



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

R56:1989

Ventilationsvärmväxlare i kustklimat

Fältprov i göteborgsområdet

Ove Strindehag
Ingmar Josefsson

INSTITUTET FÖR
BYGGDOKUMENTATION

Adnr

Plac *Sev*

R/TL

BYGGDOK

Institutet för byggdokumentation
Hälsingegatan 49
113 31 Stockholm, Sweden
Tel 08-34 01 70
Telex 125 63. Telefax 08-32 48 59

Byggeforskningsrådet

R56:1989

VENTILATIONSVÄRMEVÄXLARE I KUSTKLIMAT

Fältprov i göteborgsområdet

Ove Strindehag
Ingmar Josefsson

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag
821143-2 från Statens råd för byggnadsforskning
till Fläkt Evaporator AB, Jönköping.

REFERAT

I denna rapport redovisas en undersökning av hur olika ventilationsvärmväxlare påverkas av korrosiv uteluft, speciellt på platser med kustklimat. Korrosionsproblemen har härvid i första hand undersökts genom fältprov med värmväxlare i två befintliga ventilationsanläggningar i centrala Göteborg. I den ena anläggningen har ett värmeåtervinningssystem med lamellrörsvärmväxlare provats, medan roterande värmväxlare provats i den andra.

Efter 5 års drift uppvisar de provade värmväxlarna inga korrosionsangrepp av betydelse för växlarnas funktion. Av de laboratorieundersökningar som utförts framgår dock att det på samtliga värmväxlare finns mer eller mindre tydliga korrosionsangrepp. Det har härvid konstaterats att filtrering av uteluften reducerar korrosionsangreppen högst avsevärt.

Parallellt med fältproven har en uppföljning av några värmväxlarinstallationer skett på platser med inlandsklimat. Efter 5-7 års drift har inga, eller i ett fall högst obetydliga, korrosionsangrepp kunnat iakttas. På platser med inlandsklimat är det därför tveksamt om man från korrosions-synpunkt behöver skydda värmväxlare genom filtrering av uteluften.

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

Denna skrift är tryckt på miljövänligt, oblekt papper.

R56:1989

ISBN 91-540-5049-9

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm
Svenskt Tryck Stockholm 1989

INNEHÅLL

SAMMANFATTNING		4
1	INLEDNING	7
2	PROVENS UPPLÄGGNING	9
2.1	Val av provvärmväxlare	9
2.2	Provanläggningar i Göteborg	11
2.3	Referensanläggningar	14
3	UPPFÖLJNING AV FÄLTPROV	19
3.1	Fältprovets omfattning	19
3.2	Inspektioner vid provanläggningar	20
3.2.1	Provanläggning I	20
3.2.2	Provanläggning II	21
3.3	Inspektioner vid referensanläggning	23
3.3.1	Referensanläggningar i Jönköping	23
3.3.2	Referensanläggningar i Östersund	23
3.4	Fortsatta prov	24
4	LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR	25
4.1	Analysmetoder	25
4.2	Resultat efter 1/2 års drift	26
4.3	Resultat efter 1 års drift	26
4.4	Resultat efter 3 års drift	28
4.4.1	Provanläggning I	28
4.4.2	Provanläggning II	29
4.5	Resultat efter 5 års drift	30
4.5.1	Provanläggning I	30
4.5.2	Provanläggning II	31
4.6	Analys av stoft på luftfilter	33
5	LUFTKVALITET PÅ PROVPLATSER	57
5.1	Göteborg	57
5.2	Jönköping	59
5.3	Östersund	59
6	SLUTSATSER	63
BILAGA 1	Noteringar vid inspektioner av provanläggning I	67
BILAGA 2	Noteringar vid inspektioner av provanläggning II	70
BILAGA 3	Noteringar vid inspektioner av referensanläggningar	73
LITTERATUR		75

SAMMANFATTNING

Den genomförda undersökningen har avsett att klarlägga hur olika ventilationsvärmväxlare påverkas av korrosiv uteluft, speciellt på platser med kustklimat. Korrosionsproblemen har härvid i första hand undersökts genom fältprov med värmväxlare i två befintliga ventilationsanläggningar i centrala Göteborg. Parallellt med dessa fältprov har en uppföljning av några värmväxlarinstallationer skett på platser med inlandsklimat.

Fältproven i Göteborg har pågått under en tid av 5 år. Under hela provperioden har de olika värmväxlarna inspekterats med två månaders intervall. Minst en gång per år har dessutom provbitar tagits för analys på laboratorium. Dessa laboratorieundersökningar har utförts vid Inst. för oorganisk kemi, Chalmers Tekniska Högskola.

Två olika slag av värmväxlare, samt flera varianter av dessa, har undersökts vid provanläggningarna i Göteborg. I den ena anläggningen har ett vätskekopplat värmeåtervinningssystem med tre olika lamellrörsvärmväxlare provats, medan roterande värmväxlare av olika utföranden provats i den andra. Hur filtrering av uteluften påverkar korrosionsförloppen har studerats vid båda anläggningarna.

Den lamellrörsvärmväxlare som provats i det vätskekopplade värmeåtervinningssystemet är uppdelad i sektioner. Sektionerna utgörs av en värmväxlare i standardutförande (kopparrör och aluminiumlamell), en värmväxlare med epoxilackerad lamell och en värmväxlare helt i koppar. Lamellrörsvärmväxlarna har tolv rörader och lamelldelningen 2,2 mm. De har installerats på sådant sätt att den ena halvan av var och en av värmväxlarna genomströmmas av filtrerad uteluft och den andra av ofiltrerad. Det filter som använts är ett finfilter av klass F45.

Vid fältproven med roterande värmväxlare har sektoruppdelade rotorerna använts. Därigenom har det varit möjligt att i en och samma värmväxlare prova flera rotorutföranden. Tre sådana rotorerna har undersökts i provanläggningen vid olika filtrering av uteluften: en rotor har provats utan filter, en med grundfilter av klass G85 och en med finfilter av klass F45.

Av de fyra sektorerna i var och en av de provade rotorerna är två i icke-hygroskopiskt utförande och två i hygroskopiskt med ytskikt av aluminiumoxid. I en av de icke-hygroskopiska sektorerna i varje rotor är aluminiumbanden epoxilackerade, medan den ena av de hygroskopiska sektorerna är försedd med kantskydd av lack. Varje rotor är dessutom försedd med minst ett cylinderformat rotorelement som lätt kan tas ut för analys.

Efter 5 års drift uppvisar de provade värmeväxlarna inga korrosionsangrepp av betydelse för växlarnas funktion. De laboratorieundersökningar som utförts med bl a svepelektronmikroskop har dock visat att det på samtliga värmeväxlare finns mer eller mindre tydliga korrosionsangrepp. Ett klart samband mellan stoftbeläggning och korrosion har härvid konstaterats. Av den anledningen har filtrering av uteluften visat sig kunna reducera korrosionsangreppen högst avsevärt.

Såväl stoftbeläggning som korrosionsangrepp är i samtliga fall i hög grad koncentrerade till värmeväxlarnas fronttytor. Att förse värmeväxlare av aluminium med ett kantskydd har därför visat sig vara ett effektivt sätt att minska korrosionsriskerna. Med hänsyn till de måttliga korrosionsproblemen som konstaterats vid fältproven kan det däremot knappast anses motiverat att skydda hela värmeväxlarytan med exempelvis ett lackskikt. Ej heller tycks det finnas anledning att i värmeväxlare välja mer beständiga, och dyrare, material än aluminium. Filtrering av uteluften torde i allmänhet vara en tillräcklig åtgärd för att skydda aluminiummaterialet även i besvärliga kustklimat.

De korrosionsprodukter som bildats på de provade värmeväxlarna har analyserats med hjälp av energidispersiv röntgenspektroskopi. Analyserna visar att korrosionsprodukterna innehåller både svavel och klor, vilket tyder på att uteluftens innehåll av svaveldioxid och havssalt har orsakat korrosionsangreppen. En samverkande effekt av dessa föroreningar kan antas ha lett till ökad korrosionshastighet.

Att korrosionsproblemen är betydligt lindrigare i inlandsklimat än i kustklimat har framkommit i samband med den uppföljning som skett av referensanläggningar med vätskekopplade och roterande värmeväxlare i Jönköping och Östersund. Efter 5-7 års drift har inga, eller i ett fall högst obetydliga, korrosionsangrepp kunnat iakttas vid dessa anläggningar. På platser med inlandsklimat är det därför tveksamt om man från korrosionssynpunkt behöver skydda värmeväxlare genom filtrering av uteluften.

1 INLEDNING

Att återvinna värme ur ventilationsluft är numera mycket vanligt i nära nog alla slag av byggnader. För detta ändamål finns ett flertal olika typer av värmeväxlare att tillgå. Vanligtvis kan man räkna med mycket lång brukstid för dessa värmeväxlare, utom vid installation i vissa industrilokaler. Frånluftens halt av stoft och korrosiva gaser kan här kraftigt reducera en värmeväxlares livslängd. Problemet att återvinna värme ur korrosiv frånluft har behandlats bl a i BFR-rapporten R70:1982 (Strindehag et al, 1980).

Sedan ett antal år tillbaka har ytterligare ett korrosionsproblem uppmärksammats i samband med värmeåtervinning i ventilationssystem. Problemet har uppträtt även i lokaler med förhållandevis ren frånluft, t ex i kontorslokaler och sjukhus. Förklaringen till korrosionsproblemet ifråga är att uteluften på vissa platser har så hög halt av svaveloxid att materialet i värmeväxlarna angrips. I Sverige har korrosion av värmeväxlare i första hand uppmärksammats på västkusten. Detta sammanhänger av allt att döma med att uteluften i kustklimat även innehåller en betydande mängd havssalt, vilket tycks öka korrosionshastigheten.

De värmeväxlare som används för värmeåtervinning i ventilationssystem är oftast utförda av aluminium. Detta gäller samtliga de fyra vanligaste huvudtyperna av värmeväxlare, nämligen vätskekopplade, roterande, tvåfas och luft/luftvärmeväxlare. I vätskekopplade värmeväxlare och värmeväxlare med tvåfasmedium ingår dessutom koppar. De korrosionsskador på värmeväxlare som rapporterats från svenska västkusten gäller i första hand aluminium. Uteluftens höga halt av svavelföreningar tycks dock medföra problem även då det gäller värmeväxlare av icke-metalliska material, t ex roterande värmeväxlare av asbest, vilka tidigare var mycket vanliga.

Föreliggande undersökning har avsett att genom fältprov i göteborgsområdet klarlägga korrosionsriskerna för ventilationsvärmeväxlare i kustklimat. I första hand har värmeväxlare av aluminium provats, men jämförelser med koppar och rostfritt stål har också gjorts. Olika ytskyddande beläggningar för värmeväxlare av aluminium har även undersökts. Möjligheten att minska risken för korrosion genom att med hjälp av filter rena luften från fasta partiklar har dessutom ingående studerats.

Parallellt med fältproven i Göteborg har en uppföljning av värmeåtervinningssystem med vätskekopplade och roterande värmeväxlare även skett på platser med inlandsklimat. Dessa jämförande undersökningar har genomförts i två ventilationsanläggningar utanför

Jönköping och två anläggningar i, respektive i närheten av Östersund. Anläggningarna ifråga togs i drift mindre än ett halvår innan fältproven i Göteborg startade, utom en anläggning som togs i drift ytterligare ca ett år tidigare.

Under de fem år som fältproven pågått har ett stort antal inspektioner gjorts på de olika provplatserna. Eventuella korrosionsangrepp på olika värmväxlare har härvid ofta kunnat bedömas direkt på plats, men vid ett flertal tillfällen har provbitar tagits av värmväxlarmaterialet för analys på laboratorium. Dessa laboratorieundersökningar av korrosionsangreppens omfattning har i samtliga fall genomförts vid Inst. för oorganisk kemi, Chalmers Tekniska Högskola.

Arbetet inom projektet har fortlöpande följts av den styrgrupp som tillsatts i samråd med BFR. Denna har bestått av:

- Ing. Sven Andersson, Fastighetskontoret, Malmö
- Tekn.lic. Tord Larsson, RNK Installationskonsult AB, Göteborg
- Prof. Nils-Gösta Vannerberg, EKA Nobel AB, Surte
- Tekn.lic. Olle Wallin, Avd. för installations-teknik, KTH, Stockholm

I ett tidigt skede av projektet ingick även ing. Kaj Hansson och civ.ing. Fredrik Norin i styrgruppen som representanter för RNK Installationskonsult AB.

Det omfattande analysarbete som varit en viktig del av undersökningen har till stor del utförts av fil.dr. Gunnar Johansson, Inst. för oorganisk kemi, CTH.

2 PROVENS UPPLÄGGNING

2.1 Val av provvärmväxlare

För fältproven i Göteborg utvaldes två befintliga ventilationsanläggningar, där det var jämförelsevis lätt att genomföra de för proven nödvändiga ändringarna av installationerna. I den ena anläggningen (provanläggning I) installerades ett vätskekopplat värmeåtervinningssystem med lamellrörsvärmväxlare, medan roterande värmväxlare av olika utföranden installerades i den andra anläggningen (provanläggning II). Genom att undersöka korrosionsproblemets omfattning i vätskekopplade och roterande värmväxlare får man även viss information om de korrosionsproblem som kan väntas uppträda i tvåfasvärmväxlare och luft/luftvärmväxlare av gängse utförande.

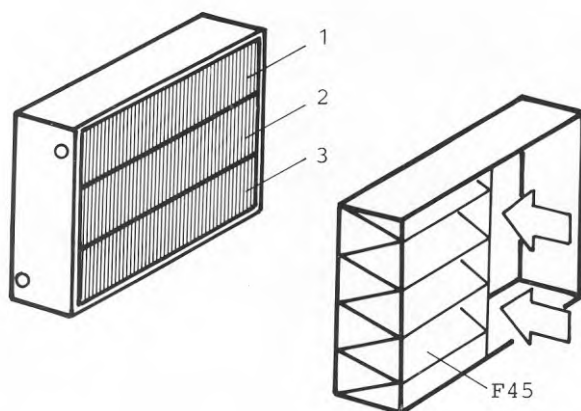
Det vätskekopplade värmeåtervinningssystem som provats har på tilluftssidan en lamellrörsvärmväxlare bestående av tre sektioner med materialkombinationerna:

- koppar/aluminium (standardutförande),
- koppar/aluminium med epoxilackerad lamell,
- koppar/koppar.

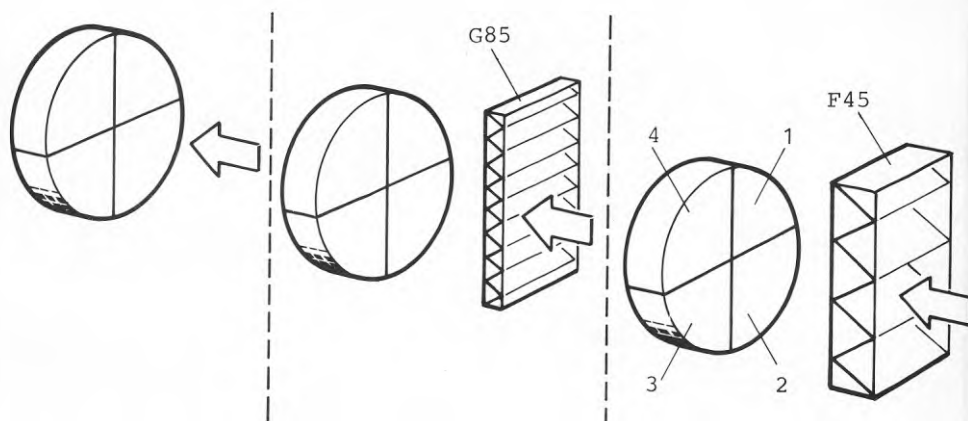
Lamellrörsvärmväxlaren på tilluftssidan har tolv rörrader och lamelldelningen 2,2 mm. Den har installerats på sådant sätt att halva växlaren genomströmmas av filtrerad uteluft och halva av ofiltrerad, se figur 2.1. Det valda filtret är ett finfilter av klass F45.

För fältproven med roterande värmväxlare har sektoruppdelade rotorerna använts. På detta sätt har det varit möjligt att i samma värmväxlare undersöka flera olika rotorutföranden. Tre roterande värmväxlare med sektoruppdelade rotorerna av aluminium har provats vid olika filtrering av uteluften, d v s en rotor har provats utan filter, en med grundfilter av klass G85 och en med finfilter av klass F45, se figur 2.2.

Av de fyra sektorerna i de provade rotorerna är två i icke-hygroskopiskt utförande och två i hygroskopiskt utförande med ytskikt av aluminiumoxid. I en av de icke-hygroskopiska sektorerna i varje rotor är aluminiumbanden epoxilackerade. Vidare är den ena av de hygroskopiska sektorerna i den rotor som arbetar med ofiltrerad uteluft försedd med ett kantskydd av klarlack. I den sistnämnda rotorn har dessutom tre cylinderformade rotorelement med ca 50 mm diameter satts in. Av dessa rotorelement är ett av rostfritt stål, ett av aluminium med extra tjockt oxidskikt och ett av aluminium med kantskydd av epoxi.



Figur 2.1. Lamellrörsvärmeväxlare och uteluftsfilter i provanläggning I. De tre sektionerna i värmeväxlaren utgöres av: 1) koppar/aluminium, 2) koppar/aluminium med epoxilackerad lamell, 3) koppar/koppar.



Figur 2.2. Sektoruppdelade roterande värmeväxlare och uteluftsfilter i provanläggning II. Rotormaterial: 1) obehandlat aluminium, 2) epoxilackerat aluminium, 3) och 4) aluminium med ytskikt av aluminiumoxid.

För att på ett enkelt sätt möjliggöra analyser av de korrosionsprodukter som bildats har samtliga rotorerna varit försedda med ett cylinderformat rotorelement som lätt har kunnat tas ut för analys. Detta element är tillverkat av obehandlat aluminium av samma kvalitet som rotormaterialet. Rotorelementen ifråga har använts för analysändamål under hela provtiden.

2.2 Provanläggningar i Göteborg

Fältproven med de vätskekopplade och de roterande värmeväxlarna har genomförts i centrala Göteborg. Det vätskekopplade värmeåtervinningssystem som provats är installerat vid Juvel Kvarn och Bageri AB, Bratteråsgatan 32 (provanläggning I) och de tre roterande värmeväxlarna vid Stena Sessan Line AB, Majnabbeterminalen (provanläggning II), se figur 2.3. På båda provplatserna kan uteluftens halt av såväl svaveldioxid som havssalt anses vara jämförelsevis hög.

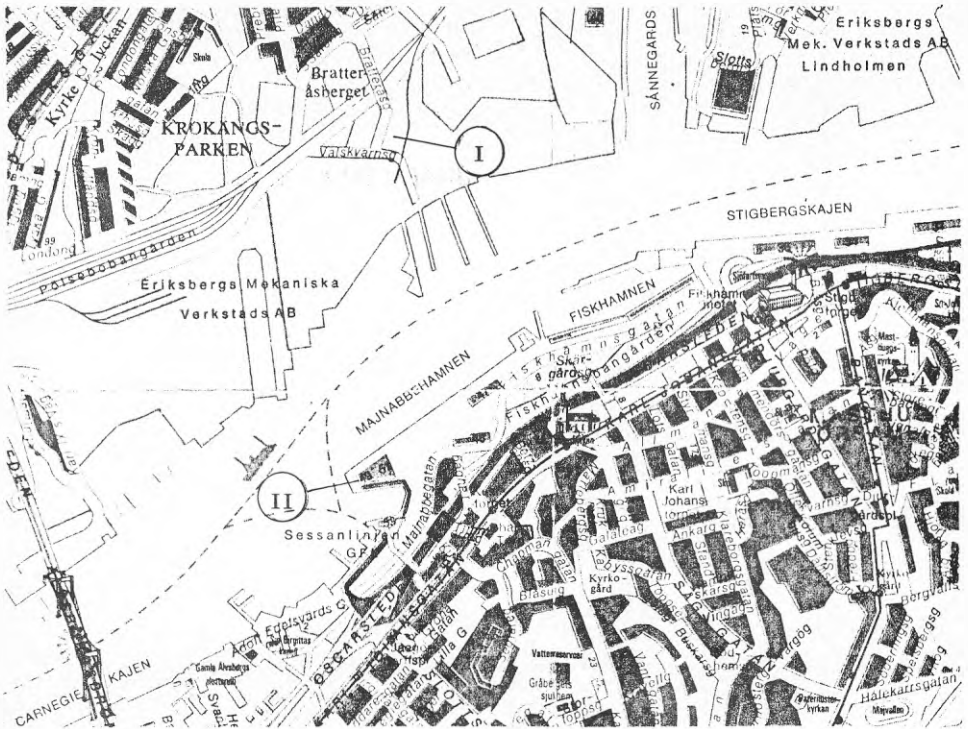
Den i provanläggning I installerade lamellrörsvärmeväxlaren har i tilluftsaggregatet placerats före den befintliga värmeväxlaren, d v s närmast uteluftsintaget, se figur 2.4 och 2.5. Den befintliga värmeväxlaren har liksom provvärmeväxlaren tolv rörrader och 2,2 mm lamelldelning. På vätskesidan är de båda värmeväxlarna inkopplade i serie.

Luftflödet genom tilluftsaggregatet har uppdelats på två olika delluftflöden. I det ena delflödet sker filtreringen av uteluften före lamellrörsvärmeväxlaren (se figur 2.6), medan filtreringen sker efter lamellrörsvärmeväxlaren i det andra delflödet. De projekterade tillufts- och frånluftsflödena i anläggningen uppgår till $2,8 \text{ m}^3/\text{s}$.

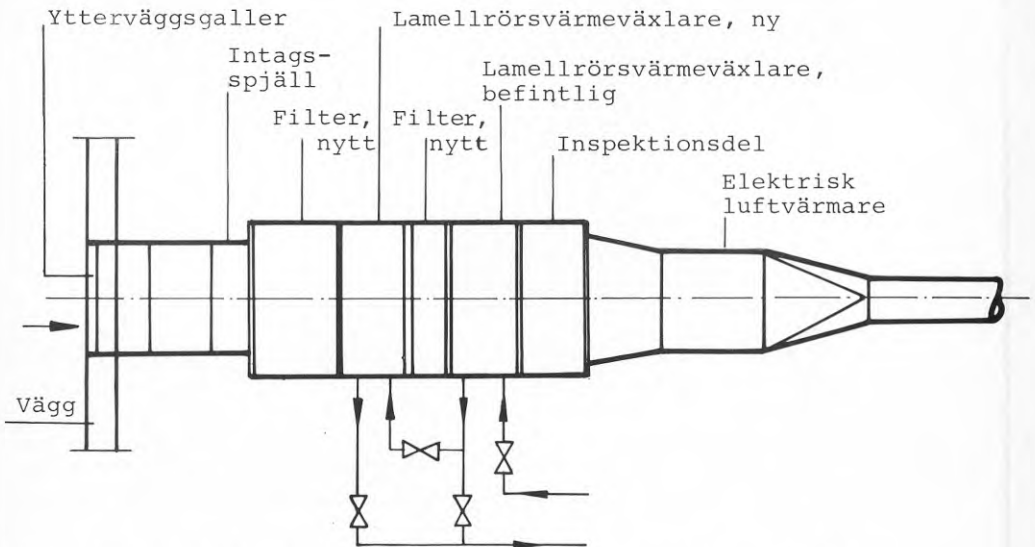
Värmeåtervinningssystemets drifttider sammanhänger med produktionen vid kvarnen och kan variera högst avsevärt från månad till månad. En drifttidmätare, kopplad till tilluftsfläkten installerades därför. Vid projektets start beräknades antalet drifttimmar per år ungefär motsvara normal kontorstid med hänsyn till den förväntade produktionen.

Inspektionen av lamellrörsvärmeväxlarna i provanläggning I har skett via den filterdel där uteluftsfilteret är placerat. Den ena halvan av värmeväxlaren har inspekterats via en speciell inspektionslucka och den andra via filterets gavellucka. För analys av de korrosionsprodukter som bildats på värmeväxlarnas lamellytor har mindre provbitar av lamellerna tagits ut via dessa luckor.

De i provanläggning II installerade roterande värmeväxlarna är samtliga placerade 8-9 m från uteluftsintagen i respektive tilluftssystem, se figur 2.7. De olika luftbehandlingsaggregaten har beteckningarna



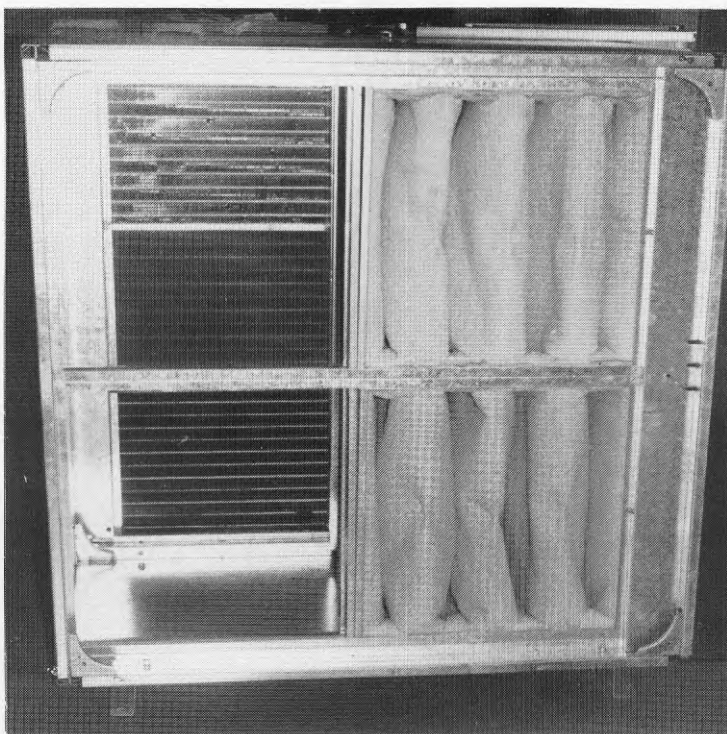
Figur 2.3. Provningsplatserna i Göteborg.
 I. Provanläggning för vätskekopplad värmeväxlare,
 II. provanläggning för roterande värmeväxlare.



Figur 2.4. Skiss av tilluftsaggregat i provanläggning I.



Figur 2.5. Foto av tilluftsaggregat i provanläggning I.



Figur 2.6. Foto av lamellrörsvärmeväxlare och uteluftsfilter i provanläggning I.

TA2/FA2, TA3/FA3 och TA4/FA4. I samtliga aggregat är luftriktningen genom värmeväxlarna vertikal, se figur 2.7 och 2.8.

De projekterade luftflödena för de olika aggregaten framgår av tabell 2.1. Av tabellen framgår också vilka uteluftsfilter som använts under provprogrammet. På frånluftssidan har aggregaten filter av klass G85 före de roterande värmeväxlarna. I samtliga fall kommer frånluften från lokaler som närmast kan jämföras med kontorslokaler med hänsyn till luftkvaliteten. Sedan fältproven pågått i ca 1 år byggdes dock vissa av de lokaler som betjänas av luftbehandlingsaggregat TA2/FA2 om till laboratorier.

Tabell 2.1. Projekterade luftflöden och valda uteluftsfilter i provanläggning II.

Aggregat	Projekterade luftflöden		Uteluftsfilter
	Tilluft (m^3/s)	Frånluft (m^3/s)	
TA2/FA2	1,7	1,5	G85
TA2/FA2	1,5	1,0	-
TA4/FA4	2,3	2,2	F45

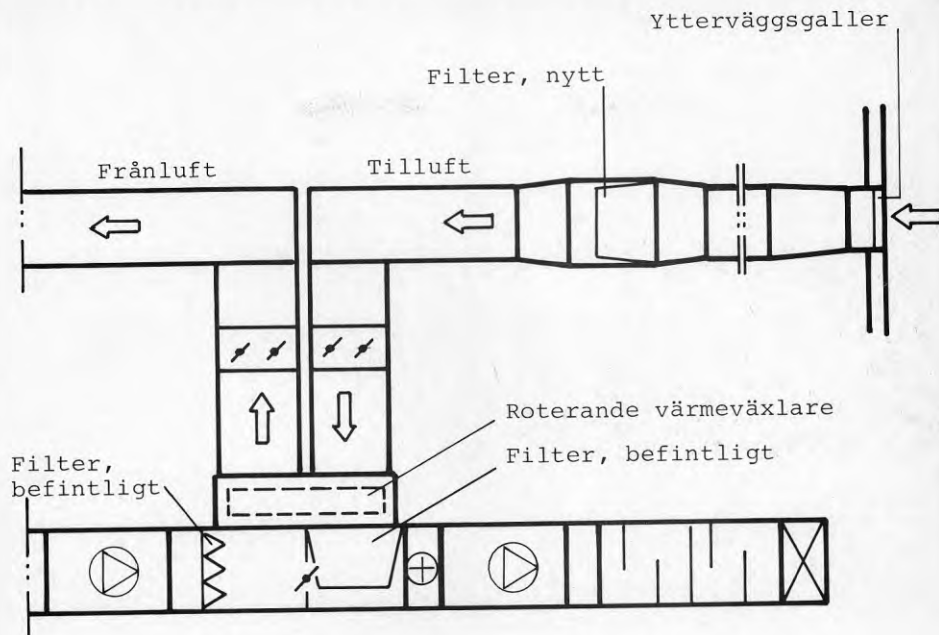
Inspektion av rotorerna har kunnat ske under drift via speciella inspektionsluckor på de olika aggregaten. Det har också varit möjligt att via dessa luckor ta ut de cylinderformade rotorelementen för analys av korrosionsprodukter.

Drifftiderna för aggregaten i provanläggningen är något olika. Varje aggregat försågs därför med en drifftidmätare kopplad till tilluftsfläkten. Då fältproven startade förväntades antalet drifftimmar per år ungefär motsvara normal kontorstid.

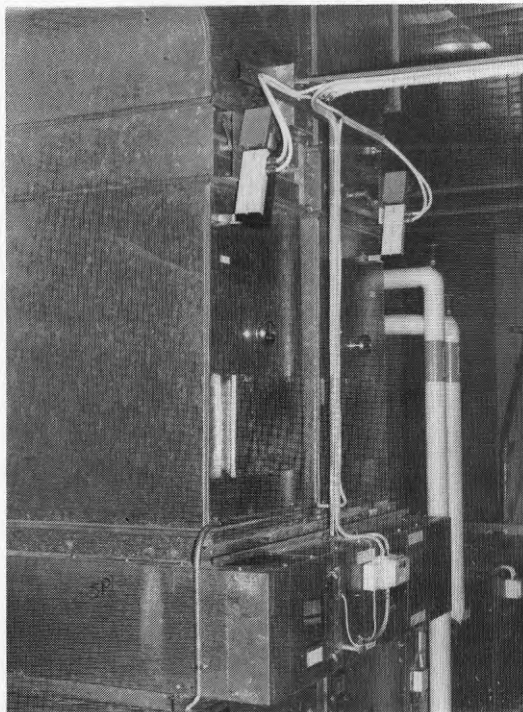
2.3 Referensanläggningar

För jämförelse med fältproven i Göteborg har ventilationsanläggningar med vätskekopplade och roterande värmeväxlare även följts upp på platser med inlandsklimat. Av de valda anläggningarna finns två utanför Jönköping, en i Östersund och en i Strömsund (nära Östersund). I fortsättningen kommer dessa anläggningar att betecknas referensanläggning I och II i Jönköping, respektive referensanläggning I och II i Östersund.

I referensanläggning I i Jönköping (Hotell Ramada) finns en vätskekopplad värmeväxlare installerad på byggnadens tak. Tilluftsaggregatet (se figur 2.9) har en lamellrörsvärmeväxlare av koppar/aluminium med åtta rörrader och 2,2 mm lamellindelning.



Figur 2.7. Skiss av luftbehandlingsaggregat TA2/FA2 i provanläggning II.



Figur 2.8. Foto av luftbehandlingsaggregat TA2/FA2 i provanläggning II.

Tilluftsflödet uppgår till $4,7 \text{ m}^3/\text{s}$. På frånluftssidan finns två takaggregat som tillsammans har ett luftflöde av $2,9 \text{ m}^3/\text{s}$.

En roterande värmeväxlare med rotordiametern $1,65 \text{ m}$ finns installerad i referensanläggning II i Jönköping (Saab-Scania Enertech AB), se figur 2.10. Aluminiumrotorn är här i hygroskopiskt utförande. Det finns inget uteluftsfilter före värmeväxlaren, som är placerad ca $1,5 \text{ m}$ från uteluftsgallret. Tilluftsflödet uppgår till $2,3 \text{ m}^3/\text{s}$ och frånluftsflödet till $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$. Frånluften kommer i detta fall från en kontorslokal.

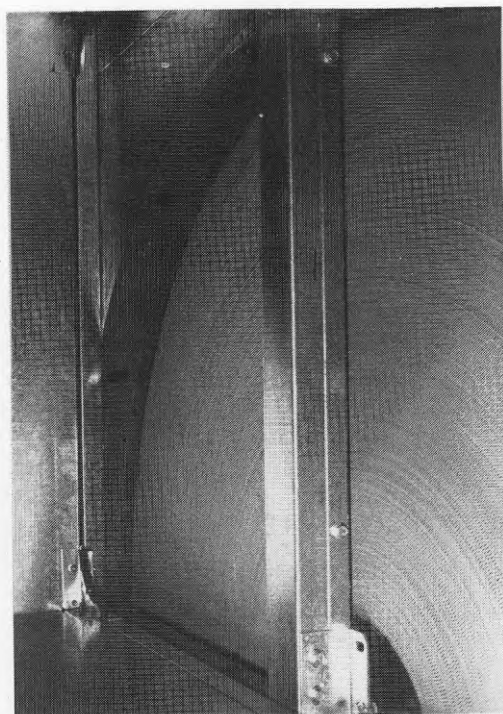
Vid referensanläggning I i Östersund (Landstingets Tvätteri) finns en vätskekopplad värmeväxlare installerad i ett inomhusaggregat, se figur 2.11. Lamellrörsvärmeväxlaren i tilluften är av standardutförande i koppar/aluminium och den har åtta rörrader och $2,2 \text{ mm}$ lamelldelning. Före värmeväxlaren finns ett uteluftsfilter av klass F45. Tilluftsflödet uppgår till $8,6 \text{ m}^3/\text{s}$ och frånluftsflödet till $9,2 \text{ m}^3/\text{s}$.

I referensanläggning II i Östersund (Industricentra, Strömsund) finns två roterande värmeväxlare placerade i ett takaggregat, se figur 2.12. Aluminiumrotorerna är i hygroskopiskt utförande och de har diametern $2,0 \text{ m}$. Rotorerna är placerade direkt efter respektive uteluftsgaller. Tillufts- och frånluftsflödet uppgår till $5,9 \text{ m}^3/\text{s}$. Frånluften kommer från verkstadslokaler med träbearbetning.

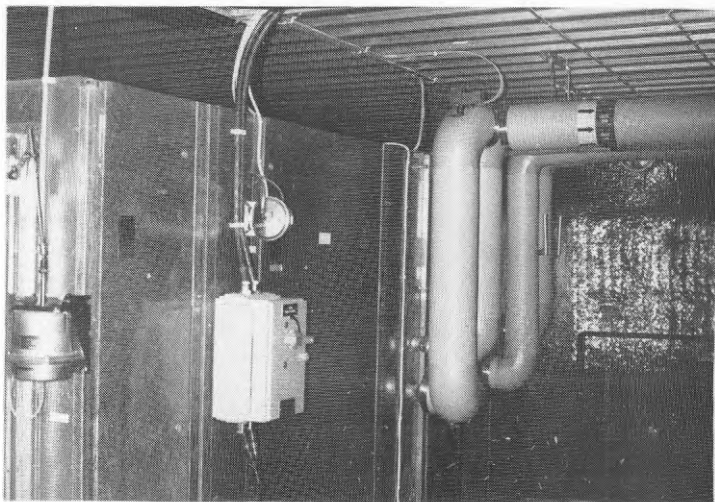
Det finns även en äldre ventilationsanläggning med två roterande värmeväxlare vid Industricentra i Strömsund. Dessa värmeväxlare är av samma typ som värmeväxlarna i referensanläggning II. De är placerade i ett takaggregat som togs i drift redan 1978.



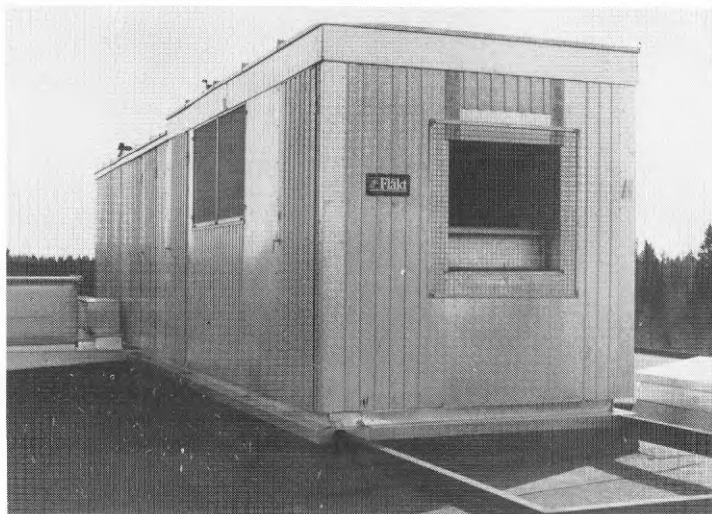
Figur 2.9. Foto av tilluftssaggregat i referensanläggning I i Jönköping.



Figur 2.10. Foto av roterande värmeväxlare i referensanläggning II i Jönköping.



Figur 2.11. Foto av inomhusaggregat med vätskekopp-
lad värmväxlare i referensanläggning I
i Östersund.



Figur 2.12. Foto av takaggregat med två roterande
värmväxlare i referensanläggning II
i Östersund.

3 UPPFÖLJNING AV FÄLTPROV

3.1 Fältprovets omfattning

De båda provanläggningarna i Göteborg med vätskekopplade värmeväxlare (provanläggning I) och roterande värmeväxlare (provanläggning II) togs i drift i juni 1983 respektive i april 1983. I enlighet med det uppgjorda programmet har dessa anläggningar sedan inspekterats med ca 2 månaders mellanrum. Vid ett flertal inspektionstillfällen har även temperaturer, luftflöden och tryckfall uppmätts. Dessa värmetekniska mätningar har utförts bl a för att man skall kunna avgöra om några driftdata i anläggningarna förändrats under provtiden.

Minst en gång per år har också mindre provbitar tagits av lamellrörsvärmeväxlarna i provanläggning I och rotorerna i provanläggning II. Dessa provbitar har sedan analyserats på laboratorium (Inst. för oorganisk kemi, CTH). I kapitel 4 redovisas de viktigaste resultaten av det genomförda analysprogrammet.

Referensanläggningarna i Jönköping och Östersund togs, med ett undantag, i drift bara några månader innan fältproven i Göteborg startade, varför det går att göra direkta jämförelser mellan korrosionsangreppens utveckling på de olika platserna. Datum för driftstart av referensanläggningarna och den valda inspektionsfrekvensen framgår av tabell 3.1. I referensanläggning I i Östersund, som togs i drift drygt ett år före övriga anläggningar, kunde inga korrosionsskador upptäckas vid första inspektionen (maj 1983). Ej heller kunde vid detta inspektionstillfälle några korrosionsskador upptäckas på de båda äldre värmeväxlarna i samma byggnad, vilka togs i drift 1978.

Tabell 3.1. Driftstart och inspektionsfrekvens för referensanläggningar.

Referens- anläggning	Driftstart	Inspektions- frekvens (ggr/år)
I, Jönköping	Nov 1982	3
II, Jönköping	Jan 1983	3
I, Östersund	Sept 1981	1
II, Östersund	Okt 1982	1

3.2 Inspektioner vid provanläggningar

3.2.1 Provanläggning I

Inspektionerna av lamellrörsvärmeväxlarna i provanläggning I har enkelt kunna ske via tilluftsaggregatets filterdel som är försedd med luckor. Genom dessa luckor har det också varit möjligt att ta ut provbitar av lamellernas frontpartier för analys. För att kontrollera hela det vätskekopplade värmeåtervinningssystemets funktion har även värmeväxlaren i frånluftsaggregatet inspekterats i samband med besöken vid provanläggningen.

En viktig del av fältproven i provanläggning I har varit att undersöka i vilken mån filtrering av uteluften reducerar korrosionsangreppen på lamellrörsvärmeväxlarna. Redan vid inspektionerna under första driftåret kunde en betydligt kraftigare stoftbeläggning iakttas på den del av värmeväxlarna som exponeras för ofiltrerad uteluft, än på den del som skyddas av F45-filter. Under de fem år som fältproven pågått har denna skillnad i stoftbeläggning blivit allt tydligare. Det bör i detta sammanhang nämnas att den del av värmeväxlaren som ej skyddats av filter rengjorts genom dammsugning vid två tillfällen (efter 2 respektive 3 års drift).

Korrosionsangreppens omfattning på de olika värmeväxlarna tycks enligt de gjorda iakttagelserna öka med ökad stoftbeläggning på värmeväxlarnas lameller. Stoftbeläggningen försvårar dock bedömningen av korrosionsangreppen direkt på provplatsen. Genom de analyser som genomförts på laboratorium, se kapitel 4, har däremot korrosionen på lamellmaterialet kunnat följas mycket noga.

Vid inspektionerna på provplatsen har de mest tydliga korrosionsangreppen konstaterats på värmeväxlaren med aluminiumlamell. Speciellt gäller detta den del av värmeväxlaren som inte skyddas av filter. På denna del av värmeväxlaren kunde tydliga tecken på korrosion iakttas redan efter ca 1/2 års drift.

Värmeväxlaren med epoxilackerade aluminiumlameller har endast obetydliga korrosionsangrepp enligt de bedömningar som gjorts vid inspektionerna. Först vid slutet av provperioden har korrosion med säkerhet kunnat iakttas på den del av värmeväxlaren som inte skyddas av filter. Härvid tycks det framför allt vara de icke lackerade framkanterna av lamellerna som angrips.

På värmeväxlaren med kopparlameller har vissa korrosionsangrepp iakttagits efter några års drift. Fläckvisa gröna partier har i detta fall bildats på lamellerna. Detta gäller i första hand den del av värmeväxlaren som inte skyddas av filter.

För varje driftår har de noteringar som gjorts vid inspektionerna av värmeväxlarna sammanställts i en tabell. Sammanställningarna för första, tredje och femte driftåret framgår av Bilaga 1. Av denna bilaga framgår också tilluftsaggregatets drifttider samt tryckfallet över uteluftsfiltret. Vid provperiodens slut uppgick den totala drifttiden till 4039 h, vilket är betydligt kortare tid än som förväntades då fältproven startade.

De iakttagelser som gjorts i samband med inspektionerna vid provanläggning I visar sammanfattningsvis att ingen av de provade värmeväxlarna har några korrosionsangrepp av betydelse för det vätskekopplade värmeåtervinningssystemets funktion. Även efter ytterligare 5 års drift kan man förvänta sig att detta gäller. För att försäkra sig om verkligt långa brukstider för lamellrörsvärmeväxlare av standardutförande är det dock, på platser med kustklimat, önskvärt att uteluften filtreras.

3.2.2 Provanläggning II

Inspektionen av de roterande värmeväxlarna i provanläggning II har skett via speciella inspektionsluckor på de olika tilluftsaggregaten TA2, TA3 och TA4. Eventuella korrosionsskador på rotormaterialet har därigenom kunnat upptäckas direkt på provplatsen. På grund av att korrosionsangreppen haft ringa omfattning har en noggrann jämförelse mellan olika rotorutföranden kunnat göras först efter provperiodens slut. Rotorerna togs då ut ur aggregaten och sågades isär.

Eftersom uteluftens filtrering är olika i tillufts-systemen har rotorernas stoftbeläggning ägnats speciell uppmärksamhet vid inspektionerna. På den rotor som exponeras för ofiltrerad uteluft kunde redan under första driftåret en tydlig stoftbeläggning iakttas. Vid två tillfällen under provperioden (efter 2,5 respektive 3,5 års drift) har denna rotor rengjorts genom dammsugning. Som framgår av de utförda laboratorieundersökningarna är också korrosionsangreppen kraftigare på denna rotor än på de rotorerna som skyddas av grundfilter eller finfilter, se kapitel 4.

De noteringar som gjorts i samband med inspektionerna under första, tredje och femte driftåret framgår av Bilaga 2. Här anges också de olika tilluftsaggregatets drifttider samt tryckfallen över uteluftsfiltren. För samtliga tilluftsaggregat överstiger den totala drifttiden 20 000 h, vilket är ungefär dubbelt så lång tid som förväntades med hänsyn till att de lokaler som systemen betjänar närmast kan anses motsvara kontorslokaler.

När fältproven avslutades under våren 1988 togs som nämnts rotorerna ut ur tilluftsaggregaten. De olika sektorerna och de mindre rotorelementen undersöktes då noga. Samtliga sektorer, utom en av sektorerna i TA2, sågades isär för att möjliggöra en noggrann jämförelse av korrosionsangreppens omfattning på rotorerna av olika utförande. Även stoftbeläggningens fördelning på rotorytorna kunde på detta sätt studeras.

Bland de slutsatser som kan dras av de avslutade fältproven i provanläggning II bör i första hand nämnas att ingen av de provade rotorerna har korrosionsangrepp av sådan omfattning att värmeväxlarnas funktion påverkats. Någon skillnad i detta avseende mellan rotorerna av obehandlat aluminium och sådana med oxidbehandling har härvid inte iakttagits. Än mindre har det varit möjligt att särskilja korrosionsbeständigheten hos olika tjocka oxidskikt.

De erhållna resultaten visar också att filtrering av uteluften avsevärt minskar risken för korrosionsskador. I den besvärliga miljö där fältproven genomförts är det därför lämpligt att skydda värmeväxlarna med filter, i varje fall med grundfilter, om man vill uppnå verkligt långa brukstider. Sannolikt skulle dock även den oskyddade värmeväxlaren ha klarat ytterligare fem års drifttid utan att dess funktion märkbart försämrats på grund av korrosionsangrepp.

En annan viktig iakttagelse i detta sammanhang är att de rotorelement som har kantskydd av lack klarat den besvärliga miljön mycket bra (se även kapitel 4). Att skydda aluminiumrotorer med ett några mm brett lackskikt är för övrigt en metod som med framgång tillämpats i ventilationssystem på fartyg. Detta kan också vara en alternativ metod att uppnå långa brukstider i kustklimat, om man av något skäl inte har möjlighet att placera uteluftsfilter före värmeväxlarna. De genomförda fältproven tyder däremot inte på att korrosionsproblemen är så svåra i kustklimat att det är nödvändigt att skydda hela värmeväxlarytan, exempelvis med ett lackskikt.

Det rotorelement av rostfritt stål som ingått i undersökningen vid provanläggning II har inga synliga korrosionsangrepp. Provet av detta rotorelement har dock gett värdefull information om stoftbeläggningens fördelning över värmeväxlarytan. Man kan i detta fall mycket tydligt se att stoftbeläggningen är koncentrerad till ett 3-4 mm brett område närmast värmeväxlarens front.

3.3 Inspektioner vid referensanläggningar

3.3.1 Referensanläggningar i Jönköping

De båda referensanläggningarna i Jönköping har som ovan framgått inspekterats tre gånger per år. Vid dessa inspektioner har noteringar i första hand gjorts om stoftbeläggningen på värmeväxlarna och om de korrosionsskador som eventuellt har kunnat iakttas. Av Bilaga 3 framgår de noteringar som gjorts i samband med inspektionerna under första, tredje och femte driftåret.

I referensanläggning I har lamellrörsvärmeväxlaren, som är installerad i ett takplacerat tilluftsaggregat, rengjorts ca 1 gång per år, eftersom stoftbeläggningen på värmeväxlarens frontyta annars hade blivit alltför kraftig. Rengöring har i detta fall skett genom tvättning med vatten. Om värmeväxlaren försetts med ett enkelt uteluftsfilter av grundfilterklass hade sannolikt värmeväxlaren inte behövt rengöras under de första driftåren. Det är dock tveksamt om ett uteluftsfilter är ekonomiskt motiverat i denna anläggning.

På lamellrörsvärmeväxlaren i referensanläggning I har vissa korrosionsangrepp vid lamellernas framkant mot uteluften kunnat konstateras, första gången efter ca 1 års drift. Dessa korrosionsangrepp har dock så liten omfattning att de inte lett till någon försämring av värmeåtervinnningssystemets funktion. Att värmeväxlaren rengörs, med ca 1 års intervall, är säkert fördelaktigt även från korrosionssynpunkt.

Trots att den roterande värmeväxlaren i referensanläggning II saknar uteluftsfilter har stoftbeläggningen varit rätt obetydlig på denna värmeväxlare under hela den drygt 5 år långa provperioden. Några korrosionsangrepp på rotormaterialet har heller inte kunnat iakttas vid inspektionerna. Med hänsyn till att inga egentliga problem med stoftbeläggning och korrosion uppträtt i denna anläggning är det knappast motiverat att förse värmeväxlaren med ett uteluftsfilter.

3.3.2 Referensanläggningar i Östersund

Eftersom uteluftens kvalitet är jämförelsevis bra vid de båda referensanläggningarna i Östersundstrakten har dessa anläggningar endast inspekterats en gång per år. De resultat som erhållits under provperioden tyder också på att denna inspektionsfrekvens varit tillräcklig. I Bilaga 3 sammanfattas några av de noteringar som gjorts i samband med inspektionerna.

Den lamellrörsvärmeväxlare som ingår i referensanläggning I uppvisar ännu efter nära 7 års drift inga

tydliga korrosionsangrepp. Stoftbeläggningen på lamellernas framkanter är också rätt måttlig. Detta sammanhänger både med att uteluftens stofthalt är låg på provplatsen och med att värmeväxlaren skyddas av finfilter.

I referensanläggning II har inga korrosionsangrepp konstaterats på de roterande värmeväxlarna efter nära 6 års drift. Trots att uteluften inte filtreras är stoftbeläggningen på rotorernas frontyta också ganska obetydlig. Att i denna anläggning skydda rotorerna med uteluftsfilter kan därför inte anses motiverat.

Vid inspektionerna av värmeväxlarna i referensanläggning II har även den äldre ventilationsanläggningen i samma byggnad inspekterats. Inga korrosionsangrepp har härvid kunnat upptäckas på de roterande värmeväxlarna efter 10 års drift. Även på dessa värmeväxlare är stoftbeläggningen obetydlig, trots att de inte skyddas av uteluftsfilter.

3.4 Fortsatta prov

Samtliga värmeväxlare som ingått i undersökningarna vid provanläggningarna i Göteborg och referensanläggningarna i Jönköping och Östersund har varit i drift i minst 5 år. Rätt väl underbyggda bedömningar av riskerna för korrosionsskador har därför kunnat göras både vad gäller kustklimat och inlandsklimat. För att än säkrare slutsatser skall kunna dras kommer dock viss uppföljning av de olika installationerna att ske under ytterligare några år. Denna uppföljning sker i fortsättningen utanför BFR-projektets ram.

De tre lamellrörsvärmeväxlare som undersökts i provanläggning I kommer att permanent ingå i det ursprungliga värmeåtervinningssystemet. Den enda modifiering som gjorts i denna anläggning är att hela frontytan av värmeväxlarna nu skyddas av filter. I provanläggning II har däremot värmeväxlarna bytts ut efter provperiodens slut. En sektor (av obehandlat aluminium) från proven i TA2 ingår dock även i den nya installationen. Vidare har finfiltret i TA4 ersatts med ett grundfilter.

I referensanläggningarna har inga förändringar gjorts efter provperiodens slut, varför dessa även fortsättningsvis är tillgängliga för inspektioner.

4 LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR

4.1 Analysmetoder

Under de fem år som fältproven pågått har provbitar vid ett flertal tillfällen tagits av värmeväxlarna i provanläggning I och II. De korrosionsprodukter som bildats på dessa provbitar har sedan ingående analyserats vid Inst. för oorganisk kemi, CTH. Det har därigenom varit möjligt att studera även relativt små korrosionsangrepp på värmeväxlarmaterialet.

Korrosionsangreppen har undersökts både i ljusmikroskop och svepelektronmikroskop (SEM). I samband med undersökningarna i svepelektronmikroskop har även kemiska analyser av de bildade korrosionsprodukterna utförts med hjälp av energidispersiv röntgenspektroskopi (EDX). Vissa av de prover som tagits av värmeväxlarna efter fem års drift har också studerats i ljusmikroskop sedan korrosionsprodukterna avlägsnats genom etsning.

De mikroskopundersökningar som utförts efter etsning av värmeväxlarmaterialet har gjort det möjligt att bestämma korrosionsangreppens utbredning och frätgroparnas djup. En viktig frågeställning i detta sammanhang är också hur snabbt korrosionsangreppen avtar med avståndet från värmeväxlarnas front. Undersökningarna av de etsade folierna har härvid gett värdefull information.

Att korrosionsangreppen på olika material är jämförelsevis kraftiga i kustklimat brukar man som inledningsvis framhållits förklara med att uteluften innehåller havssalt. I kombination med höga halter av svaveldioxid och/eller kvävedioxid antas havssalt påskynda korrosionsförloppen. För att undersöka sådana effekter har, utanför BFR-projektets ram, vissa inledande laboratorieprov genomförts vid Inst. för oorganisk kemi, CTH. De resultat som hittills erhållits tyder på att synenergieffekter av ifrågasvarande slag avsevärt ökar korrosionshastigheten hos aluminium.

Provbitar av värmeväxlarna i de båda provanläggningarna har tagits efter 1, 2, 3, 4 och 5 års drift. I provanläggning II togs dessutom prover av de obehandlade aluminiumfolierna ut för analys redan ett halvt år efter det att värmeväxlarna startats. De viktigaste resultaten av de utförda analyserna sammanfattas i avsnitten 4.2-4.5. Vissa av de delresultat som erhållits efter 2 års drift av värmeväxlarna har tidigare redovisats i en tidskriftsartikel (Strindehag, 1986).

4.2 Resultat efter 1/2 års drift

De första proverna från värmeväxlarna i provanläggning II analyserades redan i oktober 1983, dvs efter 1/2 års drift. Provtagningen skedde genom att de cylinderformade rotorelementen av obehandlat aluminium togs ut ur de tre rotorerna. För själva analyserna klipptes sedan en mindre del av aluminiumfolien bort innan rotorelementen sattes tillbaka.

Av figurerna 4.1-4.9 framgår de resultat som erhöles vid analys i svepelektronmikroskop av proverna från värmeväxlarna i provanläggning II (tilluftssystem TA2, TA3 och TA4). De kemiska analyser som utförts i samband med dessa mikroskopundersökningar visar att korrosionsprodukterna i samtliga fall är anrikade på klorid, medan halterna av sulfat är låga. I figur 4.1 ges exempel på analyser som utförts på prover från TA3 och TA4 med hjälp av röntgenspektroskopi.

Några av de bilder som tagits av proverna från TA2, TA3 och TA4 visas i figurerna 4.2-4.8, där de angivna förstoringarna avser originalbildernas förstoring. Av bilderna framgår att provet från TA3 är mer angripet än provet från TA2. Detta är också vad som kunde väntas, eftersom värmeväxlaren i TA3 inte skyddas av något filter, medan värmeväxlaren i TA2 har grundfilter. Mer överraskande är att provet från TA4 uppvisar viss stoftbeläggning och enstaka punktangrepp, trots att uteluften i detta fall filtreras med finfilter.

En förklaring till den beläggning som konstaterats på provet från TA4 kan vara att stoftpartiklar fastnat på värmeväxlarytorna innan provanläggningen togs i drift. Vad som stöder detta antagande är att undersökningar i ljusmikroskop visat att provet har en beläggning av rödbruna partiklar. Sannolikt är detta järnpartiklar som tillförts i samband med att värmeväxlaren installerades. I figur 4.9 visas den uppmätta kloridfördelningen i anslutning till ett av de korrosionsangrepp som uppkommit på provet från TA4.

4.3 Resultat efter 1 års drift

Några av de resultat som framkommit vid analys i svepelektronmikroskop av de prover som tagits på värmeväxlarna i provanläggning I efter ca 1 års drift visas i figurerna 4.10-4.15 (förstoring = 200 ggr). Som framgått av avsnitten 2.1 och 2.2 har vätskekopplade värmeväxlare med tre olika utföranden: aluminiumlamell, epoxilackerad aluminiumlamell och kopparlamell provats i denna anläggning. Härvid har den ena halvan av var och en av värmeväxlarna genomströmmats av ofiltrerad uteluft, och den andra av luft som filtrerats med finfilter av klass F45.

De bilder som tagits av provbitar från värmeväxlaren med aluminiumlamell visar att såväl stoftbeläggning som korrosionsangrepp är ganska omfattande på den del av värmeväxlaren som saknar filter, se figur 4.10. Analyser av den jämna ytan av provet visar att beläggningen förutom aluminium innehåller svavel, sannolikt i form av sulfathaltig aluminiumhydroxid. Den kristallina ansamlingen i bildens mitt innehåller svavel, natrium och små halter av aluminium och kisel.

Det prov som tagits från den del av värmeväxlaren som är försedd med filter visar att aluminiumlamellen i detta fall är betydligt mindre korroderad än den lamell som exponerats för ofiltrerad uteluft, se figur 4.11. Detta framgår bl a av att plåtens struktur (valsspår) syns tydligt. Den ansamling av korrosionsprodukter som syns på bilden innehåller aluminium, svavel och klor. På de bara ytorna av provet har däremot varken svavel eller klor kunnat påvisas.

Proverna av den epoxilackerade aluminiumlamellen (figurerna 4.12 och 4.13) visar att såväl stoftbeläggning som korrosionsangrepp är mer omfattande på den del av värmeväxlaren som saknar filter. De partiklar som finns på denna del av värmeväxlaren utgörs i första hand av sand och havssalt. Korrosionsprodukterna på båda proverna innehåller svavel och klor, förutom aluminium.

Även på kopparlamellerna från den del av värmeväxlaren som saknar filter är korrosionsangreppen mycket tydliga, se figur 4.14. Den jämna beläggningen av korrosionsprodukter innehåller förutom koppar även svavel och klor. Bland de främmande partiklarna på provet finns sådana som innehåller natrium och svavel, men det finns också sandpartiklar och svavelhaltigt sot.

Provet från den del av värmeväxlaren som skyddas av filter är betydligt mindre angripet av korrosion än det prov som exponerats för ofiltrerad uteluft, se figur 4.15. Valsspåren framträder tydligt i detta fall. Den ansamling av främmande material som finns på provet innehåller främst natrium och svavel, medan korrosionsprodukterna förutom koppar även innehåller svavel och klor. På den till synes oangripna ytan finns små mängder av klor och natrium.

Som ovan framgått kan man redan efter 1 års drift av värmeväxlarna konstatera att det är möjligt att begränsa korrosionen på samtliga material genom filtrering av uteluften.

4.4 Resultat efter 3 års drift

Prover från samtliga värmeväxlare i provanläggning I och II togs i april 1986, d v s efter ca 3 års drift. De viktigaste resultaten av undersökningarna i svepelektronmikroskop av dessa prover framgår av figurerna 4.16-4.25. Originalbildernas förstoring är 200 ggr.

4.4.1 Provanläggning I

De sex mikroskopbilderna från provanläggning I (figurerna 4.16-4.21) visar att korrosionsangreppen på de olika materialen i stora drag utvecklats i enlighet med de tendenser som kunde iakttagas redan efter 1 års drift. Även de kemiska analyserna av korrosionsprodukterna och de främmande partiklar som fastnat på värmeväxlarytorna har gett ungefär samma resultat som analyserna efter 1 års drift. Analyserna av de främmande partiklarna har också gett resultat som överensstämmer rätt väl med analyserna av uppsamlat stoft på uteluftsfiltern, se avsnitt 4.6.

Av de bilder som tagits av prover från värmeväxlaren med aluminiumlamell framgår att det prov som exponerats för ofiltrerad uteluft har omfattande korrosionsangrepp, se figur 4.16. Provytan är till ca 50 % täckt av korrosionsprodukter. De genomförda analyserna visar att korrosionsprodukterna består av aluminiumhydroxid som innehåller sulfat och en mindre mängd klorid. På ytan finns även ett stort antal främmande partiklar, bl a sot, sand och saltkristaller.

Motsvarande undersökning av ett prov från den del av värmeväxlaren som skyddas av filter (figur 4.17) visar att korrosionsangreppen på aluminiumlamellen är mindre omfattande än i fallet utan filter. Dessutom är beläggningen av främmande partiklar mindre framträdande. Analyserna av korrosionsprodukterna visar att dessa mest innehåller klorid och endast mindre mängder sulfat.

Undersökningen av proven från värmeväxlaren med epoxilackerad lamell visar att det finns tydliga korrosionsangrepp längs den oskyddade klippkanten av lamellen. Detta gäller både provet från den del av värmeväxlaren som genomströmmas av ofiltrerad uteluft och provet från den del som skyddas av filter, se figurerna 4.18 och 4.19. Korrosionsprodukterna på det prov som exponerats för ofiltrerad uteluft innehåller en hel del sulfat samt mindre mängder klorid.

De partiklar som finns på proven har i stort sett samma sammansättning som partiklarna på den olackerade aluminiumlamellen. Som framgår av figur

4.19 har korrosionsprodukter i några punkter trängt upp genom porer i lackskiktet även på provet från den del av värmeväxlaren som skyddas av filter. Korrosionsprodukterna innehåller mycket klorid och mindre mängder sulfat i detta fall.

Provet av kopparlamell från den oskyddade delen av värmeväxlaren visar att ytan är täckt både av gröna korrosionsprodukter och en stor mängd främmande partiklar (figur 4.20). På vissa områden av lamellen är korrosionsprodukterna sulfatrika, medan andra områden är rika på klorid. Sammansättningen är densamma för de korrosionsprodukter som punktvis förekommer på provet från den del av värmeväxlaren som skyddas av filter (figur 4.21).

4.4.2 Provanläggning II

De prover som tagits av de tre värmeväxlarna i provanläggning II visar att beläggningen av partiklar i samtliga fall är koncentrerad till ytorna närmast värmeväxlarens front. Några av de bilder som tagits i svepelektronmikroskop av sådana partikelbelagda ytor visas i figurerna 4.22-4.25. I anslutning till vissa av partiklarna kan tydliga korrosionsangrepp iaktas på dessa bilder.

Av figurerna 4.22 och 4.23 framgår att partikelbeläggning och korrosionsangrepp är mindre på den värmeväxlare som skyddas av grundfilter (TA2) än på den värmeväxlare som exponeras för ofiltrerad luft (TA3). Partikelbeläggningen och korrosionsangreppen på den värmeväxlare som skyddas av finfilter (TA4) är däremot svårbedömd i och med att stora variationer förekommer på aluminiumfoliens båda ytor, se figurerna 4.24 och 4.25. Att bättre reningseffekt inte erhållits med finfiltret är förvånande, men stämmer med de iakttagelser som gjorts vid övriga provtagningsstillfällen. En förklaring kan vara att den uteluft som tas in till TA4 är mer korrosiv än uteluften till övriga tilluftssystem, beroende på att uteluftsintaget till TA4 ligger mycket nära lastplatsen vid terminalen.

De analyser som gjorts på korrosionsprodukterna visar att dessa innehåller sulfat och klorid. På provet från TA3 är sulfat dominerande, medan klorid är mest förekommande på provet från TA4. Skillnaderna mellan de båda proverna kan antas sammanhånga med luftfiltrets inverkan.

4.5 Resultat efter 5 års drift

Fältproven vid provanläggningarna I och II i Göteborg avslutades i juni respektive april 1988, d v s efter 5 års drift. Innan fältproven avbröts togs provbitar av samtliga värmeväxlare. Några bilder av dessa prover från analyserna i svepelektronmikroskop visas i figurerna 4.26-4.35. Originalbildernas förstoring är 200 ggr.

På några av provbitarna av aluminium etsades korrosionsprodukterna bort för att underlätta bedömningen av korrosionsangreppens omfattning. Etsningen utfördes i koncentrerad salpetersyra mättad med CrO_3 vid rumstemperatur, kombinerat med behandling med ultraljud under 1 min. Proverna undersöktes med hjälp av ljusmikroskop före och efter etsning, se figurerna 4.36-4.43, där originalbilderna har förstoringen 100 ggr.

Analysresultaten efter 5 års drift är i god överensstämmelse med de resultat som framkommit tidigare under provperioden. Efter hand har det dock varit möjligt att dra mer bestämda slutsatser, bl a om uteluftsfilterns inverkan. Genom etsning av vissa prover har dessutom värdefull information tillkommit i samband med de avslutande analyserna, se sid. 32.

4.5.1 Provanläggning I

I figurerna 4.26-4.31 visas de bilder som tagits i svepelektronmikroskop av prover från värmeväxlaren i provanläggning I. Det prov av aluminiumlamell som exponerats för ofiltrerad uteluft (figur 4.26) har som väntat de kraftigaste korrosionsangreppen av samtliga prover. Ytan är till stor del täckt av korrosionsprodukter, bestående av aluminiumhydroxid som innehåller sulfat och klorid. På ytan finns dessutom ett stort antal främmande partiklar i form av sot, silikater, gips och saltkristaller.

Bilden av den etsade ytan av samma prov (figur 4.36) visar att det finns frätgropar på en stor del av provytan. Mellan groparna syns ännu valsspår, vilket tyder på att dessa områden är obetydligt angripna. Frätgroparnas djup varierar kraftigt, men är vanligen mindre än 50 μm .

Som framgår av figur 4.27 är provet av aluminiumlamell från den del av värmeväxlaren som skyddas av filter betydligt mindre korroderat än provet från den oskyddade delen. Längs lamellens kant är ca hälften av ytan täckt av korrosionsprodukter, medan omkring en fjärdedel av ytan är täckt i övrigt. Mängden främmande partiklar är också betydligt mindre på detta prov än på provet av den oskyddade lamellen. Samma ämnen finns dock företrädda på ytan av båda proverna.

Proven från värmeväxlaren med epoxilackerad lamell visar att korrosion uppkommit vid klippkanten där den bara metallytan exponerats. Detta gäller både provet från den oskyddade delen av värmeväxlaren och provet från den del som skyddas av filter, se figurerna 4.28 och 4.29. Från klippkanten har korrosionsprodukterna utbredd sig ovanpå epoxilacket. Som även tidigare analyser visat innehåller korrosionsprodukterna från båda proven sulfat och klorid. Beläggningsen av främmande partiklar är kraftigast på det prov som exponerats för ofiltrerad uteluft.

De prover som tagits från värmeväxlaren med kopparlamell visar att provet från den del av växlaren som genomströmmas av ofiltrerad uteluft är översållat av en blandning av gröna korrosionsprodukter, partiklar och sot, se figur 4.30. I ljusmikroskop kan man mellan de gröna korrosionsprodukterna se löda områden som består av kuprit (Cu_2O). Korrosion och nedsmutning är kraftigast nära klippkanten. Inga valsspår kan ses på provet. De gröna korrosionsprodukterna innehåller sulfat och klorid och utgörs av basiska kopparsulfater och basiska kopparklorider.

Ytan av det prov av kopparlamell som skyddats av filter har betydligt mindre beläggning av sot och partiklar än provet från den oskyddade delen av värmeväxlaren, se figur 4.31. Korrosionsangreppen är också åtskilligt mindre omfattande på detta prov. Gröna korrosionsprodukter förekommer här endast punktvis på ytan. Mellan de punktvisa angreppen kan valsspåren tydligt urskiljas. Analysen av korrosionsprodukterna visar att sulfat dominerar över klorid vid de punktvisa angreppen, medan klorid dominerar på den relativt oangripna kopparytan däremellan.

4.5.2 Provanläggning II

De prover som tagits av värmeväxlarna i provanläggning II visar att såväl stoftbeläggning som korrosion är mest tydligt märkbar på ytorna nära värmeväxlarens front. Detta är också i överensstämmelse med de resultat som framkommit tidigare under provperioden. Några av de bilder som tagits i svepelektronmikroskop av sådana ytor med jämförelsevis kraftiga angrepp visas i figurerna 4.32, 4.34 och 4.35, medan figur 4.33 visar en yta på avståndet 100 mm från värmeväxlarens front i det fall värmeväxlaren skyddas av grundfilter (TA2). I detta senare fall är beläggningsen på värmeväxlarytan ytterst obetydlig, trots att drifttiden är så lång som 5 år.

Både partikelbeläggning och korrosion är betydligt mindre framträdande på den värmeväxlare som skyddas av grundfilter (TA2) än på den oskyddade värmeväxlaren (TA3). Korrosionens ringa omfattning framgår av figur 4.32, som representerar en yta nära

värmeväxlarens front. Vid själva kanten av aluminiumfolien förekommer dock några mindre korrosionsangrepp. Som framgår av den bild som tagits efter etsning, se figur 4.37, förekommer vissa frätgropar nära foliekanten, men dessa avtar snabbt med avståndet från kanten. Enligt den genomförda analysen innehåller korrosionsprodukterna även i detta fall sulfat och klorid.

Provet från den värmeväxlare som saknar uteluftsfilter (TA3) har den kraftigaste beläggningen och de tydligaste korrosionsangreppen av de tre värmeväxlarna, se figur 4.34. De främmande partiklarna utgörs här i första hand av olika silikatmaterial. I korrosionsprodukterna förekommer förutom aluminium även svavel och klor, vilket tyder på att de utgörs av sulfat- och kloridhaltig aluminiumhydroxid.

Av provet från värmeväxlaren i TA3 har även bilder tagits i ljusmikroskop, se figurerna 4.38-4.42. Figur 4.38 visar en oetsad yta av aluminiumfoliens kant mot uteluftssidan. Mellan områden med korrosionsangrepp är valsspåren fullt synliga. I figur 4.39 visas ungefär samma yta efter etsning. En grupp av frätgropar framträder här tydligt. Groparnas djup nära kanten är i medeltal ca 30 μm , medan enstaka gropar penetrerar den 60 μm tjocka folien.

Figurerna 4.40, 4.41 och 4.42 visar den etsade ytan på avståndet 3, 10 respektive 50 mm från värmeväxlarens front. Korrosionsangreppen avtar snabbt på avstånd som är större än 3 mm från värmeväxlarens front. Redan 50 mm från värmeväxlarens front är korrosionsangreppen så grunda att de inte kan urskiljas efter etsning.

Även på den värmeväxlare som skyddas av finfilter (TA4) finns vissa korrosionsangrepp, trots att få partiklar förekommer på ytan. Korrosionen är, som även tidigare framkommit, kraftigare på ena sidan av aluminiumfolien. Figur 4.35 visar en bild som tagits av den mest angripna sidan av provet nära värmeväxlarens front.

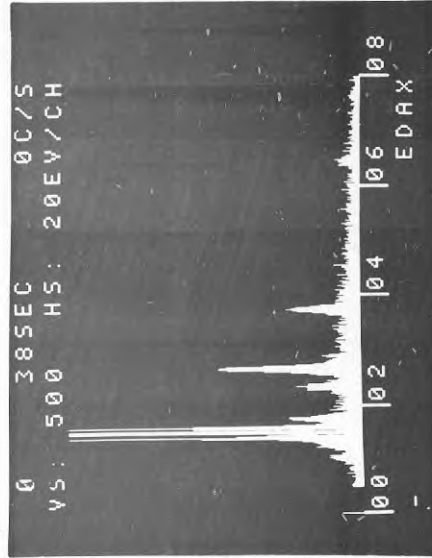
Korrosionsprodukterna innehåller även i detta fall sulfat och klorid, men på ytan finns också rostfärgade, järnhaltiga partiklar som inte förekommer på proven från de andra värmeväxlarna. Detta antyder att järnpartiklar (t ex i form av slipdamm) kan ha tillförts vid montagearbetet. Möjligen kan dessa partiklar ha haft en negativ inverkan genom galvanisk korrosion. Som på proverna från de övriga värmeväxlarna är dock korrosionsangreppen kraftigast nära foliens kant mot uteluften. Detta framgår också mycket tydligt av den bild som tagits efter etsning, se figur 4.43.

4.6 Analys av stoft på luftfilter

Det stoft som ackumulerats på uteluftsfiltern i de båda provanläggningarna har analyserats vid ett tillfälle under provperioden, nämligen efter 2 års drift. Av analyserna framgår att mängden stoft varierar avsevärt mellan de olika filterproverna, medan sammansättningen i stort sett är densamma. Speciellt kan tre olika typer av partiklar urskiljas, dels starkt klorhaltiga, dels partiklar rika på Si, K och Al (sand) och dels sotpartiklar. Svavel finns på samtliga filter men i väsentligt mindre mängder än klor. På filtern finns dessutom järn, som i form av oxid är en vanlig beståndsdel i partiklar från industrimiljöer.

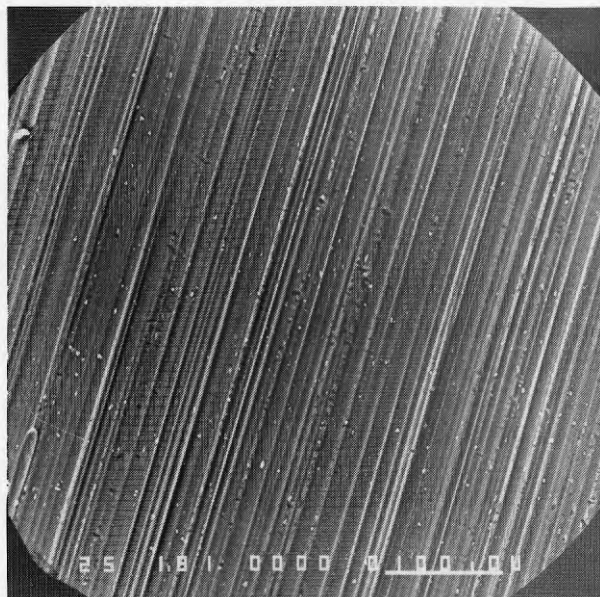


a)

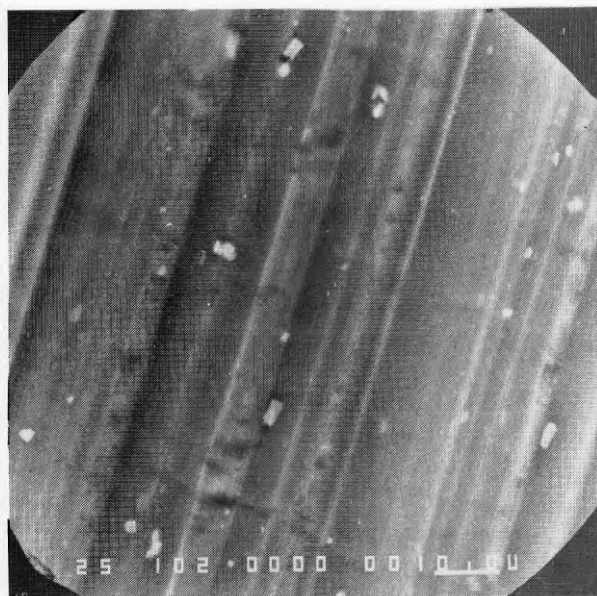


b)

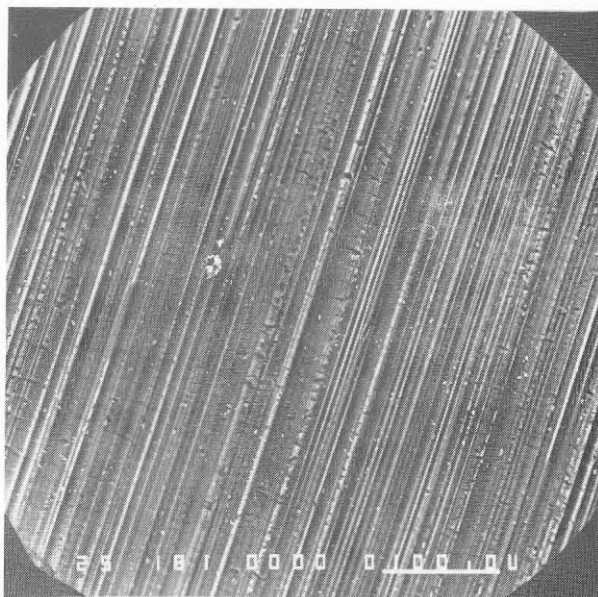
Figur 4.1. Exempel på analyser av korrosionsprodukter på proven från
 a) TA3 och b) TA4. Den största toppen är aluminium och den näst
 största är klor. Svaveltopparna ligger mellan aluminium och
 klor.



Figur 4.2. Typisk yta hos prov från TA2 i 180 ggr för-
storing. En mängd småpartiklar syns på
ytan.



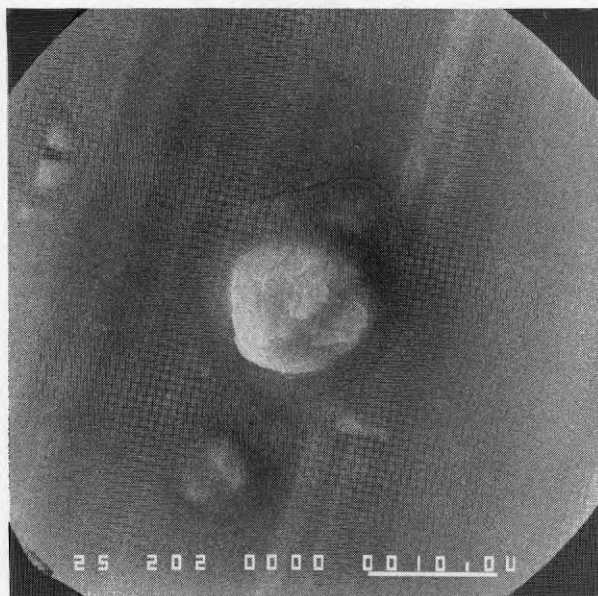
Figur 4.3. Del av ytan i figur 4.2 i 1000 ggr för-
storing. Partiklarna innehåller klorider,
ofta även järn och mycket små mängder svavel.



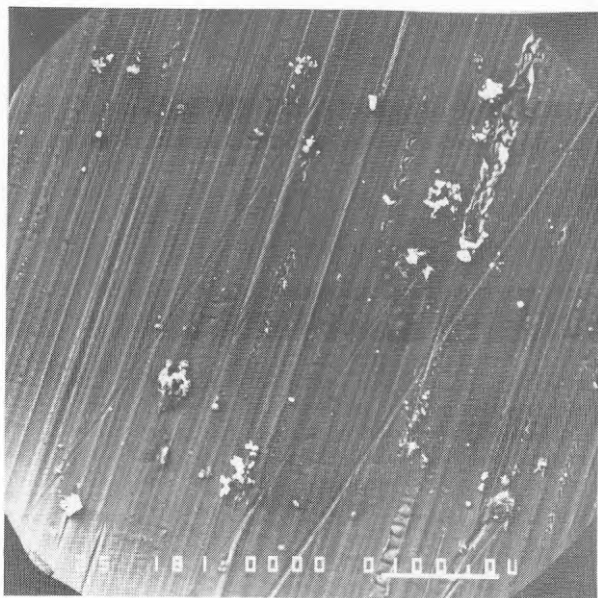
Figur 4.4. Typisk yta hos prov från TA3 i 180 ggr förstoring. Till vänster om bildens mitt syns ett tydligt korrosionsangrepp.



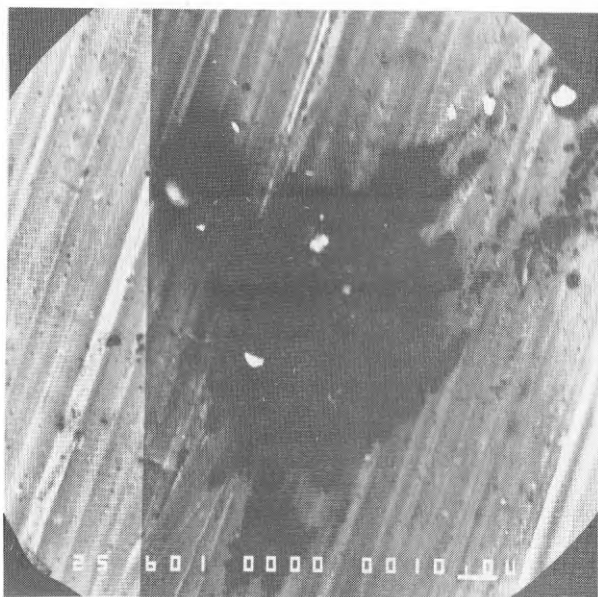
Figur 4.5. Delförstoring, 750 ggr, av området med korrosionsangrepp enligt figur 4.4. Vid angreppet uppträder kloridanrikning. Dessutom finns mindre mängder järn och svavel samt mycket små mängder kalcium och kisel.



Figur 4.6. En enstaka partikel som ännu ej förorsakat något större korrosionsangrepp på ytan hos prov från TA3. Förstoring = 2000 ggr. Klorider och järn finns på provet, liksom en obetydlig mängd svavel.



Figur 4.7. Typisk yta hos prov från TA4 i 180 ggr för-
storing. Områden som är täckta av korro-
sionsprodukter framträder tydligt.



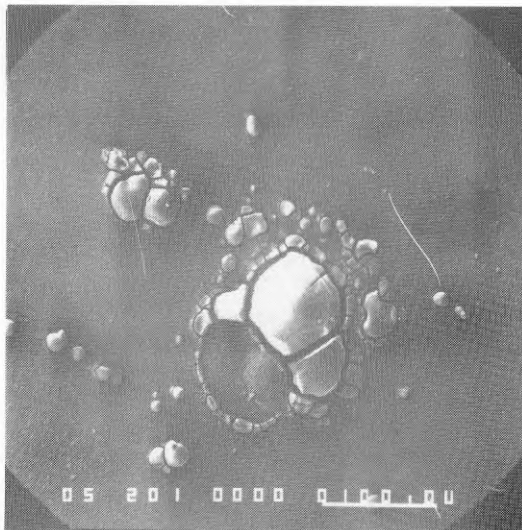
Figur 4.8. Delförstoring, 600 ggr, av område med korro-
sionsangrepp enligt figur 4.7.



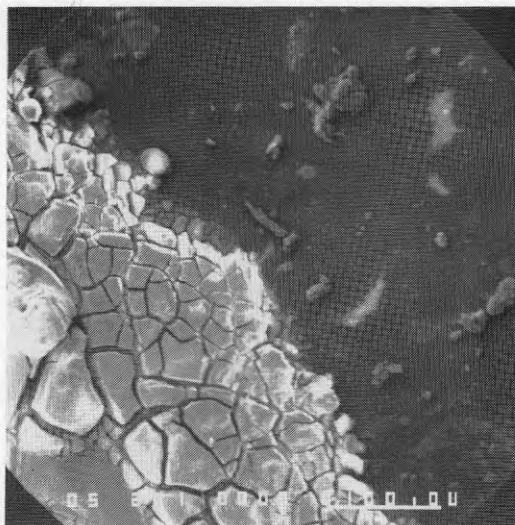
Figur 4.9. Kloridfördelning på den yta som visas i figur 4.8 (förstoring = 600 ggr). En betydande kloridanrikning märks vid korrosionsangreppet. Förutom klor har även svavel och järn kunnat påvisas i korrosionsangreppet. En liknande sammansättning kunde konstateras på partiklar som ännu ej orsakat någon märkbar korrosion.



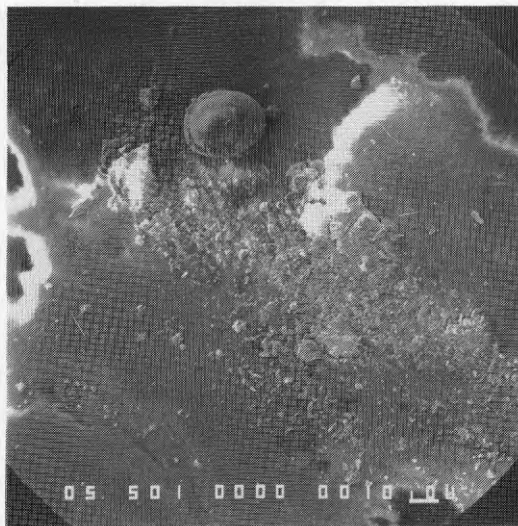
Figur 4.10. Prov av aluminiumlamell från provanläggning I efter 1 års drift. Utan filter före värmväxlare.



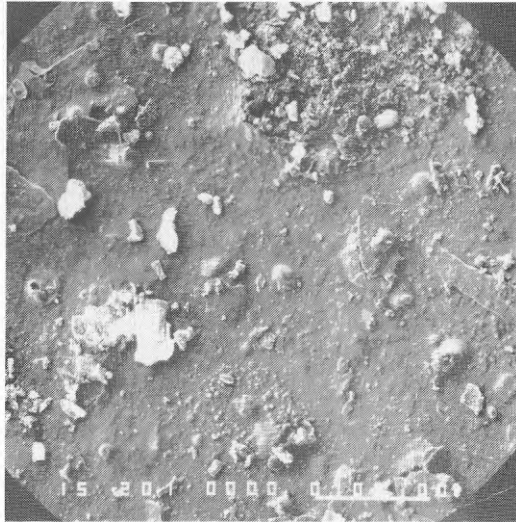
Figur 4.11. Prov av aluminiumlamell från provanläggning I efter 1 års drift. Med F45-filter före värmväxlare.



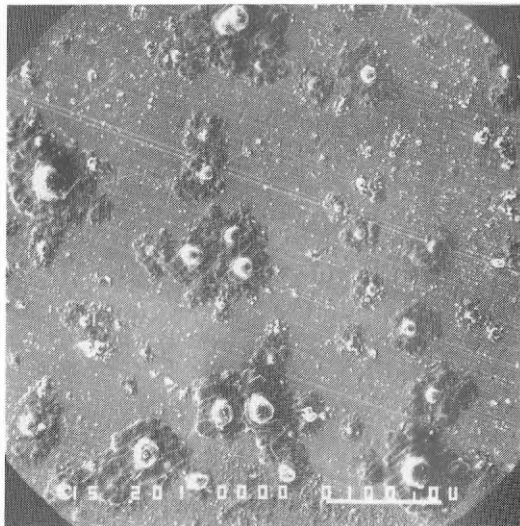
Figur 4.12. Prov av epoxilackerad aluminiumlamell från provanläggning I efter 1 års drift. Utan filter före värmeväxlare.



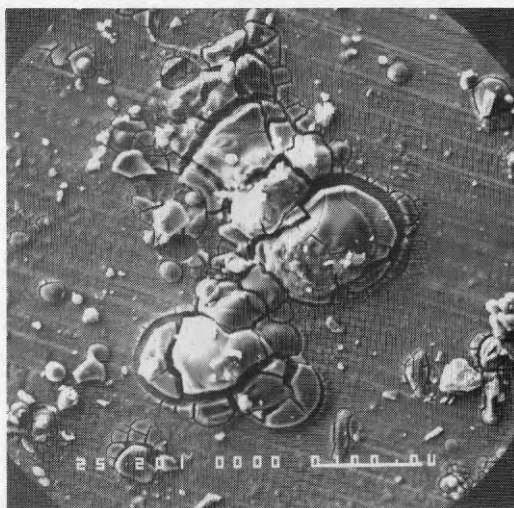
Figur 4.13. Prov av epoxilackerad aluminiumlamell från provanläggning I efter 1 års drift. Med F45-filter före värmeväxlare.



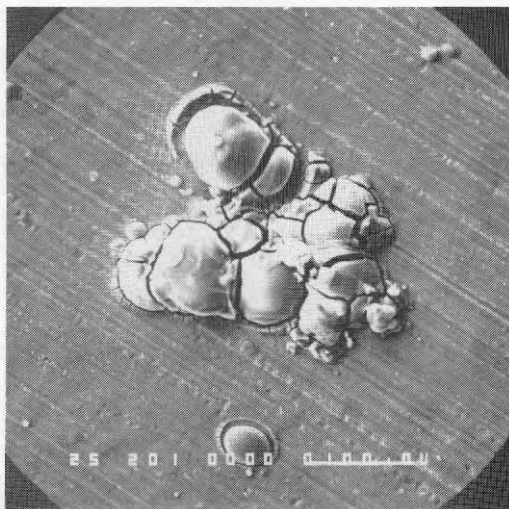
Figur 4.14. Prov av kopparlamell från provanläggning I efter 1 års drift. Utan filter före värmewäxlare.



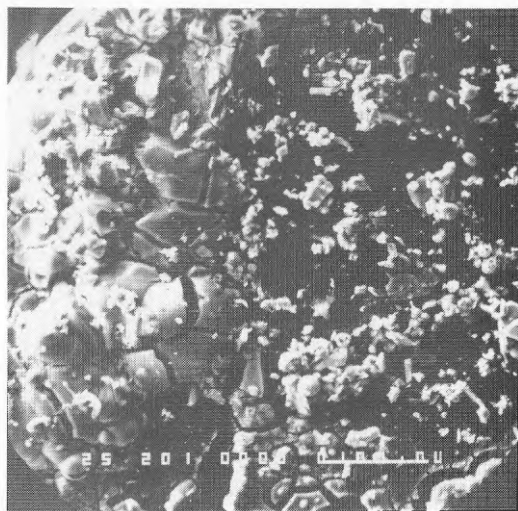
Figur 4.15. Prov av kopparlamell från provanläggning I efter 1 års drift. Med F45-filter före värmewäxlare.



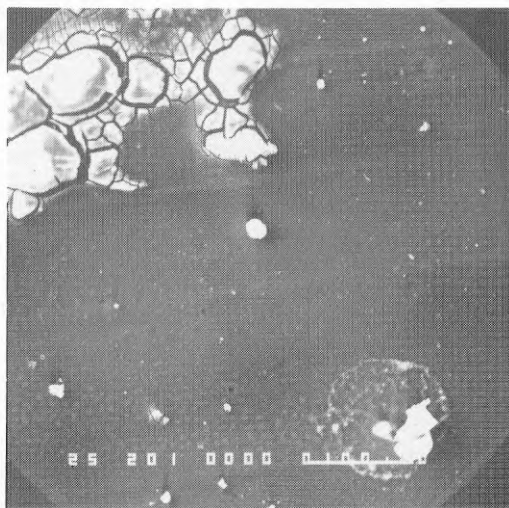
Figur 4.16. Prov av aluminiumlamell från provanläggning I efter 3 års drift. Utan filter före värmeväxlare.



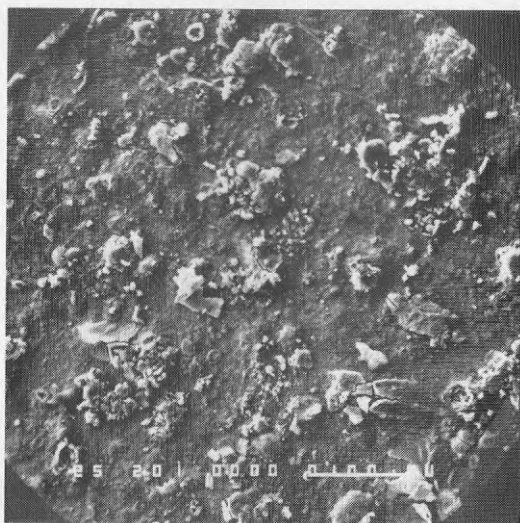
Figur 4.17. Prov av aluminiumlamell från provanläggning I efter 3 års drift. Med F45-filter före värmeväxlare.



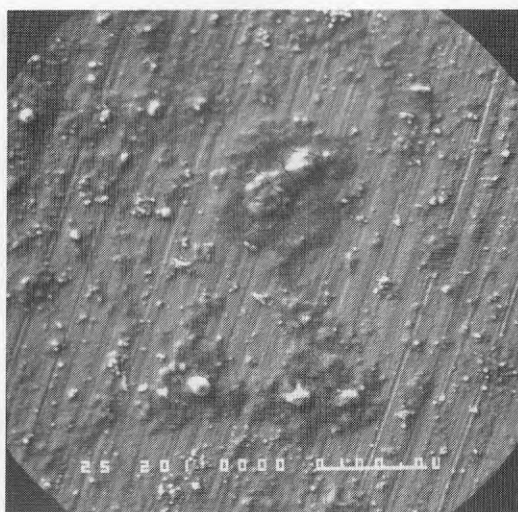
Figur 4.18. Prov av epoxilackerad aluminiumlamell från provanläggning I efter 3 års drift. Utan filter före värmväxlare.



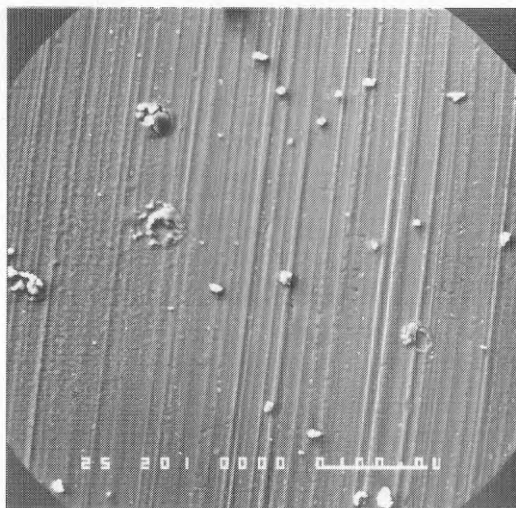
Figur 4.19. Prov av epoxilackerad aluminiumlamell från provanläggning I efter 3 års drift. Med F45-filter före värmväxlare.



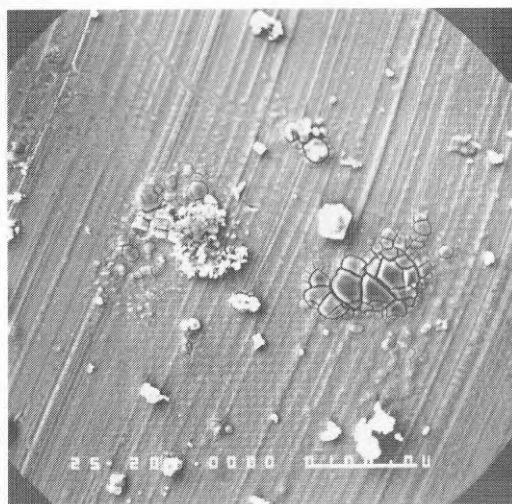
Figur 4.20. Prov av kopparlamell från provanläggning I efter 3 års drift. Utan filter före värmväxlare.



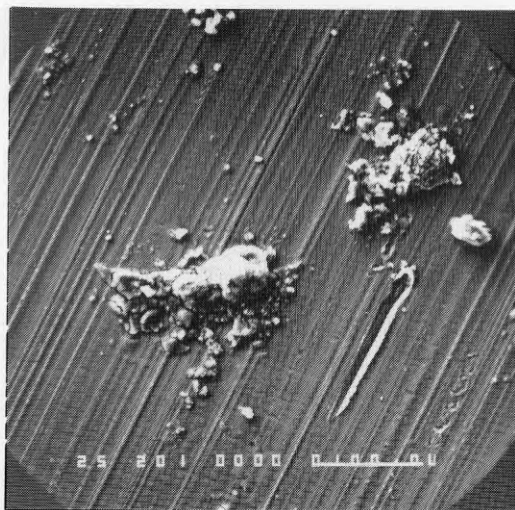
Figur 4.21. Prov av kopparlamell från provanläggning I efter 3 års drift. Med F45-filter före värmväxlare.



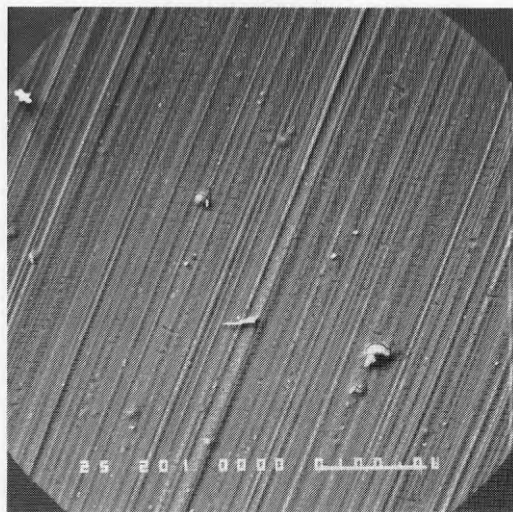
Figur 4.22. Prov från TA2 efter 3 års drift.



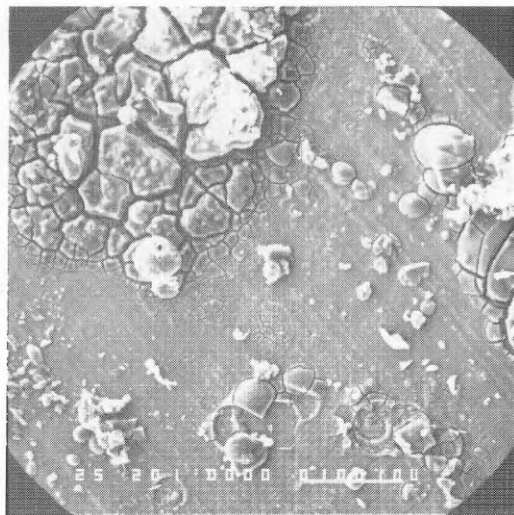
Figur 4.23. Prov från TA3 efter 3 års drift.



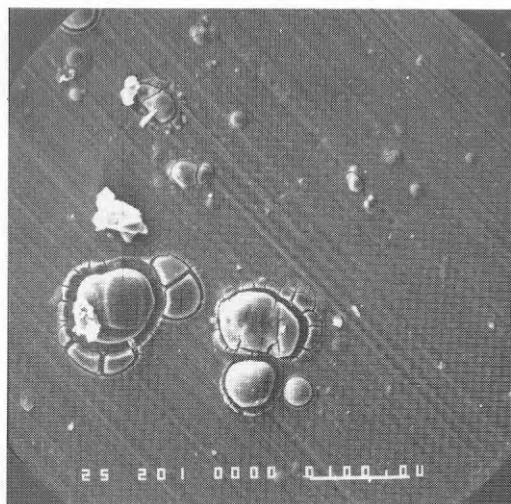
Figur 4.24. Prov från TA4 efter 3 års drift. Denna sida av aluminiumfolien har jämförelsevis kraftig beläggning av partiklar.



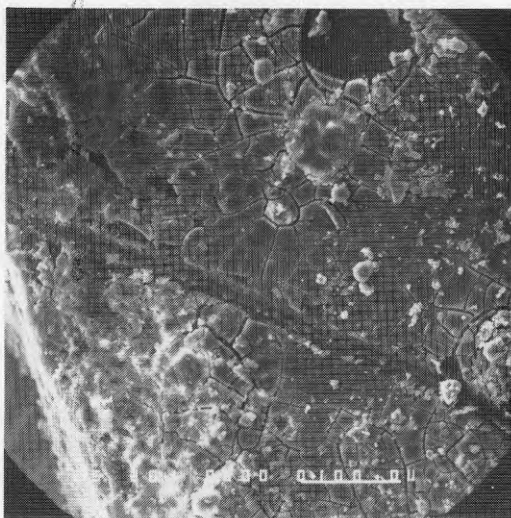
Figur 4.25. Prov från TA4 efter 3 års drift. Denna sida av aluminiumfolien har jämförelsevis liten beläggning av partiklar.



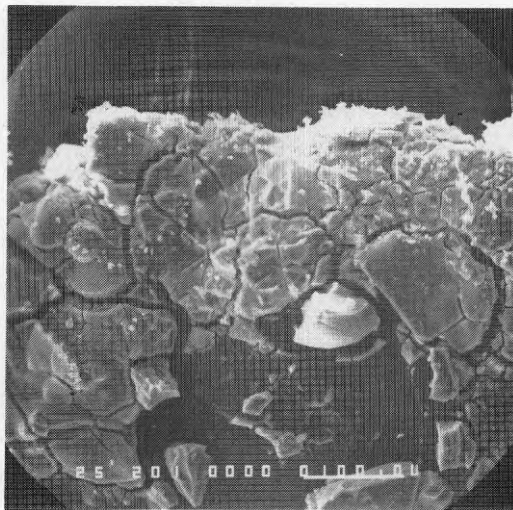
Figur 4.26. Prov av aluminiumlamell från provanläggning I efter 5 års drift. Utan filter före värmewäxlare.



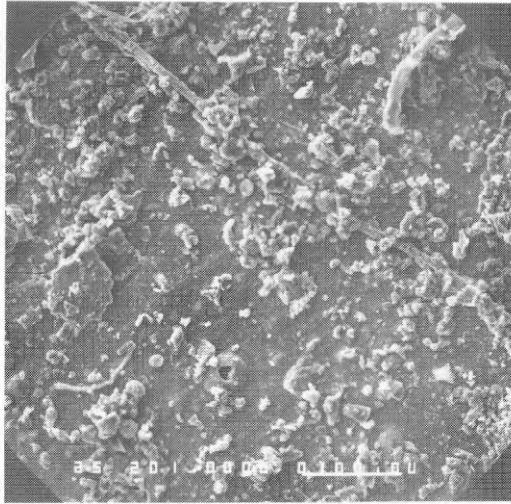
Figur 4.27. Prov av aluminiumlamell från provanläggning I efter 5 års drift. Med F45-filter före värmewäxlare.



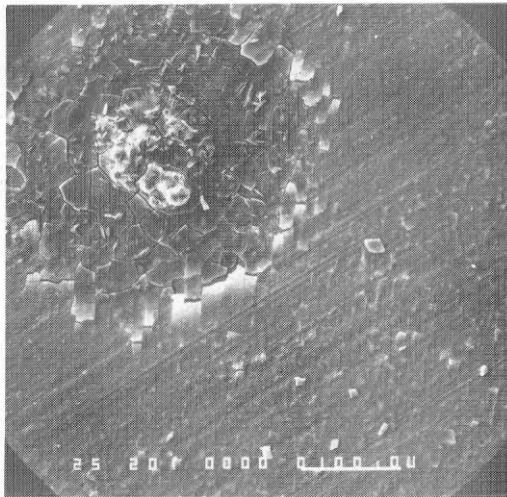
Figur 4.28. Prov av epoxilackerad aluminiumlamell från provanläggning I efter 5 års drift. Utan filter före värmeväxlare.



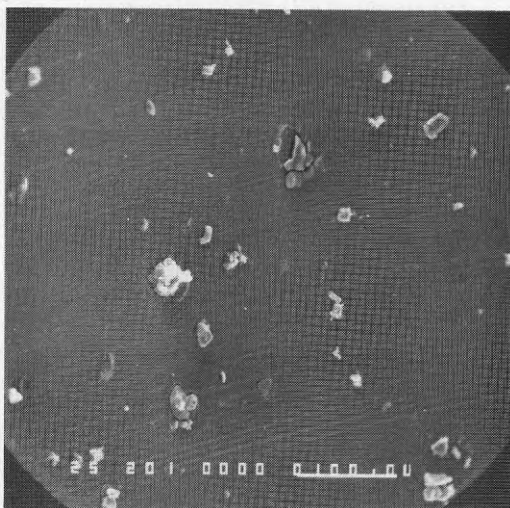
Figur 4.29. Prov av epoxilackerad aluminiumlamell från provanläggning I efter 5 års drift. Med F45-filter före värmeväxlare.



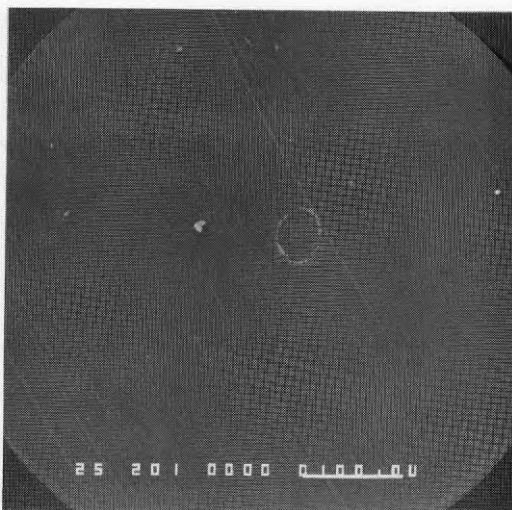
Figur 4.30. Prov av kopparlamell från provanläggning I efter 5 års drift. Utan filter före värmewäxlare.



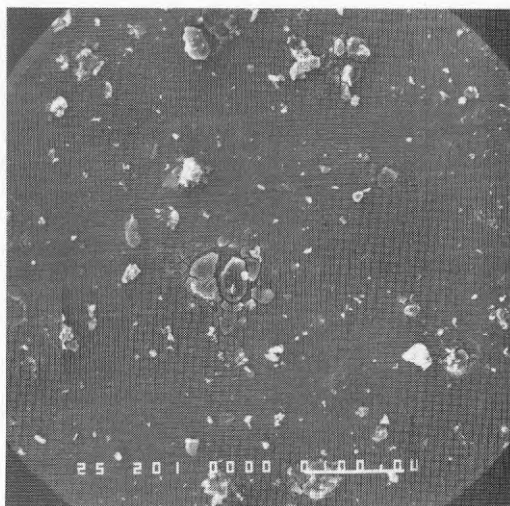
Figur 4.31. Prov av kopparlamell från provanläggning I efter 5 års drift. Med F45-filter före värmewäxlare.



Figur 4.32 Prov från TA2 efter 5 års drift. Bilden visar en typisk yta nära värmväxlarens front.



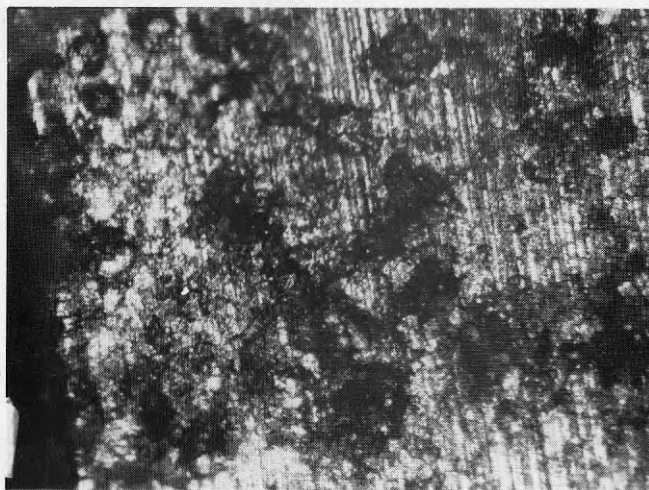
Figur 4.33. Prov från TA2 efter 5 års drift. Bilden visar en typisk yta på avståndet 100 mm från värmväxlarens front.



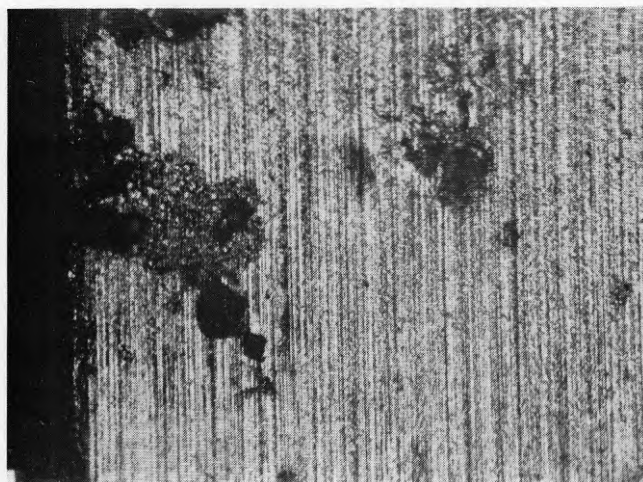
Figur 4.34. Prov från TA3 efter 5 års drift.



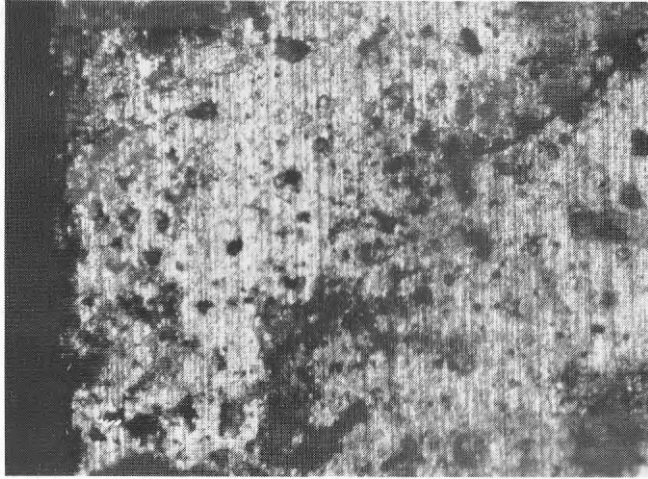
Figur 4.35. Prov från TA4 efter 5 års drift. Denna sida av aluminiumfolien har jämförelsevis kraftiga korrosionsangrepp.



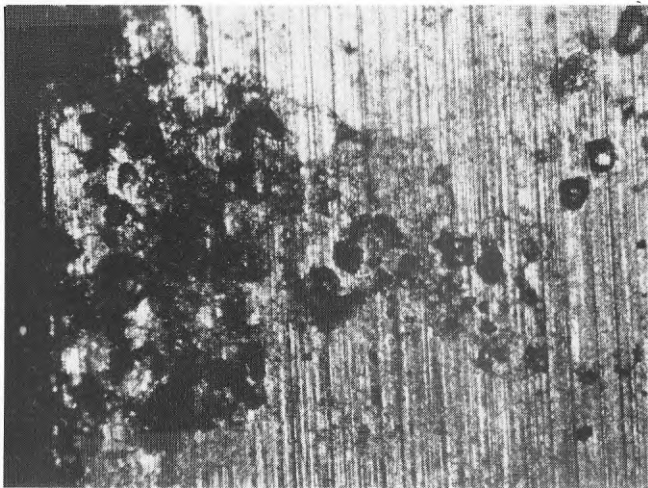
Figur 4.36. Etsad yta av aluminiumlamell från provanläggning I efter 5 års drift. Utan filter före värmeväxlare.



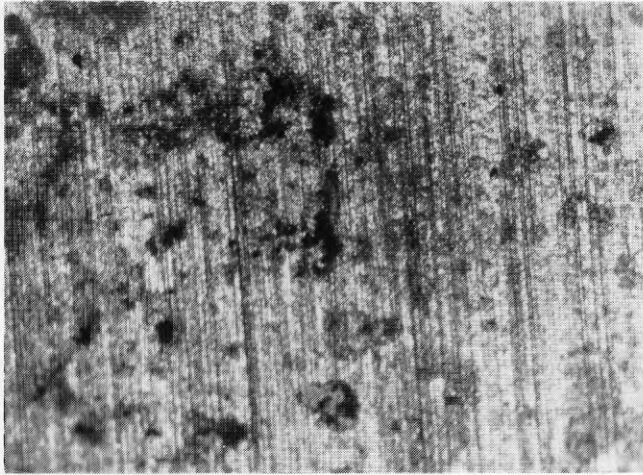
Figur 4.37. Etsad yta av prov från TA2 efter 5 års drift.



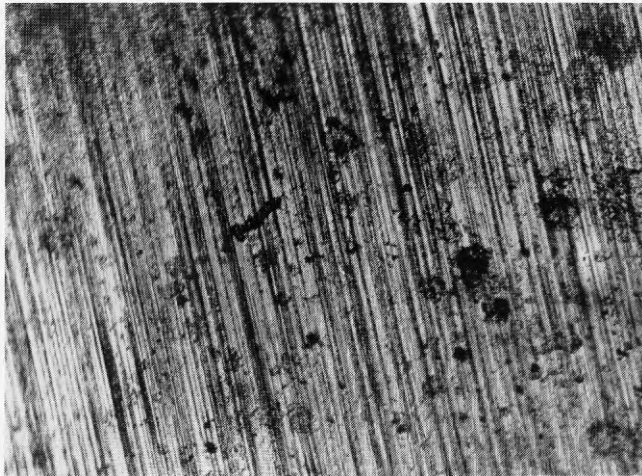
Figur 4.38. Prov från TA3 efter 5 års drift. Bilden, som tagits före etsning av ytan, visar området närmast foliens kant mot uteluften.



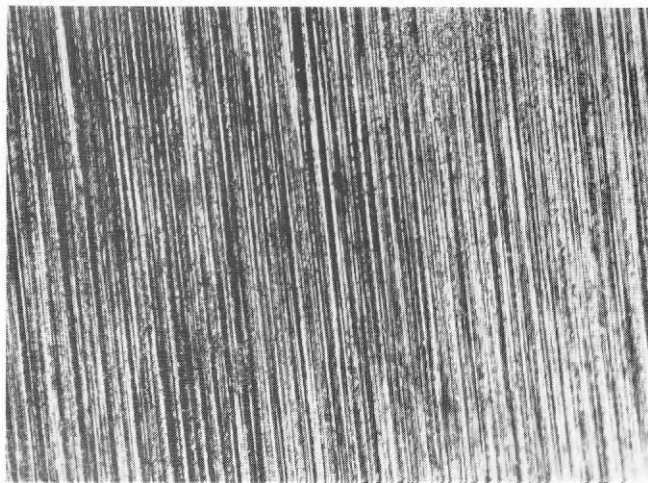
Figur 4.39. Etsad yta av prov från TA3 efter 5 års drift. Bilden visar området närmast foliens kant mot uteluften (jämför figur 4.38).



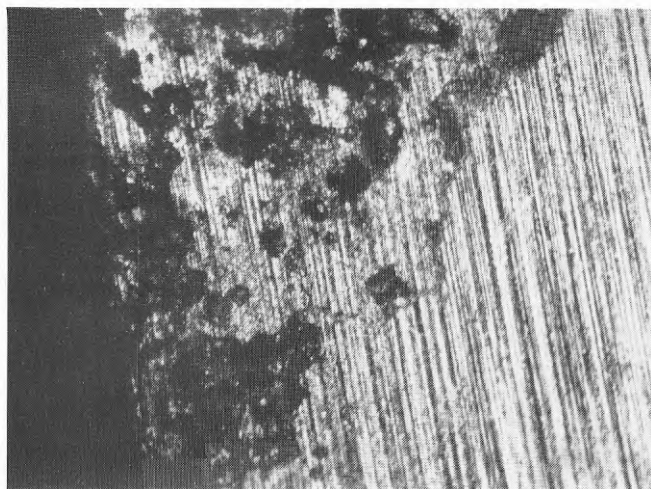
Figur 4.40. Etsad yta av prov från TA3 efter 5 års drift. Bilden visar ett område på avståndet 3 mm från foliens kant mot uteluften.



Figur 4.41. Etsad yta av prov från TA3 efter 5 års drift. Bilden visar ett område på avståndet 10 mm från foliens kant mot uteluften.



Figur 4.42. Etsad yta av prov från TA3 efter 5 års drift. Bilden visar ett område på avståndet 50 mm från foliens kant mot uteluften.



Figur 4.43. Etsad yta av prov från TA4 efter 5 års drift. Bilden visar området närmast foliens kant mot uteluften.

5 LUFTKVALITET PÅ PROVPLATSER

Som ovan framgått är riskerna för korrosionsskador till följd av föroreningar i utomhusluften högst varierande i olika delar av landet. Bedömningen av hur svåra korrosionsangrepp som kan förväntas på en viss ort underlättas väsentligt om föroreningshalterna för orten ifråga finns registrerade under en längre tidsperiod. Givetvis kan lokala förhållanden, som exempelvis att ventilationsanläggningen är belägen mycket nära ett industriområde, ändå innebära en betydande osäkerhet.

De föroreningar i utomhusluften som är av speciellt intresse från korrosionssynpunkt är bl a svaveldioxid, kvävedioxid, klorid och sulfat. Även halten av sot kan antas vara av stor betydelse i detta sammanhang. Både nedfallsmätningar och direkta luftanalyser brukar i regel göras för att bestämma halterna av föroreningar i utomhusluften. Oftast redovisas endast månads- eller årsmedelvärden, vilket dock kan anses tillräckligt för att korrosionsproblemen på en ort skall kunna bedömas.

För de platser där undersökningen av ventilationsvärmeväxlarna genomförts, dvs vid provanläggningarna i Göteborg och referensanläggningarna i Jönköping och Östersund, finns data tillgängliga om flera av de luftföroreningar som kan antas påverka korrosionsförloppen. Speciellt gäller detta för Göteborg, där mätvärden finns sammanställda för i stort sett hela den period fältproven pågått. I Jönköping och Östersund finns uppgifter att tillgå om halterna av svaveldioxid, kvävedioxid och sot under en begränsad del av provperioden.

5.1 Göteborg

Sedan lång tid tillbaka genomförs i Göteborg omfattande mätningar av luftens föroreningshalt på ett flertal platser inom kommunen. I årliga rapporter från Göteborgs miljö- och hälsoskyddsförvaltning har bl a halterna av svaveldioxid, kvävedioxid och sot redovisats, samt nedfallsmätningar av sulfat, nitrat, klorid, natrium och total stoftmängd (Luftföroreningar, 1987). Vid bedömningen av hur korrosionsriskerna förändrats från år till år är dessa mätningar mycket värdefulla, speciellt som flera av mätplatserna ligger nära provanläggningarna I och II. Exempelvis finns mätplatserna Krokäng, Masthuggstorget och Polhemsplatsen (HVN-GP) inom ett avstånd av högst 2,5 km från provanläggningarna.

Korrosionshastigheten hos aluminium förefaller som ovan nämnts att i hög grad påverkas av luftens svaveldioxidhalt. En stor del av svaveldioxiden på

västkusten kommer från källor i mellaneuropa, men i själva Göteborg är halterna av svaveldioxid i medeltal betydligt högre än i omgivningarna. Den minskning av oljeförbrukningen och den övergång till lågsvavliga oljor som skett inom kommunen har därför resulterat i en kraftig sänkning av svaveldioxidhalterna de senaste åren, jämför figur 5.1.

Halterna av sot i centrala Göteborg har också minskat betydligt under senare år, se figur 5.2. Detta minskar sannolikt risken för korrosionsskador på värmeväxlarmaterialet. Ämnen som kvarhåller fukt på en metallyta kan ju antas påskynda korrosionen.

Även halterna av kvävedioxid har minskat i Göteborg, men lokala trafikomläggningar i närheten av de olika mätplatserna försvårar tolkningen av resultaten, se figur 5.3. Halten av kvävedioxid, speciellt vid närvaro av svaveldioxid, tycks ha stor inverkan på korrosionshastigheten hos stål vid låga fukthalter (Johansson, 1984). Vilken inverkan kvävedioxid i kombination med andra luftföroreningar har på aluminium är dock oklart.

Av nedfallsmätningarna i Göteborg framgår bl a att de uppmätta halterna av natrium- och kloridjoner överensstämmer rätt väl, vilket tyder på att kloridnedfallet till stor del härrör från havssalt.

För vinterhalvåret 1986-87 anges i tabell 5.1 de halter av svaveldioxid, kvävedioxid och sot som uppmätts vid några av mätplatserna i Göteborg. För de fem platser där svaveldioxid och sot uppmätts uppgår halterna i medeltal till 16,6 respektive 9,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Medelvärdet av halterna av kvävedioxid uppgår till 35,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ på de fyra platser där mätvärden föreligger.

Tabell 5.1 Uppmätta halter av luftföroreningar i Göteborg under vinterhalvåret 1986-87.

Mätplats	Svaveldioxid ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Kvävedioxid ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Sot ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
HVN-GP	15	41	7
Krokäng	15	-	7
Gårda	-	42	-
Fjällbo	19	-	11
Backadal	-	31	-
Bjurslätt	18	-	13
Masthuggs- torget	16	28	10

5.2 Jönköping

För några av de luftföroreningar som kan påverka värmeväxlarmaterialens korrosion finns vissa data att tillgå även för Jönköping under den aktuella provperioden. Detta gäller i första hand svaveldioxid, kvävedioxid och sot. Oftast är de uppmätta halterna av dessa föroreningar lägre i Jönköping än på flertalet av mätplatserna i Göteborg.

Som exempel anges i tabell 5.2 de halter av svaveldioxid, kvävedioxid och sot som under vinterhalvåret 1986-87 uppmätts i Jönköping (Årsberättelse, 1987). Mätplatsen Hoppets torg ligger i centrala Jönköping, medan Södra Vätterbygdens folkhögskola ligger på höjderna väster om Jönköpings centrum. Ingen av dessa mätplatser ligger nära några kraftiga lokala föroreningskällor.

Det kan vara av intresse att jämföra de i tabell 5.2 angivna värdena med de halter som uppmätts i Jönköping under tidigare mätperioder. Man finner då att halten kvävedioxid i stort sett är oförändrad sedan föregående mätning under vinterhalvåret 1983-84. Även halterna av sot har i stort sett varit oförändrade sedan lång tid tillbaka, se figur 5.4. (Förslag till miljöskyddsprogram, 1988).

Svaveldioxidhalten i Jönköping har däremot minskat mycket kraftigt under den senaste 20-årsperioden och ligger nu klart under det riktvärde som Statens Naturvårdsverk angett, jämför figur 5.4. Att svaveldioxidhalterna sjunkit så kraftigt sammanhänger med fjärrvärmeutbyggnaden, den sänkta svavelhalten i eldningsoljan och de energibesparande åtgärder som vidtagits.

Tabell 5.2 Uppmätta halter av luftföroreningar i Jönköping under vinterhalvåret 1986-87.

Mätplats	Svaveldioxid ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Kvävedioxid ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Sot ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Hoppets torg	12,0	28,6	8,7
S:a Vätterbygdens folkhögskola	12,2	15,7	6,4

5.3 Östersund

De senaste värden på halterna av svaveldioxid och sot som finns tillgängliga för Östersund grundar sig på mätningar utförda under perioden januari-april 1982. På tre mätplatser har dygnsmedelvärden av dessa luftföroreningar bestämts under ett 80-tal dygn. Medelvärdena av de uppmätta halterna för hela mätperioden framgår av tabell 5.3 (Mätning av

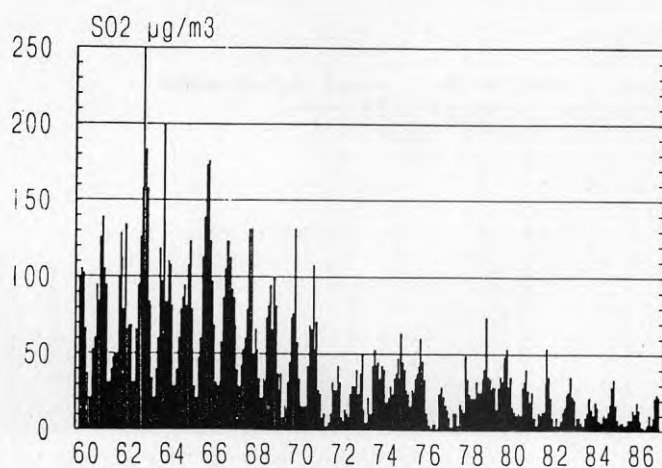
svaveldioxid och sot i utomhusluft i Östersund, 1982).

Halterna av kvävedioxid har uppmätts i Östersund inom ramen för ett större forskningsprojekt (Svanberg, 1985). Det medelvärde som erhållits för perioden januari 1983-mars 1984 uppgår till $23,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. I samma undersökning anges värdet $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ för Jönköping och värdena 49 och $43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ för två mätplatser i Göteborg.

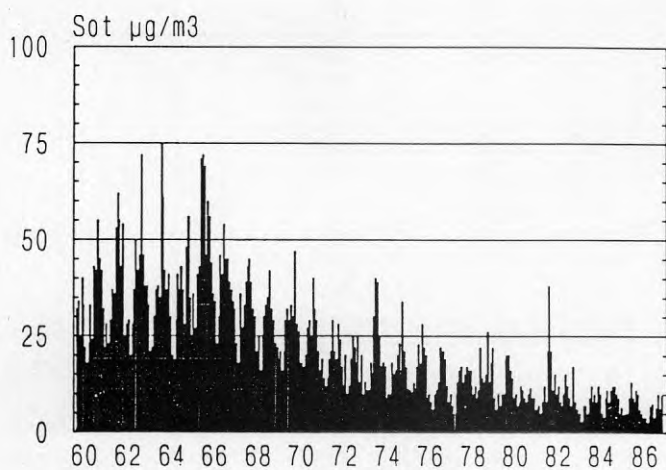
Vid den ena av referensanläggningarna i östersundsområdet, d v s referensanläggning II vid Industri-centra i Strömsund, bör utomhusluftens halter av föroreningar vara betydligt lägre än vad som anges i tabell 5.3. I detta fall torde de mätningar som utförts vid mätstationen i Bredkålen (väster om Strömsund) vara av större intresse. För perioden januari-april 1982 anges här halten av svaveldioxid till $2,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ och halten av sot till $2,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Mätning av svaveldioxid och sot i utomhusluft i Östersund, 1982).

Tabell 5.3 Uppmätta halter av luftföroreningar i Östersund under perioden januari-april 1982.

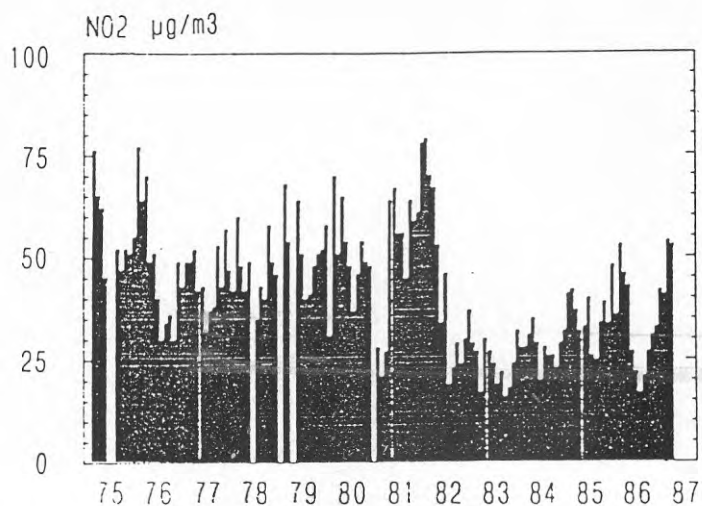
Mätplats	Svaveldioxid ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Sot ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Rådhusgatan 29	42,0	22,3
Semsåvägen 40	33,5	13,7
Fagerbacken 51	31,8	11,8



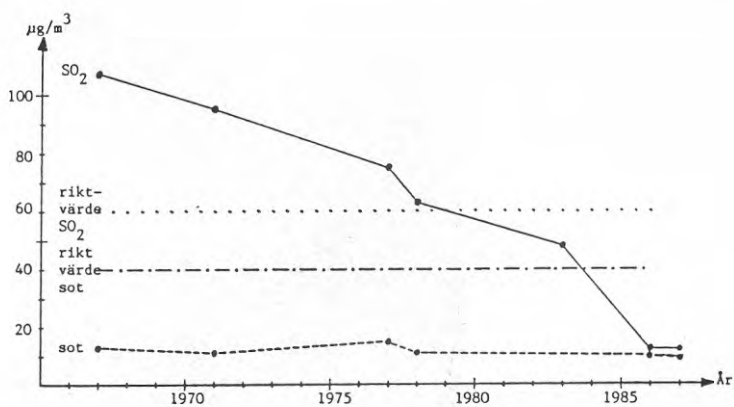
Figur 5.1. Svaveldioxidhalt i centrala Göteborg. Månadsmedelvärden under perioden 1960-87. (Luftföroreningar, 1987).



Figur 5.2. Sot halt i centrala Göteborg. Månadsmedelvärden under perioden 1960-87. (Luftföroreningar, 1987).



Figur 5.3. Kvävedioxidhalt vid mätstation HVN-GP i centrala Göteborg. Månadsmedelvärden under perioden 1975-87. (Luftföroreningar, 1987).



Figur 5.4. Halter av svaveldioxid och sot i Jönköping. (Förslag till miljöskyddsprogram, 1988).

De genomförda fältproven i Göteborg tyder på att värmeväxlare av standardutförande kan användas även på platser där uteluften har höga halter av korrosiva föroreningar. Efter 5 års drifttid är korrosionsangreppen fortfarande så obetydliga att värmeväxlarnas funktion inte påverkats. Sannolikt skulle värmeväxlarna kunna användas ytterligare 5 år utan problem.

En viktig slutsats av proven är dock att filtrering av uteluften på ett effektivt sätt kan minska risken för korrosionsskador. På platser med kustklimat är det därför önskvärt att skydda värmeväxlare med filter, i varje fall med grundfilter. Brukstiden för värmeväxlare av gängse utförande torde därigenom kunna förlängas högst avsevärt. Ett klart samband mellan stoftbeläggning och korrosion tycks nämligen finnas.

Om finfilter härvid ger ett påtagligt bättre skydd av värmeväxlare än grundfilter har inte kunnat klarläggas vid fältproven i Göteborg. I den anläggning där inverkan av finfilter och grundfilter direkt jämförts (provanläggning II) har i stället korrosionsangreppen på den värmeväxlare som skyddas av finfilter snarast varit kraftigare än angreppen på den värmeväxlare som skyddas av grundfilter. Möjligen kan detta förklaras med att den uteluft som tas in via finfiltret är jämförelsevis korrosiv, beroende på att uteluftsintaget i detta fall ligger närmare en hårt trafikerad lastplats än övriga uteluftsintag.

De prov som genomförts med lamellrörsvärmeväxlare av olika utföranden (provanläggning I) har visat att korrosionsangreppen på aluminiumlamellerna hos värmeväxlare av standardutförande kan reduceras i stor utsträckning om lamellerna skyddas av ett tunt skikt av epoxilack. Korrosionsangreppen på lamellerna begränsas då i första hand till de oskyddade klippkanterna mot uteluftssidan. Med tanke på de måttliga korrosionsangreppen även på aluminiumlameller utan lackskikt finns det dock knappast anledning att förse lamellrörsvärmeväxlare med extra ytskydd. Att skydda lamellrörsvärmeväxlare av standardutförande med uteluftsfilter torde i de flesta fall vara tillfylllest även i ett besvärligt kustklimat.

Proven med lamellrörsvärmeväxlare helt i koppar har visat att mindre korrosionsangrepp även uppträder på denna typ av värmeväxlare. Att en så pass beständig metall som koppar angrips tyder på att det är svårt att finna något alternativ (annan metall eller legering) som har nämnvärt bättre korrosionsegenskaper i den aktuella miljön än aluminium av den

kvalitet som är vanlig i värmeväxlare. Man skulle då behöva gå över till betydligt dyrare material som exempelvis rostfritt stål.

Både proven med lamellrörsvärmeväxlare i provanläggning I och proven med roterande värmeväxlare i provanläggning II har visat att stoftbeläggningen är koncentrerad till ytorna närmast värmeväxlarnas front. Även korrosionsangreppen på värmeväxlarytorna är lokaliserade till samma områden. Genom att skydda en värmeväxlares frontyta, t ex med ett lackskikt, bör det således vara möjligt att kraftigt begränsa korrosionsangreppen. Den i provanläggning II genomförda undersökningen av rotorser med kantskydd har visat att så också är fallet.

Genom att provanläggningarna i Göteborg inspekterats med endast 2 månaders intervall har det varit möjligt att noga följa utvecklingen av korrosionsförloppen på de olika värmeväxlarna under hela provperioden. Minst en gång per år har provbitar av värmeväxlaraterialet också tagits för analys på laboratorium. Därigenom har eventuella korrosionsangrepp kunnat upptäckas på ett mycket tidigt stadium.

Vid laboratorieanalyserna har såväl ljusmikroskop, svepelektronmikroskop som röntgenspektrometer använts. Tack vare analysmetodernas känslighet kunde man dra viktiga slutsatser om korrosionsförloppen på de olika värmeväxlarna redan efter 1-2 års drifttid. Av den anledningen hade fältproven möjligen kunnat slutföras på kortare tid än 5 år med acceptabel tillförlitlighet hos resultaten.

Undersökning i svepelektronmikroskop, i kombination med röntgenspektroskopi, har möjliggjort bestämningar både av korrosionsangreppens omfattning och korrosionsprodukternas sammansättning. Förekomsten av svavel och klor i korrosionsprodukterna indikerar här att den jämförelsevis höga halten av svaveldioxid och havssalt i uteluften medfört att värmeväxlaraterialet korroderat. Även de analyser som samtidigt gjorts av de främmande partiklar som fastnat på värmeväxlarytorna visar att dessa ofta består av havssalt, förutom av sotpartiklar och sand.

De undersökningar som gjorts i ljusmikroskop av etsade ytor av värmeväxlaraterialet har gett värdefull information om korrosionsangreppens fördelning över värmeväxlarnas yta. Hur snabbt korrosionsangreppen avtar med avståndet till värmeväxlarnas front är av speciellt intresse i detta sammanhang. Att frätgroparnas djup har kunnat bestämmas i samband med undersökningen i ljusmikroskop är också värdefullt.

Av de undersökningar som genomförts vid referensanläggningarna i Jönköping och Östersund, parallellt med värmeväxlarproven i Göteborg, framgår att korrosionsproblemen är jämförelsevis lindriga på

platser med inlandsklimat. Flertalet av värmväxlarna i de olika referensanläggningarna uppvisar inte några synliga korrosionsangrepp efter 5-7 års drift. Ingen av värmväxlarna har heller så kraftiga angrepp att det kan anses motiverat att försöka minska korrosionsrisken genom filtrering av uteluften. På platser med inlandsklimat är det därför tveksamt om det allmänt sett finns anledning att skydda värmväxlare med uteluftsfilter.

Sammanfattningsvis kan sägas att de resultat som framkommit både vid provanläggningarna i Göteborg och vid referensanläggningarna visar att korrosionsangreppen på de olika värmväxlarna varit av ganska ringa omfattning och ej så allvarliga som befarades då fältproven startade. Att värmväxlarna i provanläggningarna i Göteborg inte har kraftigare korrosionsangrepp kan till viss utsträckning bero på att halten av svaveldioxid minskat under de senaste åren. I kustklimat är det dock även fortsättningsvis viktigt att uteluften filtreras.

BILAGA 1. Noteringar från inspektioner vid provanläggning I.

Tabell B1:1. Inspektioner vid provanläggning I under första driftåret.

Datum	Aggregatets gångtid (h)	Filter- tryckfall (Pa)	Värmeväxlarens status	Anmärkning
83-06-13	-	35	Upstartning av provet	Värmeteknis- ka mätningar
		-	D:o	
83-08-19	260	*	Inga synl korrosionsangrepp	
		-	Viss stoftbeläggning	
83-10-18	477	*	Svaga korrosionsangrepp på de obehandlade Al- lamellernas framkant	
		-	Tydliga korrosionsangrepp på de obehandlade Al-lamellerna	
83-12-19	678	*	Svaga korrosionsangrepp på de obehandlade Al-lamellernas framkant	
		-	Tydliga korrosionsangrepp på de obeh Al-lamellernas fram- kant. Samtl lameller är dammiga	
84-02-27	769	42	Svaga korrosionsangrepp på obehandlad Al-lamell	Värmeteknis- ka mätningar
		-	Tydliga korrosionsangrepp på obehandlad Al-lamell Samtl lameller är dammiga	
84-04-16	812	*	Svaga korrosionsangrepp på obehandlad Al-lamell	Filterbyte
		-	Tydliga korrosionsangrepp på obehandlad Al-lamell. Svaga korrosionsangrepp på epoxi- lackad lamell. Samtliga lameller är dammiga	
84-06-19	994	40	Svaga korrosionsangrepp på obeh Al-lamell	Prov uttagna för analys Värmeteknik- niska mät- ningar
		-	Smutsiga lameller. Korro- sionsangrepp på Al-lamell	

* Aggregatet var ej i drift

BILAGA 1. Noteringar från inspektioner vid provanläggning I.

Tabell B1:2. Inspektioner vid provanläggning I under tredje driftåret.

Datum	Aggregatets gångtid (h)	Filter- tryckfall (Pa)	Värmeväxlarens status	Anmärkning
85-08-27	1923	*	Korrosionsangrepp på Al-lamell	
			-	Korrosionsangrepp på Al-lamell. Epoxilackad lamell är mycket smutsig
85-10-11	2092	*	Korrosionsangrepp på Al-lamell	
			-	Kraftiga korrosionsangrepp på Al-lamell Lamellerna är smutsiga
85-12-19	2158	*	Prickig beläggning på lamellerna, mest på Al-, minst på Cu-lamell	
			-	Mycket smuts på lamellerna Korrosionsangrepp på Al-lamell. Ärg på Cu-lamell, 2 - 3 cm från nedre kant
86-02-24	2159	*	Status lika 85-12-19	
			-	Status lika 85-12-19
86-04-22	2232	*	Status lika 85-12-19	Prov uttagna för analys
			-	Status lika 85-12-19
86-06-24	2481	25	Korrosionsangrepp på Al-lamell. Svaga korrosionsangrepp på epoxilackad lamell	Filterbyte
			-	Mycket smutsiga lameller

* Aggregatet var ej i drift

BILAGA 1. Noteringar från inspektioner vid provanläggning I.

Tabell B1:3. Inspektioner vid provanläggning I under femte driftåret.

Datum	Aggregatets gångtid (h)	Filter- tryckfall (Pa)	Värmeväxlarens status	Anmärkning
87-08-28	3413	*	Korrosionsangrepp på Al-lamell. Svaga korrosionsangrepp på epoxilackad lamell	
		-	Kraftiga korrosionsangrepp på Al-lamell. Svaga korrosionsangrepp på epoxilackad lamell Ärg på Cu-lamell	
87-10-26	3505	*	Korrosionsangrepp på Al-lamell Klippkanten på epoxilackad lamell har korrosionsangrepp	
		-	Mycket smuts mellan lameller Korrosionsangrepp på Al-lamell	
87-12-10	3708	*	Status lika 87-10-26	
		-	Korrosionsangrepp lika 87-10-26. Mycket damm	
88-03-02	3776	*	Korrosionsangrepp på Al-lamell	
		-	Kraftiga korrosionsangrepp på Al-lamell	
88-04-08	3904	33	Status lika 88-03-02	Prov uttagna för analys
		-	Status lika 88-03-02 Kraftig dammbeläggning	Tryckfalls-mätningar
88-06-28	4039		F45-filter installerades framför hela värmeväxlaren	Prov uttagna för analys

* Aggregatet var ej i drift

BILAGA 2. Noteringar från inspektioner vid provanläggning II.

Tabell B2:1. Inspektioner vid provanläggning II under första driftåret.

Datum	Aggregat	Gångtid (h)	Filtertryckfall (Pa)	Värmeväxlarens status	Anmärkning
83-06-13	TA2/FA2	433	27	Inga synliga korrosionsangrepp	Värmetekn mätningar
	TA3/FA3	203	-	D:o	
	TA4/FA4	250	40	D:o	
83-08-19	TA2/FA2	970	30	Inga synliga korrosionsangrepp	
	TA3/FA3	577	-	D:o	
	TA4/FA4	880	40	D:o	
83-10-18	TA2/FA2	1365	30	Inga synliga korrosionsangrepp	Prov ut- tagna för analys
	TA3/FA3	988	-	D:o	
	TA4/FA4	1329	40	D:o	
83-12-19	TA2/FA2	1676	10	Mycket återluft	
	TA3/FA3	1432	-	Mycket återluft Övre rotoryta dammig	
	TA4/FA4	1845	10	Mycket återluft Övre rotoryta dammig	
84-02-27	TA2/FA2	1676	-	Rotorn står stilla p g a ombyggnad av lokaler	
	TA3/FA3	1929	-	Övre rotoryta dammig Inga synliga korrosionsangrepp	
	TA4/FA4	2420	-	Mycket återluft Inga synliga korrosionsangrepp	
84-04-16	TA2/FA2	2173	30	Rotorn återstartad 84-03-22	Prov ut- tagna för analys Värmetekn mätningar Filterbyte
	TA3/FA3	2275	-	Inga synliga korrosionsangrepp	
	TA4/FA4	2861	30	D:o	

BILAGA 2. Noteringar från inspektioner vid provanläggning II.

Tabell B2:2. Inspektioner vid provanläggning II under tredje driftåret.

Datum	Aggregat	Gångtid (h)	Filtertryckfall (Pa)	Värmeväxlarens status	Anmärkning
85-06-19	TA2/FA2	5653	30	Smutsigt filter, filterbyte	
	TA3/FA3	7274	-	Övre rotoryta något dammig	
	TA4/FA4	6378	80	Filterbyte	
85-08-27	TA2/FA2	6184	25	Inga synliga korrosionsangrepp	
	TA3/FA3	7894	-	D:o Övre rotoryta mycket dammig	
	TA4/FA4	6901	65	Inga synliga korrosionsangrepp	
85-10-11	TA2/FA2	6560	30	Inga synliga korrosionsangrepp	
	TA3/FA3	8241	-	D:o Övre rotoryta dammig	
	TA4/FA4	7255	50	Inga synliga korrosionsangrepp	
85-12-19	TA2/FA2	7110	30	Inga synliga korrosionsangrepp	
	TA3/FA3	8751	-	Ett driftstopp på tillluftsfläkten	
	TA4/FA4	7852	50	Inga synliga korrosionsangrepp	
86-02-24	TA2/FA2	7668	-	Mycket återluft. Inga synliga korrosionsangrepp	
	TA3/FA3	9787	-	D:o Mycket återluft. Övre rotoryta dammig	
	TA4/FA4	8506	15	Inga synliga korrosionsangrepp. Mycket återluft	
86-04-22	TA2/FA2	8187	10	Mycket återluft. Inga synliga korrosionsangrepp	Prov uttagna för analys Värmetekn mätningar
	TA3/FA3	10536	-	Övre rotoryta mycket dammig	
	TA4/FA4	9077	55	Inga synliga korrosionsangrepp	

BILAGA 2. Noteringar från inspektioner vid provanläggning II.

Tabell B2:3. Inspektioner vid provanläggning II under femte driftåret.

Datum	Aggregat	Gångtid (h)	Filtertryckfall (Pa)	Värmeväxlarens status	Anmärkning
87-07-01	TA2/FA2	15930	30	Inga synliga korrosionsangrepp	
	TA3/FA3	17869	-	D:o	
	TA4/FA4	16688	50	D:o	
87-08-28	TA2/FA2	17333	40	Inga synliga korrosionsangrepp	
	TA3/FA3	19323	-	D:o	
	TA4/FA4	18142	60	D:o	
87-10-26	TA2/FA2	18713	-	Inga synliga korrosionsangrepp	
	TA3/FA3	20739	-	Övre rotoryta dammig men i övrigt intakt	
	TA4/FA4	19558	50	Inga synliga korrosionsangrepp	
87-12-10	TA2/FA2	19696	50	Inga synliga korrosionsangrepp	
	TA3/FA3	21762	-	Övre rotoryta dammig men i övrigt intakt	
	TA4/FA4	20581	30	Inga synliga korrosionsangrepp	
88-03-02	TA2/FA2	20819	50	Inga synliga korrosionsangrepp	
	TA3/FA3	23173	-	Vissa nötningsskador på den kantförstärkta sektorn. Rotorn i övrigt intakt	
	TA4/FA4	21999	10	Övre rotoryta dammig men i övrigt intakt	
88-04-08	TA2/FA2	21320	60	Inga synliga korrosionsangrepp	Prov uttagna för analys
	TA3/FA3	23801	-	Inga synliga korrosionsangrepp	Värmetekn mätningar
	TA4/FA4	22618	45	D:o	

BILAGA 3. Noteringar från inspektioner vid referensanläggningar.

Tabell B3:1. Inspektioner vid referensanläggningar i Jönköping under första, tredje och femte driftåret.

Datum	Referens- anläggning	Värmeväxlarens status
83-03-16	I	Inga synliga korrosionsangrepp
83-04-07	II	Inga synliga korrosionsangrepp
83-09-21	I	Ev några korrosionsangrepp på lamellernas framkant Viss stoftbeläggning
83-09-29	II	Inga synliga korrosionsangrepp
84-01-31	I	Svaga korrosionsangrepp på lamellernas framkant Lite stoftbeläggning
84-01-31	II	Inga synliga korrosionsangrepp
84-05-21	I	Svaga korrosionsangrepp på lamellernas framkant Lite stoftbeläggning
84-05-21	II	Inga synliga korrosionsangrepp
85-09-30	I	Lamellerna är dammiga trots rengöring i maj 1985 Svaga korrosionsangrepp på lamellerna
85-09-30	II	Inga synliga korrosionsangrepp
86-01-31	I	Tydliga korrosionsangrepp och beläggning på lamellerna
86-01-30	II	Inga synliga korrosionsangrepp
86-05-22	I	Tydliga korrosionsangrepp. Damm mellan lamellerna
86-05-23	II	Inga synliga korrosionsangrepp. Lite damm på ytan
87-10-22	I	Tydliga korrosionsangrepp. Tunt stoftskikt över hela ytan. Skall rengöras.
87-10-20	II	Inga synliga korrosionsangrepp. Något dammig yta
88-01-28	I	Tydliga korrosionsangrepp. Mycket stoft på lameller och rör Behöver rengöras på nytt
88-01-28	II	Inga synliga korrosionsangrepp. Dammig yta
88-05-31	I	Tydliga korrosionsangrepp. Damm mellan lamellerna trots rengöring
88-05-26	II	Inga synliga korrosionsangrepp. Dammig yta

BILAGA 3. Noteringar från inspektioner vid referensanläggningar.
 Tabell B3:2. Inspektioner vid referensanläggningar i Östersund.

Datum	Referens- anläggning	Värmeväxlarens status	Anmärkning
83-05-02	I	Inga synliga korrosionsangrepp	
83-05-03	II	Inga synliga korrosionsangrepp	Även två vvx installerade 1978 inspekterades
84-05-29	I	Inga synliga korrosionsangrepp	
84-05-30	II	Inga synliga korrosionsangrepp	<u>Vvx från 1978</u> Inga synliga korr-angrepp
85-06-03	I	Inga synliga korrosionsangrepp Obetydlig stoftbeläggning	
85-06-03	II	Inga synliga korrosionsangrepp	<u>Vvx från 1978</u> Inga synliga korr-angrepp
86-06-11	I	Inga synliga korrosionsangrepp Viss stoftbeläggning	
86-06-11	II	Inga synliga korrosionsangrepp	<u>Vvx från 1978</u> Inga synliga korr-angrepp
87-08-31	I	Inga synliga korrosionsangrepp Viss stoftbeläggning	
87-08-31	II	Inga synliga korrosionsangrepp	<u>Vvx från 1978</u> Inga synliga korr-angrepp
88-07-05	I	Ev vissa korrosionsangrepp Tydlig stoftbeläggning	
88-07-05	II	Inga synliga korrosionsangrepp	<u>Vvx från 1978</u> Inga synliga korr-angrepp

LITTERATUR

Johansson, L G, 1984, The corrosion of steel in atmospheres containing small amounts of SO₂ and NO_x. (Int. Congress on Metallic Corrosion, ²June 3-7, 1984, Toronto.)

Strindehag, O, Månsson, L och Wrangel, E, 1982, Värmeåtervinning ur korrosiv ventilationsluft. (Statens råd för byggnadsforskning.) Rapport 70. Stockholm.

Strindehag, O, 1986, Ventilationsvärmväxlare i kustklimat. VVS & Energi, nr 2, s. 49.

Svanberg, P-A och Grennfelt, P, 1985, Kvävedioxid i svenska tätorter - mätningar i 26 tätorter januari 1983-mars 1984. (IVL AB.) Göteborg.

Förslag till miljöskyddsprogram, 1988. (Miljö- och hälsoskyddsförvaltningen, Jönköpings kommun.)

Luftföroreningar, 1987. (Miljö- och hälsoskydds-förvaltningen, Göteborgs kommun.) Rapport 1984:6, 1985:4, 1986:8 och 1987:7.

Mätning av svaveldioxid och sot i utomhusluft i Östersund, 1982. (Hälsovårdsbyrån, Östersunds kommun.)

Årsberättelse, 1987. (Miljö- och hälsoskydds-nämnden, Jönköpings kommun.)

**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 821143-2 från
Statens råd för byggnadsforskning till Fläkt Evaporator AB,
Jönköping.**

R56: 1989

ISBN 91-540-5049-9

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6709056

**Abonnemangsgrupp:
W. Installationer**

**Distribution:
Svensk Byggtjänst
171 88 Solna**

Cirkapris: 43 kr exkl moms