

STIFTELSEN FÖR
**VÄRMETEKNISK
FORSKNING**

VÄRMETEKNIK MATERIALTEKNIK VATTENKEMI

BEDÖMNING AV VATTENSIDIGA BELÄGG-
NINGARS BETYDELSE FÖR DRIFTSÄKER-
HETEN HOS MODERNA INDUSTRIPANNOR
OCH KRAFTVERKSPANNOR

Ivan Falk

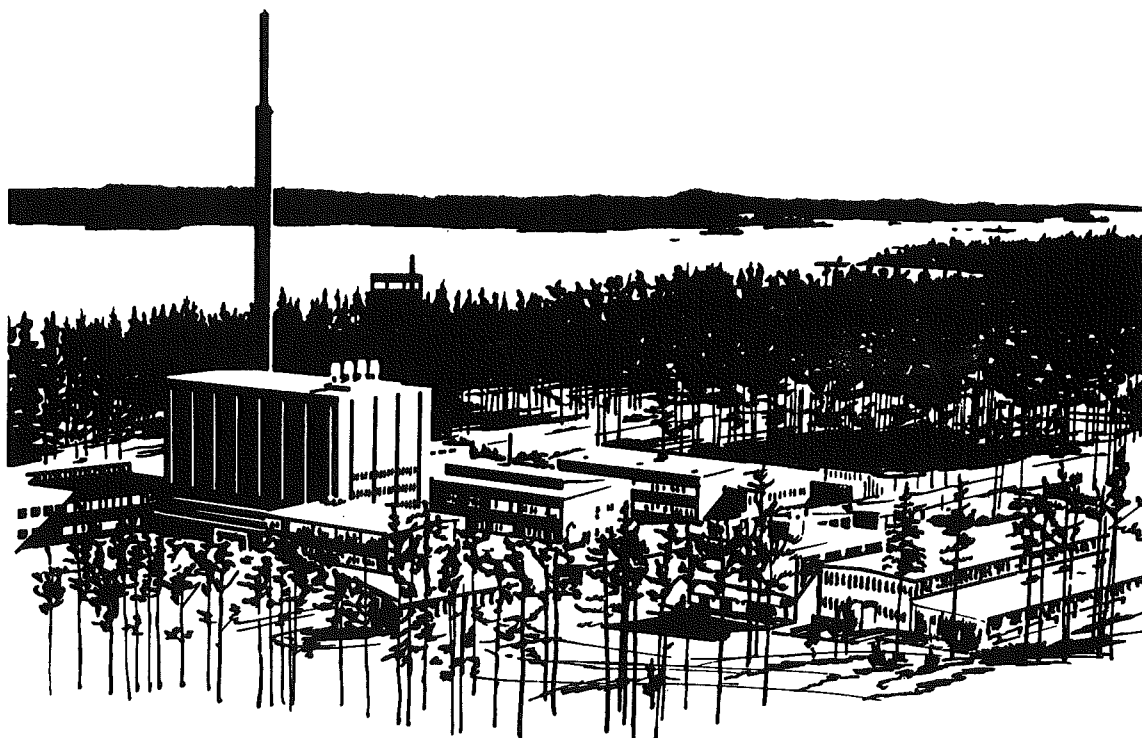
ARKIVEXEMPLAR

Stockholm, Juni 1982

BEDÖMNING AV VATTENSIDIGA BELÄGG- NINGARS BETYDELSE FÖR DRIFTSÄKER- HETEN HOS MODERNA INDUSTRIPANNOR OCH KRAFTVERKSPANNOR

Slutrapport. Projekt SVF K-25

Ivan Falk



BEGRÄNSAD DISTRIBUTION

1982-01-11

SVF-K25

Ivan Falk

The Thermal Engineering Research
Association of Sweden

ESTIMATION OF THE INFLUENCE OF WATERSIDE DEPOSITS
ON THE OPERATION AND RELIABILITY OF MODERN
INDUSTRIAL BOILERS AND POWER PLANT BOILERS

SUMMARY

The reliability and operation safety of modern steam boilers are to a large extent influenced by the amounts and properties of waterside deposits in the steam boiler tubes. The correlation between deposits and reliability is complex and hard to establish and so far general guide lines have been missing.

Measurements of tube wall temperatures and the amounts and properties of the corresponding waterside deposits have been collected in this report with the aim of clarifying this correlation and providing improved methods for judgement of the needs for chemical boiler cleaning.

The results show that the conventional measurements of deposit thickness and/or deposit weight per tube surface unit are more valuable if in addition deposit weight per deposit volume (density) is determined.

Measurements of tube wall temperatures are of the utmost importance. The wall temperatures are largely affected by the deposit density. The measurements are also affected by deposit descaling on the waterside as well as on the flue gas side. Measurements should therefore be taken on a large number of locations in the boiler.

1982-01-11

SVF K-25

Ivan Falk

Stiftelsen för Värmeteknisk
Forskning

BEDÖMNING AV VATTENSIDIGA BELÄGGNINGARS BETYDELSE
FÖR DRIFTSÄKERHETEN HOS MODERNA INDUSTRIPANNOR OCH
KRAFTVERKSPANNOR
Slutrapport

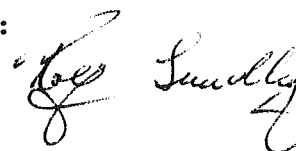
UTKAST

HUVUDINNEHÅLL

Vid mätningar och karakteriseringar av vattensidiga beläggningar i ångpannetuber föreligger ofta betydande svårigheter att bedöma beläggningarnas betydelse för driftsäkerheten. Några generella riktvärden, som anger kriterier för tidpunkten när kemisk rengöring av en panna skall utföras, saknas. I rapporten redovisas en sammanställning av resultat från tubväggstemperaturmätningar och mätningar på korresponderande vattensidiga beläggningar.

Av resultaten framgår att den konventionella bedömningen av beläggningar på tjockleks- och/eller ytviktsvärden bör även omfatta volymvikt eftersom detta mätvärde ger mera information om beläggningens inverkan på tubväggtemperaturen. Direkta mätningar av tubväggtemperaturen ger en utmärkt information för att upprätthålla en god driftsäkerhet. Mätvärdena påverkas av avlossningsfenomen hos beläggningar på såväl vatten- som rökgassidan hos tuberna varför ett stort antal mätpunkter krävs för att erhålla ett rättvisande resultat.

Godkänd av:



INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1.	BAKGRUND	3
2.	INLEDNING	5
3.	LITTERATUR	6
4.	INSAMLING AV MÄTDATA	8
4.1	Allmänt	8
4.2	Pannor	9
5.	RESULTAT	10
5.1	Panna A	10
5.2	Panna B	10
5.3	Panna C1	10
5.4	Panna C2	11
5.5	Panna D1	11
5.6	Panna D2	11
6.	DISKUSSION	13
7.	SLUTSATSER	15
8.	ACKNOWLEDGEMENTS	16
	REFERENSFÖRTECKNING	17
	TABELLER	18
	FIGURER	20

1982-01-11

1. BAKGRUND

På vattensidan av eldstadstuber i ångpannor sker en ständig tillväxt av oxidskiktens tjocklek. Efter en viss drifttid uppnår de så höga värden att pannan måste rengöras kemiskt för att tubmaterialtemperaturen ska hållas inom tillåtna värden. Tillväxthastigheten varierar inom vida gränser främst beroende på stora skillnader i värmebelastningen på materialet. Även pannvattnets innehåll av föroreningar, som deponerar i skikten och bildar beläggningar inverkar i hög grad på tillväxthastigheten. Utvecklingen mot högre värmebelastning och högre panntryck, dvs högre kylvattentemperatur för materialet, har medfört att marginalerna för acceptabel beläggningstjocklek minskat avsevärt. Därför har även kravet på tillförlitliga mätmetoder av beläggningstjockleken ökat. Vanligen mäts tjockleken på tvärsnitt av uttagna tubprov. Mätvärdena får dock ofta stor spridning på grund av oxidnoder inåt i metallen och ojämna skikt varför bedömningen av tillväxten per år och behovet av kemisk rengöring försvåras. Genom att bestämma ytvikten över en viss tubyta erhålls däremot tillförlitligare värden jämfört med mätpunkter från en linje genom beläggningen. För att skapa underlag för bedömning av vilka metoder som är lämpliga vad gäller noggrannhet och lämplig tidsåtgång utfördes därför jämförande provningar av tillgängliga mekaniska, kemiska och elektrokemiska metoder inom projekt SVF K06 "Avskalningsmetoder för bestämning av oxidmängden på vattensidan av panntuber". Arbetet inleddes med en litteraturstudie (1) som innefattade en inventering av befintliga metoder. Med denna studie

1982-01-11

som underlag utvaldes sedan de metoder som tillämpades vid laboratorieförsöken. Resultaten redovisas i SVF-rapport 113 (2).

Föreliggande projekt, som är ett komplement till K06, innefattar sammanställning och bearbetning av data från praktisk drift av ångpannor, i vilken användningen och nyttan av mätvärden på beläggningar belyses.

1982-01-11

2. INLEDNING

Vid mätningar och karakteriseringar av vattensidiga beläggningar i ångpannetuber föreligger ofta betydande svårigheter att bedöma beläggningarnas betydelse för driftsäkerheten. Några generella riktvärden som anger maximalt tillåten beläggningsmängd och vid vilken tidpunkt kemisk rengöring av pannan skall utföras saknas. Beläggningarnas värmeisolerande egenskaper och lokala variationer i värmebelastningen på pannans eldstadsytor är i många fall svåra att bedöma. Direkta mätningar av tubväggtemperaturen framstår således som det enklaste och bästa sättet att erhålla mätvärden användbara för att upprätthålla en hög driftsäkerhet. I föreliggande redovisning av driftdata ingår därför tubväggtemperaturen som huvudparameter. Bearbetningen av uppgifterna har inriktats på att visa sambandet mellan temperaturökning och beläggningstillväxt under drifttiden mellan utförda kemiska rengöringar av ångpannorna.

1982-01-11

3. LITTERATUR

Omfattande arbeten har tidigare utförts i syfte att belysa såväl tillväxtmekanismer som värmeisolerande egenskaper hos vattensidiga beläggningar i ångpannetuber. I referens (3) och (4) presenterar Ahrnbom bland annat begreppet kritisk drifttid som avser den tidpunkt då tubväggtemperaturen uppnår ett maximalt tillåtet värde. I Tabell 1 visas den nomenklatur som behandlas i artiklarna och en matematisk ekvation för beräkning av den kritiska drifttiden. I referens (3) konstaterar författaren att då värdena på ett stort antal variabler i beräkningen varierar inom vida gränser torde den enklaste och säkraste metoden för att indikera den kritiska drifttiden vara direkt mätning av tubväggtemperaturen.

I referens (5) redovisas resultat från experimentella värmetekniska försök med tuber uttagna från sodahuspannor. Artiklen är en sammanfattning av slutrapporten från Stiftelsen Svensk Cellulosa-forsknings Matarvattenkommitté "Studier rörande vattensidiga beläggningar i sodahuspannor". Bland resultaten finns exempel på beläggningar som redan vid en ytvikt på 10 mg/cm^2 ger upphov till en tubyttemperatur på 330°C om trycket är 40 bar och värmebelastningen $150 \text{ Mcal/m}^2 \cdot \text{h}$. För sodahuspannor är denna temperatur kritisk då den utgör gräns för begynnande gassidig korrosion. För flertalet av beläggningarna krävdes dock ytvikter på upp till 100 mg/cm^2 för att samma tubtemperatur skulle uppnås. Spridningen i mätvärdena var stor, vilket delvis orsakades av en mycket komplicerad sammanställning hos beläggningarna. I Figur 1 visas exempel på hur temperaturförhöjning ökar med värmebelastningen vid olika beläggningstjocklekar.

1982-01-11

Resultaten från andra försök med syntetiska beläggningar i en experimentkrets redovisas i referens (6). Som exempel på resultaten från denna undersökning visas i Figur 2 värmeresistiviteten hos olika beläggningar. Spridningen hos mätvärdena är även här som framgår av figuren mycket stor.

I nämnda rapport (6) framhålls att beläggningarnas porositet har stor inverkan på den temperaturförhöjning de orsakar i tubväggen. I flertalet av de undersökta beläggningarna i ref (6) var volymvikten $0.5-2 \text{ g/cm}^3$. Dessa värden kan jämföras med volymvikten hos de beläggningar som ingick i projekt K06 (2) och som i huvudsak kom från kraftverkspannor. I Figur 3 har volymvikten avsatts mot tjockleken. Som framgår av figuren är alla värden utom ett högre än 2.5. Det avvikande låga värdet gäller för beläggningen i en industripanna.

Sammanställningen av tubväggtemperaturen i föreliggande projekt omfattar mätvärden från kraftverkspannor. Det bör således beaktas att beläggningarna i de tuber som temperaturmätningarna gjorts på sannolikt haft högre volymvikt än de beläggningar som tidigare undersökts i ref (5) och (6).

1982-01-11

4. INSAMLING AV MÄTDATA

4.1 Allmänt

Tubväggtemperaturen mäts med termoelement vars lödställen har en position i mitten av godset och mitt på den tubhalva som är vänd inåt eldstaden. Termoelementen är placerade i de mest värmebelastade partierna av eldstadsväggarna. Antalet mätpunkter är i en del pannor ca 10 st och i andra ca 40 st.

Avläsning av temperaturen sker vid maxlast eller vid en speciellt vald last något under maxlast. Dessa driftkonditioneringsmätningar görs till exempel en eller två gånger per månad eller en gång var 1000:e drifttimme. Vid en anläggning gjordes mätningen över mikrodator, vilket möjliggjorde momentan tillgänglighet på värdena samt även möjlighet för arkivering på magnetband.

Uttagning av tubprover för kontroll av vattensidiga beläggningar har i likhet med temperaturmätningar gjorts på de högst värmebelastade områdena i eldstaden. Förutsättningarna är således goda för att mätdata på beläggningarna är representativa för de temperaturer som uppmätts. Det kan dock inte uteslutas att beläggningsmängden varierar inom snäva områden beroende på lokala skillnader i värmebelastning runt en brännare eller en brännarrad. Bearbetningen av insamlat material har därför inriktats på att samordna temperatur- och beläggningsvärden som positionsmässigt var så lika som möjligt. I ett av fallen har också en precisering uppnåtts och omfattar värden på beläggningar från samma höjd i näraliggande tuber till termoelementen. En stor del av insamlad temperaturdata har utelämnats då de ej visat någon förändring i tiden och då inga korresponderande beläggningsvärden funnits tillgängliga.

1982-01-11

4.2 Pannor

Mätdata har insamlats från fyra valda kraftverk som vid förfrågan haft tillgängliga uppgifter på både beläggningssvärden och tubväggtemperaturer. Av det bearbetade materialet redovisas sammanställda mätvärden från följande pannor:

Be- teckning	Panntyp	Kraftverk, panna
A	Dompanna, tvångscirkulation	Norrköping, P1
B	Genomströmningspanna	Uppsala, P1
C1	Dompanna, tvångscirkulation	Karlshamn, P1
C2	Dompanna, tvångscirkulation	Karlshamn, P3
D1	Dompanna, tvångscirkulation	Stenungsund, P4
D2	Dompanna, tvångscirkulation	Stenungsund, P3

1982-01-11

5. RESULTAT

5.1 Panna A

Temperaturförhöjningen över mättnadstemperaturen (363°C) och beläggningens tjocklek är i Figur 4 avsatt mot drifttiden. Efter leveransbetningen kördes pannan ca 20000 timmar innan första kemiska rengöringen utfördes. Under driftperioden kunde ingen tydlig förhöjning av tubväggtemperaturen märkas. Rengöringen motiverades av för tjocka beläggningar i pannbottentuberna. Efter rengöringen sjönk temperaturen med ca 5°C i tre väggar men ökade med samma belopp i fjärde väggen. Efter ca 30000 timmars drifttid har temperaturen redan ökat med ca 10°C i två väggar och är oförändrad i övriga två väggar. Tillväxten av beläggningar kan ej utläsas som en kontinuerlig ökning av temperaturen.

5.2 Panna B

Beläggningstjocklek och temperaturförhöjning har avsatts mot drifttiden i Figur 5. Kemisk rengöring utfördes efter 30000 timmars drift. Efter rengöringen sjönk maxvärdena med ca 10°C bortsett från ett extremvärde. Under påföljande period inträffade en överhettningsskada som troligen orsakades av otillräckligt vattenflöde genom den aktuella tuben. Av säkerhetsskäl gjordes en kemisk rengöring under nästa revisionsstopp. Denna medförde en sänkning av maxvärdena med ca 4°C . Något entydigt samband mellan tillväxt av beläggning och temperaturökning kan ej utläsas av kurvorna.

5.3 Panna C1

Temperatur- och beläggningsvärden har avsatts mot drifttiden i Figur 6. Kemisk rengöring utfördes efter 20000 timmars drift. Åtgärden motiverades av porösa beläggningar (35 mg/cm^2) och höga tubväggstemperaturer. Rengöringen medförde en sänk-

1982-01-11

ning av maxvärdena med ca 18°C . Under påföljande driftperiod på 10000 timmar ökade maxvärdena med ca 10°C . Förutsatt att tillväxthastigheten hos beläggningen varit lika hög under denna senare period har beläggningen ökat från 0 till 17 mg/cm^2 samtidigt som temperaturen ökat ca 10°C .

5.4 Panna C2

Om tillväxthastigheten hos beläggningen antas vara konstant erhålls en ökning på 15 mg/cm^2 under 10000 timmar, vilket framgår av Figur 7. Detta motsvaras av en ökning hos tubväggtemperaturen på ca 8°C , dvs ungefär lika proportionerlig ökning som hos panna C1.

5.5 Panna D1

Flera överhettningsskador inträffade under pannans första driftår som följde av för tjocka och porösa beläggningar. Efter första rengöringen, sedan termoelement installerats, erhöles en temperatur-sänkning på ca 30°C . De borttagna beläggningarna var vid detta tillfälle mycket tjocka och ytvikter på 105 mg/cm^2 uppmättes. Den därefter bildade och borttagna beläggningen på 40 mg/cm^2 medförde ej någon märkbar förändring på tubväggtemperaturen. Kurvorna visas i Figur 8.

5.6 Panna D2

I likhet med kurvorna för panna D1 föreligger inget tydligt samband mellan tillväxten av beläggningar och ökning i temperatur, vilket framgår av Figur 9. Kemisk rengöring företogs sedan alltför höga värden på beläggningsmängden uppmätts.

En detaljgranskning och ytterligare bearbetning av uppgifterna över panna D2 gjordes för att studera sambandet mellan beläggningstillväxt och temperaturökning. I Figur 10 har temperaturen i

1982-01-11

tre tuber avsatts mot drifttiden. Uppmätta beläggningstvikter i näraliggande tuber har införts med lika symboler för resp tub. Tubproven har uttagits i samma höjdläge och som längst åt sidan i 5:e tuben från termoelementpositionerna. Den kemiska rengöringen medförde en sänkning av temperaturerna på 10-20°C i de tre tuberna. I en av tuberna steg värdet lika mycket som sänkningen på 2000 timmar. I de andra två var stigningen något mindre. Efter denna korta tid planade samtliga tre värden ut. Även hos dessa speciellt sammanförda uppgifter föreligger ingen direkt följsamhet mellan tillväxt av beläggning och temperaturökning.

I Tabell 2 har den avlästa temperaturen vid provtagningstillfällena införts tillsammans med de från tubproven uppmätta ytvikterna. Tabellvärdena har avsatts mot varandra i Figur 11. Bortsett från 1 av 12 värden erhålls som framgår av kurvorna en viss ökning med ökande ytvikt.

1982-01-11

6. DISKUSSION

Enligt litteraturuppgifter i (3, 4, 5, 6) kan tillväxten av vattensidiga beläggningar på värmeöverförande ytor följas genom mätning av tubväggtemperaturen. Som framgår av de här redovisade uppgifterna från praktisk drift av kraftverkspannor är det endast i vissa fall som detta samband framträder. I flera andra fall förmedlar temperaturdata endast svårtydbar information. En rikligare bestyckning av pannorna med termoelement samt datorbehandling av mätvärdena förefaller vara orsaken till att ifrågavarande samband är klart framträdande vid två av de sex aktuella pannorna.

Temperaturen i tubväggen påverkas av vattenflödet genom tuben. En tillväxt av magnetit i dysorna, vars area är dimensionerad för ett visst flöde, inverkar således på mätvärdena. Speciellt i samband med pannstarter, men även under normal drift, kan avlossning av magnetit i dysor medföra väsentliga förändringar i tubväggtemperaturen. Det kan ej heller uteslutas att avlossning av beläggningar på såväl vatten- som rökgassidan vid termoelementen bidragit till spridningen av mätvärdena. Dessa mätsvårigheter motiverar således ett stort antal mätpunkter för att värdena i sin helhet skall ge rättvisande information.

Av presenterade värden över beläggningar är tillväxten i flertalet fall linjär. En vanligt förekommande anvisning i litteraturen är att maximala värdet för tillåten beläggning i kraftverkspannor är 40 mg/cm^2 eller $100 \text{ }\mu\text{m}$. Av redovisade data kan ej utläsas något som motiverar tillämpningen av dessa värden. Sannolikt har den enskilda beläggningens porositet i högre grad betydelse för

1982-01-11

tubväggtemperaturen än skiktjockleken och beläggningstycket. En beläggning med ytvikten 40 mg/cm^2 med hög volymvikt kan således förorsaka ett ringa bidrag medan en beläggning med lägre ytvikt och låg volymvikt kan förorsaka ett större bidrag till temperaturförhöjningen i tubväggen.

Värdena i Tabell 2 visar att temperaturökningen uppgår till $2.0 (\pm 0.6) ^\circ\text{C/mg/cm}^2$, vilket vid en volymvikt på 2.5 g/cm^3 kan uppskattas till ca $1^\circ\text{C}/\mu\text{m}$. En sådan behandling och framställning av mätvärdena är dock diskutabel framför allt med hänsyn till att temperaturökningen kan övergå i en exponentiell funktion då beläggningens ytvikt överskrider ett visst värde.

1982-01-11

7. SLUTSATSER

- Vattensidiga beläggningar har stor betydelse för driftsäkerheten hos ångpannor eftersom de genom försämrad kylning av tubmaterialet kan orsaka överhettningsskador.
- Generella riktvärden för maximalt tillåten beläggningsmängd kan ej anges eftersom riktvärdena förutsätter kända värden på lokala värmebelastningar över eldstadsväggarna. Partier mellan och ovanför brännarrader är ofta väsentligt högre värmebelastade än eldstaden i sin helhet.
- Bedömningen av vattensidiga beläggningars farlighet vad gäller förhöjning av tubväggtemperaturen bör grundas inte enbart på tjocklek och/eller ytvikt utan även dess värmeisolerande egenskap och då i första hand dess porositet.
- Direkta mätningar av tubväggtemperaturen ger en utmärkt information för att upprätthålla god driftsäkerhet. Värdena visar eventuella förändringar i kylvattenflödet och även försämrad kylning som följd av vattensidiga beläggningar.
- Temperaturmätvärdena påverkas av avlossningsfenomen på såväl vatten- som rökgassidans beläggningar varför spridningen av mätvärdena blir stor. För att erhålla rättvisande värden krävs ett stort antal mätpunkter framför allt i de högsta värmebelastade partierna i pannans eldstad.
- Vattensidiga beläggningars tillväxt bör övervakas genom mätningar av tubväggtemperaturen. För definitivt ställningstagande om åtgärder, då mätvärdena närmat sig de maximalt tillåtna, bör beläggningarnas tjocklek, ytvikt och volymvikt bestämmas.

1982-01-11

8. ACKNOWLEDGEMENTS

Författaren tackar Lars Ahrnbom, ÅF Energikon-
sult, för värdefulla synpunkter i projektarbetet
och för arbetet som kontaktman i kemigruppen
inom SVF. Dessutom framförs ett tack till kemis-
terna vid kraftverken i Norrköping, Uppsala,
Karlshamn och Stenungsund, vilka välvilligt bi-
dragit med driftdata till projektet.

1982-01-11

REFERENSFÖRTECKNING

1. DAHL, L
Avskalningsmetoder för bestämning av
oxidmängden på vattensidan av panntuber.
SVF-rapport 74, juni 1979.
2. FALK, I
Avskalningsmetoder för bestämning av
oxidmängden på vattensidan av panntuber.
SVF-rapport 113, juni 1981.
3. AHRNBOM, L
Die Verhütung kritischer Wandtemperaturen
in Verdampferrohren.
Mitt VGB 52 (1972), H 4, S 326-333.
4. AHRNBOM, L
Aspekte der Ausbildung von kristallinen
Ablagerungen auf damperzeugenden Ober-
flächen.
Mitt VGB 55 (1975), H 4, S 239-249.
5. STRANDBERG, O, DAHL, L, ARVESEN, J
Surface temperature of kraft mill boiler
tubes.
Sv Papperstidning 75 (1972):5, p 175.
6. KELÉN, T, ARVESEN, J
Temperature increments from deposits on
heat transfer surfaces: the thermal re-
sistivity and thermal conductivity of
deposits of magnetite, calcium hydroxy
apatite, humus and copper oxides.
AE-459, 1972.

1982-01-11

Tabell 1

Nomenklatur och ekvation för beräkning av
kritisk drifttid enligt ref (1).

NOMENKLATUR

$A-A$	= Phasengrenzoberfläche zwischen ionogenem Zustand und initialer Umwandlung kontaminierender Metallionen	ΔQ°	= molare Reaktionsenergie für die Umwandlung: kontaminierende Metallionen $\rightarrow$ kontaminierender Feststoff - ΔQ°
A_n	= Oberfläche der zugeführten Ionen n an der Grenzfläche A-A	Δq	= während der Zeit t entwickelte Reaktionsenergie für die Masse m des kontaminierenden Metalls
$B-B$	= Phasengrenzoberfläche zwischen Endzustand kontaminierender Metallionen in Umwandlung und völlig entwickeltem kristallinen Zustand des kontaminierenden Metalls	R_d	= Wachstumsrate kristalliner Ablagerungen; Masse in der Flächen- und Zeiteinheit
ΔB	= während der Zeit t entwickelte Bindungsenergie der Masse m des kontaminierenden Metalls	$\rightarrow$	
C	= Konzentration makropartikulärer kontaminierender Substanz im Kesselwasser an einem beliebigen Querschnitt der Verdampferrohre	τR_m	= molare Reaktionsgeschwindigkeit für beliebiges Metallion beliebiger Temperatur T K bei der Umwandlung: kontaminierende Metallionen $\rightarrow$ kontaminierender Feststoff - ΔQ°
C_0	= Konzentration makropartikulärer kontaminierender Substanz im Trommelwasser	r	= spezifische Verdampfungswärme
TC^0_p	= molare isobare Wärmekapazität des kontaminierenden Metallions	T	= absolute Temperatur K
ΔTC^0_p	= Abfall der molaren isobaren Wärmekapazität der Ausgangs- bzw. Endproduktion bei einer beliebigen Reaktion	t	= beliebige Betriebszeit bzw. Beiwerte
E_A	= molare Aktivierungsenergie für die Umwandlung kontaminierender Metallionen $\rightarrow$ kontaminierender Feststoff - ΔQ°	$t^{\tau x}_m$	= Reaktionszeit bei beliebiger Temperatur T K für vollständige molare Umwandlung: kontaminierende Metallionen $\rightarrow$ kontaminierender Feststoff - ΔQ°
e	= Grundzahl der natürlichen Logarithmen	x	= Dampfgehalt in einem beliebigen Querschnitt der Verdampferrohre
f	= Funktion	β	= Exponent in Gleichung (13)
G	= Transportgeschwindigkeitsdichte der makropartikulären kontaminierenden Substanz bei der Grenzoberfläche A-A	Δ	= Änderung in einer gegebenen unabhängigen Variable
ΔT_G°	= molare standardfreie Bildungsenergie eines beliebigen Verlaufs bei beliebiger Temperatur T K in einem thermodynamisch geschlossenen System	δ_d	= Dicke des wasserseitigen Belages (Mankinaschicht)
ΔT_H°	= molare Reaktionsenthalpie eines beliebigen Verlaufs bei beliebiger Temperatur T K in einem thermodynamisch geschlossenen System	δ_m	= Wanddicke
$\Delta_{298}H^\circ$	= molare standard Reaktionsenthalpie eines beliebigen Verlaufs bei 25°C in einem thermodynamisch geschlossenen System	δ_{ox}	= Dicke der Metalloxidschicht (Schikorr-Schicht)
$K_1 \dots K_{10}$	= Proportionalitätskonstanten bzw. Beiwerte	φ	= Wärmestromdichte (Wärmebelastung)
K_A	= Proportionalitätskonstante für Anlagerung von makropartikulärer kontaminierender Substanz gemäß der vorgeschlagenen Gleichung für die Wachstumsrate R_d	$\Delta\varphi(N)$	= Wachstumsrate je Flächeneinheit der Wärmekapazität der kontaminierenden Metallionen innerhalb der überhitzten Grenzschicht an einer siedenden Belagsoberfläche mit beliebigem Temperaturabfall $\Delta\vartheta_s$
K_{Ba}	= Proportionalitätskonstante in Batschinskis Beziehung für die Oberflächenspannung σ	x_d	= Wärmeleitfähigkeit eines Belages (Mankina-Schicht), bezogen auf die Masse je Flächeneinheit
K_M	= Proportionalitätskonstante in Mankinas Gleichung für die Wachstumsrate R_d	ρ'	= Dichte der Wasserphase beliebiger Temperatur
K_t	= negativer Temperaturgradient für die Löslichkeit jedes kontaminierenden Feststoffes	ρ''	= Dichte der Dampfphase beliebiger Temperatur
K_{We}	= Proportionalitätskonstante für Beziehung für $\Delta\vartheta_s$ gemäß Weatherhead	σ	= Oberflächenspannung zwischen Wasserphase und Dampfphase
M	= Anlagerungsgeschwindigkeitsdichte des kontaminierenden Metalls in der Übergangszone	$\Delta\vartheta_d$	= Temperaturabfall innerhalb eines wasserseitigen Belages (Mankinaschicht)
m	= Masse des während einer beliebigen Zeit t in der Übergangszone angelagerten kontaminierenden Metalls je Flächeneinheit	$\Delta\vartheta_m$	= Temperaturabfall in der Rohrwand
N	= Transportgeschwindigkeitsdichte der kontaminierenden Metallionen in übersättigtem Zustand bei der Grenzoberfläche A-A	$\Delta\vartheta_{ox}$	= Temperaturabfall in der Metalloxidschicht (Schikorr-Schicht)
n	= Masse der während einer beliebigen Zeit t an die Grenzoberfläche A-A transportierten kontaminierenden Metallionen in übersättigtem Zustand je Flächeneinheit	ϑ_m	= rauchgasseitige Temperatur der Rohrwand
ΔO	= während der Zeit t entwickelte Zuordnungsenergie der Masse m des kontaminierenden Metalls	ϑ_s	= Siedepunkt des Wassers an der in Betracht stehenden siedenden Oberfläche
$K_J + L$	= Proportionalitätskonstante für $\Delta\vartheta_s$ gemäß Jens und Lottes	$\Delta\vartheta_s$	= Temperaturabfall innerhalb der überhitzten Grenzschicht an einer siedenden Belagsoberfläche
$K_{We} + B_a$	= Proportionalitätskonstante für $\Delta\vartheta_s$ gemäß einer Kombination für σ gemäß Weatherhead und Batschinski	ϑ_w	= Temperatur der siedenden Belagsoberfläche im Zustand des Kernsiedens
p	= Kesseldruck, absolut	x	= kritischer Wert
$P(d)$	= Wahrscheinlichkeit für Anlagerung von makropartikulärer kontaminierender Substanz an der Grenzoberfläche A-A		

$$t^x = K_M^{-1} \cdot \Delta\vartheta_d^x \cdot (1 - x) \cdot x_d \cdot C_0^{-1} \cdot (\varphi^x)^{-3}$$

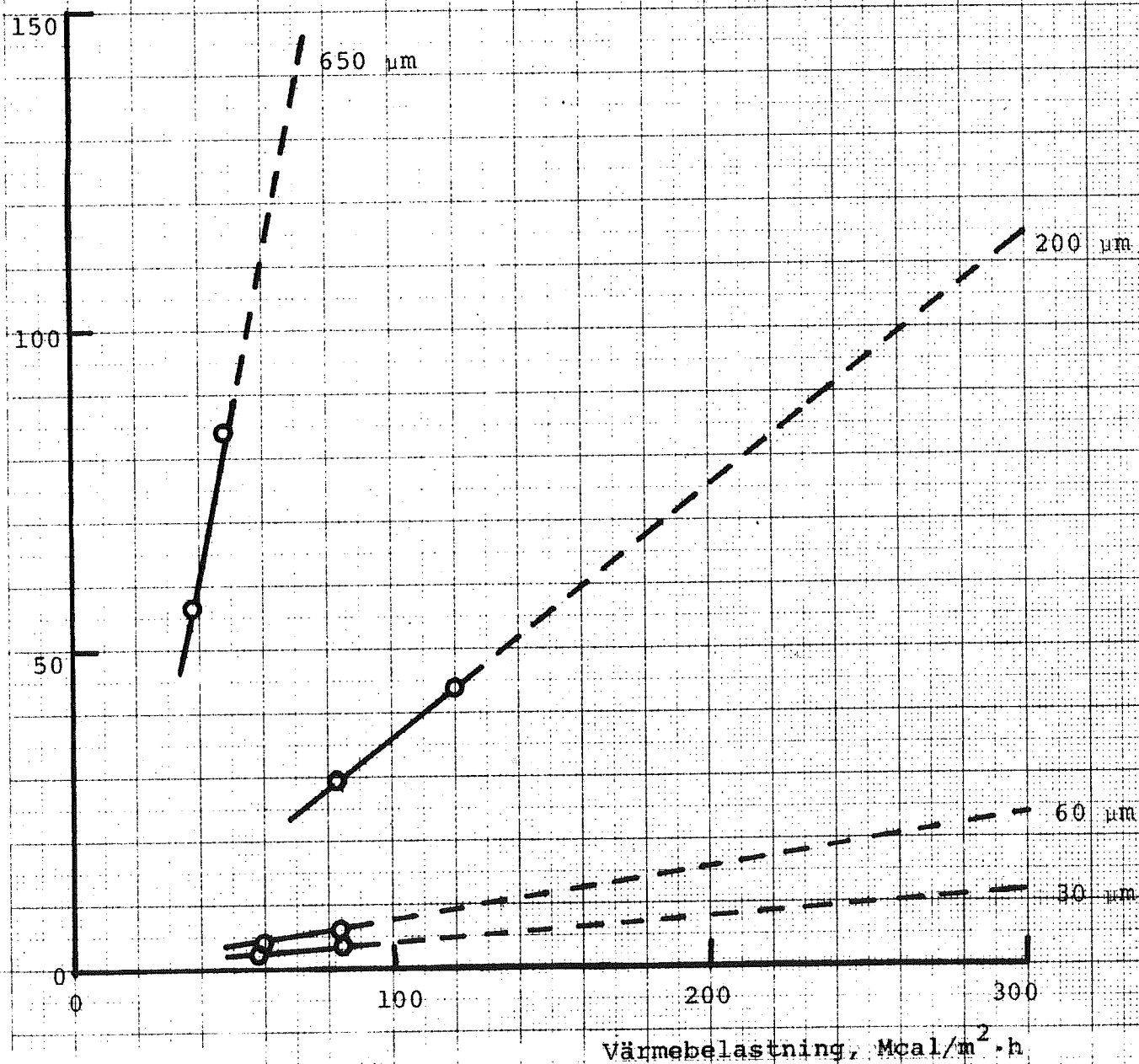
1982-01-11

Tabell 2

Temperaturförhöjning i tre tuber och beläggningsmängden i näraliggande tuber.

Drifttid tim	Tub 1095			Tub 1213			Tub 737		
	Tub	mg/cm ²	°C	Tub	mg/cm ²	°C	Tub	mg/cm ²	°C
4600	1094	15	46	-	-	-	-	-	-
5000	-	-	-	1214	19	42	-	-	-
7900	1094	22	47	-	-	-	-	-	-
8300	1094	25	48	-	-	-	-	-	-
9800	1094	38	48	1214	32	44	733	25	51
13000	1092	35	40	1208	35	44	-	-	-
Kemisk rengöring									
6500	1097	19	47	1212	16	41	731	18	47

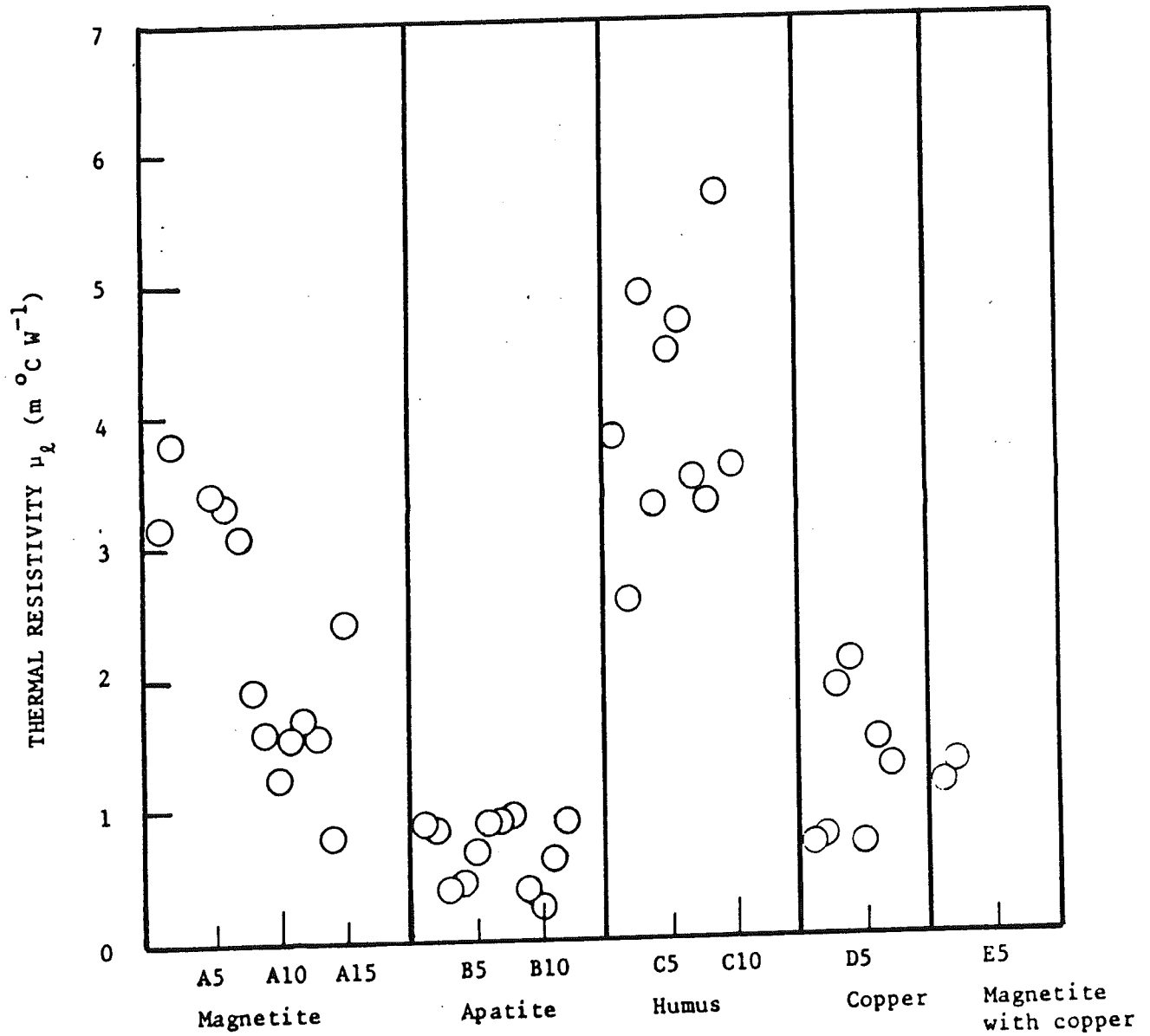
1982-01-11

Temperaturförhöjning
vid 40 bar, °C

Figur 1

Hypotetiskt förlopp för temperaturförhöjningen i tubväggen vid olika beläggningstjocklekar avsatt mot värmebelastningen enligt ref (4).

1982-01-11

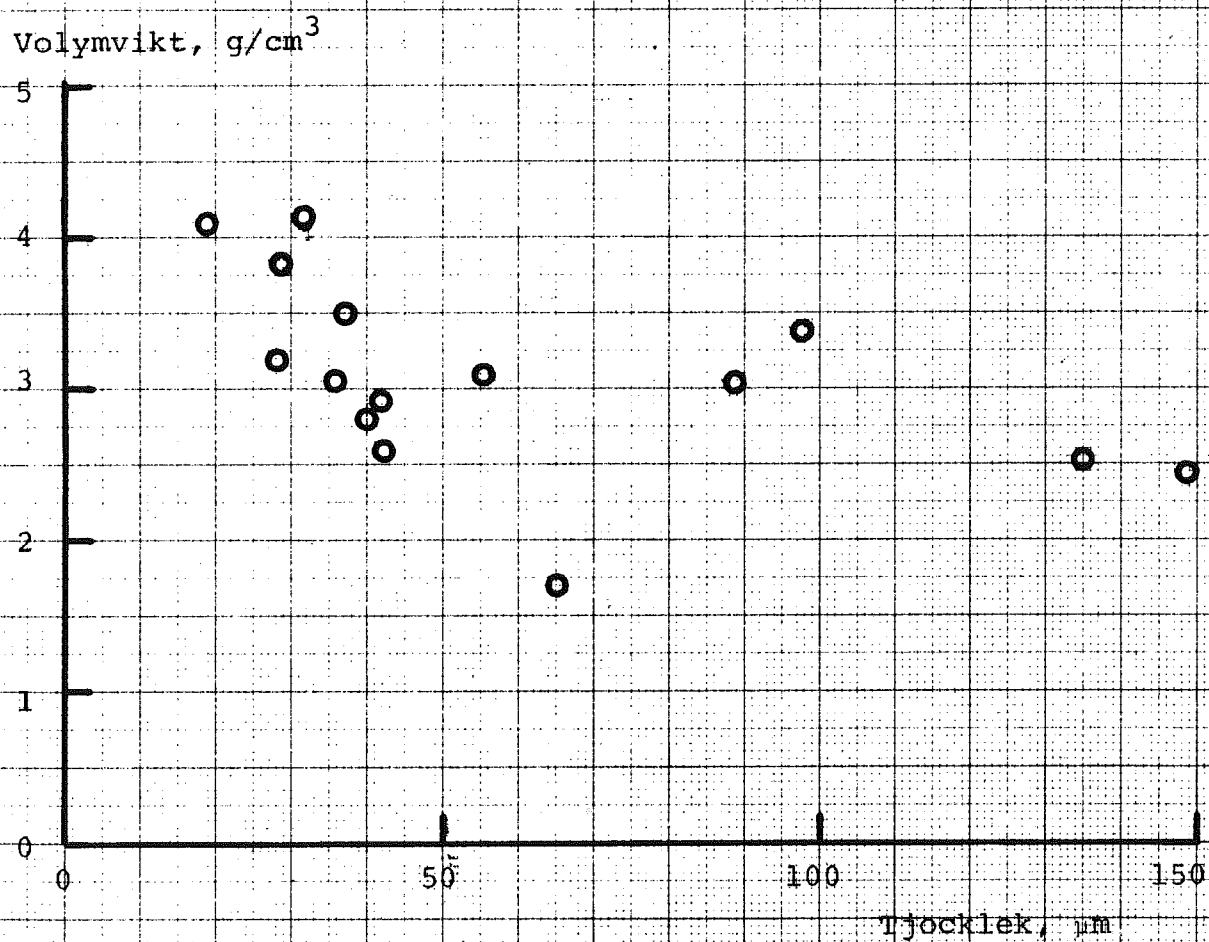


Survey plot of the thermal resistivity μ_{ℓ} for the investigated deposits.

Figur 2

Värmeresistiviteten hos olika typer av beläggningar enligt ref (4). μ_{ℓ} = temperaturfallet över beläggningen dividerad med värmebelastning och beläggningstjocklek.

1982-01-11

Figur 3

Volymvikten avsatt mot tjockleken hos beläggningar som undersökts i ref (2).

1982-01-11

Temperaturförhöjning, °C Frontvägg

60
50
40

Bakvägg

60
50
40

Vänster vägg

60
50
40

Höger vägg

60
50
40(174)
µm

Eldstadsväggar

Pannbotten

µm

50
40
30
20
10
0

12

18

6

12

18

24

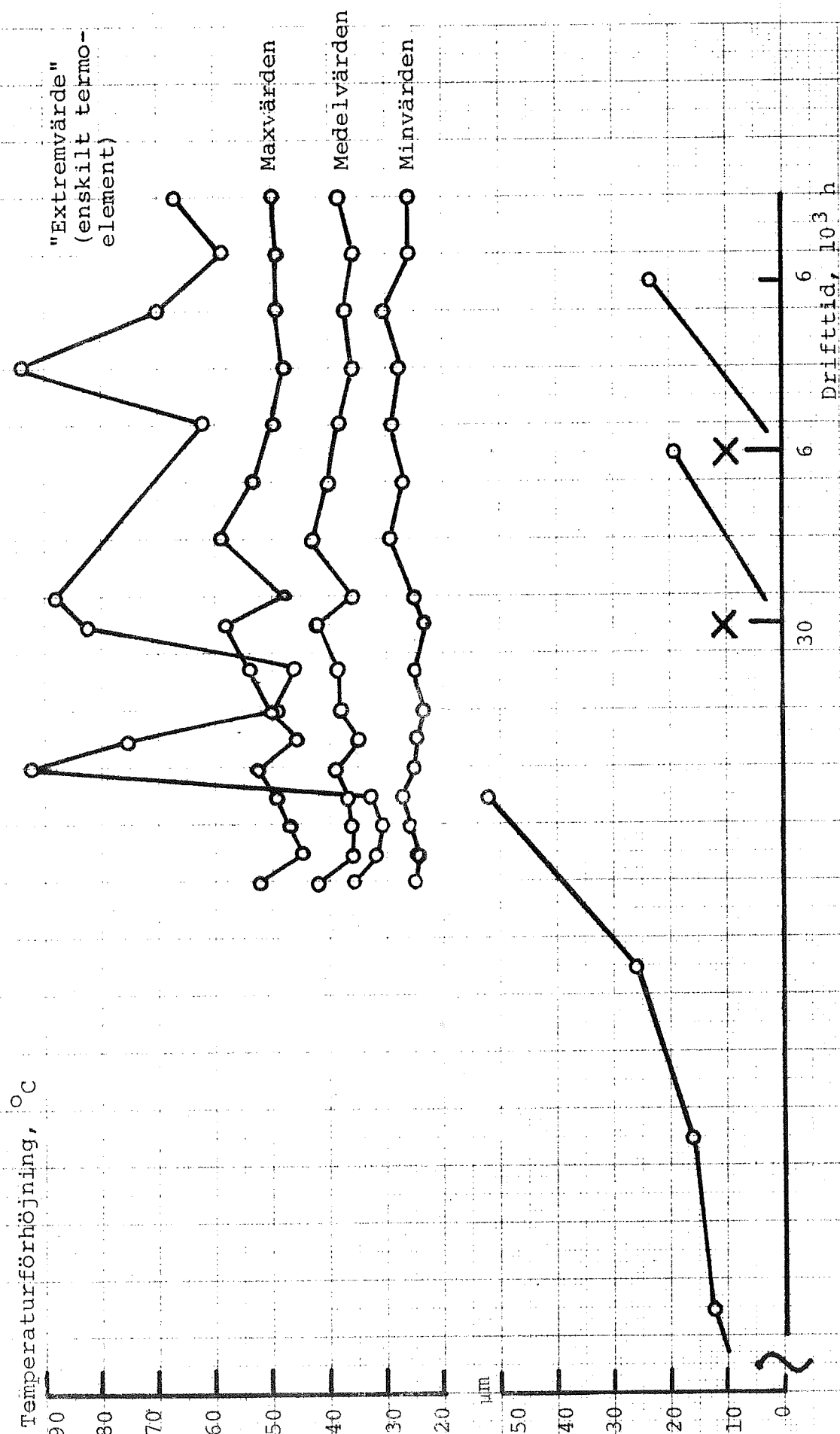
30

Drifttid, 10³ h

Figur 4

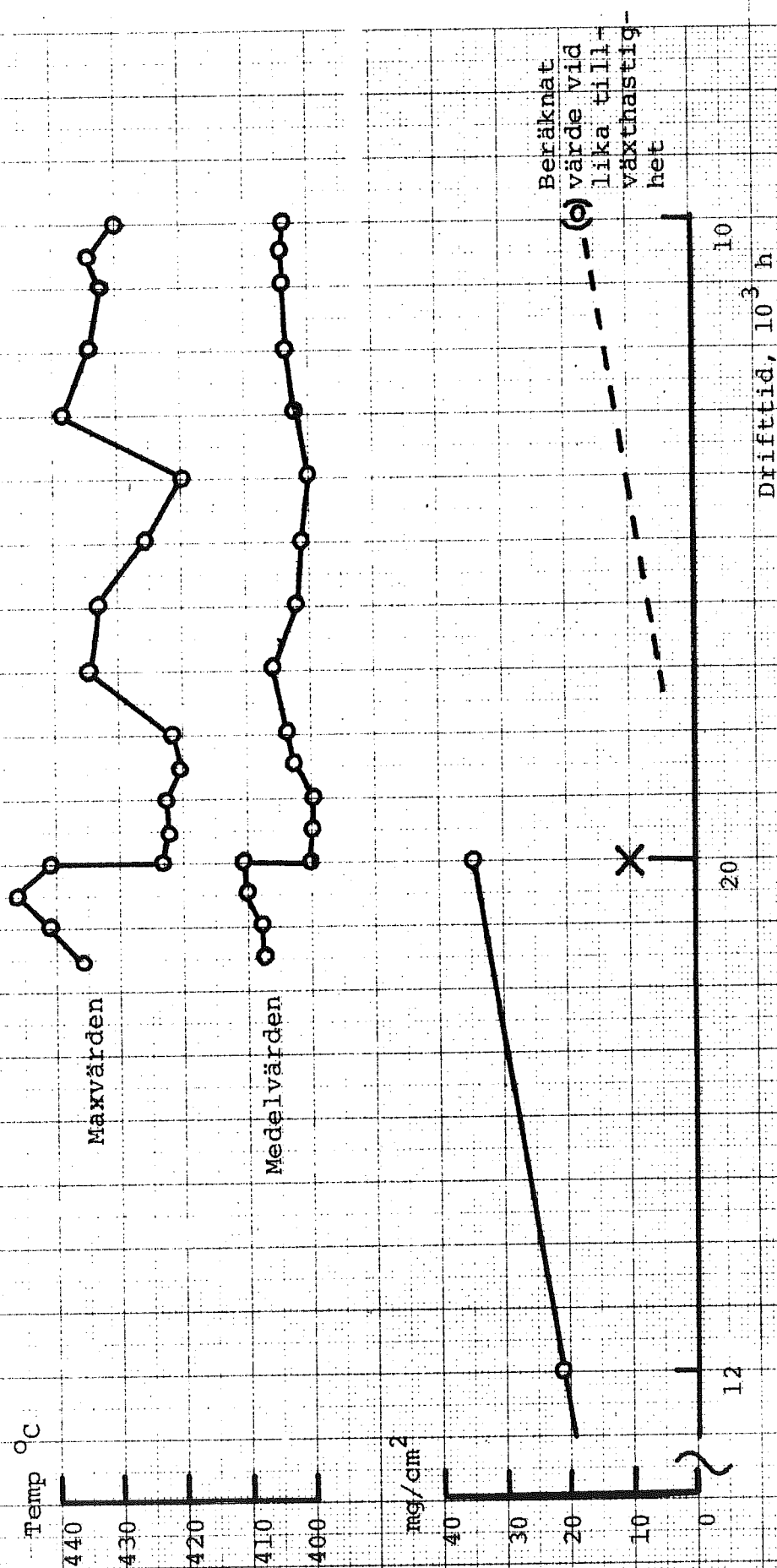
Temperaturförhöjningen i eldstadsväggar och beläggningens tjocklek avsatta mot tiden. X = kemisk rengöring.

1982-01-11



Figur 5

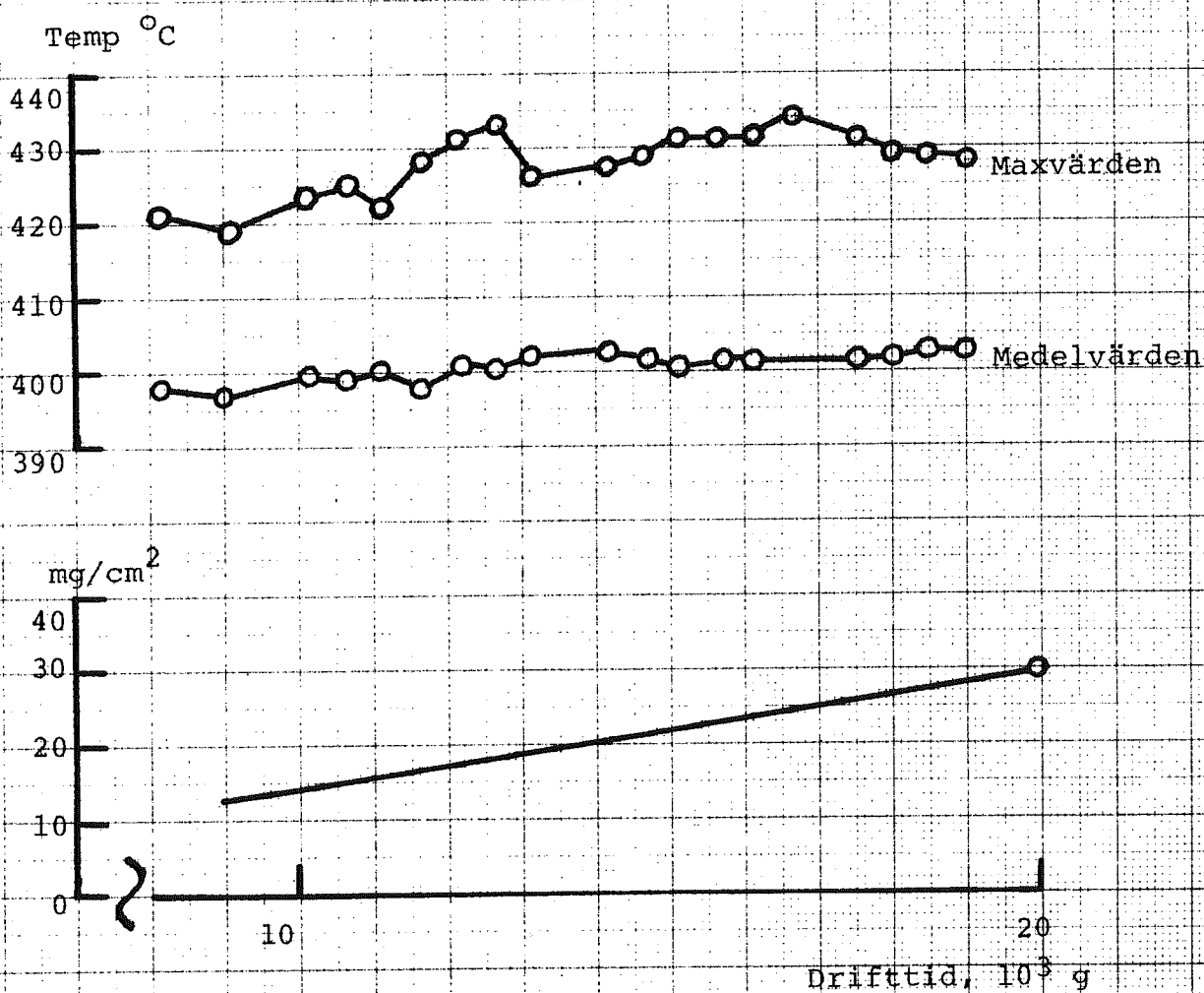
Temperaturförhöjningen i tubmaterialet och beläggningens tjocklek avsatta mot drifttiden.



Figur 6

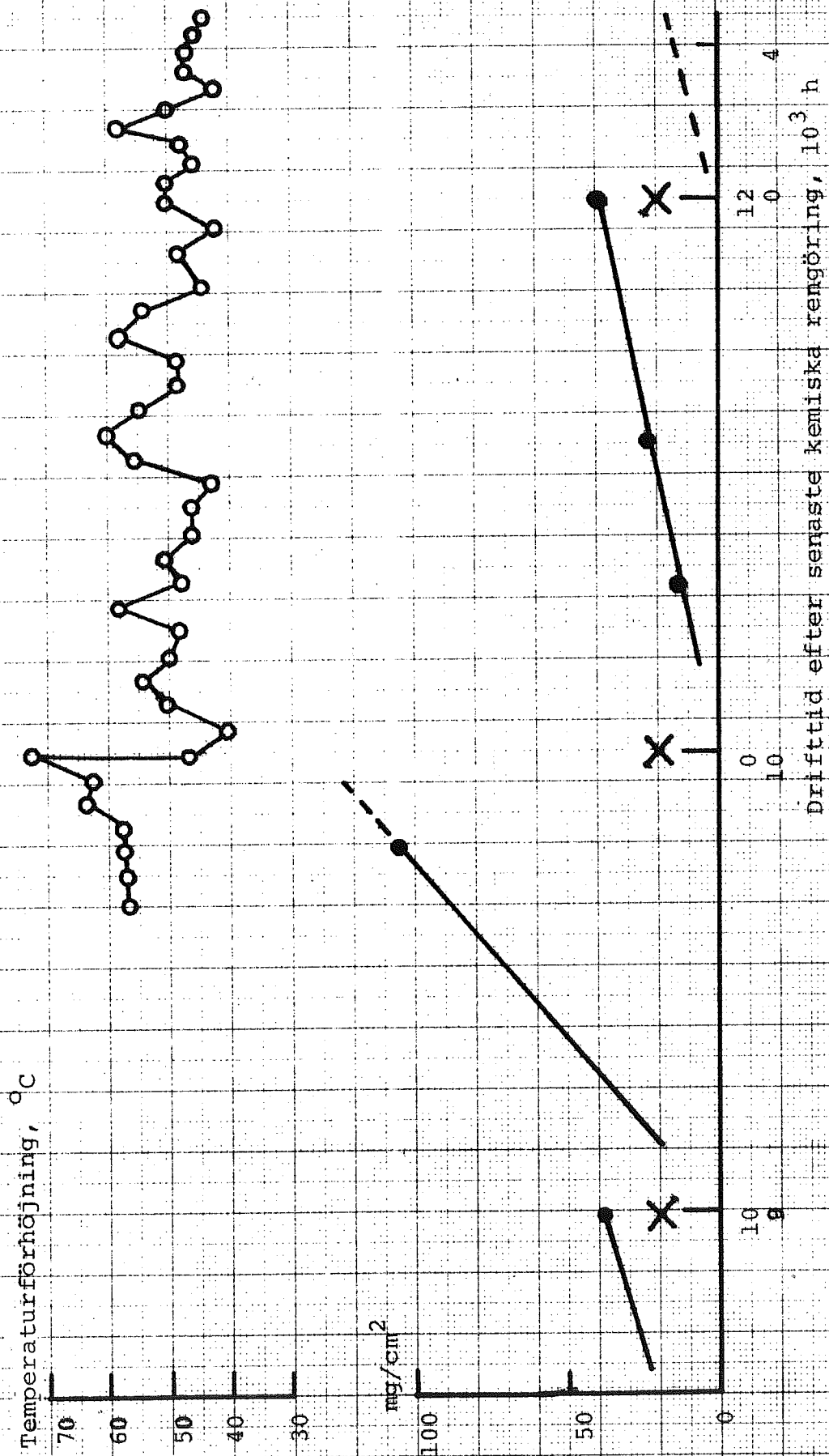
Temperaturen i tubmaterialet och beläggningens ytvikt avsatta mot drifttiden. X = kemisk rengöring.

1982-01-11

Figur 7

Temperaturen i tubmaterialet och beläggningens ytvikt
avsatta mot drifftiden.

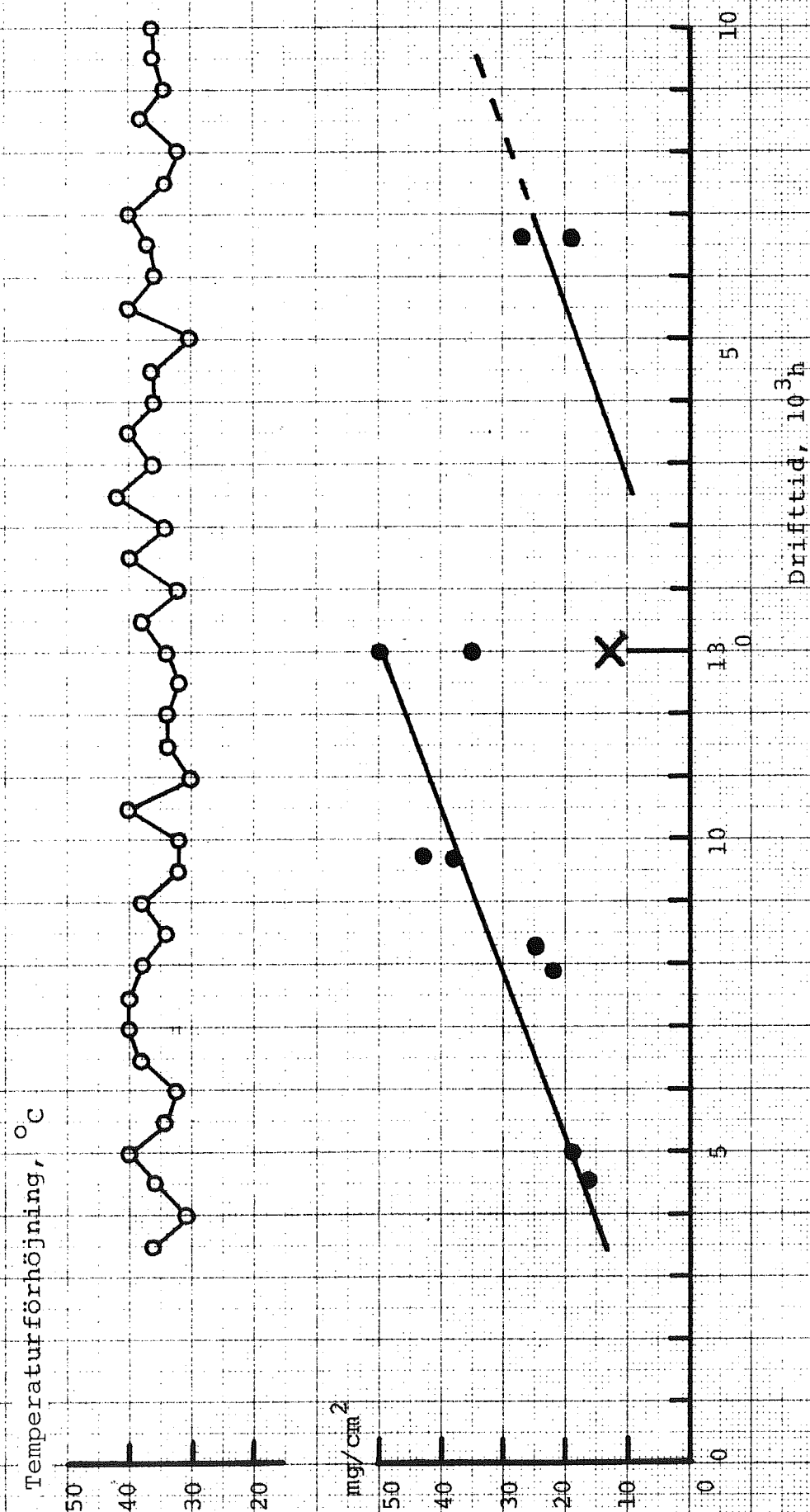
1982-01-11



Figur 8

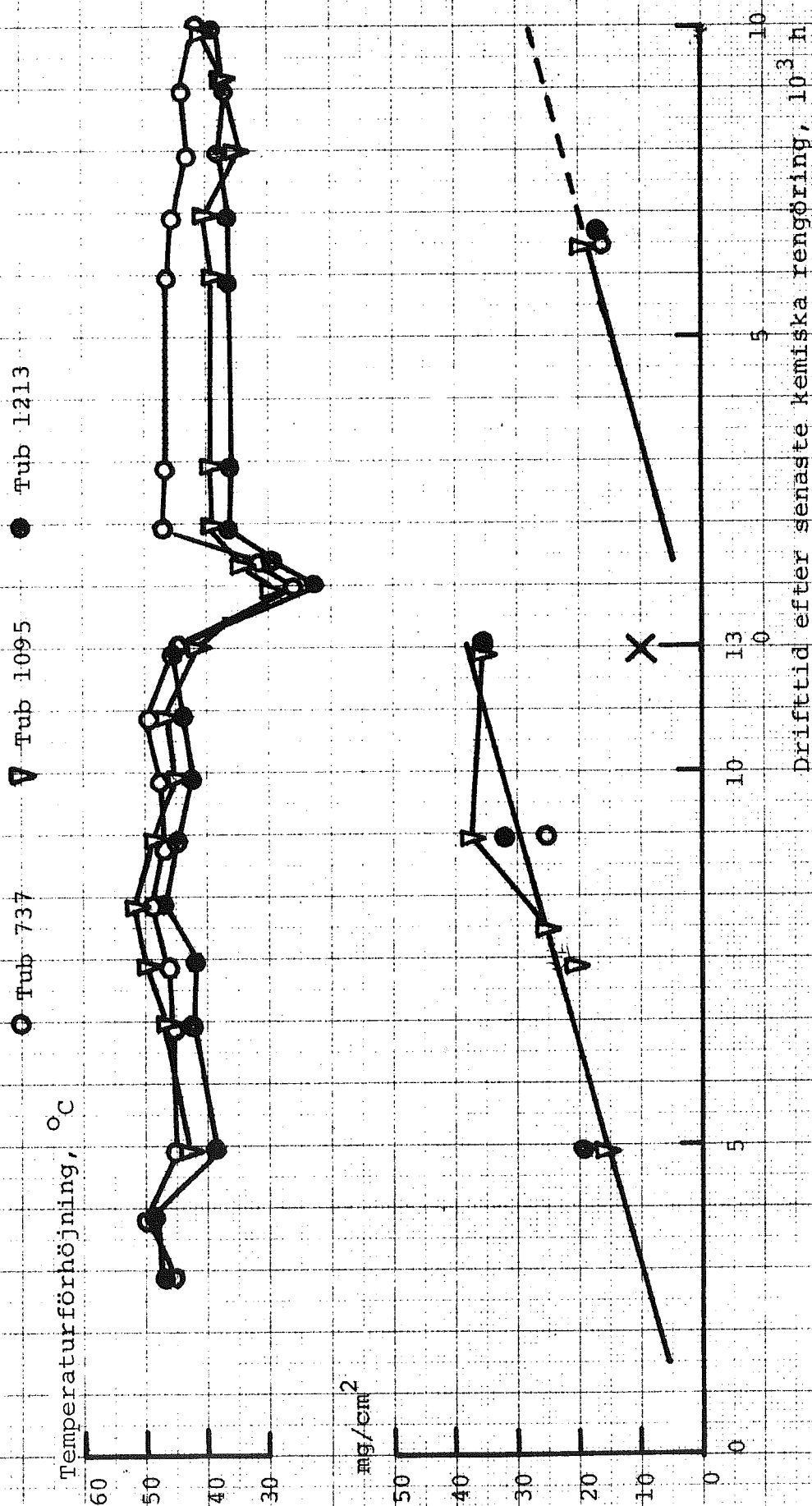
Temperaturförhöjningen i tubmaterialet och beläggningstviktens avsatta mot drifttiden. X = kemisk rengöring.

1982-01-11



Figur 9

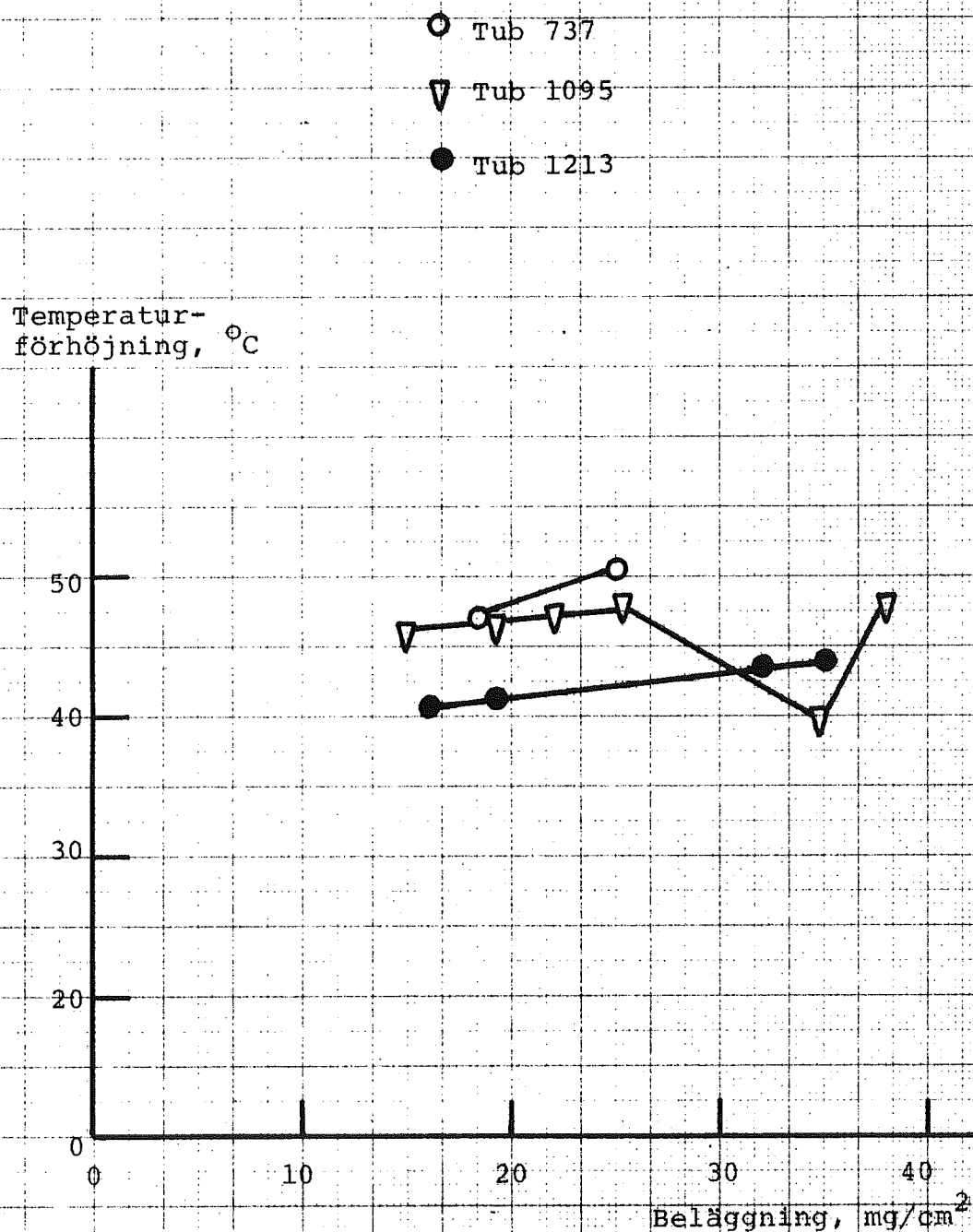
Temperaturförhöjningen i tubmaterialet och beläggningens ytvikt avsatta mot drifftiden. X = kemisk rengöring.



Figur 10

Temperaturförhöjningen i tubmaterialet i tre tuber och beläggningens ytvikt i näraliggande tuber avsatta mot drifttiden.

1982-01-11

Figur 11

Temperaturförhöjningen i tubmaterialet avsatt mot ytvikten hos beläggningen i näraliggande tuber (se Tabell 2).

5523 A 4

ESSELTE

44+6