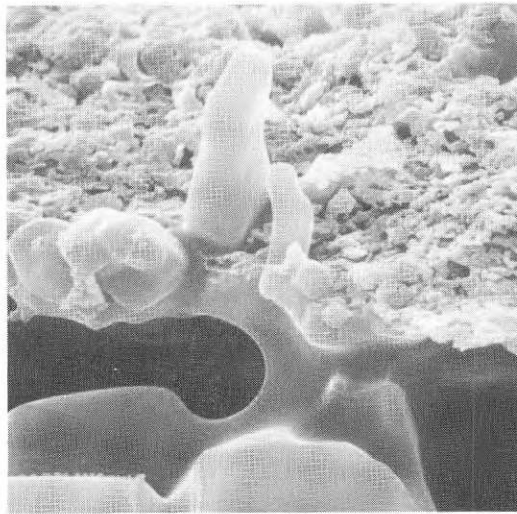
50 μm



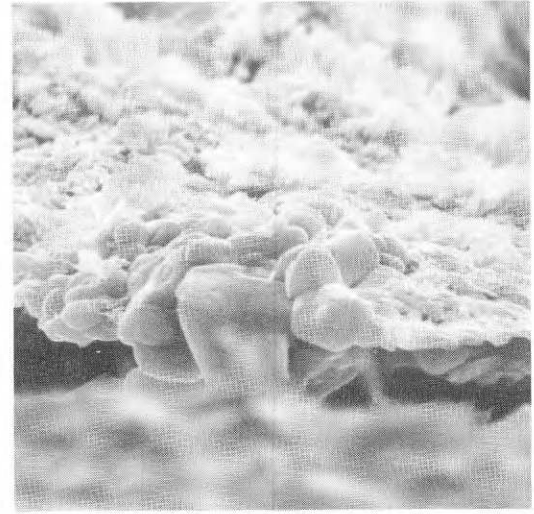
10 μm



10 μm

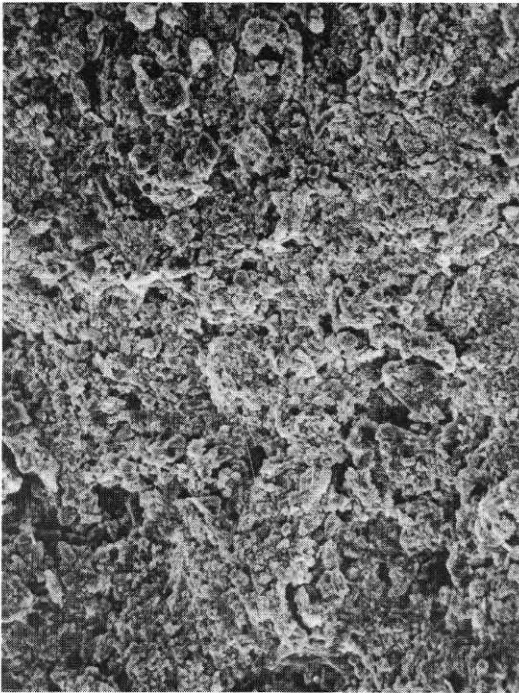


10 μm

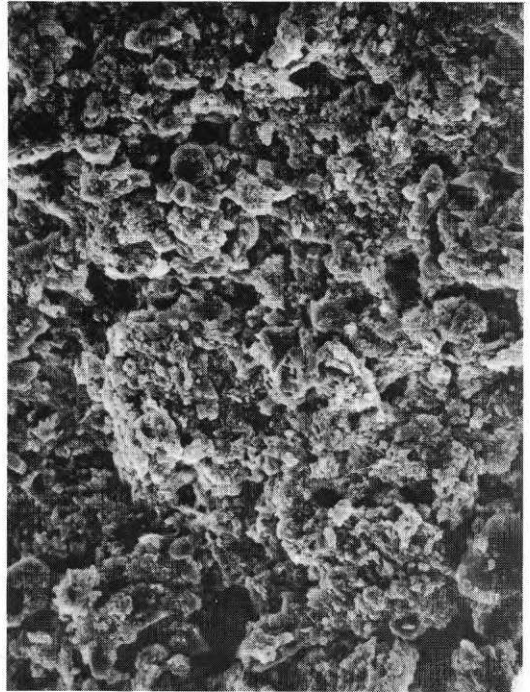


10 μm

Fig 51 Avskjuvning av tegelflaga genom koksaltfilm, detaljer från Fig50\*



25  $\mu\text{m}$  



10  $\mu\text{m}$  




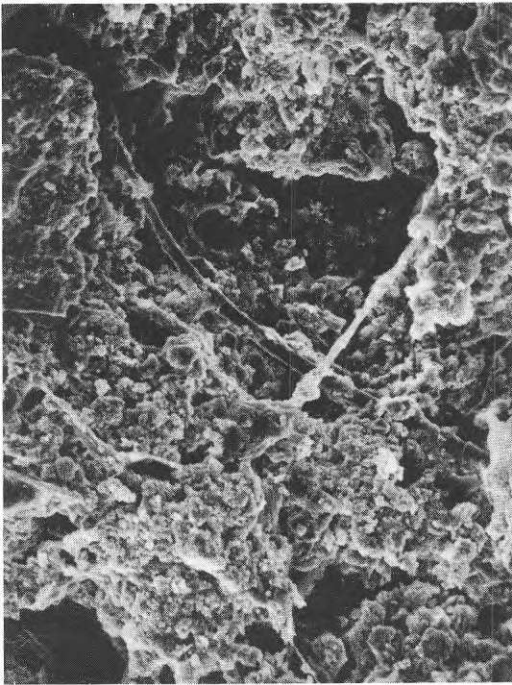
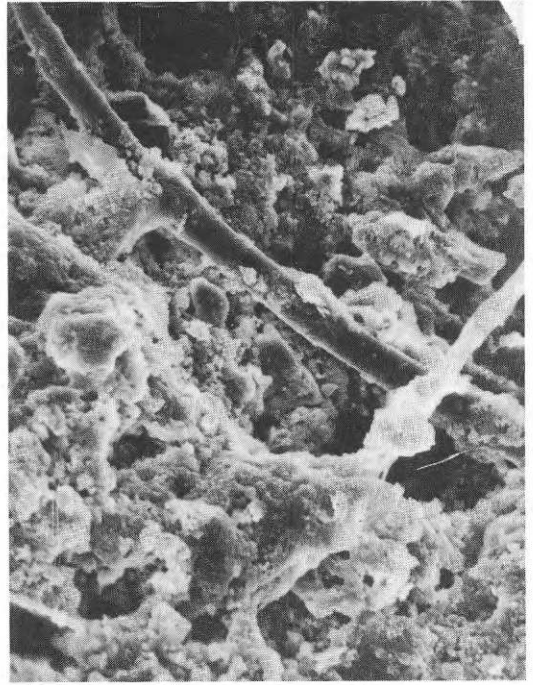
3  $\mu\text{m}$  

Fig 54 Nedbrytningsprodukter, industritegel, nedbrytning genom koksalt (torkning och nedfuktning) (BH)

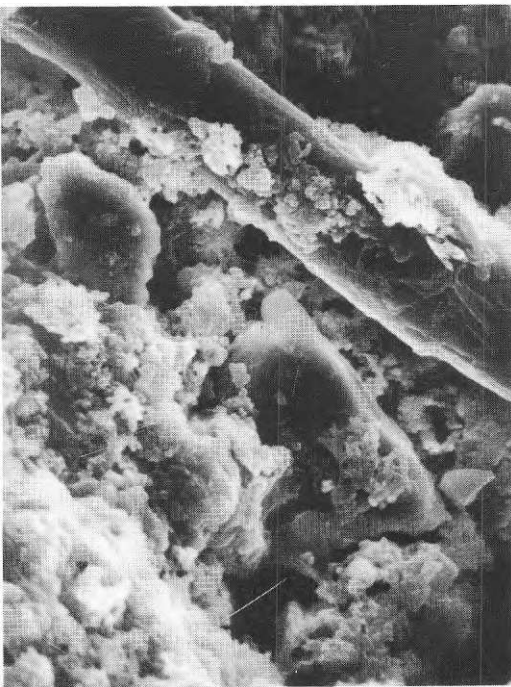





25  $\mu\text{m}$  



10  $\mu\text{m}$  



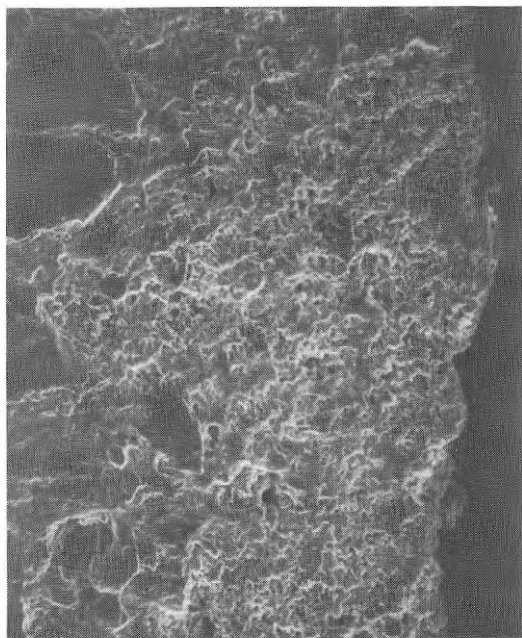
3  $\mu\text{m}$  

Anm: Organisk fiber i provet

Fig 57 Nedbrytningsprodukter, betong K300, nedbrytning genom koksalt (torkning och nedfuktning) (BH)

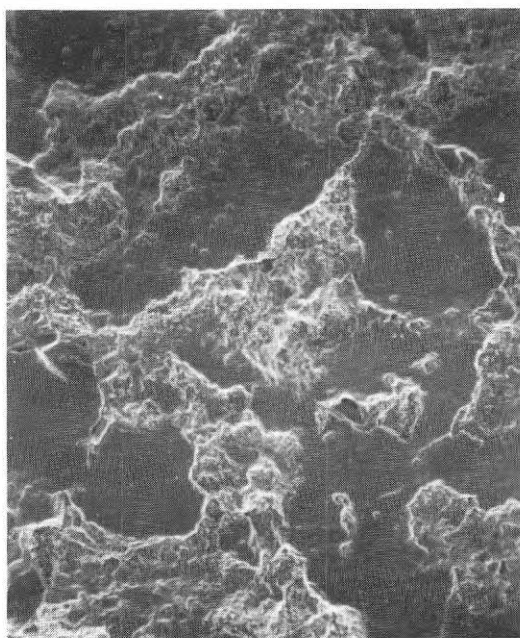
Avskalningen efter ett fåtal cykler kan lätt bestämmas kvantitativt, varvid en cykel omfattar: saltvandring - uttorkning - nedfuktning - nedbrytning.

Likheten mellan nedbrytningsprodukterna från dessa försök kan konstateras med förvittringsskikt på olika materialtyper (Fig 54, 57-61).



Vitringskikt  
Nedbrytningsprodukter

100  $\mu\text{m}$  



Grundmaterial


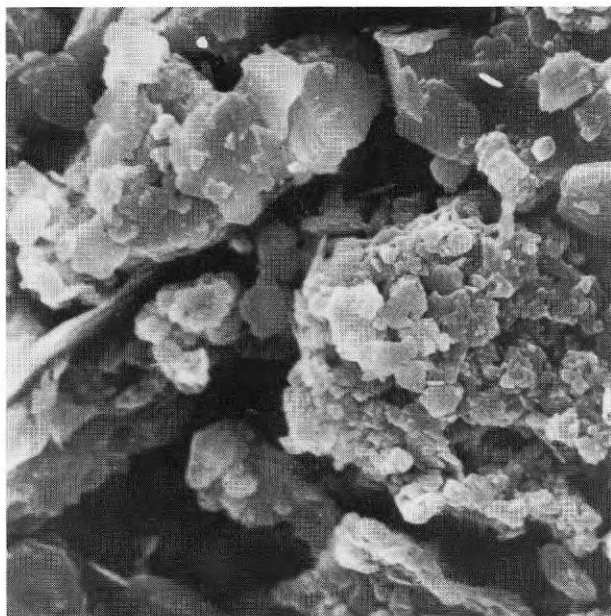

100  $\mu\text{m}$  

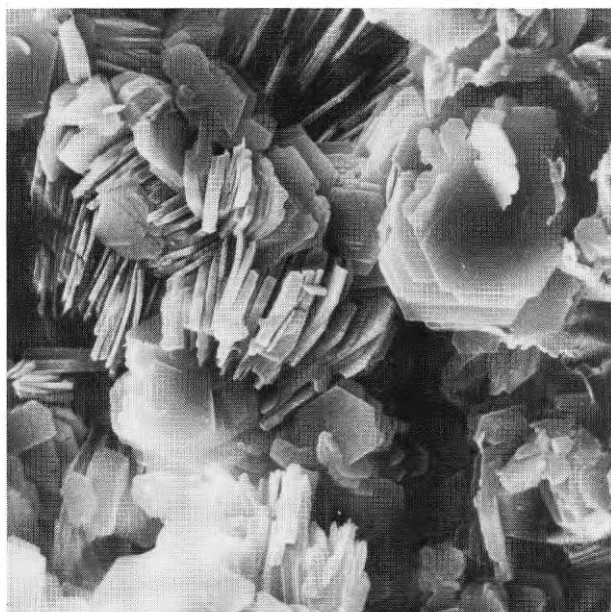
Fig 58 Kölnerdomen, Schlaitdorfer Sandstein, slipprover





Vitreringsprodukter  
på fasadyta

10  $\mu\text{m}$  



Bindefas


10  $\mu\text{m}$  

Fig 59 Kölnerdomen, Schleitdorfer Sandstein (AJI)



Nedbrytningsprodukter  
(vittring) på fasadyta

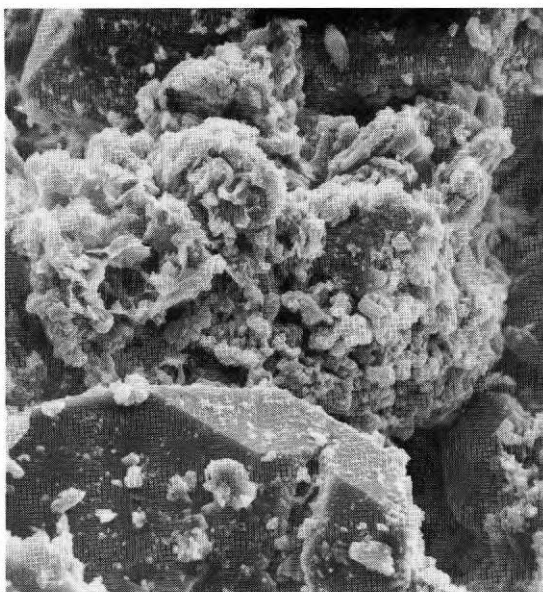
10  $\mu\text{m}$  



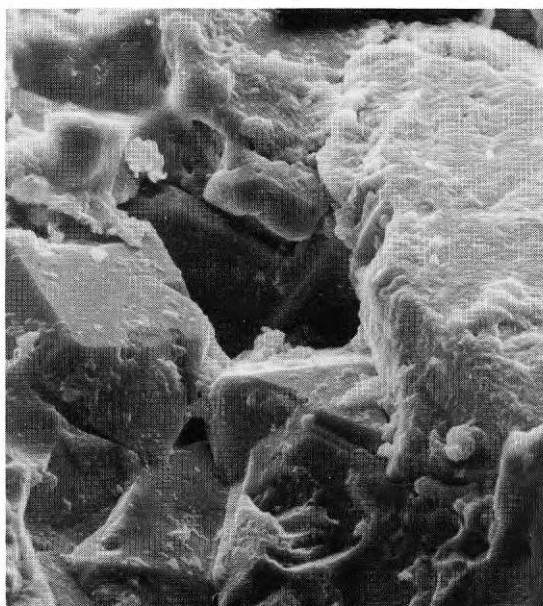
Grundmaterial  
Bindefas och korn

10  $\mu\text{m}$  

Fig 60 Kölnerdomen, Schlaitdorfer Sandstein (AJI)



Vittrad beläggning

10  $\mu\text{m}$  

Ny Gotlandssandsten

10  $\mu\text{m}$  

Fig 61 Stockholms slott, Gotlandssandsten



## 7. Komplexa saltbildningsförlopp

### 7:1 Saltstrukturer och materialreaktioner

Modellen för bildning av porösa saltformationer ur menisker av saltlösningar behöver inte förutsätta att kemiska reaktioner inte kan förekomma under saltbildningsprocessen.

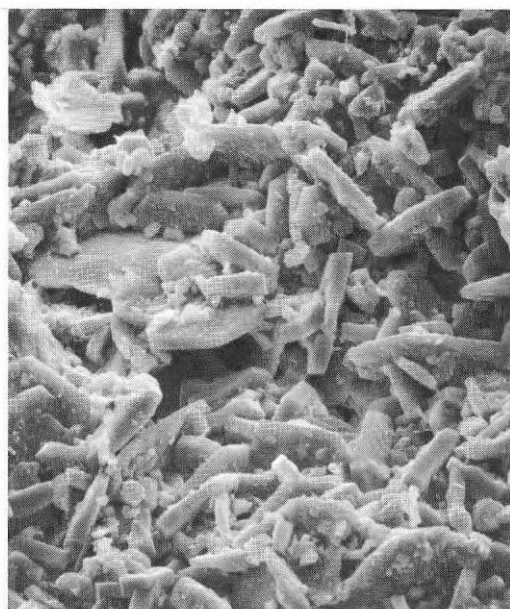
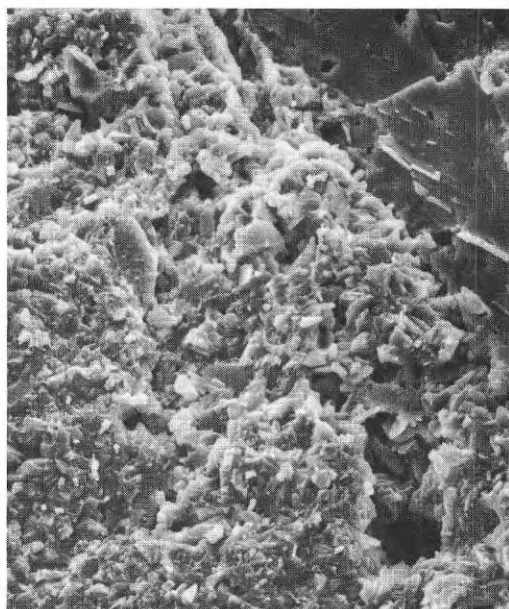
I princip gäller strukturbildningsmodellen och strukturändringsmodellen även om kemiska reaktioner förekommer, under förutsättning att luften kan innehålla fukt samt att eventuella kondensfenomen kan uppträda - (eller avdunstningsfenomen) och reaktionsprodukterna kan lösas i vatten. De kemiska processerna - med material löst i eller blandat med vatten - måste i princip även följa de lagar för uttorkning, kondens, uppvärmning, nedkylning i grovporösa material eller på fria utrymmen som gäller för "stabila" lösningar av salt i vatten. Även för kemiska processer gäller fuktfysiken. Dessa kemiska processer kan förekomma mellan grundmaterial och vattenlösta ämnen, de kan även förekomma mellan grundmaterial och i luften befintliga gaser m.m m.m (Fig 62, 63). Hydratvattenupptagning kan i så fall anses vara en speciell variant av en fysikalisk/kemisk materialändring (således bildas gipshydrat på kalk- eller magnesiumhaltiga byggmaterial direkt under inverkan av luftens svavelsyrlighet tillsammans med luftens fukthalt), varvid speciella finstrukturer bildas.

Som framgår av litteraturuppgifter kan i samband med saltbildning och saltstrukturändringar andra speciella, sekundära - än så länge svårförklarliga - fenomen uppträda (Ref 4:2). Ett exempel är en typ av silikat(hydrat)bildning av speciell typ som kan observeras i såväl saltskadat tegel som saltskadad betong (Fig 64).

Speciella former av gipsbildningar i närvaro av koksalt eller samband mellan karbonatisering av betong i närvaro av tö-(kok-)salt skulle kunna vara av den typen (Ref 4:1, 4:2).

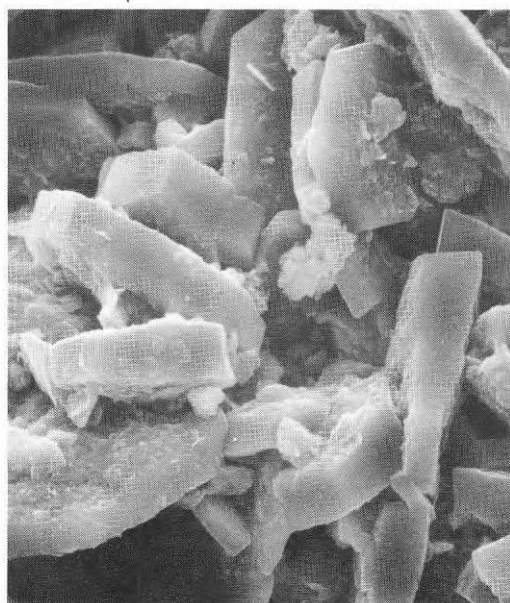
### 7:2 Saltstrukturer och fysikaliska processer

Saltvandring, saltbildningar och saltnedbrytningar av den tidigare skisserade typen kan givetvis förekomma tillsammans med andra fysikaliska processer.



10  $\mu\text{m}$  

10  $\mu\text{m}$  



Skarv mellan grundmaterial och  
beläggning

Beläggning

Fig 62 Nedbrytningsprodukter, fasad, Ekebergsmarmor (AJI)



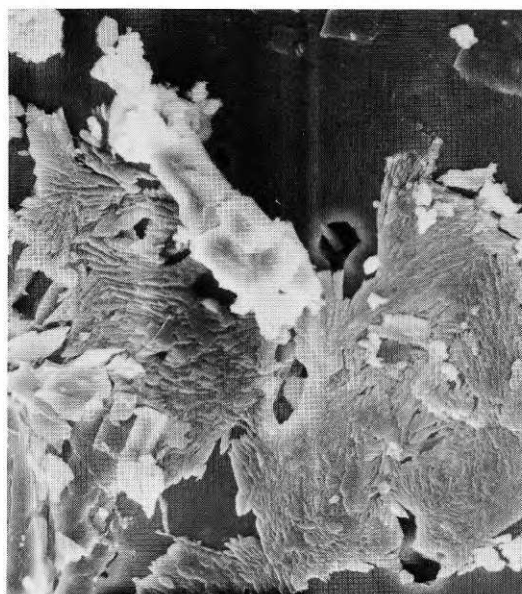
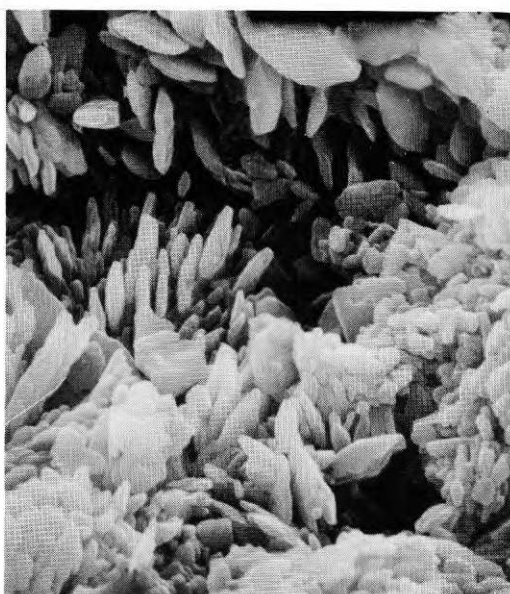

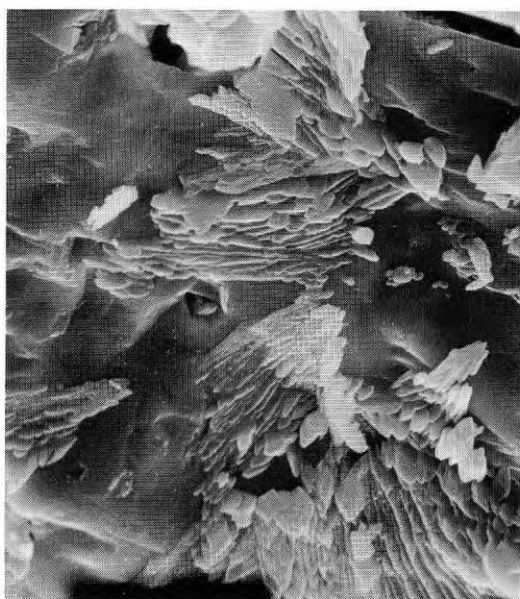
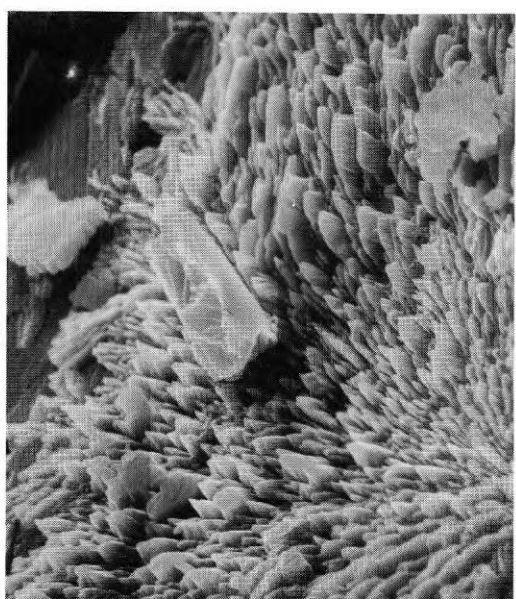


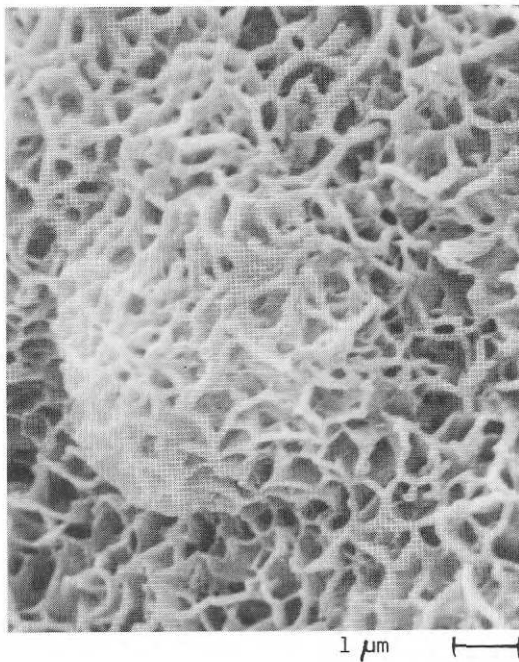
10  $\mu\text{m}$  1  $\mu\text{m}$  10  $\mu\text{m}$  10  $\mu\text{m}$  

Fig 63 Kalksten, Konstakademih, Stockholm, baksida av avvittrad flaga (AJI)

Betong (Skurubron)



Industrieteigel

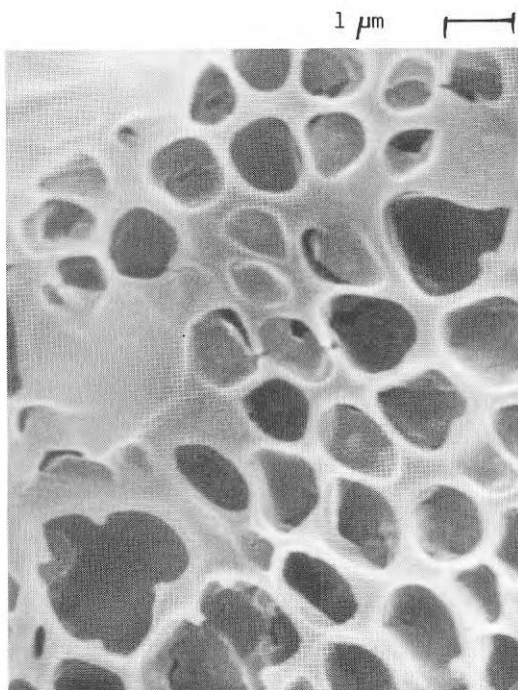


Fig 64 Silikathydrat(?)struktur i saltskadat material (MF)



Till dessa hör bland annat frysning - konventionell svällning och krympning av framför allt icke vattenlösligt material, värmeutvidgning och liknande. Beroende på bl a olika värmeutvidgning och värmeupptagning kan även "optiska" fenomen uppträda (värmeupptagning vid olika färg av materialytor vid solbestrålning) (Ref 1:2). Även här kan de olika processerna ej enbart förekomma parallellt med varandra utan de kan även påverka varandra. Således skulle saltformationers och saltlösningars beteende negativt kunna inverka på bildningsprocesser och verkningssätt även hos sådana material som under "normala" förhållanden inte har några ogynnsamma egenskaper. Det är ej osannolikt, att många materialbildningsprocesser (t ex hårdnandet av bruk) influeras av närvaron av lösningsbara material. Fuktförhållanden i ett poröst mer eller mindre hårdnat bruk påverkas säkert genom daggpunktsändrande lösningsbara salter. (Den konventionella fukthaltsfilosofin stämmer sedan inte heller.)



## 8. Saltstrukturer i skadat material

### 8:0 Allmänt

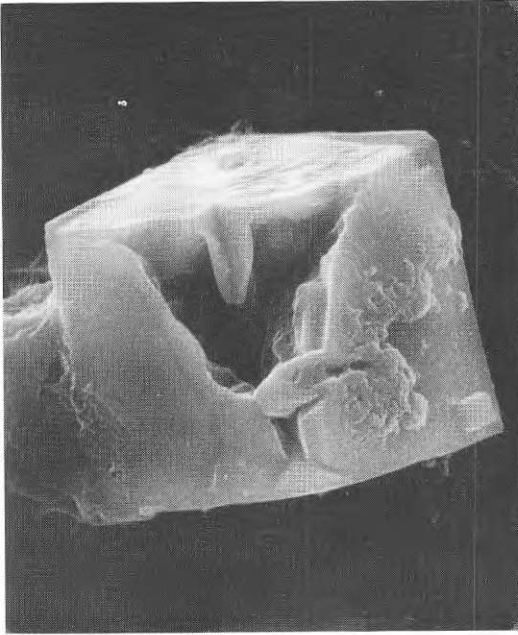
Inom det aktuella projektet har några större systematiska undersökningar avseende strukturen av skadliga salter i byggnadsmaterial inte kunnat göras på grund av projektets begränsade ekonomiska ram. Några undersökningar har även fått utföras i ett tidigt skede av projektet, "innan man visste vad man borde leta efter".


Därför kan det delvis hända, att några SEM-fotografier, som står som intäkt för riktigheten av en hypotes, inte är ett statistiskt korrekt urval ur verkligheten. Detta gäller i första hand de fotografier av saltskadade betongkonstruktioner som har gjorts för ett antal år sedan utan att vid den tidpunkten ha en hypotes att arbeta med.

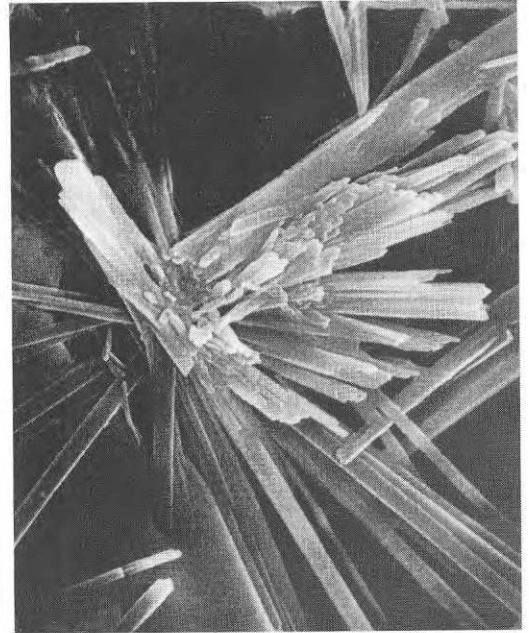
### 8:1 Saltstrukturer

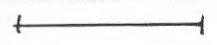
Salter kan uppträda i många skepnader på materialytor eller i porösa materials ytskikt. Salter kan förekomma i bl a följande former (Fig 65):

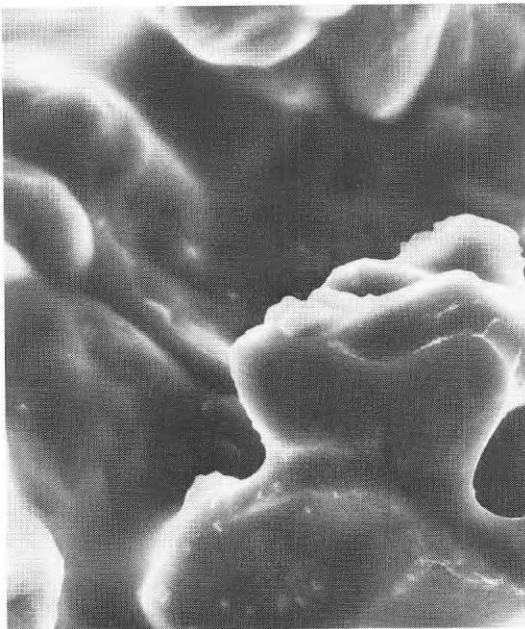
- (.1) Strukturer som liknar ideala kristaller. Dessa strukturer tycks bildas, när en utfällning kan ske störningsfritt i en följd i mättade saltlösningar.
- (.2) Nålstukturer eller andra mikroporösa strukturer som tycks bildas i diskontinuerliga processer, varvid lösning i lösningsmedel och utfällning ur lösningsmedel växlar av varandra.
- (.3) Amorfa strukturer, som kanske har en inre yta som är ytterst stor och som i stor utsträckning liknar de formationer som bildas i gelbildande material.
- (.4) Kombinationer av (.1) - (.3) enligt ovan. Alla dessa strukturer kan odlas laboratoriemässigt. Dessa strukturer förekommer även i eller på saltskadat material.



:1 idealkristall 10  $\mu\text{m}$  



:2 nålkristall 10  $\mu\text{m}$  



:3 amorf struktur 10  $\mu\text{m}$  

Fig 65 Koksaltstrukturer

## 8:2 Undersökningsmetodik

Undersökningsmetodiken har varit ytterst enkel. Antingen har man undersökt nedbrytningsprodukter av skadat material i form av flisor, flagor eller pulver eller har man undersökt brottytor i skadat material. När man bryter material, korresponderar förmodligen brottytan på något sätt med en brottanvisning till en blivande potentiell saltskada. "Brottmetoden" har den fördelen, att man inte förstör saltstrukturen genom vätske- eller temperaturpåverkan vid annan provtagningsmetod. När dessa prover togs och undersöktes hade man ännu inte insett betydelsen av att fukthalten vid provtagningen och under undersökningen omedelbart därefter har en stor inverkan på undersökningsresultatet, dvs hur saltformationerna verkligen ser ut. Det borde vara ett mål för ett fortsatt forskningsarbete att finna metoder för att kunna observera saltstrukturer i detalj "i sin rätta fuktmiljö". (Man har tydligen redan undersökt is i porer med hjälp av SEM.) Den till förfogande stående apparaturen har inte gjort det möjligt att undersöka framför allt koksalt. Efteråt kunde konstateras att SEM-detektorn var defekt (Edax). Det har varit lättare med vägsaltet, dvs kalciumkloriden. Det har därför inte heller entydigt kunnat konstateras, om de ytterst mycket porösa saltstrukturer som har hittats i saltskadat material verkligen har varit koksalt. Det skulle kunna ha varit materialstrukturer som har initierats av förekomsten av koksalt, vars närvaro har fastställts med hjälp av konventionella analysmetoder.

Följande material har undersökts:

- (.1) Tegel från Sveaborg i Finland och saltskadat industritegel.
- (.2) Saltskadad betong från några broar i Stockholms-trakten och Ölandsbron.
- (.3) Natursten från olika historiska byggnader.

## 8:3 Materialundersökningar

### 8.3.1 Jämförelse tegel/betong

Som tidigare påpekats, kan ytterst porösa saltstrukturer bildas. Närvaron av lösningsbara salter kan även påverka andra processer som bildar finstrukturer.

Gemensamt för tegelprover och betongprover var att brottytan i skadat material var täckt med en amorf beläggning av salter. Undersökningen visar, att den amorfa beläggningen inte har någon direkt kontakt med underlaget (åtminstone inte i dess kant). En förklaring till detta fenomen finns (Fig 49, 66, 67).

Det skulle kunna hända, att den amorfa beläggningen har lossnat från underlaget antingen vid provtagningen eller vid uttorkningen vid preparation av proverna för SEM-undersökningar. En speciell struktur av silikat (?) har kunnat observeras i såväl saltskadat tegel som saltskadad betong (Fig 64). Denna struktur har inte kunnat hittas vid icke skadade konstruktioner, i och för sig inget bevis för att den inte finns där. Strukturen har en typisk "skum form" - egendomligt nog har samma form kunnat konstateras vid strukturer av amorf kiseloxid ur kiselsyrestrar och liknande förbindningar.

### 8.3.2 Tegel från Sveaborg

I Sveaborgs tegel har alla strukturer uppräknade under 8:1 kunnat finnas, såsom t ex

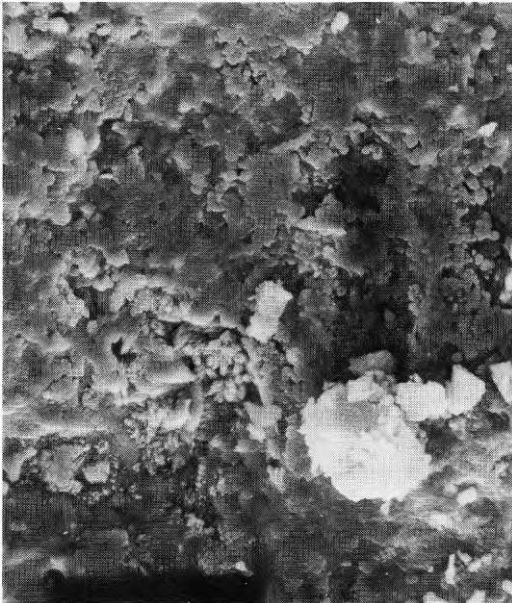
- amorfa strukturer i form av beläggningar (Fig 67, 68),
- "ideala" kristaller (Fig 69),
- finporösa faserformiga strukturtyper (Fig 70),
- saltbildning i kanten av uttorkade saltlösningsdroppar som ett första steg i en saltvandring (Fig 71, 72).

Dessa olika strukturer representerar kanske olika steg i en saltomvandling, -vandring- och -materialnedbrytningsprocess (Fig 73).

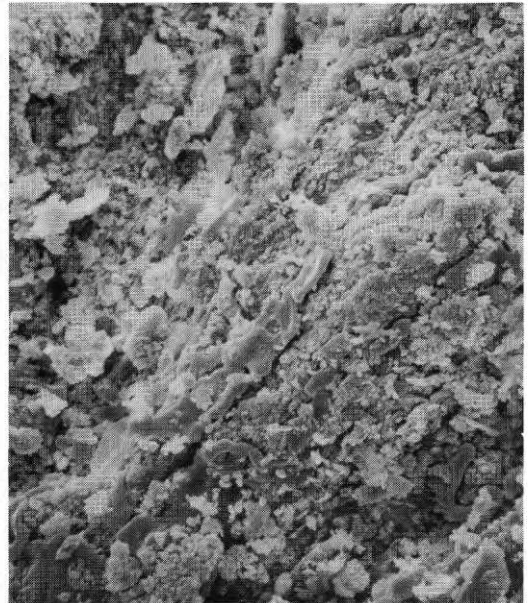
Saltskadat tegel uppvisar i brottytan en beläggning med amorfa saltformationer. Icke saltskadat tegel har beläggningfria brottytor (Fig 68).

### 8.3.3 Betongkonstruktioner

Under de senaste åren har nedbrytningsmaterial från olika tösalt-skadade betongkonstruktioner i Stockholms-trakten undersökts. Ytorna på flagade betongskikt eller i brottytorna på ännu icke nedbrutet material visar en beläggning med en ytterst porös struktur. De flesta av dessa undersökningar har gjorts för något år sedan. Dessa undersökningar har ej följts upp med analyser (Fig 74-76).



Fack 17/2

10  $\mu\text{m}$ 100  $\mu\text{m}$ 

Rotebro, betong

Tavastehus, tegel

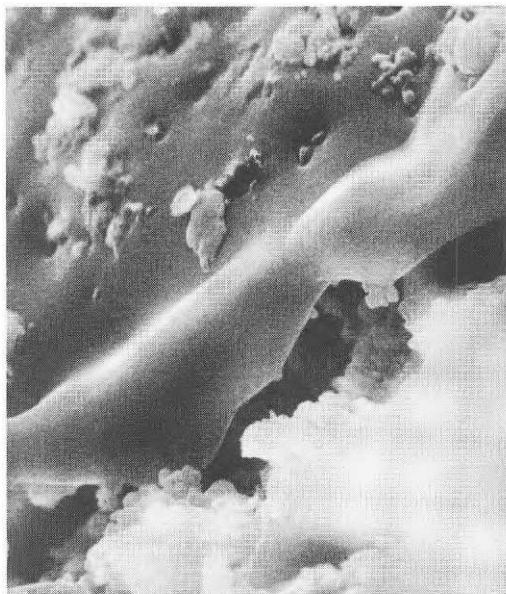
Detaljer av saltformationer i  
saltbelägningens randzon



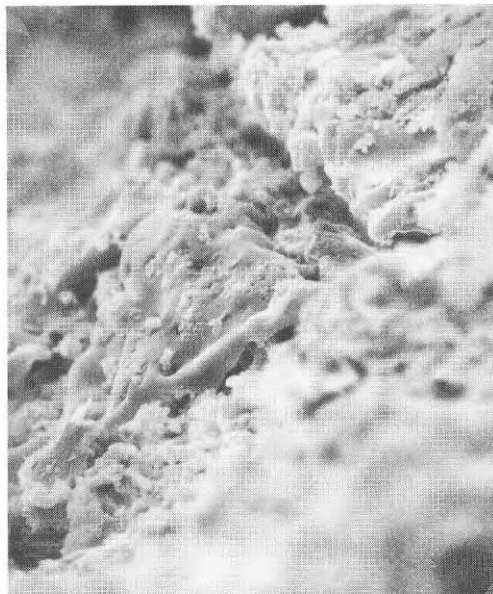
Fack 17/2

1  $\mu\text{m}$ 

Fig 66 Amorfa saltbelägningar på avflagningar av saltskadat material (AJI)

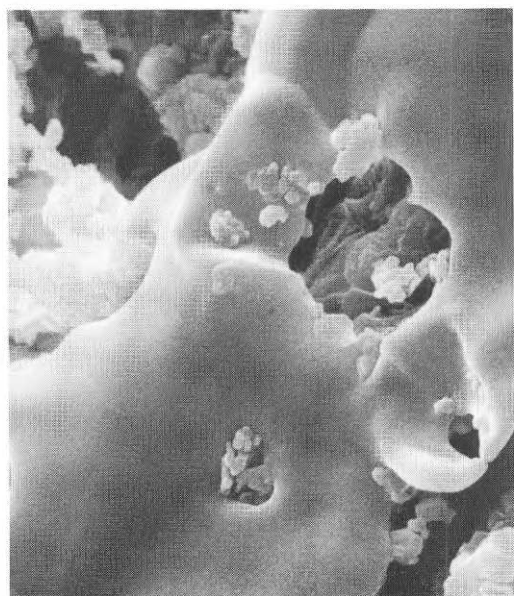


10 µm



50 µm

Anliggning mot underlaget

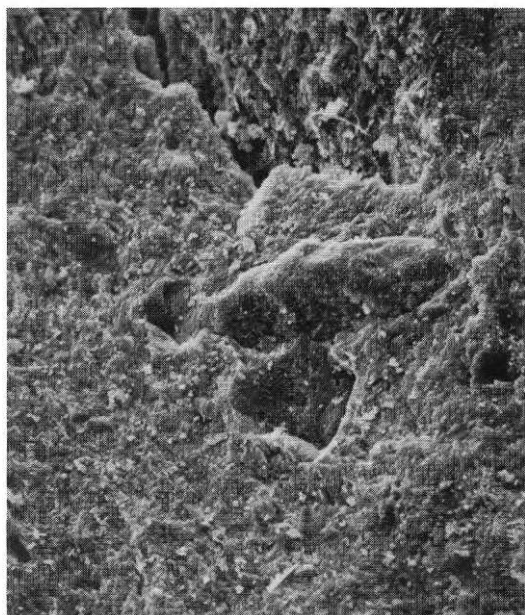


överyta

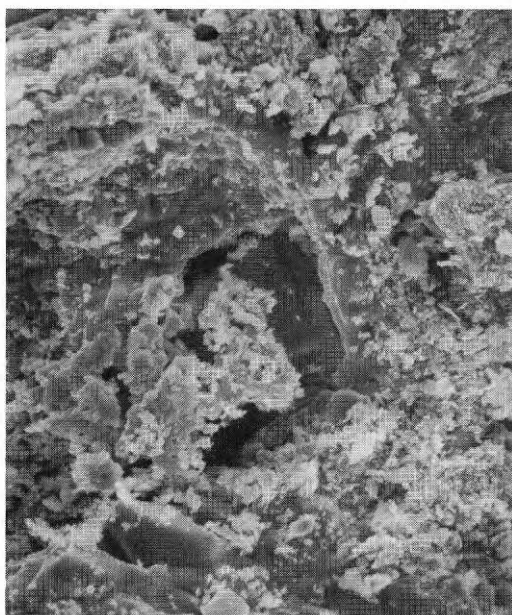
10 µm

Fig 67 Tavastehus, Finland, saltskadat tegel, amorf beläggning av salt på nedbrytningsprodukter (MF)



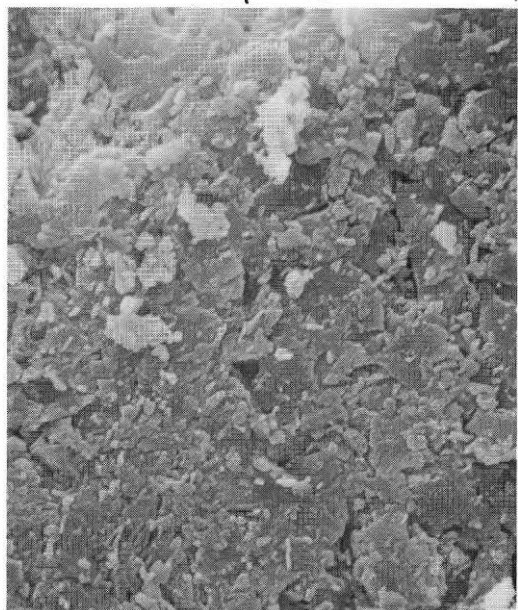


10  $\mu\text{m}$

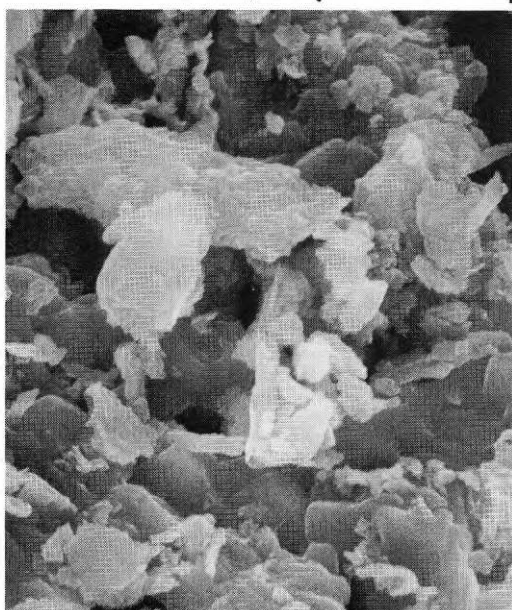


10  $\mu\text{m}$

10  $\mu\text{m}$



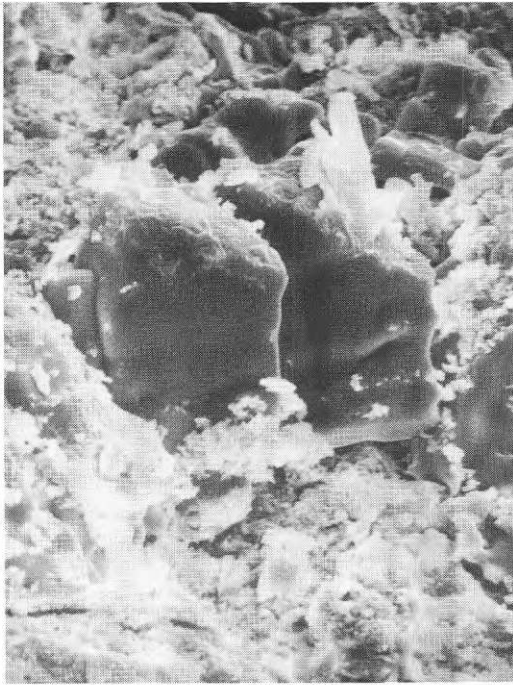
10  $\mu\text{m}$



Icke skadat tegel, prov nr 36,  
materialyta

Saltskadat tegel, prov nr 37,  
yta, saltskadad nedbrytnings-  
produkt

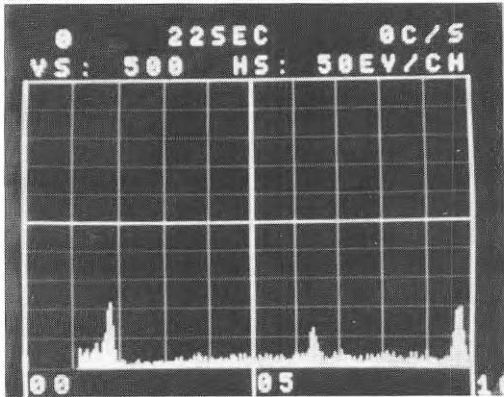
Fig 68 Tavastehus, Finland (MF)



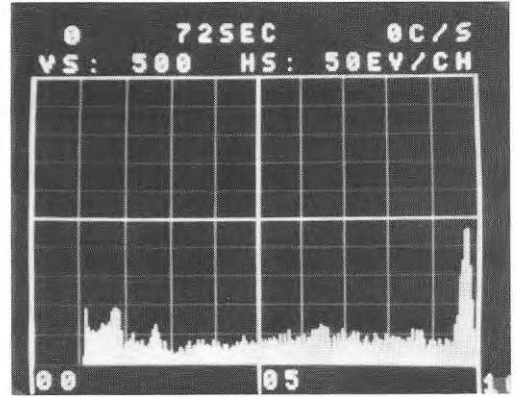
20  $\mu\text{m}$

C

D

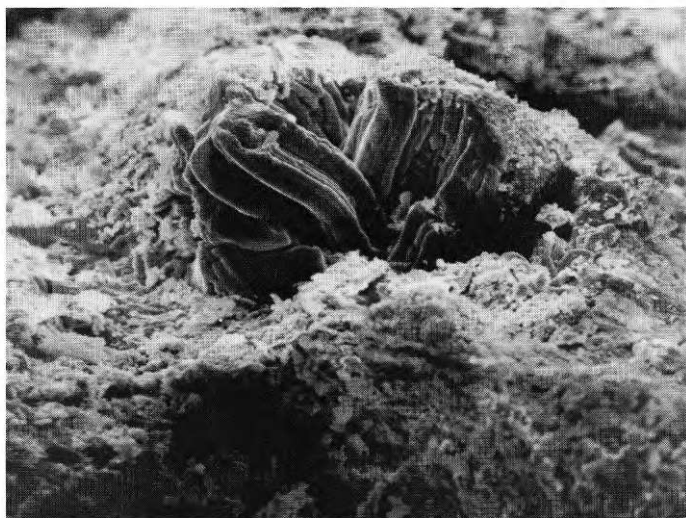


Al, Si, K, Ca, Fe  
från D

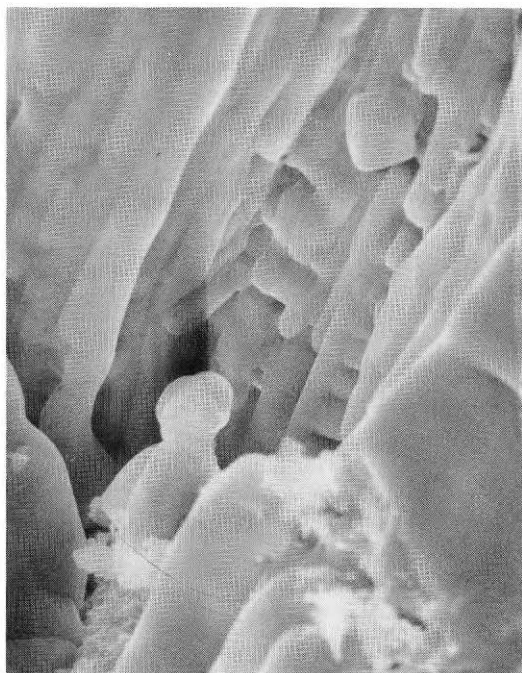


Al, Si, Cl  
från C

Fig 69 Tegel, Tavastehus, Finland, koksalt på nedbrytningprodukt (MF)

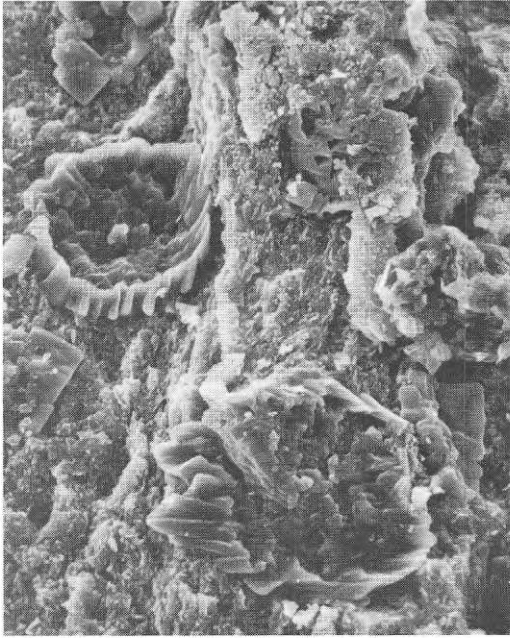


50  $\mu\text{m}$  |

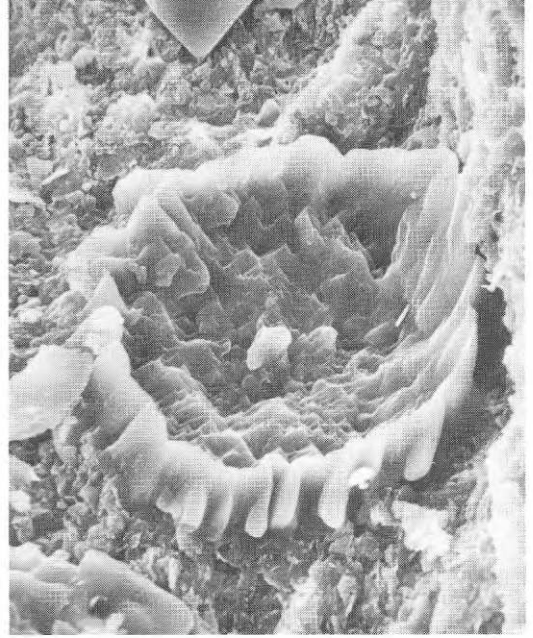


10  $\mu\text{m}$  |

Fig 70 Tegel, Tavastehus, Finland, omstrukturering av saltformationens randzon (i samband med nedbrytning av yta) (MF)

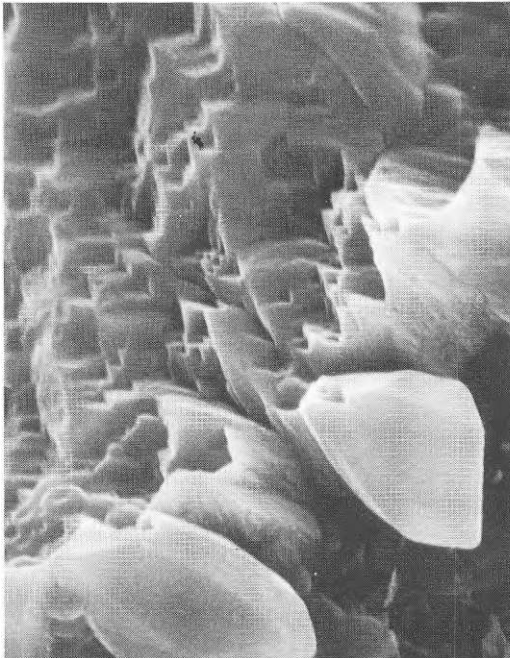


15  $\mu\text{m}$  |

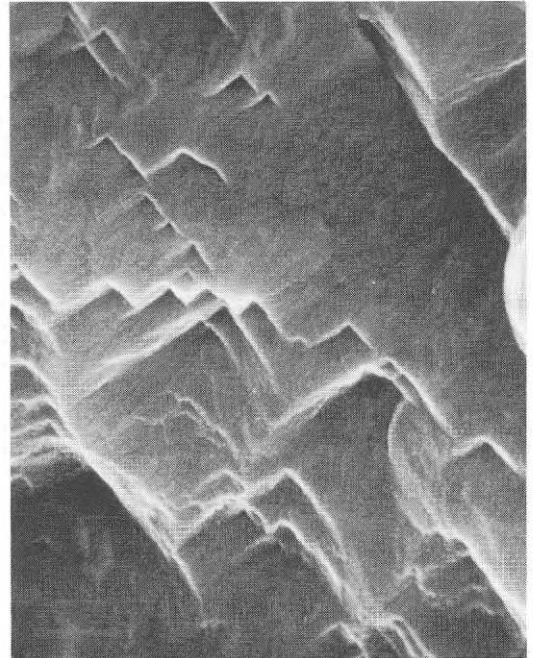


15  $\mu\text{m}$  |

2  $\mu\text{m}$  |



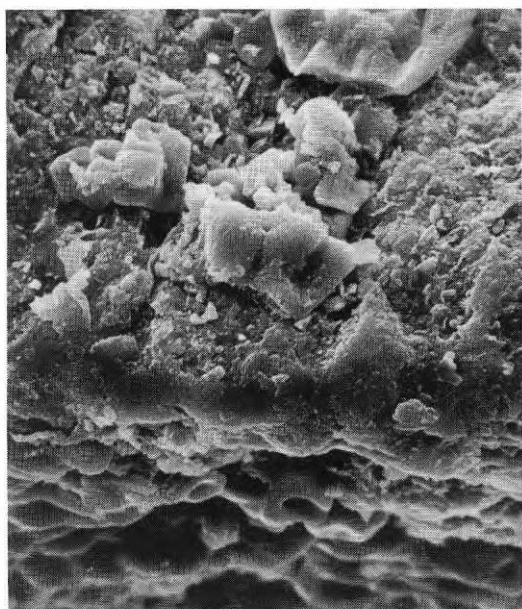
1  $\mu\text{m}$  |



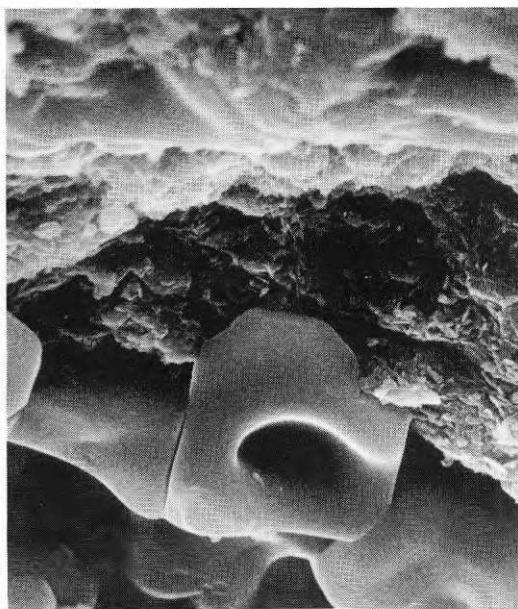
Olika stadier av strukturbildning

Fig 71 Tegel, Tavastehus, Finland, påbörjad saltvandring efter nedfuktning (kondens?), detaljer av uttorkad lösningsdropp (MF)

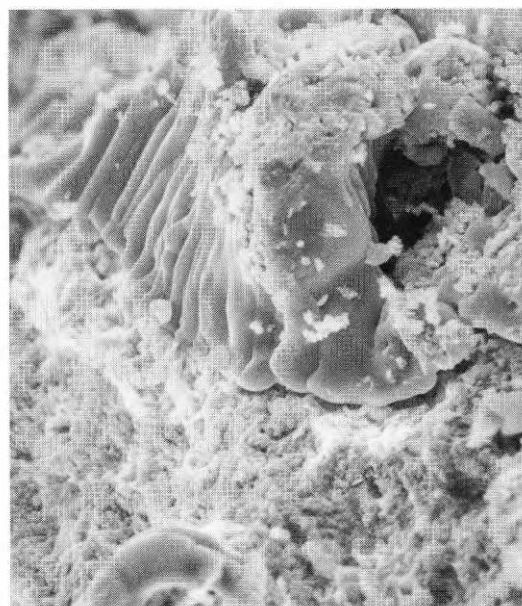




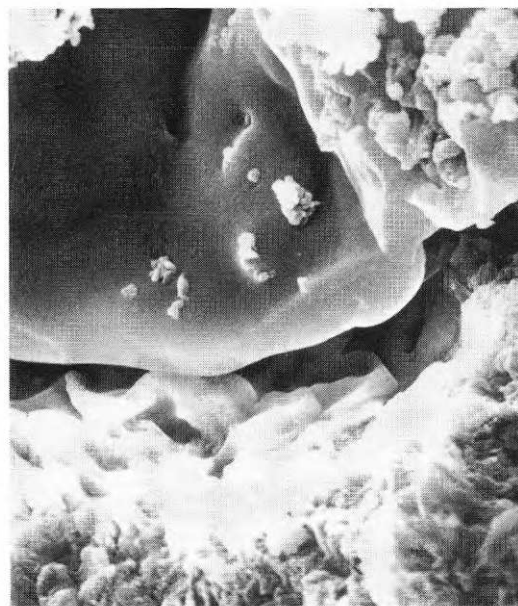
100 μm



50 μm

Saltformationer i nedbrytningsprodukter

50 μm



10 μm

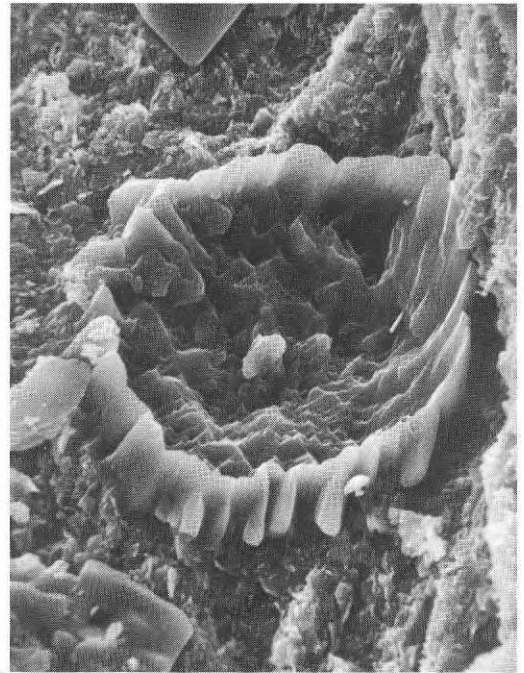
Saltformationer på nedbrytningsprodukter


Fig 72 Tegel, Tavastehus, Finland, saltformationer, saltskadat tegel, struktur i beläggningkant, detalj (F D) anliggningsyta (MF)



10  $\mu\text{m}$  

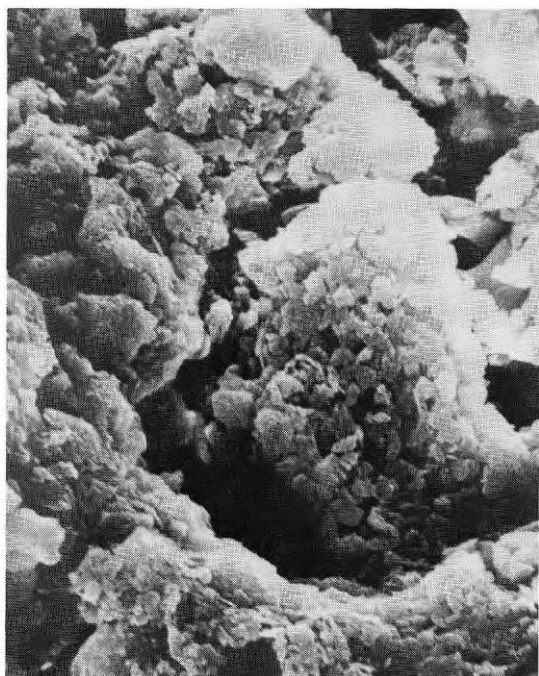
:1 idealkristall i materialets inre



10  $\mu\text{m}$  

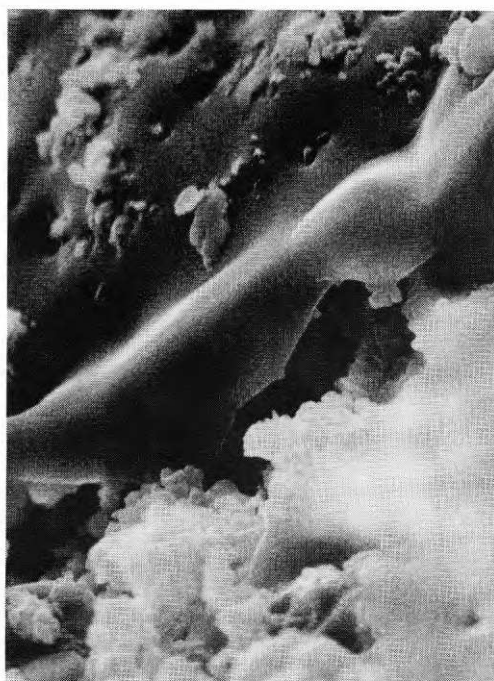
:2 påbörjad saltvandring (och salt-  
nedbrytning?) i ytskiktet vid ut-  
torkning av lösningsdroppe efter  
kondens

Fig 73 Hypotes, stadier av saltvandring och saltnedbrytning i tegel (Tavastehus)



10  $\mu\text{m}$  |-----|

:3 Saltformationer efter kondens- og uttørkningscykel, pågående nedbrytning (Sveaborg) (ThP)



10  $\mu\text{m}$  |-----|

:4 Amorfa flagor på nedbrytningsprodukter



Oskadad betong,  
skarv cement/sandkorn

10000 x



Bro, Södertälje,  
saltskadad betong,  
saltformation

Fig 74 Oskadad och saltskadad betong (AJI)



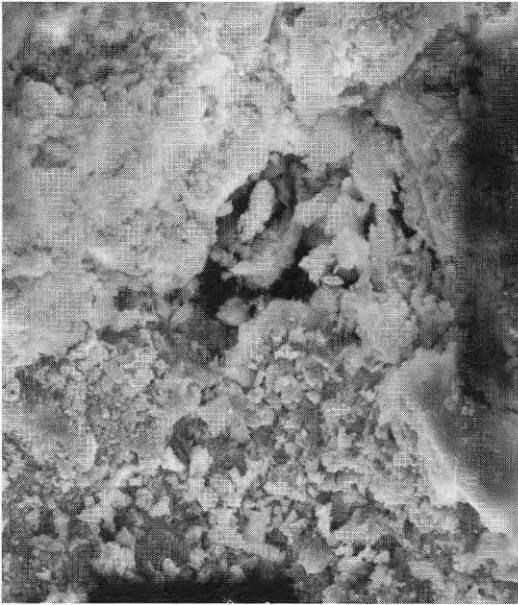
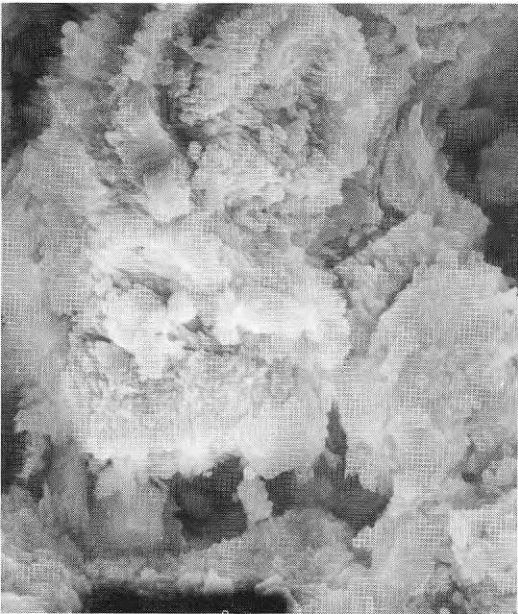
10  $\mu\text{m}$ 10  $\mu\text{m}$ 10  $\mu\text{m}$ 

Fig 75 Bro, Södertälje, saltskadad betong, saltformationer (AJI)

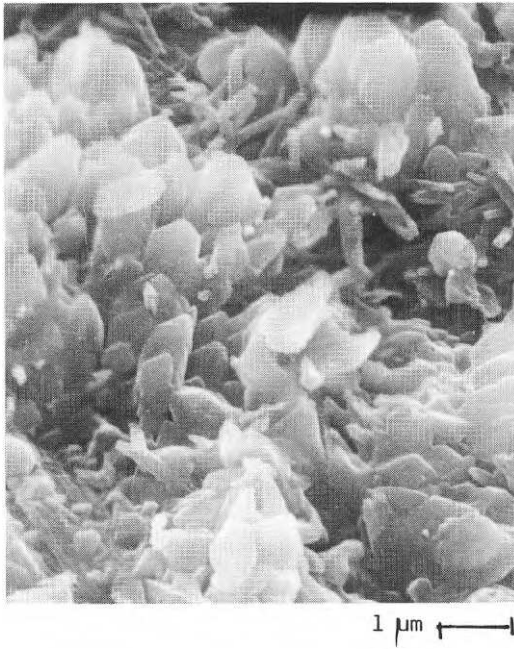
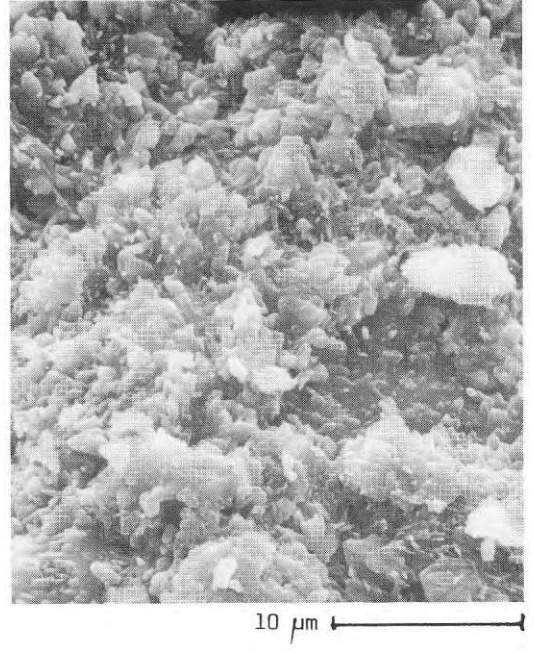
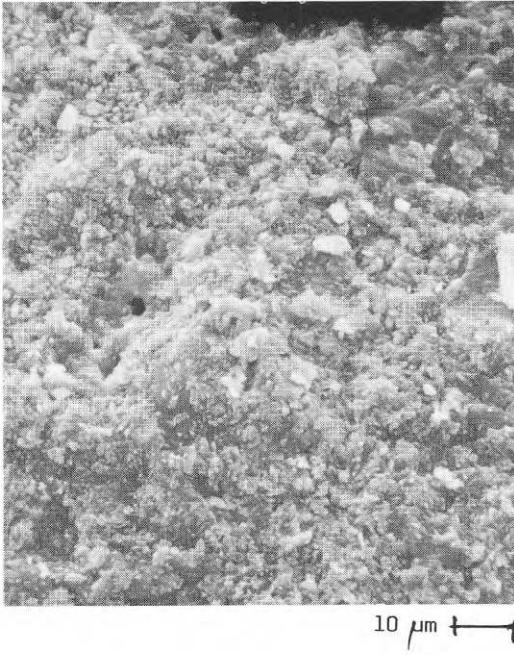


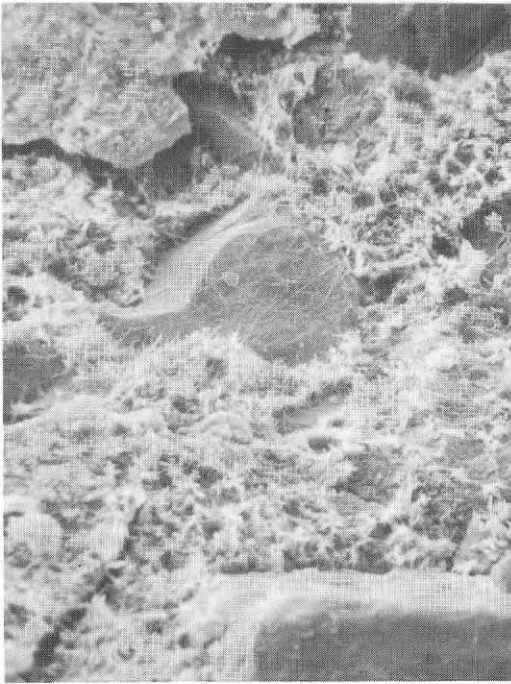
Fig 76 Bro, Södertälje, tösaltskadad betong (AJI)

I de flesta undersökningar som redovisar en amorf beläggning av en yta har man vid några av dessa betongundersökningar kunnat observera en ytterst finporös struktur i beläggningsrandzonen. Denna struktur skulle kunna förklaras som en vandring av salterna i beläggningens randzon och början till grundmaterialnedbrytning i beläggningens randzon vid saltförflyttningen (Fig 66, detalj).

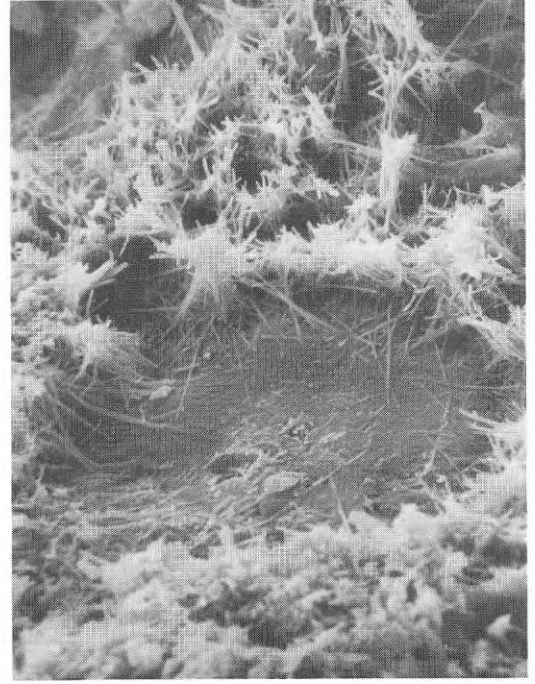
Hos många skadefall hos betongbroar har saltfyllda luftporer kunnat konstateras, ibland även utan förstoringsglas. Dessa porfyllnader i form av vita prickar på brottypytan har vid reparationsarbeten varit ett kriterium för en skadad betong. Trots att skadorna i många betongprover ansågs ha uppstått som följd av tösaltning med natriumklorid, har dessa vita prickar bestått av kalciumklorid!!! (Fig 77, 78). Man kan inte låta bli att fundera över om man inte har "tösaltat" med vägsalt (kalciumklorid). Dessa porfyllnader var inte kompakta, de var finporösa. Har dessa porfyllnader av luftporer initierat materialnedbrytningen, kan nedbrytningsmekanismen inte ha varit massiv porfyllnad i form av ideala kristaller.


#### 8:4 Materialomvandling

Det verkar som om vissa byggnadsmaterial omstruktureras och reagerar i närvaro av koksalt utan att koksaltet deltar i några kemiska processer (Fig 60). Till dessa mikrostrukturer hör en speciell typ av skumartiga material, som skulle kunna vara en form av silikathydrat, som, såsom tidigare påpekats, förekommer i såväl saltskadat tegel som i tösaltskadad betong. De strukturer som förekommer i saltskadad betong har en påfallande likhet med ettringit (Fig 79-81). Även här skulle det kunna hända att tösalt, även om det inte deltar i några kemiska processer, på något sätt fysikaliskt influerar andra processer, som leder till en omstrukturering av grundmaterialet åt mikrostrukturhållet till: Saltskadat material (framför allt betong) har en stor andel mikrostrukturer på grovporernas väggyta, som inte förekommer vid icke skadat material (ettringit?? eller kalciumklorid??) (Fig 81, 82). (En närmare analys skulle kanske visa, att dessa strukturer åtminstone innehåller salt om de inte består av salt.)




100  $\mu\text{m}$  



10  $\mu\text{m}$  



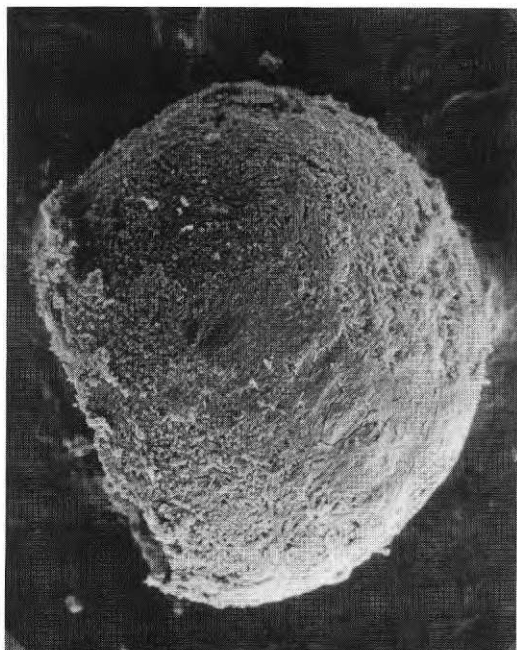
10  $\mu\text{m}$  




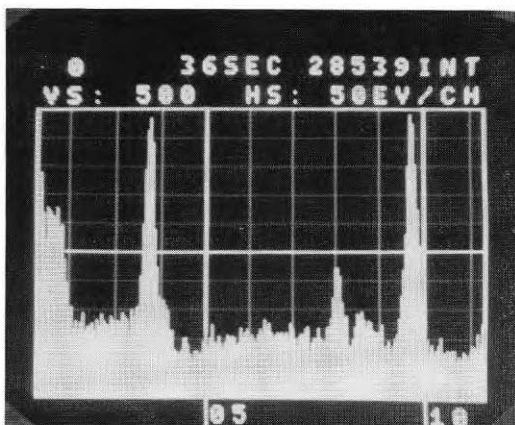
10  $\mu\text{m}$  


Fig 77 Skrubbron, materialförändringar, saltskadad betong (MF)

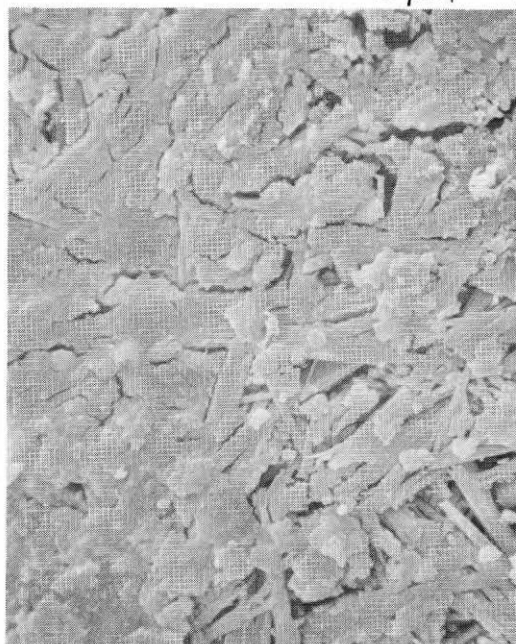




100  $\mu\text{m}$  



10  $\mu\text{m}$  



1  $\mu\text{m}$  

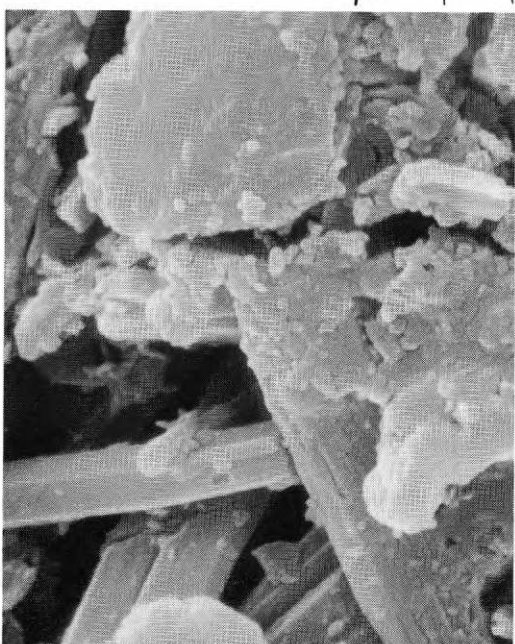
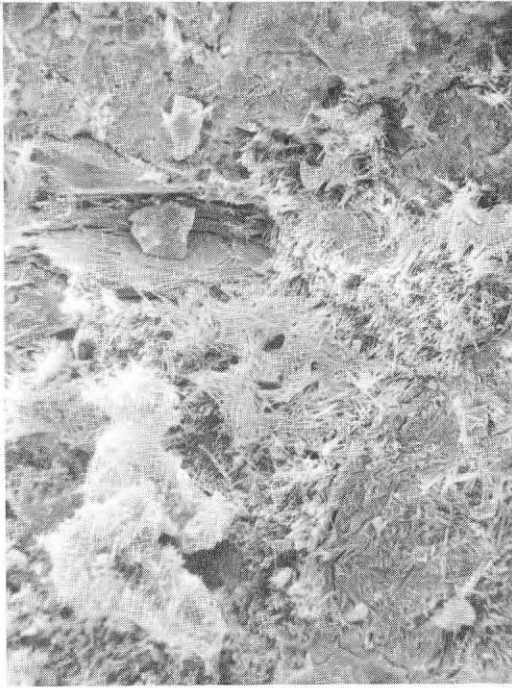


Fig 78 Mariebergsbron, Stockholm, saltskadad betong, luftpor fylld med finporös kalciumklorid (MF)



100 μm



10 μm

10 μm

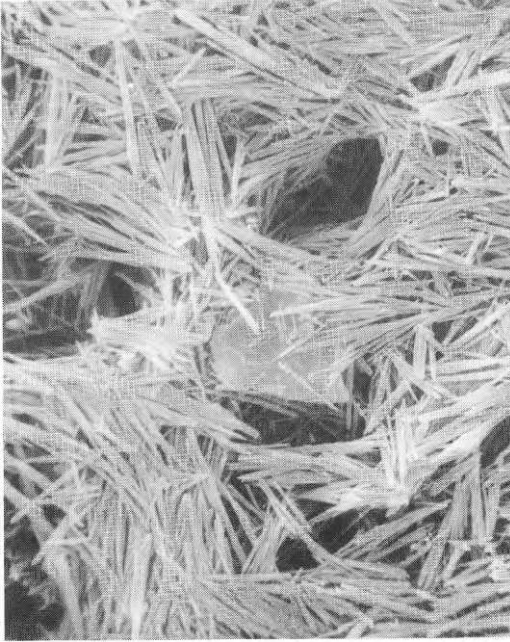
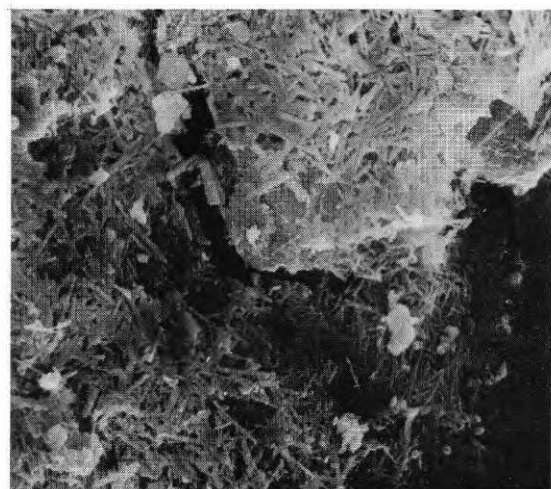
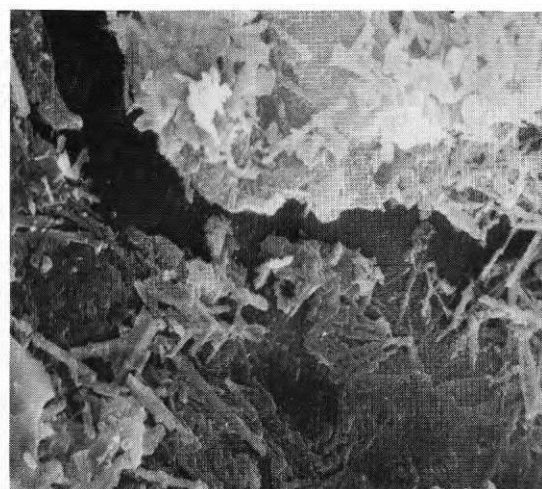


Fig 79 Skurubron, saltskadad betong, materialstruktur på avflagnig (MF)



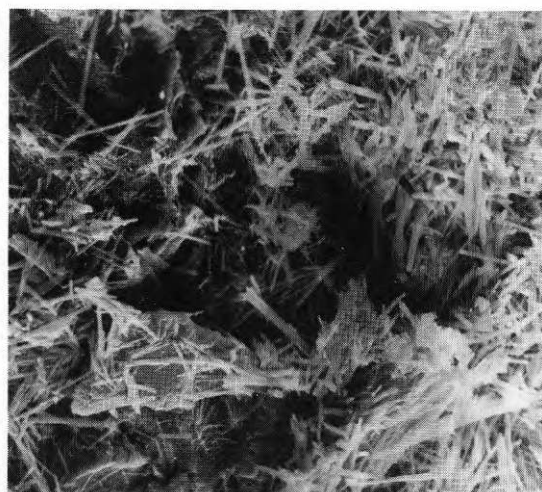
1A 100 μm



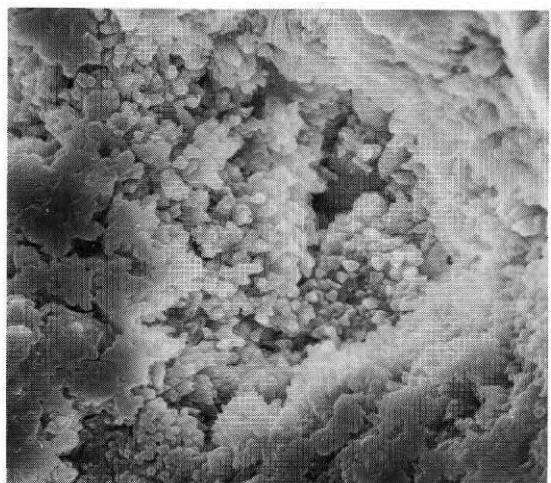
1B 10 μm



2A 100 μm



2B 10 μm



3 10 μm

1A, B Fack 16  
Materialstruktur under salt-  
belägning eventuellt salt

2A, B Fack 19  
Struktur under saltformationen  
eventuellt salt

3 Fack 19  
Saltbelägning

Fig 80 Bro, Rotebro, saltskadad betong  
(AJI)



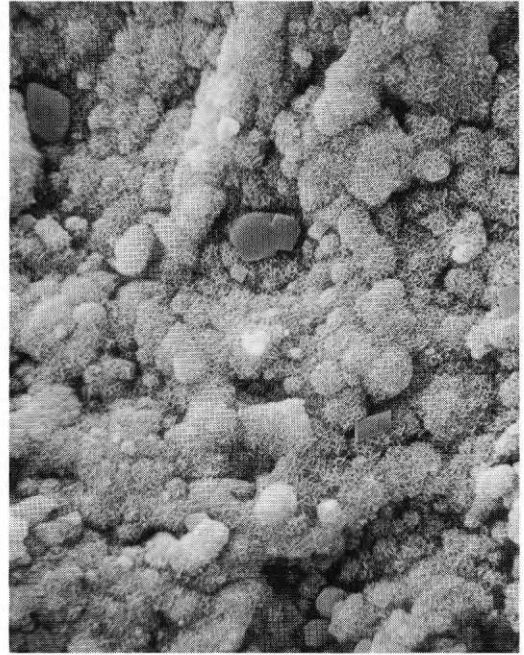
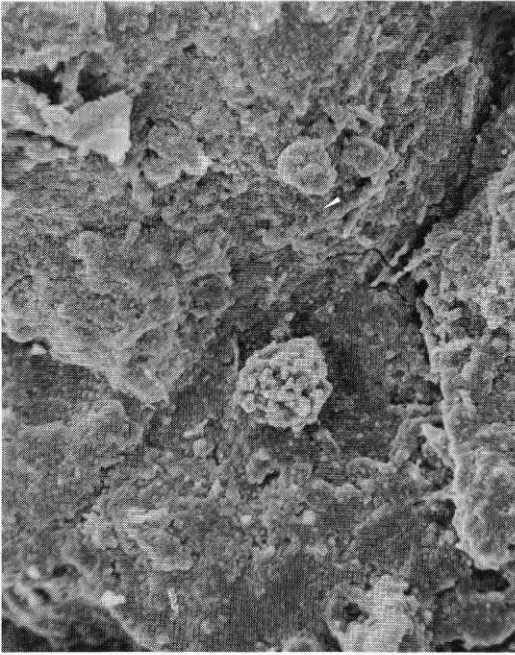
10  $\mu\text{m}$  |-----|

10  $\mu\text{m}$  |-----|



Fig 81 Skurubron, saltskadad betong, saltfylld (?) luftpor (MF)





100 μm

10 μm

10 μm

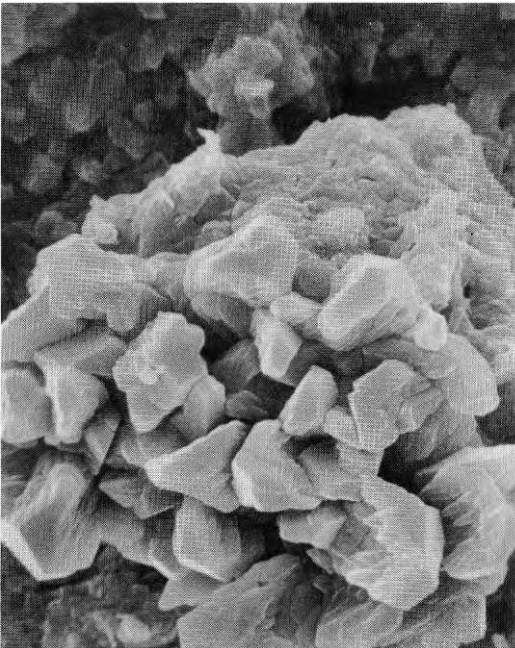


Fig 82 Skurubron, saltskadad betong, materialstruktur (salt?) (MF)



## 9. Åtgärder mot saltvittring

### 9:1 Förutsättningar för saltvittring

Under förutsättning att ovan skisserade hypoteser för saltvandringar och saltnedbrytningar av poröst vätbart material stämmer, kan även åtgärder för att motverka eller rent av förhindra saltnedbrytning av material skisseras. Syftet med dessa åtgärder kan vara av olika slag. Sammanfattningsvis skall kriterierna för förekomsten av saltvandringar och saltnedbrytningar upprepas enligt följande.

- Porvolymen skall vara tillräckligt stor för att tillåta variationer i fukthalt. Som extremfall för en tillräckligt stor porvolym gäller en fri materialyta.
- Saltmängden skall var tillräckligt stor.
- Saltmängden i porvolymen får inte överskrida ett visst värde för att inte stabilisera förhållandena i porvolymen.
- Poren får inte vara fylld, varken med salt eller saltlösningar.
- Det nedbrytbara materialet måste vara vätbart för att de menisker skall kunna bildas som initierar salttransport och indirekt saltnedbrytning.

### 9:2 Åtgärder mot saltvittring

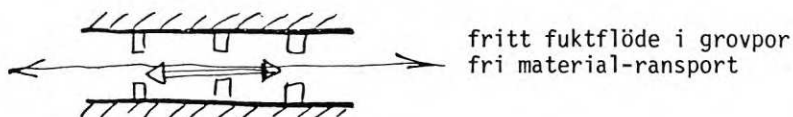
Följande åtgärder skulle kunna anges (Fig 83).

- (.1) Minska porvolymen genom delvis porfyllning av finporöst material. Denna porfyllning bromsar snabba fukthaltsfluktuationer och hindrar i så fall saltvandringar och saltnedbrytningar.
- (.2) Åstadkom stabila fuktförhållanden i porsystemet. Detta kan i extremfall åstadkommas genom att porsystemet fylls med vatten eller saltlösningar. I det andra extremfallet kan porsystemet fyllas med salt ovanför en kritisk salthalt (helt eller delvis).

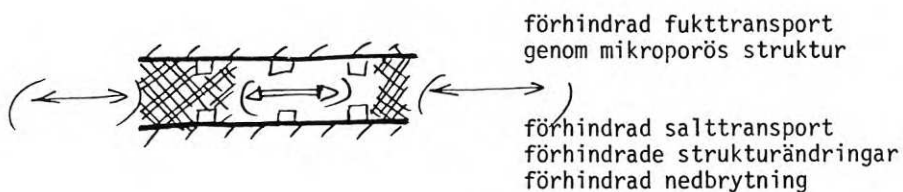
- (.3) Åstadkom stabila temperaturförhållanden i materialet för att undvika daggpunktsgenomgång som kan vara en förutsättning för saltförflyttningar av saltnedbrytningar (värmeisolering, slutna porer).

Saltvandring sker vid uttorkning av saltlösningens filmer mot filmkanten till eller vid uttorkning från vätskemenisker (Fig 84:1). Saltvandring är en förutsättning för saltnedbrytning. Följande åtgärder att styra saltvandring och saltnedbrytning skulle därför kunna anges. (Åtgärderna kan i viss utsträckning användas för att förhindra fuktvandringar och fuktskador.)

- (.4) Ändra kraftspelet i saltlösningens menisk mot underlaget genom att ändra saltlösningens ytspänning. Detta kan åstadkommas genom att belägga grundmaterialets yta med tensider eller genom att späda ut saltlösningen med tensider (Fig 84:2).
- (.5) Kraftspelet i saltlösningens menisk mot underlaget kan även ändras genom att göra underlaget vattenavvisande. Genom en vattenavvisande behandling av porsystemets väggar åstadkommer man en randvinkel av saltlösningens film mot underlaget större än  $90^{\circ}$  med en motsvarande minskning av avdunstningen från lösningens rand, vilket i sin tur resulterar i att finporösa vandrande saltformationer inte kan bildas i en vandrande saltlösningens film (Fig 84:3).
- (.6) Åstadkom stabila fuktförhållanden med en fukthalt ovanför saltlösningen eller saltformationen som är lägre än saltlösningens mätnadsfukthalt genom att införa vattenlösliga material med en mätnadsfukthalt lägre än den respektive saltlösningens mätnadsfukthalt - man höjer daggpunktstemperaturen (Fig 84:4).
- (.7) Öka fukthalten i porsystemet ovanför den aktuella saltlösningens mätnadsfukthalt genom att införa vattenlösliga material med hög mätnadsfukthalt - man sänker daggpunktstemperaturen (Fig 84:5).
- (.8) Och varför skulle inte luftporer med en viss fördelning och storlek kunna inverka på fukthaltsändringar (och på saltvandringar, om de har hydrofoba väggytor)?

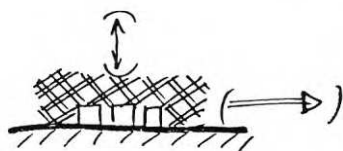


fritt fuktflöde i grovpor  
fri material-transport

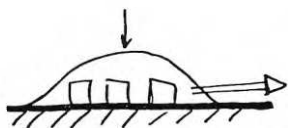


förhindrad fukttransport  
genom mikroporös struktur

förhindrad salttransport  
förhindrade strukturändringar  
förhindrad nedbrytning



förhindrad fukttransport genom  
mikroporös beläggning  
förhindrad salttransport  
förhindrad strukturändring  
förhindrad nedbrytning



fritt fuktflöde på fri materialyta

Fig 83 Åtgärder mot saltvandring och saltnedbrytning (ändring av strukturen i grundmaterialet)

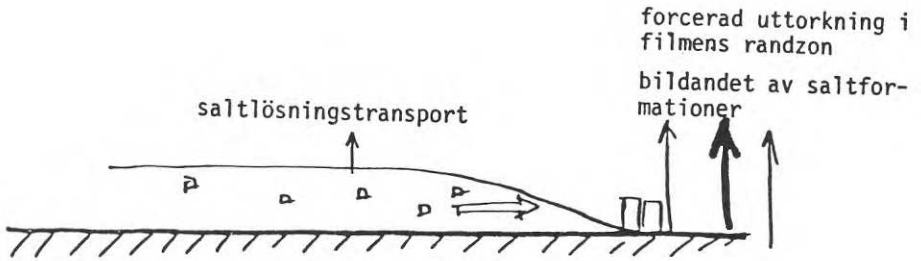


Fig 84:1 ostörd saltvandring

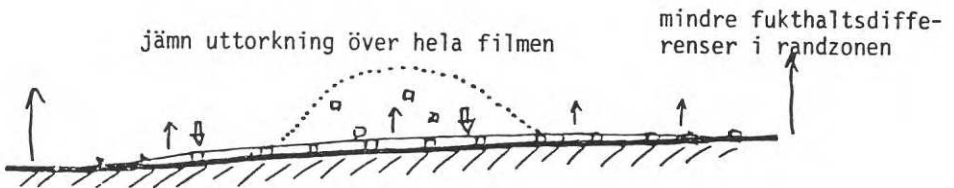


Fig 84:2 sänkning av utspänningen av saltlösningen t ex genom tensid tillsats

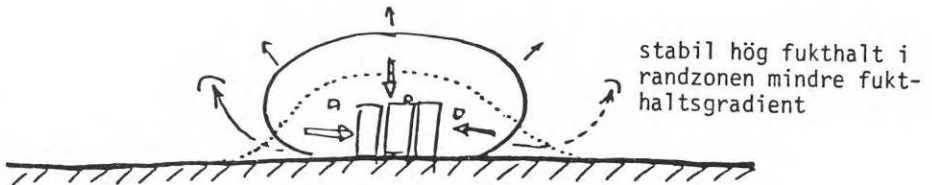


Fig 84:3 ökning av gränsspänningen mot underlaget t ex genom hydrofobering

Fig 84 Effekt av åtgärder mot saltvandring och saltnedbrytning  
Ändring av saltlösningens egenskaper och verkningssätt

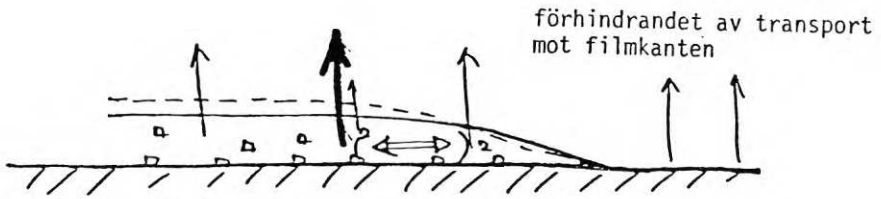


Fig 84 :4 ändring av daggpunktstemperaturen av lösningen  
 avdunstningsforcering från filmen  
 (förhindrandet av kondens)

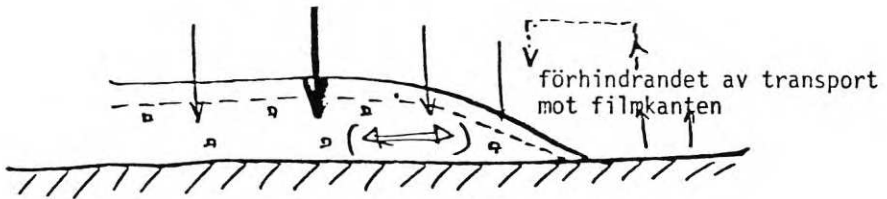


Fig 84:5 ändring av daggpunktstemperaturen av lösningen  
 kondensforcering på lösningen (för-  
 hindrandet av avdunstning)

(.9) Kombinationer av åtgärder enligt (.1) till (.8) är möjliga (tillsammans med en eventuell hållfasthetsförbättring!!!).

### 9:3 Saltextraktion

På grundval av kriterierna i 8:2 kan även metoder (och deras begränsningar) för "fysikaliska" saltextraktioner från materialytor eller materialyttskikt formuleras. (Preliminära försök har utförts.)

### 9:4 Experiment - åtgärder

I en förberedande försöksserie har effekten av dessa behandlingsmetoder testats på olika tegelsorter och även på konstruktionsbetong. Härvid har man kunnat konstatera, att alla uppräknade åtgärder har viss effekt. (Även om hypoteserna är fel, har man i alla fall en vettig modell.)

Vid tegel har införandet av vattenlösliga metallsalter av organiska syror haft den bästa effekten. Dessa salter har resulterat i att daggpunktstemperaturen har höjts, materialet har alltid varit fuktigt, saltvandringarna och motsvarande nedbrytningar har kunnat förhindras.

Några SEM-undersökningar beträffande åtgärders inverkan på de aktuella processerna har tyvärr ej kunnat utföras inom ramen för projektet.

Även nedbrytningsprocessen i gängse frost/tösalttester har kunnat influeras genom dessa åtgärder!!!

På ett enkelt sätt kan effekten av ovan beskrivna åtgärder för att förhindra saltvandringar och saltnedbrytningar åskådliggöras på följande sätt. Härvid används den metod som redogör för saltlösningars vandringsbenägenhet och vilken har beskrivits tidigare (Kap 6:3, Fig 29).

Härvid placeras ett objektglas, stående i en bägare med mättad saltlösning. Vid fukthalter i miljön lägre än saltlösningens



mättnadsfukthalt vandrar saltlösningen på objektglaset uppåt, varvid saltformationer fälls ut. Tillsätter man till saltlösningen preparat som antingen höjer daggpunktstemperaturen eller sänker daggpunktstemperaturen eller preparat som sänker lösningens ytspänning (vätmedel/tensider) eller höjer underlagets ytspänning (hydrofobering) kan man konstatera, att salt-saltvandring enbart uppträder i den koncentrerade "rena" saltlösningen (Fig 85\*).

Motsvarande effekter av dessa åtgärder kan även studeras vid uttorkning av droppar av saltlösningar - saltvandring (eller förhindrad saltvandring) är förutsättning för nedbrytning (eller utebliven nedbrytning) (Fig 86\*, 87\*).



## 10. Hypotesernas användbarhet

### 10:1 Tegelnedbrytning i gamla källarvalv

I gamla källarvalv har i moderna tider och efter det att lokalerna har börjat återanvändas avskalningsskador kunnat konstateras. En förklaring: Efter många år har fukthalten i källarluften stabiliserats på något sätt, i bottten av ett saltskikt och i stora delar av skiktet har luftfuktigheten ställt in sig efter saltlösningars mättnadsfukthalt, dvs mindre än i källaren i övrigt. I rummet har luften varit mättad, dvs har haft 100 % RF. Genom modern användning, det räcker med enstaka dörröppningar, har luften kommit i rörelse med fukthaltsutjämnningar som följd. Luften utanför och i saltformationen har blivit "övermättad" med fukt (dvs den har mindre fukthalt än 100 % RF i luft men större fukthalt än saltlösningens mättnadsfukthalt)! Saltformationerna har svällt (och krympt), tegelmaterialet under saltformationen har spjälkat loss. Det var inte uttorkningen av källaren utan nedfuktning av saltet som leder till nedbrytning av tegelytor.

### 10:2 Tösaltskador

Tösaltskador i betongkantbalkar uppträder inte på vintern utan på våren och sommaren. De uppträder i mindre utsträckning på norrsidan av broar och på skuggsidor. Förklaringen är att konstruktionen är mera fuktig på norrsidan, den torkar aldrig riktigt ut. (Norrsidan borde frysa mera!) Ändringar av saltformationer och förresten bildning av saltformationer uppträder först när lösningsvatten har avdunstat - det sker snabbast på solbelysta södersidor. Har sedan efter uttorkning av en lösningsfilm ett poröst saltskikt bildats, kan genom omkristallisation vid varierande relativa fukthalter (genom temperaturvariationer) betongens bindemedel flagna av i tunna partiklar (början till slutet). Den relativa fuktigheten motsvarande tösalternas mättnadsfukthalt över lösningar är ungefär 70 % RF, dvs denna fukthalt kan utan vidare passeras vid temperaturändringar mellan dag och natt under våren och sommaren. Tösaltfrostsador uppträder paradoxalt nog på sommaren.

### 10:3 Sfinx

Av litteraturuppgifter framgår att Sfinxen faller sönder. Detta har - även detta enligt uppgifter - inte med sandstormar och liknande att göra. Det är känt från litteraturen före sekelskiftet att ökensand vittrar vid fukthaltsvariationer och det största sönderfallet uppträder efter ett i och för sig sparsamt regn.

Förutsättningar:

Stor och öppen porvolym.

Låg hållfasthet i grundmaterialet.

Förekomst av lösningsbara salter (som delmaterial, om de inte har transporterat genom saltvattenaerosoler på något sätt). Det räcker även att de har transporterat i pulverform och avlagrats på ytan.

Transporter och ändringar åstadkommes sedan genom fukthaltsvariationer i luften (dessa borde även förekomma i öknen, åtminstone mellan dag och natt).

## 11. Appendix - Ölandsbron

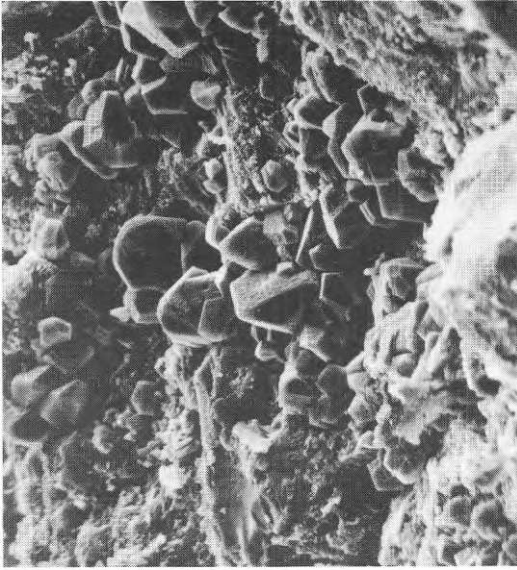
Under slutredigeringen av föreliggande uppsats har det givits tillfälle (C Wannerberg, B Steorn) att undersöka några betongprover från stöden från Ölandsbron, som redan efter 10 års användning uppvisade grava korrosionsskador i betongkonstruktionerna.

I Ölandsbrons pelare har med konventionella analysmetoder kloridhalter med upp till 8 (åtta) % av cementvikten uppmätts. Salterna har kunnat entydigt fastställas i borrhärdar. Saltformationen var massiv i materialets inre någon mm från ytan (Fig 88:1, 89:1). Genom fuktning/uttorkning har dessa salter fått en mera porös struktur som ett första steg i den amorfa strukturen som har kunnat observeras på nedbrytningsprodukter från tölsaltskadade betongytor vid andra broar (Fig 88:2, 89:2).

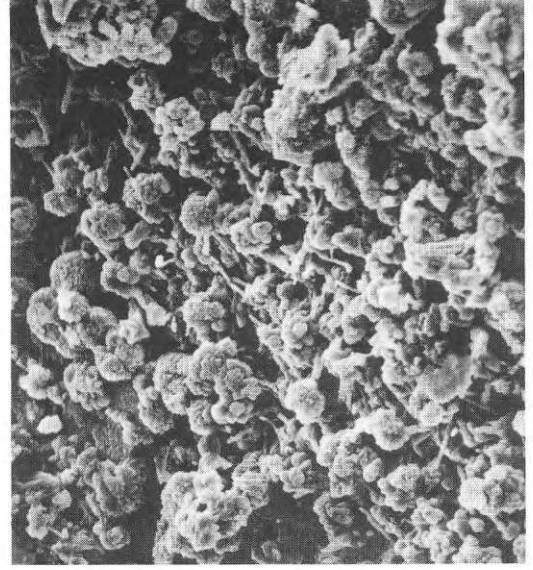
Sedan lösliga salter har tagits bort från brotytan har en grundmaterialstruktur observerats som skiljer sig från icke skadad betong. Materialytan under saltbeläggningen är täckt med nålformiga icke lösliga materialstrukturer (Fig 88:3, 89:3). Från andra utförda försök skulle man kunna dra slutsatsen att dessa nålar är kalk, dvs kalciumhydroxid (gissning). Man kan sedan fundera över om denna omstrukturering av grundmaterialet, som förmodligen är en följd av tölsaltpåverkan, även medför en mekanisk försvagning av betongytan motsvarande kalkurlakningen vid vanlig fuktpåverkan. Eller dessa nålformiga strukturer är ettringitliknande förbindningar som har konstaterats på annat håll (Ref 4:2) (eller båda delarna?)

### Anm:

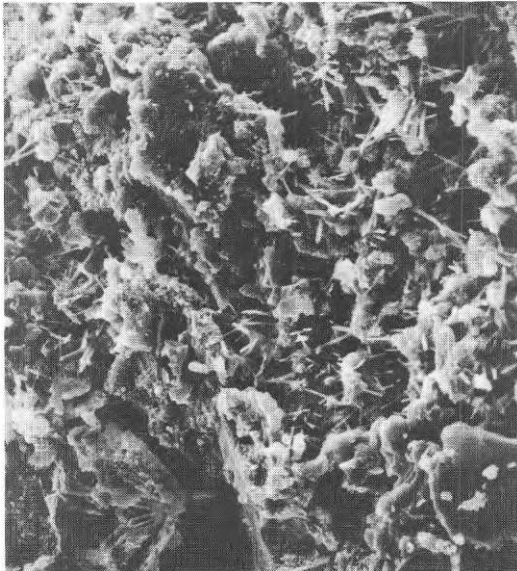
Kloridhalten i det aktuella provet var cirka 4 % av cementvikten. Extremt höga kloridhalter skulle kunna förklaras med att salt har intransporterats i redan skadade partier.



:1 Saltformationer i betong (efter intraspecific transport av lösning och efter uttorkning)



:2 Saltformationer i betong, strukturändringar efter en cykel nedfuktning/uttorkning



:3 Materialyta under saltformation (efter borttagning av vattenlösliga salter), (påbörjad?) strukturändring i grundmaterial efter saltpåverkan?

10  $\mu\text{m}$  

Fig 89 Ölandsbron

Alla tre prover har tagits från en och samma borrhärd med ett inbördes avstånd av några m. Proverna har tagits ca 10 mm från konstruktionsytan.  
SEM: Bengt Hedberg, Chalmers

## 12. Skiss till fortsatt teoretiskt utvecklingsarbete

### 12:1 Konventionella saltsprängningsteorier

Konventionella saltsprängningsteorier förutsätter:

1. Kompletta porfyllnad.
2. Volymökning av porfyllnad.
3. Längdändring i porytan.
4. Sprängning av porväggen.
5. Volymändring av grundmaterialet.

Ett samband består mellan 2 och 5.

### 12:2 Variant av saltsprängningsteori

Skulle man inte kunna formulera en saltvittringshypotes på följande förutsättningar:

1. Mer eller mindre komplett beläggning av porväggen.
2. Ytändring av beläggningen.
3. Längdändring av porytan.
4. Spänningar i porväggen.
5. Volymändring av grundmaterialet.

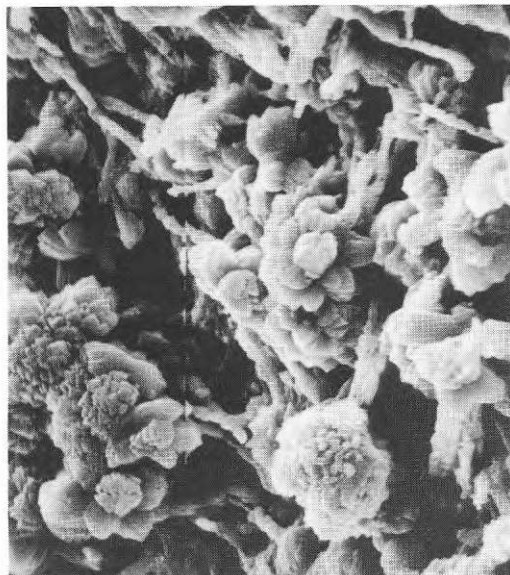
Ett samband föreligger mellan 2 och 5.

Och det är kanske inte omöjligt att formulera hypoteser för sprängning av material genom vatten, som går ut på att det är strukturändringar av fina vattenkristaller i adsorbatskiktet av vatten mot grundmaterialet som åstadkommer avskjuvningar i porväggarna i initialskedet av kristallbildningen eller i initialskedet av avsmältningen.

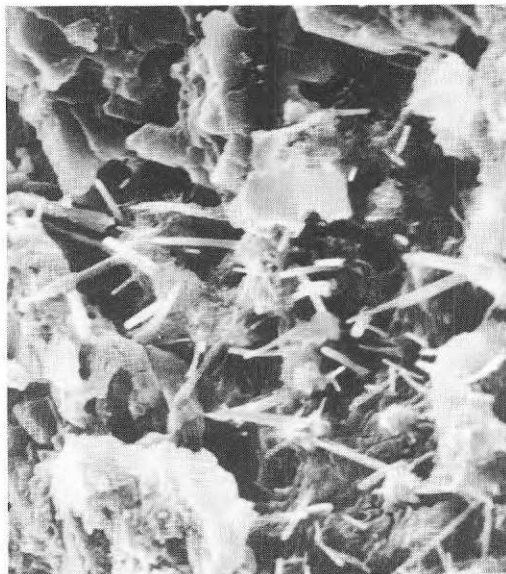
Armeringskorrosion har säkert även en (fukt-)fysikalisk komponent (Fig 90).



:1 Saltformationer i betong (efter intransport av lösning och efter uttorkning)



:2 Saltformationer i betong, strukturändringar efter en cykel nedfuktning/uttorkning



:3 Materialyta under saltformation (efter borttagning av vattenlösliga salter), (påbörjad?) strukturändring i grundmaterial efter saltpåverkan?


3  $\mu\text{m}$  

Fig 90 Ölandsbron

Alla tre prover har tagits från en och samma borrhärna med ett inbördes avstånd av några m m. Proverna har tagits ca 10 mm från konstruktionsytan. SEM: Bengt Hedberg, Chalmers



### 13. Ett axplock ur litteraturen

13:1 Citat (Siffrorna 1-10 hänför sig till motsvarande litteratur angiven i 13:2)

1:1 Förutsättningar för och effekter av saltförekomster i poröst material har varit kända sedan länge och har varit föremål för många systematiseringsförsök.

1:2 Man har i stor utsträckning försökt att förklara nedbrytning av material genom lösningsbara salter med en volymutvidgning eller/och tryck åstadkomna genom maximal porfyllnad mot porväggarna. Någon motsvarande effekt vid volymminskning har inte angetts, fastän den borde vara i samma storleksordning. En mycket elegant sammanfattning över alla tills dags dato kända nedbrytningsmekanismer för natursten har på åtskilliga sidor åstadkommit i en bok av E M Winkler.

"Slutklämmen" i motsvarande kapitel lyder: "A full evaluation of the behaviour of salt in very narrow capillaries is very difficult" och "The process of damage due to moisture, with or without salts, is extremely complex and thus very difficult to analyze quantitatively".

1:3 Även om kunskaper om fuktfixering i salthaltigt poröst material har funnits, så har man betraktat sambandet mellan fukthalt och salthalt ganska statistiskt: Man har i princip observerat tillstånd men inte förlopp.

1:4 Som transportmekanismer - om man överhuvud taget har sysslat med sådana - har man antagit rena kapillärtransporter av lösningar och eventuellt koncentrationsutjämnningar i själva lösningen i fyllda porer genom diffusion.

2 Undersökningar från historiska byggnader från Finland visar, att nedbrytningsprocessen i tegel inte föregås av volymfyllnad, varken med överkoncentrerade lösningar eller massiva saltformationer.

3 Tidigare har det konstaterats, att förvittring av ökensand i närvaro av lösningsbara salter inte kan vara en följd av

porfyllnad eller kapillärt transporterat vatten. För gipshydratbildning av anhydrid krävs det dessutom "geologiska tidsperioder"! Nedbrytning av ökensand sker inte vid uttorkning av saltlösningar utan vid nedfuktning av torra saltbildningar. Koksaltnedbrytningen kan inte förklaras. Egendomligt nog vittrar saltfattig öken snabbare än mycket salthaltig.

- 4:1 En klassisk nedbrytningsmekanism är omvandling av anhydridgips till hydratgips. Man har beräknat stora tryck som uppstår på grund av volymutvidgning av gips. Det finns undersökningar som bevisar, att hydratgipsbildningen, åtminstone i sitt första skede, innebär en volymminskning (om man räknar in vattenvolymen).

Det finns samband mellan saltförekomst och materialbildningsprocesser. Några typiska exempel: Förekomsten av koncentrerade salter, framför allt klorider, förskjuter jämvikten anhydrit-gips mot lägre temperaturer (saltförekomst skulle paradoxalt nog hindra den s k gipsnedbrytningen). Motsvarande gäller - icke oväntat - höga tryck, som i princip skulle innebära, att gipsbildningen hindrar själva gipsbildningen i fulla porer.

Det skulle kunna vara andra mekanismer som styr saltnedbrytning. Det behöver inte vara masiva mer eller mindre ideala kristaller och lösningar som resulterar i saltnedbrytning.

- 4:2 Ett annat intressant fenomen har observerats i konstruktionsbetong, varvid förekomsten av koksalt/tösalt befrämjar bildandet av ettringitliknande strukturer (komplexsalter).

- 5 Man har konstaterat, att salter i mycket små utrymmen kristalliserar i ytterst porösa formationer. Det skulle kunna vara dessa formationer som skulle ha ett verkningssätt som förklarar vissa typer av saltnedbrytning.
- 6 Det är inte en hög saltkoncentration som resulterar i saltnedbrytning utan en specifik koncentration. På amerikanska ostkusten står ett fyrtorn som har byggts med saltvattenbetong och som har stått i en atmosfär av saltvattenaerosoler i hundra år utan den minsta skada.

- 7 Man har även ansett sig kunna konstatera, att nedbrytning av högkvalitativ konstruktionsbetong genom vägsalt/kalciumklorid (som frysskydd) inte har med frysningsprocessen att göra och inte heller med maximalkoncentrationen i motsvarande lösningar. Kalciumkloridnedbrytning av betong sker vid plusgrader och under maximalkoncentration av saltlösningen.
- 8 Man har kunnat konstatera, att saltlösningar har ett annat termodynamiskt verkningssätt än vatten. Detta beteende skulle kunna vara orsaken till vissa nedbrytningsmekanismer.
- 9 Det finns modeller för kritiska sluttillstånd (hur detta sluttillstånd uppkommer tiger hypotesen om) som anger trycket i en komplett porfyllnad som resultat av verkningssättet av adsorbatskiktet mellan grundmaterial och porfyllnad (fros-  
tsprängning av vattenfyllt material). Det skulle inte vara omöjligt att konstruera modeller för saltnedbrytning som har beteendet av ett adsorbatskikt mellan en porfyllnad (helst en partiell sådan eller ingen fyllnad alls) och ett substrat som primärförutsättningar. (Förekommer förresten inte volym-  
utvidgning av vätskemättat poröst material vid frysning när vätskan undergår en volymminskning vid frysningen?)
- 10 Det borde inte vara svårt att kunna konstruera en modell för materialnedbrytning baserad på verkningssättet av ett adsorbatskikt. Även i verkligheten förekommer bildandet av nedbrytningsprodukter (eller material som leder till nedbrytning) i form av ett adsorbatskikt: Bildandet av salhydrater (till exempel gips eller andra sulfater på bl a annat material) kan ske direkt och utan omvägen över anhydritformer, dvs nedbrytningen kan inte vara en omvandlingsprocess till och från salhydrater.

13:2 Referenser (Punktbeteckningarna i detta kapitel korresponderar med punkt-beteckningarna i kapitel 13:1 Citat)

- 1:1 R J Schaffer, The weathering of natural building stones, Building Research Report 18, London 1932.
- 1:2 E M Winkler, Stone: Properties durability in man's environment, Springer 1975.
- 1:3 B Vos, E Tammes, Moisture and moisture transfer in porous materials, Delft 1969.
- 1:4 P Samuelson, Kalkutfällningar på betongytor, BFR R3:1977.
- 2 Th Perander, Suomenlinnan Tenalji von Fersenin Rakenuuksen Tiulukirien Rapantuminen.
- 3 H Mortensen, Die "Salzsprengung" und ihre bedeutung für die regional-klimatische Gliederung der Wüsten, Dr A Petermanns Mitteilungen aus Justus Perthes Geografischer Anstalt Gotha 1933.
- 4:1 H C Einfald, Umwandlung von Anhydrid in Gips - Mechanismus und Einflussfaktoren, Bericht H.NAT. Tag Ingenieursgeologie, Fellbach 1979.
- 4:2 A Volkweind, Ettringit-ähnliche Phasen in stark chloridhaltigem, altem Zementstein und Beton, TIZ-Fachberichte 9/79.
- 5 K Obenauer, Die Ausblühung als kapillarräumlich bedingte Form kristalliner Aggregate, Vortrag vor der westdeutschen Bezirksgruppe der DKG, 1941.
- 6 W J McCoy, Significance of tests and properties of concrete and concrete making materials, kapitel 43, ASTM 1978.
- 7 L Berntsson, S Chandra, Damage of concrete sleepers by calcium chloride, Pergamon Press 1982.
- 8 H Klopfer, Wassertransport durch Diffusion in festen Stoffen, Bauverlag 1974.

- 9 Max I Setzer, Einfluss des Wassergehalts auf die Eigenschaften des erhärteten Betons, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 280.
  
- 10 H Kollman, G Strübel, Untersuchungen über Ausblühungen und Treiberscheinungen durch Sulfate, Betonwerk + Fertigteil 1979:10, 11, 12.



#### 14. FÄRGBILDER bilaga





Fig 1 Saltskador i kalkade tegelvalv, Sveaborg, Finland (ThP)



Fig 2 Saltskador i modern betongbro, Stockholm (B Steorn)



Vatten    Kalkvatten    Vatten + koksalt    Kalkvatten + koksalt

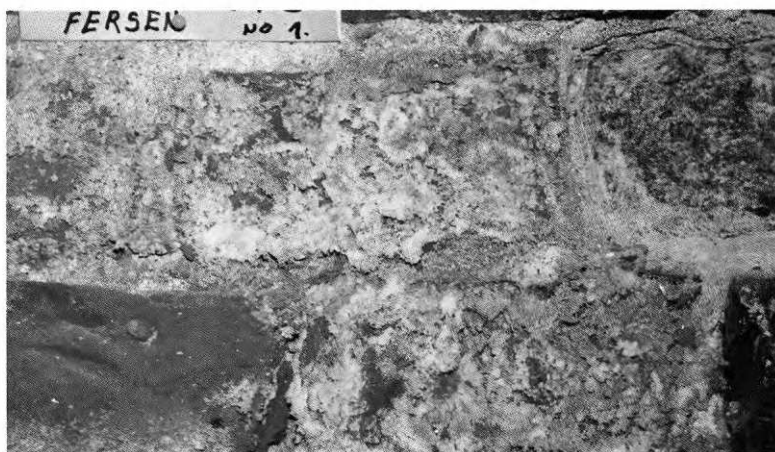
Fig 3 Volymändringar vid frysning



:1 Modernt  
industritegel



: 2 1600-talstegel,  
Sveaborg, Finland  
(ThP)



:3 Saltbelägning  
tegel, Tavastehus  
(ThP)

Fig 5 Saltnedbrytning



vid 95 % RH



vid 70 % RH

Markerad salt-  
bildning vid  
45 % RH

Fig 7 Uttorkning av saltlösning ur tegelprover (dubblettprov vid mättnadsfukthalt under glas) (ThP)



vid 95 % RH

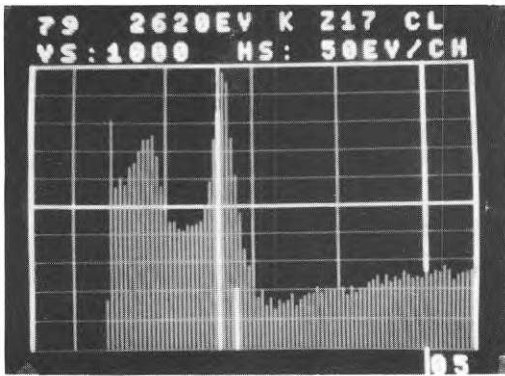
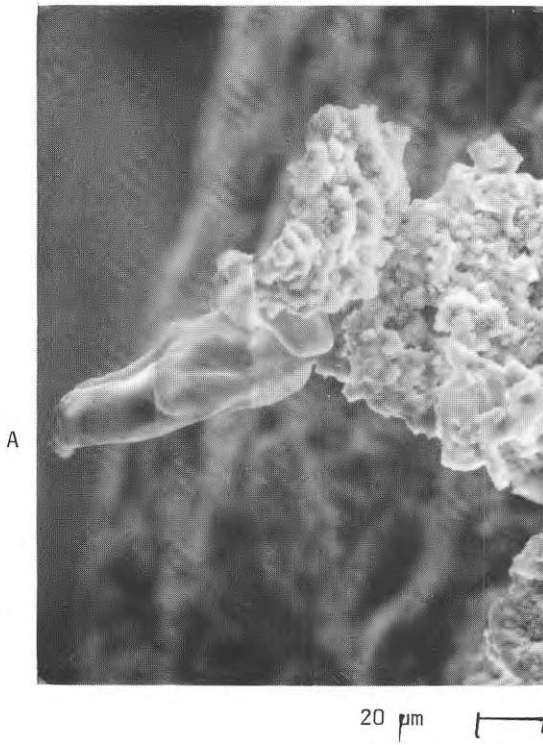


vid 70 % RH



Markerad salt-  
bildning vid  
45 % RH

Fig 8 Uttorkning av saltlösning ur tegelprover, blandsalter (ThP)



A Kisel Calcium

Fig 11 Partikel i ickelösligt material på "toppen" av en saltformation av koksalt

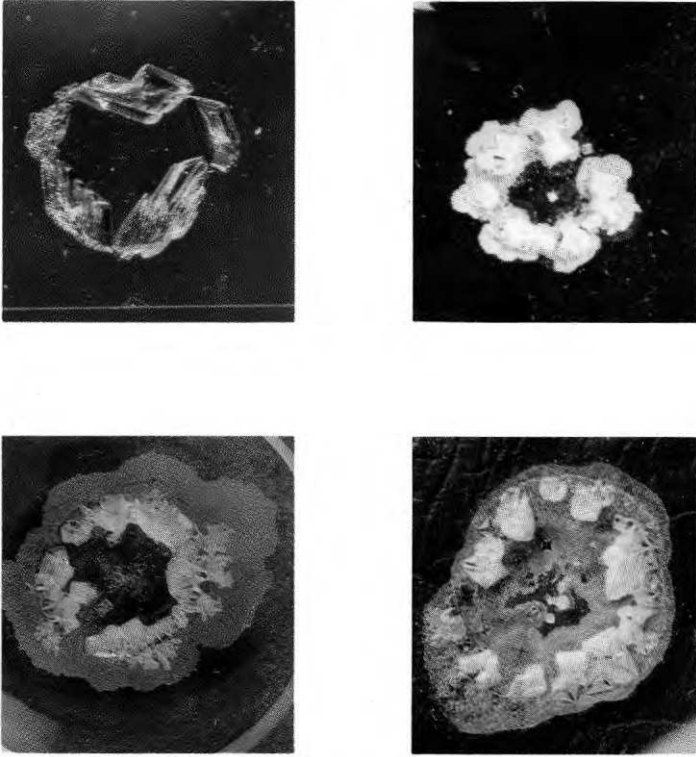
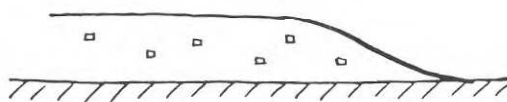
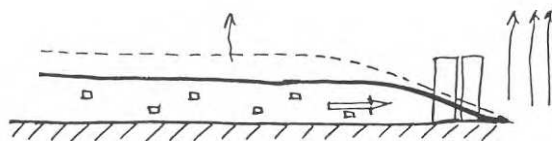


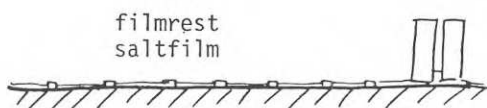
Fig 18 Saltformationer vid uttorkning av filmer (droppar)



saltlösningsfilm



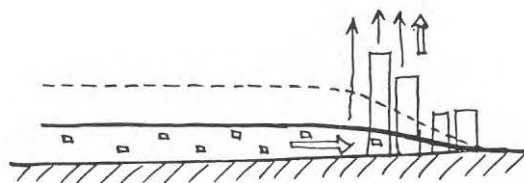
uttorkning av film-  
kanten  
Bildande av saltfor-  
mationer



saltformation



nyttillförsel av  
saltlösnings  
reducerad uttork-  
ningshastighet utan-  
för filmkanten på  
grund av saltkon-  
centration.



salttillväxt innan-  
för ursprunglig  
randzon i riktning  
mot största fukt-  
haltsgradienten



Fig 23 Salttillväxt vinkelrätt mot substratet (vid snabb ut-  
torkning och/eller begränsad nyttillförsel av saltlösnings)





Fig 27 Saltbildning och saltvandring i utrymmen med labila fukt- och temperaturförhållanden (från lösningsmenisken)



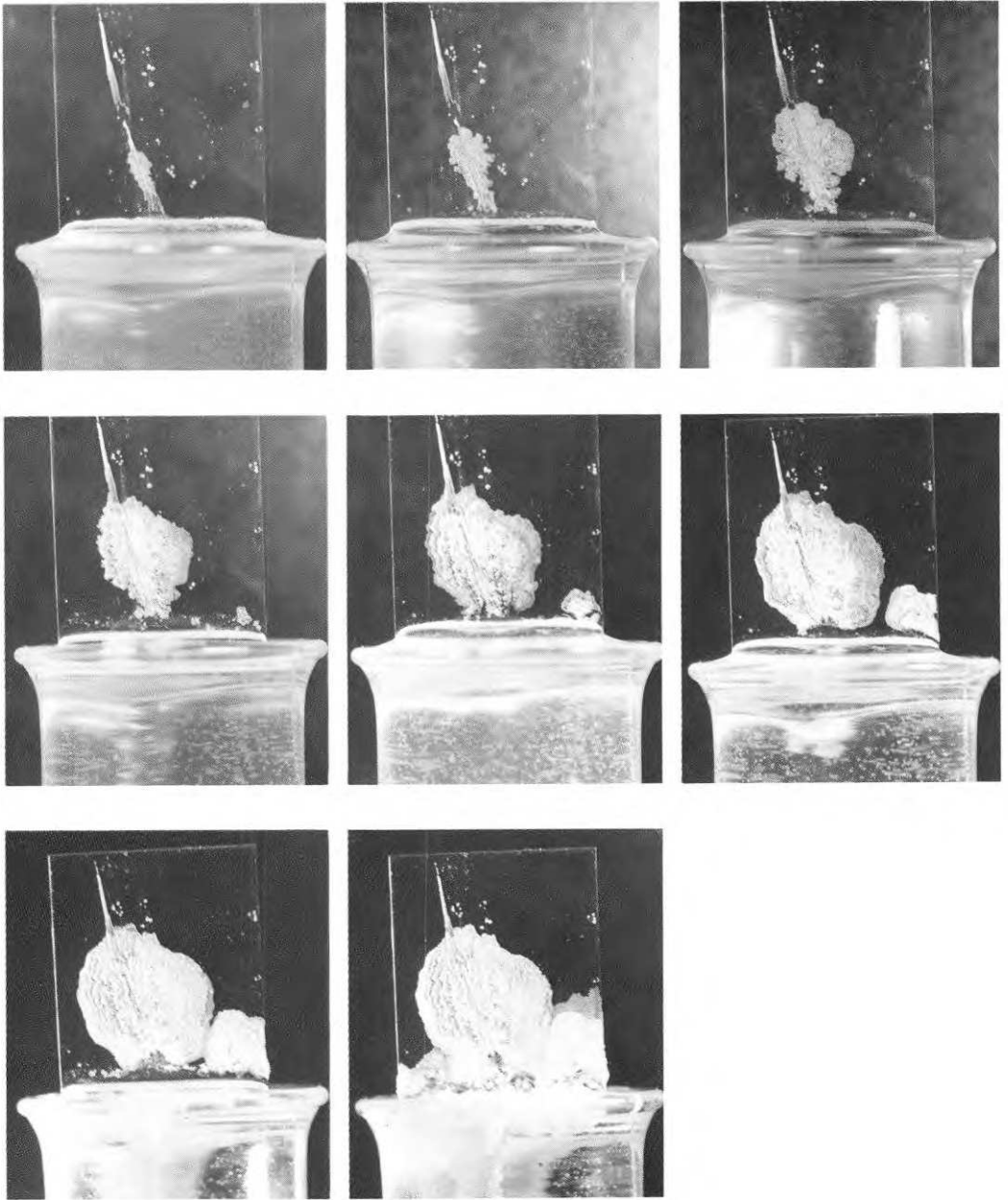


Fig 28 saltvandring på vertikal glasyta (objektglas)

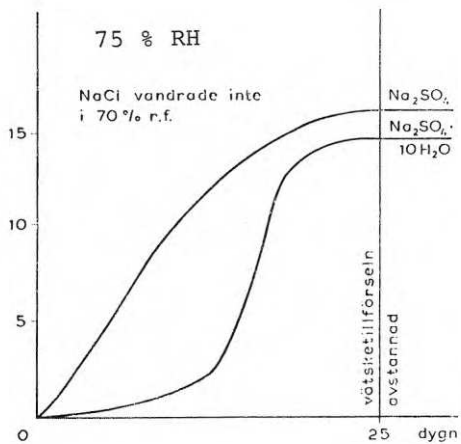
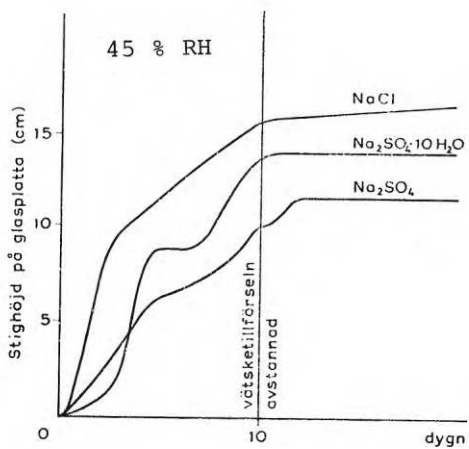
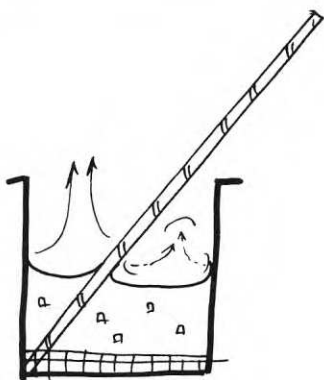
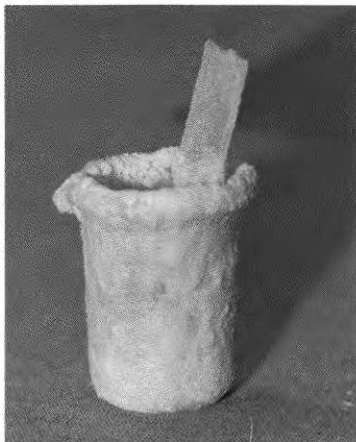
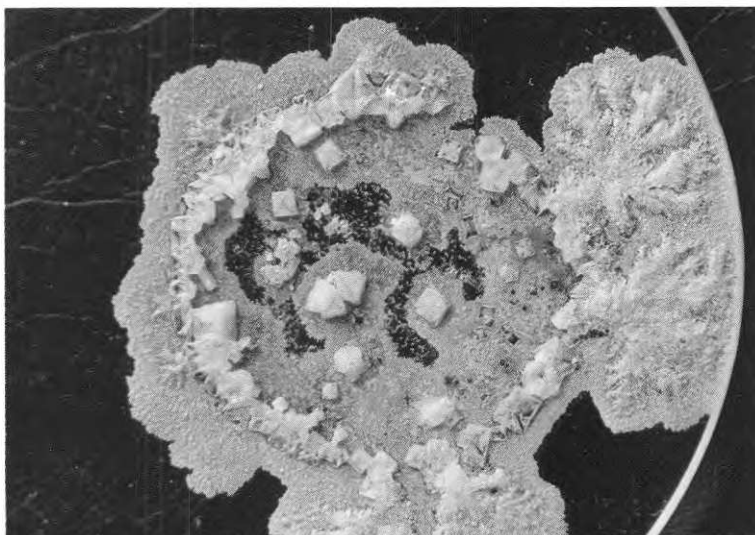


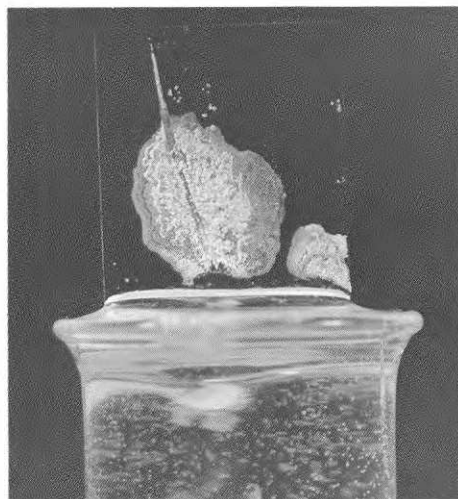
Fig 29 Saltvandring på vertikala glasytor (ThP)



:1 Ur saltlösningsdroppe

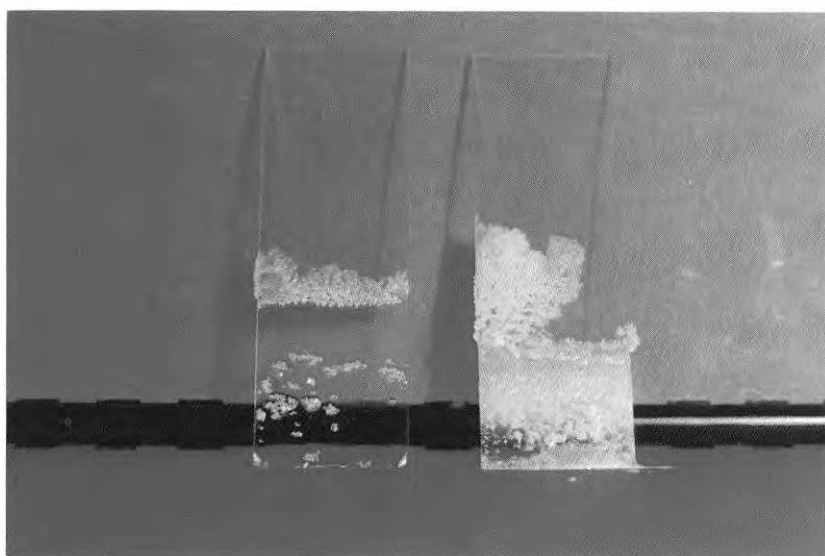
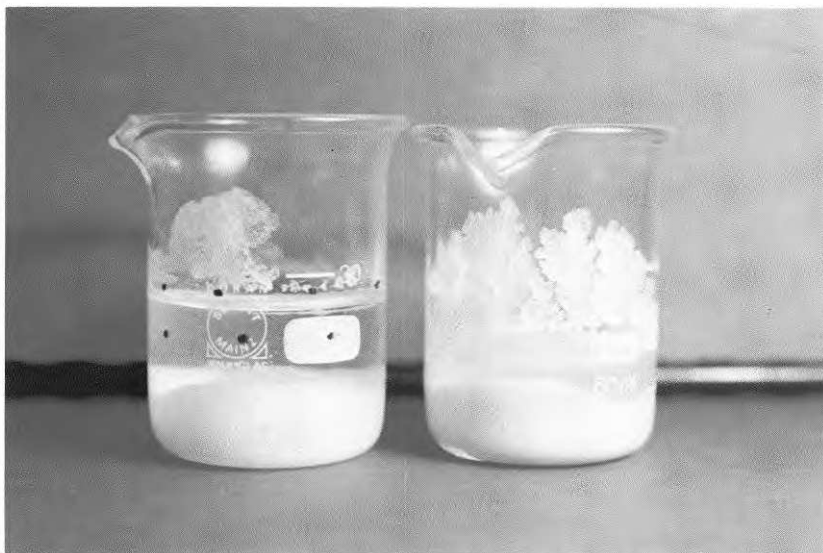


:2 På vertikal yta ur  
lösningmenisk



:3 På horisontell yta ur  
lösningmenisk

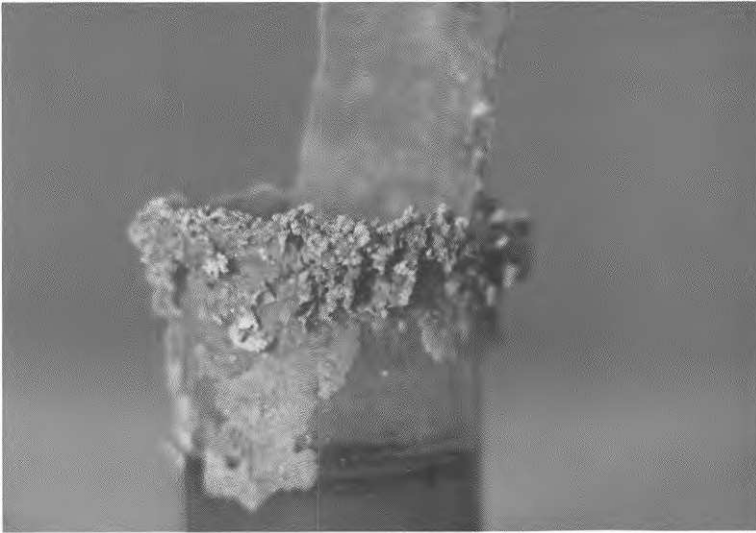
Fig 30 Saltvandring i etapper



:1 Neutral lösning

:2 Alkalisk lösning

Fig 35 Saltvandring och saltstruktur



Avskjuvning av konvex saltformation från bågarens ytteryta vid uttorkning



Avskjuvning av konkav saltformation från bågarens inneryta vid nedfuktning

Fig 47 Avskjuvning av saltfilmen vid fukthaltsändringar



Fig 50 Avflagnig av tegelyta vid torkning och nedfuktning av saltfilmer (koksalt)

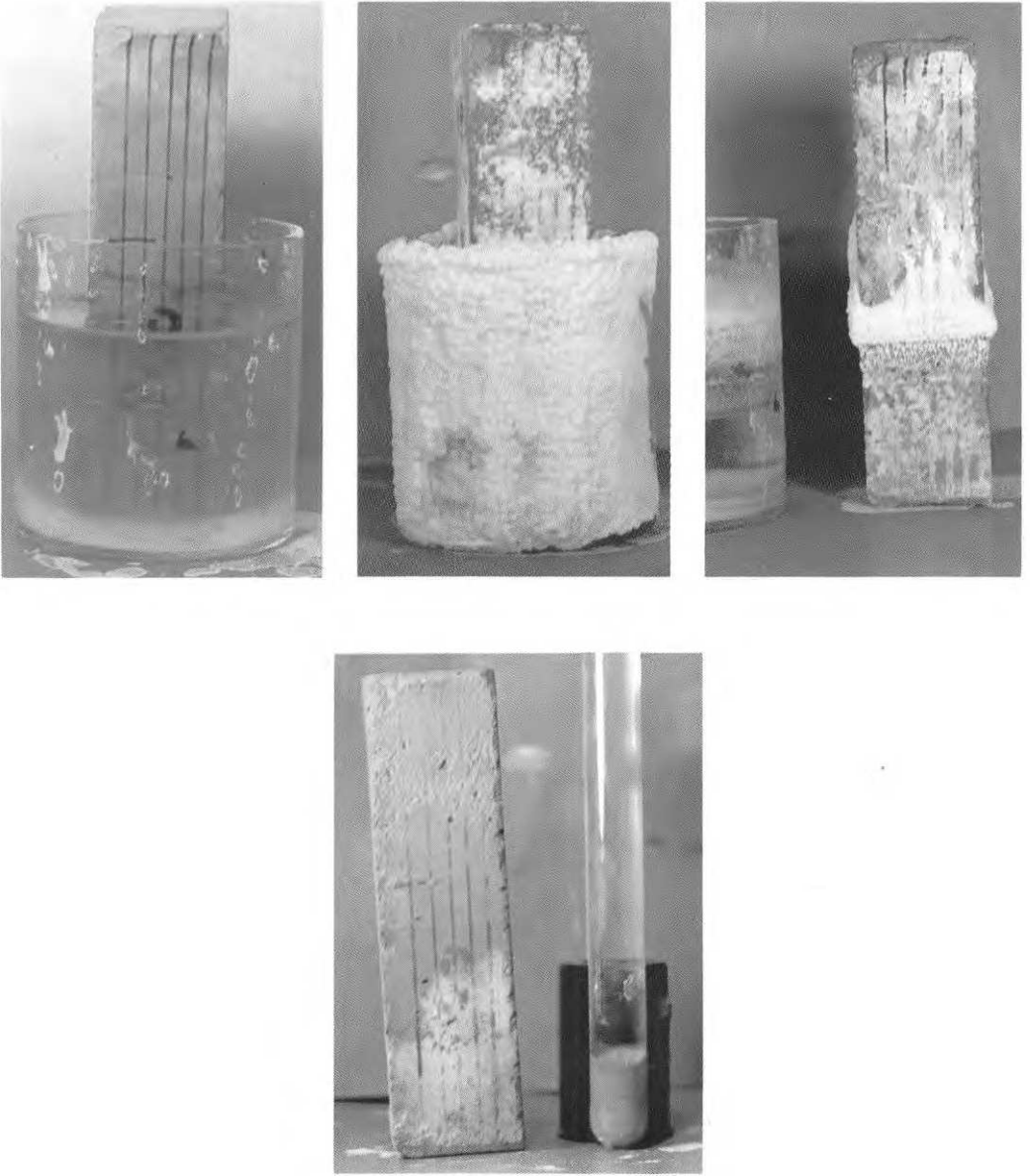
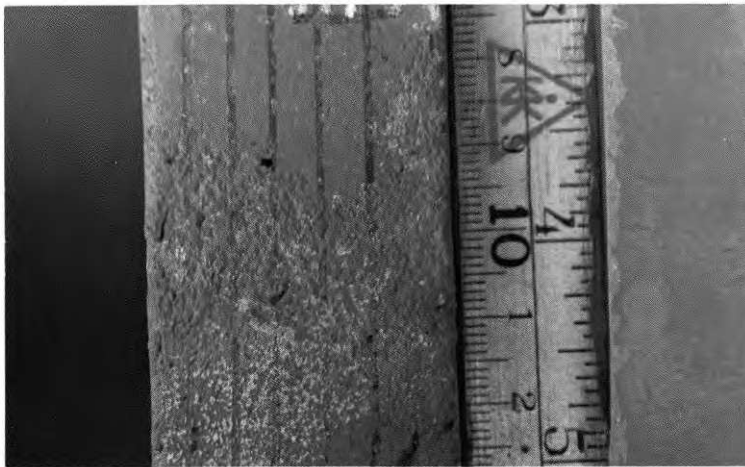
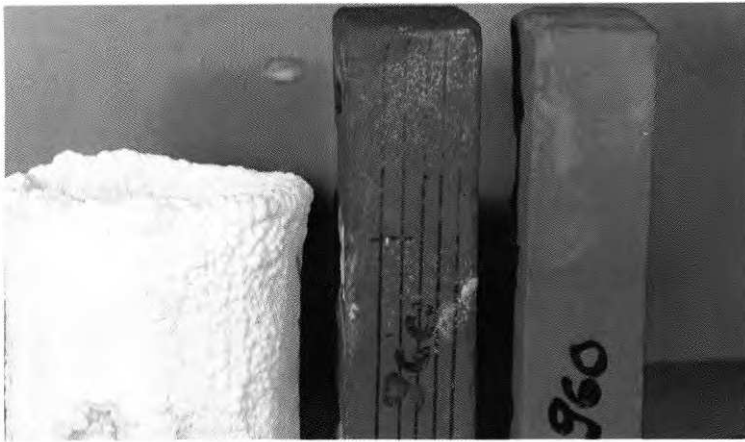
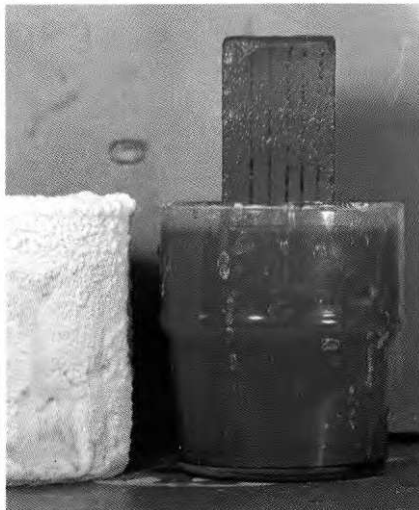


Fig 52 Nedbrytning av modernt industritegel, saltvandring -  
uttorkning - nedfuktning i 5 cykler





Jämförelse med  
nytt tegel



Suspension av tegelpartiklar efter  
nedfuktning av saltstrukturen

Fig 53 Nedbrytning av modernt fasadtegel genom koksalt vid rumstemperatur



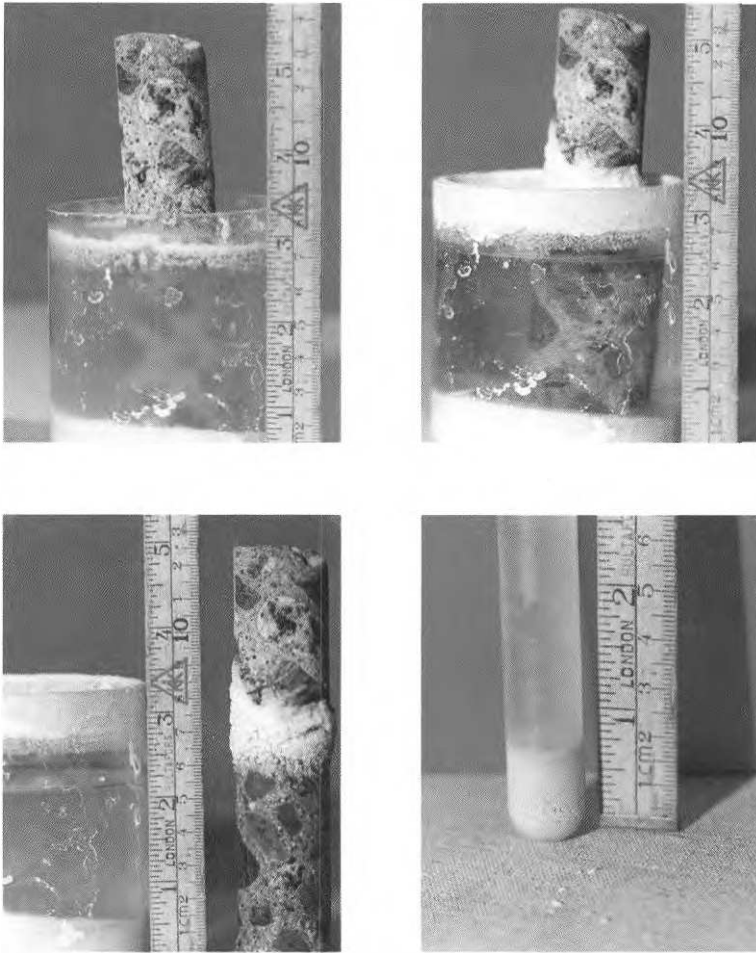
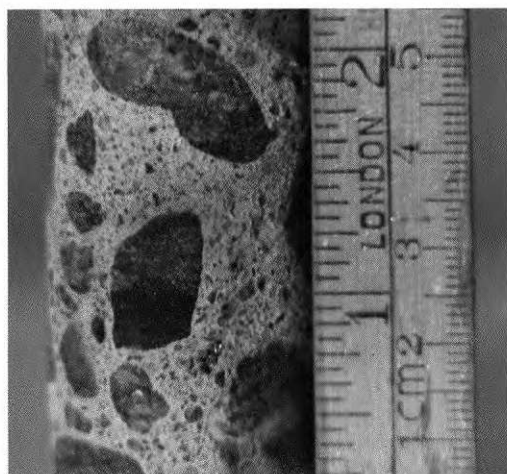
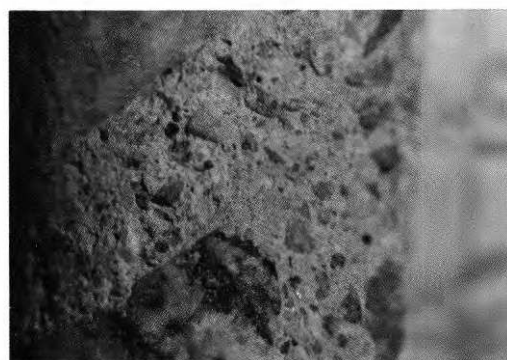


Fig 55 Nedbrytning av borrkärna ur modern konstruktionsbetong  
Saltvandring - torkning - nedfuktning - nedbrytning i  
25 cykler

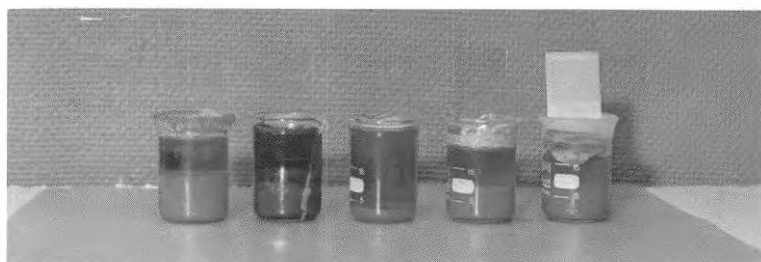


Detalj i icke skadad zon  
(placerad i lösningen)



Detaljer skadad zon  
(placerad i lösningens  
menisker)

Fig 56 Koksaltangrepp på borrkärna av konstruktionsbetong efter 25 saltangreppscyklar



:5 :4 :3 :1 :2



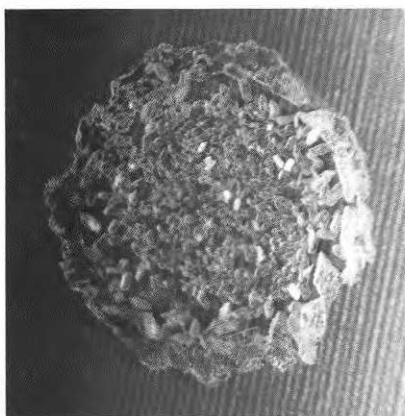
:5 :4 :3 :1 :2



:5 :4 :3 :1 :2

Fig 85 Saltvandring vid olika åtgärder

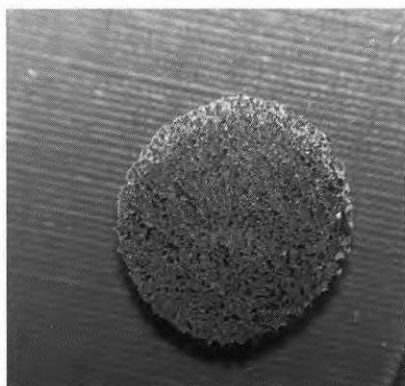
- |                                 |                                  |
|---------------------------------|----------------------------------|
| :1 Sänkning ytspänning          | :4 Sänkning daggpunktstemperatur |
| :2 Höjning gränsspänning        | :5 Nollprov                      |
| :3 Höjning daggpunktstemperatur |                                  |



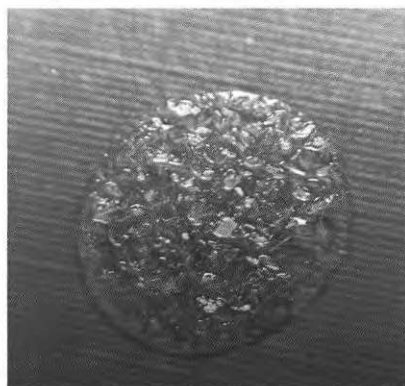
:1



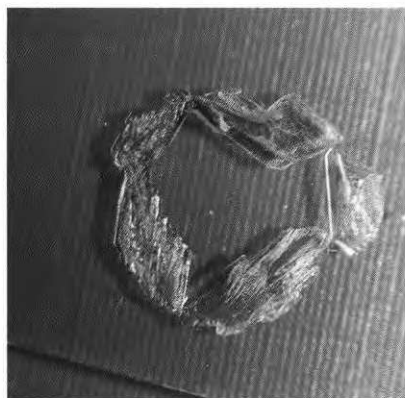
:2



:3



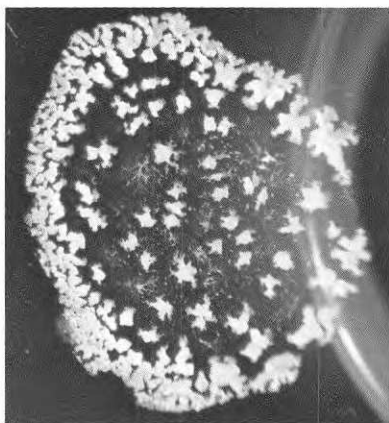
:4



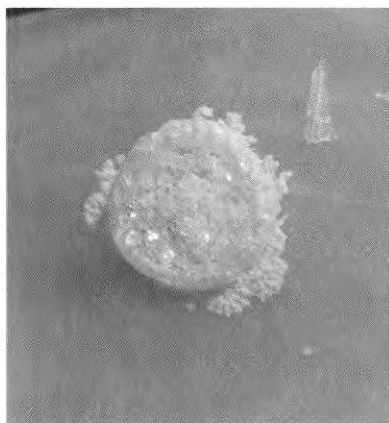
:5

- :1 Sänkning ytspänning
- :2 Höjning gränsspänning
- :3 Höjning daggpunktstemperatur
- :4 Sänkning daggpunktstemperatur
- :5 Nollprov

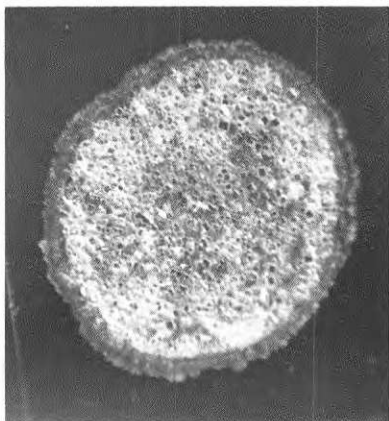
Fig 86 Uttorkning av saltlösningssdroppe (koppersulfat)



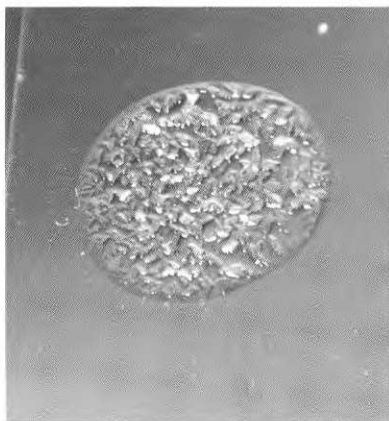
:1



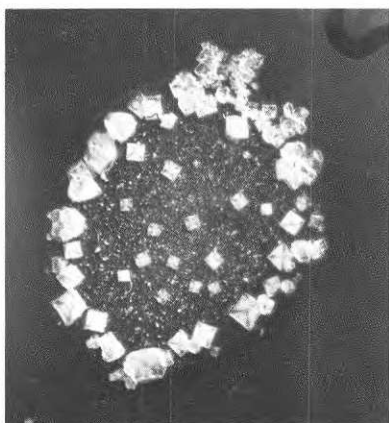
:2



:3



:4



:5

- :1 Sänkning ytspänning
- :2 Höjning gränsspänning
- :3 Höjning daggpunktstemperatur
- :4 Sänkning daggpunktstemperatur
- :5 Nollprov

Fig 87 Uttorkning av saltlösningdroppe (koksalt)



Kloridrostbildning (koksalt)  
Utan åtgärder

Åtgärder  
Utan kloridrostbildning  
(koksalt)



Kloridrostbildning (koksalt)  
Utan åtgärder

Åtgärder  
Utan kloridrostbildning  
(koksalt)

Fig 88 Saltformationer - fysikaliska rostbildningsprocesser



**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag  
800508-3 från Statens råd för byggnadsforskning  
till Josef Pühringer Innovationskonsult, Stockholm.**

**R22:1983**

**ISBN 91-540-3892-8**

**Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm**

**Art.Nr: 6700722**

**Abonnemangsgrupp:  
Z. Konstruktioner och material**

**Distribution:  
Svensk Byggtjänst, Box 7853  
103 99 Stockholm**

**Cirka pris: 50 kr exkl moms**