

NILU
TEKNISK NOTAT NR 3/78
REFERANSE: 00375
DATO: MARS 1978

EKSPONERING AV STÅL OG SINK
PÅ SKANDINAVISKE FELTSTASJONER,
NORDFORSK 1975- 1977.

AV
SVEIN ERIK HAAGENRUD

NORSK INSTITUTT FOR LUFTFORSKNING
POSTBOKS 130, 2001 LILLESTRØM
NORGE

ISBN 82-7247-016-0

INNHALDSFORTEGNELSE

	Side
FORORD	5
ATMOSPHERIC CORROSION RATE OF UNALLOYED STEEL AND ZINC, AND ENVIRONMENTAL PARAMETERS AT TEST SITES IN SCANDINAVIA	7
REGRESJONSANALYSER - FELTSTASJONER, NORDFORSK 75/76 ...	19
1 BESKRIVELSE	19
1.1 Datagrunnlag	19
1.2 Lineære regresjonsanalyser	19
2 RESULTATER	20
2.1 Stål	20
2.1.1 Enfaktorrelasjoner	20
2.1.2 Regresjonsanalyser	24
2.2 Sink	25
2.2.1 Enfaktorrelasjoner	25
2.2.2 Regresjonsanalyser	28
3 DISKUSJON	29
3.1 Ulike atmosfæretyper	29
3.2 Stasjonenes representativitet i sammenheng med miljøparametrene	29
3.3 Måleprogrammene	30
3.4 Stål og sinks korrosjon i avhengighet av miljø	30
4 KONKLUSJONER	31
LITTERATURLISTE	32
VEDLEGG - tabeller og figurer	33

FORORD

I samarbeidsprosjektet "Atmosfærisk korrosjon med spesiell hensyn til forholdene på bygninger" i regi av NORDFORSK, pågår et felles eksponeringsprogram for stål og sink på i alt 30 feltstasjoner i Skandinavia (fra juni 1977 er det 32 stasjoner). Hensikten med dette er blant annet å oppnå en felles referanseramme for de ulike eksponeringsprogrammene på stasjonene. En har dessuten forsøkt å samordne måleprogrammene slik at en ved regresjonsanalyser skal kunne undersøke og bestemme sammenhengen mellom korrosjon og miljø.

Dette notatet inneholder en fellespublikasjon til det 8. Nordiske korrosjonsmøtet i Helsingfors 1978 av de deltagende samarbeidspartnere, og de fullstendige regresjonsanalysene av første års data - fra juli 1975 t.o.m. juni 1976. Disse analysene er utført ved Norsk institutt for luftforskning.

ATMOSPHERIC CORROSION RATE OF UNALLOYED STEEL AND ZINC, AND ENVIRONMENTAL PARAMETERS AT TEST SITES IN SCANDINAVIA

BY

Lyder Atteraas, Det norske Veritas, West Norway Region
Svein Haagenrud, Norwegian Institute for Air Research (NILU)
Vladimir Kučera, Swedish Corrosion Institute (KI)
Tero Hakkarainen, Technical Research Centre of Finland (VTT)

INTRODUCTION. Several separate programs for measuring atmospheric corrosivity have been undertaken in Scandinavia (1,2,3). As these have been performed with somewhat varying metal compositions at different time periods, however, a comparison of results may be dubious. This is particularly true where pollution- and meteorological data are lacking.

In a joint effort coordinated through NORDFORSK, test panels of pure zinc and carbon steel were mounted at thirty test sites for atmospheric corrosion in Scandinavia during July 1975 (5 in Finland, 6 in Sweden and the remainder in Norway). At most of these sites, the meteorological and some air pollution variables have been monitored. The purpose of the program, from which one- and two-year results are presented, was twofold: To map the relative corrosivity in Scandinavia, and to seek correlations between corrosivity and atmospheric conditions.

TEST CONDITIONS. Test panels (100 x 150 x 1 mm) were mounted individually in the open, between porcelain insulators. All panels were facing south at 45° angles. (30° in Finland). Each panel was individually marked through a system of drilled holes (1). Before exposure all the panels were cleaned and weighed to 0,01 gram accuracy at Det norske Veritas in Bergen. After one year exposure 2 panels of each metal were removed from each test site; this was repeated the following year. Following removal of corrosion products, the panels were again weighed and thus the weight difference expresses the corrosion attack.

Precleaning started with degreasing. The steel specimens were then dipped in Clarks solution (conc. HCl + 20 g/l Sb₂O₃ + 50 g/l Sn Cl₂) for about one minute, then rinsed. The zinc specimens were given a few-second dip into ammonium chloride and rinsed.

After exposure, all panels were shipped to the Swedish Corrosion Institute. The steel specimens were derusted for 5-20 min. in Clarks solution, water rinsed and dried. The zinc specimens were pickled for 10 minutes in saturated ammonium acetate at room temperature, water cleaned during soft brushing, alcohol rinsed and dried. With both metals, metal loss during pickling was corrected for through simultaneous pickling and weightloss measurements of clean dummy specimens. (DIN 50905).

The SO₂ content in the air is in Sweden and Norway measured by passing a known quantity of air through a solution containing hydrogen peroxide. Air particles are retained in a filter prior to the solution. The SO₂ oxidizes rapidly, and is accumulated as sulphate. (ISO/DIS 4219). In Finland, a Japanese method is used, whereby a vertical alkaline - impregnated filter collects SO₂ through an acid-base reaction (Int. Clean Air Congr., London 1966, proc. part 1, part 7, p. 231).

Temperature and relative humidity are recorded mechanically on a so-called thermohygrograph, and precipitation (rain) duration is recorded (also mechanically) on a pluviograph.

Precipitation is also collected and analyzed for certain constituents (eg. SO₄, S1, Ca, NH₄, NO₃). Methods vary, however, so that interested readers must be referred to the national institutions of the authors of this paper.

Chemical analysis (weight percent) of metals:

Steel: 0.14 C/ 0.42 Mn/ 0.10 Si/ 0.06 Cr/ 0.017 P/ 0.015 S/ 0.01 Ni/
0.00 Cu. (Semi-killed steel).

Zinc: 0.05 Fe/ <0.0001 Cd/ <0.001 Ti/ <0.0005 Ni/ 0.0007 Cu/ 0.002 Pb/
<0.0005 Al.

The test sites are characterized in Table 1.

RESULTS - Corrosion and environmental measurements.

One-year corrosion rates are reported in Table 1, and one- and two-year results are shown graphically in Figures 2 and 3. A complete set of measurements of 28 atmospheric-chemical and meteorological parameters are reported separately (4), while the most interesting parameters are found in Table 1. The selection of parameters are made on the basis of results from the regression analysis, which has been performed with standard programs developed at the Norwegian institute for Air Research (5).

The following are the principal findings (4):

1. All correlation coefficients (R) generated by the regression analysis are presented in Table 2. Also shown are the correlation coefficients which result when the more atypical environments such as saltwater spray or alkaline industrial atmosphere are excluded.

Due to lack of space, the only plots of corrosion rates vs. pollutant presented here are those of carbon steel and zinc vs. ambient SO₂, in Figures 4 and 5.

2. Due to variations in the measuring programs at various sites it was decided to include in the regression analysis only variables which had been measured at ten sites or more, and that the significance of one-factor correlation should be at the 95% confidence level or higher (Table 2).

The following parameters were included: SO₂ in air, amount of precipitation, its pH, sulphate and chloride concentration and deposition in precipitation, annual mean temperature and hours below the freezing point. 22 stations are included in the analysis, but the two marine-splash (saltwater spray) sites have been excluded.

The results from the ten best linear regression equations for the sum of respectively 2, 3 and 4 variables are summarized in equations 1, 2 and 3; where
 \dot{K} = g/m²-year corrosion rate, SO₂=µg/m³ sulphur dioxide in air
Cl= g/m²-year chloride deposition,
R = correlation coefficient and V = unexplained variance.

Carbon steel: $\dot{K}_{\text{steel}} = 5.28 \text{ SO}_2 + 176.6 \dots\dots\dots(1)$

with R = 0.76 and V = 42%. The sums of either 2, 3 and 4 variables do not give any significant increase in correlation compared with (1).

Zinc: $\dot{K}_{\text{zinc}} = 0.22 \text{ SO}_2 + 6.0 \dots\dots\dots(2)$

with R = 0.76 and V = 42%. The sum of two variables gives a significant increase in correlation at the 95% confidence level when deposition of chloride in precipitation is included:

$\dot{K}_{\text{zinc}} = 0.27 \text{ Cl} + 0.22 \text{ SO}_2 + 4.5 \dots\dots(3)$

with R = 0.82 and V = 33%. The sum of 3 or of 4 variables does not improve the correlation further.

DISCUSSION - Corrosion rates.

The corrosion rate of carbon steel at the Norwegian sites is somewhat higher than in previous investigations. This, however, is due to a difference in steel composition (1). The corrosion rate at the Swedish sites is in good agreement with values obtained at the end of the 1950' in rural and marine locations but about 30% lower at the urban sites (2).

The corrosion rates of zinc obtained in the present investigation are, however, at most test sites substantially lower than the results from earlier investigations. The main reason for this seems to be the extremely warm and dry weather during initial exposure of the test panels. It has been shown by other authors (6,7) that the weather conditions prevailing at the exposure time may affect the corrosion rate of zinc by a factor of two to three. This so-called "memory effect" has been shown to persist for at least 2 years. Another factor which could have contributed to the lower corrosion rates especially in some urban locations is that the SO₂-content has decreased because of switch-over to fuels with low sulphur contents. Also the increasing use of district-heating systems may have contributed to the low

corrosion rate e.g. in Stockholm. It should therefore be strongly emphasized that the zinc values has to be considered as preliminary. More reliable results will be obtained after 4 years exposure, and from a sequence of 1-year exposures which will begin in different seasons of the year.

The commonly use grouping of test sites according to geographic location, which is usually taken to imply specific types of atmospheres, does have fair validity according to the test results. This can be seen e.g. by comparing the corrosion of carbon steel after 2 years' exposure on all seven sites in rural locations except the surbarctic site in Gällivare. This grouping shows only small variations, between 26 and 36 μm . However, testresults also point out an inherent weakness in this. A case in this point is the so-called "industrial atmosphere", when contrasting Borregaard and Brevik with significant differences in ambient air; the corrosion rate of both carbon steel and zinc differ widely. Also the corrosion rates in "marine atmosphere" are completely dependent upon presence of salt spray. The results obtained thus indicate that the next step in working out an environmental classification system for practical corrosion purposes should be characterizing the different types of atmosphere with quantitative values of climatic parameters comprising in the first place sulphur pollutants and chlorides.

DISCUSSION - Regression analysis

A thorough discussion of the results is given in (4). The analysis shows that in calculating the relationship between corrosion rate and environment, two widely different types of atmosphere should not be mixed. One must differentiate between a marine-salt spray atmosphere and an inland atmosphere, and between different types of industrial atmospheres, e.g. alkaline vs. acidic. By including the marine-salt spray atmosphere a high correlation with chloride in precipitation is obtained, but on the other hand the SO_2 influence is then masked (Figure 4).

The analysis shows that when the object is that of determining the relationship between corrosion and environment, the present sites are not in optimum locations. Both with temperature, pH, sulphate and partly SO_2 , it is often one particular site which determines the correlation (Figure 5). More reliable relations demand sites giving more dispersed data. This would be a natural follow-up of this project, and the measuring programs should be revised to include the most significant parameters on all sites.

The first year of exposure shows a similar relationship between corrosion rate and environment for both carbon steel and zinc, both being best correlated with SO_2 in air with a correlation coefficient of 0,75 when the marine/splash sites are excluded.

The relatively low corrosion rates measured in city sites (e.g. Gotenburg and Stockholm) must not be taken as evidence of universally low corrosion rates in these cities. Equations 1 and 3 show that the low corrosion rates are due to the relatively low SO₂-concentrations at the test sites (respectively 39 and 14 µg/m³). At other sites in Stockholm where the SO₂-concentrations may be 60 µg/m³, the corrosion rates would be 63 µm/year for steel, and 2,7 µm/year for zinc, according to equations 1 and 2.

When ignoring the marine/splash and alkaline industrial atmospheres the corrosion rate of both steel and zinc are significantly correlated with sulphate in precipitation. This is due mainly to the acid industrial atmosphere at Borregaard, and it is probable that the high corrosion rate there in fact is due to low pH and high SO₂ concentrations.

CONCLUSIONS

1. The reported corrosion rates of carbon steel agree fairly well with previous results. Some differences are attributed mainly to different alloy composition and to air pollution changes.
2. The measured corrosion rates of zinc are substantially lower than in previous investigations, and must be considered preliminary. Possible reasons are "memory effect" due to extremely dry and warm weather conditions during initial exposure, and that recent levels of SO₂ are lower at some urban locations.
3. The regression analysis performed assumes linear relationships. Although this in itself is a limitation, it is believed that the analysis has revealed significant parameters which influence atmospheric corrosion rates.
4. When seeking the relationship between corrosion rate and environment, it is necessary to differentiate between completely different types of atmosphere such as those of a salt spray or an inland location, and between different types of inland-atmospheres, e.g. acid- and alkaline-industrial atmospheres.
5. In this investigation the correlation between the corrosion rate and environment are very much the same for carbon steel and zinc. The corrosion rates of both are best correlated with the SO₂-concentration in the air, with a correlation coefficient of 0,75 and with an unexplained variance of 42%.

REFERENCES

1. Atteraaas, L. and Hagerup, O.A: Atmospheric corrosion in western Norway. 4-year test results. Proc. of 7th Scand. Congr. on Metallic Corrosion Trondheim 1975, pp 57-70.

2. Bresle, Å & Nylén, P: Studier i ståls atmosfäriska korrosion. Jernkontorets Ann. 152 (1968) pp 477-484.
3. Fintling, E. and Hasselbohm, B: Field tests of metal-coated specimens in Swedish climate. Current Corrosion Research in Scandinavia, Helsinki 1964, pp 145-170.
4. Haagenrud, S.E: Regresjonsanalyser - feltstasjoner NORDFORSK 75/76. NORDFORSK-prosjekt: Atmosfærisk korrosjon. Delprosjekt 1.2. Lillestrøm 1978 (NILU TN 3/78). (In Norwegian).
5. Gram, F: Program MULREG, Lillestrøm 1978. NILU TN (in press). (In Norwegian).
6. Elis, O.B: Effect of weather on the initial corrosion rate of sheet zinc. ASTM Proceed. 49 (1949) pp 152-170.
7. Guttman, H: Effects of atmospheric factors on the corrosion of rolled zinc. ASTM STP 435, Baltimore, USA, (1968) pp 223-239.

ACKNOWLEDGEMENTS: The authors wish to thank the following for support: Royal Norwegian Council for Scientific and Industrial Research (NTNF), Swedish State Council for Building Research (BFR) and the Scandinavian Council for Applied Research (NORDFORSK).

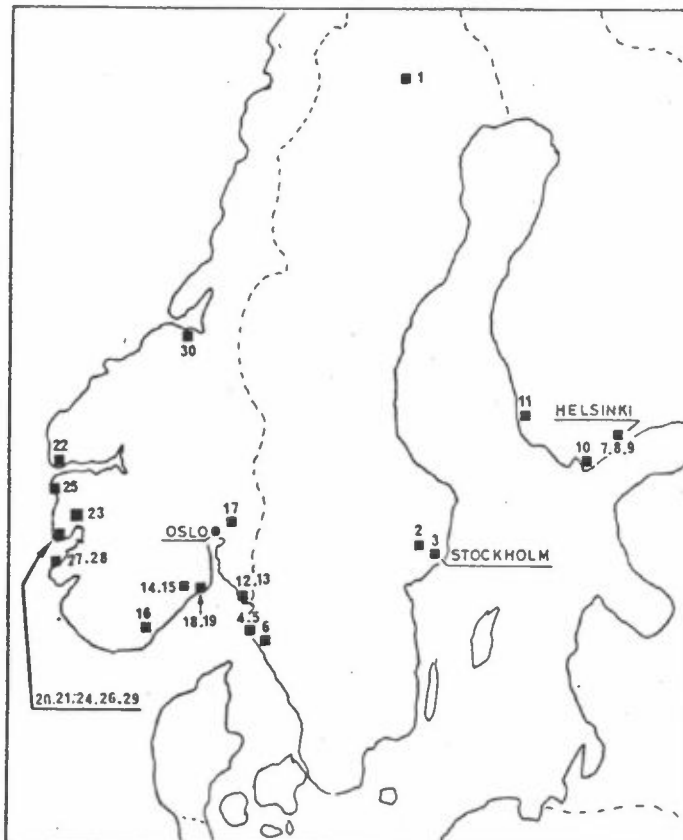


Figure 1.
Corrosion test sites in Scandinavia, identified by the numbers found in Figures 2 and 3, and in Table 1.

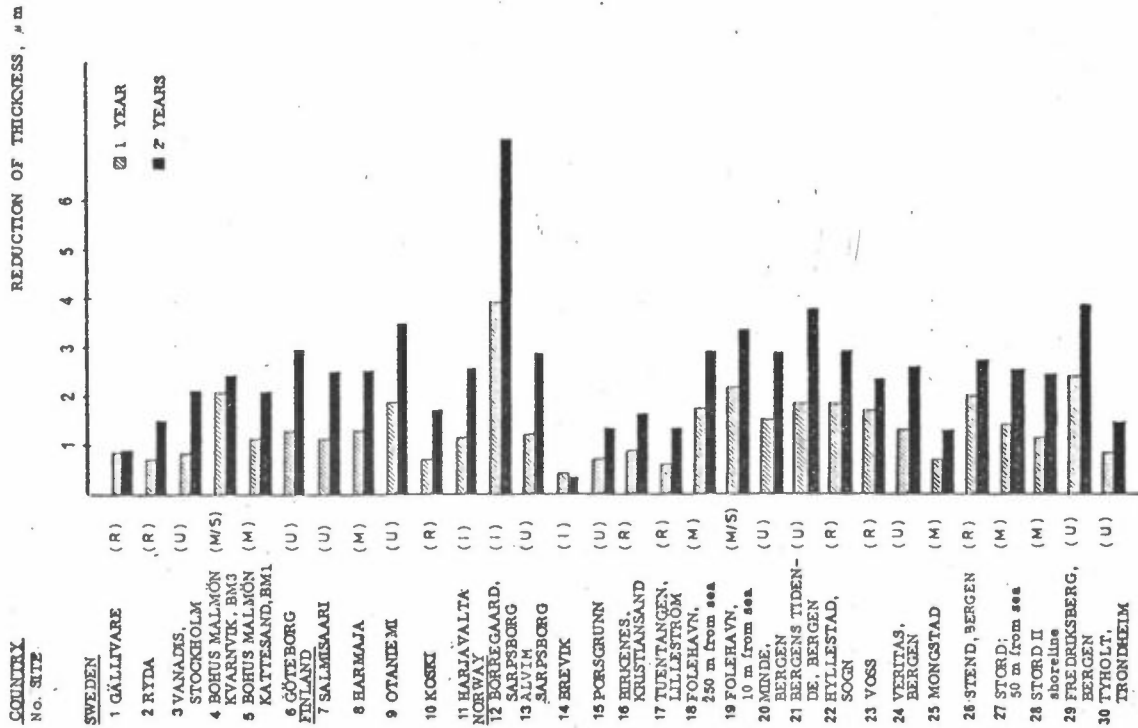


Figure 3. Corrosion of zinc after one year and two years, in Scandinavia.

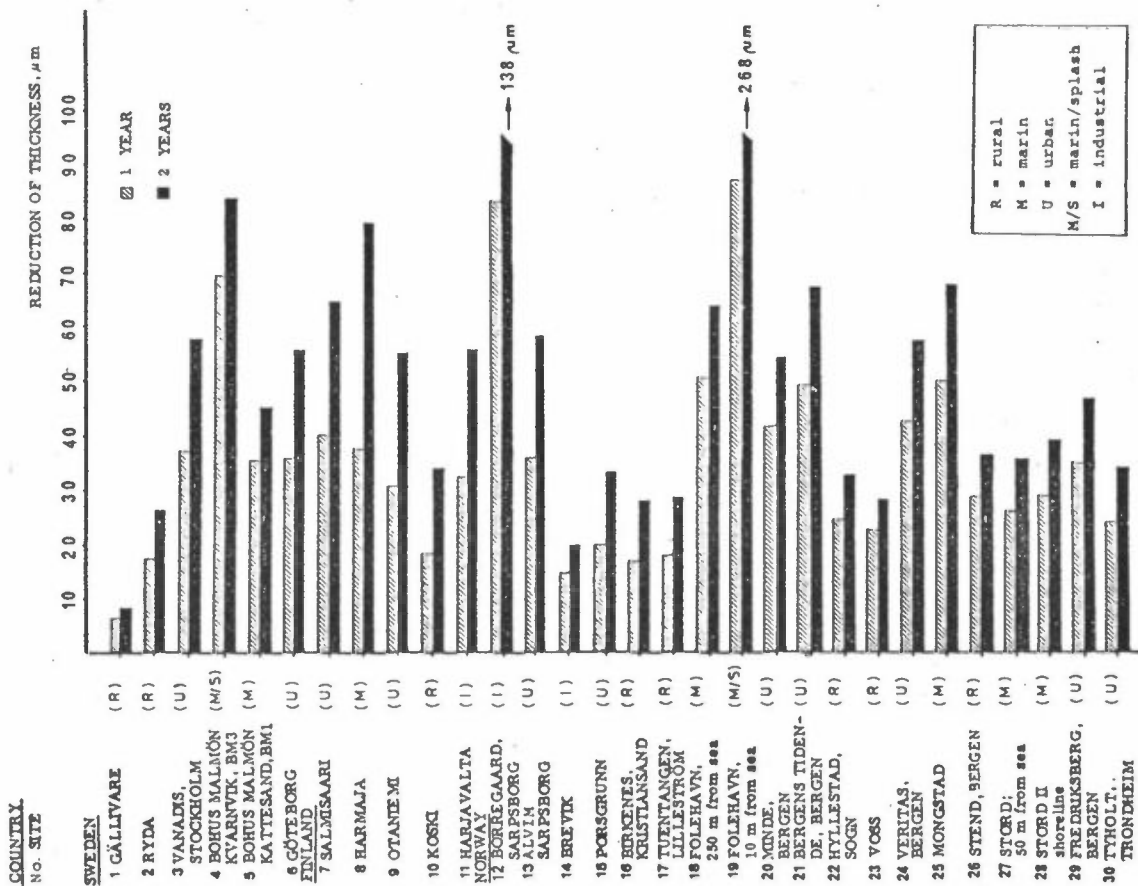
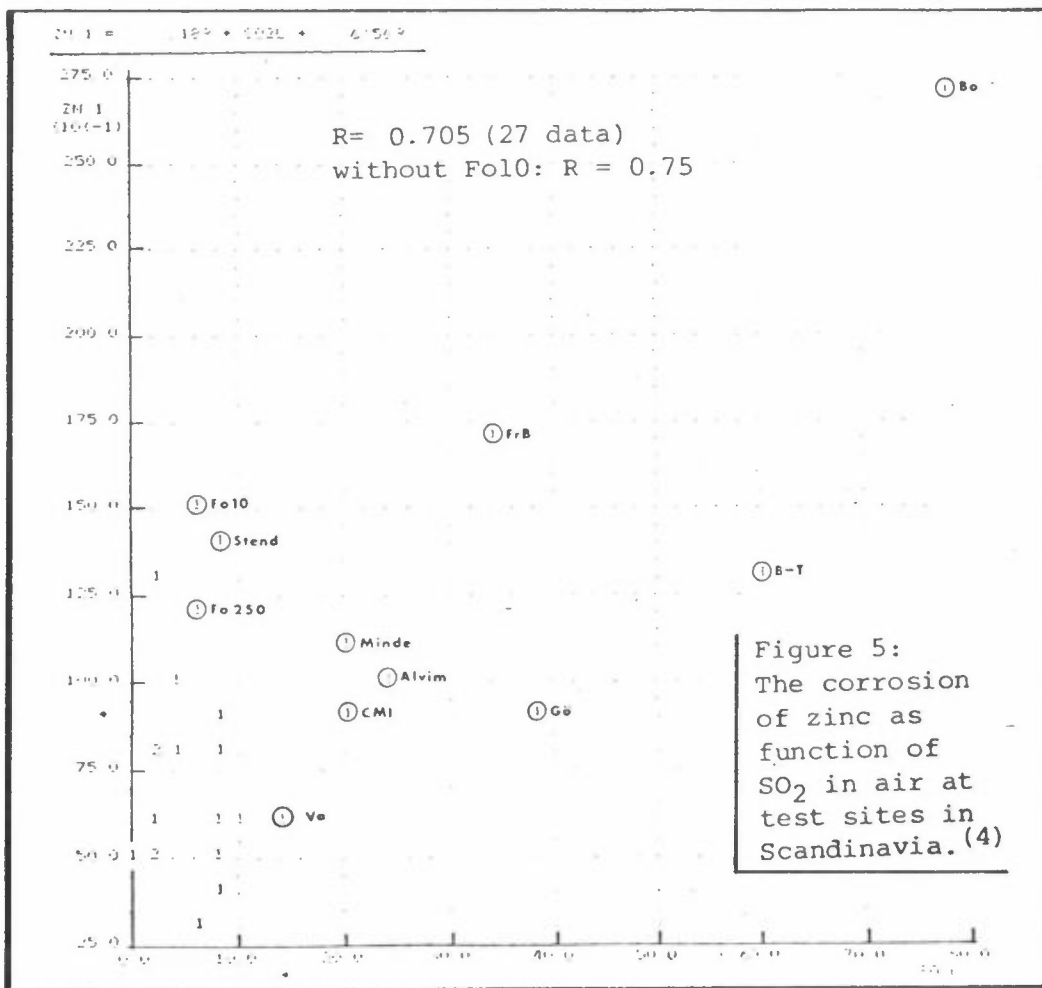
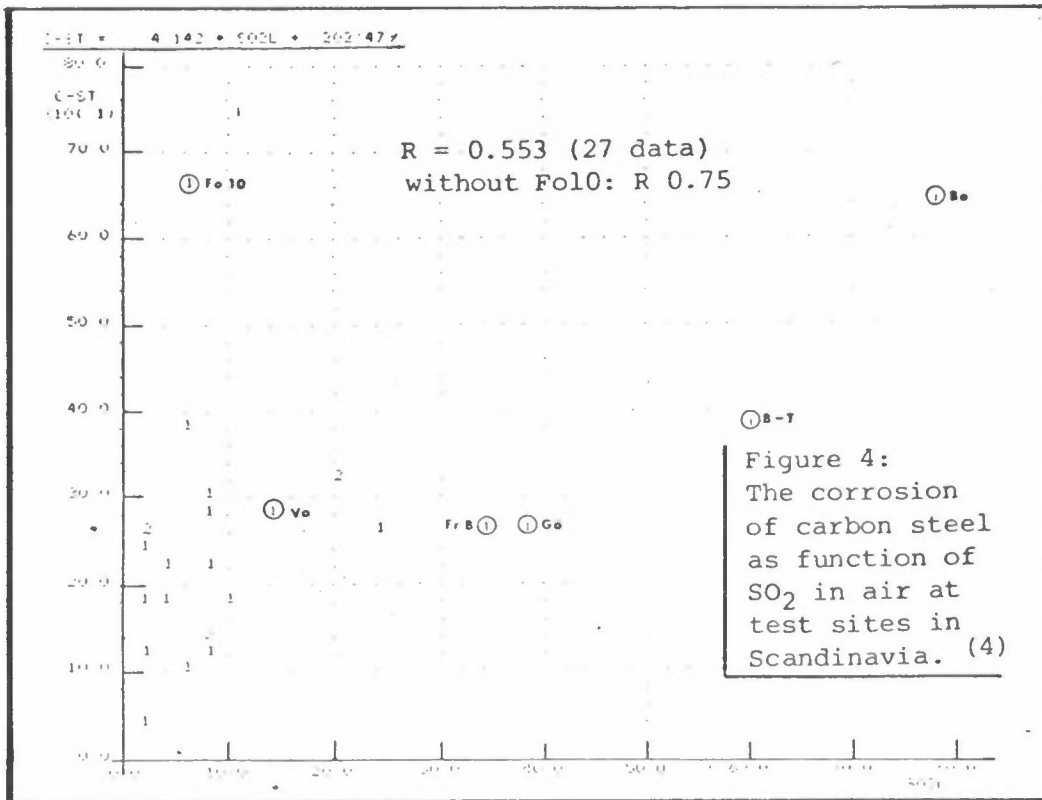


Figure 2. Corrosion of carbon steel after one year (hatched bars) and two years (solid bars).



VARIABLES		CORROSION RATE ($\mu\text{m}/\text{year}$)		PRECIPITATION				AIR		METEOROLOGICAL PARAMETERS						
Country No. site	Type of loc. Distance from sea km	Zinc	Steel	pH	SO_4 (g/m^2)	SO_4 (mg/l)	Cl (g/m^2)	Cl (mg/l)	$\%$ (μS)	SO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	RH (%)	$T > 85^\circ\text{F}$ (h)	TMID ($^\circ\text{C}$)	$T < 0^\circ\text{C}$ (h)	DNED (d)	MM (mm)
SWEDEN																
1	GALLIVARE R 175	0.8	6	4.5	1.0	3.3	0.1	0.3	22	3			-1.0	5017	303	
2	RYDA R 70	0.7	17	4.3	1.6	4.0	0.2	0.5	34	3	4639	6.5	2802	404		
3	VANADIS, STOCKHOLM u 3	0.8	36	5.6	4.4	14.2	1.2	3.9	241	14	2383	7.0	2181	310		
4	BOHUS MALMÖN, KNARVIK, BM3 M/S 0.05	2.0	68									8.2	2175	433		
5	BOBUS MALMÖN, KATESAND, BM1 M 0.3	1.1	34	4.3	4.0	9.2	8.1	18.7	89	2	3662	8.2	2175	433		
6	GÖTEBORG u 7	1.3	35	4.2	6.8	12.5	8.0	14.7	98	39		8.4	1845	544		
FINLAND																
7	SALMISAARI u 0.5	1.1	39	5.7	3.1	7.2	1.2	2.8		9	2838	5.4	2604	197	430	
8	HARAJA M 0.02	1.3	36	6.0	3.2	9.4	12.3	36.0		8	4020	5.0	2520	180	342	
9	OTANIEMI u 2	1.8	30	4.5							2848	4.9	2592	175	390	
10	KOSKI R 15	0.7	18	4.8	1.6	3.2	0.8	1.6		1	2388	5.0	2560	182	506	
11	HARJAVALTA I 30	1.1	31	4.6	2.4	5.7	0.7	1.7		3	3760	4.1	2688	160	422	

Table 1: Corrosion rates and environmental data from 1-year exposure at test sites in Scandinavia. The table is continued on next page.
 Type of location is designated as in Figure 2:
 R = rural, M = marin, U = urban, M/S = marine-splash (saltspray) and I = industrial.

VARIABLES		CORROSION RATE ($\mu\text{m}/\text{year}$)		PRECIPITATION				AIR		METEOROLOGICAL PARAMETERS								
Country No. site	Type Distance of from sea loc. km	Zinc	Steel	pH	SO_4 (g/m^2)	SO_4 (mg/l)	Cl (g/m^2)	Cl (mg/l)	Σ (μS)	SO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	RH (%)	$T > 85\%$ (h)	T MID ($^{\circ}\text{C}$)	$T < 0^{\circ}\text{C}$ (h)	DNED (d)	MM (mm)		
<u>NORWAY</u>																		
12	BORREGAARD, SARPSBORG.	I	12	3.8	81	3.5	11.0	28.4	2.3	5.9	198	79	75	3289	6.2	1891	104	387
13	ALVIM, SARPSBORG	u	10	1.4	35	4.2	5.8	14.3	2.6	6.4	131	25	75	3289	6.2	1891	104	406
14	BREVIK	I	0.5	0.4	15	7.7	20.7	48.8	4.8	11.3	351	6	74	3466	7.3	1822	113	424
15	PORSGRUNN	u	2	0.7	20	4.6	6.0	14.7	1.9	4.7	108	8	74	3286	7.1	1907	113	407
16	BIRKENES, KRISTIANSAND	R	25	0.8	17	4.3	3.9	4.2	1.9	2.1		8	79	4543	5.1	2054	147	928
17	TUENTANGEN, LILLESTRØM	R	20	0.6	18	4.1	2.1	4.8	0.6	1.4	52	8	67	2314	4.1	1990	109	440
18	FOLEHAVNEN, SANDEFJORD	M	0.25	1.7	49	4.2	3.5	7.3	9.2	19.3	224	6	75	2379	7.5	1206	113	478
19	FOLEHAVNEN, SANDEFJORD	M/S	0.01	2.1	86	6.0	15.1	227.1		1604		6			7.5	1206		
20	MINDE, BERGEN	u	2.2	1.5	41			8.8	3.0	8.0	2.7	20		3800	8.0	800	220	2900
21	BERGENS TIDENDE, BERGEN	u	0.6	1.8	49			8.8	3.4	16.9	6.5	60		3732	8.0	740	220	2603
22	HYLLESTAD, SOGN	R	2.5	1.8	24	4.7	5.3	12.5	11.0	25.9	33	3	84	3140	7.1	740	221	425
23	VOSS	R	20	1.7	23								78		5.1		182	1627
24	VERITAS, BERGEN	u	0.1	1.3	42	4.6	8.8	3.4	16.9	6.5	73	21		3732	8.0	740	220	2603
25	MONGSTAD	M	0.02	0.7	35	4.6	2.1	1.1	5.5	2.8	36	2	79	3143	8.3	563	218	1998
26	STEND, BERGEN	R	0.7	2.0	28	5.2	7.4	2.9	21.1	8.2	41	8	82	3140	7.0	750	213	2577
27	STORD	M	0.05	1.4	25	4.5	3.9	4.1	5.1	5.4		4		3150	8.0	750	190	952
28	STORD	M	0.005	1.1	28	4.5	3.9	3.5	6.0	5.3		4		3150	8.0	750	190	1132
29	FREDRIKSBERG, BERGEN	u	0.125	2.4	34	8.8	3.4	10.0	3.8			35	79	3732	7.9	740	220	2603
30	TYBOLT, TRONDHEIM	u	4	0.8	23							10	75	1971	5.2		184	1225

Table 1 continued

Parameter	ALL SITES				WITHOUT MARINE/SPLASH SITES (BM-3, FOL0)				WITHOUT MARINE/SPLASH AND ALKALINE IND. SITES (BM-3, FOL0, BREVIK)			
	C-steel		Zinc		C-steel		Zinc		C-steel		Zinc	
	Sites with data	Conc. (mg/l)	Depos. (g/m ²)	Conc. (mg/l)	Depos. (g/m ²)	Conc. (mg/l)	Depos. (g/m ²)	Conc. (mg/l)	Depos. (g/m ²)	Conc. (mg/l)	Depos. (g/m ²)	
Temp.	Mean temp (°C)	30	0.42 (xx)	0.223	0.405 (x)	0.182	0.214	0.438 (xx)	0.214	0.214	0.214	
	Days <0°C	22	-0.412 (x)	-0.275	-0.350	-0.241	-0.243	-0.355	-0.243	-0.243	-0.243	
	Hours <0°C	28	-0.304 (x)	-0.297	-0.359 (x)	-0.301	-0.309	-0.367 (x)	-0.309	-0.309	-0.309	
Humidity	Mean rel. hum (%)	18	0.046	0.283	FOL0 and BM-3 do not have these data.	0.001	0.247	0.001	0.247	0.247	0.247	
	Hours >85%	25	-0.006	0.075		0.01	0.095	0.01	0.095	0.095	0.095	
	" >90%	25	-0.047	0.049		-0.031	0.069	-0.031	0.069	0.069	0.069	
Precipitation	" >95%	16	-0.326	-0.171		-0.249	-0.085	-0.249	-0.085	-0.085	-0.085	
	Days w/prec.	23	-0.037	+0.067		-0.228	-0.130	-0.228	-0.130	-0.130	-0.130	
	Hours w/prec.	11	0.348	-0.044		0.348	-0.044	0.348	-0.044	-0.044	-0.044	
pH	Hours prec.	29	0.117	0.221	0.19	0.248	0.225	0.167	0.225	0.225	0.225	
		24	0.044	-0.296	-0.291	-0.398	-0.325	0.187	-0.325	-0.325	-0.325	
Chemistry	NH ₄	17	0.104	0.027	-0.110	-0.127	As 0.112	0.083	0.084	-0.143	-0.147	
	Ca	16	-0.215	0.095	-0.272	-0.112	for -0.205	0.178	0.132	0.091	0.200	
	SO ₄	26	0.216	0.423 (x)	0.088	0.346 (x)	all 0.245	0.555 (xxx)	0.664 (xxx)	0.519 (xxx)	0.755 (xxx)	
Air	Cl	26	0.175	0.607 (xx)	0.166	0.267	0.284	0.200	0.280	0.194	0.366 (x)	
	NO ₃	11	0.267	0.033	0.176	-0.151	0.300	0.284	0.329	-0.082	-0.025	
	κ (μS)	16	0.652 (xxx)	0.259	0.298	0.078	0.666 (xxx)	0.376	0.376	0.376	0.376	
	SO ₂ μg/m ³	27	0.553 (xxx)	0.705 (xxx)	0.749 (xxx)	0.748 (xxx)	0.751 (xxx)	0.751 (xxx)	0.751 (xxx)	0.751 (xxx)	0.751 (xxx)	

Table 2: Correlation coefficients between the corrosion rate of carbon steel and zinc and environmental parameters from 1-year measurements at test sites in Scandinavia (4). Confidence level 99,5% (xxx), 99% (xx) and 95% (x).

REGRESJONSANALYSER - FELTSTASJONER NORDFORSK 75/66

1 BESKRIVELSE

1.1 Datagrunnlag

Dataene for samtlige feltstasjoner for første års eksponering i perioden juli 1975/juni 1976 er vist i tabell 1.

Det er i alt 32 variable, men av forskjellige årsaker er stasjonenes måleprogrammer meget forskjellige. Følgende parametre bestemmes på minst 24 av stasjonene: Middelsestemperatur, timer under 0°C, timer over 85 og 90% relativ fuktighet, mm nedbør, pH, sulfat og klorid i nedbør, svoveldioksyd i luft.

Den store forskjellen i måleprogrammene har betydning for regresjonsanalysene. Inkluderes samtlige variable i analysene vil ikke antall datasett (stasjoner) bli større enn antall data for den variable som har færrest data. Mangler målinger for en av de variable faller hele settet ut. I de foreliggende analysene vil dette da bety at med samtlige variable blir det ingen datasett tilbake. En har derfor måttet foreta en utvelgelse av variable.

1.2 Lineære regresjonsanalyser

Regresjonsanalysene er kjørt etter standardprogrammer utviklet ved NILU (1). Programmene inneholder følgende deler:

1. Plott av enfaktorrelasjoner med angivelse av korrelasjonskoeffisientene (R). I den foreliggende publikasjon er korrelasjonskoeffisientene for samtlige relasjoner vist i tabeller sammen med angivelse av antall data (stasjoner) i hver rela-

- sjon, og signifikansnivå. Når det gjelder beregning av signifikansnivå er dette basert på antagelse av normalfordelte datapunkter. Signifikansnivåene 99.5%, 99% og 95% er angitt med henholdsvis xxx, xx og x . En har valgt å betegne signifikansnivå <95% som insignifikant.
2. Korrelasjonsmatrise med angivelse av middel- og maksimumsverdier og standardavvik for de variable.
 3. Lineære regresjonsligninger for én parameter og de 10 beste av summen av henholdsvis 2,3 og 4 variable, med angivelse av korrelasjonsfaktoren, uforklart restvarians (RR) og signifikansnivå.
 4. Beregning av korrosjonshastigheten ut fra den beste regresjonsligningen med angivelse av bidrag fra de enkelte ledd i ligningen, samt plott av sammenhengen observert = beregnet + konst.

Utvelgelsen av variable i regresjonsanalysene er gjort dels på grunnlag av antall data for vedkommende variabel, og dels på grunnlag av vurdering av signifikansnivåer i enfaktorrelasjonene. En har da gått ut fra at det minst skal være med 10 stasjoner for vedkommende variabel, og dessuten at korrelasjonen minst bør være signifikant på 95% nivå.

2 RESULTATER

Målingene av de meteorologiske og atmosfærisk-kjemiske parametre er uavhengig av korrosjonsmålingene. Ved presentasjonen av resultatene behandles derfor stasjonene mer detaljert under avsnittet om stål.

2.1 Stål

2.1.1 Enfaktorrelasjoner

Korrelasjonsfaktorene er sammenstilt i tabell 2, mens plott av de med interessante relasjoner er vist i figur 1-9 (2).

Av plottene fremgår at de tre atmosfæretypene - sjøatmosfære (BM-3 og Fol0), alkalisk industriatmosfære (Brevik) og sur industriatmosfære (Borregaard, Bo) ofte har så stor innvirkning på de enkelte relasjoner at en også har måttet bestemme relasjonene dersom disse stasjonene tas vekk. Disse korrelasjonskoeffisientene er også angitt i tabellene.

Temperaturparametre

Temperaturparametrene er signifikant korrelert med korrosjonshastigheten med middeltemperaturen som den beste. Plottet viser at hele den gode korrelasjonen framkommer på grunn av den nord-svenske stasjonen Gällivare (Gä) med middeltemperatur -1°C (figur 1). Resten av stasjonene ligger i området $+4.1$ til 8.4°C , og innenfor dette temperaturområdet er sammenhengen helt tilfeldig.

Fuktighetsparametre

Samtlige fuktighetsparametre viser meget liten og ingen signifikant korrelasjon med korrosjonshastigheten, selv for timer $>85\%$ relativ fuktighet (figur 2). Stasjonene Gä, BM-1, BM-3, Voss og Fol0 er ikke med i målingene.

Nedbørmeteorologiske parametre

For døgn eller timer nedbør mangler en rekke stasjoner, herunder de to sjøatmosfærestasjonene BM-3 og Fol0. På grunn av sjøsprøyt har det heller ingen mening med måling av nedbørvarighet på BM-3 og Fol0. Hverken døgn- eller timer nedbør er signifikant korrelert med korrosjonshastigheten.

Nedbørmengden uttrykt ved mm nedbør blir signifikant korrelert med korrosjonshastigheten på 99% nivå når stasjonene Bo og BM-3 fjernes av relasjonen, figur 3.

Nedbørkjemiske parametre

Disse er angitt både som konsentrasjon og belastning (nedbørmengde x konsentrasjon).

De mest interessante parametre er pH, sulfat og klorid, mens de øvrige (kalsium, ammonium og nitrat) dels har langt færre data og dessuten ikke viser signifikant korrelasjon hverken for konsentrasjonen eller belastningen.

pH er heller ikke signifikant korrelert med korrosjonen. Figur 4 viser at de 3 stasjonene Brevik, Bo og Fol0 skiller seg klart fra de andre. Resten av stasjonene ligger samlet. BM-3 har ikke pH målinger, og fjernes dessuten Fol0 øker korrelasjonskoeffisienten fra 0.04 til 0.29. Ved samtidig å fjerne Brevik/ eller Bo avtar korrelasjonen igjen.

Målinger både i laboratoriet og i felt har vist at korrosjonshastigheten av stål øker raskt ved pH surere enn 4 (3), (4), og dette synes å være i god overensstemmelse med resultatene her. Dette er også i overensstemmelse med resultatene fra korrosjonen i neddykket tilstand (5).

Når det gjelder sulfatkonsentrasjonene i nedbøren viser tabell 1 at hverken sjøstasjonene BM-3 eller Fol0 har data, og heller ikke Otaniemi, Tyholt og Voss. For de øvrige stasjonene er relasjonen insignifikante, og figur 5a viser at dette skyldes stasjonen Brevik. Fjernes denne blir korrelasjonen signifikant på 99.5% nivå med en korrelasjonsfaktor på 0.56. Figur 5a viser også at denne korrelasjonen styres fullstendig av Bo. De øvrige konsentrasjoner er < 15 mg/l, og er helt tilfeldig orientert. Fjernes Bo i stedet for Brevik forsvinner korrelasjonen fullstendig. En høy sulfatkonsentrasjon synes derfor ikke å ha

betydning hvis den ikke er kombinert med høyt SO_2 innhold og/ eller lav pH. Enfaktormålinger i laboratoriet viste at det ikke var noen økende korrosjon ved sulfatkonsentrasjoner opptil 10 mg/l verken ved pH 5.7 eller 3.7 (3). Dette er i god overensstemmelse med resultatene her selv om det er mulig at en eventuell effekt av så høye sulfatkonsentrasjoner som på Brevik kan maskeres av at størstedelen av sulfatet foreligger som tungtløselig CaSO_4 .

For sulfatbelastningen kommer også sjøstasjonen Fol0 med. Sammenhengen er noenlunde den samme som for konsentrasjonen, men korrelasjonene blir noe bedre både fordi Fol0 kommer med, og fordi det synes å være en viss økende korrosjon ved økende sulfatbelastning for de øvrige stasjonene (figur 5b).

For kloridkonsentrasjon mangler de samme stasjonene som for sulfatkonsentrasjon, altså også sjøatmosfærestasjonene. Samtlige korrelasjoner er insignifikante også når stasjonene Brevik og Bo tas vekk (figur 6a).

For kloridbelastning kommer også Fol0 med, og dette bevirker at korrelasjonene blir signifikante på 99.5% nivå. Det framgår imidlertid av figur 6b at dette i stor grad bestemmes av Fol0 m, mens Bo motvirker korrelasjonen. Ved å ta bort både Fol0 m og Bo blir korrelasjonen likevel signifikant på 99.5% nivå.

For ledningsevnen inngår 16 stasjoner, og korrosjonen er signifikant korrelert med ledningsevnen på 99.5% nivå med en korrelasjonsfaktor på 0.65. Figur 7 viser at de tre stasjonene Bo, Brevik og Fol0 skiller seg klart ut. Ved å ta vekk Fol0 og Bo blir korrelasjonen insignifikant, mens den holder seg signifikant på 99.5% nivå ved å ta vekk Fol0 og Brevik (figur 7b).

Luftkjemiske parametre

Svoveldioksyd i luft måles på 27 stasjoner og korrosjonshastigheten er signifikant korrelert med SO₂ på 99.5% nivå. Av figur 8 framgår det at Fol0 og Bo skiller seg noe ut. Når Fol0 tas ut, er SO₂ den parameter som er best korrelert med korrosjonshastigheten.

Ammonium, kalsium, sulfat og klorid

Disse parametre måles bare på 4 svenske stasjoner. Korrelasjonskoeffisientene (tabell 2) er meget høye, men dette er tilfeldig og skyldes bare at det er så få observasjoner.

2.1.2 Regresjonsanalyser

Etter utvelgelse inneholder regresjonsanalysene følgende variable: pH, sulfat- og klorid-belastning i nedbøren, SO₂, mm nedbør, middeltemperatur, og timer <0°C. Følgende stasjoner faller ut av analysen: BM-3, Otaniemi, Minde, Tyholt, Bergens Tidende, Voss, Fredriksberg og Fol0. Begge de typiske sjøatmosfære-stasjonene mangler altså.

For 22 stasjoner er den beste enfaktorrelasjonen,

$$(1) \text{ STÅL} = 5.28 \text{ SO}_2 + 176.6$$

med en korrelasjonsfaktor på 0.76 og med en restvarians på 42%. Ved summen av henholdsvis 2, 3 og 4 variable fåes ingen signifikant økning av korrelasjonen i forhold til ligning 1.

I figur 9 er vist sammenhengen mellom målte og beregnede korrosjonshastigheter etter ligning 1 for de 22 stasjonene. Det framgår her at svært mye av korrelasjonen styres av stasjonen Borregaard. Tas denne stasjonen vekk er korrosjonen best korrelert med middeltemperaturen, men korrelasjonsfaktoren faller da til 0.53 med en restvarians på 72%.

Ved å ta vekk den alkaliske industriatmosfæren (Brevik) øker ikke enfaktorkorrelasjonen med SO_2 vesentlig, men man får en signifikant økning av korrelasjonen ved summen av 2 variable når middeltemperaturen kommer inn som annen variabel. Korrelasjonskoeffisienten øker da til 0.82 og restvariansen er 33%.

2.2 Sink

2.2.1 Enfaktorrelasjoner

Korrelasjonsfaktorene er sammenstilt i tabell 3, mens plott av de mest interessante relasjonene er vist i figurene 10-17.

Temperaturparametre

I motsetning til for stål er ingen av temperaturparametrene signifikant korrelert med korrosjonshastigheten av sink. For stål var korrelasjonen styrt av den lave korrosjonen på stasjonen Gä, men for sink er det 9 stasjoner som har lavere enn eller samme som Gä (tabell 1).

Om man ser bort fra Fo10 og Bo, blir temperaturparameteren $t_{\text{imer}} < 0^{\circ}\text{C}$ signifikant korrelert med korrosjonshastigheten på 99% nivå (figur 10).

Fuktighetsparametre

Tilsvarende som for stål viser ingen av fuktighetsparametrene noen signifikant korrelasjon med korrosjonshastigheten.

Når Bo fjernes av relasjonen blir korrosjonshastigheten av sink signifikant korrelert med middel relativ fuktighet på 95% nivå.

Nedbørmeteorologiske parametre

Ingen av de nedbørmeteorologiske parametre er signifikant korrelert med korrosjonen av sink når stasjonene betraktes samlet. Bo skiller seg klart ut, og fjernes denne stasjonen i tillegg til sjøstasjonen BM-3 blir korrosjonen signifikant korrelert med mm nedbør på 99.5% nivå (figur 11). Det blir da også en signifikant korrelasjon med døgn m/nedbør. Disse forholdene er tilsvarende som for stål.

Nedbørkjemiske parametre

Også for sink er pH, sulfat og klorid de mest interessante parametre.

For stasjonene samlet er det ingen signifikant korrelasjon mellom pH og korrosjonen av sink. Figur 12 viser at sammenhengen med pH er svært lik den for stål. De tre stasjonene Brevik, Bo og Fol0 skiller seg klart fra de andre, mens resten av stasjonene ligger samlet. Fjernes Fol0 blir korrelasjonen signifikant på 99% nivå, mens den avtar igjen når samtidig henholdsvis Brevik og Borregaard fjernes.

Resultatene synes å indikere at det ikke er noen økt korrosjonshastighet av sink med økende surhet ned til pH 4.1. Forsøk i laboratoriet viste at det ikke var noe økt korrosjon av sink ned til pH 3.7. Felteksponeringene her mangler data mellom pH 4.1 og 3.7, men korrosjonen viser en meget markert økning når surheten kommer ned i pH 3.45. Dette kan imidlertid ha sammenheng med det økte SO₂-nivået i luften.

Når det gjelder sulfatkonsentrasjonene i nedbør er også forholdene tilsvarende som for stål. Når stasjonene betraktes samlet er relasjonen insignifikant, og figur 13a viser at dette skyldes stasjonen Brevik. Fjernes denne stasjonen blir relasjonen signifikant på 99.5% med en korrelasjonsfaktor på 0.52. Sammenhengen styres imidlertid fullstendig av den høye konsentrasjonen (28.4 mg/l) på Borregaard, mens de

Øvrige konsentrasjoner er lavere enn 15 mg/l og helt tilfeldig orientert. Heller ikke for sink synes derfor høy sulfat-konsentrasjon å ha noen betydning hvis den ikke er kombinert med høyt SO_2 -innhold og/eller lav pH. Enfaktorforsøkene i laboratoriet viste at det ikke var noen økende korrosjon ved sulfatkonsentrasjoner opptil 10 mg/l hverken ved pH 5.7 eller 3.7.

For sulfatbelastningen kommer også sjøstasjonen Fol0 med. Korrelasjonen er da signifikant på 95% nivå når stasjonene betraktes samlet (figur 13b). Her synes det å være en ganske klar økning av korrosjonen ved økende sulfatbelastning selv når sjøstasjonene og Bo tas vekk.

For kloridkonsentrasjonen er det ingen signifikante korrelasjoner.

For kloridbelastning kommer også Fol0 med. Stasjonene Fol0 og Bo adskiller seg meget sterkt fra de andre (figur 14a). Tas Fol0 vekk blir korrelasjonen signifikant på 95% nivå og fjernes samtidig Bo blir relasjonen signifikant på 99.5% nivå med en korrelasjonsfaktor på 0.69 (figur 14b).

For ledningsevnen er det ingen signifikant korrelasjon. Stasjonene Bo, Fol0 og Brevik skiller seg klart ut (figur 15), og det er mulig at man vil få signifikant korrelasjon dersom alle disse tre stasjonene fjernes fra relasjonen.

Luftkjemiske parametre

Korrosjonshastigheten er signifikant korrelert med svovel-dioksyd i luften på 99.5% nivå med en korrelasjonsfaktor på 0.70-0.75. Figur 16 viser imidlertid at størstedelen av korrelasjonen styres av Bo. Fjernes Fol0 og Bo fra relasjonen faller korrelasjonsfaktoren til 0.5 som er signifikant på 99% nivå.

SO₂ er den parameter som er best korrelert med korrosjons-
hastigheten av sink.

Ammonium, kalsium, sulfat og klorid

Korrelasjonskoeffisientene er meget høye, men som for stål er
dette tilfeldig, og skyldes kun at det er så få observasjoner
(tabell 3).

2.2.2 Regresjonsanalyser

Tilsvarende som for stål får en at for 22 stasjoner er den
beste enfaktorrelasjonen:

$$(2) \text{ SINK} = 0.22 \text{ SO}_2 + 6.0$$

med en korrelasjonsfaktor på 0.76 og med en restvarians på 42%.

Ved summen av 2 variable fåes en signifikant økning av korr-
elasjonen på 95% nivå når kloridbelastning i nedbøren kommer
inn.

$$(3) \text{ SINK} = 0.27 \text{ ClN} + 0.22 \text{ SO}_2 + 4.5$$

med en korrelasjonsfaktor på 0.82 og med en restvarians på 33%.
Ved summen av henholdsvis 3 og 4 variable fåes ingen signifi-
kant økning av korrelasjonen i forhold til ligning 3.

I figur 17 er vist sammenhengen mellom målte og beregnede
korrosjonshastigheter etter ligning 3 for de 22 stasjonene.
Som for stål fremgår det at svært mye av korrelasjonen styres
av stasjonen Bo. Tas denne stasjonen vekk er korrosjonen best
korrelert med klorid i nedbøren, men korrelasjonsfaktoren faller
til 0.7 med en restvarians på 51%.

Den alkaliske industriatmosfæren (Brevik) har liten innvirkning
på regresjonsligningene, og ved å ta vekk Brevik er relasjonene
praktisk talt identiske med ligning 2 og 3.

3 DISKUSJON

3.1 Ulike atmosfæretyper

Undersøkelsen viser at en ved beregning av sammenhengen mellom korrosjon og miljø ikke må blande sammen for ulike atmosfæretyper, fordi dette gir et feil bilde av sammenhengene. En må skille både mellom sjøatmosfære (ved strandkanten) og innenlandsatmosfære, og mellom ulike typer av innenlandsatmosfære. Ved å inkludere en sjøatmosfærestasjon fåes selvfølgelig høy korrelasjon med klorid i nedbøren, mens derimot SO₂-innvirkningen ikke kommer sterkt nok frem.

Tilsvarende må en også skille mellom vidt forskjellige typer av innenlandsatmosfære, som f.eks. alkalisk og sur industriatmosfære. Den dominerende forurensning er sure svovelforbindelser, men ved å blande inn en industriatmosfære med sterk belastning av alkalisk støv forsvinner den høye korrelasjonen med sulfat og med nedbørens ledningsevne.

3.2 Stasjonenes representativitet i sammenheng med miljøparametrene

Undersøkelsen viser at når det gjelder å kunne bestemme sammenhengen mellom korrosjon og miljø er stasjonene ofte uhensiktsmessig valgt. Både for temperatur, pH, sulfat og tildels SO₂ er det i altfor stor grad én stasjon som bestemmer korrelasjonen, mens de øvrige stasjonene nesten ikke har noen spredning i vedkommende parameter. Temperaturkorrelasjonen for stål bestemmes således utelukkende av stasjonen Gä med -1°C i middeltemperatur, mens de øvrige 29 stasjonene ligger mellom +4.1 og 8.4°C i middeltemperatur. For pH ligger samtlige stasjoner med unntak av Brevik og Borregaard i pH-området 6.0 til 4.2. For SO₂ ligger samtlige stasjoner med unntak av Bo (79 µg/m³) og Bergens Tidende (B-T) (60 µg/m³) under 40 µg/m³.

For å få en sikrere sammenheng med miljøparametrene burde der-

for flere av stasjonene med fordel vært lagt slik at man fikk en større spredning i måledataene.

3.3 Måleprogrammene

Måleprogrammene er sterkt uensartet for stasjonene, og dette får stor betydning for regresjonsanalysene og forsøkene på å finne sammenhengen mellom miljø og korrosjonshastighet. Om en tar med interessante parametre som døgn med nedbør, fuktighet som timer \geq 85% relativ fuktighet og ledningsevne, får en tilbake 10 stasjoner. Måleprogrammet bør derfor revideres til å omfatte færre parametre som måles på alle stasjonene.

3.4 Stål og sinks korrosjon i avhengighet av miljø

Første års eksponering viser en ganske stor likhet i stål og sinks avhengighet av miljøparametrene. Begge er best korrelert med SO_2 med en korrelasjonsfaktor på 0.75 når sjøstasjonen Folo fjernes. Tas denne med avtar korrelasjonen mer for stål enn for sink.

Uten sjøatmosfære og alkalisk industriatmosfære er også både stål og sink signifikant korrelert med sulfat i nedbøren. Dette skyldes i vesentlig grad Bo , og det er trolig at den høye korrosjonen da egentlig skyldes lav pH og høy SO_2 -konsentrasjon.

Sammenhengen med pH er også tilnærmet den samme for begge metallene, og resultatene understøttes av laboratorieforsk.

Både stål og sinks korrosjonshastighet er dessuten signifikant korrelert med kloridbelastning i nedbøren når Bo fjernes. Det samme gjelder for korrelasjonene med nedbørmengden. For Bo er forurensningene av så dominerende betydning at nedbørmengden får mindre relativ betydning.

Fuktighetsparametrene har ikke signifikant betydning hverken for stål eller sink. For sammenhengen med temperaturparametrene er det en forskjell på stål og sink ved at stasjonen Gä ikke synes å nedsette korrosjonen av sink.

4 KONKLUSJONER

1. Ved beregningen av sammenhengen mellom korrosjon og miljø må en skille mellom vesentlig forskjellige atmosfæretyper som sjøatmosfære og innenlandsatmosfære, og ulike typer av innenlandsatmosfære som sur og alkalisk industriatmosfære etc.
2. De fleste stasjonene er såvidt like at spredningen i måleverdiene for miljøparametrene blir for liten til å gi sikre sammenhenger mellom korrosjon og miljø. De uensartede måleprogrammene legger også en klar begrensning på dette.
3. Korrosjonen av stål og sink viser stor likhet i avhengigheten av miljøparametrene. Begge er best korrelert med SO_2 -konsentrasjonen i luften med en korrelasjonsfaktor på 0.75, og med en restvarians på 42%. For summen av flere variable fås ingen signifikant økning av korrelasjonen for stål, mens det for sink blir en signifikant økning av korrelasjonen når kloridbelastningen i nedbøren kommer inn. For begge metaller synes korrosjonen å øke vesentlig med økende surhetsgrad i nedbøren under pH 4.

LITTERATURLISTE

- (1) Gram, F. Program MULREG, Lillestrøm 1978, NILU TN (in press).
- (2) Datautskrifter av komplette resultater.
- (3) Haagenrud, S.E. Enfaktorforsøk på laboratoriet. NORDFORSK-prosjekt: Atmosfærisk korrosjon. Delprosjekt 1.3. Lillestrøm 1977 (NILU TN 15/77)
- (4) Haagenrud, S.E. Bestemmelse av korrosjon under korte fourensningsepisoder uten-dørs. NORDFORSK-prosjekt: Atmosfærisk korrosjon. Delprosjekt 1.3. Lillestrøm 1977 (NILU TN 14/77)
- (5) Whitman, G.W.
Russel, R.P.
Altieri, V.J. Effects of hydrogen-ion concentration on the submerged corrosion of steel. *Ind. Eng. Chem.*, 16, 665-670 (1924).

VEDLEGG
TABELLER
FIGURER

STASJON	ZN 1	ZN 2	C-ST	C-ST	PH	NH4N	CA N	SO4N	CL N	NO3N	SO2L	LEFN	NH4L	CA L	SO4L	CL L	NO3L
GØLLIVARE	6.0	.8	50.0	6.0	4.50	.1	.1	1.0	.1	3	3.0	22.0	.19	.08	.67	.27	.01
RYDA	5.0	.7	132.0	17.0	4.30	.2	.1	1.6	.2	8	3.0	34.0	.64	.12	1.31	.30	.12
VANADIS	6.0	.8	285.0	36.0	5.60	4.6	.6	4.4	1.2	8.4	14.0	241.0	.55	.20	1.43	.17	.10
BM-1 BOHUS	8.0	1.1	269.0	34.0	4.30	.4	.4	4.0	8.1	2.8	2.0	89.0	1.06	.27	1.24	1.20	.30
BM-3 BOHUS	14.0	2.0	530.0	68.0	-99.00	-99.0	-99.0	-99.0	-99.0	-99.0	-99.0	-99.0	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00
GÖTEBORG	9.0	1.3	274.0	35.0	4.20	.5	1.3	6.8	8.0	2.5	39.0	98.0	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00
SALMISAARI	8.0	1.1	305.0	39.0	5.70	-99.0	-99.0	3.1	1.2	-99.0	9.0	-99.0	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00
HARMAJA	9.0	1.3	286.0	36.0	6.00	-99.0	-99.0	3.2	12.3	-99.0	8.0	-99.0	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00
OTANIEMI	13.0	1.8	233.0	30.0	4.50	-99.0	-99.0	-99.0	-99.0	-99.0	-99.0	-99.0	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00
KOSKI	5.0	.7	141.0	18.0	4.80	-99.0	-99.0	1.6	8	-99.0	1.0	-99.0	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00
HARJAVALTA	8.0	1.1	246.0	31.0	4.60	-99.0	-99.0	2.4	7	-99.0	3.0	-99.0	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00
MINDE	11.0	1.5	320.0	41.0	-99.00	-99.0	-99.0	8.8	8	-99.0	20.0	-99.0	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00
BORREGAARD	27.0	3.8	640.0	81.0	3.45	.7	.6	11.0	2.3	-99.0	7.0	198.0	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00
ALVIM	10.0	1.4	277.0	35.0	4.24	.7	.7	5.8	2.6	-99.0	25.0	131.0	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00
BREVIK	3.0	.4	116.0	15.0	7.71	.2	12.4	20.7	4.8	2.4	6.0	351.0	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00
PORSGRUNN	5.0	.7	157.0	20.0	4.56	2.1	1.5	6.0	1.9	2.2	8.0	108.0	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00
BIRKENES	6.0	.8	133.0	17.0	4.30	.5	.3	3.9	1.9	.5	8.0	-99.0	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00
TUENTANGEN	4.0	.6	141.0	18.0	4.12	.4	.2	2.1	.6	-99.0	8.0	52.0	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00
TYHOLDT	6.0	.8	180.0	23.0	-99.00	-99.0	-99.0	-99.0	-99.0	-99.0	10.0	-99.0	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00
BT-BERGEN	13.0	1.8	384.0	49.0	-99.00	-99.0	-99.0	8.8	16.9	-99.0	60.0	-99.0	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00
HYLLESTAD	13.0	1.8	191.0	24.0	4.68	.2	.7	5.3	11.0	-99.0	5.0	33.0	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00
VOSS	12.0	1.7	177.0	23.0	-99.00	-99.0	-99.0	-99.0	-99.0	-99.0	-99.0	-99.0	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00
VERITAS	9.0	1.3	333.0	42.0	4.63	.4	1.7	8.8	16.9	-99.0	21.0	73.0	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00
MONGSTAD	5.0	.7	275.0	35.0	4.63	.2	-99.0	2.1	5.5	.2	2.0	36.0	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00
STEND	14.0	2.0	221.0	28.0	5.17	.4	2.5	7.4	21.1	-99.0	8.0	41.0	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00
STORD 50	10.0	1.4	199.0	25.0	4.50	-99.0	-99.0	3.9	5.1	-99.0	4.0	-99.0	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00
STORD 5	3.0	1.1	221.0	28.0	4.50	-99.0	-99.0	3.9	6.0	-99.0	4.0	-99.0	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00
FREDBERG	17.0	2.4	268.0	34.0	-99.00	-99.0	-99.0	8.8	10.0	-99.0	35.0	-99.0	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00
FO HAVN 10	15.0	2.1	672.0	86.0	6.00	.3	6.7	15.1	227.1	8	6.0	1614.0	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00
FO HAVN250	12.0	1.7	387.0	49.0	4.20	.4	.4	3.5	9.2	.9	6.0	224.0	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00

STASJON	RH	T>85	T>90	T>95	TMI0	D<0	T<0	DNED	TNED	MM	NH4	CA	SO4	CL	NO3
GØLLIVARE	-99.00	-99	-99	-99	-1.0	-99	5017	-99	-99	303.0	.33	.33	3.30	.33	.99
RYDA	-99.00	4639	3513	2410	6.5	-99	2802	-99	-99	401.0	.50	.25	3.99	.50	2.00
VANADIS	-99.00	2383	1093	295	7.0	-99	2181	-99	-99	310.0	14.84	1.94	14.19	3.87	27.10
BM-1 BOHUS	-99.00	-99	-99	-99	8.2	-99	2175	-99	-99	433.0	.92	.92	6.24	18.71	6.47
BM-3 BOHUS	-99.00	-99	-99	-99	8.2	-99	2175	-99	-99	433.0	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00
GÖTEBORG	-99.00	3662	2168	391	8.4	-99	1845	-99	-99	544.0	.92	2.38	12.50	14.71	4.60
SALMISAARI	.75	2838	1402	486	5.4	140	2604	197.	1210	430.0	-99.00	-99.00	7.21	2.79	-99.00
HARMAJA	.61	4020	2307	846	5.0	134	2520	180.	1013	342.0	-99.00	-99.00	9.36	35.96	-99.00
OTANIEMI	.75	2848	1776	592	4.9	127	2592	175	1205	390.0	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00
KOSKI	.74	2388	1126	.24	5.0	130	2560	182	1200	506.0	-99.00	-99.00	8.16	1.58	-99.00
HARJAVALTA	.79	3760	2528	1072	4.1	132	2688	160	1061	422.0	-99.00	-99.00	5.69	1.66	-99.00
MINDE	-99.00	3800	2350	-99	8.0	70	800	220	1385	2900.0	-99.00	-99.00	3.03	2.76	-99.00
BORREGAARD	.75	3289	2314	845	6.2	122	1891	104.	-99	387.0	1.81	1.55	28.42	5.94	-99.00
ALVIM	.75	3289	2314	845	6.2	122	1891	104.	-99	406.0	1.72	1.72	14.29	6.40	-99.00
BREVIK	.74	3466	2271	1742	7.3	113	1822	113.	-99	424.0	4.47	29.25	48.82	11.32	5.66
PORSGRUNN	.74	3236	2544	1604	7.1	123	1907	113.	-99	407.0	5.16	3.69	14.74	4.67	5.41
BIRKENES	.79	4543	3672	1027	5.1	162	2054	147.	1038	928.0	.54	.54	4.20	2.05	.54
TUENTANGEN	.67	2314	1637	882	4.1	138	1990	109.	-99	440.0	.91	.45	4.77	1.36	-99.00
TYHOLDT	.75	1971	.718	-99	5.2	139	-99	184.	-99	1225.0	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00
BT-BERGEN	-99.00	3732	2304	-99	8.0	63	740	220.	1385	2603.0	-99.00	-99.00	3.38	6.49	-99.00
HYLLESTAD	.84	3140	1845	-99	7.1	81	740	221.	-99	425.0	.47	1.65	12.47	25.88	-99.00
VOSS	.78	-99	-99	-99	5.1	146	-99	182.	-99	1627.0	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00
VERITAS	-99.00	3732	2304	-99	8.0	63	740	220.	1385	2603.0	.15	.65	3.38	6.49	-99.00
MONGSTAD	.79	3143	1845	223	8.3	50	563.	218.	1999	1998.0	.10	-99.00	1.05	2.75	.10
STEND	.82	3140	1845	-99	7.0	88	750	213.	-99	2577.0	.16	.97	2.87	8.19	-99.00
STORD 50	-99.00	3150	1850	-99	8.0	-99	750	190.	-99	952.0	-99.00	-99.00	4.10	5.36	-99.00
STORD 5	-99.00	3150	1850	-99	8.0	-99	750	190.	-99	1132.0	-99.00	-99.00	3.45	5.30	-99.00
FREDBERG	.79	3732	2304	-99	7.9	63	740.	220.	1385	2603.0	-99.00	-99.00	3.38	3.84	-99.00
FO HAVN 10	-99.00	-99	-99	-99	7.5	71	1206.	-99.	-99	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00	-99.00
FO HAVN250	.75	2379	1673	701.	7.5	71	1206.	113.	-99	478.0	.84	.84	7.32	19.25	1.88

INNLEST 30 DATASET
XL= -2.00

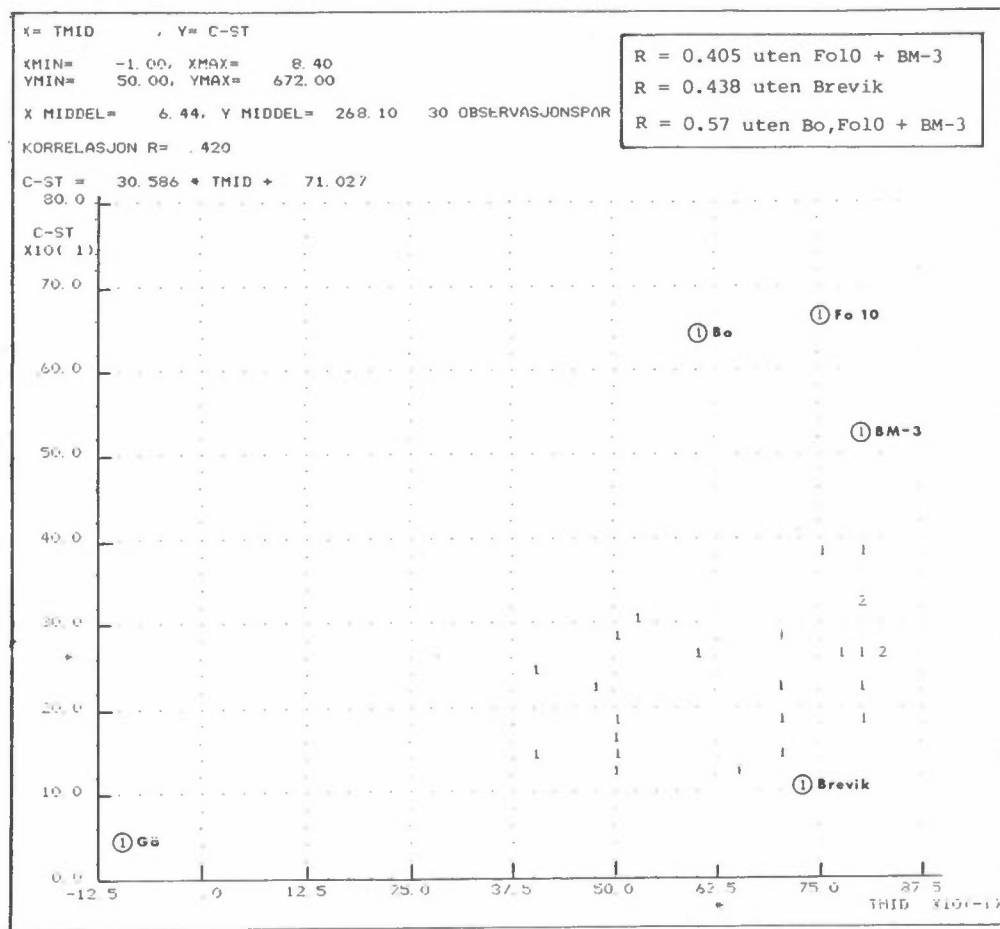
Tabell 1: Feltstasjoner NORDFORSK - korrosjon og miljødata fra 30 feltstasjoner i Skandinavia.

Tabell 2: Feltstasjoner NORDFORSK - korrelasjonsfaktorer for enfaktorrelasjonene: Korrosjon stål = f(variabel A) for 30 feltstasjoner i Skandinavia (tabell 1). Signifikansnivåer 99.5% (xxx), 99% (xx) og 95% (x).

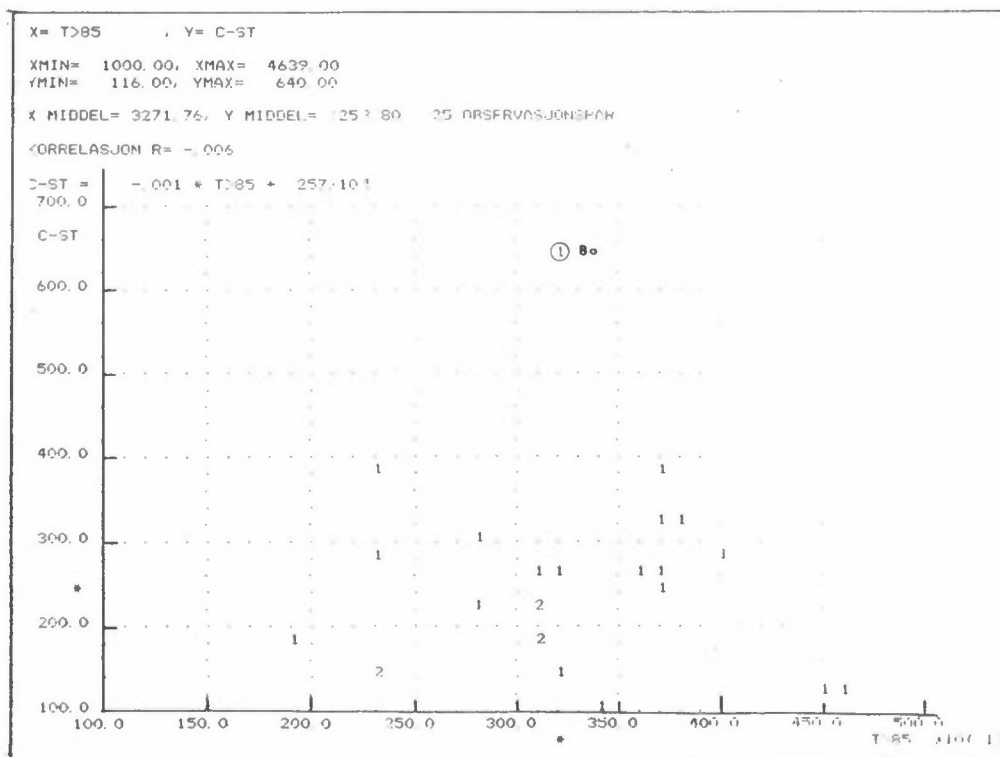
Parameter	Samlet antall stasjoner		Uten sjøatm. (Fo10+BM-3)		Uten sjøatm. og alle ind.atm (Fo10+BM-3+ Brevik)		Uten sjøatm. og sur ind. atm. (Fo10+BM-3+Bo)		
	Antall stasjoner								
Middeltemp.	30	0.42 (xx)		0.405(x)		0.438(xx)		0.570(xxx)	
Temp. Dager <0°C	22	-0.412(x)		-0.350		-0.355		-0.617(xxx)	
Timer <0°C	28	-0.304 x		-0.359 x		-0.367(x)		-0.515(xxx)	
Middelfukt.RH	18	0.046	Hverken FO 10 m eller BM-3 har disse fuktig-			0.001		0.227	
Fukt. Timer ≥85% RH	25	-0.006	hets- og nedbørsdata			0.01		-0.014	
" "90% RH	25	-0.047				-0.031		-0.151	
" "95% RH	16	-0.326				-0.249		-0.517	
Dg.m.nedbør	23	-0.037				-0.228		0.278	
T. m.nedbør	11	0.348				0.348		0.348	
mm nedbør	29(Fo10)	0.117		0.19		0.167		0.395(x)	
Nedbør- pH	24	0.044		-0.291		-0.187		-0.074	
kjemi	NH ₄ g/m ²	17	Vars. 0.104	Belastn. 0.027	Kons. Samme 0.112	0.083	Belastn 0.084	Kons. 0.116	Belastn. 0.187
	Ca "	16	-0.215	0.095	som -0.205	0.178	0.132	0.265	-0.217
	SO ₄ "	26	0.216	0.423(x)	i 0.245	0.555(xxx)	0.664 (xxx)	-0.216	0.084
	Cl "	26	0.175	0.607(xx)	kolonne 0.284	0.200	0.280	0.286	0.530(xxx)
	NO ₃ "	11	0.267	0.033	1. 0.300	0.284	0.329	0.267	0.300
	Ledn.evne µS	16	0.652(xxx)		0.298		0.666(xxx)		0.187
Luft	SO ₂ µg/m ³	27	0.553(xxx)		0.749 (xxx)		0.751(xxx)		0.526(xxx)
	NH ₄ "	4	0.719						
	Ca "	4	0.836						
	SO ₄ "	4	0.806						
	Cl "	4	0.415						

Tabell 3: Feltstasjoner NORDFORSK - korrelasjonsfaktorer for enfaktorrelasjonene: Korrosjon sink = f(variabel A) for 30 feltstasjoner i Skandinavia (Tabell 1).
Signifikansnivåer 99.5% (xxx), 99% (xx) og 95% (x)

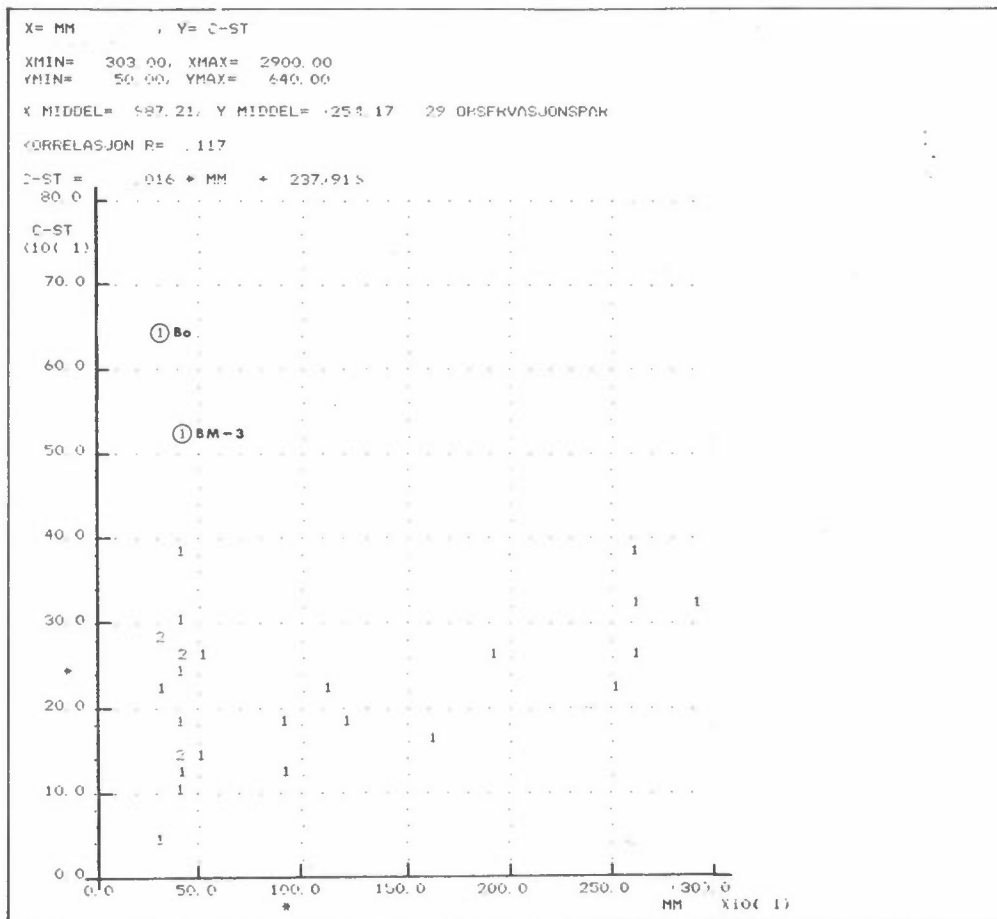
Parameter	Samlet antall stasjoner		Uten sjøatmosfære (Fo10+BM-3)		Uten sjøatmosfære og alk. industri (Fo10+BM-3+Brevik)		Uten sjøatmosfære og sur industriatmosfære (Fo10+BM-3+Bc)		
	Antall stasjoner								
Middeltemp	30	0.223			0.182	0.214		0.271	
Temp. Dager <0°C (D<0)	22	-0.275			-0.241	-0.243		<u>-0.440(x)</u>	
Timer <0°C (T<0)	28	0.297			-0.301	-0.309		<u>-0.454(xx)</u>	
Middelfukt RH	18	0.283				0.247		<u>0.534(x)</u>	
Fukt. Timer >85% RF	25	0.075			Hverken Fo-10 eller BM-3	0.095		0.102	
" "90% "	25	0.049			har disse fuktighets-	0.069		-0.011	
" "95% "	16	-0.171			eller nedbørsdata.	-0.085		-0.321	
Dager m/nedbør	23	+0.067				-0.130		<u>0.416(x)</u>	
Nedbør Timer " "	11	-0.044				-0.044		-0.044	
mm nedbør	29(-Fo10)	0.221			0.248	0.225		<u>0.493(xxx)</u>	
pH	24	-0.296			-0.398	-0.325		-0.236	
		Kons.	Belastn.		Kons.	Belastn.		Kons.	Belastn.
Nedbør- NH ₄	17	-0.110	-0.127		-0.105	-0.143	-0.147		-0.189
kjemi Ca g/m ²	16	-0.272	-0.112		Samme	-0.236	0.091	0.200	-0.399
SO ₄ g/m ²	26	0.088 (-Fo10m)	<u>0.346(x)</u>		som i	0.286	<u>0.519(xxx)</u>	<u>0.755(xxx)</u>	-0.318
Cl "	26	0.166	0.267		kolonne	<u>0.366(x)</u>	0.194	<u>0.366(x)</u>	0.294
NO ₃ "	11	-0.076	-0.151		1	-0.043	-0.082	-0.025	0.076
Ledn. evne uS	16	0.259				0.078	0.376		-0.216
Luft SO ₂ ug/m ³	27	<u>0.705(xxx)</u>				<u>0.748(xxx)</u>	<u>0.75(xxx)</u>		<u>0.498(xx)</u>
NH ₄ "	4	0.645							
Ca "	3	0.974							
SO ₄ "	4	0.006							
Cl "	4	0.891							
NO ₃ "	3	0.911							



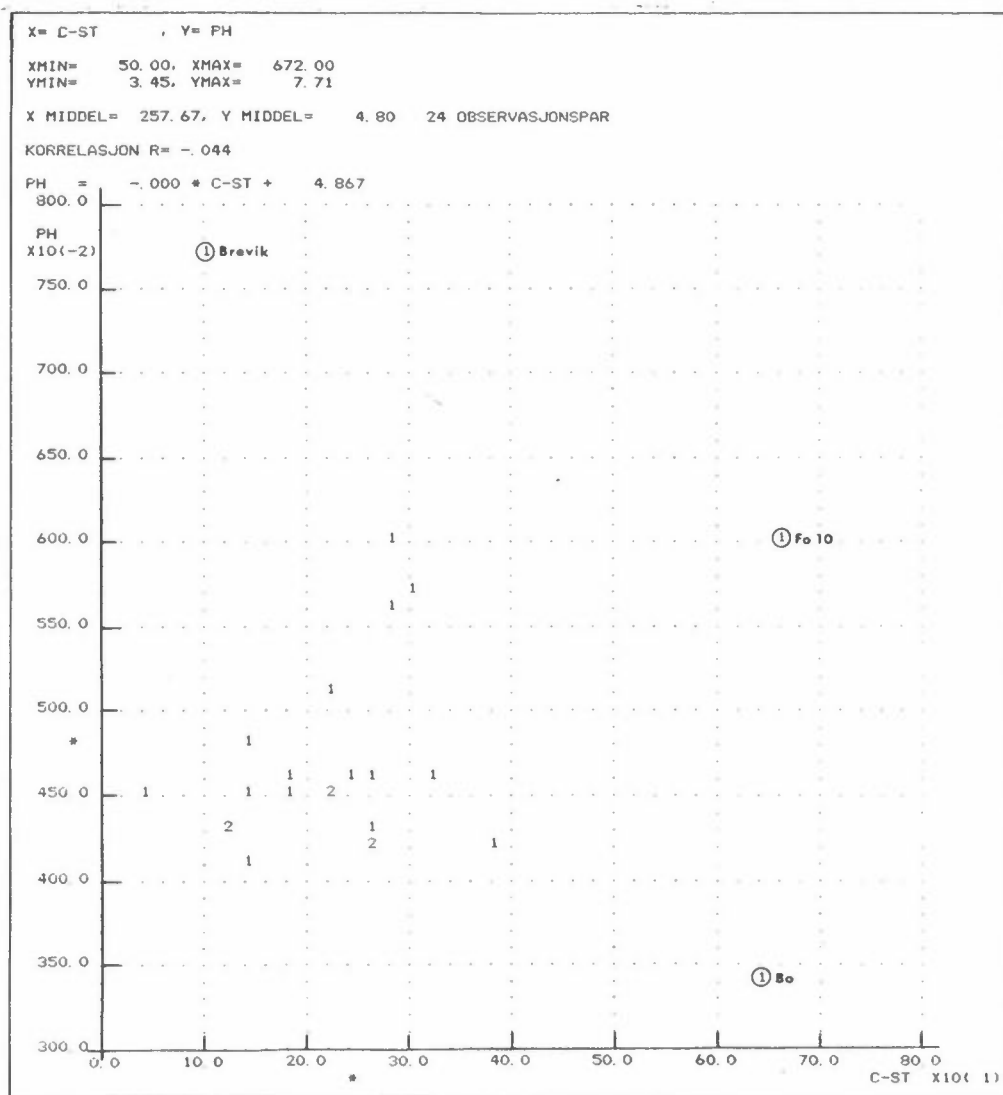
Figur 1: Feltstasjoner NORDFORSK - korrosjonen av stål som funksjon av stasjonenes middeltemperatur.



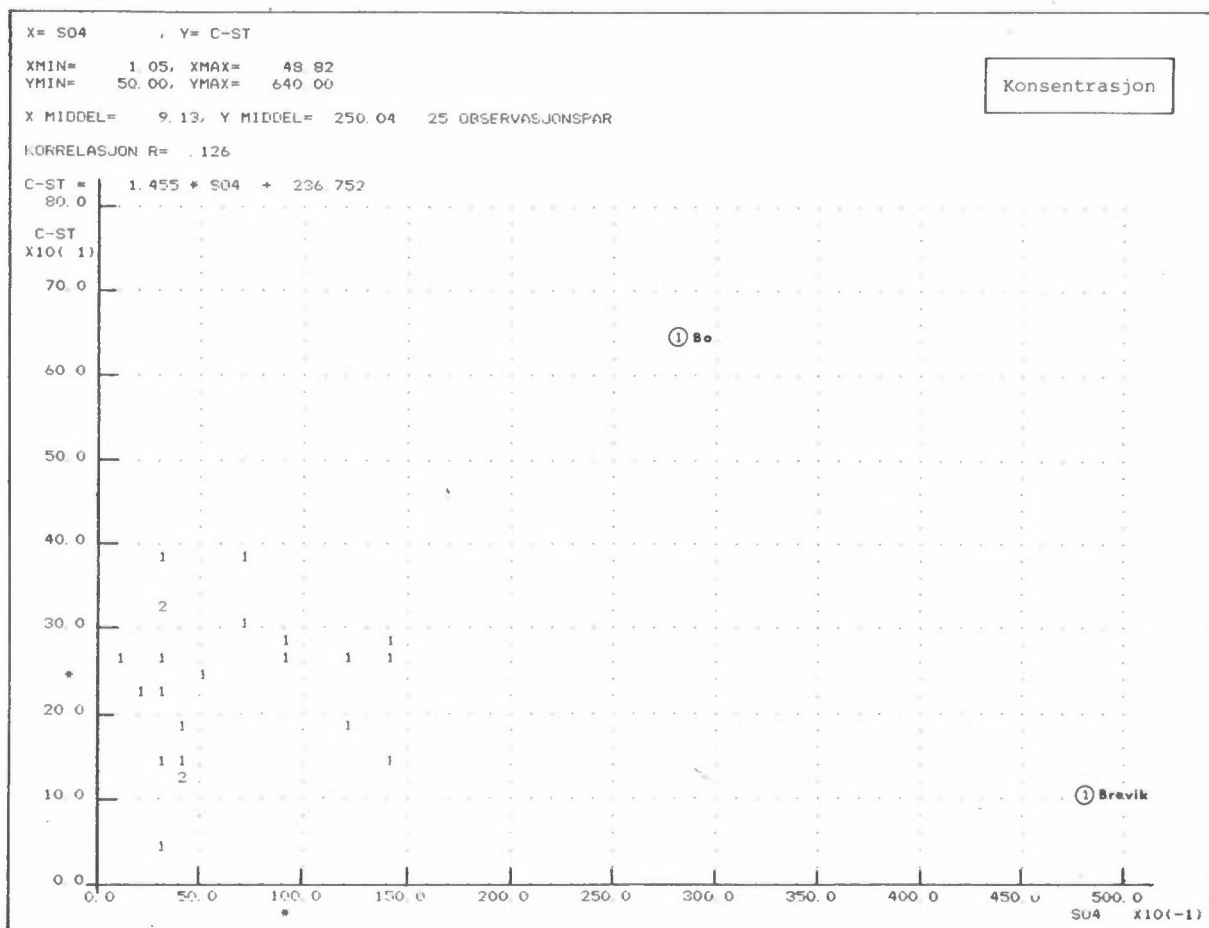
Figur 2: Feltstasjoner NORDFORSK - korrosjonen av stål som funksjon av timer > 85% relativ fuktighet på stasjonene.



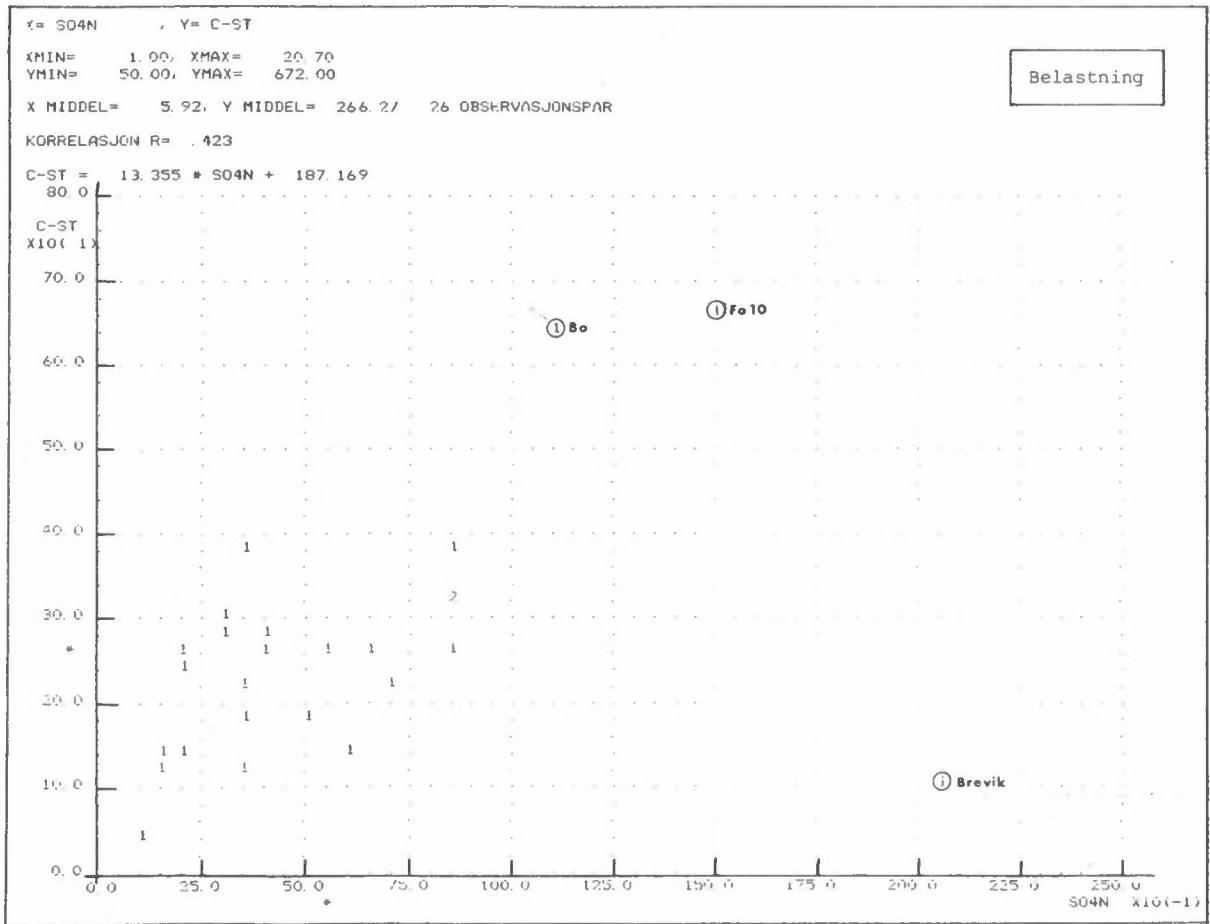
Figur 3: Feltstasjoner NORDFORSK - korrosjon av stål som funksjon av mm nedbørmengde på stasjonene.



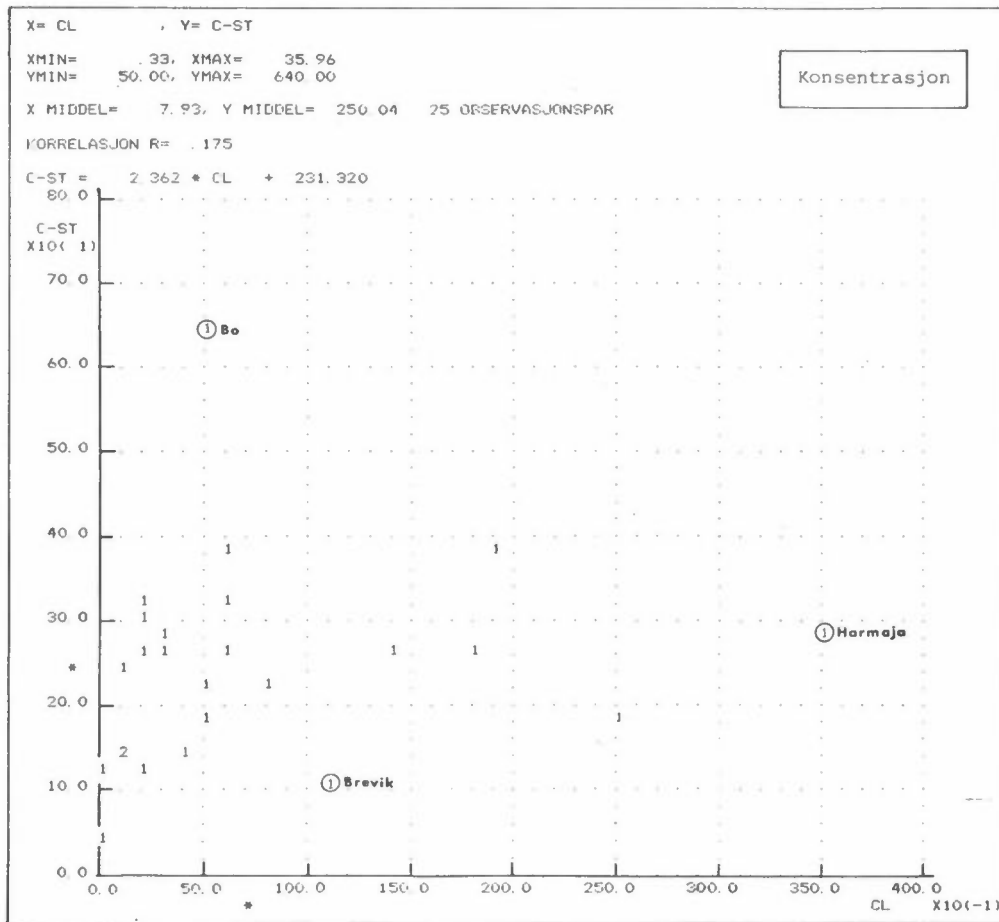
Figur 4: Feltstasjoner NORDEFORSK - korrosjonen av stål som funksjon av nedbørens surhetsgrad på stasjonene.



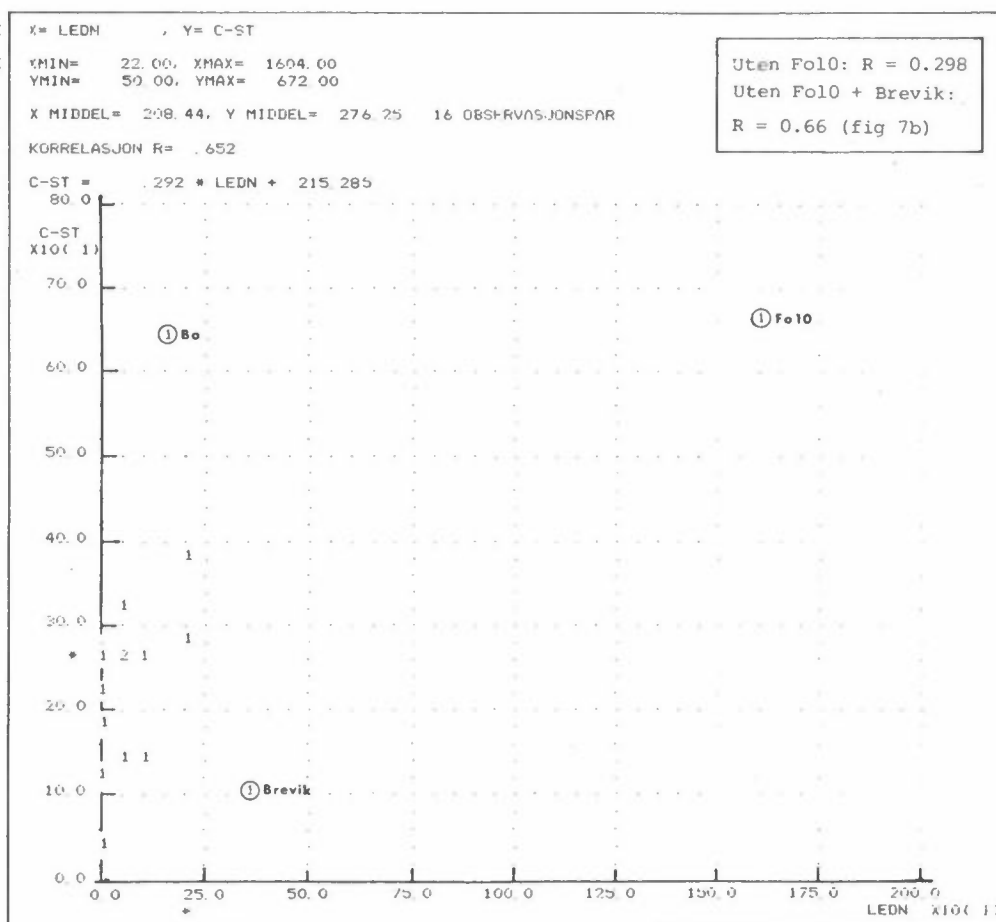
Figur 5a: Feltstasjoner NORDFORSK - korrosjonen av stål som funksjon av sulfat i nedbøren på stasjonene.



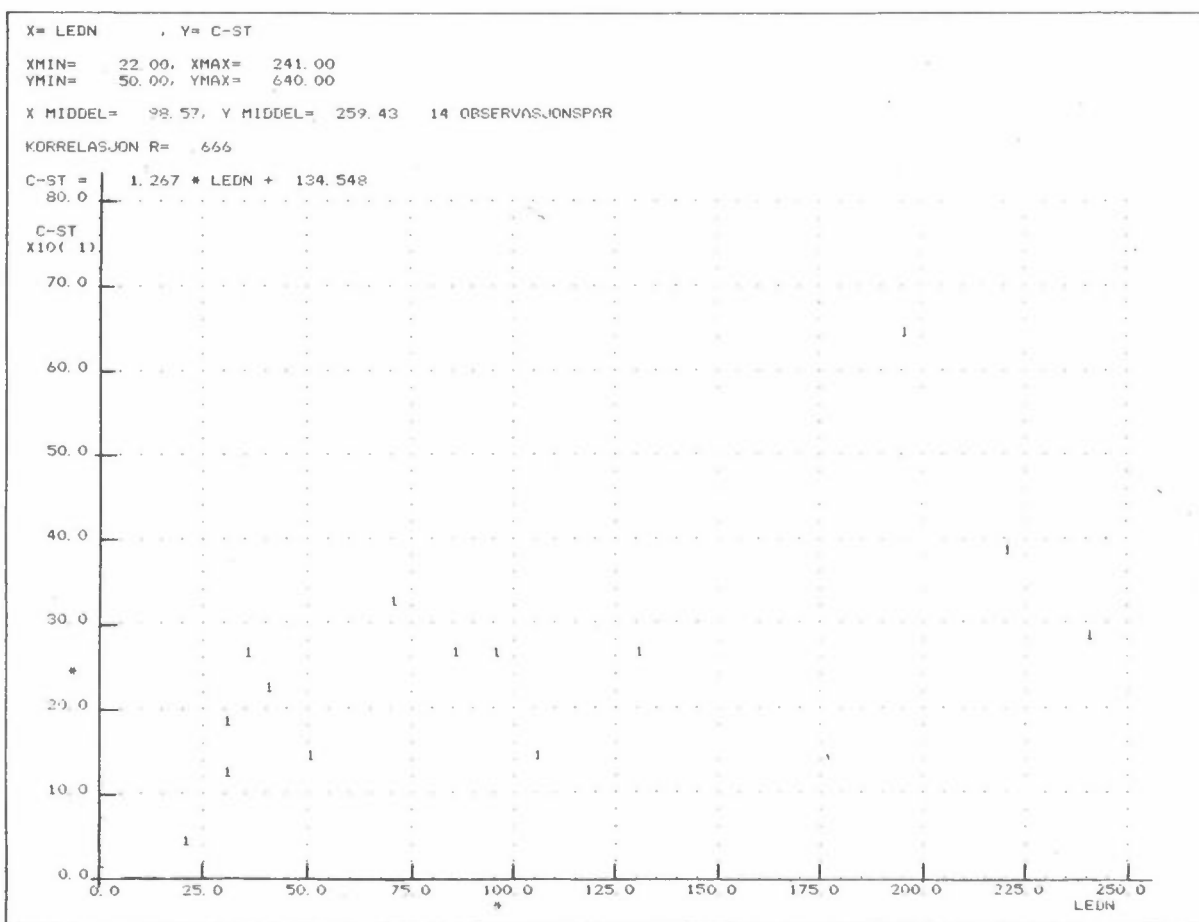
Figur 5b: Feltstasjoner NORDFORSK - korrosjonen av stål som funksjon av sulfat i nedbøren på stasjonene.



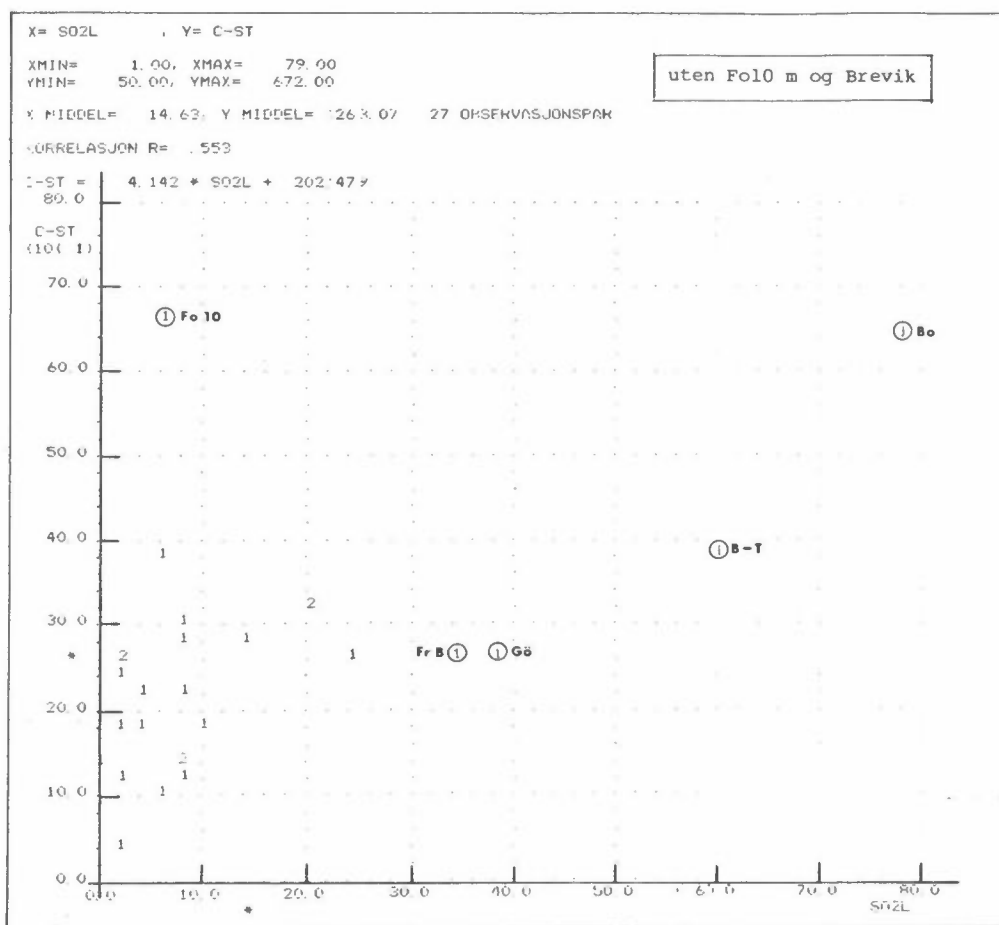
Figur 6a: Feltstasjoner NORDFORSK - korrosjonen av stål som funksjon av klorid i nedbøren på stasjonene.



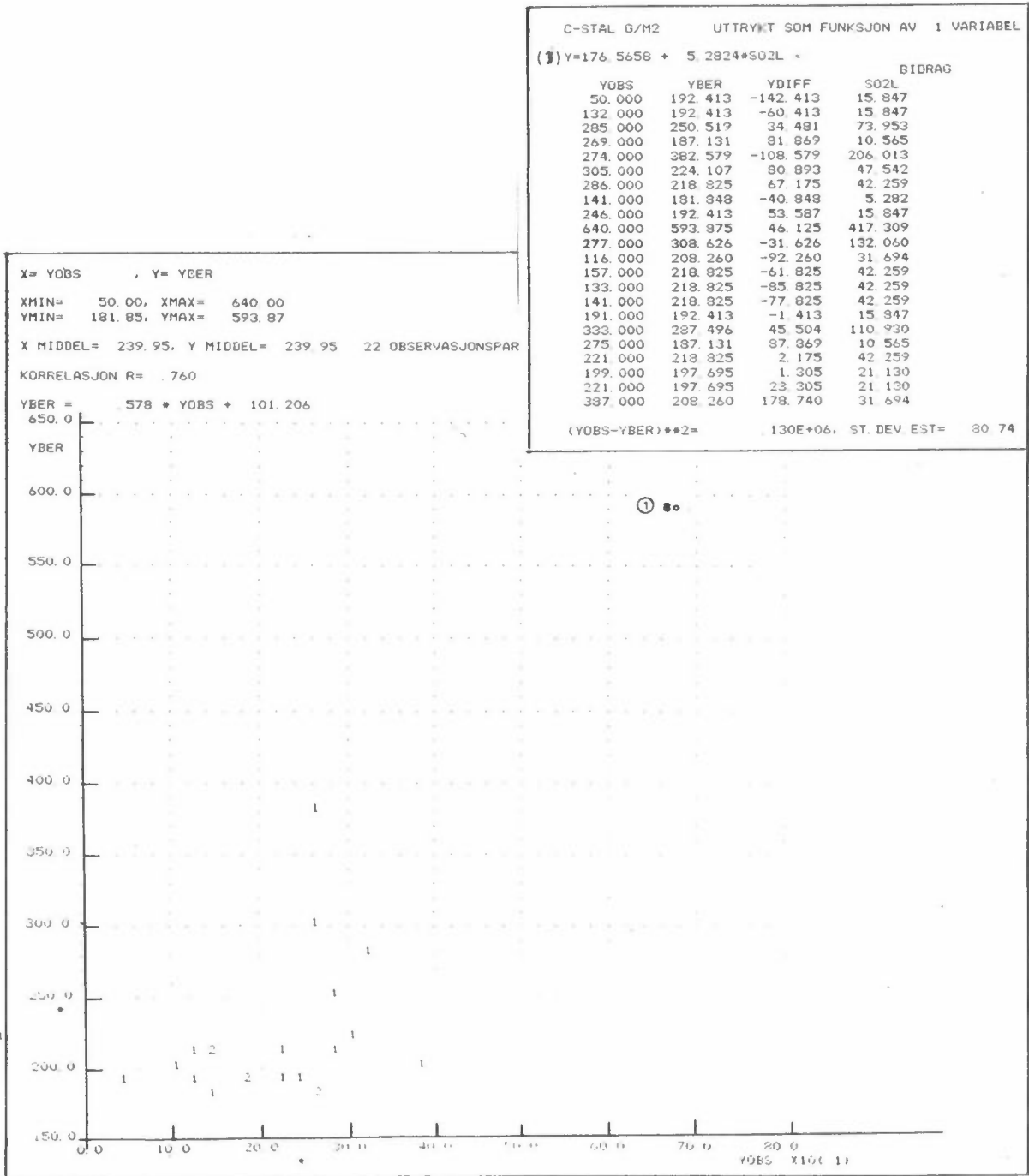
Figur 7a: Feltstasjoner NORDFORSK - korrosjonen av stål som funksjon av ledningsevne i nedbøren på stasjonene.



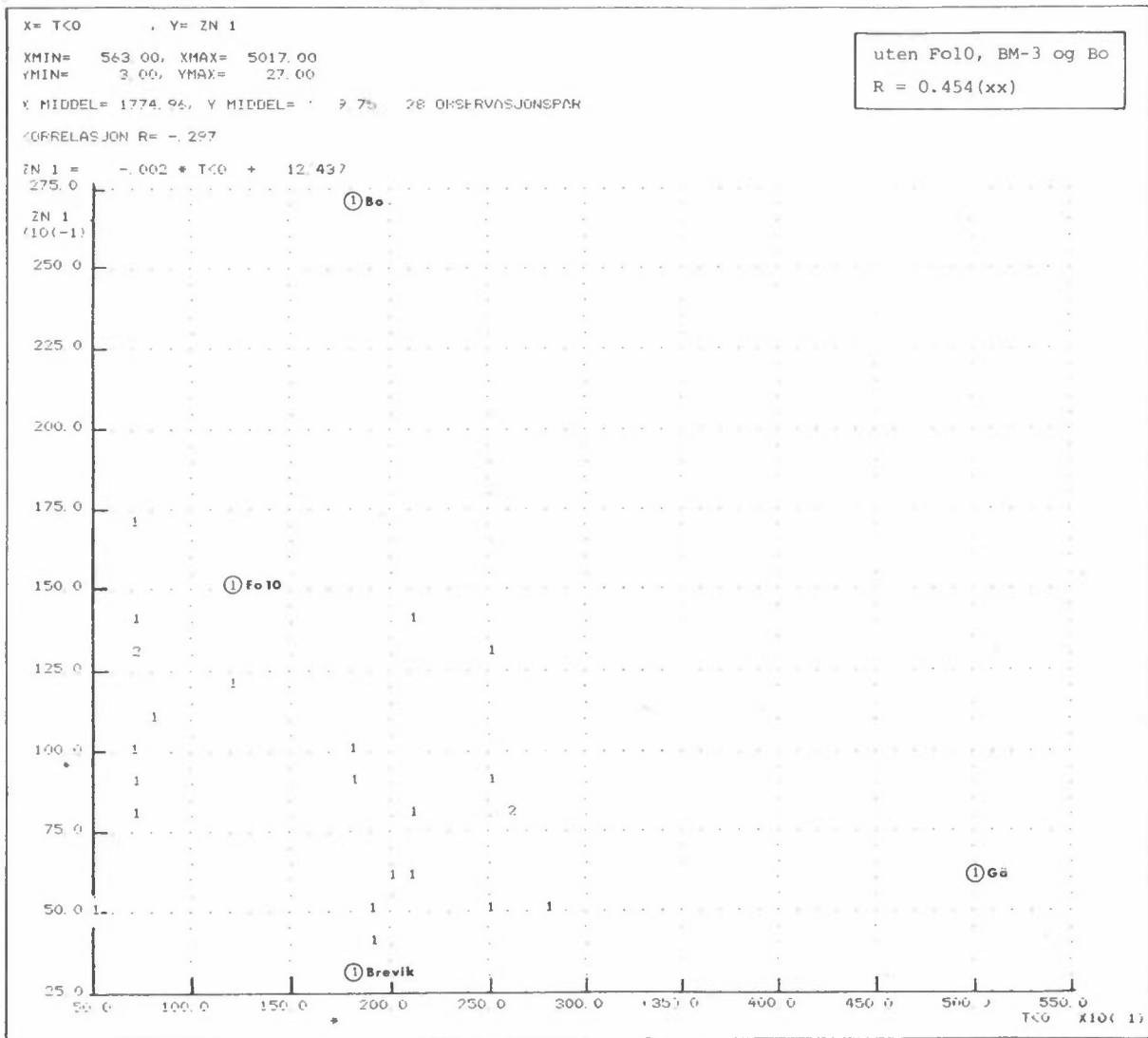
Figur 7b: Feltstasjoner NORDFORSK - korrosjonen av stål som funksjon av ledningsevne i nedbøren på stasjonene.



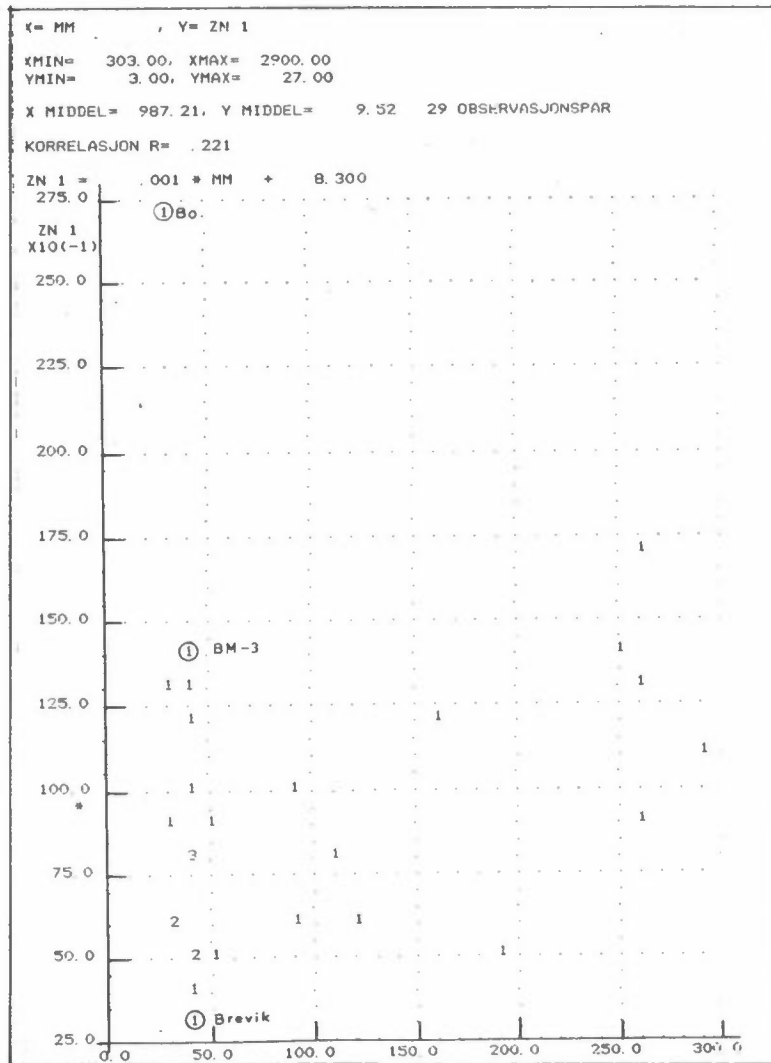
Figur 8: Feltstasjoner NORDFORSK - korrosjonen av stål som funksjon av svoveldioksyd i lufta.



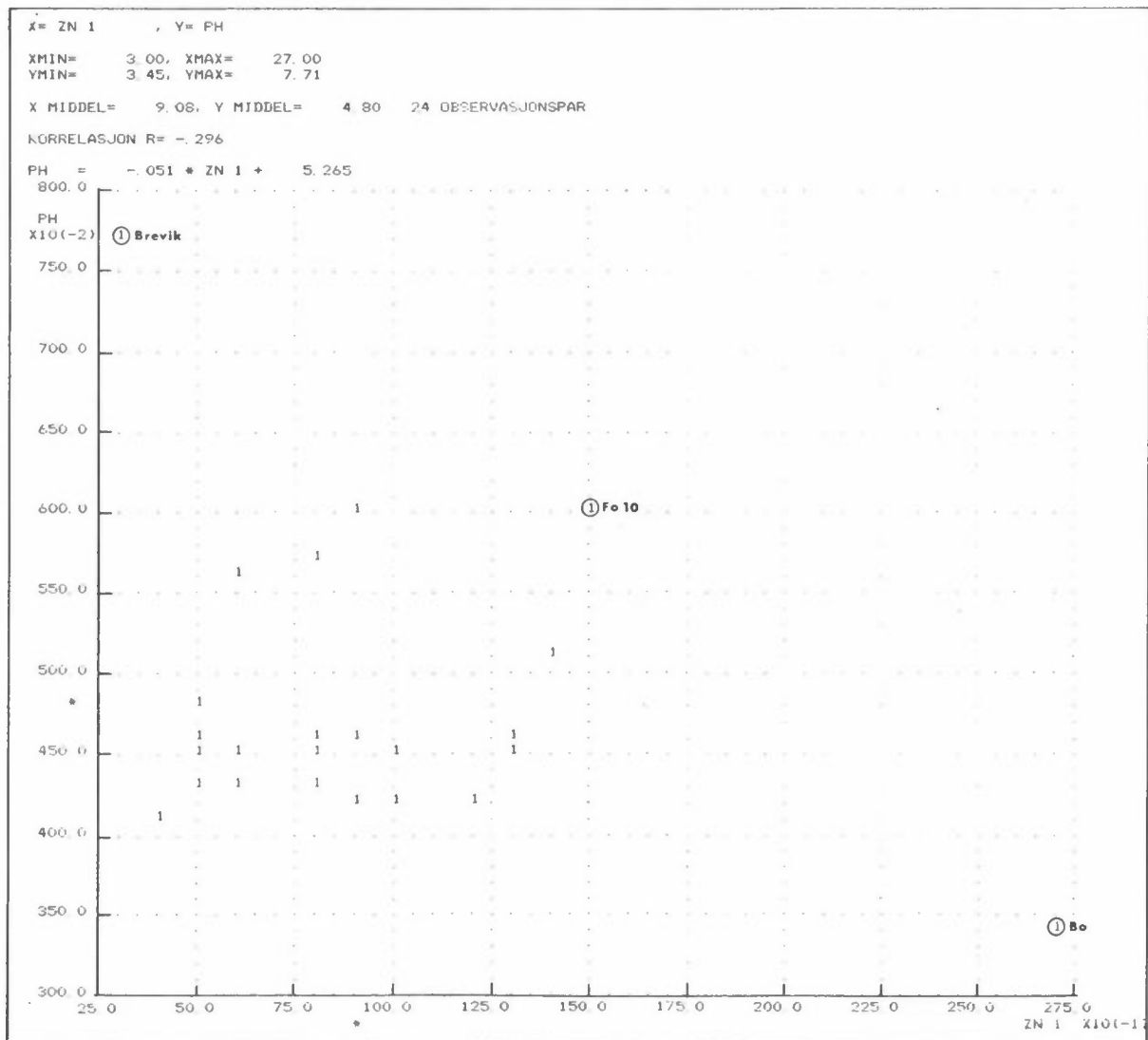
Figur 9: Feltstasjoner NORDFORSK - målte og beregnede korrosjonshastigheter (etter ligning 1) for stål.



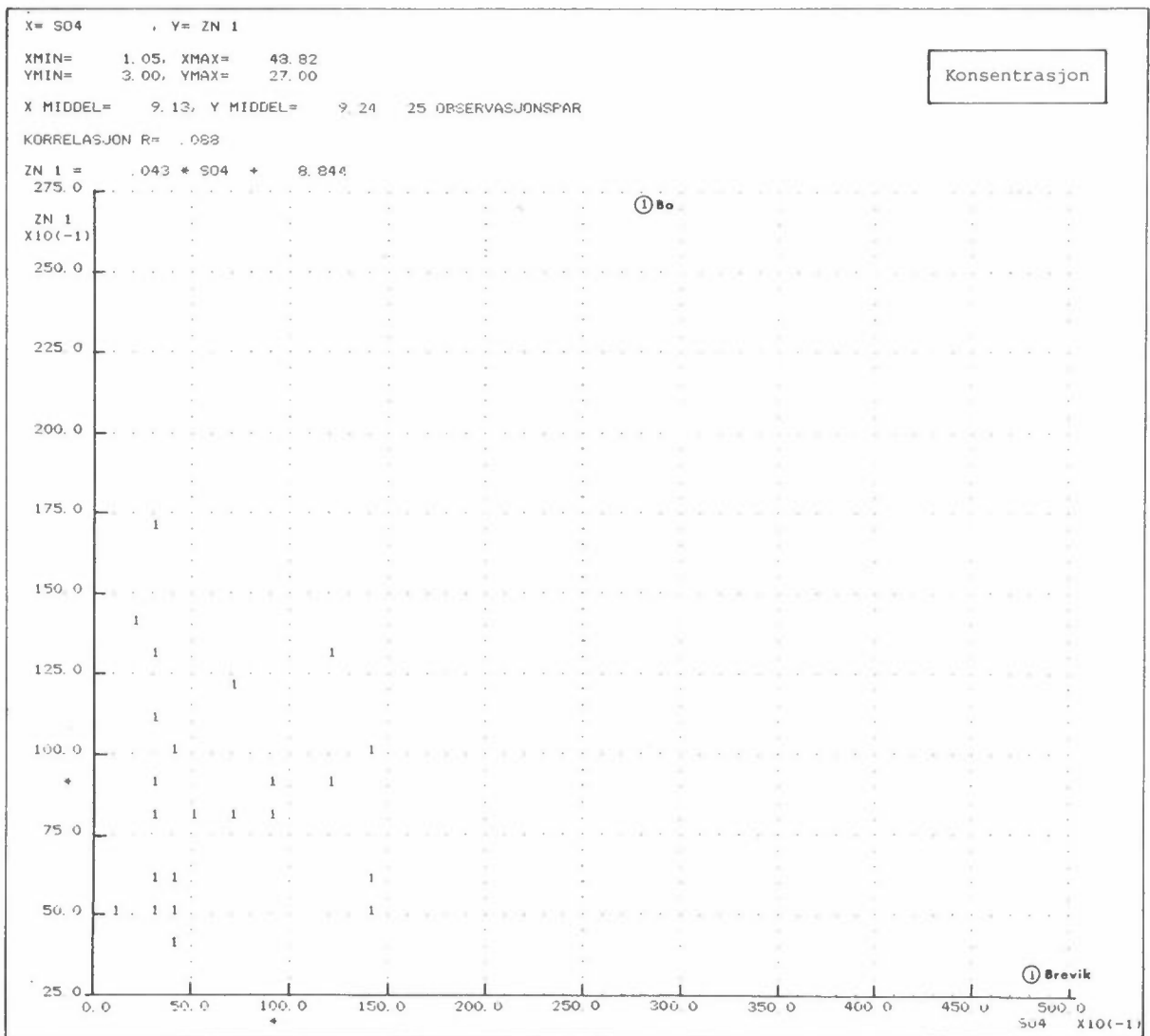
Figur 10: Feltstasjoner NORDFORSK - korrosjonen av sink som funksjon av timer $< 0^{\circ}C$ på stasjonene.



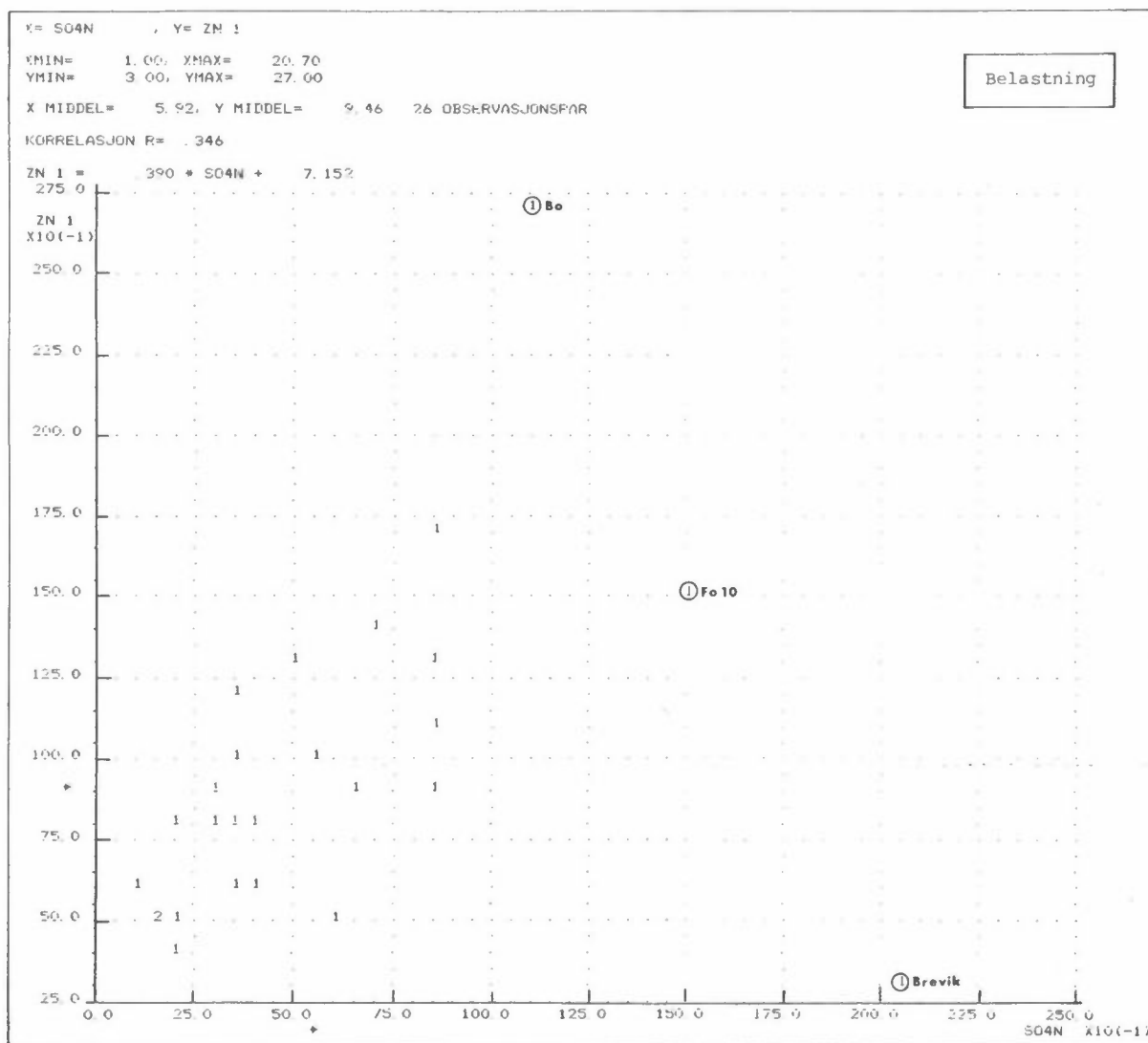
Figur 11: Feltstasjoner NORDFORSK - korrosjonen av sink som funksjon av nedbørmengden på stasjonene.



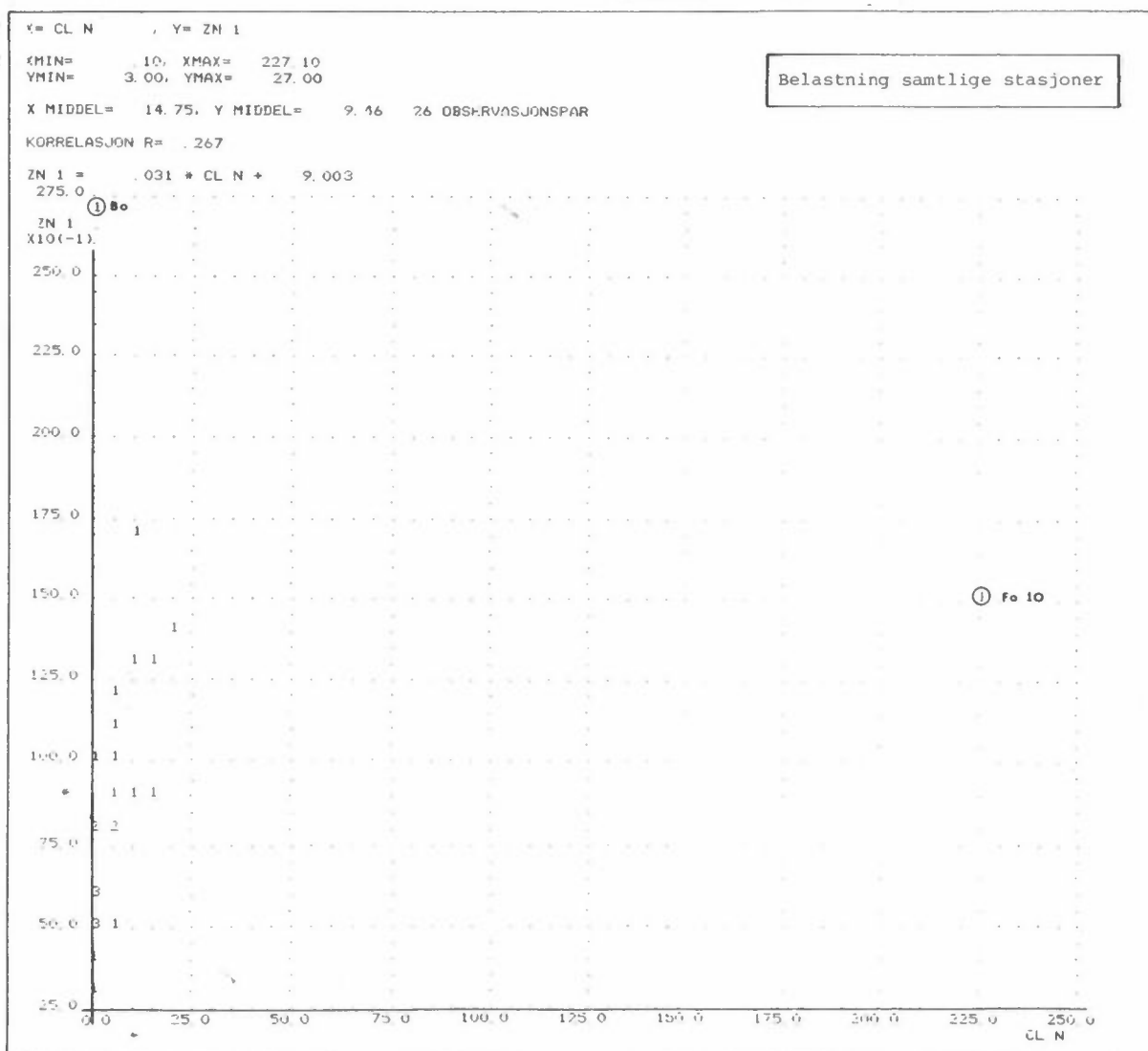
Figur 12: Feltstasjoner NORDFORSK - korrosjonen av sink som funksjon av pH i nedbøren på stasjonene.



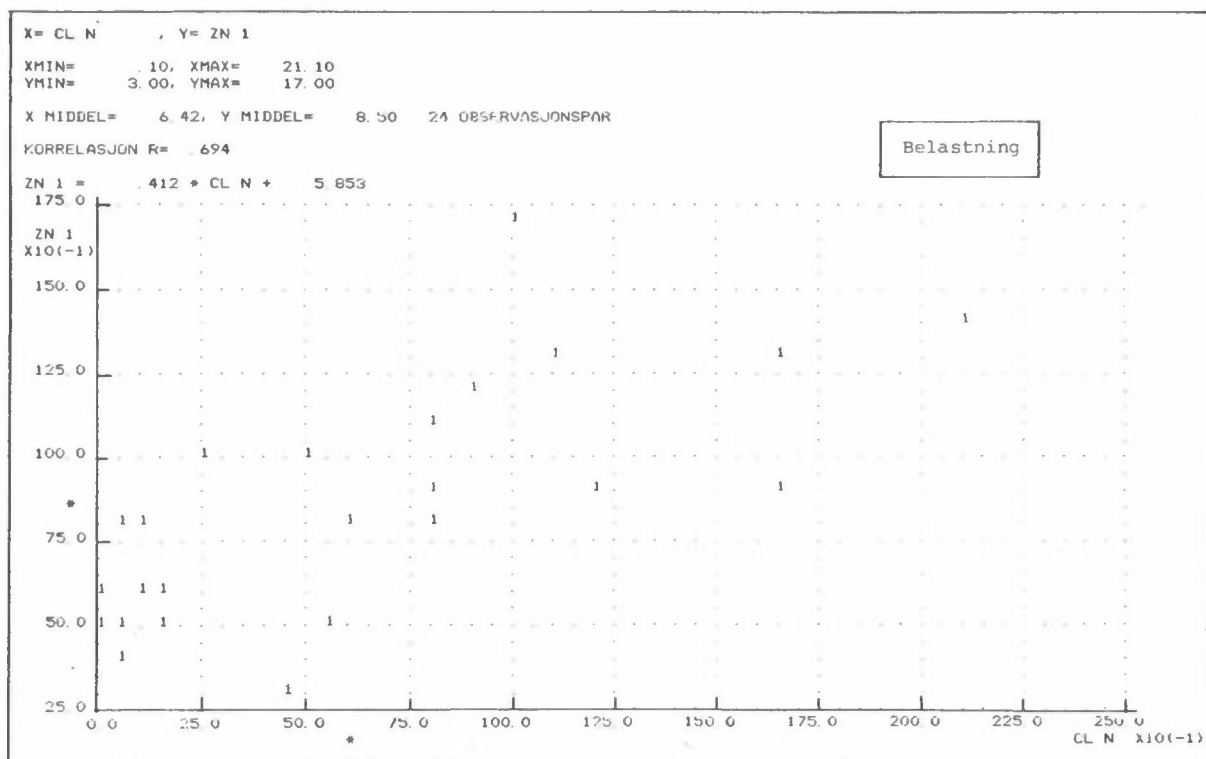
Figur 13a: Feltstasjoner NORDFORSK - korrosjonen av sink som funksjon av sulfat i nedbøren på stasjonene.



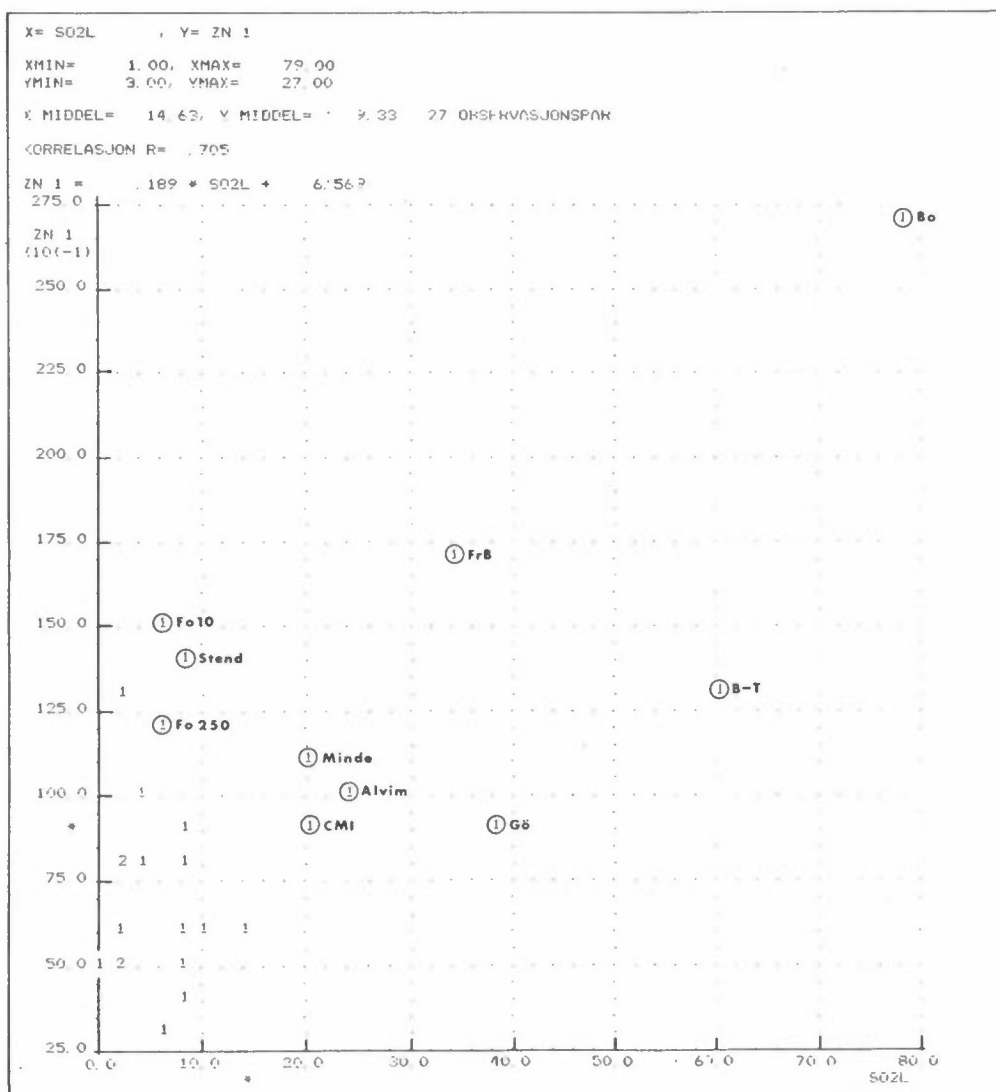
Figur 13b: Feltstasjoner NORDFORSK - korrosjonen av sink som funksjon av sulfat i nedbøren på stasjonene.



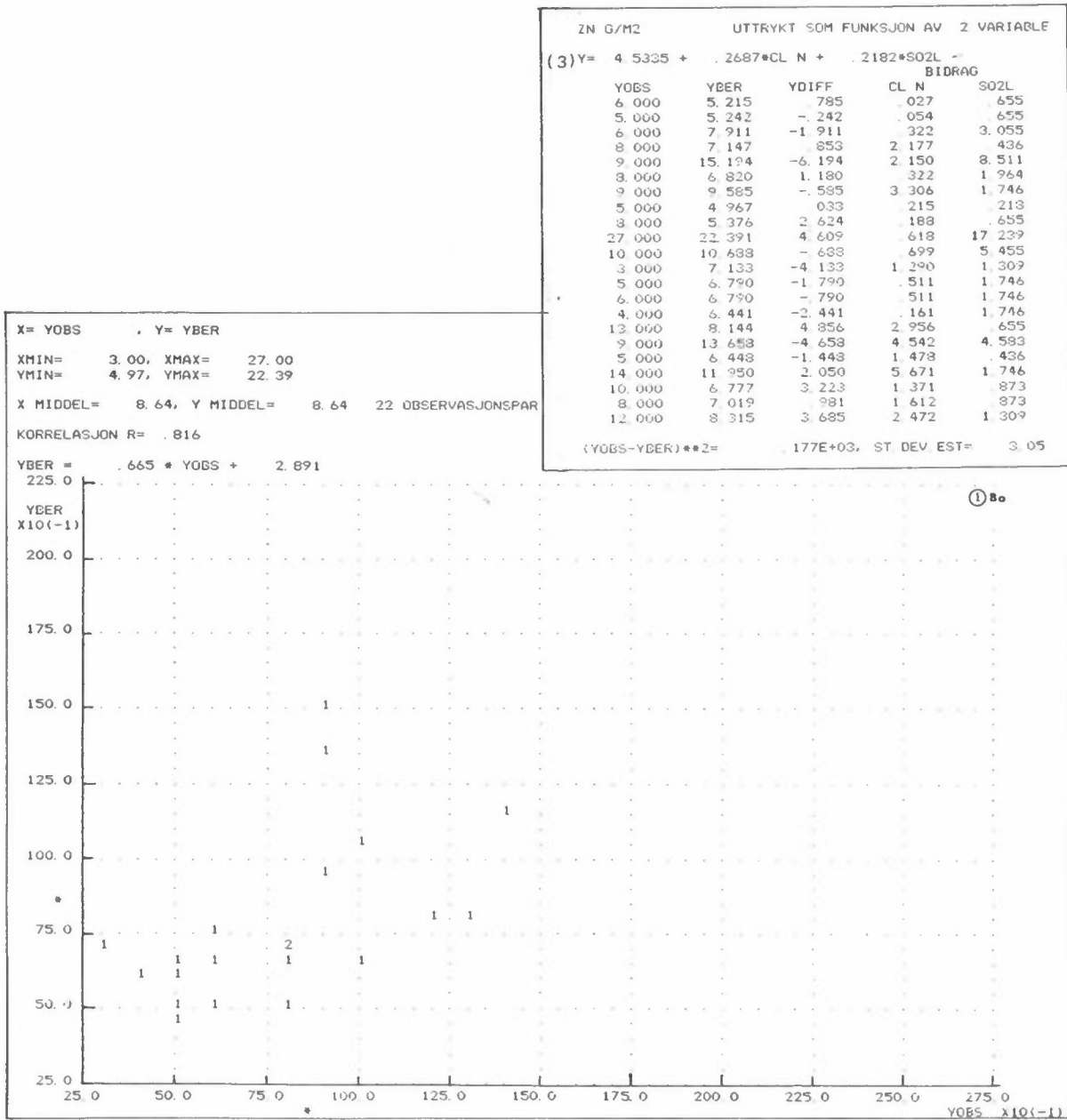
Figur 14a: Feltstasjoner NORDFORSK - korrosjonen av sink som funksjon av klorid i nedbøren på stasjonene.



Figur 14b: Feltstasjoner NORDFORSK - korrosjonen av sink som funksjon av klorid i nedbøren på stasjonene.



Figur 16: Feltstasjoner NORDFORSK - korrosjonen av sink som funksjon av svoveldioksyd i luften på stasjonene.



.Figur 17: Feltstasjoner NORDFORSK - målte og beregnede (etter ligning 3) korrosjonshastigheter av sink.