

**Swerea KIMAB AB**  
**Statens geotekniska institut**

# **Korrosion på långtidsexponerade vertikala stålrör i jord**

**Tor-Gunnar Vinka & Ulf Bergdahl**



## Förord

Under en lång följd av år har Korrosionsinstitutet (KI), numera Swerea KIMAB AB och Statens geotekniska institut (SGI) i samarbete med IVAs Pålkommision/Pålkommisionen och tidigare SJs Geotekniska kontor sökt klarlägga korrosionshastigheterna på stålplåtar i jord och vatten. Detta har resulterat i Pålkommisionens Rapport 93 (1994) [1] och Rapport 98 (2000) [2] med dimensioneringsanvisningar för slagna slanka stålplåtar.

En ny rapport, Pålkommisionens Rapport 105 (2009) [3], med samlade erfarenheter av korrosion i jord fram till 2007 har utkommit.

Föreliggande rapport utgör ett första dokument inom det nya projektet i Swerea KIMAB AB; "Korrosion i jord på stålplåtar och andra bärande konstruktioner – Långtidsprojekt i fält", som syftar till att ta in och utvärdera korrosionen på ett antal neddrivna stålplåtar och nedgrävda stålstänger, som varit exponerade i jord i över 25 år. Detta projekt finansieras av Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF), Svenska Kraftnät, Ruukki Construction, Pålkommisionen, Swerea KIMAB AB och Statens geotekniska institut.

Denna delrapport inom projektet redovisar resultat från tidigare neddrivna och upptagna rör från Sandvik AB, som efter cirka 25 års exponering tagits upp av Korrosionsinstitutet och senare undersökts på Statens geotekniska institut.

I projektgruppen ingår:

Lillemor Carlshem (ordförande), Svenska Kraftnät, Sundbyberg  
Gunnar Holmberg, Skanska Sverige AB, Skanska Teknik, Göteborg  
Harald Ihler, Ruukki Norge AS, Oslo  
Ulf Bergdahl, Statens geotekniska institut, Linköping  
Jörgen Almqvist, Göran Camitz och Tor-Gunnar Vinka, Swerea KIMAB AB, Stockholm

Samråd har under arbetets gång skett med projektgruppen. Författarna framför härmed ett varmt tack till Sandvik AB för deras värdefulla gåva till korrosionsforskningen. Vi vill tacka följande personer som arbetar eller har arbetat vid Sandvik AB: Ola Forssell, som kom med erbjudandet att överta den pågående exponeringen av rören och givit oss de interna rapporterna, Hans Eriksson, som hjälpt oss att översätta Sandviks stålbetaeckningar till svensk standard och Jan Andersson, som mätt densitet hos de olika stålen.

Vi tackar också för värdefulla synpunkter, som framkommit under arbetet med rapporten.

Stockholm och Linköping i februari 2011

Tor-Gunnar Vinka  
Swerea KIMAB AB

Ulf Bergdahl  
Statens geotekniska institut



# Innehållsförteckning

<b>Förord</b>	<b>..... 3</b>
<b>Sammanfattning</b>	<b>..... 9</b>
<b>1. Inledning</b>	<b>... 11</b>
<b>2. Provningsplatser</b>	<b>... 12</b>
2.1 Lokalisering .....	12
2.2 Jordanalyser .....	12
<b>3. Korrosionsprovning</b>	<b>... 19</b>
3.1 Material.....	19
3.2 Exponering av rören.....	19
3.3 Mätningar i samband med intag av rören .....	21
3.4 Seghårdning av stål och hållfasthetsegenskaper hos rören.....	23
3.4.1 Seghårdning.....	23
3.4.2 Hållfasthetsegenskaper hos rören .....	24
3.5 Sammanfattning av provningsförfarandet.....	26
<b>4. Tidigare utvärderingar av korrosionsangrepp på rör av Sandvik AB</b>	<b>... 27</b>
<b>5. Utvärdering av korrosionsangrepp</b>	<b>... 33</b>
5.1 Rengöring och vägning av rören.....	33
5.2 Mätning med vattenvolymeter .....	33
5.3 Korrosionstyper.....	37
5.3.1 Jämn korrosion .....	37
5.4 Beräkning av genomsnittlig korrosionshastighet baserat på massförlust .....	38
5.5 Beräkning av korrosionshastighet baserat på vattenvolymetermätningar .....	39
<b>6. Resultat</b>	<b>... 42</b>
<b>6.1 Allmänna iakttagelser.....</b>	<b>42</b>
6.1.1 Kolstål exponerat vid tre provningsplatser.....	42
6.1.1.1 Nyhem .....	42
6.1.1.2 Närefors.....	42
6.1.1.3 Åkerhög.....	43
6.1.2 Låglegerat stål exponerat vid Åkerhög .....	44
6.1.2.1 Låglegerat stål SS 2225.....	44
6.1.2.2 Låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo .....	45
<b>6.2 Korrosionshastigheter angivna i denna rapport .....</b>	<b>45</b>
<b>6.3 Korrosionshastigheter från massförlustbestämningar .....</b>	<b>46</b>
<b>6.4 Korrosionshastigheter från vattenvolymetermätningar .....</b>	<b>47</b>
6.4.1 Kolstål exponerat vid tre provningsplatser.....	50
6.4.1.1 Nyhem .....	50
6.4.1.2 Närefors.....	51
6.4.1.3 Åkerhög.....	52
6.4.2 Låglegerat stål exponerat vid Åkerhög .....	53
6.4.2.1 Låglegerat stål SS 2225.....	53
6.4.2.2 Låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo .....	54

6.5	Statistiska parametrar för korrosionshastighet .....	56
<b>7.</b>	<b>Tidigare undersökningar av korrosionen på stolpar</b> .....	<b>58</b>
7.1	Kraftledningsstolpar.....	58
7.2	Belysningsstolpar .....	59
7.2.1	Inventering .....	59
7.2.2	Exponering.....	59
7.3	Sammanfattning av undersökningar av korrosion på stolpar .....	61
<b>8.</b>	<b>Diskussion</b> .....	<b>63</b>
8.1	Inverkande faktorer vid korrosion i jord .....	63
8.1.1	Syretillförsel genom jorden .....	63
8.1.2	Luftningsceller i jorden.....	64
8.1.2.1	Laboratorieförsök med luftningsceller .....	66
8.1.3	Samband mellan korrosionshastighet och jordparametrar .....	70
8.2	Jämförelse mellan uppmätt korrosion och jordegenskaper.....	70
8.2.1	Allmänt .....	70
8.2.2	Jämförelse för olika provningsplatser .....	70
8.2.2.1	Resultat för kolstål från Nyhem .....	71
8.2.2.2	Resultat för kolstål från Närefors.....	72
8.2.2.3	Resultat för låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo från Åkerhög .....	72
8.2.3	Jämförelse med korrosion på kraftledningsstolpar .....	72
8.3	Inverkan av luftningsceller på korrosionen på rören.....	73
8.3.1	Rör av kolstål från Nyhem och Närefors.....	73
8.3.2	Rör av kolstål och låglegerat stål från Åkerhög .....	74
8.3.2.1	Kolstål SS 2120.....	74
8.3.2.2	Låglegerat stål SS 2225.....	74
8.3.2.3	Låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo .....	75
8.3.3	Sammanfattning av korrosionsangrepp på rör orsakat av luftningsceller.....	76
8.4	Korrosionshärdighet hos de olika stälen.....	76
8.4.1	Inverkan av legeringsämnen på korrosionen hos låglegerat stål .....	77
8.4.1.2	Undersökningar av låglegerat stål i jord.....	77
8.4.1.2	Undersökningar av låglegerat stål i havsvatten .....	80
8.4.1.3	Slutsatser från undersökningarna .....	83
8.5	Praktisk tillämpbarhet av resultaten .....	84
8.6	Exponeringssätt av rör.....	84
<b>9.</b>	<b>Sammanfattande resultat och synpunkter</b> .....	<b>85</b>
9.1	Korrosionsangrepp .....	85
9.2	Jämförelser mellan korrosionsangrepp uppmätt på olika sätt.....	85
9.3	Korrosionens beroende av jordens egenskaper .....	86
<b>10.</b>	<b>Referenser</b> .....	<b>87</b>

<b>Bilaga A:1</b>	<b>Kolstål SS 2120 från Nyhem</b>	<b>... 90</b>
<b>Bilaga A:2</b>	<b>Kolstål SS 2120 från Närefors</b>	<b>... 91</b>
<b>Bilaga A:3</b>	<b>Kolstål SS 2120 från Åkerhög</b>	<b>... 92</b>
<b>Bilaga A:4</b>	<b>Låglegerat stål SS 2225 från Åkerhög</b>	<b>... 93</b>
<b>Bilaga A:5</b>	<b>Låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo från Åkerhög</b>	<b>... 94</b>
<b>Bilaga B:1 - B:3</b>	<b>Sammanställning av laboratorieundersökningar av jorden på provningsplatserna</b>	<b>... 95</b>
<b>Bilaga B:4</b>	<b>Resultat av laboratorieundersökningar av jorden på provningsplatserna: pH-värde, vattenkvot, kloridhalt och organisk halt</b>	<b>... 98</b>
<b>Bilaga B:5</b>	<b>Resultat av laboratorieundersökningar av jorden på provningsplatserna: resistivitet med instickselektrod</b>	<b>... 99</b>
<b>Bilaga B:6 - B:8</b>	<b>Jordens kornstorleksfördelning på provningsplatserna</b>	<b>. 100</b>





# Sammanfattning

Under 1967 drev dåvarande Sandvikens Jernverks AB ner ett större antal rör av olika stålsorter i ostörd jord på tre olika platser i Mellansverige med syftet att låta stålrören stå ostörda i jorden under lång tid för att därefter undersöka dem med avseende på uppkommen korrosion. Efter en tid hade undersökningen förlorat intresse för Sandvik AB, som då överlät undersökningen till dåvarande Korrosionsinstitutet (KI). Rören togs upp av Korrosionsinstitutet 1992 efter 25 års exponering. Härefter har rören rengjorts och avrostningen uppmätts på olika sätt.

Rören har drivits ned på tre olika provningsplatser:

1. Nyhem vid Sandviken där jorden består av gyttjig silt med relativt hög organisk halt.
2. Närefors nära Lidköping där jorden består av siltig lera med delvis lågt pH-värde.
3. Åkerhög nära Kungälv där jorden består av marin lera med hög kloridhalt.

Rören bestod av 3,5 m långa rör med 32 mm ytterdiameter och 16 eller 9 mm innerdiameter av olika stålsorter. Rören drevs ned nära 3 m i jorden, det vill säga cirka 0,6 m av rören stack upp över markytan. Centrumhålet lämnades öppet vid neddrivningen. Före nedslagning har rören ursprungsvikt nogga bestämts.

Följande tre stålsorter har ingått i undersökningen:

- a. Kolstål SS 2120 med exponering på alla tre provningsplatserna
- b. Låglegerat stål SS 2225 med exponering vid Åkerhög
- c. Låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo med exponering vid Åkerhög.

Efter rengöring kunde en första mätning av korrosionen bestämmas genom en noggrann vägning av rören och jämförelse med ursprungsmassan. Detta ledde till ett mått på den massförlustbestämda medelavfrätningen på rörens hela area såväl in- som utvändigt. Medelavfrätningen blev mellan 4,4 och 9,2  $\mu\text{m}/\text{år}$  för kolstålen, det högre värdet gäller vid Åkerhög nära Kungälv och det lägre vid Nyhem vid Sandviken. För de låglegerade stålen i Åkerhög blev medelavfrätningen: 12,2  $\mu\text{m}/\text{år}$  för låglegerat stål SS 2225 och 6,1  $\mu\text{m}/\text{år}$  för det låglegerade stålet 1,3Cr-3Ni-0,2Mo.

Eftersom man redan från början såg att det vid Åkerhög på vissa nivåer fanns kraftigare korrosionsangrepp än på rören i övrigt ville man ha en mer noggrann uppmätning av korrosionens fördelning längs rören. Detta är av betydelse för att ta fram hur stor korrosionen är i det mest anfrätta tvärsnittet, vilket ju också svarar mot det tvärsnitt där rörets bärförmåga vanligen är minst. Tidigare mätningar har ju endast omfattat vägning och beräkning av medelavfrätningen på stålpålar och nedgrävda stålstänger. Denna senare mätning utfördes i en så kallad vattenvolymeter där rörets volym kunde bestämmas dm för dm längs rören genom att stålröret sattes ned i ett större plaströr, vilket sedan successivt fylldes med vatten vars mängd bestämdes genom noggrann vägning. Genom beräkning kunde därefter korrosionens storlek bestämmas.

Resultaten av undersökningarna visade att de låglegerade stålen vid Åkerhög fått ojämna avfrätningar medan kolstålen fått mer jämnt fördelade avfrätningar.

Resultaten av vattenvolymetermätningen visade att korrosionshastigheten kunde variera betydligt. Störst var skillnaden för de låglegerade stålen vid Åkerhög där den kunde variera mellan 1 – 41  $\mu\text{m}/\text{år}$  för det standardiserade låglegerade stålet SS 2225 och mellan ungefär 0 och 87  $\mu\text{m}/\text{år}$  för det icke standardiserade låglegerade stålet 1,3Cr-3Ni-0,2Mo.

För kolstålen var variationerna längs rören mindre men den lokala korrosionen på den mest anfrätta delen av rören var i medeltal cirka 2 gånger större än den genom vägning och beräkning bestämda medelavfrätningen. Störst var även i detta fall korrosionshastigheten vid Åkerhög.

För vertikala konstruktioner, med en del i jord under markytan och en del i luft del över markytan, som stolpar och förankringsanordningar till stolpar måste man räkna med kraftiga korrosionsangrepp i anslutning till markytan.

Grundvattenytans läge har stor betydelse för korrosionsangreppets lokalisering på vertikala konstruktioner som stolpar och förankringsanordningar till stolpar. Här avses konstruktioner med en del i jord under markytan och en del i luften över markytan.

En utpräglad korrosionszon uppkommer där stängerna passerar grundvattenytan – detta gäller för stänger av såväl kolstål som av varmförzinkat kolstål. Om grundvattenytan ligger konstant nära markytan erhålls en skarp korrosionszon. Om däremot grundvattenytan varierar under årets lopp sprids korrosionsangreppet ut över en bredare korrosionszon. Det minsta angreppet erhålls om grundvattenytan hela året ligger under konstruktionen.

Korrosionsangreppen på vertikala konstruktioner med en del i jord under markytan och en del i luften över markytan orsakas i huvudsak av makroluftningsceller. Med grundvattenytan konstant tämligen nära markytan erhålls en distinkt korrosionszon orsakad av en kraftig makroluftningscell. Om däremot grundvattenytan varierar uppkommer inte en lika distinkt zon som i fallet med grundvattenytan nära markytan och korrosionsangreppet sprids ut över en bredare korrosionszon. Om, slutligen, grundvattenytan hela året ligger under konstruktionen befinner sig hela konstruktionen i tämligen välluftad jord och inga makroluftningsceller uppstår.

Korrosionshärdigheten för de olika undersökta stålen kan rangordnas med ökande härdighet enligt följande:

*Låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo < Låglegerat stål SS 2225 < Kolstål SS 2120.*

Korrosiviteten mot kolstål och låglegerat stål på de olika provningsplatserna kan också rangordnas med ökande korrosivitet enligt följande:

*Nyhem < Närefors < Åkerhög.*

På rören av kolstål SS 2120 och låglegerat stål SS 2225 från Åkerhög fanns det i huvudsak korrosionsangrepp något under markytan, på ungefär en halv meter djup och på ungefär en meters djup under markytan. På röret av låglegerat stål SS 2225 fanns det dessutom korrosionsangrepp längst ned på röret. På röret av låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo fanns det korrosionsangrepp något under markytan och längst ned på röret.

Korrosionsangreppen på kolstålrören i Nyhem och i Närefors var små. På båda rören var de största och enda påtagliga korrosionsangreppen något under markytan.

Den högre korrosionshastigheten för kolstålrören vid Åkerhög kan sannolikt förklaras av flera ogynnsamma förhållanden i jämförelse med dem i Nyhem och Närefors: Inverkan av kraftiga luftningsceller på stålrören på grund av högt grundvattenstånd, låg resistivitet i jorden och hög kloridhalt i jorden.

Legeringstillsatserna av krom och nickel i de låglegerade stålen SS 2225 respektive 1,3Cr-3Ni-0,2Mo hade inte påverkat den massförlustbestämda medelavfrätningen i någon större omfattning. Legeringstillsatserna av krom och speciellt nickel hade däremot påverkat den lokala korrosionen på ett negativt sätt. Att det låglegerade stålet 1,3Cr-3Ni-0,2Mo hade den sämsta härdigheten mot lokala korrosionsangrepp berodde antagligen på tillsatsen av 3 mass-% nickel i stålet.

En viktig slutsats från undersökningarna är att det inte är någon fördel, ur korrosionssynpunkt, att använda låglegerade stål istället för kolstål i jord.

Om rören stått helt i jord under markytan hade de lokala korrosionsangreppen blivit mycket mindre eftersom angreppen på rören, med en del i jord under markytan och en del i luft del över markytan, orsakats av luftningsceller. På rör helt i jord under markytan hade det inte funnits en lika effektiv katodyta där en kraftig katodreaktion kunnat försiggå som på rör delvis i jord. Den drivande kraften för korrosionen på grund av luftningsceller hade därför blivit mycket mindre.

Undersökningen är direkt tillämpbar på vertikala konstruktioner, med en del i jord under markytan och en del i luft över markytan, som stolpar, master och förankringsanordningar till stolpar och master.

# 1. Inledning

Swerea KIMAB AB (tidigare Korrosionsinstitutet, KI) och Statens geotekniska institut (SGI) har genom en lång följd av år samarbetat för att öka kunskaperna om korrosion på framför allt stålplåtar i jord. Föreliggande rapport utgör en del av det fortsatta samarbetet i denna fråga, som påbörjades 2008 och som syftar till att klarlägga korrosionshastigheterna på långtidsexponerade neddrivna stålplåtar och nedgrävda stålstänger i jord. Denna rapport redovisar de undersökningar, som utfördes 1992 – 96, på de så kallade Sandviksrören.

Under 1967 drev dåvarande Sandvikens Jernverks AB [4, 5] ned ett större antal rör av olika stålsorter i ostörd jord på tre olika provningsplatser i Mellansverige. Syftet var att låta stålrören stå ostörda i jorden under lång tid för att därefter undersöka dem med avseende på uppkommen korrosion. Efter en tid hade undersökningen förlorat betydelse för Sandvik AB varför man överlät undersökningen till dåvarande Korrosionsinstitutet (KI).

Efter cirka 25 års exponering togs rören upp av Korrosionsinstitutet 1992 för undersökning. Härfter har rören rengjorts och avrostningen uppmätts på Statens geotekniska institut på olika sätt bland annat för att få en bild av hur korrosionen fördelar sig längs rörytorna eftersom en neddriven påles eller en nedgrävd vertikal stängs bärförmåga bestäms av det svagaste tvärsnittet på pålen eller stängen.

## 2. Provningsplatser

### 2.1 Lokalisering

Rören exponerades av dåvarande Sandvikens Jernverks AB på tre provningsplatser: Nyhem vid Sandviken, Närefors nära Lidköping samt Åkerhög nära Kungälv [4, 5], **Tabell 2.1**.

**Tabell 2.1.** Lokalisering av provningsplatserna samt jordart och berggrund vid provningsplatserna.

Provningsplats	Lokalisering	Jordart på provningsplatsen	Jordart inom området		Berggrund inom området	
			Jordart	Kartmaterial	Berggrund	Kartmaterial
<b>Nyhem</b>	Nyhem vid Jädraån. 3 km N Sandvikens centrum, 3 km NV Sandvik ABs industriområde. Sandvikens kommun, Gästrikland, Gävleborgs län.	Gyttig silt	Lättare leror, mjåla <sup>2</sup>	SGU Serie Ca nr 42	Äldre tidigorogena intrusivbergarter. Dominerande bergarter är metagranit till metagranodiorit och berggrunden är i allmänhet åderförgnej-sad.	SGU Serie K 32
<b>Närefors</b>	17 km SV Lidköping. Lidköpings kommun, Västergötland, Västra Götalands län (före 1998 Skaraborgs län).	Siltig lera	Glacial lättlera <sup>1</sup>	SGU Serie Aa nr 201	Sydvästsvenska gnejser: Gnejs, röd till gråröd.	SGU Serie Ah nr 9
<b>Åkerhög</b>	Vedhall vid Ryskärsfjorden. 15 m från havet. 1 km V Åkerhög, 16 km SV Kungälv. Kungälv kommun, Bohuslän, Västra Götalands län (före 1998 Göteborgs och Bohus län).	Lera, saltvattensavsatt lera (marin lera)	Post-glacial finlera <sup>3</sup>	SGU Serie Ae nr 72	Gnejsig, ådrad och lokalt migmatitiserad metagråvacka tillhörande Stora Le-Marstrandsgruppen.	SGU Serie K 60

- 1) Lättlera benämns också grovlera. Lättlera innehåller 15 – 25 mass-% ler räknat på material mindre än 20 mm
- 2) Jordfraktionerna mjåla (finmjåla och grovmjåla) och finmo ingår numera i jordfraktionen silt
- 3) Finlera innehåller mer än 25 mass-% ler räknat på material mindre än 20 mm

### 2.2 Jordanalyser

I samband med upptagning av rörproverna utfördes också resistivitetmätning med Wenners metod i fält med olika elektrodavstånd (elektrodavståndet motsvarar i princip djupet under markytan) på de tre provplatserna. Vidare upptogs jordprover för närmare analys på laboratorium. Vid Nyhem togs sju prover från 0,2 – 3,2 m djup, vid Närefors fem prover från 0,2 – 2,4 m djup och vid Åkerhög togs sju prover från 0,2 – 3,0 m djup. Syftet med fältmätningar, provtagningar och laboratorieundersökningar har varit att söka klarlägga eventuella samband mellan inträffad korrosion och egenskaperna hos jorden.

Samtliga upptagna prover har undersökts på SGIs laboratorium med avseende på jordart, resistivitet med soil-box (box-metoden) och instickselektrod, vattenkvot, pH-värde som pH(H<sub>2</sub>O) samt kloridhalt. Dessutom har analys av kornstorlek och organisk halt utförts på proverna från 0,2 m djup.

Resultaten av undersökningarna har sammanställts i **Tabell 2.2** och redovisas som funktion av djupet under markytan i **Figur 2.1 – 2.2**. Resultaten av laboratorieundersökningarna finns också sammanställda i **Bilaga B:1 – B:8**. I **Tabell 2.3** visas kornfraktioner, organisk halt och jordart för jorden på djupet 0,2 m på provningsplatserna

**Tabell 2.2.** Jordart samt kemiska och fysikaliska analyser av jorden på olika djup på tre provningsplatser vid uppdragning av stålror efter 24,9 års exponering.

Prov-nings-plats	Djup under markytan m	Jordart	pH (H <sub>2</sub> O)	Resistivitet naturfuktig jord		Vatteninnehåll i jorden		Klorid-halt mg Cl <sup>-</sup> /kg torr jord	Orga-nisk halt mass-% av torr jord
				Soil-box Ωm	Instick-selek-trod Ωm	Vatten-halt mass-% av fuktig jord	Vatten-kvot mass-% av torr jord		
Nyhem	0,2	sa si Mu vx	4,4	–	28,1	43	75	10	13,9
	0,3 - 0,7	gy Si vx	4,6	–	28,8	30	42	<10	–
	0,8 - 1,2	(gy) Si	4,9	–	43,8	28	38	<10	–
	1,3 - 1,7	(gy) Si	4,9	–	51,2	24	31	<10	–
	1,8 - 2,2	(gy) Si vx	4,9	142	–	28	38	<10	–
	2,3 - 2,7	gy Si vx	4,9	132	–	34	52	<10	–
	2,8 - 3,2	gy Si vx	4,6	115	–	40	67	53	–
Närefors	0,2	mu sa le Si vx	5,6	–	23,2	20	25	44	3,3
	0,3 - 0,7	si Le le Si vx	6,4	–	23,5	15	18	11	–
	0,8 - 1,2	le Si vx	6,7	–	39,3	16	19	11	–
	1,4 - 1,8	si Le vx	3,9	13,6	–	29	40	<10	–
	2,0 - 2,4	sa si Le vx	3,3	7,6	–	26	35	11	–
Åkerhög	0,2	mu sa si Le vx	7,5	–	2,3	25	33	2120	2,4
	0,5	Le sk vx	7,3	–	2,5	29	40	2030	–
	0,6 - 1,0	si Le sk vx	7,4	3,6	–	23	30	1790	–
	1,1 - 1,5	si Le sk vx	7,8	3,3	–	31	44	2300	–
	1,6 - 2,0	Le sk	7,7	2,4	–	40	67	3710	–
	2,1 - 2,5	Le sk	7,7	2,1	–	37	58	3600	–
	2,6 - 3,0	Le sk	7,9	1,9	–	42	73	4620	–

Undersökningarna vid Nyhem vid Sandviken visar att jorden ned till 3,2 m djup huvudsakligen består av något gyttjig till gyttjig silt med växtdelar. Vattenkvoten ligger normalt mellan 31 och 42 mass-% men är högre vid markytan och mellan 2,3 och 3,2 m djup. Kloridhalten är låg men ökar på 3 m djup. Den organiska halten är hög närmast markytan. pH-värdet ligger mellan 4,4 och 4,9. Resistiviteten är mycket högre än vid Åkerhög, men även högre än vid Närefors. Vid uppdragning av rören noterades att grundvattenytan stod cirka 1,6 m under markytan.

Undersökningarna vid Närefors nära Lidköping visar att jorden ned till 2,4 m djup består av lerig silt och siltig lera med växtdelar. Ned till 1,2 m djup är jorden rostfläckig. Vattenkvoten är relativt låg liksom kloridhalt och organisk halt. pH-värdet ligger mellan 5,6 och 6,7 ned till 1,2 m djup men minskar därunder

till mellan 3,3 och 3,9. Resistiviteten är betydligt högre än i Åkerhög. Vid uppdragning av rören noterades att grundvattenytan stod cirka 1,3 m under markytan.

Undersökningarna vid Åkerhög nära Kungälv visar att jorden ned till 3,0 m djup består av en marin lera med växtdelar ned till cirka 1,5 m djup samt rester av marina skaldjur ner till 3,0 m djup. Skalen ger upphov till ett högt pH-värde. Leran har en hög kloridhalt, vilket medför en låg resistivitet. Vattenkvoten är relativt låg till cirka 1,5 m djup men ökar därunder. Vid uppdragning av rören noterades att grundvattenytan stod endast några dm under markytan.

**Tabell 2.3.** Kornfraktioner, organisk halt och jordart hos jorden på djupet 0,2 m på tre provningsplatser.

Parameter		Provningsplats			
		Nyhem	Närefors	Åkerhög	
Jordfraktion mass-%	<b>Ler</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	
	<b>Silt</b>	Finsilt	5	7	6
		Mellansilt	20	18	15
		Grovsilt	41	33	17
		Silt, totalt	<b>66</b>	<b>58</b>	<b>38</b>
	<b>Sand</b>	Finsand	17	21	31
		Mellansand	8	10	17
		Grovsand	2	3	3
		Sand, totalt	<b>27</b>	<b>34</b>	<b>51</b>
	<b>Grus</b>	Fingrus	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Organisk halt</b>	mass-% av torr jord	14	3,2	2,4	
<b>Jordart</b>		Sandig siltig mulljord	Mullhaltig sandig lerig silt	Mullhaltig sandig siltig lera	

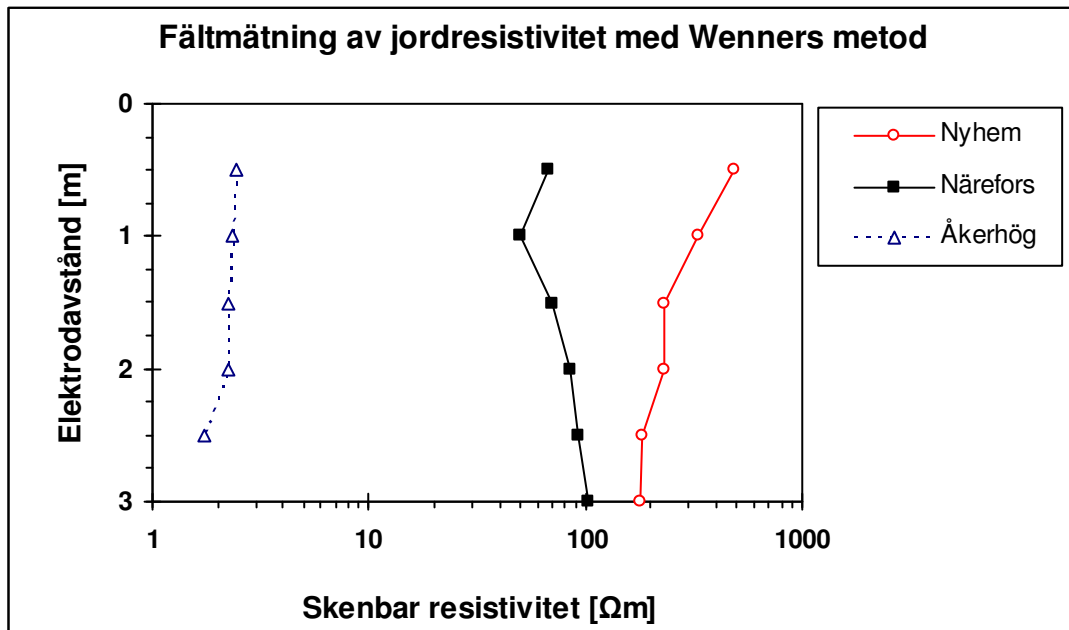
Överensstämmelsen mellan laboriemätningarna av resistivitet med instickselektrod och soil-box (box-metoden) var dålig för jorden från Nyhem och Närefors vilket framgår av **Figur 2.3**. För jorden från Åkerhög var däremot samstämmigheten mycket god mellan laboriemätningarna av resistivitet. Från fältmätningarna av jordresistiviteten med Wenners metod, **Figur 2.1**, framgår att inte förekommer kraftiga språngvisa variationer i resistivitet vid provningsplatserna Nyhem och Närefors. Det går inte heller att förklara de uppmätta språngvisa variationerna i resistivitet för jorden från Nyhem och Närefors med variationer i jordens kloridhalt, **Figur 2.1**, eller i jordens vattenkvot, **Figur 2.2**.

Resistiviteten blir i allmänhet ungefär lika stor vid mätning med instickselektrod som med soil-box, se vidare Camitz [6]. I detta fall förefaller mätningarna med instickselektrod att vara pålitligare än mätningarna med soil-box. Antagligen har det funnits för lite jord vid mätningarna med soil-box. I allmänhet är det dock betydligt lättare att erhålla pålitliga resultat med soil-box än med instickselektrod. En nackdel med box-metoden är att resistiviteten påverkas av packningen av jordresistanscellen (soil-boxen) [6].

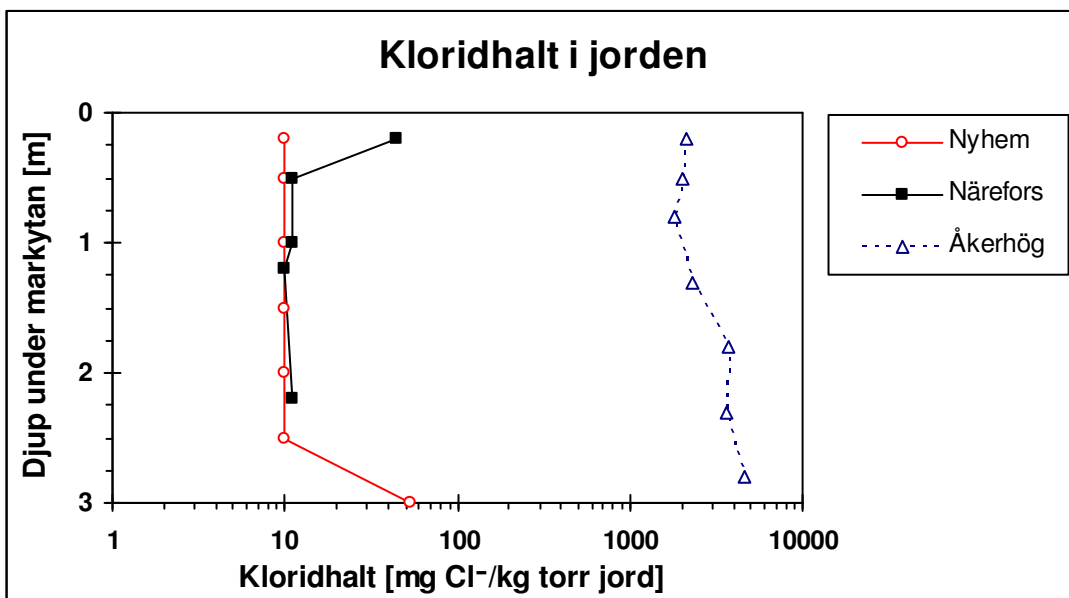
Mätningarna av resistivitet med Wenners fyrelektrodmätning i fält och instickselektroden i jordprover på laboriet visade ett högre resistivitetvärde vid fältmätning än vid laboriemätning.

Vid fältmätning med Wenners metod påverkas resultatet av den i allmänhet höga resistiviteten närmast markytan [6]. Det är därför som fältmätningar i allmänhet ger högre resistivitet än laboriemätningar. Skillnaden mellan metoderna avtar med djupet under markytan.

a)



b)

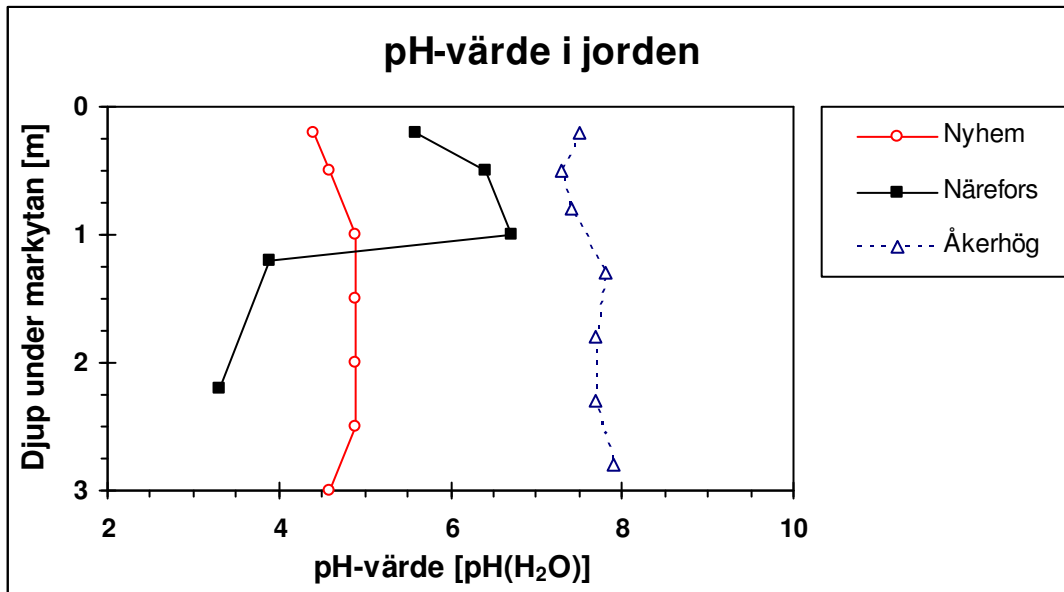


**Figur 2.1.** Resistivitet och kloridhalt på olika djup i jorden vid provningsplatserna Nyhem, Närefors och Åkerhög.

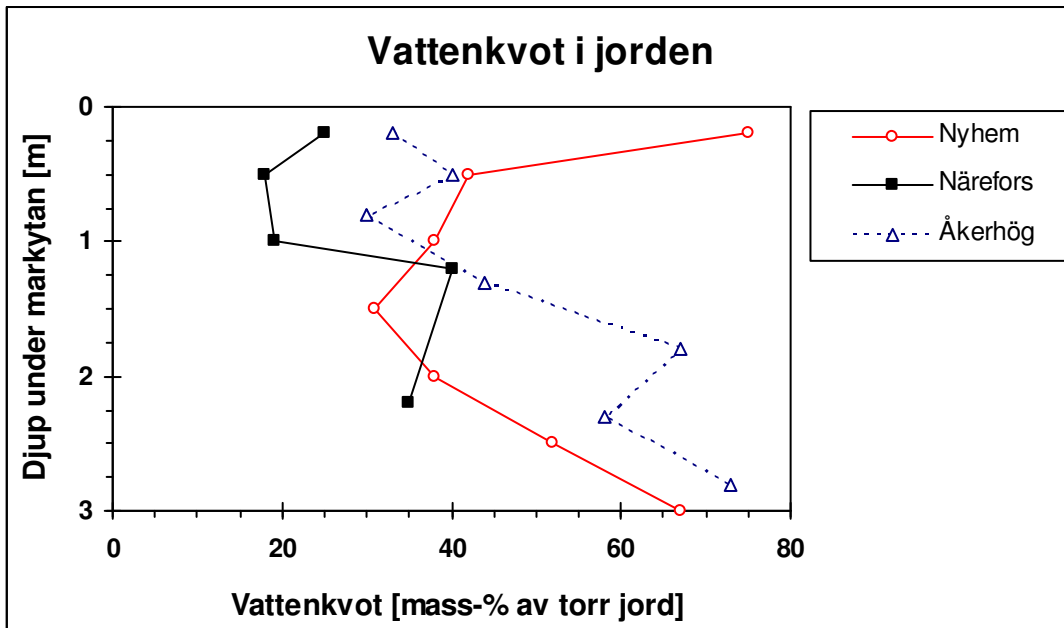
a) Fältmätning av jordresistivitet med Wennerg 4-elektrodmätning. Elektrodståndet motsvarar i princip djupet under markytan.

b) Kloridhalt.

a)



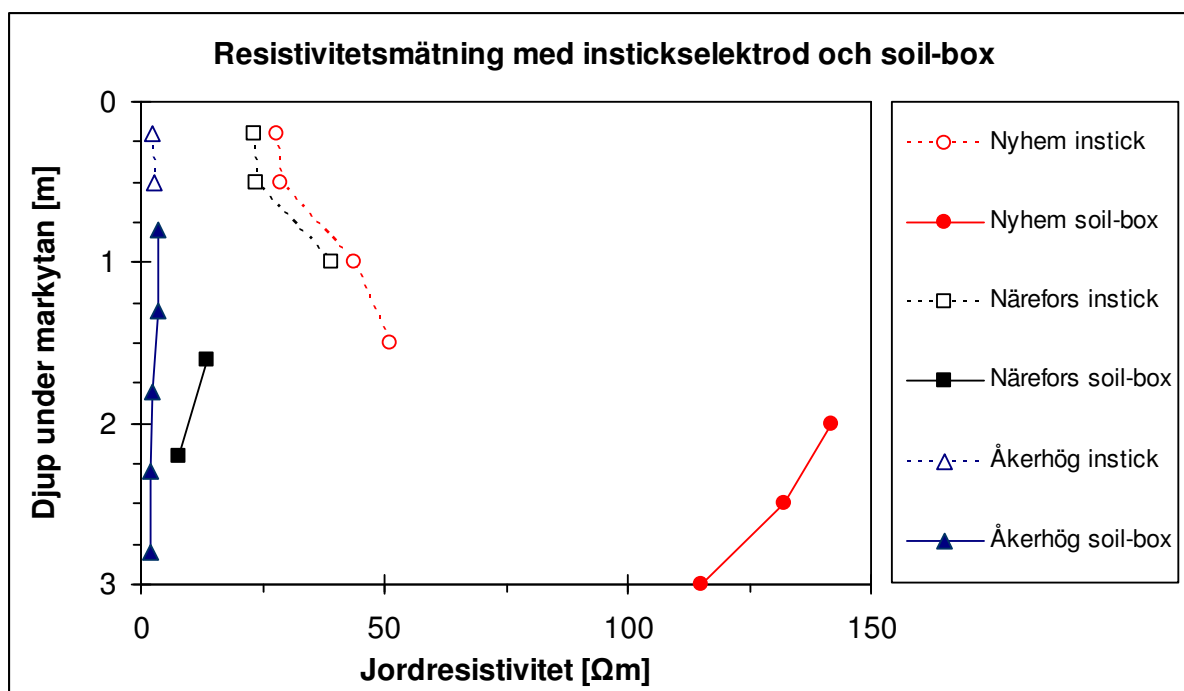
b)



**Figur 2.2.** pH-värde och vattenkvot på olika djup i jorden vid provningsplatserna Nyhem, Närefors och Åkerhög.

a) pH-värde b) Vattenkvot.





**Figur 2.3.** Jordresistivitet hos naturfuktig jord på olika djup från tre provningsplatser. Resistiviteten har uppmätts på laboratorium med två olika metoder: instickselektrod och soil-box.

I ett samarbetsprojekt mellan Geologiska institutionen, Chalmers tekniska högskola och Korrosionsinstitutet jämfördes olika laboratoriemetoder för resistivetsmätning, som använts i Sverige vid korrosionsundersökningar [7, 8].

Följande metoder jämfördes:

- Box-metoden (soil-box), naturfuktig jord
- Box-metoden (soil-box), vattenmättad jord
- Televerkets metod
- Vattenfalls metod
- Ledningstalsmetoden.

Undersökningarna [7, 8] visade att olika resultat erhöles med olika metoder. Det är därför viktigt att noga ange vilken metod som använts vid resistivetsmätning.

Sammanfattningsvis kan de olika metoderna ordnas in i följande serie med ökande resistivitet:

*Ledningstal < Vattenfalls metod < Soil-box, vattenmättad jord < Televerkets metod < Soil-box, naturfuktig jord.*

Sandvikens Jernverks AB [4] har också låtit analysera jorden vid provningsplatserna, **Tabell 2.3**. Det är emellertid mycket svårt att förstå av rapporten [4] på vilket djup under markytan, som provtagning av jorden skett.

**Tabell 2.3.** Analyser av jorden på olika djup på tre provningsplatser. Analysresultaten är angivna av Sandvikens Jernverks AB, Kjellberg [4].

Analys	Nyhem			Närefors			Åkerhög		
	4,1 - 4,3 m under v y <sup>1</sup>	0,1 - 0,3 m under markytan	3,9 - 4,0 m ovan v y <sup>1</sup>	0,3 m under markytan	1,2 m över grundvattennivån	1,5 m under grundvattennivån	markytan	över grundvattennivån	1,6 m under grundvattennivån
Konduktivitet <sup>2</sup> (20 °C), µS/cm	32	39	71	97	40	261	5070	313	364
Resistivitet <sup>3</sup> (20 °C), Ωm	312	256	141	103	250	38	2,0	32	27
Torrsubstans mass-% av fuktig jord	79	61	57	83	78	65	68	79	59
Vattenhalt <sup>4</sup> mass-% av fuktig jord	21	39	43	17	22	35	32	21	41
Vattenkvot <sup>4</sup> mass-% av torr jord	27	64	75	20	28	54	47	27	69
pH-värde <sup>2</sup>	6,0	5,2	5,6	5,8	7,2	8,0	8,1	8,2	7,9
Vattenlösliga klorider, mg/kg torrsubstans	9	11	18	5	5	5	2150	50	20
Vattenlösliga sulfater, mg/kg torrsubstans	11	13	16	6	6	8	410	6	110
Svavel, mg/kg torrsubstans	190	200	580	170	170	1280	8100	280	2000
Fosfor, mg/kg torrsubstans	370	310	440	430	530	580	430	460	550

- 1) Förkortningen v y står antagligen för vattenytan
- 2) Mätningarna utfördes på extrakt med 100 g jord/100 ml destillerat vatten
- 3) Omräknat från de angivna värdena på konduktivitet
- 4) Omräknat från de angivna värdena på torrsubstans

### 3. Korrosionsprovning

#### 3.1 Material

Korrosionshårdigheten hos rör av kolstål och två olika sorters låglegerade stål har undersökts efter exponering under 25 år i jord på tre olika provningsplatser. Sammanlagt har fem rör undersökts. Stålsorterna och stålbeteckningarna framgår av **Tabell 3.1**.

**Tabell 3.1.** Typ av stål, stålbeteckningar vid Sandvik samt svensk och europeisk standard för de exponerade rören.

Stålsort Beteckning i denna rapport	Typ av stål	Stålbeteckning vid Sandvik	Svensk standard		Europastandard	
			Vid utsättning av rören	Innan europeisk standardiseringen	Materialbeteckning	Materialnummer
Kolstål SS 2120	Olegerat seghärtningsstål	Sandvik 9LM	Stål 21 20 enligt SIS 14 21 20	Stål 21 20 enligt SS 14 21 20 [9]	Direkt motsvarighet saknas	
Låglegerat stål SS 2225	Låglegerat seghärtningsstål	Sandvik 5C2Mo	Stål 22 25 enligt SIS 14 22 25	Stål 22 25 enligt SS 14 22 25 [10]	25CrMo4 <sup>a</sup>	1.7218 <sup>a</sup>
Låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo	Låglegerat seghärtningsstål	Sandvik 4N3C2Mo	Ej standardiserat	–	–	

a) Avser leveransformerna stång, platta produkter och smide.

Rören hade en nominell yttre diameter på 32 mm och en inre diameter på 16 respektive 9 mm. Det senare röret var av det ej standardiserade låglegerade stålet 1,3Cr-3Ni-0,2Mo. Stålels sammansättning visas i **Tabell 3.2**.

#### 3.2 Exponering av rören

Under 1967 drev Sandvikens Jernverks AB [4] ned ett större antal rör av olika stålsorter i ostörd jord på tre olika provningsplatser: Nyhem, Närefors och Åkerhög. Exponeringen startade den 1 juli 1967 på alla provningsplatserna.

Rören var cirka 3,5 m långa och hade drivits ned nära 3,0 m i jorden, det vill säga cirka 0,6 m av rören stack upp över markytan förutom röret av kolstål SS 2120 i Närefors (rör 71) som ej kunde drivas ned längre än till cirka 1,6 m djup. Rören var inte pluggade i ändarna och innehöll därför vatten och jord vid upptagningen varför deras insida också korroderat. Vid intag av rören i juni 1992 fanns det vatten/jord inuti samtliga fem rör.

I **Tabell 3.3** visas dimension (nominell diameter) och uppmätta längder hos rören. I fält mättes höjden över markytan hos rörtoppen hos rören. Den totala längden hos rören uppmättes vid SGI vid utvärderingen av korrosionen på de olika rören.

**Tabell 3.2.** Kemisk sammansättning hos de undersökta stålroren. Data från Sandvikens Jernverks AB, Kjellberg [4].

Stålsort Standard Stålbeteckning	Prov- nings- plats	Rör  nr	Halt								
			mass-%								
			C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P	S	Fe
Kolstål SS2120  <b>Sandvik 9LM</b>	Nyhem	76	0,47	1,50	0,27	0,06	0,04	–	0,021	0,010	Rest.
	Närefors	71	0,47	1,50	0,27	0,06	0,04	–	0,017	0,010	Rest.
	Åkerhög	66	0,47	1,50	0,26	0,06	0,04	–	0,019	0,010	Rest.
Låglegerat stål SS 2225  <b>Sandvik 5C2Mo</b>	Åkerhög	21	0,24	0,56	0,28	1,08	0,05	0,21	0,015	0,010	Rest.
Låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo  <b>Sandvik 4N3C2Mo</b> Ej standardiserat	Åkerhög	38	0,27	0,64	0,28	1,34	2,98	0,24	0,021	0,011	Rest.

**Tabell 3.3.** Diametrar, total längd, höjd rörtopp över markytan (längd del i luft) och längd del i jord hos exponerade stålrör vid tre provningsplatser.

Stålsort Standard Stålbeteckning	Provnings- plats	Rör  nr	Nominell diameter		Uppmätta längder		
			Utvändig diameter mm	Invändig diameter mm	Total längd hos röret m	Höjd rörtopp över markytan m	Längd del i jord m
Kolstål SS 2120  <b>Sandvik 9LM</b>	Nyhem	76	32	16	3,40	0,57	2,83
	Närefors	71	32	16	3,385	1,80	1,585
	Åkerhög	66	32	16	3,435	0,62	2,815
Låglegerat stål SS 2225  <b>Sandvik 5C2Mo</b>	Åkerhög	21	32	16	3,49	0,61	2,88
Låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo  <b>Sandvik 4N3C2Mo</b> Ej standardiserat	Åkerhög	38	32	9	3,50	0,57	2,93

### 3.3 Mätningar i samband med intag av rören

Före uppdragningen av rören på provningsplatserna mättes för varje rör den fria korrosionspotentialen med en referenselektrod av typen mättad koppar/kopparsulfatelektrod (Cu/CuSO<sub>4</sub>). Resultaten av dessa mätningar har sammanställts i **Tabell 3.4**.

Som framgår av **Tabell 3.4** varierade korrosionspotentialen dels mellan de olika stålsorterna på provningsplats Åkerhög, dels mellan provningsplatserna för kolstålrör. Det mest negativa värdet uppmättes för kolstål SS 2120 vid Åkerhög och det mest positiva värdet för kolstål vid Närefors.

Vidare mättes vattenståndet i stålrören och i jorden i hålen efter uppdragning av rören, **Tabell 3.4**.

**Tabell 3.4.** Vattenstånd i rör och i jord samt korrosionspotentialer vid uppdragning av olika stålrör efter exponering i jord. Korrosionspotentialerna anges relativt mättad koppar/kopparsulfatelektrod (Cu/CuSO<sub>4</sub>).

Stålsort Standard Stålbeteckning	Provnings- plats	Rör nr	Korrosions- potential mV (Cu/CuSO <sub>4</sub> )	Höjd rörtopp Höjd över markytan m	Vattenstånd vid uppdragning av rören	
					I röret Avstånd från rörtopp m	I hålet i jorden efter röret Avstånd från markytan m
Kolstål	Nyhem	76	- 617	0,57	0,41	1,60 <sup>a</sup>
SS 2120	Närefors	71	- 575	1,80	1,45	0,85 <sup>b</sup>
<b>Sandvik 9LM</b>	Åkerhög	66	- 651	0,62	0,13	Något under markytan
Låglegerat stål SS 2225 <b>Sandvik 5C2Mo</b>	Åkerhög	21	- 618	0,61	0,15	Något under markytan
Låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo <b>Sandvik 4N3C2Mo</b> Ej standardiserat	Åkerhög	38	- 587	0,57	Stopp i röret	Något under markytan

a) Medelvärde för samtliga uppdragna rör, också rör av rostfritt stål, på provningsplatsen: 1,63 m

b) Medelvärde för samtliga uppdragna rör, också rör av rostfritt stål, på provningsplatsen: 1,27 m

## 3.4 Seghårdning av stål och hållfasthetsegenskaper hos rören

### 3.4.1 Seghårdning

I undersökningen exponerades tre seghärtningsstål: olegerat stål SS 2120, låglegerat stål SS 2225 och ett icke standardiserat låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo.

Seghårdning är en värmebehandlingsmetod för stål för att öka segheten och höja brott- och sträckgränserna. Med värmebehandling avses värmning och kylning eller värmning och svalning av metallen. Med kylning menas påskyndad sänkning av metallens temperatur till exempel med kylning i vatten eller olja. Svalning är en långsam sänkning av metallens temperatur till exempel med svalning i luft.

Hårdning med efterföljande anlöpning till 500 – 670 °C av stålet kallas för seghårdning. Hårdbarheten hos stål kan förbättras med små legeringstillsatser. En förhöjd manganhalt i stålet är ett alternativ eller tillsats av två eller flera av legeringsämnen mangan (Mn), krom (Cr), nickel (Ni) och molybden (Mo).

Det olegerade stålet SS 2120 har legerats med mangan, det låglegerade stålet SS 2225 med krom och små mängder molybden och det låglegerade stålet 1,3Cr-3Ni-0,2Mo med krom, nickel och små mängder molybden, se **Tabell 3.5**. Av **Tabell 3.6** framgår effekten av legeringstillsatserna i stålet på mekaniska egenskaper hos stålet. Det olegerade stålet SS 2120 är egentligen ett kol-manganstål (C-Mn-stål), men stålet räknas sammansättningsmässigt som ett olegerat stål [12].

**Tabell 3.5.** *Legeringstillsatser i stålen för att öka hårdbarheten. Legeringshalterna från rapport av Kjellberg [4].*

Stålsort Standard Stålbeteckning	Legeringstillsats
Olegerat stål SS 2120 <b>Sandvik 9LM</b>	Mangan 1,50 mass-% (Förhöjd manganhalt <sup>1</sup> )
Låglegerat stål SS 2225 <b>Sandvik 5C2Mo</b>	Krom 1,08 mass-% Molybden 0,21 mass-%
Låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo <b>Sandvik 4N3C2Mo</b> Ej standardiserat	Krom 1,34 mass-% Nickel 2,98 mass-% Molybden 0,24 mass-%

- 1) Kolstål brukar innehålla minst 0,4 mass-% mangan. Manganets viktigaste uppgift är att binda svavlet i stålet. Svavlet binds i stålet som icke metalliska inneslutningar i form av mangansulfid MnS.

Seghårdning består av två värmebehandlingar: hårdning med efterföljande anlöpning. Hårdning används för att göra stålet väsentligt hårdare. Vid hårdning upphettas stålet till 840 – 870 °C [9, 10] så att stålet får austenitisk kristallstruktur (austenit,  $\gamma$ -Fe "gammajärn"). Stålet kyls därefter i olja så snabbt att omvandlingen av austenit till ferrit ( $\alpha$ -Fe "alfajärn") och perlit (blandning av  $\alpha$ -Fe och cementit) inte hinner ske. Vilket är fallet vid långsam svalning i luft. Istället bildas vid kylning i olja martensit. Hårdningen ökar stålets hårdhet, brottgräns och sträckgräns, men sänker brottförlängningen och segheten.

Vid den efterföljande anlöpningen, som bör ske omedelbart efter kylning efter härdningen, upphettas stålet till 550 – 675 °C [9, 10]. Syftet med anlöpningen är att åstadkomma en lämplig avvägning av hårdhet och seghet hos stålet. Genom att välja anlöpningstemperatur och hålltid vid anlöpningstemperaturen kan önskad hårdhet och önskade hållfasthetsegenskaper erhållas. Hålltiden anpassas också efter stålets dimension. Efter anlöpning får stålet svalna långsamt i luft. Vid anlöpning sönderfaller martensiten till ferrit och sfäroidiserad cementit. Jämfört med ett stål i varmvalsat eller normaliserat tillstånd har samma stål högre brottgräns, sträckgräns och hårdhet och vanligen också högre slagseghet. Normalisering är en värmebehandlingsmetod för stål, som gör en grovkornig struktur mera finkornig.

Austenit,  $\gamma$ -Fe "gammajärn", har kubisk ytcentrerad kristallstruktur och lösligheten för kol är max 2 mass-% vid hög temperatur. Austeniten är mjuk, töjbar och omagnetisk. Ferrit,  $\alpha$ -Fe "alfajärn", har kubisk rymdcentrerad kristallstruktur och lösligheten för kol är max 0,02 mass-% vid hög temperatur. Ferriten består nästan helt av rent järn och är mycket mjuk och magnetisk.

Perlit är en blandning av ferrit och cementit och har medelkolhalten 0,8 mass-%. Perliten består av omväxlande skivor (lameller) "lamellär perlit" av ferrit och cementit. Perliten är betydligt hårdare och sprödare än ferriten. Cementit, järnkarbid  $\text{Fe}_3\text{C}$ , innehåller 6,7 mass-% C och är mycket hård och spröd. Martensit är en omvandlingsprodukt hos stål som uppkommer vid härdning med hastig kylning av stålet. Martensiten innehåller lika mycket kol som austeniten den bildats från och har av kolöverskottet en deformerad struktur påminnande om  $\alpha$ -järns struktur. Martensit har en tetragonalt ytcentrerad kristallstruktur och är mycket hård.

**Tabell 3.6.** Effekt av vissa legeringstillsatser på hårdbarheten av stålet och mekaniska egenskaper hos stålet.

Legeringstillsats	Effekt på härdning av stål och mekaniska egenskaper hos stål
Mangan	Förbättrar hårdbarheten (ökar härddjupet) Höjer sträckgräns och brottgräns
Krom	Förbättrar hårdbarheten (ökar härddjupet) Höjer sträckgräns och brottgräns Höjer segheten
Nickel	Förbättrar hårdbarheten något (ökar härddjupet) Höjer sträckgräns och brottgräns Höjer segheten
Molybden	Förbättrar hårdbarheten (ökar härddjupet) Höjer sträckgräns och brottgräns Höjer varmhållfastheten

Den som vill veta mer om stålets metallografi och värmebehandling hänvisas till följande nyare böcker på svenska: Stål och värmebehandling – En handbok [13] samt handböcker av Mattson [14] och Ullman [15]. Något äldre handböcker på svenska är Thelning [16] och Sandvikens Handbok [17].

### 3.4.2 Hållfasthetsegenskaper hos rören

I **Tabell 3.7** anges draghållfasthetsegenskaper för de provade rören. Dragprovningen utfördes på icke exponerade rör av Sandvikens Jernsverks AB [4]. Densiteter för stålen i rören uppmättes 1997 av Sandvik Steel, Sandvik AB, **Tabell 3.7**.



**Tabell 3.7.** Densitet och draghållfasthetsegenskaper för de exponerade stålrören. Dragprovningen utfördes på icke exponerade rör. Hållfasthetsdata från Sandvikens Jernsverks AB, Kjellberg [4].

Stålsort Standard Stålbeteckning	Prov- nings- plats	Rör  nr	Densitet  kg/m <sup>3</sup>	Draghållfasthet				
				Förläng- nings- gräns <sup>1</sup> (0,2 %) R <sub>p0,2</sub> MPa <sup>(5)</sup>	Förläng- nings- gräns <sup>1</sup> (1 %) R <sub>p1,0</sub> MPa <sup>(5)</sup>	Brott- gräns <sup>2</sup> R <sub>m</sub> MPa <sup>(5)</sup>	Brottför- längning <sup>3</sup> A <sub>5</sub> %	Kontrak- tion <sup>4</sup> Z %
Kolstål SS 2120  <b>Sandvik 9LM</b>	Nyhem	76	7820	1020	1090	1160	14	53
	Närefors	71	7820	1100	1150	1210	13	49
	Åkerhög	66	7830	1040	1120	1160	13	53
Låglegerat stål SS 2225  <b>Sandvik 5C2Mo</b>	Åkerhög	21	7830	287	355	554	34	74
Låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo  <b>Sandvik 4N3C2Mo</b> Ej standardiserat	Åkerhög	38	7830	852	1070	1220	17	55

1) Förlängningsgränsen är den högsta spänning som provstaven kan belastas med utan att förlängningen efter avlastning överskrider ett visst värde, 0,2 eller 1 %. Förlängningsgräns används för material som saknar ett distinkt sträckgränsområde.

2) Brottgränsen är spänningen vid brott vid dragprovning.

3) Brottförlängning är den procentuella ökningen av ett visst avstånd mellan ritsar på ömse sidor om brottstället. Med A<sub>5</sub> menas att det ursprungliga mätavståndet är 5 gånger provstavens ursprungliga diameter.

4) Kontraktion är den procentuella minskningen av provstavens tvärsnittsarea vid brottstället jämfört med ursprunglig tvärsnittsarea.

5) 1 MPa = 1 N/mm<sup>2</sup> = 0,102 kp/mm<sup>2</sup>.

### 3.5 Sammanfattning av provningsförfarandet

I **Tabell 3.8** sammanfattas provningsförfarandet.

**Tabell 3.8.** Sammanställning över provningsförfarandet.

Provningsförfarande	Parameter
Provnings sätt	Vertikalt nedtryckta rör i jord med en del av röret över markytan. Rören var öppna i båda ändarna.
Provningsplatser	Tre provningsplatser: Nyhem (jordart gyttjig silt) Närefors (jordart siltig lera) Åkerhög (marin lera)
Exponeringstid	24,9 år
Material	Tre seghärtningsstål: Olegerat stål SS 2120 Låglegerat stål SS 2225 Låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo
Provform	Rör (ämnesrör)
Dimension hos rören	Nominell längd: 3,5 m Nominell diameter: Utvändig diameter: 32 mm Invändig diameter: 16 mm Invändig diameter: 9 mm för det låglegerade stålet 1,3Cr-3Ni-0,2Mo
Del av röret över markytan	Medelvärden: Nyhem: 0,56 m Närefors: 1,65 m Åkerhög: 0,59 m

## 4. Tidigare utvärderingar av korrosionsangrepp på rör av Sandvik AB

Sandvikens Jernverks AB/Sandvik AB har tidigare tagit in rör efter ett och fem års exponering och utvärderat korrosionsangrepp på rör av kolstål och låglegerat stål [18, 19].

Efter ett års exponering av rör på tre provningsplatser omfattade undersökningarna 1969 följande moment [18]:

- Rengörning av rören
- Granskning av rören efter korrosionsangrepp
- Vägning av rören efter rengörning
- Undersökning av tvärsnitt av rören med korrosionsangrepp och mätning av frättdjup
- Hållfasthetsprovning (dragprovning) av exponerade rör.

Resultaten från granskning av rören efter ett års exponering framgår av **Tabell 4.1**. De massförlustbestämda medelavfrätningarna hos rören har sedermera beräknats av Swerea KIMAB AB, **Tabell 4.2**. De beräknade korrosionshastigheterna avser korrosion på både in- och utsidan av hela röret.

För tre av rören blev massförlusten noll eller mindre än noll. Dessa rör har troligen inte rengjorts tillräckligt noga. Det fanns sannolikt kvar korrosionsprodukter på rörytan. Tre andra rör uppvisade orimligt höga korrosionshastigheter. Dessa rör kan ha rengjorts för kraftigt, så att också okorroderat stål tagits bort. Ett annat alternativ kan vara fel vid vägningen av rören.

Vid Åkerhög har vatten tidvis stått över markytan, medan rören vid Nyhem och Närefors stått i relativt torr jord [18]. Vid undersökningen [18] framkom att de största korrosionsangreppen uppstått i övergången mellan luft och jord eller för Åkerhög övergången mellan luft och vatten. Hållfasthetsundersökningarna visade inga tydliga skillnader mellan exponerade och icke exponerade rör.

Undersökningarna 1973 [19] efter fem års exponering av rör på tre provningsplatser omfattade alla moment, som genomfördes 1969 förutom hållfasthetsundersökningarna.

Resultat från granskningen av rör efter fem års exponering framgår av **Tabell 4.3**. De massförlustbestämda medelavfrätningarna hos rören har också här beräknats av Swerea KIMAB AB, **Tabell 4.4**. De beräknade korrosionshastigheterna avser korrosion på både in- och utsidan av hela röret.

Vid denna undersökning [19] blev också massförlusten noll eller mindre än noll för tre rör. Dessa rör har troligen inte rengjorts tillräckligt noga. Det fanns sannolikt kvar korrosionsprodukter på rörytan.

Även vid den senare undersökningen [19] framkom att de största korrosionsangreppen uppstått i övergången mellan luft och jord eller för Åkerhög övergången mellan luft och vatten.

I **Tabell 4.5** finns slutligen en sammanställning av massförlustbestämda medelavfrätningar och av maximala lokala utvärdiga korrosionshastigheter. De högsta medelavfrätningarna uppvisar rör av kolstål SS 2120 och låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo exponerade i Åkerhög. Eftersom nio av sjutton rör uppvisade orimliga korrosionshastigheter går det inte att dra några ytterligare slutsatser.

De största lokala korrosionsangreppen uppstod på det låglegerade stålet 1,3Cr-3Ni-0,2Mo på alla tre provningsplatserna. För alla stålen, kolstål SS 2120, låglegerat stål SS 2225 och låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo, var den maximala lokala korrosionshastigheten störst i Åkerhög. Möjligen var också den maximala lokala korrosionshastigheten större i Närefors än i Nyhem.

Den maximala lokala korrosionshastigheten kan för stålen rangordnas med ökande korrosionshastighet enligt följande:

*Kolstål SS 2120 < Låglegerat stål SS 2225 < Låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo.*

**Tabell 4.1.** Korrosionsangrepp och frättdjup på stålrören efter ett års exponering i jord på tre olika provningsplatser. Resultat från Sandvikens Jernverks AB, Danielsson [18].

Stålsort Standard Stålbeteckning	Prov- nings- plats	Rör	Höjd rör- topp över markytan	Korrosionsangrepp på rören  Resultat från syning av rören  Avstånd i m anges från rörets övre ände (rörtopp)	Frätgropar på rören vid angreppsställen
		nr	m		
Kolstål SS 2120  <b>Sandvik 9LM</b>	Nyhem	–	–	–	–
	Närefors	69	–	Angrepp från den övre änden av röret och nedåt. Ett kraftigare angrepp vid ca 1,8 m.	Rätt stor mängd gropar med djupet max 0,10 mm.
	Åkerhög	64	0,5	Angrepp från den övre änden av röret och nedåt. Ett kraftigare angrepp vid ca 0,5 m (i anslutning till markytan).	Små gropar med djupet 0,05 mm.
Låglegerat stål SS 2225  <b>Sandvik 5C2Mo</b>	Nyhem	29	0,7	Angrepp mest från den övre änden av röret och ca 0,7 m nedåt på röret. Efter ytterligare ca 0,8 m (1,5 m från rörtoppen) inget anmärkningsvärt.	Inga synliga angrepp.
	Närefors	24	0,4	Angrepp från den övre änden av röret och nedåt. Ett kraftigare angrepp vid ca 1,7 m.	Utvändigt rätt stor mängd gropar med djupet max 0,10 mm.
	Åkerhög	19	0,6	Angrepp från den övre änden av röret och nedåt. Ett kraftigare angrepp vid ca 0,6 m (i anslutning till markytan). Angreppet avtar sedan.	Både in- och utvändiga gropar med djupet max 0,15 mm.
Låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo  <b>Sandvik 4N3C2Mo</b>	Nyhem	44	0,5	Något kraftigare angrepp vid ca 0,7 m (i anslutning till markytan). För övrigt endast mindre angrepp, som helt avtar mot den nedre änden av röret.	Någon enstaka liten grop med djupet 0,08 mm.
	Närefors	39	0,6	Rätt kraftiga angrepp i övre änden av röret, som avtar mot den nedre delen där endast punktangrepp förekommer. Vid 3,07 m något större anhopning av angrepp.	Enstaka mindre gropar.
	Ej standardiserat	Åkerhög	34	0,57	Rätt kraftiga angrepp vid 0,57 m (i anslutning till markytan). Den övre delen av röret var för övrigt något angripen. Vid 3,08 m en kraftig anhopning av angrepp. För övrigt en del mindre angrepp på den nedre delen av röret.

**Tabell 4.2.** Korrosionshastigheter hos stålrör efter ett års exponering i jord på tre olika provningsplatser. Korrosionshastigheterna, som beräknats vid Swerea KIMAB, avser korrosion på både in- och utsidan av hela röret. Resultat från Sandvikens Jernverks AB, Danielsson [18].

Stålsort Standard Stålbeteckning	Prov- nings- plats	Rör  nr	Total längd hos röret  m	Höjd rör- topp över markytan  m	Längd del i jord  m	Massa före expo- nering  kg	Massa efter rengör- ning  kg	Mass- förlust  g	Korro- sions- hastig- het  µm/år
Kolstål SS 2120  <b>Sandvik 9LM</b>	Nyhem	–	–	–	–	–	–	–	–
	Närefors	69	3,5	–	–	17,22	17,22	0	0 <sup>a</sup>
	Åkerhög	64	3,5	0,5	3,0	17,00	16,93	70	17
Låglegerat stål SS 2225  <b>Sandvik 5C2Mo</b>	Nyhem	29	3,5	0,7	2,8	16,45	16,20	250	60 <sup>b</sup>
	Närefors	24	3,5	0,4	3,1	17,62	17,72	Massök- ning	< 0 <sup>a</sup>
	Åkerhög	19	3,5	0,6	2,9	17,67	17,71	Massök- ning	< 0 <sup>a</sup>
Låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo  <b>Sandvik 4N3C2Mo</b>  Ej standardiserat	Nyhem	44	3,5	0,5	3,0	20,75	20,42	330	93 <sup>b</sup>
	Närefors	39	3,5	0,6	2,9	20,45	20,12	330	93 <sup>b</sup>
	Åkerhög	34	3,5	0,57	2,93	20,35	20,30	50	14

- a) Orimligt låg korrosionshastighet. Röret har troligen inte rengjorts tillräckligt nogga. Det finns sannolikt kvar korrosionsprodukter på rörytan.
- b) Orimligt hög korrosionshastighet. Röret kan alternativt ha rengjorts för kraftigt, så att också okorroderat stål tagits bort. Ett annat alternativ är fel vid vägningen av rören.

**Tabell 4.3.** Korrosionsangrepp och frättdjup på stålrören efter fem års exponering i jord på tre olika provningsplatser. Resultat från Sandvik AB, Danielsson [19].

Stålsort Standard Stålbeteckning	Prov- nings- plats	Rör	Höjd rörtopp över mark- ytan	Korrosionsangrepp på rören	Frätgropar på rören vid angreppsställen
		nr	m	Resultat från syning av rören  Avstånd i m anges från rörets övre ände (rörtopp)	
Kolstål SS 2120  <b>Sandvik 9LM</b>	Nyhem	74	0,5	Jämn korrosion på röret över markytan till ca 0,5 m, sedan kraftigare angrepp ned till 1,25 m. Därefter inget anmärkningsvärt.	Flacka gropar runt om röret med djupet max 0,40 mm.
	Närefors	70	1,0	Rätt kraftiga angrepp utom sista 0,75 m på röret (2,75 – 3,5 m), som har svaga angrepp.	Flacka gropar runt om röret med djupet max 0,40 mm.
	Åkerhög	65	0,55	Rätt kraftiga angrepp vid 0,5 m (i anslutning till markytan), sedan svagare angrepp ned till sista 0,5 m på röret (3,0 – 3,5 m), som har kraftiga angrepp.	Rätt jämn avfrätning samt en del flacka gropar med djupet 0,10 mm.
Låglegerat stål SS 2225  <b>Sandvik 5C2Mo</b>	Nyhem	30	0,55	Jämn korrosion på röret över markytan till ca 0,55 m, sedan kraftigare angrepp ned till 1,7 m. Därefter inget anmärkningsvärt.	Större flacka gropar nästan runt om röret, max 0,30 mm djupa.
	Närefors	25	1,0	Rätt kraftiga angrepp 2 m nedåt på röret (0 – 2 m). Därefter inget anmärkningsvärt.	Flacka gropar runt om röret, max 0,40 mm djupa.
	Åkerhög	20	0,55	Rätt kraftiga angrepp vid 0,6 m (i anslutning till markytan), sedan svagare angrepp ned till 1,5 m på röret. Därefter åter kraftiga angrepp.	Jämn avfrätning med enstaka flacka gropar, max 0,15 mm djupa.
Låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo  <b>Sandvik 4N3C2Mo</b>  Ej standardiserat	Nyhem	45	0,5	Angrepp ned till 1,4 m på röret, därefter några enstaka punktangrepp.	Ett kraftigt punktangrepp med djupet 0,50 mm. För övrigt ganska jämn avfrätning med djupet 0,10 mm.
	Närefors	40	1,0	Jämn korrosion på röret ned till 1,6 m, därefter kraftigare urfrätningar ned till 2,4 m. Därefter endast några enstaka punktangrepp.	Kraftiga punktangrepp med djupet max 1,20 mm d et vill säga ca 10 % av godstjockleken.
	Åkerhög	35	0,55	Rätt kraftiga angrepp vid 0,5 m, sedan ett område med höjden 0,2 m (0,5 – 0,7 m) med mycket kraftiga angrepp, som sedan avtar ned till 1,0 m. För övrigt är röret i stort sett bra utom sista 0,4 m på röret (3,1 – 3,5 m), som har kraftiga angrepp.	Kraftiga urfrätningar runt om röret med djupet max ca 1,5 mm det vill säga ca 13 % av godstjockleken.

**Tabell 4.4.** Korrosionshastigheter hos stålrör efter fem års exponering i jord på tre olika provningsplatser. Korrosionshastigheterna, som beräknats vid Swerea KIMAB, avser korrosion på både in- och utsidan av hela röret. Resultat från Sandvik AB, Danielsson [19].

Stålsort Standard Stålbeteckning	Prov- nings- plats	Rör  nr	Total längd hos röret  m	Höjd rör- topp över markytan  m	Längd del i jord  m	Massa före expo- nering  kg	Massa efter rengör- ning  kg	Mass- förlust  g	Korro- sions- hastig- het  µm/år
Kolstål SS 2120  <b>Sandvik 9LM</b>	Nyhem	74	3,5	0,5	3,0	17,13	17,05	80	3,9
	Närefors	70	3,5	1,0	2,5	17,71	17,63	80	3,9
	Åkerhög	65	3,5	0,55	2,95	17,35	17,17	180	8,7
Låglegerat stål SS 2225  <b>Sandvik 5C2Mo</b>	Nyhem	30	3,5	0,55	2,95	17,40	17,40	0	0 <sup>a</sup>
	Närefors	25	3,5	1,0	2,5	16,66	16,58	80	3,9
	Åkerhög	20	3,5	0,55	2,95	17,44	17,50	Massök- ning	< 0 <sup>a</sup>
Låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo  <b>Sandvik 4N3C2Mo</b>  Ej standardiserat	Nyhem	45	3,5	0,5	3,0	20,25	20,30	Massök- ning	< 0 <sup>a</sup>
	Närefors	40	3,5	1,0	2,5	20,25	20,22	30	1,7
	Åkerhög	35	3,5	0,55	2,95	20,50	20,35	150	8,5

- a) Orimligt låg korrosionshastighet. Röret har troligen inte rengjorts tillräckligt nogga. Det finns sannolikt kvar korrosionsprodukter på rörytan.

**Tabell 4.5.** Korrosionshastigheter och maximala lokala korrosionshastigheter hos stålrör efter ett och fem års exponering i jord på tre olika provningsplatser. De massförlustbestämda korrosionshastigheterna avser korrosion på både in- och utsidan av hela röret. Resultat från Sandvikens Jernverks AB och Sandvik AB, Danielsson [18, 19].

Stålsort Standard Stålbeteckning	Provnings- plats	Expone- ringstid	Rör	Korrosions- hastighet	Maximal lokal utvärdig korrosionshastighet
				Massförlustbestämd jämn enkelsidig avfrätning µm/år	Baserat på mätning av utvärdigt frättdjup på rören µm/år
		år	nr		
Kolstål SS 2120  Sandvik 9LM	Nyhem	1	–	–	–
		5	74	3,9	80
	Närefors	1	69	0 <sup>a</sup>	100
		5	70	3,9	80
	Åkerhög	1	64	17	50
		5	65	8,7	20
Låglegerat stål SS 2225  Sandvik 5C2Mo	Nyhem	1	29	60 <sup>b</sup>	Inga synliga gropar
		5	30	0 <sup>a</sup>	60
	Närefors	1	24	< 0 <sup>a</sup>	100
		5	25	3,9	80
	Åkerhög	1	19	< 0 <sup>a</sup>	150
		5	20	< 0 <sup>a</sup>	30
Låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo  Sandvik 4N3C2Mo  Ej standardiserat	Nyhem	1	44	93 <sup>b</sup>	80
		5	45	< 0 <sup>a</sup>	100
	Närefors	1	39	93 <sup>b</sup>	Endast enstaka mindre gropar
		5	40	1,7	240
	Åkerhög	1	34	14	350
		5	35	8,5	300

a) Orimligt låg korrosionshastighet. Röret har troligen inte rengjorts tillräckligt nog. Det finns sannolikt kvar korrosionsprodukter på rörytan.

b) Orimligt hög korrosionshastighet. Röret kan alternativt ha rengjorts för kraftigt, så att också okorroderat stål tagits bort. Ett annat alternativ är fel vid vägningarna av rören.



## 5. Utvärdering av korrosionsangrepp

### 5.1 Rengöring och vägning av rören

För att kunna utvärdera den totala korrosionen genom massförlustbestämning måste rören rengöras från jord och korrosionsprodukter såväl in- som utvändigt. Detta har skett genom stålborstning. Insidan rengjordes med runda borstar monterade på en borrstång med bormaskin. Kontroll av att utsidan frigjorts från alla korrosionsrester gjordes med ritsspets.

Rören vägdes därefter på en elektrisk våg med maxkapaciteten 32,1 kg och en upplösning på 1 g i aktuellt mätområde. Tre av rören, kolstålsrören från Nyhem (rör 76) och Närefors (rör 71) samt röret av låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo från Åkerhög (rör 38), vägdes med rost, med ren insida och helt rena medan röret av låglegerat stål SS 2225 från Närefors (rör 21) mättes med ren insida och helt rent samt kolstålsröret från Åkerhög (rör 66) som enbart vägdes helt rent.

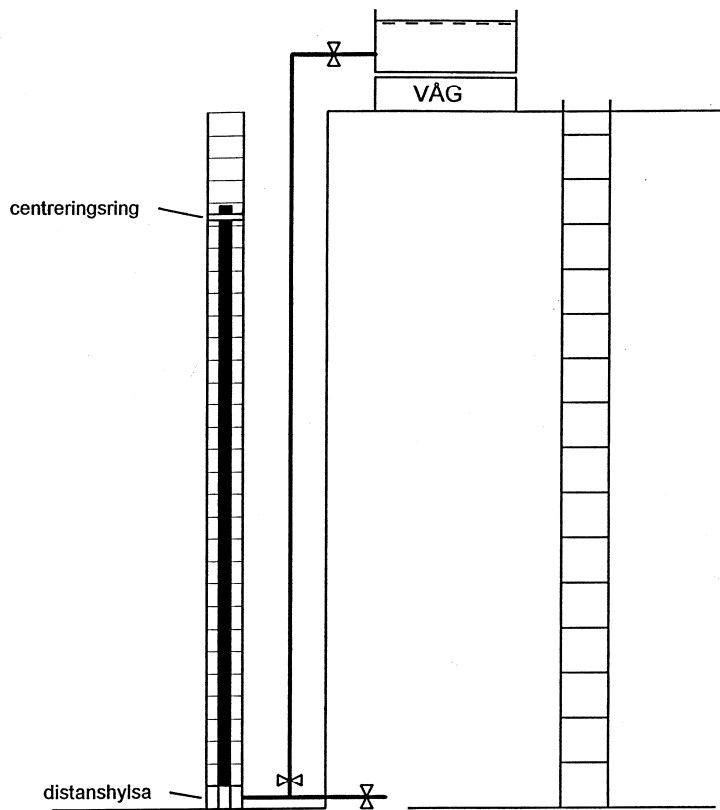
**Tabell 5.1.** Uppmätta massor för exponerade rör med olika grad av rengörning från provningsplatser. Exponeringstiden var 24,9 år.

Stålsort Standard Stålbeteckning	Provnings- plats	Rör nr	Ursprunglig massa hos röret kg	Massa före rengöring av röret kg Röret är en- dast renspo- lat från jord	Massa med rengjord in- sida av röret kg	Massa helt rengjort rör kg
Kolstål	Nyhem	76	17,20	16,881	16,877	16,839
SS 2120	Närefors	71	17,09	16,699	16,692	16,655
<b>Sandvik 9LM</b>	Åkerhög	66	17,39	–	–	16,462
Låglegerat stål SS 2225 <b>Sandvik 5C2Mo</b>	Åkerhög	21	17,38	–	16,177	16,121
Låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo <b>Sandvik 4N3C2Mo</b> Ej standardiserat	Åkerhög	38	20,30	19,812	19,801	19,760

### 5.2 Mätning med vattenvolymeter

Eftersom man redan tidigt såg att det fanns lokala korrosionsangrepp på rören från Åkerhög på vissa nivåer under markytan ville man ha en mer noggrann uppmätning av korrosionen längs rören såväl ut- som invändigt i syfte att få en uppfattning av hur korrosionshastigheten varierade längs rören och hur stor den maximala korrosionen kunde bli i jämförelse med den jämna (allmänna) korrosionen, som bestäms genom massförlustmätning.

Dessa mätningar utfördes med en speciellt tillverkad så kallad vattenvolymeter där röret sattes ned i ett graderat plexiglasrör, vilket decimeter för decimeter fylldes med vatten varvid tillförd vattenvolym mättes genom noggrann vägning av tillförd vattenmängd. Genom att mäta vattenvolymsskillnaden mellan tomt mätrör och med instucket stålrör kunde stålvolymen för varje decimeter av det instuckna röret bestämmas och korrosionen beräknas. En principskiss över mätutrustningen visas i **Figur 5.1** medan ett foto av utrustningen visas i **Figur 5.2**.



**Figur 5.1.** Principskiss för vattenvolymeterutrustningen.

Till vattenvolymetern användes ett 4 m långt rör av PVC med ytterdiameter 50 mm och godstjocklek 2,4 mm, som pluggades i ena änden och graderades med tunna ritsmärken var 100:e mm. Uppmätt invändig diameter var  $46,0 \pm 0,2$  mm. Mätröret ställdes lodrätt mot ett stöd. Över mätrörets överkant placerades en behållare med vatten på en våg. Behållaren var försedd med en tappkran för reglering av vattenvolymen och varje ändring av vattenmängden kunde avläsas på den våg ( $\pm 0,05$  g) på vilken behållaren placerats.

Först bestämdes det tomma PVC-rörets volym som funktion av vattenhöjden i röret. Tappkranen över mätröret öppnades och vatten fylldes på upp till i nivå med den första ritsen, 100 mm upp. Vågen lästes av och värdet noterades. Vatten fylldes på till nästa rits och en ny avläsning av vågen gjordes. Skillnaden i vikt hos vattenbehållaren motsvarade den volym vatten, som rymdes i mätröret för aktuell delsträcka om 100 mm. Vid volyberäkningen användes densiteten  $1,00 \text{ kg/dm}^3$  för vattnet. Hela röret uppmättes på detta sätt. Genom att bestämma mätrörets volym på samma sätt såväl med som utan stålrör, som när uppmätning av stålrören ägde rum, kunde man vid mätningen av de senare bortse från eventuella små utvidgningar av mätrörets volym i dess nedre del på grund av vattentrycket när röret vattenfylldes.

När mätröret tömts på vatten och dess insida torkats insattes ett stålrör och helheten restes mot stödet. Vatten fylldes på upp till skalstrecket, som markerade 100 mm och vågen avlästes. Mätningarna fortsatte för den del av rörets längd, som helt fyllde mellanrummet mellan ritsarna, det vill säga utgjorde hela decimetrar. Rörets sista centimetrar i dess övre ände uppmättes inte. I beräkningarna antogs avrost-

ningen på denna del vara av samma storlek per ytenhet som på närmast underliggande hela decimeter. Den volym, som stålröret upptog för varje delsträcka, beräknades som skillnaden i vattenvolym mellan tomt mätrör och mätrör med röret insatt. Motsvarande massa kunde beräknas om man antar att den genomsnittliga diametern för delsträckan kunde bestämmas.



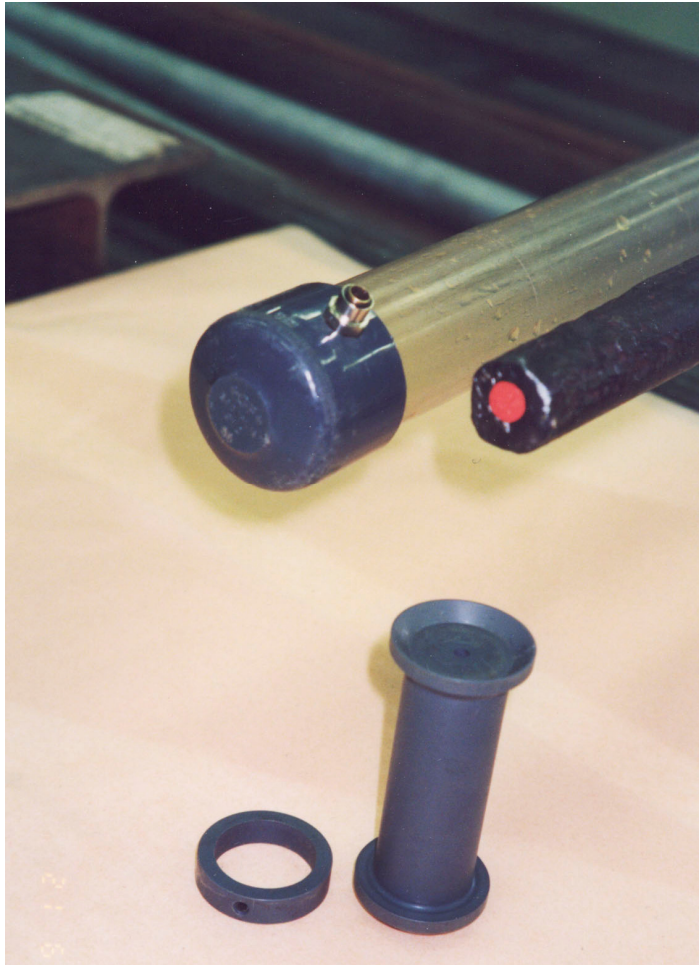
**Figur 5.2.** Mätutrustning på SGI.

Mätning av stålrören skedde i två omgångar, först när rören var pluggade i den nedre änden, därefter när de var opluggade. På så sätt kunde såväl den utvändiga som den invändiga diametern på det korroderade röret bestämmas.

Vid tidigare mätningar upptäcktes svårigheter med att fylla på vattnet genom mätrörets övre ände. Eftersom slangen hölls högt stänkte vattendroppar på stålröret och på mätrörets insida, droppar vars sammanlagda vikt gav utslag vid avläsning av vågen, men vars volym inte påverkade vattenytans nivå. Dessutom bildades vid vattenstrålens nedslag luftbubblor, som stannade kvar under vattenytan när nivån steg. Om slangen sänktes djupt i mätröret kom den att ta stöd mot mätrörets överkant och insida varför avläsningen av vågen inte blev tillförlitlig. Vattnet fylldes därför på underifrån i mätröret vid senare försök.

För att säkerställa att ingen luft kommit in i slangarna vid mätrörets nedre ände och därmed ge upphov till ett fel vid avläsningen före påfyllning av vatten i den första decimetern, nollmätningen, användes en distanshylsa, som var avpassad så att stålröret kom att stå i nivå med den första ritsen. Genom distanshysan borrades hål för att vattnet, via en tunn bottenbricka med en skåra i, säkert skulle tränga

upp i stålröret i det fall detta var opluggat. Nederdelen av mätröret, ett pluggat stålrör och distanshylsan med centrerande ring visas i **Figur 5.3**.



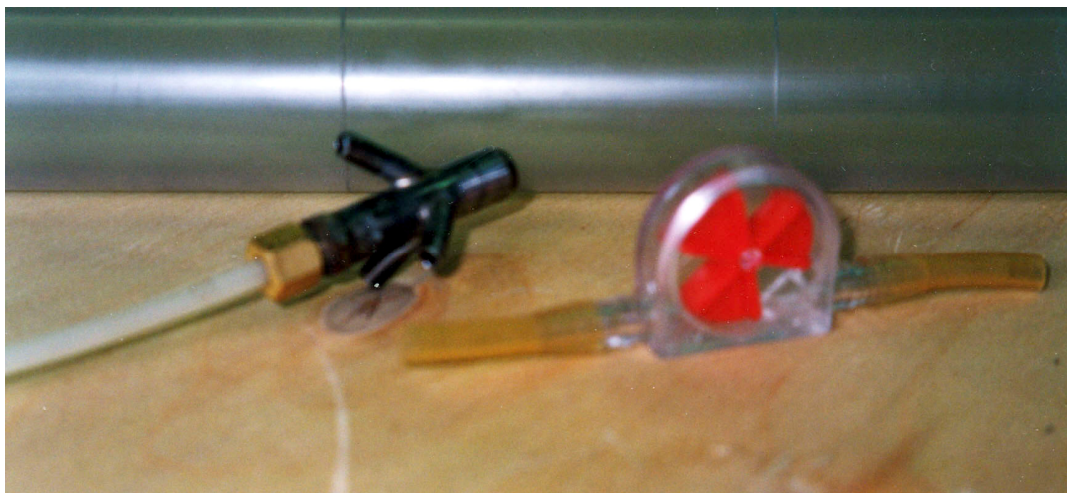
**Figur 5.3.** Mätrör, pluggat stålrör, distanshylsa och centrerande ring.

Ytspänningen gjorde att det bildades en hängande menisk mot stålröret men mellan vattenytan och det glatta mätröret var vinkeln rät. Volymen av det vatten, som utgjorde menisken mot stålröret kan dock anses ha varit konstant längs hela stålrörets längd, varför det mätfel menisken givit upphov till endast belastar den nedersta decimetern av stålröret. Mätfelet kan dessutom anses ha varit litet.

Eftersom stålröret ställdes ned i mätröret utan styrning och tilläts luta sig mot mätrörets vägg, steg vattnet väsentligt genom spaltverkan vilket försvårade avläsningen av vattennivån i röret. Distanshylsan utformades därför så att den tillsammans med en centrerande ring fastskruvad i övre änden av stålröret höll det centriskt i mätröret.

Vattnet som användes var vanligt icke avluftat kranvatten, som fått stå minst ett dygn i rumstemperatur (+ 23 °C). Någon hänsyn till den lägre densiteten vid + 23 °C jämfört med + 18 °C har ej tagits. Vid stängning av vattenflödet kunde det hända att tryckminskningen orsakade att luft löstes ut ur vattnet precis nedanför ventilen, som reglerade flödet. Dessa (enstaka) luftbubblor kunde dock inte passera den nedre ventilen och fortsätta ut i mätröret, varför deras inverkan på resultatet kan anses vara försumbar.

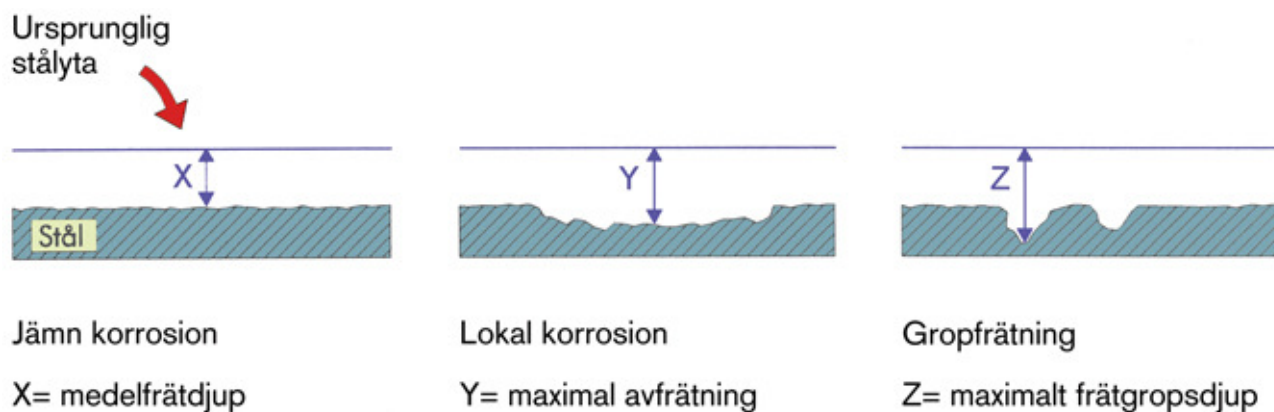
Mätröret blåstes torrt med tryckluft mellan varje mätning, **Figur 5.4**.



**Figur 5.4.** Specialverktyg för torkning av mätröret med tryckluft samt flödesindikator.

### 5.3 Korrosionstyper

Korrosionen kan delas upp i jämn och lokal korrosion. Jämn korrosion (allmän korrosion) avser den genomsnittliga avfrätningen på ett föremål och sker med ungefär samma hastighet på hela metallytan, medan lokal korrosion är lokaliserad till en del eller vissa delar av metallytan och sker med särskilt stor hastighet inom begränsade områden på metallytan. Gropfrätning är lokal korrosion, som är koncentrerad till vissa punkter och resulterar i frätgropar på metallytan, se **Figur 5.5**. Gropfrätning, som också ibland kallas för punktfrätning eller punktkorrosion, leder till ett angrepp med ringa utbredning men ofta med betydande djup.



**Figur 5.5.** Olika typer av korrosionsangrepp på kolstål eller låglegerat stål.

#### 5.3.1 Jämn korrosion

Jämn korrosionshastighet bestäms genom massförlustundersökningar där provföremålet vägs före exponering och sedan efter exponering, då korrosionsprodukterna avlägsnats genom betning eller med något annat rengöringssätt, till exempel stålborstning. Korrosionshastigheten avseende massminskning per exponerad area och exponeringstid brukar anges i enheten  $g/(m^2 \cdot \text{år})$  och sedan räknas om till medelavfrätning i enheten  $\mu\text{m}/\text{år}$  ( $1 \mu\text{m} = 0,001 \text{ mm}$ ). Vid omräkning av korrosionshastigheten till medelavfrätning användes här densiteten  $7800 \text{ kg}/\text{m}^3$ .

Medelavfrätningen är alltså föremålets massminskning omräknad till utbredd avverkning av föremålet per tidsenhet. Medelavfrätningen är i dubbel bemärkelse en genomsnittlig korrosionshastighet: dels ge-

nomsnittlig korrosionshastighet för hela exponeringstiden, dels genomsnittligt frätdjup (medelfrätdjup) per tidsenhet på metallytan.

I vissa dokument till exempel svensk standard SS-EN 1993-5:2007 [20] anges korrosionshastigheten som tjockleksminskning i mm för en viss tid. Ovan nämnda standard är tyvärr också ett exempel på hur man inte bör ange korrosionshastigheter. Det är inte klart utsagt om det avses enkel- eller dubbelsidig avfrätning på pålar och spont i standarden. Troligtvis avses dock enkelsidig korrosionen för viss tid. En annan brist i svensk standard SS-EN 1993-5:2007 [20] är att det inte anges vilken sorts korrosionshastighet som avses för stålspont i vatten: medelvärde för jämn korrosion eller största värdet för jämn korrosion.

Korrosionshastigheten kan också anges som karakteristiska, rekommenderade eller dimensionerande värden på avrostningen uttryckt i enheten mm/100 år. Med karakteristiskt värde avses ofta 95%-fraktilen av en serie uppmätta värden eller erfarenhetsvärden. Med rekommenderade värden avses värden som bör användas vid dimensionering i brott- och bruksgränstillstånd för viss livslängd. Dimensionerande värden kan vara desamma som rekommenderade men kan också vara karakteristiska värden multiplicerade med en viss partialkoefficient men kan också vara ett krav från en beställare eller myndighet.

Rostmån för stålpålar och stålspont, karakteristisk, rekommenderad eller dimensionerande rostmån, brukar också anges i enheten mm/100 år,

## 5.4 Beräkning av genomsnittlig korrosionshastighet baserat på massförlust

När stålrören vägts efter fullständig rengöring kunde den genomsnittliga korrosionshastigheten beräknas från rörens massförlust. Korrosionshastigheten  $v_{korr}$  uttryckt i enheten g/(m<sup>2</sup>·år) beräknades enligt:

$$v_{korr} = \frac{\Delta m}{A \cdot t} \quad (1)$$

där  $v_{korr}$  = korrosionshastighet, g/(m<sup>2</sup>·år)  
 $\Delta m$  = massminskning (massförlust), g  
 $A$  = exponerad area, m<sup>2</sup>  
 $t$  = exponeringstid, 24,9 år

Rörens exponerade area  $A$  beräknades här som dess totala area enligt:

$$A = \left[ \pi \cdot D \cdot l + \pi \cdot d \cdot l + 2 \cdot \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4} \right] \cdot 10^{-6} \quad (2)$$

där  $A$  = exponerad area, m<sup>2</sup>  
 $D$  = yttre nominell diameter, mm  
 $d$  = inre nominell diameter, mm  
 $l$  = rörets längd, mm

Korrosionshastigheten  $w_{korr}$  uttryckt som medelavfrätning i enheten µm/år beräknades enligt:

$$w_{korr} = \frac{1000 \cdot v_{korr}}{\rho_s} \quad (3)$$

där  $w_{korr}$  = korrosionshastighet (medelavfrätning),  $\mu\text{m}/\text{år}$   
 $V_{korr}$  = korrosionshastighet,  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{år})$   
 $\rho_s$  = stålets densitet;  $7800 \text{ kg}/\text{m}^3$

Senare uppgivna densitetsvärden för de olika rören av olika stålsorter redovisas i **Tabell 3.7**, men har ej beaktats i redovisade resultat.

## 5.5 Beräkning av korrosionshastighet baserat på vattenvolymetermätningar

Sedan mätningarna med vattenvolymetern genomförts kunde beräkningar av mängden korroderat material på olika djup under markytan på stängerna utföras. Först beräknades volymen av stålröret för varje delsträcka om 100 mm:

$$\Delta V_s = \Delta V_{tomt} - \Delta V_w^{opluggat} \quad (4)$$

där  $\Delta V_s$  = volym av stålröret,  $\text{cm}^3$   
 $\Delta V_{tomt}$  = volymen av det tomma mätröret på samma sträcka,  $\text{cm}^3$   
 $\Delta V_w^{opluggat}$  = uppmätt volym vatten sedan opluggat stålrör insatts i mätröret,  $\text{cm}^3$

Delvolymerna summerades och den totala volymen multiplicerat med stålets densitet jämfördes med det värde, som erhållits vid vägningen av röret. Skillnaden, orsakad dels av mätfel och dels av fel i antagandet av stålets och vattnets densiteter fördelades jämnt över rörets längd.

För varje delsträcka bestämdes därefter massan av det korroderade stålet  $\Delta m_s$ , uttryckt i enheten g enligt:

$$\Delta m_s = \frac{m_0}{l} \cdot \Delta l - \Delta V_s \cdot \rho_s \quad (5)$$

där  $\Delta m_s$  = massa hos korroderad delsträcka av röret, g  
 $m_0$  = ursprungsmassa hos hela stålröret (se Tabell 5.1), g  
 $l$  = längden hos röret (se Tabell 3.3), m  
 $\Delta l$  = längden hos delsträckan; 0,10 m  
 $\Delta V_s$  = uppmätt volym hos stålröret,  $\text{cm}^3$   
 $\rho_s$  = densiteten hos stål;  $7,80 \text{ g}/\text{cm}^3$

Rörets ytterdiameter  $d_y$  beräknades enligt:

$$d_y = 10 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot (\Delta V_{tomt} - \Delta V_w^{opluggat})}{\pi \cdot \Delta l}} \quad (6)$$

<sup>1</sup> Den verkliga densiteten för stålen anges i **Tabell 3.7**

där  $d_y$  = rörets ytterdiameter, mm  
 $\Delta V_{tomt}$  = volymen av det tomma mätroret på aktuell sträcka, cm<sup>3</sup>  
 $\Delta V_w^{pluggat}$  = uppmätt volym vatten då insatt stålrör var pluggat i änden, cm<sup>3</sup>  
 $\Delta l$  = längden hos delsträckan; 10,0 cm

Stålrörets innerdiameter  $d_i$  kunde sedan beräknas utifrån uppgift om dess ytterdiameter enligt:

$$d_i = 10 \cdot \sqrt{\left(\frac{d_y}{10}\right)^2 - \frac{4 \cdot (\Delta V_{tomt} - \Delta V_w^{opluggat})}{\pi \cdot \Delta l}} \quad (7)$$

där  $d_i$  = rörets innerdiameter, mm  
 $d_y$  = rörets ytterdiameter, mm  
 $\Delta V_{tomt}$  = volymen av det tomma mätroret på aktuell sträcka, cm<sup>3</sup>  
 $\Delta V_w^{opluggat}$  = uppmätt volym vatten då inträtt stålrör varit opluggat, cm<sup>3</sup>  
 $\Delta l$  = längden hos delsträckan; 10,0 cm

Den area, som exponerats (jord- eller luftexponerats) på aktuell rördel, är om både rörets utsida och insida antagits korrodera:

$$\Delta A = \pi \cdot \frac{(d_y^{nom} + d_i^{nom})}{1000} \cdot \Delta l \quad (8a)$$

där  $\Delta A$  = exponerad area hos delsträckan av röret, m<sup>2</sup>  
 $d_y^{nom}$  = nominell ytterdiameter; 32 mm <sup>2</sup>  
 $d_i^{nom}$  = nominell innerdiameter; 9 respektive 16 mm <sup>3</sup>  
 $\Delta l$  = längden hos delsträckan; 0,10 m

För sektionen närmast rörets ände måste en term för arean av ändytan läggas till ovanstående ekvation varför  $\Delta A$  får följande uttryck:

$$\Delta A = \pi \cdot \frac{(d_y^{nom} + d_i^{nom})}{1000} \cdot \Delta l + \pi \cdot \frac{[(d_y^{nom})^2 - (d_i^{nom})^2]}{4} \cdot 10^{-6} \quad (8b)$$

Beräkningarna av korrosionshastigheten  $v_{korr}$  på ett visst djup kan sedan baseras på framtagna uppgifter om mängden korroderat stål på aktuell delsträcka samt exponerad yta för samma sträcka enligt (se även ekvationer 1 och 2):

$$v_{korr} = \frac{\Delta m_s}{\Delta A \cdot t} \quad (9)$$

<sup>2</sup> Korrektion för eventuellt avvikande ytterdiameter har ej gjorts

<sup>3</sup> Korrektion för eventuellt avvikande innerdiameter har ej gjorts



där

- $v_{korr}$  = korrosionshastighet, g/(m<sup>2</sup>·år)
- $\Delta m_s$  = massa hos korroderad delsträcka av röret, g
- $\Delta A$  = exponerad area hos delsträckan av röret, m<sup>2</sup>
- $t$  = exponeringstid, 24,9 år

Djupet i jorden för en viss rördel har definierats som avståndet från rördelens mitt till markytan.

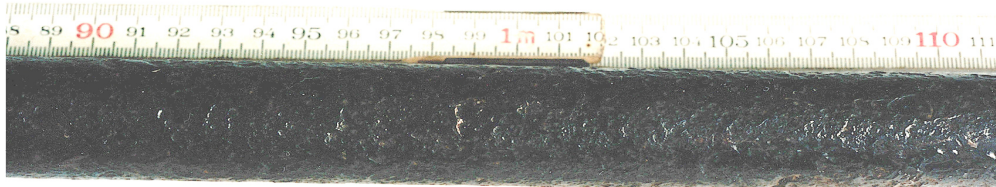
## 6. Resultat

### 6.1 Allmänna iakttagelser

#### 6.1.1 Kolstål exponerat vid tre provningsplatser

##### 6.1.1.1 Nyhem

Kolstålsröret SS 2120 (rör 76) uppvisade inga stora lokala angrepp men en begränsad jämn avfrätning med mindre lokala avfrätningar, se **Figur 6.1**. Avfrätningen var störst mellan 2,2 och 2,7 m från spetsen, det vill säga från markytans nivå till 0,5 m därunder. Insidan av röret visade på mindre variationer i den invändiga korrosionen. Den beräknade inre diametern var mindre än den nominella (16 mm) och låg mellan 15,09 och 15,91 mm.

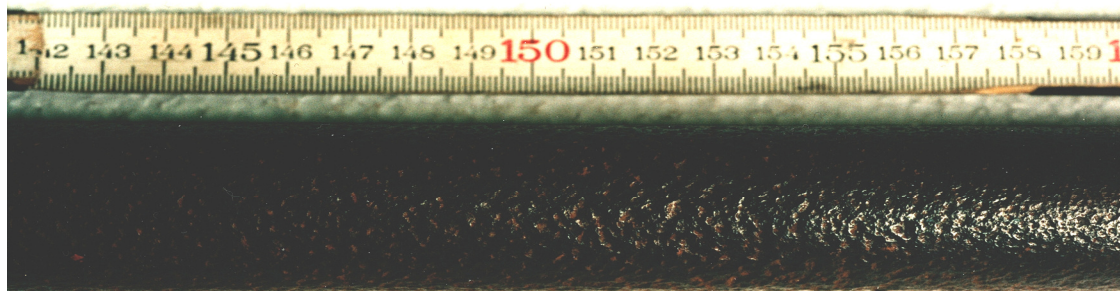


76 Kolstål  
NYHEM

**Figur 6.1.** Rör av kolstål SS 2120 (rör 76) från Nyhem vid Sandviken.

##### 6.1.1.2 Närefors

Röret av kolstål SS 2120 (rör 71) visade inga stora lokala angrepp men en begränsad jämn avfrätning med lokala mindre gropar, se **Figur 6.2**. Avfrätningen var störst 1,3 – 1,6 m från rörspetsen, det vill säga något under markytan. Insidan av röret visade på mindre variationer i den invändiga korrosionen. Den beräknade invändiga diametern var mindre än den nominella (16 mm) och låg mellan 15,01 och 15,83 mm.

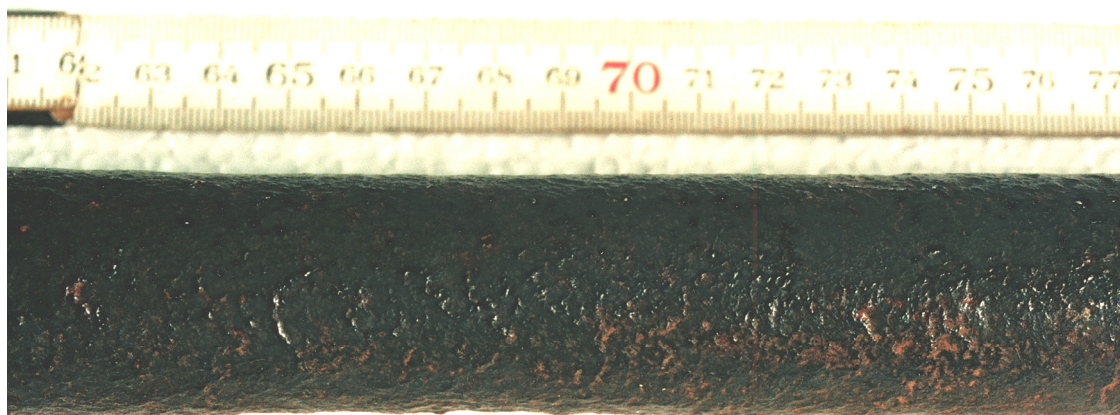


71 Kolstål

**Figur 6.2.** Rör av kolstål SS 2120 (rör 71) från Närefors nära Lidköping.

### 6.1.1.3 Åkerhög

Röret av kolstål SS 2120 (rör 66) uppvisade korrosionsangrepp, som var fördelade över hela rörets ut-sida. Något under markytan var angreppen något större och röret visade här en antydning till midja, se **Figur 6.3**. Även på cirka 0,4 m djup under markytan noterades kraftiga angrepp medan de var mindre på 2,5 – 2,7 m djup. Insidan av röret hade korroderat mest i sin övre ände.



66 Kolstål

**Figur 6.3** Rör av kolstål SS 2120 (rör 66) från Åkerhög nära Kungälv

## 6.1.2 Låglegerat stål exponerat vid Åkerhög

### 6.1.2.1 Låglegerat stål SS 2225

Röret av låglegerat stål SS 2225 (rör 21) hade utsatts för flera större korrosionsangrepp på olika djup under markytan bland annat på cirka 0,55, 0,90, 1,02 och 2,80 m djup. Korrosionen var inte jämnt fördelad över rörets yta. Punktvisa angrepp i form av gropar liknande tumavtryck koncentrerade till enbart en sida av röret noterades. Något under markytan fanns en antydning till en utvändig midja på röret i form av en jämn avfrätning runt röret samt många halvstora frätgropar med rundade kanter, **Figur 6.4 och 6.5**. Insidan av röret hade korroderat mest i sin övre ände det vill säga över markytan.



**Figur 6.4.** Rör av låglegerat stål SS 2225 (rör 21) från Åkerhög nära Kungälv.



**Figur 6.5.** Rör av låglegerat stål SS 2225 (rör 21) från Åkerhög nära Kungälv. Extra belyst.

### 6.1.2.2 Låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo

Röret av låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo (rör 38) uppvisade en kraftig korrosion på röret utvändigt på ett djup något under markytan, **Figur 6.6**. Röret var också angripet i sin nedre ände dels på en sträcka från änden och 0,3 m uppåt dels på ett avsnitt 0,5 m från nedre änden. Korrosionen på insidan av röret var relativt jämn.



**Figur 6.6.** Rör av låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo (rör 38) från Åkerhög nära Kungälv.

## 6.2 Korrosionshastigheter angivna i denna rapport

I denna undersökning har korrosionshastigheter på rören mätts på två olika sätt: massförlustbestämd medelavfrätning och lokal korrosionshastighet mätt med vattenvolymeter.

För den massförlustbestämda medelavfrätningen gäller:

- Genomsnittlig medelavfrätning (jämn korrosion) för hela röret
- Korrosionen har beräknats för hela rörets area (både delen i luft och delen i jord) såväl invändigt som utvändigt
- Enkelsidig avfrätning
- Lika stor korrosionshastighet på insidan som på utsidan av röret.

För korrosionshastigheter bestämda med vattenvolymetermetoden gäller:

- Lokal jämn korrosionshastighet för en 0,1 m lång rörsträcka
- Korrosionen har beräknats för hela rörsträckans area såväl invändigt som utvändigt
- Enkelsidig avfrätning
- Lika stor korrosionshastighet på insidan som på utsidan av röret.

Av en jämförelse mellan den invändiga och utvändiga korrosionen på rören framgår att:

- Korrosionen på insidan av rören var relativt jämn utan påtagliga lokala korrosionsangrepp
- Den jämna korrosionshastigheten bedömdes vara större på utsidan än på insidan av rören
- På utsidan av rören fanns fläckvis kraftiga lokala korrosionsangrepp
- De höga lokala korrosionshastigheterna bestämda med vattenvolymetermetoden härrör i huvudsak från utvändiga lokala korrosionsangrepp
- Den utvändiga arean hos rören var betydligt större än den invändiga arean. Den utvändiga arean var dubbelt så stor som den invändiga arean, med undantag för rör av låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2 Mo där den var 3,6 gånger större än den invändiga arean.

Korrosionen på utsidan på rören var större än korrosionen på insidan av rören. Därför kan de uppmätta korrosionshastigheterna på rören approximativt anses utgöra utvändiga korrosionshastigheter. De utvändiga korrosionshastigheterna kommer dock att överskattas något genom denna approximation.

### 6.3 Korrosionshastigheter från massförlustbestämningar

Stålrörens ursprungliga vikter och slutlig vikt efter exponering och noggrann rengöring redovisas i **Tabell 6.1** tillsammans med beräknad massförlustbestämd medelavfrätning. Beräkningarna av denna har utförts enligt **Kapitel 5.4** med den förutsättningen att hela röret korroderat lika mycket såväl ut- som invändigt och såväl över som under markytan.

Om endast den del av rören, som befunnit sig under markytan antas ha korroderat ut- och invändigt ökar korrosionshastigheten med cirka 20 %. Om man vidare antar att endast delen under markytan korroderat och endast utvändigt så ökas den beräknade korrosionshastigheten med 50 – 80 % jämfört med den massförlustbestämda medelavfrätningen i **Tabell 6.1**. För kolstålröret från Närefors var emellertid ökningen större eftersom så stor del av röret stod över markytan, se **Tabell 3.3**.

**Tabell 6.1.** Massförlustbestämd korrosionshastighet (medelavfrätning) för olika stålrör vid olika provningsplatser. För varje rör anges tre korrosionshastigheter beroende på hur den exponerade arean hos röret beräknats. Exponeringstiden var 24,9 år.

Stålsort Standard Stålbeteckning	Prov- nings- plats	Rör  nr	Massa före expo- nering  kg	Massa efter rengör- ning  kg	Mass- förlust  g	Korrosionshastighet		
						Massförlustbestämd jämn enkelsidig avfrätning vid olika antaganden om exponerad area µm/år		
						Antagen exponerad area hos röret		
						Total area <sup>1</sup>	Total area under markytan <sup>2</sup>	Utvändig area under markytan <sup>3</sup>
Kolstål  SS 2120  <b>Sandvik 9LM</b>	Nyhem	76	17,20	16,839	361	<b>3,6</b>	4,3	6,5
	Närefors	71	17,09	16,655	435	<b>4,4</b>	9,3	14
	Åkerhög	66	17,39	16,462	928	<b>9,2</b>	11	17
Låglegerat stål SS 2225  <b>Sandvik 5C2Mo</b>	Åkerhög	21	17,38	16,121	1259	<b>12,2</b>	15	22
Låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo  <b>Sandvik 4N3C2Mo</b> Ej standardiserat	Åkerhög	38	20,30	19,760	540	<b>6,1</b>	7,3	9,4

- 1) Arean hos ut- och insidan av hela röret samt arean hos två ändtytor.
- 2) Arean hos ut- och insidan av röret under markytan samt arean hos en ändyta.
- 3) Arean hos utsidan av röret under markytan samt arean hos en ändyta (utvändig jordexponerad area).

## 6.4 Korrosionshastigheter från vattenvolymetermätningar

De från vattenvolymetermätningarna och efterföljande beräkningar enligt **Kapitel 5.5** framtagna korrosionshastigheterna för olika delar av rören har sammanställts som tabeller i **Bilaga A1 – A5**.

För att belysa skillnaderna mellan den ovan uppmätta och beräknade massförlustbestämda medelavfrätningen och den med vattenvolymeter uppmätta och beräknade förändringen av ståltvärsnittet för varje dm av rören visas resultaten för de fem rören i **Figur 6.7 – 6.12**. Som jämförelse har inlagts den massförlustbestämda medelavfrätningen för hela rörets avrostning fördelad på rörets hela area såväl ut- som invändigt. Värdena är i höjdlängd relaterade till markytans nivå (djupet = 0 m).

I **Tabell 6.2** har resultaten av de på olika sätt uppmätta korrosionshastigheterna sammanställts för respektive provningsplats och stålsort.

**Tabell 6.2.** Korrosionshastigheter (medelavfrätning och lokala korrosionsangrepp) och korrosionens uppträdande på vertikala rör av kolstål och låglegerat stål efter 24,9 års exponering i jord på tre provningsplatser.

Stålsort Standard Stålbeteckning	Prov- nings- plats	Rör  nr	Medel- avfrät- ning <sup>a</sup>  µm/år	Lokal korrosion <sup>b</sup>		Lokal korrosion <sup>b</sup>		Anmärkning
				Fem minsta angreppen på röret		Fem största angreppen på röret		
				Korro- sions- hastig- het µm/år	Djup under markytan m	Korro- sions- hastig- het µm/år	Djup under markytan m	
Kolstål	Nyhem	76	3,6	~ 0	- 0,22	26,6 <sup>c</sup>	- 0,52	Små lokala an- grepp. De största angreppen på dju- pet 0,1 – 0,5 m under markytan.
				~ 0	- 0,12	8,5	0,18	
				~ 0	0,08	7,5	0,38	
				~ 0	- 0,42	7,2	0,48	
				0,7	- 0,32	5,7	0,68	
SS 2120	Närefors	71	4,4	0,5	- 0,865	12,2	0,135	Små lokala an- grepp. De största angreppen på dju- pet 0 – 0,5 m un- der markytan.
				1,4	- 1,565	11,4	0,335	
				1,5	- 1,165	11,1	0,235	
				1,7	- 1,465	8,3	0,535	
				1,7	- 0,165	7,5	0,435	
Sandvik 9LM	Åkerhög	66	9,2	0,4	- 0,135	17,4	0,065	Små lokala an- grepp. De största angreppen i an- slutning till mark- ytan och på djupen 0,45, 1,05, 1,25, 2,05 och 2,67 m under markytan.
				2,2	- 0,235	16,9	0,465	
				2,5	0,765	15,5	1,065	
				2,8	0,165	14,7	- 0,035	
				3,3	- 0,335	14,5	1,265	
Låglegerat stål SS 2225 Sandvik 5C2Mo	Åkerhög	21	12,2	0,1	- 0,07	40,7	0,83	Måttliga lokala an- grepp i form av gropar på flera ställen: på djupet 0 – 1 m från mark- ytan och längst ned på röret.
				0,6	- 0,17	38,6	0,93	
				0,6	2,23	30,9	1,03	
				0,9	- 0,27	30,6	0,53	
				2,2	1,63	27,2	0,03	
Låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo Sandvik 4N3C2Mo Ej standardiserat	Åkerhög	38	6,1	~ 0	1,98	87,0	0,08	Tydlig midjebild- ning något under markytan och kraf- tigt angrepp längst ned på röret.
				~ 0	1,68	21,9	2,88	
				~ 0	- 0,12	21,0	0,18	
				~ 0	2,28	19,4	2,78	
				~ 0	- 0,42	17,9	2,68	

a) Korrosionshastigheten utvärderat genom massförlustmätning – avser både in- och utvändig korrosion.  
b) Korrosionshastigheten utvärderat med vattenvolymeter – avser både in- och utvändig korrosion.  
c) Orimligt hög lokal korrosionshastighet längst upp på röret i luften. Sannolik felmätning.

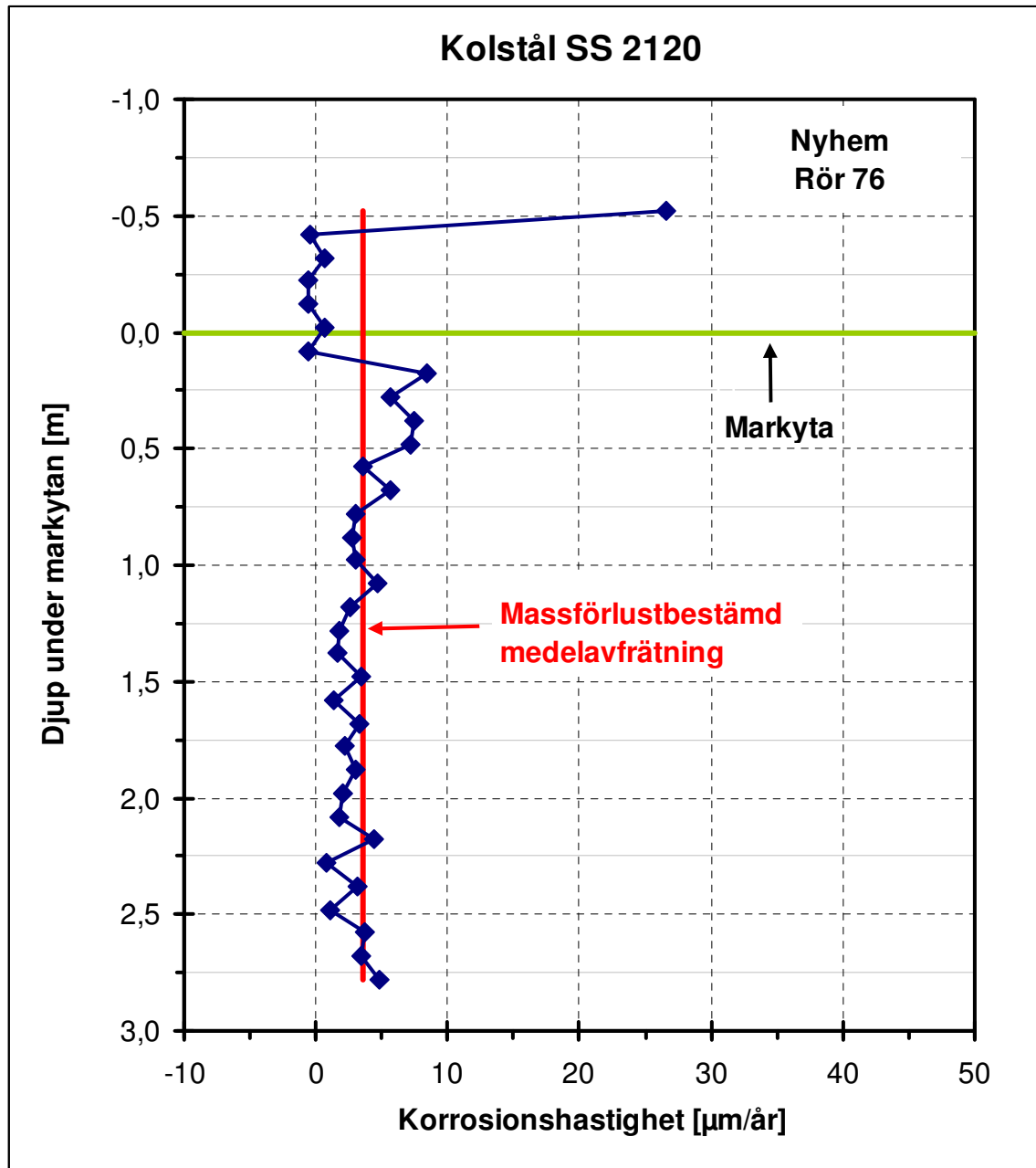


Resultaten visade att korrosionshastigheterna kunde variera inom vida gränser längs rören och vida överstiga de värden på medelavfrätning, som erhållits genom vägning och beräkning från massförlusten. Resultaten från de fem rören på de tre provningsplatserna sammanfattas nedan var för sig.

## 6.4.1 Kolstål exponerat vid tre provningsplatser

### 6.4.1.1 Nyhem

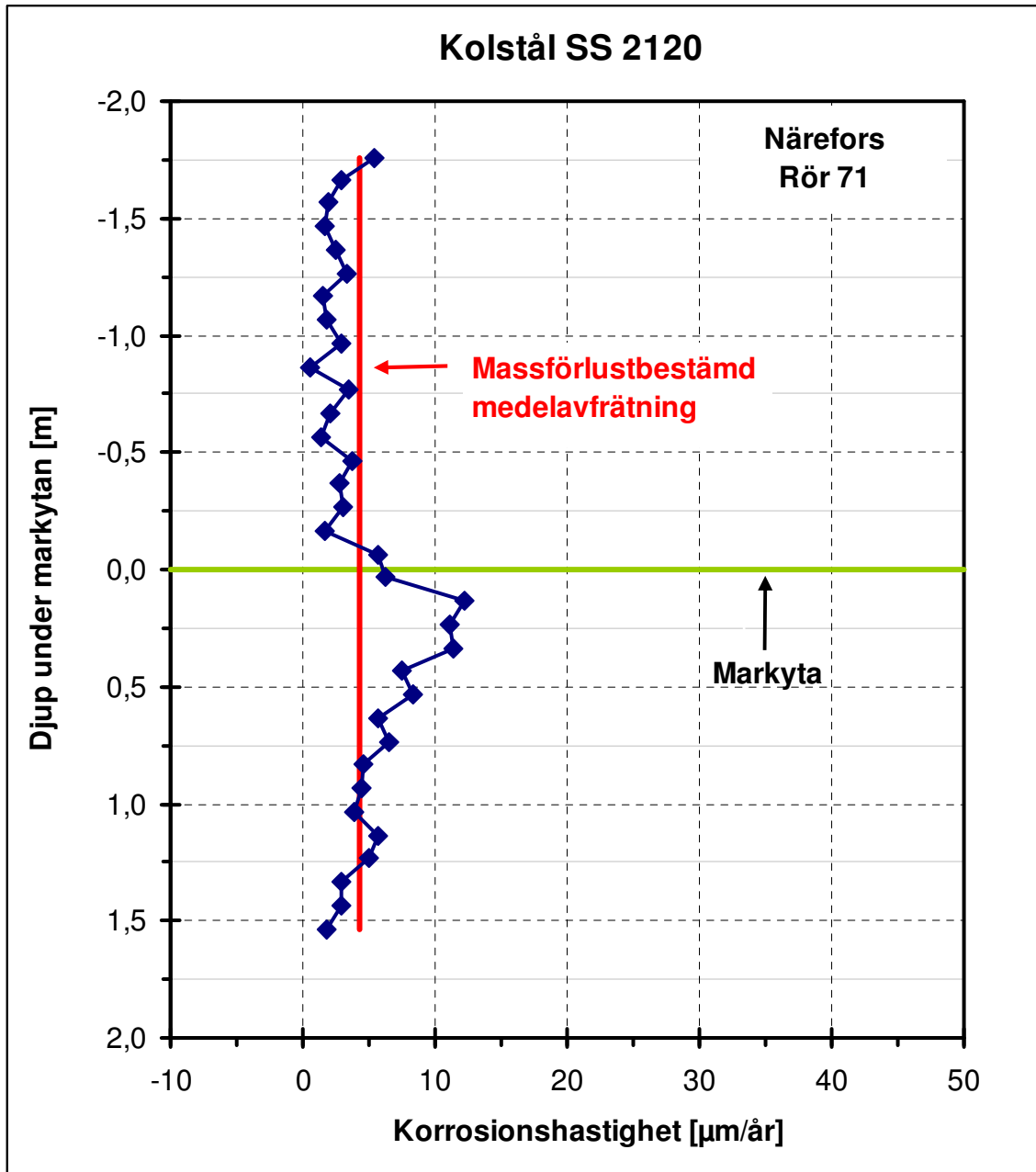
Vattenvolymetermätningarna på rör av kolstål SS 2120 (rör 76) från Nyhem visade att den största korrosionen också här har uppkommit på mellan 0 och 0,5 m djup under markytan, där den var mellan 5,5 och 8,5  $\mu\text{m}/\text{år}$ . I övrigt låg korrosionshastigheten nära den massförlustbestämda medelavfrätningen på 3,6  $\mu\text{m}/\text{år}$ . På delen över markytan låg korrosionshastigheten nära noll om man bortser från värdet (27  $\mu\text{m}/\text{år}$ ) vid den övre änden, som bedöms vara felmätt. Några mindre negativa värden har uppmätts på delen över markytan.



**Figur 6.7.** Uppmätt korrosionshastighet på olika djup för kolstål SS 2120 (rör 76) från Nyhem vid Sandviken. Korrosionshastigheter från vattenvolymetermätningarna jämförs med den massförlustbestämda medelavfrätningen.

### 6.4.1.2 Närefors

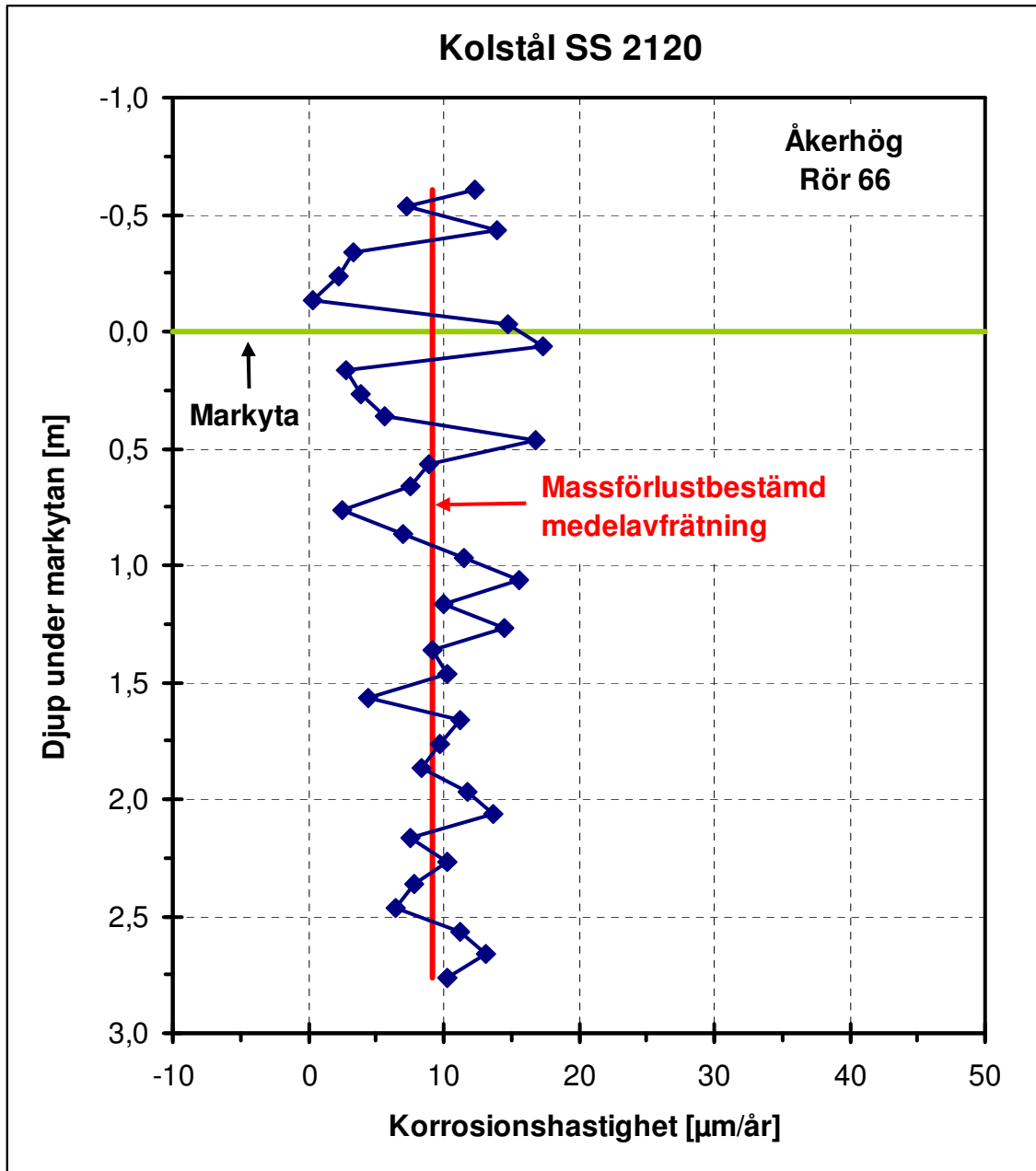
Vattenvolymetermätningarna på rör av kolstål SS 2120 (rör 71) från Närefors visade att den största korrosionen uppkommit mellan 0 och 1,5 m djup under markytan där den var mellan 11 och 12  $\mu\text{m}/\text{år}$ . I övrigt låg korrosionshastigheten nära den massförlustbestämda medelavfrätningen på 4,4  $\mu\text{m}/\text{år}$ . På den långa delen av röret över markytan låg korrosionshastigheten mellan 0,5 och 5,4  $\mu\text{m}/\text{år}$ . Några negativa värden har inte uppmätts.



**Figur 6.8.** Uppmätt korrosionshastighet på olika djup för kolstål SS 2120 (rör 71) från Närefors nära Lidköping. Korrosionshastigheter från vattenvolymetermätningarna jämförs med den massförlustbestämda medelavfrätningen.

### 6.4.1.3 Åkerhög

Vattenvolymetermätningarna på rör av kolstål SS 2120 (rör 66) från Åkerhög visade att korrosionen också här var störst mellan 0 och 1,0 m under markytan. Den största korrosionshastigheten nära markytan var cirka 17  $\mu\text{m}/\text{år}$ . I övrigt var korrosionshastigheten väl samlad runt den massförlustbestämda medelavfrätningen 9,2  $\mu\text{m}/\text{år}$ . Över markytan varierade korrosionshastigheten mellan nära 0 och cirka 14  $\mu\text{m}/\text{år}$ . Några negativa värden uppmättes ej.

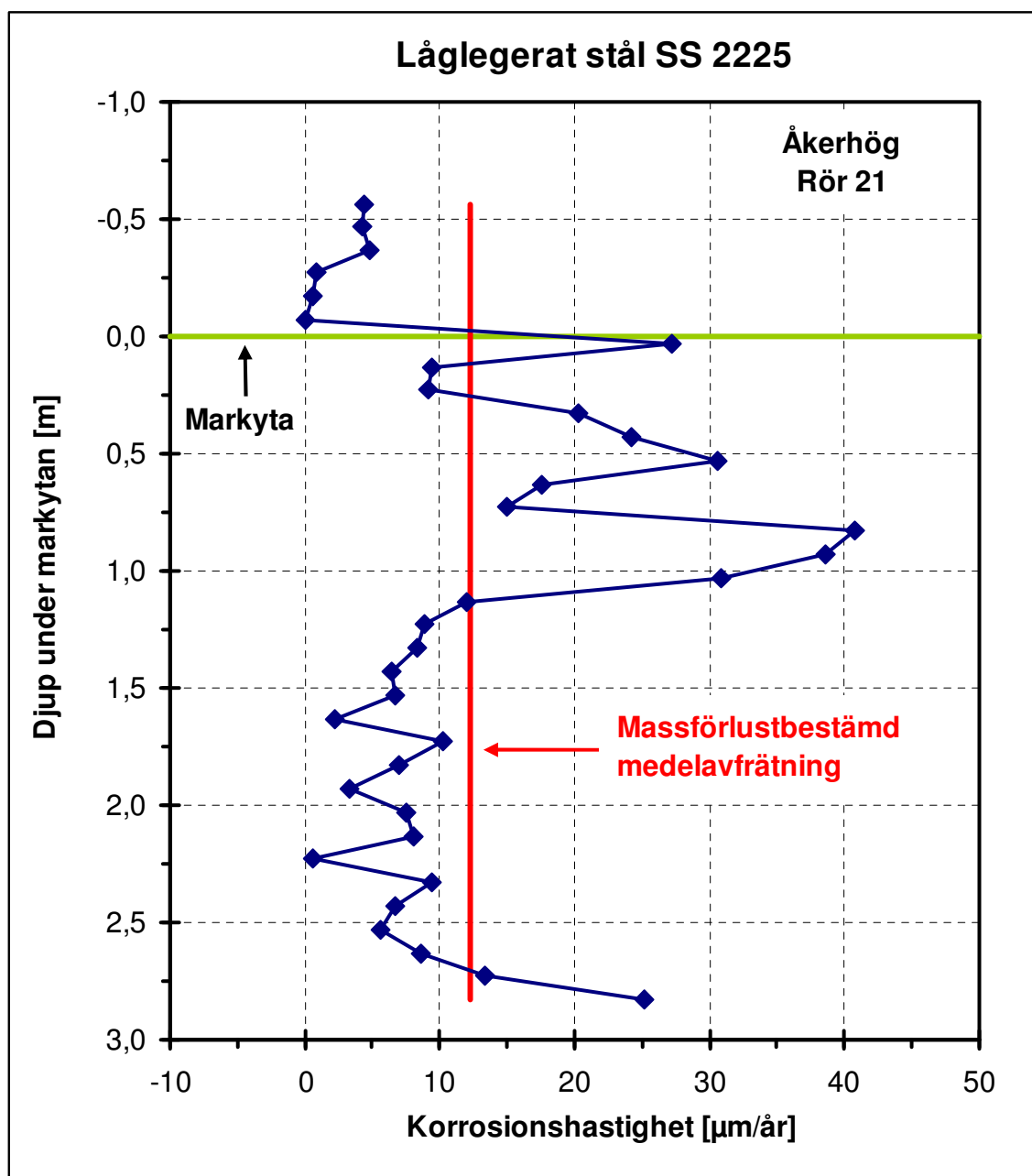


**Figur 6.9.** Uppmätt korrosionshastighet på olika djup för kolstål SS 2120 (rör 66) från Åkerhög nära Kungälv. Korrosionshastigheter från vattenvolymetermätningarna jämförs med den massförlustbestämda medelavfrätningen.

## 6.4.2 Låglegerat stål exponerat vid Åkerhög

### 6.4.2.1 Låglegerat stål SS 2225

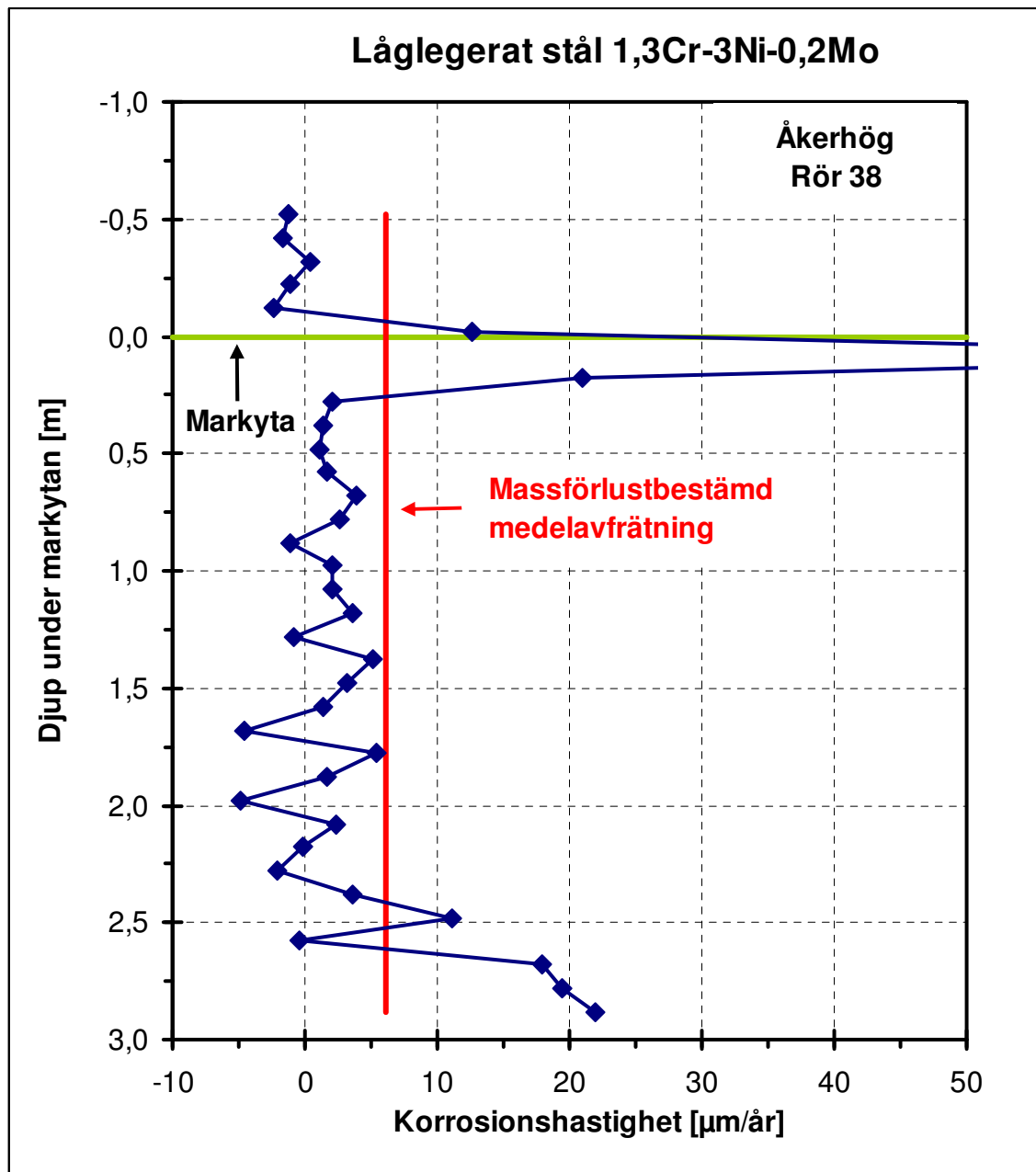
Vattenvolymetermätningarna på rör av låglegerat stål SS 2225 (rör 21) visade att korrosionen här uppkom i huvudsak mellan 0 och 1,0 m djup under markytan samt vid rörets spets. Den största korrosionshastigheten var nära  $41 \mu\text{m}/\text{år}$  cirka 0,8 m under markytan, vilket resulterade i en viss midjebildning. I nedre änden var korrosionshastigheten cirka  $25 \mu\text{m}/\text{år}$ . I övrigt var korrosionshastigheten mindre än den massförlustbestämda medelavfrätningen  $12,2 \mu\text{m}/\text{år}$  och varierade mellan noll och den massförlustbestämda medelavfrätningen. Över markytan var korrosionshastigheten ungefär noll eller några få  $\mu\text{m}/\text{år}$ . Några negativa värden har ej uppmätts.



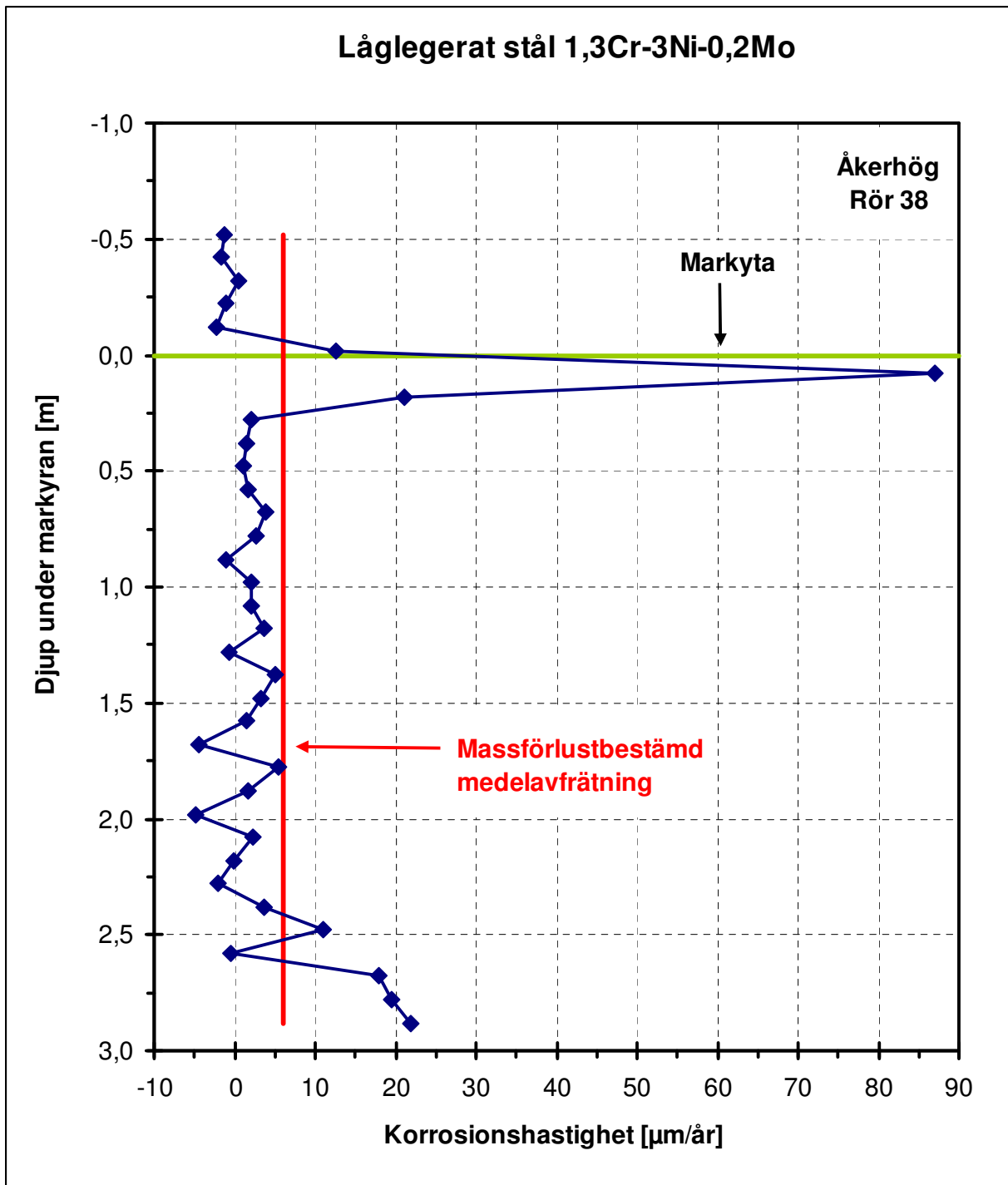
**Figur 6.10.** Uppmätt korrosionshastighet på olika djup för låglegerat stål SS 2225 (rör 21) från Åkerhög nära Kungälv. Korrosionshastigheter från vattenvolymetermätningarna jämförs med den massförlustbestämda medelavfrätningen.

### 6.4.2.2 Låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo

Vattenvolymetermätningarna på rör av låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo (rör 38) visade att korrosionen i huvudsak var begränsad till cirka 0,2 m djup närmast under markytan och till de djupast liggande 0,4 m av röret. Den största korrosionshastigheten var  $87 \mu\text{m}/\text{år}$  något under markytan och resulterade i en tydlig midjebildning på röret. I den nedre änden var korrosionshastigheten nära  $22 \mu\text{m}/\text{år}$ . I övrigt var korrosionen mindre än den massförlustbestämda medelavfrätningen  $6,1 \mu\text{m}/\text{år}$  och den var i huvudsak jämnt fördelad längs röret under markytan, medan den bedömdes vara nära noll över markytan. Beräkningarna gav också ett antal negativa korrosionshastigheter, vilket antas bero på att erforderliga korrigeringar ej kunnat göras fullt ut.



Figur 6.11. Uppmätt korrosionshastighet på olika djup) för låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo (rör 38) från Åkerhög nära Kungälv. Korrosionshastigheter från vattenvolymetermätningarna jämförs med den massförlustbestämda medelavfrätningen.



**Figur 6.12.** Uppmätt korrosionshastighet på olika djup) för låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo (rör 38) från Åkerhög nära Kungälv. Korrosionshastigheter från vattenvolymetermätningarna jämförs med den massförlustbestämda medelavfrätningen. Ändrad skala jämfört med **Figur 6.11**.

## 6.5 Statistiska parametrar för korrosionshastighet

I den sammanställning, som tidigare utförts av Bengtsson med flera [21], över korrosionens fördelning för olika typjordar på de av SJ tidigare utförda korrosionsundersökningarna på neddrivna stålstänger i jord [22] anges de statistiska parametrarna för korrosionshastigheten.

Eftersom korrosionens fördelning längs de rör, som här undersökts delvis visat sig vara mycket ojämn är det av intresse att också i detta fall använda de statistiska parametrarna för den uppmätta korrosionen längs rören baserat på mätningarna med vattenvolymetern. I nämnda rapport [21] har man angivit 95 %-fraktilen som det karakteristiska värdet på korrosionshastigheten. I **Tabell 6.2** nedan anges de statistiska parametrarna för de olika rören och provningsplatserna.

**Tabell 6.2.** Statistiska parametrar för korrosionshastighet för olika stålrör vid olika provningsplatser. Korrosionshastigheterna, uppmätt med vattenvolymetermetoden, avser korrosion på både in- och utsidan på rörsträckor om 100 mm. Exponeringstiden var 24,9 år.

Stålsort Standard Stålbeteckning	Prov- nings- plats	Rör  nr	Antal mät- vär- den	Korrosionshastighet  µm/år							
				Mins- ta värde	Nedre kvartil	Medi- an- värde	Övre kvartil	95 %- frakti- len	Störs- ta värde	Me- del- värde	Stan- dard- avvi- kelse
Kolstål SS 2120  <b>Sandvik 9LM</b>	Nyhem	76	34 30 <sup>a</sup>	< 0 0,7	1,4 1,9	3,0 3,1	4,3 4,6	7,8 8,0	26,6 26,6	3,6 4,1	4,6 4,6
	Närefors	71	34	0,5	2,2	3,4	5,7	11,2	12,2	4,4	2,9
	Åkerhög	66	35	0,4	6,8	9,7	12,1	15,9	17,4	9,2	4,3
Låglegerat stål SS 2225  <b>Sandvik 5C2Mo</b>	Åkerhög	21	35	0,1	5,2	8,6	16,3	33,2	40,7	12,2	10,7
Låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo  <b>Sandvik 4N3C2Mo</b> Ej standardiserat	Åkerhög	38	35 24 <sup>b</sup>	< 0 0,5	< 0 2,0	2,2 3,4	4,5 11,4	21,3 21,8	87,0 87,0	6,1 9,8	15,5 17,5

- a) Avser mätvärden som är större än noll. Fyra mätvärden med korrosionshastighet mindre än noll har tagits bort.
- b) Avser mätvärden som är större än noll. Elva mätvärden med korrosionshastighet mindre än noll har tagits bort.

För kolstålsrören (rör 76 från Nyhem, 71 från Närefors och 66 från Åkerhög) visade sammanställningen att de största värdena låg mellan 12 och 27 µm/år medan den karakteristiska korrosionshastigheten (95 %-fraktilen) låg mellan 8 och 16 µm/år.



Dessa värden kan jämföras med dem, som redovisas av Bengtsson med flera [21] där motsvarande karakteristiska korrosionshastigheter var mellan 11 och 12  $\mu\text{m}/\text{år}$  för neddrivna stänger, som exponerats helt i jord mer än 10 år. För kolstålsrören var således korrosionshastigheten i princip densamma, som tidigare uppmätts i SJs undersökningar [22]. De karakteristiska korrosionshastigheterna var i SJs undersökningar oberoende av jordarten. För alla typjordarna, sandiga jordar, leriga jordar och jordar med organiskt material, var de karakteristiska korrosionshastigheterna mellan 11 och 12  $\mu\text{m}/\text{år}$  [21]

Det finns emellertid en påtaglig skillnad i exponeringssätt mellan undersökningarna. De så kallad Sandviksrören utgjordes av vertikala rör med en del av röret över markytan. En del av röret exponerades alltså i luften. I SJs undersökning [22] exponerades vertikala stänger helt neddrivna i jord. Ingen del av stängerna exponerades således över markytan.

Sammanställningen visade att det var stor spridning i värdena på uppmätt korrosionshastighet från cirka 0 till 87  $\mu\text{m}/\text{år}$ . De högsta värdena har uppmätts på de låglegerade stålen från Åkerhög, låglegerat stål SS 2225 (rör 21) och låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo (rör 38), där man ju också fått tydliga midjebildningar på rören. Den stora variationen i korrosionshastighet på dessa rör framgår också av den höga standardavvikelsen i mätresultaten från dessa.

De redovisade korrosionshastigheterna kan också jämföras med den dimensionerande rostmånen enligt Pålkommisionens Rapport 98 [2] och svensk standard SS-EN 1993-5:2007 [19] för dimensionering av stålplåtar. Enligt Rapport 98 [2] bedöms den dimensionerande rostmånen för 100 år vid Åkerhög och Närefors vara 3 mm över grundvattenytan och 2 mm under grundvattenytan medan den skulle bli 4 respektive 3 mm vid Nyhem på grund av gyttejinnerhållet. Detta motsvarar en dimensionerande korrosionshastighet på 20 – 40  $\mu\text{m}/\text{år}$ .

Från 95 %-fraktilen för kolstålen i **Tabell 6.2** kan dimensionerande korrosionshastigheter bestämmas genom multiplikation av karakteristiska korrosionshastigheter med faktorn 1,5 till mellan 12 och 24  $\mu\text{m}/\text{år}$ . Dessa värden ligger inom angivna gränser för dimensionerande korrosionshastigheter enligt Rapport 98 [2]. För de låglegerade stålen blir den dimensionerande korrosionshastigheten mellan 32 och 50  $\mu\text{m}/\text{år}$ , vilket är för lågt jämfört med värden i Rapport 98.

Enligt svensk standard SS-EN 1993-5:2007 [20] är den dimensionerande korrosionshastigheten i naturlig jord endast 12  $\mu\text{m}/\text{år}$ , vilket inte är tillräckligt för kolstålen och speciellt inte för de låglegerade stålen.

Det måste påpekas att rostmånerna i Pålkommisionens Rapport 98 [2] och i svensk standard SS-EN 1993-5:2007 [20] avser stålplåtar helt neddrivna i jord och med ingen del av plåten över markytan.

## 7. Tidigare undersökningar av korrosionen på stolpar

### 7.1 Kraftledningsstolpar

För vertikala bärande konstruktioner är vid korrosionsbedömning den maximala genomsnittliga korrosionshastigheten i ett visst tvärsnitt utslagsgivande [23, 24].

Vid undersökningar vid Vattenfall av Troselius [23, 24] har det framkommit att grundvattenytans läge har stor betydelse för korrosionsangreppets lokalisering på vertikala konstruktioner som stolpar och förankringsanordningar till stolpar. Här avses konstruktioner med en del i jord under markytan och en del i luften över markytan.

En utpräglad korrosionszon uppkommer där stängerna passerar grundvattenytan – detta gäller för stänger av såväl kolstål som av varmförzinkat kolstål. Om grundvattenytan ligger konstant nära markytan, det vill säga i "markbandet" (de översta decimetrarna av jordprofilen) erhålls en skarp korrosionszon. Om däremot grundvattenytan varierar under årets lopp sprids korrosionsangreppet ut över en bredare korrosionszon. Det minsta angreppet erhålls om grundvattenytan hela året ligger under konstruktionen.

Troselius [24] anger följande korrosionshastigheter för kolstål i morän och torv. Korrosionshastigheten avser maximal genomsnittlig korrosionshastighet i korrosionszonen, se **Tabell 7.1**.

**Tabell 7.1.** Korrosionshastigheter för kolstål och zinksiktet på varmförzinkat stål för vertikalt placerade konstruktioner i sandig morän och torv. Data från Troselius [24].

Grundvattenytans läge	Korrosionshastighet			
	µm/år			
	Kolstål		Zinksikt	
	Morän	Torv	Morän	Torv
I "markbandet"	15	40	10	15
Varierande grundvattenyta	10	30	5	8
Under konstruktionen	5	–	1	–

Korrosionsangreppen, enligt Troselius [24], på vertikala konstruktioner med en del i jord under markytan och en del i luften över markytan orsakas i huvudsak av makroluftningsceller. Med grundvattenytan tämligen konstant i markbandet erhålls en distinkt korrosionszon orsakad av en kraftig makroluftningscell. Om däremot grundvattenytan varierar under årets lopp uppkommer inte en lika distinkt zon som i fallet med grundvattenytan nära markytan och korrosionsangreppet sprids ut över en bredare korrosionszon. Om, slutligen, grundvattenytan hela året ligger under konstruktionen befinner sig hela konstruktionen i tämligen vällyftad jord och inga makroluftningsceller uppstår.

I torv med mycket hög vattenkvot erhålls mera distinkta förhållanden, som gynnar bildningen av makroluftningsceller på den vertikala konstruktionen, än i sandig morän.

## 7.2 Belysningsstolpar

### 7.2.1 Inventering

En inventering av korrosionsstatus på belysningsstolpar utfördes under 1985 – 87 av Korrosionsinstitutet, Foghelin & Johnsson [25, 26].

Vid inventeringen framkom att förzinkade stolpar direkt nedgrävda i jord uppvisade de allvarligaste angreppen i anslutning till markytan [25]. Fördelning av korrosionsangreppen kan vara något olika. Angreppen kan börja i markbandet och sluta någon decimeter nedanför eller fortsätta ända ned till fundamentet. Angreppen kan också börja lite under markytan, kanske 5 cm, och sträcka sig några decimeter ned [26].

Ett vanligt fall är att korrosionsangreppen i eller i närheten av markytan är omfattande medan en zon därunder uppvisar mindre allvarliga angrepp. Risken för allvarliga korrosionsangrepp på förzinkade stolpar i jord är stor redan efter 10 – 15 år och värst är det i markbandet [26].

På målade stålstolpar förekommer det nästan alltid allvarliga och omfattande korrosionsangrepp i ett område från cirka 0,5 m över markytan till cirka 0,3 m under markytan. Angreppen är ofta koncentrerade till ett mindre område vid själva markytan [26]. I allmänhet är färgsiktet skadat och helt eller delvis borta i markbandet och under jord [26].

Av inventeringar framgår tydligt att de värsta korrosionsangreppen på belysningsstolpar uppkommer i anslutning till markytan.

I en skrift med den fyndiga titeln Stolpe slut, Planering och metoder för friska stolpar [27] beskrivs korrosion och korrosionsskydd av belysningsstolpar på ett lättillgängligt och trevligt sätt.

### 7.2.2 Exponering

Vid kartläggningen av korrosionsstatus hos belysningsstolpar konstaterades det att de helt dominerande korrosionsangreppen uppstod i markbandet på stolpar nedgrävda i jord och vid gummiringens anslutningsyta på förzinkade stolpar i fundament [28]. Därför beslutades att påbörja en fältexponering med målsättning att prova olika korrosionsskydd på stolpar främst i anslutning till markytan.

Under 1990 – 2003 pågick en mycket omfattande fältexponering av rostskyddssystem för belysningsstolpar vid Korrosionsinstitutet. Fältexponeringen i jord inleddes 1990 på provningsplatsen Stockholm.

Undersökningen leddes av framlidne Torsten Johnsson. Resultat från upp till fem års exponering har publicerats i KI Rapport 1998:7 [28]. Det finns också en förkortad upplaga av undersökningen med resultat från upp till fem års exponering, KI Rapport 1998:8 [29]. Resultat från två års fältexponeringar presenterades vid en konferens anordnad av Korrosionsinstitutet 1993 [30]. Det sista intaget av stolpar gjordes på senhösten 2002 med Märit Forssander som ansvarig för projektet [31].

Totalt ingick 52 rostskyddssystem i undersökningen, 40 system sattes ut 1990 och 12 system 1993. De olika rostskyddssystemen indelades i sju kategorier:

- Varmförzinkade stolpar direkt nedgrävda i jord (4 system 1990, 1 system 1993)
- Varmförzinkade stolpar ingjutna i betong (2 system 1990)
- Varmförzinkade stolpar i fundament med tättningsring (3 system 1990)
- Varmförzinkade stolpar med offeranoder monterade på stolparna (2 system 1990)
- Ytbehandlade nya stolpar (16 system 1990, 4 system 1993)
- Ytbehandlade gamla stolpar (11 system 1990)
- Stolpar i nya material (2 system 1990, 7 system 1993).

Stolparna exponerades på provningsplatsen Stockholm, som är belägen vid Skå på Färingsö (7 km NV Ekerö centrum, 20 km NV Stockholms centrum), Ekerö kommun, Uppland. Jordarten på provningsplatsen är gyttjig lera och den postglaciala gyttjiga leran har avsatts i bräckt vatten (brackvattenssediment).

I kategorin Ytbehandlade nya stolpar som sattes ut 1990 provades 16 beläggningssystem. Varmförzinkade kolstålsstolpar belades med 16 olika rostskyddssystem. Stolparna med yttre diameter 108 mm och godstjocklek 3,6 mm var 1 m långa. Zinksiktets nominella medelskiktjocklek var 85 µm. Mitt på stolpens längd försågs stolparna med en vertikal rits, 200 mm lång och 2 mm bred, ned till kolstålet. Ritsen genom beläggningen simulerade en beläggningsskada.

Stolparna placerades ut stående med en del, 0,5 m, nedgrävd och en del, 0,5 m, stående i atmosfären. Stolparna placerades så att mitten på den 200 mm långa ritsen hamnade i markytan. Av varje rostskyddssystem placerades totalt 9 stolpar ut (trippelprov för tre olika intag).

För att efterlikna förhållandena kring vägar och för att öka korrosiviteten i jorden omkring stolparna utfördes saltning kring stolparna. Vid varje saltningstillfälle spreds 100 g NaCl runt varje stolpe [28].

Utvärderingen av stolparna har skett genom okulär besiktning sedan stolparna rengjorts noggrant. Vid utvärderingarna har olika områden noga särskilts [28]:

- Över jord
- I och kring markbandet
- Vid ritsen
- Under jord
- Vid roten
- På speciella ställen, till exempel innanför låskilar för fundament.

I rapporterna [28, 29, 30, 31] redovisades iakttagelser för varje rostskyddssystem och redovisningarna slutar med ett samlat omdöme avseende prognos för 50 års teknisk livslängd. Prognosen görs i en tregradig skala:

- Bra
- Tvivelaktig
- Dålig.

Stolpar direkt nedgrävda i jord med enbart varmförzinkning, både rör av otätat stål med nominell medelskiktjocklek 85 µm på zinksiktet och rör av kiseltätat stål med nominell medelskiktjocklek 200 µm på zinksiktet, som korrosionsskydd fick prognosen Dålig [28, 29]. De varmförzinkade stolparna hade fläckvis kraftiga angrepp på zinksiktet från markytan och ned till roten på stolpen. Ett tydligt maximum på avfrätningen av zinksiktet var i markbandet [30, 31].

I **Tabell 7.2** visas prognosen för samtliga 16 rostskyddssystem efter fem års exponering [28, 29]. Det var endast tre system, Levasint, Duamastic och Procoat, som fått prognosen Bra. Fem system fick prognosen Tvivelaktig och hela åtta system fick prognosen Dålig, däribland flera epoxisystem.

Vid intaget av stolpar efter 11,5 års exponering 1992 fick alla 16 rostskyddssystem i **Tabell 7.2** prognosen Dålig [31]. Vid detta intag hade flertalet beläggningssystem fått blåsbildning under markytan i jorden, ofta i anslutning till ritsen [31]. Också stolpar direkt nedgrävda i jord med enbart varmförzinkning som korrosionsskydd fick prognosen Dålig [31].

Att alla beläggningssystem blev underkända efter 11,5 års exponering visar tydligt på svårigheterna att belägga eller rostskyddsmåla varmförzinkat stål.

**Tabell 7.2.** Prognos för 50 års teknisk livslängd för 16 olika rostskyddssystem på varmförzinkade kolstålstolpar efter 5 års exponering delvis i gytjig lera, delvis i atmosfären [28, 29].

Prognos	Skyddsmetod	Produktnamn	Företag
<b>Bra</b>	EVAl pulverbeläggning	Levasint	Bayer
	Målning med aluminiumepoxiuretan	Duamastic	Nordsjö AB
	Sprutad gummibeläggning	Procoat	Procoat Innovation AB
<b>Tvivelaktig</b>	Beläggning med termoplast av polyamidtyp	Rilsan	Plastråvaror AB
	Målning med aluminiumepoxi	Reapox	Dikursby Färg AB
	Målning med epoxi/polyuretan	Penguard/Hard Top AS	Jotun Sverige AB
	Tejpning		AB Karnag
	Krympslang		Nitto Scandinavia AB
<b>Dålig</b>	Pulvermålning, pulvereoxi	Interpon	International Färg AB
	Pulvermålning, pulvereoxi	Interpon med zinkfosfatering	International Färg AB
	Polyester pulverbeläggning		Ørsta Stålindustri
	Epoxi pulverbeläggning		Ørsta Stålindustri
	Målning med epoxi/polyuretan	Penguard/Hard Top HB	Jotun Sverige AB
	Målning med vattenburen akrylat	Hemucryl	Hempel Färg AB
	Målning med järnglimmerpigmenterad epoxi	Intergard Mastic	International Färg AB
	Målning med järnglimmer epoxi	Hempadur	Hempel Färg AB

### 7.3 Sammanfattning av undersökningar av korrosion på stolpar

Från undersökningarna av belysningsstolpar och exponerade rör med halva röret över markytan framkom att de värsta korrosionsangreppen uppstår under jord i anslutning till markytan. För stolpar med en del av stolpen över markytan måste man alltså räkna med kraftiga korrosionsangrepp i markbandet.

Undersökningarna av Troselius [23, 24] visade att grundvattenytans läge har mycket stor betydelse för korrosionsangreppets lokalisering på vertikala konstruktioner med en del i jord under markytan och en del i luft över markytan som för stolpar och förankringsanordningar till stolpar. Korrosionsangreppen orsakas i huvudsak av makroluftningsceller. I **Figur 7.1** visas korrosiviteten på vertikala konstruktioner i förhållande till olika typfall för grundvattenytans läge.

Undersökningarna av varmförzinkade rör med och utan beläggning stående i jord med halva röret över markytan visade med all tydlighet på svårigheterna att korrosionsskydda stolpar. I en aggressiv jord som gytjig lera är det inte tillräckligt med enbart varmförzinkning som korrosionsskydd. Inte ens ett tjockt zinkskikt med nominell medelskiktjocklek 200 µm på zinkskiktet på kiseltätat stål bedöms få en teknisk livslängd på 50 år [28, 31]. Korrosionshårdigheten hos zinkskiktet på en stolpe av varmförzinkat stål beror förutom av grundvattenytans läge också bland annat av jordarten.

Efter att alla 16 beläggningssystemen i undersökningen [31] blivit underkända måste man ställa frågan hur skall man ordna ett förstärkt korrosionsskydd på en stål stolpe.

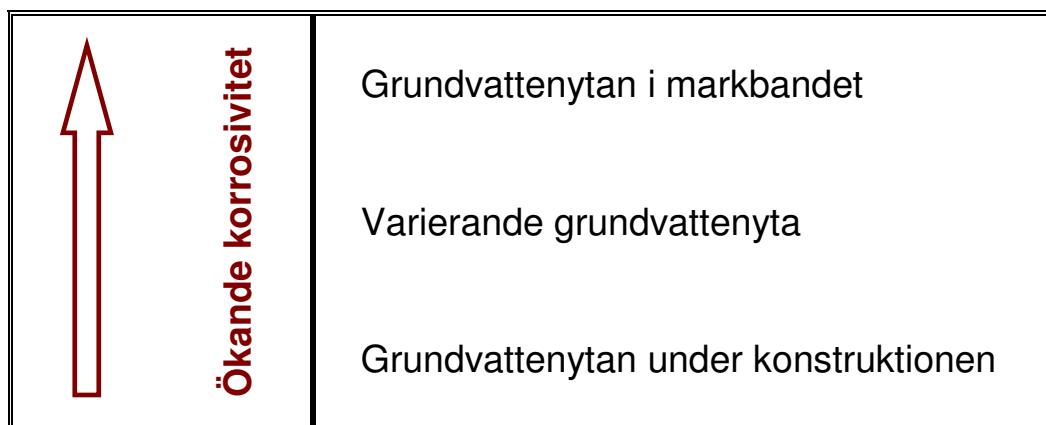
Det torde krävas fortsatta undersökningar för att finna lämpliga rostskyddssystem på varmförzinkat stål. För det bästa korrosionsskyddet på stolpar i jord, särskilt då i anslutning till markytan, vore onekligen en kombination av organisk beläggning, varmförzinkning och rostmån på stålet. Varmförzinkning med ett tjockt zinksikt är ett lämpligt korrosionsskydd på stolpens del i luft.

För att erhålla en mycket lång livslängd på stolpens del i jord är det troligen nödvändigt att ha en viss rostmån på det underliggande stålet.

Alternativa korrosionsskydd som kan diskuteras är:

- Varmförzinkning av stolpen och rostmån på stålet
- Korrosionsskyddande beläggning direkt på stålet och rostmån på stålet.

Rostmån på konstruktioner avfärdas ibland, på felaktig grund, som ett icke tillförlitligt sätt att ta hänsyn till korrosionen. Effektiviteten och livslängden hos olika system för rostskyddsmålning brukar däremot understundom överskattas.



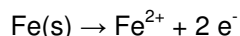
**Figur 7.1.** Korrosivitetens beroende av grundvattenytans läge mot vertikala konstruktioner. Här avses stålkonstruktioner som går från luft vertikalt ned i jorden, såsom stolpar och förankringsanordningar till stolpar.

## 8. Diskussion

### 8.1 Inverkande faktorer vid korrosion i jord

#### 8.1.1 Syretillförsel genom jorden

Korrosionsprocessen kan uppdelas i anod- respektive katodreaktioner. Vid korrosion av kolstål och låglegerat stål innebär anodreaktionen oxidation och upplösning av järn, Fe, till järn(II)joner,  $\text{Fe}^{2+}$ , under avgivning av elektroner  $e^-$  enligt:



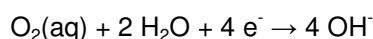
Vid god syretillförsel kan  $\text{Fe}^{2+}$  joner oxideras och bilda "rödrost" som korrosionsprodukt på metallytan. Rödrosten består av järnoxidhydroxid FeOOH i form av goethit  $\alpha\text{-FeOOH}$  och lepidokrokit  $\gamma\text{-FeOOH}$ . Vid reaktionen bildas också vätejoner,  $\text{H}^+$ . Reaktionen kan skrivas:



Vid sämre syretillförsel bildas "svartrost" som korrosionsprodukt på metallytan. Svartrosten består av järn(II,III)oxid i form av magnetit  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Reaktionen kan skrivas:



Katodreaktionen vid korrosionsprocessen består till övervägande del av syrgasreduktion. Vid syrgasreduktionen reduceras löst syrgas i jordvattnet,  $\text{O}_2(\text{aq})$ , till hydroxidjoner,  $\text{OH}^-$ , under upptagning av elektroner  $e^-$  enligt:



Syrgasen fungerar som "bränsle" för korrosionsprocessen. Själva syrgasreduktionen är beroende av transporthastigheten av syrgas genom jorden fram till metallytan. I det totala reaktionsförloppet kan olika delsteg urskiljas:

- Transport av syrgas genom jorden fram till konstruktionen
- Transport av syrgas genom "rostpansaret" på metallytan
- Adsorption av syremolekyler på metallytan
- Laddningsöverföring.

Syrgas kan transporteras i jord genom diffusion på grund av koncentrationsskillnader och strömning (konvektion). Både diffusionen och strömningen kan ske i vätskefas (porvatten i jorden) och i gasfas (porgas i jorden). Syretransporten genom strömning kan alltså indelas i luftströmning och vattenströmning.

Diffusion är den viktigaste transportmekanismen. Diffusion i gasfas dominerar över syretransport via luftströmning. Diffusionskoefficienten för syrgas är fyra tiopotenser lägre i vatten än i luft. Man kan härvid konstatera att diffusionen blir mycket snabbare i luft än i vatten och alltså är diffusionen mycket beroende av vattenmättnadsgraden hos jorden.

Korrosionshastigheten begränsas ofta antingen av korrosionsprocessens katodiska delprocess eller anodiska delprocess. Om den katodiska delprocessen begränsar korrosionshastigheten brukar man tala om katodisk reglering och om den anodiska delprocessen begränsar korrosionshastigheten råder anodisk reglering. Om graden av katodisk reglering är ungefär lika stor som graden av anodisk reglering råder blandad reglering.

Enligt Tomashov [32] är korrosionen till helt övervägande del katodiskt reglerad (graden av katodisk reglering är mycket större än graden av anodisk reglering) i de allra flesta jordar med undantag för mycket

torr jord, där graden av anodiska regleringen något överväger. I torra jordar råder därför närmast blandad reglering.

Det finns ytterligare en form av korrosionsreglering nämligen resistiv reglering. Resistiv reglering kan inträffa om elektrolytens (jordens eller vattnets) resistans eller en resistans på metallytan, från någon form av beläggning på metallytan, ger upphov till ett spänningsfall, som begränsar korrosionsströmmen i en galvanisk korrosionscell. Ett exempel på kombinerad katodisk och resistiv reglering av korrosionshastigheten uppkommer vid luftningsceller (makroluftningsceller) på en rörledning i jord, Tomashov [32].

Vattenhalten i jorden har en mycket stor inverkan på korrosionshastigheten hos kolstål. Vid laboratorieundersökningar i sand vid Korrosionsinstitutet av Sederholm, Svensson & Vinka [33], framkom att maximal jämn och lokal korrosionshastighet på provplåtar av kolstål uppstod vid en viss, för korrosionen, optimal vattenhalt på cirka 6 mass-% (som motsvaras av vattenkvoten 6,4 mass-%, den volymbaserade vattenhalten 10 vol-% och vattenmättnadsgraden 27 vol-%).

Vid högre och lägre vattenhalt än 6 mass-% minskade både den jämna korrosionen och den lokala korrosionen. Från laboratieförsöken att döma blir korrosionen successivt mer katodiskt reglerad från vattenmättnadsgraden 27 vol-% till vattenmättnad av jorden. Korrosionshastigheten blir vid katodisk reglering begränsad av transporthastigheten för syrgas genom jorden fram till metallytan.

Korrosionens beroende av vattenhalten kan sammanfattas enligt följande:

Hög vattenhalt	*	Låg jämn korrosion
	*	Låg lokal korrosionshastighet och nästan helt utan gropfrätning
Vattenhalt cirka 6 mass-%	*	Mycket hög jämn korrosion
	*	Mycket kraftig gropfrätning
Låg vattenhalt	*	Måttlig jämn korrosion
Vattenhalt < 6 mass-%	*	Påtaglig gropfrätning

De erhållna resultaten överensstämmer helt med förnyade laboratorieundersökningar av korrosionen på kolstål i sand av Vinka, Camitz & Linder [34].

Korrosionen hos kolstål har undersökts i fyllningsjord i stadsmiljö i Göteborg i ett samarbetsprojekt mellan Geologiska institutionen, Chalmers tekniska högskola och Korrosionsinstitutet [7, 8]. I projektet mättes regelbundet en gång i veckan på tre olika djup jordens vattenhalt med tensiometrar samt korrosionshastigheter hos kolstål dels som momentan korrosionshastighet med linjär polarisationsteknik (LPR-sonder), dels som ackumulerad avfrätning med elektrisk resistansteknik (ER-sonder). Vid dessa mätningar upptäcktes årtidsberoende skillnader i korrosionshastighet. Högst korrosionshastighet mättes under sommarmånaderna med lägst vattenhalt. Perioder med mycket hög korrosionshastighet under sommarmånaderna har till stor del kunnat sättas i samband med mycket kraftiga regn.

## 8.1.2 Luftningsceller i jorden

En luftningscell är en koncentrationscell inom den större gruppen galvaniska celler. Koncentrationscellen skapas av olika halt löst syrgas,  $O_2(aq)$ , på metallytan. Delar av metallytan med hög syrgashalt (god luftning) blir katod i luftningscellen och skyddas mot korrosion medan delar med låg syrgashalt (dålig luftning) blir anod i luftningscellen och angrips av korrosion.

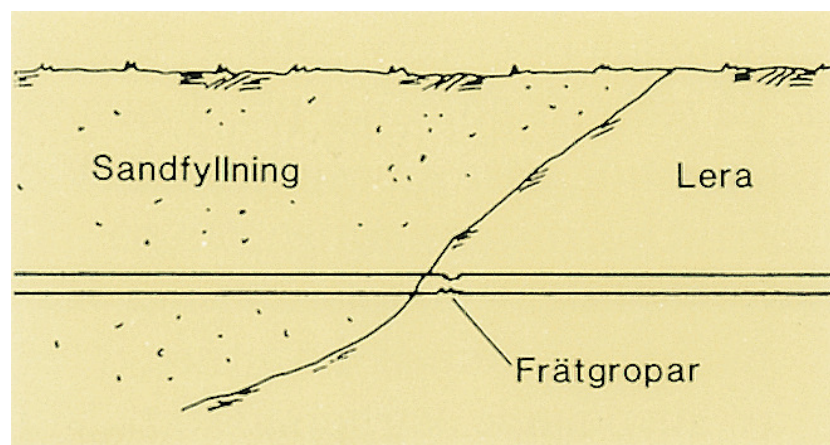
Tomashov [32] skiljer på två huvudtyper av luftningsceller; makro- och miniluftningsceller. Mikroluftningsceller är som namnet antyder mycket små luftningsceller. För små föremål till exempel provplåtar kan det enligt Tomashov [32] uppstå dels små (korta) makroluftningsceller orsakade av lokala heterogeniteter i jordmiljön och dels mikroluftningsceller.



Makroluftningsceller kan orsakas av [32]:

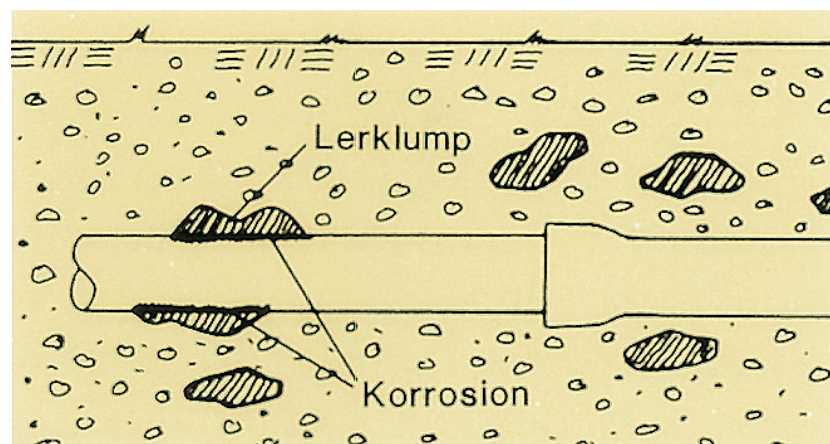
- Olika syretillförsel till olika delar av jorden. En sådan makroluftningscell kan uppstå på långsträckta konstruktioner, till exempel en rörledning med skador i skyddsbeläggningen, **Figur 8.1**.
- Lokala variationer i syretillförsel. Denna typ av makroluftningscell kan till exempel uppstå om en lerklump ligger an mot en vattenledning och röret i övrigt ligger i sandfyllning; **Figur 8.2**.
- Att konstruktionen befinner sig på olika djup. Denna typ av makroluftningscell uppstår i första hand på vertikala konstruktioner som stolpar och förankringsanordningar till stolpar, men kan också uppstå på långsträckta horisontella konstruktioner som rörledningar, **Figur 8.3**.

På en långsträckt rörledning som korsar två eller jordarter kan en luftningscell uppkomma. I luftningscellen är anoden lokaliserad till ett område med dålig luftning i lera och katoden är lokaliserad till området med sandfyllning där luftningen är bättre, **Figur 8.1**.



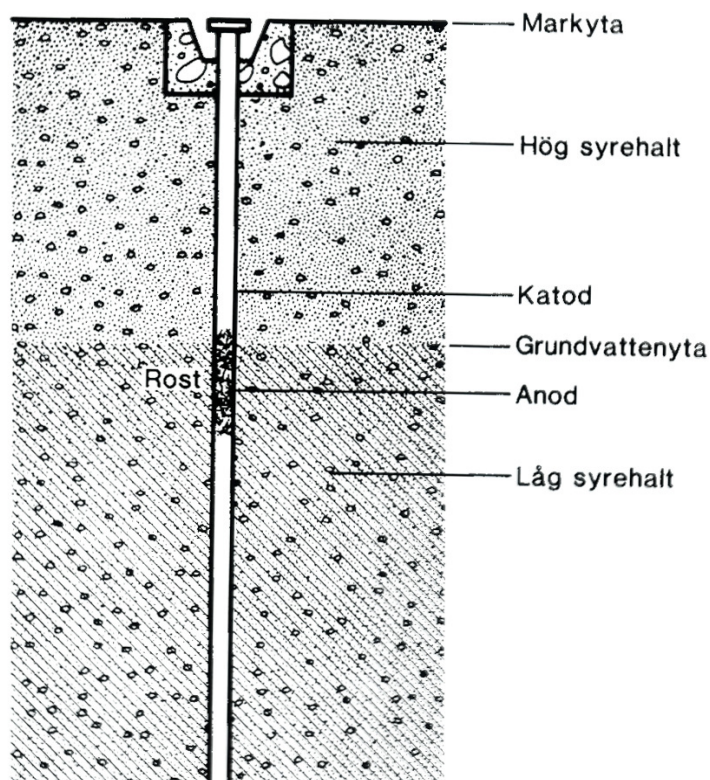
**Figur 8.1.** Korrosionsangrepp, orsakad av en makroluftningscell, på ställedning vid gränsen mellan lera och sandfyllning.

Luftningsceller kan också bildas då konstruktionen omges med blandad jord som innehåller till exempel lerklumpar, **Figur 8.2**. Det bildas då anodiska områden med dålig luftning, som resulterar i frätgropar, under lerklumpar som ligger an mot konstruktionen. Det katodiska området på konstruktionen är lokaliserat till området med sandfyllning.



**Figur 8.2.** Korrosionsangrepp, orsakad av en kort makroluftningscell, på gjutjärnsledning (gråjärn eller segjärn) under lerklumpar i sandfyllningen.

Luftningsceller kan också uppkomma på en vertikal konstruktion i jord som sträcker sig genom grundvattenytan, **Figur 8.3**.



**Figur 8.3.** Korrosionsangrepp, orsakad av en makroluftningscell, på en stålpåle i jord under grundvattenytan.

Makroluftningsceller påverkas av syretransporten genom jorden fram till katoden, areaförhållandet mellan anod och katod i korrosionscellen och jordens resistivitet, som påverkar resistansen i korrosionscellen [32, 33]. Tomashov [31] uppger att jordens resistivitet har liten inverkan på korrosionen orsakad av mikroluftningsceller och av korta makroluftningsceller. Störst inverkan har resistiviteten på långa makroluftningsceller.

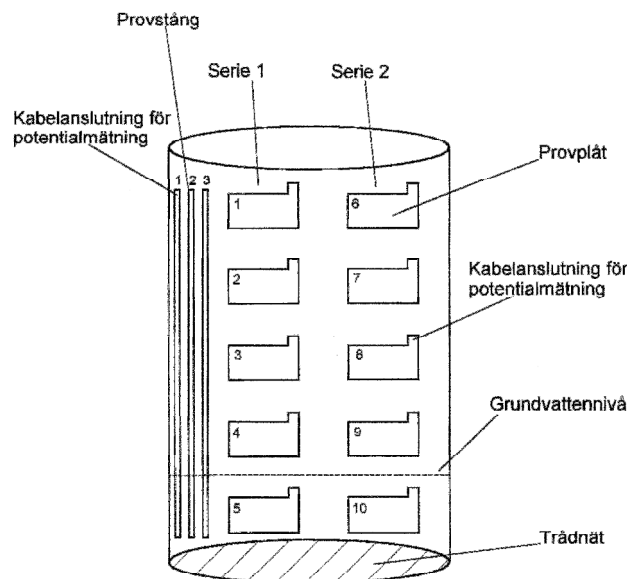
### 8.1.2.1 Laboratorieförsök med luftningsceller

Vid laboratorieförsök i sand med olika vattenhalt vid Korrosionsinstitutet [34] jämfördes korrosionen på okopplade provplåtar av kolstål med hopkopplade provplåtar av kolstål.

Provplåtar placerades på 5 olika nivåer (*nivå 1* till *5*) i provkärlet. *Nivå 1* fanns högst upp i kärlet och *nivå 5* längst ned i kärlet. Jorden på *nivå 5* var vattenmättad och vattenhalten minskade därefter successivt för provnivåer högre upp i kärlet. På *nivå 1* var jorden "torr" med mycket låg vattenhalt. Vid vattenmättnad var vattenhalten drygt 19 mass-% och vattenkvoten knappt 24 mass-%.

I försöket med okopplade provplåtar (försök 1) placerades i provkärlet 10 provplåtar samt 3 provstänger. Provplåtarna placerades i två parallella serier med 5 plåtar i varje (serie 1 och 2), där varje plåt var fristående från de övriga. Provstängerna placerades vertikalt i kärlet och var fristående från varandra. Avståndet mellan plåtarna i vertikal riktning var 35 mm och avståndet från botten var liksom för stängerna 20 mm. Avståndet från jordytan "markytan" till provplåtarnas övre kant var 50 mm och 20 mm till övre kanten på provstängerna. En schematisk bild av arrangemanget med provplåtar och provstänger visas i **Figur 8.4**.

## Provkärl med okopplade plåtar



**Figur 8.4.** Schematisk bild av försöksuppställning 1 (försök 1) med okopplade provplåtar och provstänger av kolstål vid laborieförsök i sand. Figur från Vinka, Camitz & Linder [34].

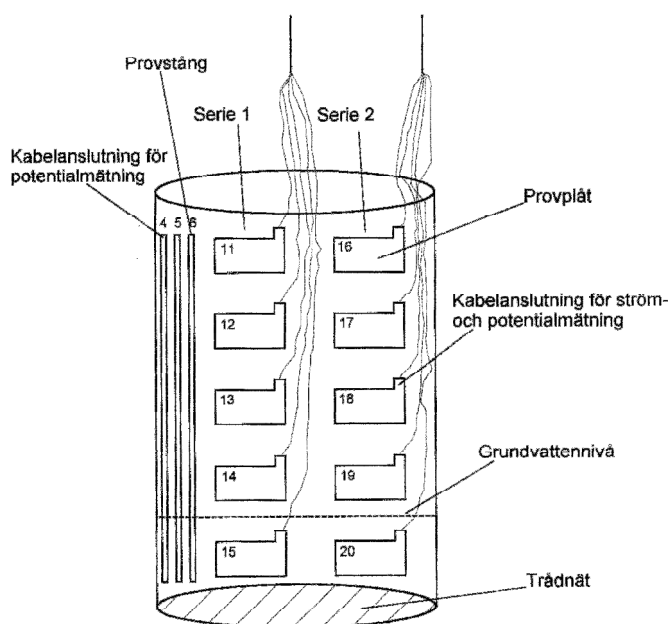
Försöket med kopplade provplåtar (försök 2) hade samma utformning som försök 1, med skillnaden att provplåtarna inom varje serie var hopkopplade för att korrosionsströmmarna skulle kunna flyta fritt mellan dem på samma sätt som genom en provstäng. De tre vertikala provstängerna var fristående och inte sammankopplade. En schematisk bild av arrangemanget med provplåtar och provstänger visas i **Figur 8.5**.

I **Figur 8.6** jämförs korrosionshastigheterna (massförlustbestämda medelavfrätningar) mellan okopplade och hopkopplade provplåtar av kolstål vid laborieförsöket. Undersökningen visade tydligt på effekten av luftningsceller på hopkopplade provplåtar.

Korrosionshastigheterna för hopkopplade provplåtar, som påverkades av luftningsceller; avvek markant från korrosionshastigheterna på icke hopkopplade provplåtar. Med de icke hopkopplade provplåtarna mättes korrosionshastigheterna på olika nivåer i sanden i vertikalled. De okopplade provplåtarna påverkades av jordens vattenhalt och syretillförseln.

Generellt kan sägas att det sker en utjämning mellan korrosionshastigheterna på provplåtarna vid hopkoppling. Det fanns ingen provplåt med mycket hög jämn korrosionshastighet som vid vattenhalten 7 mass-% (nivå 3) vid försök 1 med okopplade provplåtar. Det fanns heller ingen provplåt med låg jämn korrosionshastighet som i vattenmättad jord (nivå 5) vid försök 1 med okopplade provplåtar. Den stora korrosionstoppen (nivå 3) vid försöket med okopplade provplåtar flyttades ned till nivå 4 vid hopkoppling av provplåtar och korrosionstoppen minskade dessutom i storlek. På det heta taget var korrosionsbilden gynnsammare vid hopkoppling av provplåtar än för okopplade provplåtar.

## Provkärl med kopplade plåtar

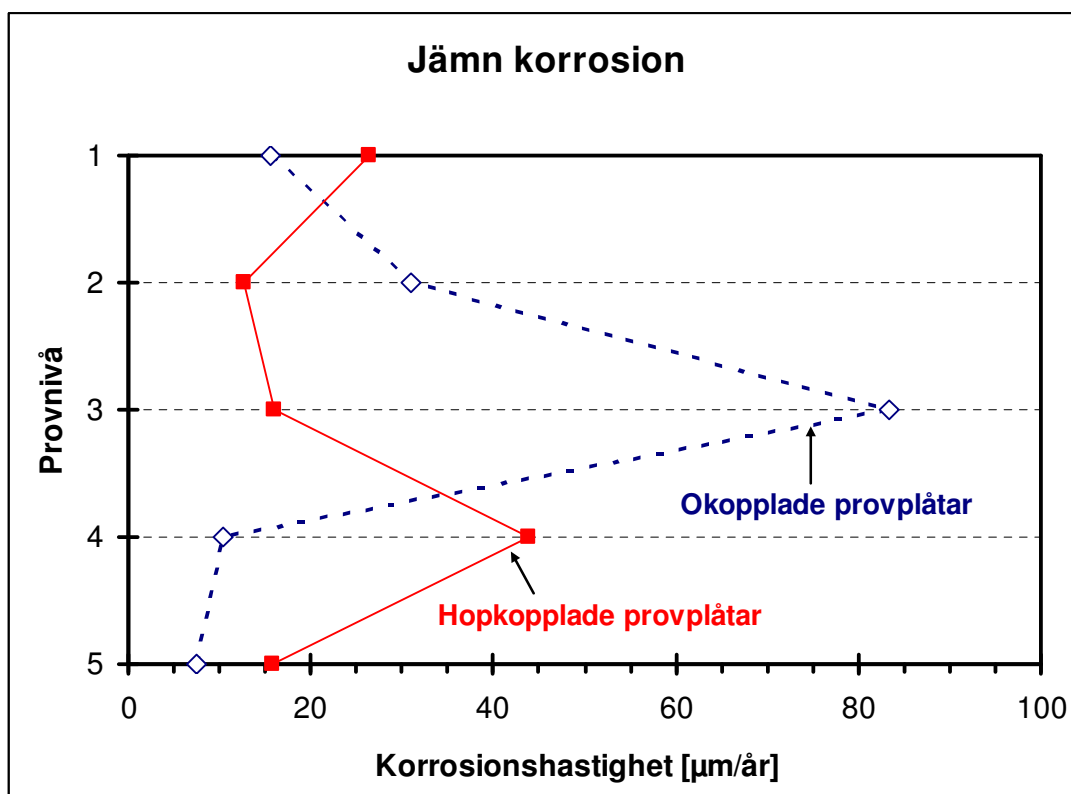


**Figur 8.5.** Schematisk bild av försöksuppställning 2 (försök 2) med hopkopplade provplåtar och okopplade provstänger av kolstål vid laborieförsök i sand. Figur från Vinka, Camitz & Linder [34].

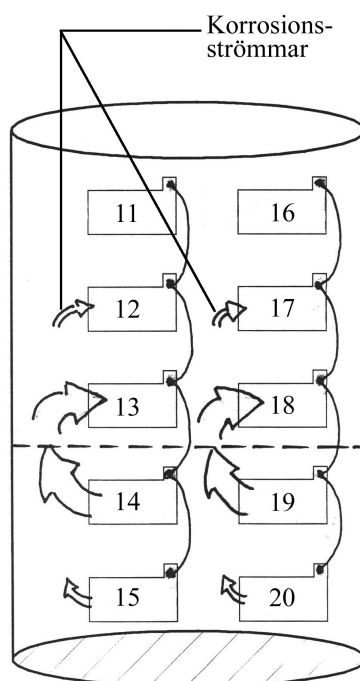
I **Figur 8.7** visas en schematisk bild av korrosionsströmmarna mellan hopkopplade provplåtar vid försök 2. I figuren visas korrosionsströmmarnas riktning mellan provplåtarna på samma plåtrad och strömmens storlek visas symboliskt med strömpilarnas tjocklek.

Av de uppmätta strömmarna i försök 2, framgår det att provplåtarna på de tre översta nivåerna (*nivåerna 1, 2 och 3*) fungerat som katoder till plåtarna på de två lägsta nivåerna (*nivåerna 4 och 5*) i luftningscellen.

Plåtarna särskilt på *nivå 1*, men också på *nivå 2*, hade endast i liten omfattning fungerat som katoder. Provplåtarna från *nivå 3* bildade tillsammans med provplåtarna från *nivå 4* i stort sett egna luftningsceller, där plåtarna från *nivå 3* verkar som katoder på bekostnad av plåtarna på *nivå 4*. Vattenhalten har tydligen varit tillräcklig för att ge god elektrisk ledningsförmåga mellan *nivå 3* och *4* samtidigt som syretillförseln till *nivå 3* varit tillfredsställande. Att plåtarna på *nivå 3* gett större tillskott till korrosionen på *nivå 4* än på *nivå 5* (där samma förutsättningar råder) beror troligen på att avståndet till *nivå 5* var större och den elektriska resistansen därmed högre.



**Figur 8.6.** Korrosionshastigheter (massförlustbestämd medelavfrätning) hos provplåtar av kolstål vid laborieförsök luftningsceller i sand. I figuren jämförs korrosionen hos okopplade provplåtar med hopkopplade provplåtar. Figur från Vinka, Camitz & Linder [34].



**Figur 8.7.** Schematisk bild av korrosionsströmmarna mellan hopkopplade provplåtar vid försök 2 vid laborieförsök luftningsceller i sand. Figuren visar korrosionsströmmarnas riktning mellan provplåtarna på samma plåtråd och strömmens storlek visas symboliskt med strömpilarnas tjocklek. Figur från Vinka, Camitz & Linder [34].

### 8.1.3 Samband mellan korrosionshastighet och jordparametrar

Det är svårt att finna samband mellan korrosionshastighet och jordparametrar eftersom korrosionen i jorden är så kraftigt katodiskt reglerad, det vill säga den katodiska delprocessen (syrgasreduktion som katodreaktion) begränsar korrosionshastigheten. Korrosionshastigheten blir alltså begränsad av genomsläppligheten (transporthastigheten) för syrgas genom jorden fram till metallytan.

För att erhålla ett signifikant samband mellan korrosion och jordparametrar måste man använda parametrar, som har bäring på syretillförseln. Vid rutinmässiga jordanalyser tas det inte fram sådana parametrar. Vad man får göra är att ta fram parametrar, som indirekt tar hänsyn till syretillförseln till exempel jordart, vattenkvot, närheten till grundvattenytan, mättad hydraulisk konduktivitet och korrosionspotential.

Eftersom korrosionen i jord begränsas av syretillförseln eller också orsakas av luftningsceller förlorar också andra jordparametrar i betydelse.

Den atmosfäriska korrosionen är ett exempel på svårigheterna att finna samband mellan korrosion och miljöparametrar. Under tider med hög svaveldioxidhalt ( $\text{SO}_2$ -halt) i atmosfären var det lätt att erhålla signifikanta samband mellan korrosionshastighet för de flesta bruksmetaller och  $\text{SO}_2$ -halten som enda förklarande parameter. Fram till ungefär 1985 – 90, då  $\text{SO}_2$ -halten började nå mycket låga nivåer i Sverige, erhöles linjära samband mellan korrosionshastighet och  $\text{SO}_2$ -halt med mycket hög förklaringsgrad (> 90 %) för den atmosfäriska korrosionen. I och med att  $\text{SO}_2$ -halten i atmosfären numera är så låg går det svårt att finna samband med acceptabel förklaringsgrad trots att det inkluderats betydligt fler parametrar i sambanden.

För korrosion på neddrivna stålplåtar helt under markytan i jord erhöles inga samband mellan korrosionshastighet och jordens resistivitet eller pH-värde varken i svenska undersökningar vid SJ av Sandegren [22] (se den statistiska utvärderingen av SJs undersökningar i [21]) och vid japanska undersökningar av Ohsaki [35].

## 8.2 Jämförelse mellan uppmätt korrosion och jordegenskaper

### 8.2.1 Allmänt

Det är känt att korrosionshastigheten på stålplåtar i jord kan variera beroende på till exempel syretillförseln genom jorden och fuktförhållandena, Camitz med flera [3]. Dessa förhållanden kan i sin tur påverkas bland annat av jordens permeabilitet, vattenkvot och närheten till grundvattenytan.

Jordens resistivitet och pH-värde kan också påverka korrosionshastigheten. Förekomsten av organiskt innehåll samt sulfider och sulfater anses också ha betydelse för korrosionshastigheten i jord. Huruvida jorden är omgrävd eller utgörs av fyllning har också visat sig ha betydelse för korrosionshastigheten. Även faktorer som korrosionspotential kan vara en indikator för korrosionshastigheten, jämför till exempel Bergdahl [36].

### 8.2.2 Jämförelse för olika provningsplatser

För att få ett underlag för en jämförelse mellan uppmätt korrosionshastighet och ett antal jordegenskaper från de platser där rören stått har dessa värden sammanställts i **Tabell 8.1**.

En allmän jämförelse mellan uppmätt korrosionshastighet på rören av kolstål och de uppmätta jordparametrarna visar att man vid Åkerhög där den största korrosionshastigheten uppmäts har flera ogynnsamma parametervärden: högt grundvattenstånd, låg resistivitet och hög kloridhalt. Skillnaden i parametervärden mellan Närefors och Nyhem är inte lika påtaglig så att den kan förklara den något högre korrosionshastigheten vid Närefors.

En närmare jämförelse görs mellan uppmätt korrosionshastighet för rören på olika djup och de olika parametrarnas fördelning med djupet.

**Tabell 8.1.** Sammanställning av korrosionshastighet och uppmätta jordparametrar vid de tre provningsplatserna.

Stålsort Standard Stålbeteckning	Prov- nings- plats	Rör  nr	Korro- sions- hastig- het  95 %- fraktilen  $\mu\text{m}/\text{år}$	Korro- sions- potential  mV (Cu/ CuSO <sub>4</sub> )	Grund- vatten- nivå  m under mark- ytan	Vatten- kvot  mass-% av torr jord	pH- värde  pH(H <sub>2</sub> O)	Resis- tivitet  Instick- selek- trod  Natur- fuktig jord  $\Omega\text{m}$	Klorid- halt  mg Cl <sup>-</sup> /kg torr jord
Kolstål	Nyhem	76	7,8	- 617	1,6	31 – 75	4,4 – 4,9	28,1 – 51,2	<10 – 53
SS 2120	Närefors	71	11,2	- 575	1,3	18 – 40	3,3 – 6,7	23,2 – 39,3	<10 – 44
<b>Sandvik 9LM</b>	Åkerhög	66	15,9	- 651	0,1	33 – 73	7,3 – 7,9	2,3 – 2,5	1790 – 4620
Låglegerat stål SS 2225 <b>Sandvik 5C2Mo</b>	Åkerhög	21	33,2	- 618	0,1	33 – 73	7,3 – 7,9	2,3 – 2,5	1790 – 4620
Låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo <b>Sandvik 4N3C2Mo</b> Ej standardiserat	Åkerhög	38	21,3	- 587	0,1	33 – 73	7,3 – 7,9	2,3 – 2,5	1790 – 4620

### 8.2.2.1 Resultat för kolstål från Nyhem

- I Nyhem är resistiviteten högre än i Närefors men minskar något med djupet ned till grundvat-  
tenytan.
- Kloridhalten är låg och nära konstant ner till 2,5 m djup där den ökar. Detta återspeglas dock  
ej i korrosionshastigheten.
- Vattenkvoten i jorden varierar kraftigt med djupet och är högst i mulljorden närmast markytan  
och i den gyttjiga silten med växtrester under 1,8 m djup. Någon tydlig variation av korrosions-  
hastigheten med vattenkvoten syns ej däremot en viss liten ökning närmast markytan.
- pH-värdet är som lägst närmast markytan och på 3 m djup vilket kan ha påverkat korrosions-  
hastigheten närmast markytan.

### 8.2.2.2 Resultat för kolstål från Närefors

- Den betydligt högre resistiviteten i jorden kan vara en del av förklaringen till den låga korrosionshastigheten vid Närefors.
- Även kloridhalten är betydligt lägre än vid Åkerhög. Den högre kloridhalten närmast markytan kan vara en del av förklaringen till den större korrosionshastigheten närmast markytan.
- Vattenkvoten är lägre över grundvattenytan där jorden har torrskorpekaraktär vilket kan ge en ökad syresättning av jorden och därmed ökad korrosion relativt djupare liggande jordlager.
- pH-värdet är relativt högt i jorden närmast markytan men sjunker betydligt under grundvattenytan men detta tycks inte ha påverkat korrosionshastigheten.

### 8.2.2.3 Resultat för låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo från Åkerhög

- Inget samband finns mellan den stora korrosionshastigheten nära markytan och vid rörspeisen och resistivitets fördelning med djupet. Möjligen kan noteras den lägre resistiviteten på 2,5 m djup.
- Kloridhaltens fördelning kan antyda en ökad korrosionshastighet mot djupet men inte mot markytan.
- Vattenkvoten ökar från cirka 30 – 40 mass-% ned till cirka 1 m djup och därunder till 70 – 80 mass-% på cirka 3 m djup. Den övre lägre vattenkvoten kan tyda på en viss torrskorpebildning med åtföljande sprickor. Detta tillsammans med markytans låga nivå kan ge en förklaring till den kraftiga korrosionen nära markytan om saltvatten tidvis trängt in i jordens sprickor. Den förklarar dock inte den högre korrosionshastigheten mot djupet.
- Det höga pH-värdet och dess fördelning med djupet kan inte förklara korrosionshastighetens fördelning med djupet på detta rör.

## 8.2.3 Jämförelse med korrosion på kraftledningsstolpar

För att klargöra huruvida korrosionshastigheterna på de olika provningsplatserna kan bedömas från de jordparametrar, som bestämts, har jämförelser gjorts med det samband, som presenterades av Bergdahl [36]. Sambandet är framtaget för nedgrävda varmförzinkade kraftledningsstolpar. En stor del av kraftledningsstolpen står ovan markytan i luft. Enligt detta samband kan korrosionshastigheten bedömas från värdet på följande korrosionsfunktion:

$$w_{korr} = f \left( \frac{\log w \cdot (7,0 - 2,5 \cdot h_w) \cdot |\Delta U|}{pH \cdot \log \rho} \right)$$

- där
- $w_{korr}$  = korrosionshastighet (medelavfrätning),  $\mu\text{m}/\text{år}$
  - $w$  = vattenkvot, mass-% av torr jord
  - $h_w$  = grundvattenytans minsta djup under markytan, m
  - $\Delta U$  = rörens korrosionspotential före uppdragning, mV (Cu/CuSO<sub>4</sub>)
  - $\rho$  = resistivitet i jorden,  $\Omega\text{m}$
  - $pH$  = uppmätt pH-värde i jorden.

Värdena på dessa parametrar har sammanställts i **Tabell 8.1** ovan med högsta och lägsta värden. I **Tabell 8.2** nedan redovisas för kolstål dels den uppmätta korrosionshastigheten som medelavfrätning



samt största och minsta korrosionshastigheter, dels värdena på korrosionsfunktionen även här med medelvärde samt största och minsta värde.

**Tabell 8.2.** Uppmätta korrosionshastigheter på kolstålsrör och värden på korrosionsfunktionen enligt Bergdahl [36].

Provningsplats	Korrosionshastighet			Värde korrosionsfunktion		
	µm/år			Medelvärde	Största värde	Minsta värde
Medelavfrätning	Största värde	Minsta värde				
Nyhem	3,6	8,5	0,5	0,4	0,5	0,3
Närefors	4,4	12,2	0,5	0,5	0,8	0,3
Åkerhög	9,2	17,4	2,5	2,6	3,0	2,1

En jämförelse mellan uppmätta korrosionshastigheter och värdena på korrosionsfunktionen visar på en proportionalitet: korrosionshastigheten ökar med värdet på korrosionsfunktionen. Det innebär att korrosionsfunktionen skulle kunna användas för andra stolpar än kraftledningsstolpar.

Korrosionsfunktionen enligt Bergdahl är intressant. pH-värdet och jordens resistivitet är vanliga parametrar i olika bedömningsprogram för korrosionsriskbedömning. Vattenkvoten, grundvattenytans läge och korrosionspotentialen kan alla anses ha bäring på syretillförseln genom jorden.

Resultatet antyder också att någon liknande funktion skulle kunna vara användbar för att bedöma korrosiviteten i jord för stålplåtar.

## 8.3 Inverkan av luftningsceller på korrosionen på rören

Det visades i **Kapitel 8.2** att det gick att förklara korrosionsangreppen på rören med olika jordparametrar. Nedan tas inverkan av luftningsceller (makroluftningsceller) på korrosionen på rören som förklaringsgrund.

### 8.3.1 Rör av kolstål från Nyhem och Närefors

Rören har i Nyhem och Närefors stått i relativt torr jord [18, 19] och grundvattenytan var på djupet 1,2 – 1,6 m under markytan vid intagning av rören, **Tabell 3.4**.

Korrosionsangreppen på rören i Nyhem, **Figur 6.7** och i Närefors, **Figur 6.8**, var små. På båda rören var de största och enda påtagliga korrosionsangreppen något under markytan (0,18 m under markytan i Nyhem och 0,14 m i Närefors). I grundvattenytans troliga variationsområde 1 – 2 m under markytan fanns inga förstärkta korrosionsangrepp. Det fanns inte heller några förstärkta korrosionsangrepp längst ned på rören.

Grundvattenytan var här varierande enligt Troselius' typfall [24] och det innebär att korrosionsangreppet sprids ut över en bredare korrosionszon. Resistiviteten i jorden var hög, särskilt i Nyhem, **Figur 2.1**. Den höga jordresistiviteten begränsar här effekten av makroluftningsceller.

Det kan konstateras att de relativt små korrosionsangreppen något under markytan på rören både i Nyhem och i Närefors torde ha orsakats av luftningsceller. Att inte korrosionsangreppen blivit större torde bero på varierande och förhållandevis djupt liggande grundvattenyta och hög jordresistivitet.

## 8.3.2 Rör av kolstål och låglegerat stål från Åkerhög

Vid Åkerhög har vatten tidvis stått över markytan [18, 19] och grundvattenytan var endast några enstaka decimetrar under markytan vid intagningen av rören. Jordens resistivitet är mycket låg i Åkerhög, **Figur 2.1**.

Grundvattenytan var i "markbandet" enligt Troselius' typfall [24] och den torde också tämligen konstant ligga i markbandet. Det innebär att det bildas en skarp korrosionszon [24].

### 8.3.2.1 Kolstål SS 2120

På kolstålröret fanns det större korrosionsangrepp, toppar i korrosionshastighet i kurvan, som beskriver korrosionen som funktion av djupet under markytan i **Figur 6.9**, på följande djup under markytan:

- 0,06 m (största korrosionsangreppet)
- 0,46 m
- 1,06 m
- 1,26 m.

I huvudsak fanns det alltså korrosionsangrepp något under markytan, på ungefär en halv meter djup och på ungefär en meters djup under markytan. Det fanns inget påtagligt korrosionsangrepp längst ned på röret som på rören av låglegerat stål. Detta torde bero på den bättre korrosionshårdigheten hos kolstål jämfört med låglegerat stål.

Det värsta korrosionsangreppet på röret har uppstått något under markytan, här kallat "marklinjekorrosion", som orsakats av en makroluftningscell. De tämligen kraftiga angreppen på en halv och en meters djup under markytan kan troligen bero på grundvattenytans variationer under årens gång. Vid något sjunkande grundvattenyta torde korrosionsangreppen på grund av luftningsceller ha förskjutits lite längre ned i jordprofilen.

På röret har det uppstått minst en makroluftningscell med anodiska områden i anslutning till markytan och grundvattenytan. Korrosionsangreppen på röret torde bero på högt grundvattenstånd och mycket låg resistivitet i jorden.

### 8.3.2.2 Låglegerat stål SS 2225

På röret av låglegerat stål SS 2225 fanns det större korrosionsangrepp, toppar i korrosionshastighet i kurvan, som beskriver korrosionen som funktion av djupet under markytan i **Figur 6.10**, på följande djup under markytan:

- 0,03 m
- 0,53 m
- 0,83 m (största korrosionsangreppet)
- 2,83 m (längst ned på röret).

Det fanns alltså korrosionsangrepp något under markytan, på ungefär en halv och en meters djup under markytan och längst ned på röret.

De kraftiga korrosionsangreppen på röret har orsakats av makroluftningsceller. Det höga grundvattenståndet i jorden har skapat kraftiga luftningsceller enligt Troselius' typfall [24]. På rördelen över markytan har det kunnat ske en kraftig katodreaktion, särskilt efter regn, som fungerat som drivande kraft för korrosionen.

Det har uppstått ett tämligen kraftigt angrepp något under markytan, här kallad "marklinjekorrosion". Angreppen något djupare i jordprofilen, på ungefär en halv och en meters djup, kan troligen ses som effekter av grundvattenytans variationer under årens gång. Vid något sjunkande grundvattenyta torde korrosionsangreppen på grund av luftningsceller ha förskjutits lite längre ned i jordprofilen.

Det har också bildats en lång makroluftningscell på röret med det anodiska området längst ned på röret resulterande i ett tämligen kraftigt korrosionsangrepp. Den mycket låga jordresistiviteten i Åkerhög, se **Figur 2.1**, har till mycket ringa del begränsat korrosionsströmmen hos luftningscellen i den galvaniska cellen. Jordresistiviteten är också lägst vid rörets nedre ände och samtidigt är jordens vattenkvot och kloridhalt högst på denna nivå, **Figur 2.1** och **2.2**. Den höga kloridhalten i jorden är mycket starkt bidragande till den mycket låga jordresistiviteten. Korrosionsströmmen i den långa makroluftningscellen har därför lämnat röret längst ned på röret.

Makroluftningscellen med anodiska områden i anslutning till markytan och grundvattenytan har resulterat i kraftigare korrosionsangrepp än angreppet orsakad av den långa makroluftningscellen med anodiskt område längst ned på röret. Detta kan möjligen bero på lägre resistans i de kortare makroluftningscellerna med anodiskt område i anslutning till markytan och grundvattenytan.

Det kan konstateras att det uppstått minst två luftningsceller på röret: en makroluftningscell med anodiska områden i anslutning till markytan och grundvattenytan och en lång makroluftningscell med anodiskt område längst ned på röret. Korrosionsangreppen på röret torde bero på högt grundvattenstånd och mycket låg resistivitet i jorden.

### 8.3.2.3 Låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo

På röret av låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo fanns det större korrosionsangrepp, toppar i korrosionshastighet i kurvan som beskriver korrosionen som funktion av djupet under markytan i **Figur 6.11** och **Figur 6.12**, på följande djup under markytan:

- 0,08 m (största korrosionsangreppet)
- 2,68 – 2,88 m (längst ned på röret).

Det fanns alltså korrosionsangrepp något under markytan och längst ned på röret.

På detta rör har det uppstått ett mycket kraftigt korrosionsangrepp något under markytan, "marklinjekorrosion", orsakad av en makroluftningscell. På samma sätt som på röret av låglegerat stål SS 2225 har också en lång makroluftscell uppkommit med anodiskt område längst ned på röret.

Det har inte på röret uppstått förstärkta korrosionsangrepp på ungefär en halv och en meters djup under markytan som på kolstålröret och röret av låglegerat stål SS 2225.

Makroluftningscellen med anodiskt område i anslutning till markytan har på detta rör resulterat i ett mycket kraftigare korrosionsangrepp än angreppen på grund av den långa makroluftningscellen med anodiskt område längst ned på röret.

Det har här också på detta rör uppstått minst två luftningsceller på röret: en makroluftningscell med anodiskt område i anslutning till markytan och en lång makroluftningscell med anodiskt område längst ned på röret. Korrosionsangreppen på röret torde bero på högt grundvattenstånd och mycket låg resistivitet i jorden.

### 8.3.3 Sammanfattning av korrosionsangrepp på rör orsakat av luftningsceller

Typiskt för alla rören på alla tre provningsplatser var att det uppstod ett korrosionsangrepp något under markytan. Korrosionsangreppen var små på kolstålsrören i Nyhem och Närefors. I Åkerhög var angreppet något under markytan måttligt på kolstålsröret, tämligen kraftigt på röret av låglegerat stål SS 2225 och mycket kraftigt på röret av låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo.

Korrosionsangreppen på rören har orsakats av makroluftningsceller, låt oss kalla angreppen för "marklinjekorrosion". Marklinjekorrosionen fungerar på samma sätt som den mera kända vattenlinjekorrosionen på konstruktioner som endast delvis är nedsänkt i vatten (en del av konstruktionen befinner sig i vatten under vattenytan och en del över vattenytan i luft). I regel uppstår det kraftigaste angreppet en liten stycke under vattenytan. Vattenlinjekorrosionen, som orsakas av luftningsceller, begränsar livslängden för konstruktioner som stålsfont i vatten och för metalliska vägtrummor.

För vertikala konstruktioner, med en del i jord under markytan och en del i luft del över markytan, som stolpar och förankringsanordningar till stolpar måste man räkna med kraftiga korrosionsangrepp i anslutning till markytan.

Korrosionsangreppen på en halv och en meters djup under markytan i Åkerhög på röret av kolstål SS 2120, med tämligen kraftiga angrepp och låglegerat stål SS 2225, med kraftiga angrepp, kan troligtvis bero på grundvattenytans variationer under årens gång. Vid något sjunkande grundvattenyta torde korrosionsangreppen på grund av luftningsceller ha förskjutits lite längre ned i jordprofilen.

På rören av låglegerat stål i Åkerhög har det också bildats en långa makroluftningsceller på rören med det anodiska området längst ned på röret resulterande i tämligen kraftiga korrosionsangrepp. Den mycket låga jordresistiviteten i Åkerhög har endast till mindre del begränsat korrosionsströmmen hos luftningscellen i den galvaniska cellen. Jordresistiviteten är också lägst vid rörets nedre ände och samtidigt är jordens vattenkvot och kloridhalt högst på denna nivå.

Makroluftningsceller med anodiska områden i anslutning till markytan och grundvattenytan har resulterat i kraftigare korrosionsangrepp på de låglegerade stålrören i Åkerhög än angreppet orsakad av den långa makroluftningscellen med anodiskt område längst ned på röret. Detta kan möjligen bero på lägre resistans i de kortare makroluftningscellerna med anodiskt område i anslutning till markytan och grundvattenytan.

Sammanfattningsvis har korrosionsangreppen på rören i Åkerhög orsakats av makroluftningsceller och torde bero på högt grundvattenstånd och mycket låg resistivitet i jorden.

Om rören stått helt i jord under markytan hade de lokala korrosionsangreppen blivit mycket mindre eftersom angreppen på rören, med en del i jord under markytan och en del i luft del över markytan, orsakats av luftningsceller. På rör helt i jord under markytan hade det inte funnits en lika effektiv katodyta där en kraftig katodreaktion kunnat försiggå som på rör delvis i jord. Den drivande kraften för korrosionen på grund av luftningsceller hade därför blivit mycket mindre.

## 8.4 Korrosionshårdighet hos de olika stålen

Det visade sig att de låglegerade stålen, både låglegerat stål SS 2225 och speciellt låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo, hade sämre korrosionshårdighet än kolstål SS 2120 i Åkerhög. Det fanns däremot endast mindre skillnader i massförlustbestämd medelavfrätning mellan de olika stålsorterna: 9 µm/år för kolstål SS 2120, 12 µm/år för låglegerat stål SS 2225 och 6 µm/år för låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo. På det låglegerade stålet 1,3Cr-3Ni-0,2Mo, som hade de kraftigaste lokala korrosionsangreppen, var alltså medelavfrätningen minst.

Det var de stora lokala korrosionsangreppen, mätt med vattenvolymetermetoden, som utmärkte de låglegerade stålen i jämförelse med kolstål SS 2120. Kolstål SS 2120 hade mycket bättre hårdighet mot lokala korrosionsangrepp i den kloridhaltiga jorden i Åkerhög än de låglegerade stålen. Kolstål SS 2120

hade också mycket bättre hårdighet mot korrosion orsakad av luftningsceller i Åkerhög än de låglegerade stålen.

Som framgår av tidigare utvärderingar av korrosionsangreppen på rör efter ett års exponering av Sandvikens Jernverks AB [18] och efter fem års exponering av Sandvik AB [19] uppvisade kolstål SS 2120 den bästa hårdigheten mot lokala korrosionsangrepp och låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2 Mo den sämsta, se vidare **Kapitel 4**. Resultaten från de tidigare undersökningarna överensstämmer alltså med den här redovisade undersökningen.

Korrosionshårdigheten för de olika stålen kan rangordnas med ökande hårdighet enligt följande:

*Låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo < Låglegerat stål SS 2225 < Kolstål SS 2120.*

Korrosiviteten mot kolstål och låglegerat stål på de olika provningsplatserna kan också rangordnas med ökande korrosivitet enligt följande:

*Nyhem < Närefors < Åkerhög.*

### 8.4.1 Inverkan av legeringsämnen på korrosionen hos låglegerat stål

Det låglegerade stålet SS 2225 innehöll 1,08 mass-% krom (Cr), 0,21 mass-% molybden (Mo) och 0,05 mass-% nickel (Ni) och det låglegerade stålet 1,3Cr-3Ni-0,2Mo 1,34 mass-% krom (Cr), 2,98 mass-% nickel (Ni) och 0,24 mass-% molybden (Mo), **Tabell 3.3**. Sammansättningen hos de låglegerade stålen var tämligen lika förutom att det låglegerade stålet 1,3Cr-3Ni-0,2Mo också innehöll 3 mass-% nickel.

#### 8.4.1.2 Undersökningar av låglegerat stål i jord

National Bureau of Standards, numera National Institute of Standards and Technology, i USA har undersökt korrosionen i jord med ett mycket omfattande exponeringsprogram [37]. Undersökningarna påbörjades 1937 på 15 provningsplatser i USA. Stålen grävdes ned och djupet under markytan till provplåtarna varierade mellan 22 och 48 inch (0,56 – 1,22 m). Ett vanligt exponeringsdjup var 30 inch (0,76 m). Provplåtarna exponerades som längst under 12,7 år med intag av provplåtar efter 2,1, 4,0, 9,0, 11,1 och 12,7 års exponering.

I undersökningen exponerades bland annat provplåtar av tio olika stålsorter: ett kolstål (referensmaterial), ett stål med nickeltillsats (2Ni-1Cu), fem stål med kromtillsats (1Cr-0,4Cu-0,2Ni, 2Cr-0,6Mo, 5Cr, 4,7Cr-0,5Mo och 5,8Cr-0,4Mo-0,2Ni) och tre stål med tillsats av koppar (0,45Cu, 0,54Cu-0,1Mo respektive 1Cu-0,5Ni). Provplåtarna hade dimensionen 12 x 2,5 inch (305 x 63 mm) och godtjockleken varierade mellan 4,4 och 6,7 mm. Det exponerades två provplåtar för varje intag av varje material.

Korrosionen på provplåtarna utvärderades dels med massförlustundersökning och dels med mätning av maximalt frättdjup på två provplåtar (dubbelprov) från varje intag.

Romanoff [37] har angett relativa massförluster (från massförlustundersökningarna) och relativt maximalt frättdjup för olika låglegerade stål i förhållande till jordens luftning (syretillförseln genom jorden), **Tabell 8.3**.

Jordens luftning indelades i fyra kategorier: god, tillfredställande, dålig och mycket dålig. Ett specialfall var exponeringen i kolaska (cinders) med mycket dålig luftning.

Massförlusterna och det maximala frättdjupet har satts till 100 för kolstålet (stål nr 1) i alla kategorierna för jordens luftning.

Romanoff [37] har använt medelvärden för massförluster och maximala frättdjup. Medelvärden har beräknats för alla exponerade provplåtar, från alla fem exponeringsperioderna, i samma luftningskategori.

**Tabell 8.3.** Relativ massförlust och relativt maximalt frättdjup för olika stålsorter som funktion av luftningen (syretillförseln) i jorden för nedgrävda provplåtar i USA. Massförlusterna och det maximala frättdjupet har satts till 100 för kolstålet (stål nr 1). Data från Romanoff, Table 24 i [37].

Be-teck-ning	Stålsort	Jordens luftning (Syretillförsel genom jorden fram till provplåtarna)					Jordens luftning (Syretillförsel genom jorden fram till provplåtarna)				
		God	Tillfred-ställande	Dålig	Mycket dålig	Mycket dålig Kolaska (Cinders)	God	Tillfred-ställande	Dålig	Mycket dålig	Mycket dålig Kolaska (Cinders)
		Relativ massförlust <sup>1</sup> Medelvärde av massförlust från massförlustundersökningar					Relativt maximalt frättdjup <sup>1</sup> Medelvärde av maximalt frättdjup				
1	Kolstål	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
2	Låglegerat stål 0,45 Cu	100	95	98	84	120	100	95	82	120	75
3	Låglegerat stål 0,54Cu-0,1Mo	100	93	97	83	92	87	96	80	119	63
4	Låglegerat stål 1Cu-0,5Ni	79	98	94	81	94	96	92	102	93	72
5	Låglegerat stål 2Ni-1Cu	79	91	99	81	127	110	81	100	95	72
6	Låglegerat stål 1Cr-0,4Cu-0,2Ni	94	83	95	76	80	101	84	116	115	64
7	Låglegerat stål 2Cr-0,6Mo	90	82	80	63	66	97	91	78	103	60
8	Kromlegerat stål 5Cr	45	77	51	58	55	96	94	83	176	64
9	Kromlegerat stål 4,7Cr-0,5Mo	46	79	53	56	40	84	83	78	149	54
10	Kromlegerat stål 5,8Cr-0,4Mo-0,2Ni	46	85	52	56	43	88	100	84	149	59

1) Medelvärden av massförluster och maximala frättdjup för fem exponeringsperioder: 2,1, 4,0, 9,0, 11,1 och 12,7 års exponering.

Från undersökningarna av olika stål nedgrävda i jord i USA [37] framkom bland annat:

- Medelavfrätningen var högre på kolstålet än på de kromlegerade stålen.
- Gruppen kromlegerade stål hade som helhet mindre maximalt frätdjup än kolstålet. Vid kort exponeringstid hade de kromlegerade stålen dock större maximalt frätdjup än kolstålet. Med längre exponeringstid var det maximala frätdjupet större på kolstålet.
- I jordar med mycket dålig luftning var det maximala frätdjupet betydligt större på kromlegerade stål än på kolstål.
- För det låglegerade stålet med tillsats av 1 mass-% krom (stål nr 6: 1Cr-0,4Cu-0,2Ni) var den massförlustbestämda medelavfrätningen endast något lägre än för kolstål och det maximala frätdjupet var betydligt större i jordar med dålig och mycket dålig luftning än för kolstål.
- Det var svårt att särskilja effekterna från legeringsämnena krom och molybden på korrosionen.
- Det låglegerade stålet med 2 mass-% nickel (stål nr 5: 2Ni-1Cu) hade något lägre medelavfrätning än kolstål och det maximala frätdjupet var tämligen lika som för kolstål.
- Det fanns ingen större skillnad i medelavfrätning och maximalt frätdjup för stål med tillsats av koppar (0,45Cu, 0,54Cu-0,1Mo samt 1Cu-0,5Ni) och kolstål.

Med tanke på att syretillförseln (luftningen) var dålig i leran i Åkerhög, främst beroende på högt grundvattenstånd, var det intressant att det maximala frätdjupet var betydligt större på kromlegerade stål än på kolstål i mycket dåligt luftade jordar. Det låglegerade stålet med tillsats av 1 mass-% krom (stål nr 6: 1Cr-0,4Cu-0,2Ni) hade större frätdjup än kolstål i både dåligt och mycket dåligt luftade jordar.

Den sämre lokala korrosionshårdigheten för låglegerat stål med tillsats av 1 mass-% krom än för kolstål i dåligt luftade jordar kan vara en förklaring till att låglegerat stål SS 2225 hade sämre lokal korrosionshårdighet än kolstål SS 2120 i Åkerhög.

### 8.4.1.2 Undersökningar av låglegerat stål i havsvatten

Med tanke på den mycket höga kloridhalten i jord i Åkerhög, se **Figur 2.1**, är det av intresse att ta del av undersökningar av kolstål och låglegerade stål helt nedsänkta i havsvatten.

Den mest omfattande undersökningen av korrosionen på bland annat låglegerat stål i havsvatten har utförts av Naval Research Laboratory i USA [38, 39, 40]. Undersökningarna påbörjades 1946 – 47 i Panama i anslutning till Panamakanalen. Stålen exponerades som längst under 16 år med intag av provplåtar efter 1, 2, 4, 8 och 16 års exponering.

I undersökningen exponerades bland annat provplåtar av tio olika stålsorter: ett kolstål (referensmaterial, stål A), två stål med nickeltillsats (stål E: 1,9Ni-0,6Cu respektive stål F: 5,5Ni), två stål med kromtillsats (stål G: 3,2Cr respektive stål H: 5,1Cr-0,5Mo), ett stål med tillsats av 0,35 mass-% koppar (stål D: 0,35Cu) och fyra låglegerade stål (stål I: 1,5Ni-0,9Cr, stål J: 0,7Cr-0,5Ni-0,5Si-0,4Cu, stål K: 0,8Mn-0,7Ni-0,6Cu och stål L: 0,6Cu-0,6Mn-0,6Cr-0,3Ni) avsedda för användning i atmosfären. Provplåtarna var kvadratiska med kantlängden 9 inches (229 mm) och godtjockleken ¼ inch (6,35 mm). Det exponerades två provplåtar för varje intag av varje material.

Här koncentreras på korrosionen av kolstålet och stålen med tillsats av nickel och krom. Sammansättningen hos stålen framgår av **Tabell 8.4**.

Resultaten från den omfattande undersökningen av olika stål i havsvatten framgår av **Tabell 8.5**. I tabellen anges medelfrättdjup, korrosionshastighet (medelavfrätning) och korrosionshastighet i fortvarighets-tillstånd efter 16 års exponering från massförlustundersökningarna.

I undersökningen har man också mätt de 20 djupaste frätgroparna på två provplåtar, som fem djupaste frätgropar på varje sida hos de två provplåtarna och sedan angett medelvärdet för de 20 djupaste frätgroparna samt maximalt frättdjup på två provplåtar, **Tabell 8.5**.

Av undersökningarna av olika stål helt nedsänkta i havsvatten i Panama [39, 40] framkom bland annat:

- Medelavfrätningen var något högre för de nickellegerade stålen (stål E: 1,9Ni-0,6Cu och stål F: 5,5Ni) än för kolstål. De lokala korrosionsangreppen var betydligt större på de nickellegerade stålen efter 8 och 16 års exponering än på kolstålet (stål A).
- Medelavfrätningen var högre på kolstålet än på de kromlegerade stålen (stål G: 3,2Cr och stål H: 5,1Cr-0,5Mo) efter ett och två års exponering. Efter fyra års exponering ändrades förhållandet och de kromlegerade stålen fick i fortsättningen högre medelavfrätning än kolstålet. Efter 16 års exponering var medelavfrätningen 22 – 45 % högre på de kromlegerade stålen än på kolstålet.
- De kromlegerade stålen hade efter 8 och 16 års exponering endast något mindre lokala korrosionsangrepp än kolstålet. Medelvärdet för de tjugo djupaste frätgroparna var efter 8 och 16 års exponering lika för stålet med 3,2 mass-% Cr (stål G: 3,2Cr) som för kolstålet.
- Medelavfrätningen var något högre på stålet med tillsats av 0,35 mass-% koppar (stål D: 0,35Cu) än på kolstålet. Den lokala korrosionen var ungefär lika för de båda stålsorterna.
- För två av de låglegerade stålen (stål L: 0,6Cu-0,6Mn-0,6Cr-0,3Ni och stål J: 0,7Cr-0,5Ni-0,5Si-0,4Cu) var medelavfrätningen betydligt större och ungefär lika stor för de två andra låglegerade stålen (stål K: 0,8Mn-0,7Ni-0,6Cu och stål I: 1,5Ni-0,9Cr) som för kolstålet. För tre av de låglegerade stålen var de lokala korrosionsangreppen större än på kolstålet. Det fjärde låglegerade stålet (stål K: 0,8Mn-0,7Ni-0,6Cu) hade något mindre lokala korrosionsangrepp efter 16 års exponering än kolstålet.
- I undersökningarna framkom att inget låglegerat stål förbättrade korrosionshårdigheten något nämnvärt jämfört med kolstål.



**Tabell 8.4.** Kemisk sammansättning hos de exponerade stålen i havsvatten i Panama. Data från Forge-  
son, Southwell & Alexander [38, 40].

Kod	Stålsort	Halt									
		mass-%									
		C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Cu	Mo	Fe
A	Kolstål	0,24	0,48	0,040	0,027	0,01	0,03	0,05	0,08	–	Rest.
D	Låglegerat stål 0,35Cu	0,22	0,44	0,019	0,033	0,01	Spår	0,14	0,35	–	Rest.
E	Låglegerat stål 1,9Ni-0,6Cu	0,20	0,54	0,012	0,023	0,18	0,15	1,94	0,63	–	Rest.
F	Nickellegerat stål 5,5 Ni	0,13	0,49	0,010	0,014	0,16	0,10	5,51	0,06	–	Rest.
G	Låglegerat stål 3,2Cr	0,08	0,44	0,010	0,017	0,13	3,16	0,16	0,11	0,02	Rest.
H	Kromlegerat stål 5,1Cr-0,5Mo	0,08	0,41	0,020	0,019	0,20	5,06	0,11	0,06	0,52	Rest.
I	Låglegerat stål 1,5Ni-0,9Cr	0,08	0,47	0,007	0,026	0,06	0,00	1,54	0,87	–	Rest.
J	Låglegerat stål 0,7Cr-0,5Ni-0,5Si-0,4Cu	0,15	0,45	0,113	0,026	0,47	0,68	0,49	0,42	–	Rest.
K	Låglegerat stål 0,8Mn-0,7Ni-0,6Cu	0,08	0,75	0,058	0,022	0,04	Spår	0,72	0,61	0,13	Rest.
L	Låglegerat stål 0,6Cu-0,6Mn-0,6Cr-0,3Ni	0,13	0,60	0,089	0,021	0,15	0,55	0,30	0,61	0,06	Rest.

**Tabell 8.5.** Frätdjup och korrosionshastigheter på olika stål efter olika exponeringstider vid exponering av provplåtar helt nedsänkta i havsvatten i Panama. Data från Forgeson, Southwell & Alexander [38, 40].

Typ av stål	Massförlustundersökning										Korrosionshastighet i fortvarighetstillstånd efter 16 års exponering µm/år
	Medelfrätdjup mm					Korrosionshastighet µm/år					
	1 år	2 år	4 år	8 år	16 år	1 år	2 år	4 år	8 år	16 år	
A. Kolstål	0,15	0,21	0,40	0,65	1,17	150	105	100	81	73	64
E. Låglegerat stål 1,9Ni-0,6Cu	0,19	0,23	0,44	0,81	1,32	188	117	109	101	83	69
F. Nickellegerat stål 5,5Ni	0,16	0,26	0,42	0,81	1,32	160	128	106	102	83	69
G. Låglegerat stål 3,2Cr	0,05	0,14	0,46	1,03	1,78	53	70	114	129	111	97
H. Kromlegerat stål 5,1Cr-0,5Mo	0,07	0,15	0,43	0,81	1,42	69	77	108	102	89	89

82

Typ av stål	Medelvärde av de 20 djupaste frätgroparna på två provplåtar										Mätning av maximalt frätdjup									
	Medelvärde av frätdjup mm					Medelvärde av lokal korrosionshastighet mm/år					Maximalt frätdjup mm					Maximal lokal korrosionshastighet mm/år				
	1 år	2 år	4 år	8 år	16 år	1 år	2 år	4 år	8 år	16 år	1 år	2 år	4 år	8 år	16 år	1 år	2 år	4 år	8 år	16 år
A. Kolstål	1,04	1,19	1,68	1,68	2,29	1,04	0,60	0,42	0,21	0,14	1,57	1,55	2,87	2,18	3,94	1,57	0,77	0,72	0,27	0,25
E. Låglegerat stål 1,9Ni-0,6Cu	0,84	1,30	1,27	2,39	– <sup>a</sup>	0,84	0,65	0,32	0,30	– <sup>a</sup>	1,30	2,18	2,13	4,55	– <sup>a</sup>	1,30	1,09	0,53	0,57	– <sup>a</sup>
F. Nickellegerat stål 5,5 Ni	0,74	1,27	1,96	2,97	– <sup>a</sup>	0,74	0,64	0,49	0,37	– <sup>a</sup>	1,45	2,13	4,95	5,44	– <sup>a</sup>	1,45	1,07	1,24	0,68	– <sup>a</sup>
G. Låglegerat stål 3,2Cr	0,28	0,79	0,99	1,65	2,36	0,28	0,39	0,25	0,21	0,15	0,51	0,97	1,24	1,98	2,77	0,51	0,48	0,31	0,25	0,17
H. Kromlegerat stål 5,1Cr-0,5Mo	0,69	0,74	1,07	1,60	1,75	0,69	0,37	0,27	0,20	0,11	2,31	1,27	1,30	2,29	2,54	2,31	0,64	0,32	0,29	0,16

a) Genomfrätning av provplåtar. Godstjocklek ¼ inch = 6,35 mm.

I **Tabell 8.6** visas en sammanställning av effekterna av olika legeringsämnen i låglegerat stål på jämn respektive lokal korrosion hos stål helt nedsänkt i havsvatten [41]. Från sammanställningen framgår att krom har en ogynnsam effekt på den jämna korrosionen och en neutral (ingen påtaglig) effekt på den lokala korrosionen. Nickel har ingen påtaglig effekt på den jämna korrosionen, men en ogynnsam effekt på den lokala korrosionen.

**Tabell 8.6.** Effekt av olika legeringsämnen på jämn och lokal korrosion på låglegerat stål helt nedsänkt i havsvatten. Uppgifter från Hudson, Stanners & Hooper [41].

Korrosionstyp	Korrosionsmiljö	Effekt av legeringsämnen på korrosionshårdigheten hos låglegerat stål		
		Gynnsam	Neutral	Ogynnsam
Jämn korrosion	Helt nedsänkt i havsvatten	Mn Si Al Mo (t < 4 år) Cr (t ≤ 4 år)	Ni	P S Cu Mo (t ≥ 4 år) Cr (t > 4 år)
Lokal korrosion	Helt nedsänkt i havsvatten	–	Cu Cr	Ni

t = exponeringstid i år

Den sämre lokala korrosionshårdigheten för låglegerat stål med tillsats av nickel än för kolstål i kloridhaltig miljö kan vara en förklaring till att låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo hade sämre lokal korrosionshårdighet än kolstål SS 2120 i Åkerhög.

### 8.4.1.3 Slutsatser från undersökningarna

Legeringstillsatserna av krom och nickel i de låglegerade stålen SS 2225 respektive 1,3Cr-3Ni-0,2Mo hade inte påverkat den massförlustbestämda medelavfrätningen i någon större omfattning. Legeringstillsatserna av krom och speciellt nickel hade däremot påverkat den lokala korrosionen på ett negativt sätt. Att det låglegerade stålet 1,3Cr-3Ni-0,2Mo hade den sämsta hårdigheten mot lokala korrosionsangrepp berodde antagligen på tillsatsen av 3 mass-% nickel i stålet.

Den viktigaste slutsatsen från undersökningarna är att det inte är någon fördel, ur korrosionssynpunkt, att använda låglegerade stål istället för kolstål i jord. Detta överensstämmer med uppgifter i Revie & Uhlig [42], som skriver att låglegerat stål inte har någon praktisk effekt på korrosionshastigheten jämfört med kolstål i naturliga vatten och i jord.

## 8.5 Praktisk tillämpbarhet av resultaten

Denna undersökning är direkt tillämpbar på vertikala konstruktioner, med en del i jord under markytan och en del i luft över markytan, som stolpar, master och förankringsanordningar till stolpar och master.

Undersökningen är också tillämpbar på konstruktioner med utsträckning i både vertikal- och horisontal- led samt med en del av konstruktionen i jord under markytan och en del av konstruktionen i luft över markytan. Ett exempel är här stålsfont i jord.

Undersökningen är mindre tillämpbar på neddrivna stålpålar i jord helt under markytan. På stålrör helt i jord under markytan hade de lokala korrosionsangreppen blivit mycket mindre eftersom den drivande kraften för korrosion orsakad av luftningsceller blivit mycket mindre än på rör delvis i jord och delvis i luft. På rör helt i jord hade det inte uppstått en lika effektiv katodyta som på rören med en del av röret i luft över markytan.

## 8.6 Exponeringssätt av rör

Exponeringssättet med öppna rör i båda ändarna har försvårat undersökningarna av korrosionsangrepp på rören. Eftersom rören inte var pluggade i ändarna innehöll de vatten och jord vid upptagningen varför deras insida också korroderat. Vid intag av rören i juni 1992 fanns det vatten/jord inuti samtliga fem rör.

Eftersom man var intresserad av den utvändiga korrosionen på rören hade det varit en stor fördel om rören varit pluggade i båda ändarna. Då hade det varit enklare att bestämma den massförlustbestämda medelavfrätningen för enbart utsidan av röret.

Vid en planerad undersökning med mycket lång exponeringstid av neddrivna rör i jord är det viktigt att pluggningen av rörändarna görs på ett robust sätt. Vid användning av metalliskt material vid pluggning av rörändarna måste risken för bimetallkorrosion (galvanisk korrosion) beaktas, till exempel vid gängning av röränden och fastskruvning av en bult eller fastsvetsning av ett lock över rörändarna.

Om man också är intresserad av den invändiga korrosionen på rören krävs att rör med utvändigt beläggning exponeras. Skyddsbeläggningen måste vara fullgod för att motstå lång exponering i jord och samtidigt måste beläggningen gå att ta bort efter avslutad exponering. Om beläggningen skyddat mot utvändigt korrosion hade den massförlustbestämda medelavfrätningen för enbart insidan av röret kunnat bestämmas.

## 9. Sammanfattande resultat och synpunkter

### 9.1 Korrosionsangrepp

Totalt har korrosionen undersökts på fem rör med den nominella yttre diametern 32 mm som var 3,5 m långa och neddrivna i jord på tre olika provningsplatser i Mellansverige, Nyhem vid Sandviken, Närefors nära Lidköping och Åkerhög nära Kungälv. Tre av rören var av kolstål SS 2120 medan två rör var av låglegerat stål: SS 2225 respektive 1,3Cr-3Ni-0,2Mo.

Korrosionshastigheten på rören av kolstål visade i huvudsak på en jämn avfrätning, vars massförlustbestämda medelavfrätning visade sig vara 3,6  $\mu\text{m}/\text{år}$  (Nyhem), 4,4  $\mu\text{m}/\text{år}$  (Närefors) och 9,2  $\mu\text{m}/\text{år}$  (Åkerhög). Röret från Åkerhög visade dock på en antydning till midja något under markytan.

På de två rören av låglegerat stål från Åkerhög noterades också en större korrosion något under markytan. Låglegerat stål SS 2225 hade flera större angrepp på olika djup under markytan. På låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo fanns en tydlig midjebildning i anslutning till markytan samt kraftiga angrepp i dess nedre ände. Medelavfrätningen mätt som massförlust var för låglegerat stål SS 2225 12,2  $\mu\text{m}/\text{år}$  och 6,1  $\mu\text{m}/\text{år}$  för låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo.

De ovan angivna korrosionshastigheterna har beräknats under förutsättning att rören korroderat jämnt över hela rörytan, såväl utvändigt som invändigt.

### 9.2 Jämförelser mellan korrosionsangrepp uppmätt på olika sätt

Eftersom man redan tidigt såg att det fanns större lokala korrosionsangrepp på vissa rör på vissa nivåer, utfördes en noggrann uppmätning av volymförändringen längs rören. Detta är ju också väsentligt för att kunna bestämma största korrosionshastighet på en stolpe eller stältpåle, det vill säga bestämma stolpens eller pålens svagaste tvärsnitt. Dessa mätningar utfördes i en så kallad vattenvolymeter, se **Kapitel 5.2**. Resultaten redovisas i **Kapitel 6.3**.

En statistisk bearbetning av de med vattenvolymeter uppmätta korrosionshastigheterna längs rören visade att den karakteristiska korrosionshastigheten (95 %-fraktilen) låg mellan 8 och 16  $\mu\text{m}/\text{år}$  för kolstål SS 2120, 33  $\mu\text{m}/\text{år}$  för det låglegerade stålet SS 2225 och 21  $\mu\text{m}/\text{år}$  för det låglegerade stålet 1,3Cr-3Ni-0,2Mo. Dessa korrosionshastigheter kan omräknas till dimensionerande korrosionshastighet genom multiplicering med partialkoefficienten 1,5 till mellan 12 och 24  $\mu\text{m}/\text{år}$  för kolstålen, 50  $\mu\text{m}/\text{år}$  för det låglegerade stålet SS 2225 och 32  $\mu\text{m}/\text{år}$  för låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo. Dessa värden kan också uttryckas som 1,2 – 2,4 mm/100 år för kolstål SS 2120 och 3,2 – 5,0 mm/100 år för de låglegerade stålen.

På kolstålen fanns ojämnheter i korrosionens storlek längs rören, men de var inte av samma storlek som på de låglegerade stålen. De största uppmätta värdena var mellan 8,5 och 17,4  $\mu\text{m}/\text{år}$ , vilket skulle motsvara en korrosion på 0,8 till 1,7 mm/100 år eller en dimensionerande rostmån mellan 1,2 och 2,6 mm/100 år efter multiplikation av korrosionshastigheten med en partialkoefficient med värdet 1,5. Dessa värden ligger under de värden som anges i Pålkommisionens Rapport 98 [2]. För kolstålrören från Åkerhög och Närefors var den uppmätta lokala korrosionshastigheten dock större än vad som anges i svensk standard SS-EN 1993-5:2007 [20].

Korrosionshastigheten ovan kan också jämföras med den som bestämts genom massförlustbestämning, **Tabell 6.1**. Massförlustbestämningen visade på korrosionshastigheter för kolstålrören på mellan 3,6 och 9,2  $\mu\text{m}/\text{år}$ , det vill säga cirka 50 % av de största uppmätta lokala korrosionshastigheterna. Den jämförelse visade på betydelsen av att korrosionen mäts även med andra metoder än enbart massförlustundersökning för att man skall finna en stolpes eller en stältpåles svagaste tvärsnitt.

Resultaten visade att det framför allt på de låglegerade rören fanns stora olikheter i uppmätt korrosionshastighet längs rören. De största lokala korrosionshastigheterna var 41  $\mu\text{m}/\text{år}$  för låglegerat stål SS 2225 på 0,8 m djup under markytan respektive 87  $\mu\text{m}/\text{år}$  för låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo på 0,08 m djup under markytan.

Detta skulle motsvara en korrosion på 4,1 respektive 8,7 mm/100 år eller en dimensionerande rostmän på 6,1 – 13 mm/100 år, vilket är mycket högre än vad som anges för motsvarande förhållanden i Pålkommisionens Rapport 98 [2]. De höga lokala korrosionshastigheterna kan också jämföras med dem som bestämts genom massförlustbestämning, **Tabell 6.1**, som var 6,1 µm/år för låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo och 12,2 µm/år för låglegerat stål SS 2225, det vill säga endast 7 till 30 % av den maximala uppmätta lokala korrosionshastigheten.

### 9.3 Korrosionens beroende av jordens egenskaper

För att bedöma huruvida man från jordens egenskaper kan bestämma en framtida korrosionshastighet på stålplåtar eller stolpar på en viss plats har jämförelser gjorts mellan uppmätt korrosionshastighet och ett antal jordparametrar, som bestämts på de tre provningsplatserna.

Den högre korrosionshastigheten för kolstålsrören vid Åkerhög kan sannolikt förklaras av flera ogynnsamma förhållanden i jämförelse med dem i Nyhem och Närefors:

- Inverkan av kraftiga luftningsceller på stålrören på grund av högt grundvattenstånd
- Låg resistivitet i jorden
- Hög kloridhalt i jorden.

En jämförelse mellan uppmätta korrosionshastigheter på kolstålsrören och det samband som redovisas av Bergdahl [35] visar att en liknande funktion skulle kunna användas för att bedöma storleken på jordens korrosivitet på en viss plats om ett antal jordparametrar bestäms.

## 10. Referenser

1. Camitz, G: Korrosion och korrosionsskydd av stålplåtar och stålsplint i jord och vatten. Rapport 93. IVA Pålkommisionen, Linköping 1994. (Pålkommisionen, c/o Statens geotekniska institut, Linköping).
2. Bengtsson, Å & Berglars, B & Hultsjö, S & Romell, J: Dimensioneringsanvisningar för slagna slanka stålplåtar. Rapport 98. Pålkommisionen, Linköping 2000. (Pålkommisionen, c/o Statens geotekniska institut, Linköping.)
3. Camitz, G & Bergdahl, U & Vinka, T-G: Stålplåtars beständighet mot korrosion i jord – En sammanställning av kunskaper och erfarenheter. Rapport 105. Pålkommisionen, Linköping 2009. (Pålkommisionen, c/o Statens geotekniska institut, Linköping.)
4. Kjellberg, J W: Korrosionsprovning av förankringsrör. Utlåtande Sandvik Stålforskningen. T nr 58435. Utfärdare: TRP/Kjellberg/ab, 1968-09-13. Sandvikens Jernverks AB, Stålforskningen, Sandviken 1968.
5. Danielsson, H: Platser för korrosionsprovning av förankringsrör, vilka nedslagits i jorden. Tillvägagångssätt för rörens upptagning. Utlåtande Sandvik Stålforskningen. T nr 62854. Utfärdare: TRP/M/Danielsson/AÖ, 1973-12-03. Sandvik AB, Stålforskningen, Sandviken 1973.
6. Camitz, G: Korrosionsundersökningar i jord. Bestämning av jordars resistivitet. Bulletin nr 88. Korrosionsinstitutet, Stockholm 1980.
7. Norin, M: Groundwater and soil properties in an urban environment and their effects on the corrosion of soil buried constructions of carbon steel and zinc. Licentiatuppsats, Publ. A 86. Geologiska institutionen, Chalmers tekniska högskola, Göteborg 1998.
8. Norin, M & Vinka, T-G: Korrosion på kolstål och zink i fyllnadsjord i stadsmiljö. KI Rapport 2003:5. Korrosionsinstitutet, Stockholm 2003.
9. Svensk standard SS 14 21 20. Seghärtningsstål – SS-stål 21 20. Utgåva 9. SIS, Stockholm 1991.
10. Svensk standard SS 14 22 25. Seghärtningsstål – SS-stål 22 25. Utgåva 11. SIS, Stockholm 1991.
11. Svensk standard SS-EN 10083-3: 2006. Seghärtningsstål – Del 3: Tekniska leveransbestämmelser för legerade stål. Utgåva 2. SIS, Stockholm 2006.
12. Svensk standard SS-EN 10020. Definition och klassificering av ståltyper. Utgåva 2. SIS, Stockholm 2000.
13. Stål och värmebehandling (Holm, T & Olsson, P & Troell, E, red.). Swerea IVF, Mölndal 2010.
14. Mattson, S: Materiallära för svetsare. Liber AB, Stockholm 1999.
15. Ullman, E: Materiallära (Karlebo Materiallära). Fjortonde utgåvan. Liber AB, Stockholm 2003. (Detta är en fortsättning på Sven Brennerets klassiska handbok Materiallära. Från och med den tolfte utgåvan tog Erik Ullman över ansvaret för boken.)
16. Thelning, K-E: Stål och värmebehandling. Andra utgåvan. Karlebo-serien 16. Karlebo, Stockholm 1985.

17. Sandvikens Handbok. Järnets och stålets metallografi.  
  
Nygren, E & Folke, G & Modin, S: Järnets och stålets metallografi. Volym 1. Tredje oförändrade upplagan. Sandvikens Jernverks AB, Sandviken 1970.  
  
Nygren, E & Folke, G & Modin, S & Ljungberg, L: Järnets och stålets metallografi. Volym 2. Andra oförändrade upplagan. Sandvikens Jernverks AB, Sandviken 1970.
18. Danielsson, H: Korrosionsprovning av förankringsrör. Utlåtande Sandvik Stålforskningen. T nr 60239. Utfärdare: TRP/M/Danielsson/Bib, 1969-05-07. Sandvikens Jernverks AB, Stålforskningen, Sandviken 1969.
19. Danielsson, H: Korrosionsprovning av förankringsrör. Utlåtande Sandvik Stålforskningen. T nr 62785. Utfärdare: TRP/M/Danielsson/SP, 1973-08-15. Sandvik AB, Stålforskningen, Sandviken 1973.
20. Svensk standard SS-EN 1993-5: 2007. Eurokod 3: Dimensionering av stålkonstruktioner – Del 5: Pålår och spont. Utgåva 1. SIS, Stockholm 2007.  
  
Standarden ikraftsätter europastandarden EN 1993-5:2007 som svensk standard. Det tekniska innehållet finns alltså i: European Standard EN 1993-5:2007. Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 5: Piling. European Committee for Standardization (CEN), Bryssel 2007. Se speciellt Chapter 4, Durability.
21. Bengtsson, P-E & Bergdahl, U & Camitz, G & Vinka, T-G: Statens Järnvägars undersökning av korrosion på stålplåtar i jord – Statistisk bearbetning. Information 2002:1. Pålkommisionen, Linköping 2002. (Pålkommisionen, c/o Statens geotekniska institut, Linköping.) Finns också på Pålkommisionens hemsida på internet: [www.palkommisionen.se](http://www.palkommisionen.se).
22. Sandegren, E: Korrosion på stål – vertikalt orienterat – i jord. Slutrapport. Meddelande nr 46. Statens Järnvägars Huvudkontor, Geoteknik och ingenjörsgologi, Stockholm 1988.
23. Troselius, L: Korrosionsrisker och motåtgärder vid jordförlagda metallkonstruktioner – stolpar och deras förankringsanordningar. I konferenspärm till konferensen *Korrosionsskydd i jord*, anordnad av Korrosionsinstitutet den 9 - 10 maj 1984 i Stockholm. Korrosionsinstitutet, Stockholm 1984.
24. Troselius, L: Korrosionsrisker under mark: stagförankringar i ställverk och spont i dammar. I konferenspärm till konferensen *Korrosionsskydd av vattenkraftverk*, anordnad av Korrosionsinstitutet den 9 - 10 april 1991 i Sundsvall. Korrosionsinstitutet, Stockholm 1991.
25. Foghelin, M & Johnsson, T: Rostskador på belysningsstolpar – en lägesredovisning. Rapport 5. FoU-gruppen för gator och trafik. Svenska Kommunförbundet, Stockholm 1987.
26. Foghelin, M & Johnsson, T: Rostskador på belysningsstolpar. Slutrapport etapp 1. Rapport 10. FoU-gruppen för gator och trafik. Svenska Kommunförbundet, Stockholm 1987.
27. Forssander, M: Stolpe slut. Planering och metoder för friska stolpar. Svenska Kommunförbundet, Stockholm 2004.
28. Johnsson, T & Andreasson, P: Rostskydd av belysningsstolpar. Deletapp 2, etapp 2. Resultat av upp till fem års fältundersökning. KI Rapport 1998:7. Korrosionsinstitutet, Stockholm 1998.
29. Johnsson, T: Rostskydd av belysningsstolpar. En fältundersökning. Förkortad version av KI Rapport 1998:7. KI Rapport 1998:8. Korrosionsinstitutet, Stockholm 1998.
30. Johnsson, T: Rostskydd av belysningsstolpar. Delrapport 1, etapp 2. Resultat av två års fältundersökning. Uppdragsrapport 53 712/2, 1990-03-10. I konferenspärm till konferensen *Korrosionsskydd av belysningsstolpar, master och liknande konstruktioner*, anordnad av Korrosionsinstitutet den 16 mars 1993 i Stockholm. Korrosionsinstitutet, Stockholm 1993.



31. Forssander, M: Korrosionsskydd av belysningsstolpar och spännstolpar. Resultat från exponering upp till 11,5 år. Slutrapport. KI Rapport 2003:1. Korrosionsinstitutet, Stockholm 2003.
32. Tomashov, N D: Theory of corrosion and protection of metals. MacMillan, New York 1966. Se särskilt kapitel XV Underground corrosion of metals.
33. Sederholm, B & Svensson, T & Vinka, T-G: Korrosion på metaller i jordar med olika surhetsgrad och vattenhalt. Rapport R7:1992. Byggforskningsrådet, Stockholm 1992.
34. Vinka, T-G & Camitz, G & Linder, H: Korrosion på vertikala stålstänger i jord med olika vattenhalt – Laboratorieundersökningar med luftningsceller och galvanisk korrosion. Rapport under utgivning vid Swerea KIMAB AB.
35. Ohsaki, Y: Corrosion of steel piles driven in soil deposits. Soils and Foundations vol. 22, nr 3, sid 57 - 76, 1982.
36. Bergdahl, U: Sydkraft AB. Korrosionsundersökningar på kraftledningsstolpar i jord, Etapp IV. Sammanställning av erfarenheter från Nässjö - Mörarp och Hornsö - Kalmar I. Dnr 2-314/81 (1990). Statens geotekniska institut, Linköping 1990.
37. Romanoff, M: Underground Corrosion. National Bureau of Standards Circular 579. United States Department of Commerce, National Bureau of Standards. U. S. Government Printing Office, Washington DC 1957. Se sid 39 - 49.  
(National Association of Corrosion Engineers (NACE), numera NACE International, har omtryckt och givit ut boken 1989: Romanoff, M: Underground Corrosion. NACE, Houston 1989.)
38. Forgeson, B W & Southwell, C R & Alexander, A L: Corrosion of metals in tropical environments. Part 3 – Underwater corrosion of ten structural steels. Corrosion 16(1960) sid 105t - 114t.
39. Southwell, C R & Alexander, A L: Corrosion of structural ferrous metals in tropical environments – Sixteen years' exposure to sea and fresh water. Proceedings of the 24th Conference of the National Association of Corrosion Engineers, Cleveland, Ohio, March 18 - 22, 1968, sid 685 - 695. National Association of Corrosion Engineers (NACE), Houston 1969.
40. Southwell, C R & Alexander, A L: Corrosion of metals in tropical waters – Structural ferrous metals. Materials Protection vol 9, nr 1, 1970, sid 14 - 23.
41. Hudson, J C & Stanners, J F & Hooper, R A E: Low-alloy Steels. I: Sheir, L L & Jarman, R A & Burstein, G T (eds.): Corrosion. Third edition. Volume 2, Kapitel 3.2, sid 3:23 - 3:33. Butterworth-Heinemann Ltd, Oxford 1994.
42. Revie, R W & Uhlig, H H: Corrosion and Corrosion Control. 4th edition. Wiley-Interscience (John Wiley & Sons, Inc., Publication), Hoboken, New Jersey 2008.

## Bilaga A:1 Kolstål SS 2120 från Nyhem

Tabell över med vattenvolymetermetoden beräknade värden på korrosionshastigheter för rör av kolstål SS 2120 (rör 76) på olika djup från Nyhem vid Sandviken.

Höjd i mätrör	Djup under markytan	Uppmätt massa för delsträcka	Massför- lust för delsträcka	Area för delsträcka	Korrosions- hastighet för delsträcka	Korrosions- hastighet för delsträcka
			$\Delta m_s$	$\Delta A$	$V_{korr}$	Medel- avfrätning
m	m	g	g	m <sup>2</sup>	$\frac{g}{m^2 \cdot \text{år}}$	$\mu\text{m}/\text{år}$
3,4	-0,52	421,88	81,00	0,01568	207,11	26,55
3,3	-0,42	504,13	-1,24	0,01508	-3,30	-0,42
3,2	-0,32	500,94	1,94	0,01508	5,17	0,66
3,1	-0,22	504,77	-1,88	0,01508	-5,01	-0,64
3,0	-0,12	504,70	-1,81	0,01508	-4,82	-0,61
2,9	-0,02	500,73	2,15	0,01508	5,72	0,73
2,8	0,08	504,57	-1,64	0,01508	-4,46	-0,57
2,7	0,18	477,98	24,91	0,01508	66,23	8,49
2,6	0,28	486,49	16,39	0,01508	43,60	5,59
2,5	0,38	480,96	21,92	0,01508	58,30	7,47
2,4	0,48	481,67	21,21	0,01508	56,41	7,23
2,3	0,58	492,52	10,36	0,01508	27,56	3,53
2,2	0,68	486,21	16,67	0,01508	44,33	5,68
2,1	0,78	493,94	8,94	0,01508	23,78	3,04
2,0	0,88	494,66	8,23	0,01508	21,88	2,80
1,9	0,98	493,81	9,08	0,01508	24,14	3,09
1,8	1,08	489,06	13,83	0,01508	36,77	4,71
1,7	1,18	495,23	7,65	0,01508	20,36	2,61
1,6	1,28	497,50	5,38	0,01508	14,32	1,83
1,5	1,38	498,21	4,67	0,01508	12,43	1,59
1,4	1,48	492,68	10,20	0,01508	27,13	3,47
1,3	1,58	498,85	4,03	0,01508	10,72	1,37
1,2	1,68	493,32	9,56	0,01508	25,42	3,25
1,1	1,78	496,38	6,51	0,01508	17,31	2,21
1,0	1,88	493,97	8,92	0,01508	23,71	3,04
0,9	1,98	497,02	5,86	0,01508	15,60	2,00
0,8	2,08	497,73	5,15	0,01508	13,71	1,75
0,7	2,18	489,86	13,02	0,01508	34,63	4,44
0,6	2,28	500,71	2,17	0,01508	5,78	0,74
0,5	2,38	493,62	9,26	0,01508	24,63	3,15
0,4	2,48	499,79	3,09	0,01508	8,22	1,05
0,3	2,58	491,92	10,96	0,01508	29,14	3,73
0,2	2,68	492,64	10,25	0,01508	27,25	3,49
0,1	2,78	488,72	14,17	0,01508	37,67	4,83

## Bilaga A:2 Kolstål SS 2120 från Närefors

Tabell över med vattenvolymetermetoden beräknade värden på korrosionshastigheter för rör av kolstål SS 2120 (rör 71) på olika djup från Närefors nära Lidköping

Höjd i mät rör	Djup under markytan	Uppmätt massa för delsträcka	Massför- lust för delsträcka	Area för delsträcka	Korrosions- hastighet för delsträcka	Korrosions- hastighet för delsträcka
			$\Delta m_s$	$\Delta A$	$V_{korr}$	Medel- avfrätning
m	m	g	g	m <sup>2</sup>	$\frac{g}{m^2 \cdot \text{år}}$	$\mu\text{m}/\text{år}$
< 3,4	- 1,7575	416,58	14,06	0,01342	42,02	5,38
3,3	- 1,665	497,89	8,74	0,01508	23,26	2,98
3,2	- 1,565	500,94	5,69	0,01508	15,14	1,94
3,1	- 1,465	501,65	4,98	0,01508	13,25	1,69
3,0	- 1,365	499,24	7,39	0,01508	19,66	2,52
2,9	- 1,265	496,83	9,80	0,01508	26,06	3,34
2,8	- 1,165	502,23	4,41	0,01508	11,73	1,50
2,7	- 1,065	501,38	5,26	0,01508	13,98	1,79
2,6	- 0,965	498,19	8,45	0,01508	22,46	2,88
2,5	- 0,865	505,14	1,49	0,01508	3,98	0,51
2,4	- 0,765	496,49	10,14	0,01508	26,98	3,45
2,3	- 0,665	500,32	6,31	0,01508	16,79	2,15
2,2	- 0,565	502,59	4,04	0,01508	10,75	1,37
2,1	- 0,465	495,50	11,13	0,01508	29,60	3,79
2,0	- 0,365	498,56	8,08	0,01508	21,49	2,75
1,9	- 0,265	497,71	8,93	0,01508	23,75	3,04
1,8	- 0,165	501,54	5,10	0,01508	13,56	1,73
1,7	- 0,065	489,77	16,86	0,01508	44,85	5,75
1,6	0,035	488,14	18,49	0,01508	49,18	6,30
1,5	0,135	470,91	35,72	0,01508	94,99	12,17
1,4	0,235	473,96	32,67	0,01508	86,88	11,13
1,3	0,335	473,11	33,52	0,01508	89,14	11,42
1,2	0,435	484,74	21,89	0,01508	58,21	7,46
1,1	0,535	482,34	24,30	0,01508	64,62	8,28
1,0	0,635	490,07	16,57	0,01508	44,06	5,64
0,9	0,735	487,66	18,98	0,01508	50,46	6,47
0,8	0,835	493,05	13,58	0,01508	36,13	4,63
0,7	0,935	493,76	12,87	0,01508	34,24	4,39
0,6	1,035	495,25	11,38	0,01508	30,27	3,88
0,5	1,135	489,72	16,91	0,01508	44,97	5,76
0,4	1,235	491,99	14,64	0,01508	38,93	4,99
0,3	1,335	498,16	8,47	0,01508	22,53	2,88
0,2	1,435	498,10	8,54	0,01508	22,71	2,91
0,1	1,535	501,20	5,44	0,01508	14,46	1,85

## Bilaga A:3 Kolstål SS 2120 från Åkerhög

Tabell över med vattenvolymetermetoden beräknade värden på korrosionshastigheter för rör av kolstål SS 2120 (rör 66) på olika djup från Åkerhög nära Kungälv.

Höjd i mätrör	Djup under markytan	Uppmätt massa för delsträcka	Massförlust för delsträcka	Beräknad diameter för delsträcka		Area för delsträcka	Korrosionshastighet för delsträcka	Korrosionshastighet för delsträcka
				$d_y$	$d_i$			
m	m	g	$\Delta m_s$	mm	mm	$\Delta A$	$V_{korr}$	Medelavfrätning
			g			$m^2$	$\frac{g}{m^2 \cdot \text{år}}$	$W_{korr}$
								$\mu m/\text{år}$
< 3,5	- 0,603	162,89	14,12	32,53	16,35	0,00588	96,28	12,34
3,4	- 0,535	484,38	21,37	32,53	16,35	0,01508	56,83	7,29
3,3	- 0,435	464,88	40,87	32,15	16,58	0,01508	108,68	13,93
3,2	- 0,335	496,08	9,67	32,61	15,92	0,01508	25,72	3,30
3,1	- 0,235	499,20	6,55	32,51	15,55	0,01508	17,43	2,23
3,0	- 0,135	504,66	1,09	32,45	15,14	0,01508	2,91	0,37
2,9	- 0,035	462,54	43,21	31,31	15,01	0,01508	114,91	14,73
2,8	0,065	454,74	51,01	31,41	15,64	0,01508	135,65	17,39
2,7	0,165	497,64	8,11	32,33	15,26	0,01508	21,58	2,77
2,6	0,265	494,52	11,23	32,37	15,51	0,01508	29,87	3,83
2,5	0,365	489,06	16,69	32,05	15,14	0,01508	44,39	5,69
2,4	0,465	456,30	49,45	31,45	15,64	0,01508	131,50	16,86
2,3	0,565	479,70	26,05	31,86	15,22	0,01508	69,28	8,88
2,2	0,665	483,6	22,15	31,96	15,22	0,01508	58,91	7,55
2,1	0,765	498,42	7,33	32,37	15,31	0,01508	19,50	2,50
2,0	0,865	485,16	20,59	32,03	15,31	0,01508	54,76	7,02
1,9	0,965	471,90	33,85	31,84	15,59	0,01508	90,02	11,54
1,8	1,065	460,20	45,55	31,37	15,26	0,01508	121,13	15,53
1,7	1,165	476,58	29,17	31,88	15,43	0,01508	77,57	9,95
1,6	1,265	463,32	42,43	31,43	15,22	0,01508	112,83	14,47
1,5	1,365	478,92	26,83	31,90	15,35	0,01508	71,35	9,15
1,4	1,465	475,80	29,95	31,84	15,39	0,01508	79,65	10,21
1,3	1,565	492,96	12,79	32,25	15,35	0,01508	34,02	4,36
1,2	1,665	472,68	33,07	31,66	15,18	0,01508	87,94	11,27
1,1	1,765	477,36	28,39	32,13	15,92	0,01508	75,50	9,68
1,0	1,865	481,26	24,49	32,05	15,55	0,01508	65,13	8,35
0,9	1,965	471,12	34,63	31,59	15,14	0,01508	92,09	11,81
0,8	2,065	465,66	40,09	31,61	15,47	0,01508	106,61	13,67
0,7	2,165	483,60	22,15	31,94	15,18	0,01508	58,91	7,55
0,6	2,265	475,80	29,95	31,78	15,26	0,01508	79,65	10,21
0,5	2,365	482,82	22,93	32,03	15,43	0,01508	60,98	7,82
0,4	2,465	486,72	19,03	32,01	15,18	0,01508	50,61	6,49
0,3	2,565	472,68	33,07	31,66	15,18	0,01508	87,94	11,27
0,2	2,665	467,22	38,53	31,53	15,22	0,01508	102,46	13,14
0,1	2,765	474,29	31,46	31,66	15,10	0,01568	80,44	10,31

## Bilaga A:4 Låglegerat stål SS 2225 från Åkerhög

Tabell över med vattenvolymetermetoden beräknade värden på korrosionshastigheter för rör av låglegerat stål SS 2225 (rör 21) på olika djup från Åkerhög nära Kungälv.

Höjd i mättrör	Djup under markytan	Uppmätt massa för del- sträcka	Mass- förlust för del- sträcka	Beräknad diameter för delsträcka		Area för delsträcka	Korrosions- hastighet för delsträcka	Korrosions- hastighet för delsträcka
				$\Delta m_s$	$d_y$			
m	m	g	g	mm	mm	m <sup>2</sup>		
< 3,5	- 0,565	436,56	12,18	32,61	16,43	0,01417	34,45	4,42
3,4	- 0,47	485,94	12,65	32,61	16,43	0,01508	33,64	4,31
3,3	- 0,37	484,38	14,21	32,27	15,84	0,01508	37,79	4,85
3,2	- 0,27	496,08	2,51	32,61	15,92	0,01508	6,68	0,86
3,1	- 0,17	496,86	1,73	32,51	15,68	0,01508	4,61	0,59
3,0	- 0,07	498,42	0,17	32,49	15,55	0,01508	0,46	0,06
2,9	0,03	418,86	79,73	30,49	15,68	0,01508	212,01	27,18
2,8	0,13	471,12	27,47	31,66	15,26	0,01508	73,05	9,37
2,7	0,23	471,90	26,69	31,82	15,55	0,01508	70,98	9,10
2,6	0,33	439,14	59,45	31,00	15,64	0,01508	158,08	20,27
2,5	0,43	427,44	71,15	30,70	15,64	0,01508	189,19	24,26
2,4	0,53	408,72	89,87	30,17	15,59	0,01508	238,97	30,64
2,3	0,63	446,94	51,65	31,21	15,64	0,01508	137,34	17,61
2,2	0,73	454,74	43,85	31,39	15,59	0,01508	116,60	14,95
2,1	0,83	379,08	119,51	29,10	15,10	0,01508	317,78	40,74
2,0	0,93	385,32	113,27	29,66	15,84	0,01508	301,19	38,61
1,9	1,03	407,94	90,65	30,13	15,55	0,01508	241,04	30,90
1,8	1,13	463,32	35,27	31,47	15,31	0,01508	93,79	12,02
1,7	1,23	472,68	25,91	32,15	16,20	0,01508	68,90	8,83
1,6	1,33	474,24	24,35	31,57	14,93	0,01508	64,75	8,30
1,5	1,43	479,70	18,89	32,01	15,55	0,01508	50,24	6,44
1,4	1,53	478,92	19,67	32,09	15,76	0,01508	52,31	6,71
1,3	1,63	492,18	6,41	32,31	15,51	0,01508	17,05	2,19
1,2	1,73	468,78	29,81	31,70	15,47	0,01508	79,27	10,16
1,1	1,83	478,14	20,45	31,94	15,47	0,01508	54,38	6,97
1,0	1,93	489,06	9,53	32,11	15,26	0,01508	25,35	3,25
0,9	2,03	476,58	22,01	31,86	15,39	0,01508	58,53	7,50
0,8	2,13	475,02	23,57	31,92	15,59	0,01508	62,68	8,04
0,7	2,23	496,86	1,73	32,05	14,71	0,01508	4,61	0,59
0,6	2,33	471,12	27,47	31,92	15,80	0,01508	73,05	9,37
0,5	2,43	478,92	19,67	31,86	15,26	0,01508	52,31	6,71
0,4	2,53	482,04	16,55	32,00	15,39	0,01508	44,01	5,64
0,3	2,63	473,46	25,13	31,90	15,64	0,01508	66,83	8,57
0,2	2,73	459,42	39,17	31,29	15,14	0,01508	104,16	13,35
0,1	2,83	422,03	76,56	30,47	15,47	0,01568	195,75	25,10

## Bilaga A:5 Låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo från Åkerhög

Tabell över med vattenvolymetermetoden beräknade värden på korrosionshastigheter för rör av låglegerat stål 1,3Cr-3Ni-0,2Mo (rör 38) på olika djup från Åkerhög nära Kungälv.

Höjd i mätrör	Djup under markytan	Uppmätt massa för delsträcka	Massförlust för delsträcka	Beräknad diameter för delsträcka		Area för delsträcka	Korrosionshastighet för delsträcka	Korrosionshastighet för delsträcka
				$\Delta m_s$	$d_y$			
m	m	g	g	mm	mm	m <sup>2</sup>		
< 3,5	-0,52	580,77	-3,19	32,33	9,77	0,01362	-9,40	-1,20
3,4	-0,42	581,88	-4,30	32,33	9,77	0,01288	-13,39	-1,72
3,3	-0,32	576,42	1,16	31,94	8,88	0,01288	3,60	0,46
3,2	-0,22	580,32	-2,74	32,27	9,71	0,01288	-8,54	-1,09
3,1	-0,12	583,44	-5,86	32,23	9,30	0,01288	-18,25	-2,34
3,0	-0,02	546,00	31,58	31,29	9,37	0,01288	98,30	12,60
2,9	0,08	359,58	218,00	25,76	8,74	0,01288	678,61	87,00
2,8	0,18	524,94	52,64	30,78	9,51	0,01288	163,86	21,01
2,7	0,28	572,52	5,06	32,01	9,51	0,01288	15,74	2,02
2,6	0,38	574,08	3,50	31,92	9,03	0,01288	10,89	1,40
2,5	0,48	574,86	2,72	32,09	9,57	0,01288	8,46	1,08
2,4	0,58	573,30	4,28	31,80	8,67	0,01288	13,32	1,71
2,3	0,68	567,84	9,74	32,00	9,84	0,01288	30,31	3,89
2,2	0,78	570,96	6,62	31,47	7,65	0,01288	20,60	2,64
2,1	0,88	580,32	-2,74	32,57	10,65	0,01288	-8,54	-1,09
2,0	0,98	572,52	5,06	31,96	9,30	0,01288	15,74	2,02
1,9	1,08	572,52	5,06	32,05	9,64	0,01288	15,74	2,02
1,8	1,18	568,62	8,96	31,76	8,96	0,01288	27,88	3,57
1,7	1,28	579,54	-1,96	32,00	8,81	0,01288	-6,11	-0,78
1,6	1,38	564,72	12,86	31,78	9,37	0,01288	40,03	5,13
1,5	1,48	569,40	8,18	31,98	9,64	0,01288	25,46	3,26
1,4	1,58	574,08	3,50	31,92	9,03	0,01288	10,89	1,40
1,3	1,68	588,90	-11,32	32,43	9,51	0,01288	-35,25	-4,52
1,2	1,78	563,94	13,64	31,74	9,30	0,01288	42,45	5,44
1,1	1,88	573,30	4,28	32,01	9,44	0,01288	13,32	1,71
1,0	1,98	589,68	-12,10	32,27	8,88	0,01288	-37,67	-4,83
0,9	2,08	571,74	5,84	31,88	9,10	0,01288	18,17	2,33
0,8	2,18	577,98	-0,40	31,96	8,81	0,01288	-1,25	-0,16
0,7	2,28	582,66	-5,08	32,17	9,17	0,01288	-15,82	-2,03
0,6	2,38	568,62	8,96	32,01	9,84	0,01288	27,88	3,57
0,5	2,48	549,90	27,68	31,27	8,96	0,01288	86,16	11,05
0,4	2,58	578,76	-1,18	32,03	9,03	0,01288	-3,68	-0,47
0,3	2,68	532,74	44,84	30,84	9,03	0,01288	139,58	17,89
0,2	2,78	528,84	48,74	30,86	9,44	0,01288	151,72	19,45
0,1	2,88	519,53	58,05	30,51	9,10	0,01362	170,87	21,91

# Bilaga B:1 - B:3 Sammanställning av laboratorieundersökningar av jorden på provningsplatserna

Bilaga I



**RAPPORT**

utfärdad av ackrediterat laboratorium  
REPORT is issued by an Accredited Laboratory

P:1

## SAMMANSTÄLLNING AV LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR

KI STÅLPÅLEKORROSION							Tabell	3
							Dnr	1-9412-599
Provningsdatum	Provningsareal	Laboratorieundersökning		Utförd av		Datum		
		Datum				950329		
							Teknisk ledare	<i>Anders-Maj Kallén</i>
Sektion/ Borrhål/ Djup	Benämning enligt 1981 års system	Densitet ρ t/m <sup>3</sup>	Vä- ten- kvot w %	Prov temp °C	pH	Resi- sitivitet Ohm.m	Jordartsbeteckning (Anmärkning)	
	<u>ÅKERHÖG</u>							
0,2	GRÅ, MULLHALTIG, SANDIG, SILTIG LERA MED RIKLIGT MED VÄXTDELAR, ROST-FLÄCKIG						mu sa si Le vx Korn. Diagram 3	
0,5	GRÅ LERA MED SKAL OCH VÄXTDELAR						Le sk vx	
0,6-1,0	GRÅ, SILTIG LERA MED RIKLIGT MED SKAL OCH VÄXTDELAR			16,8		3,6	si Le sk vx	
1,1-1,5	GRÅ, SILTIG LERA MED SKAL OCH ROT-TRÄDAR			16,8		3,3	si Le sk vx	
1,6-2,0	GRÅ LERA MED SKAL			16,5		2,4	Le sk	
2,1-2,5	GRÅ LERA MED SKAL			17,9		2,1	Le sk	
2,6-3,0	GRÅ LERA MED SKAL			16,4		1,9	Le sk	

\* Resistiviteten bestäms med Soil-box-metoden. Fötsöken är utförda på naturlig vattenkvot.

Akrediterat laboratorium utses av Styrelsen för teknisk ackreditering (SWEDAC) enligt lag. Verksamheten vid de svenska ackrediterade laboratorier uppfyller kraven enligt SS-EN 45 001.

Den här rapport får endast återges i sin helhet, om inte SWEDAC och utfärdande laboratorium i förväg skriftligen godkänt annat.

**Statens geotekniska institut**

581 93 Linköping, Telefon 013-11 51 00, Telefax 013-13 16 96

**SAMMANSTÄLLNING AV LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR**

KI STÅLPÅLEKORROSION							Tabell	1
							Dnr	1-9412-599
Provtagningsdatum:	Provtagningsredskap	Laboratorieundersökning		Utförd av		Datum	950329	
		Datum	950301-0323		ML	I-MK	Teknisk ledare <i>Jenny-Maj Kallén</i>	
Sektion/ Borrhål/ Djup	Beskrivning enligt 1981 års system	Densitet p t/m <sup>3</sup>	Vätskvot w %	Provtemp. °C	pH	Resistivitet Ohm.m	Jordartsbenämning (Anmärkning)	
0,2	<u>NÄREPCRS</u> BRUN, MULLHALTIG, SANDIG, LERIG SILT MED VÄXTDELAR						mu sa le Si vx Korn. Diagram 1	
0,3-0,7	BRUNGRÅ, SILTIG LERA OCH LERIG SILT MED VÄXTDELAR, ROSTFLÄCKIG						si Le ls Si vx	
0,8-1,2	GRÅ, LERIG SILT MED RÖTTRÄDAR, ROST- FLÄCKIG						le Si vx	
1,4-1,8	GRÅ, SILTIG LERA MED VÄXTDELAR			18,3		13,6	si Le vx	
2,0-2,4	GRÅ, SANDIG, SILTIG LERA MED VÄXT- DELAR			19,6		7,6	sa si Le vx	

\* Resistiviteten bestämd med Soil-box-metoden. Fölestiken är utförd på naturlig vattenkvot.

Accrediterat laboratorium utses av Styrelsen för teknisk ackreditering (SWEDAC) enligt lag.  
 Verksamheten vid de svenska ackrediterade laboratorierna uppfyller kraven enligt SS-EN 45 001.

Denna rapport får endast återges i sin helhet, om inte SWEDAC och  
 utfärdande laboratorium i förväg skriftligen godkänt annat.

**Statens geotekniska institut**

581 93 Linköping, Telefon 013-11 51 00, Telefax 013-13 16 96



**SAMMANSTÄLLNING AV LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR**

KI STÅLPÅLEKORROSION						Tabell	2
						Drz	1-9412-599
Provtagningsdatum		Provtagningsredskap		Laboratorieundersökning		Datum	
				Datum		950329	
				Utförd av		Teknisk ledare	
				950301-0323 ML I-MK		Jonas-Maj Kivler	
Sektion/ Borrhål/ Djup	Benämning enligt 1981 års system	De- stet p u/m <sup>2</sup>	Vat- ten- kvot w %	Prov temp. °C	pH	Resi- tivitet Ohm.m	Joedartsbenämning (Anmärkning)
	<u>SANDVIKEN</u>						
0,2	BRUN, SANDIG, SILTIG MULLJORD MED VÄXTDELAR						ss si Mu vx Korn. Diagram 2
0,3-0,7	BRUN, GYTTJIG SILT MED VÄXTDELAR						gy si vx
0,8-1,2	BRUN, NÅGOT GYTTJIG SILT						(gy) Si
1,3-1,7	GRÅ, NÅGOT GYTTJIG SILT, ROSTFLÄCKIG						(gy) Si
1,8-2,2	GRÅ, NÅGOT GYTTJIG SILT MED VÄXTDELAR			16,0		142	(gy) Si vx
2,3-2,7	BRUN, GYTTJIG SILT MED VÄXTDELAR			15,2		132	gy Si vx
2,8-3,2	BRUN, GYTTJIG SILT MED VÄXTDELAR, ROSTFLÄCKIG			16,3		115	gy Si vx

\* Resistiviteten bestämd med Soil-box-metoden. Försöken är utförda på naturlig vattenkvot.

Ackrediterat laboratorium utses av Styrelsen för teknisk ackreditering (SWEDAC) enligt lag. Verksamheten vid de svenska ackrediterade laboratorerna uppfyller kraven enligt SS-EN 45 001.

Denna rapport får endast återges i sin helhet, om inte SWEDAC och utfärdande laboratorium i förväg skriftligen godkänt annat.

**Statens geotekniska institut**

581 93 Linköping, Telefon 013-11 51 00, Telefax 013-13 16 96

# Bilaga B:4 Resultat av laboratorieundersökningar av jorden på provningsplatserna: pH-värde, vattenkvot, kloridhalt och organisk halt



**RAPPORT** Bilaga B:4  
utfärdad av ackrediterat laboratorium  
REPORT is issued by an Accredited Laboratory

## SAMMANSTÄLLNING AV LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR

Projekt : KI STÅLPÅLEKORROSION			Enr	1-9412-599
			Miljénr.	5013
Beställare	Registrerad Datum	Lab.undersökning utförd Datum	Av	Utfärdad Datum
Korrosionsinstitutet	950112	9502-05	LFr, CT	951219
				Teknisk ledare
				Bett Snell

Provbeteckning / Parameter	pH ( H <sub>2</sub> O)	Vattenkvot %	Klorid mg/ kg torr jord	Organisk halt %	Anm.
	SS ISO 10390	SS 027116-3		SS 027107-3	
Närefors 0,2 m	5,6	25	44	3,3	
Närefors 0,3-0,7 m	6,4	18	11		
Närefors 0,8-1,2 m	6,7	19	11		
Närefors 1,4-1,8 m	3,9	40	<10		
Närefors 2,0-2,4 m	3,3	35	11		
Sandviken 0,2 m	4,4	75	10	13,9	
Sandviken 0,3-0,7 m	4,6	42	<10		
Sandviken 0,8-1,2 m	4,9	38	<10		
Sandviken 1,3-1,7 m	4,9	31	<10		
Sandviken 1,8-2,2 m	4,9	38	<10		
Sandviken 2,3-2,7 m	4,9	52	<10		
Sandviken 2,8-3,2 m	4,6	67	53		
Åkerhög 0,2 m	7,5	33	2120	2,4	
Åkerhög 0,5 m	7,3	40	2030		
Åkerhög 0,6-1,0 m	7,4	30	1790		
Åkerhög 1,1-1,5 m	7,8	44	2300		
Åkerhög 1,6-2,0 m	7,7	67	3710		
Åkerhög 2,1-2,5 m	7,7	58	3600		
Åkerhög 2,6-3,0 m	7,9	73	4620		

### Metoder :

Klorid är utförd med upplösning enl. SGI handledning och analys enl. SS 028120-1

Akrediterat laboratorium utses av Styrelsen för teknisk ackreditering (SWEDAC) enligt lag. Verksamheten vid de svenska ackrediterade laboratorierna uppfyller kraven enligt SS-EN 45 001.

Denna rapport får endast återges i sin helhet, om inte SWEDAC och utförande laboratorium i förväg skriftligen godkänt annat.

**Statens geotekniska institut**  
581 93 Linköping, telefon 013-20 18 00, telefax 013-20 19 14

# Bilaga B:5 Resultat av laboratorieundersökningar av jorden på provningsplatserna: resistivitet med instickselektrod

Bilaga 2

SGI

Bilaga B:5

## SAMMANSTÄLLNING AV LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR

Projekt : STÄLPÅLEKORROSION			Dnr	1-9412-599
			Målslab.nr	
Beställare	Registrerad Datum	Lab.undersökning utförd Datum	Utfördad Datum	950630
	9504	9505 Av L.Fr	Teknisk ledare	Björn Anell

Provbeteckning	Resistivitet ohm.m	Metod
Närefors 0,2 m	23,2	Utfört med instickselektrod vid 23 °C
Närefors 0,3-0,7 m	23,5	" "
Närefors 0,8-1,2 m	39,3	" "
Sandviken 0,2 m	28,1	" "
Sandviken 0,3-0,7 m	28,8	" "
Sandviken 0,8-1,2 m	43,8	" "
Sandviken 1,3-1,7 m	51,2	" "
Åkerhög 0,2 m	2,32	" "
Åkerhög 0,5 m	2,53	" "

# Bilaga B:6 - B:8 Jordens kornstorleksfördelning på provningsplatserna

SGFs laboratoriekommitté  
Laboratorianvisningar, del 2 o. 4

Kornfördelning  
Fraktionsindelning 198

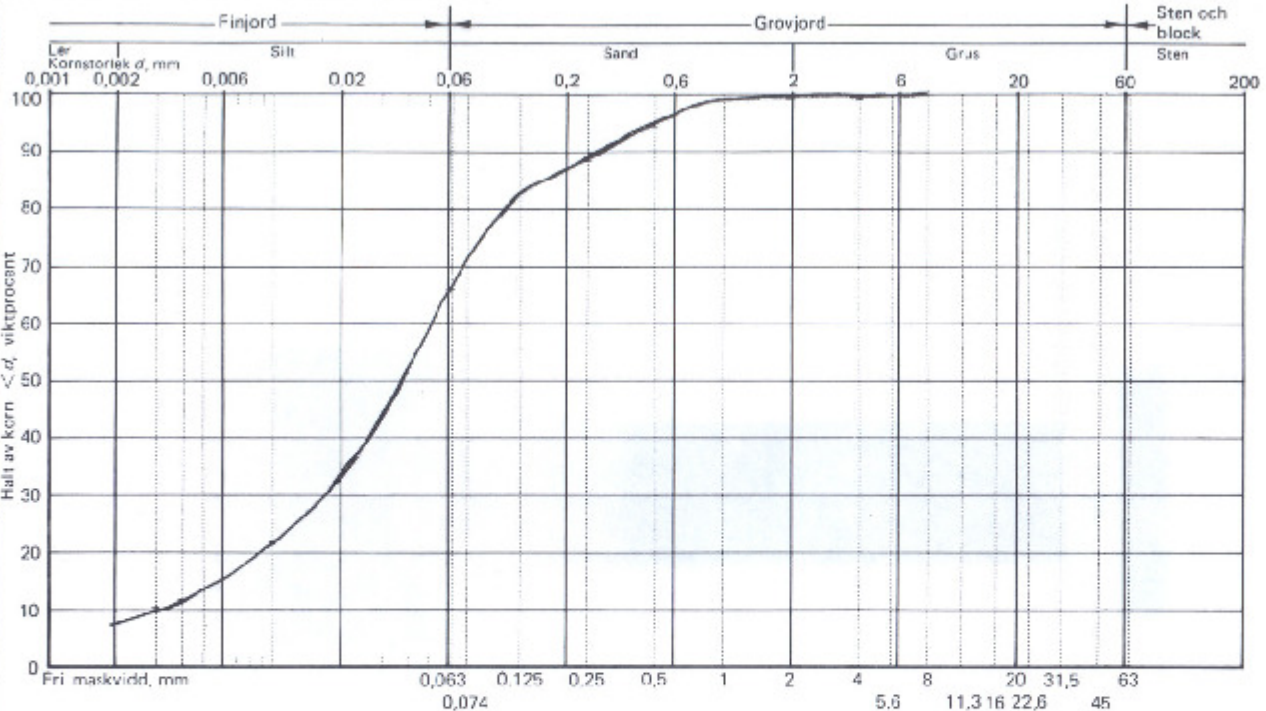
Bilaga 3

B:6  
1-9412-599

Diagram 1

Avsändare <i>K1 Stålpåle Korslösa</i>		Beskrivning eller provets märkning <i>NAVE 10003</i>	Prov nr
Prov nr		Beskrivning eller provets märkning	Prov nr
Prov nr		Beskrivning eller provets märkning	Prov nr
Prov nr		Beskrivning eller provets märkning	Prov nr

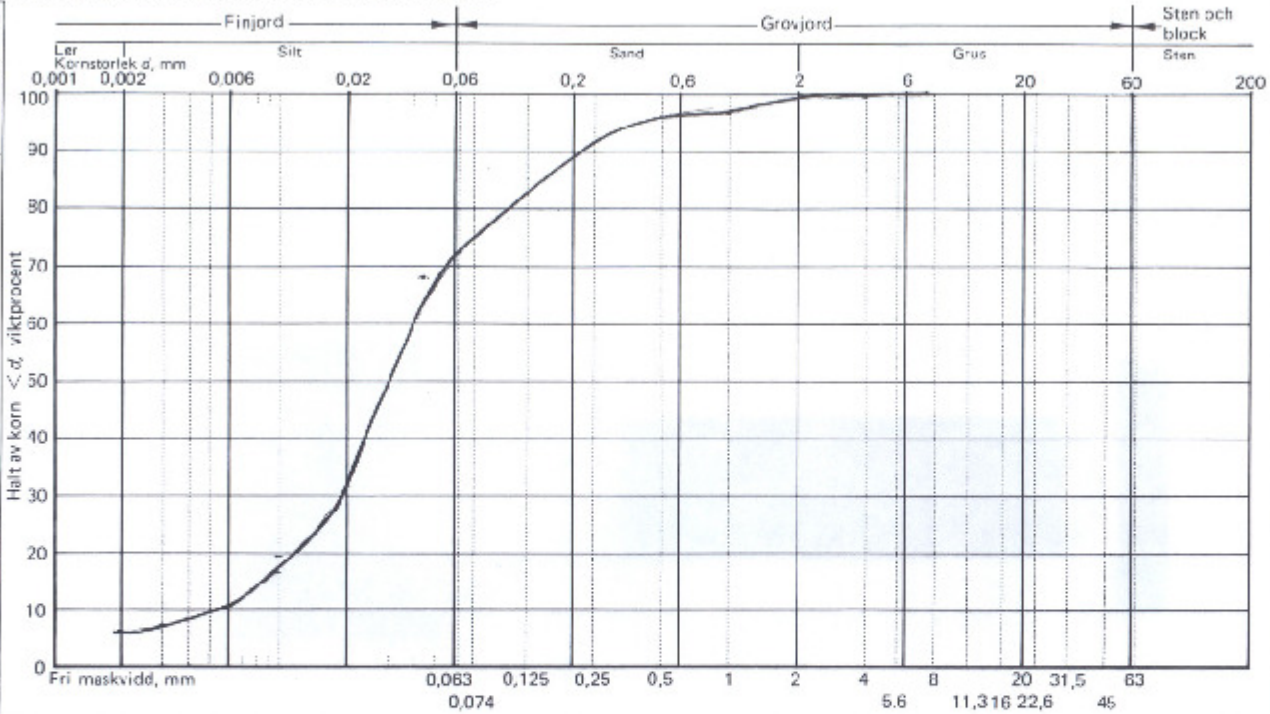
SGF nr 112, 1981.2, (82.05) 1580 A 100 sk. © Svenska Geotekniska Förbundet. S28 Väg 82763



Prov nr	Siktning			Sedimentering					Graderings- tal C <sub>u</sub> - d <sub>60</sub> /d <sub>10</sub>	Spjälkethets- grupp	
	Totalt lab. prov g	Siktad provmängd, g		Största korn- storlek, mm	Halt av mlr □ > 60 mm, % □ > 20 mm, %	Provmängd g	Provnings- metod	Förbehandling			
519	261			0	99	Hydrometer <input checked="" type="checkbox"/>	Humus <input type="checkbox"/>	Järn <input type="checkbox"/>	Såber <input type="checkbox"/>	12	

Prov nr	Beskrivning av material □ < 20 mm X < 20 mm	Tilläggsbeskrivning enligt □ totalt laboratoriekprov □ fältobservation	Anmärkning
	<i>mu sa te Si</i>		<i>ORB-NALT 3.2%</i>

Ort och datum: *Stenlöpsås 950329*  
Signatur: *UB*



Östern datum *Stenköpang 950329*

Signatur *Mu*

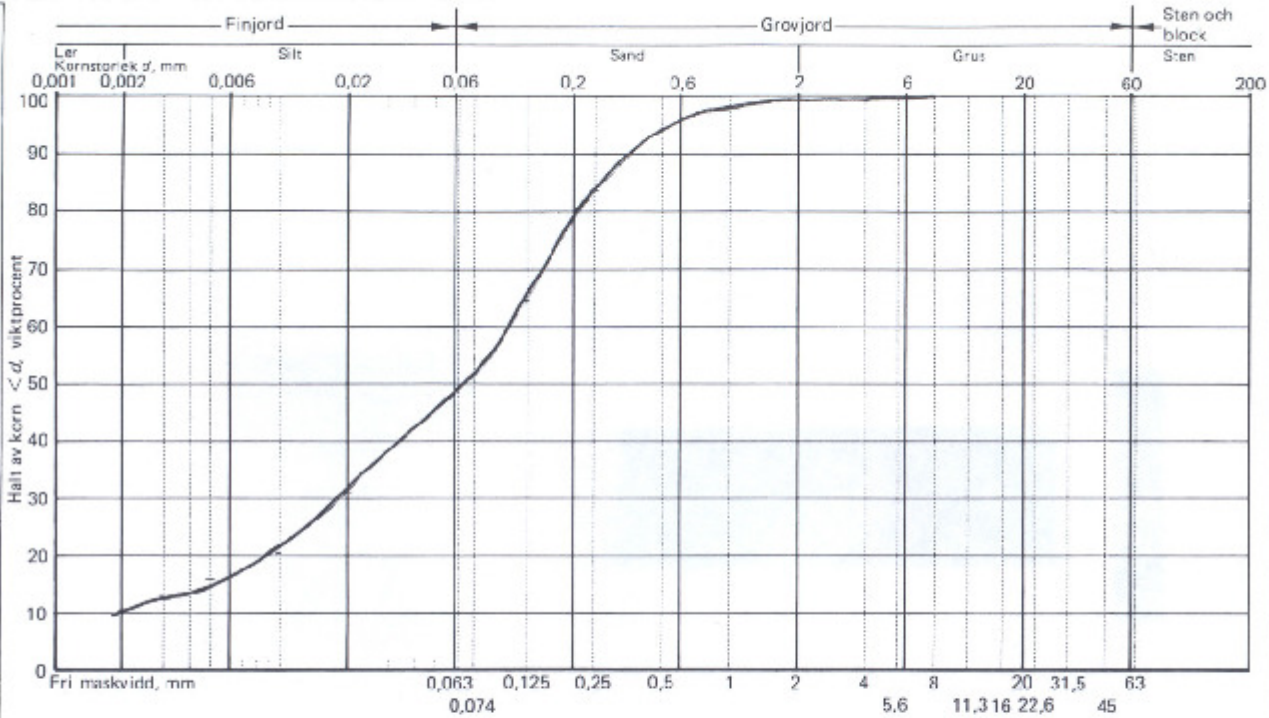
Prov nr	Siktning			Halt av mlr □ >60 mm, % □ >20 mm, %	Provmängd g	Provningsmetod <input type="checkbox"/> Hydrometer <input checked="" type="checkbox"/> Viskrosop <input type="checkbox"/> Pipett	Förbehandlning			Lerhalt % av mlr <0.06 mm	Grunderings- tal C <sub>u</sub> = d <sub>60</sub> /d <sub>10</sub>	Själfbärighets- grupp
	Totalt labprov g	Siktad provmängd g <60 mm	Siktad provmängd g <20 mm				Humus	Åkn	Sjober			
	526	251		0	80	<input type="checkbox"/> Hydrometer <input checked="" type="checkbox"/> Viskrosop <input type="checkbox"/> Pipett	<input type="checkbox"/> Humus <input type="checkbox"/> Åkn <input type="checkbox"/> Sjober	<input type="checkbox"/> Humus <input type="checkbox"/> Åkn <input type="checkbox"/> Sjober	9.7			

Prov nr	Beskrivning av material <input type="checkbox"/> <60 mm <input checked="" type="checkbox"/> <20 mm	Tilläggsbeskrivning enligt <input type="checkbox"/> total laboratorieprov <input type="checkbox"/> observation	Anmärkning
	<i>sa si Mu</i>		<i>ORDBILT 14%</i>

Använd	
Prov nr	<i>K1 Stenköpangs korrision</i>
Provningsplats eller provets räkning	<i>SANDVIKEN</i>
Bortfall eller provgrupp	
Provningsdjup eller nivå	<i>0,2</i>

SGFS laboratoriekommitté  
 Laboratorierapportering, del 2 o. 4  
 Bilaga 3  
 Kornfördelning  
 Fraktionsindelning 198  
 Diagram 2

Öst och datum: *Älvköpings 950329* Signatur: *ML*



Prov nr	Siktning				Sedimentering					Graderings- tal $C_u = d_{60}/d_{10}$	Tjällfärdighets- grupp		
	Totalt kg prov/g	Siktad provmängd, g		Största kom- ponent, mm	Halt av ml <input type="checkbox"/> >60 mm, % <input type="checkbox"/> >20 mm, %	Provmängd g	Frovnings- metod	Förbehandling				Lerhalt % av ml <0.06 mm	
		<60 mm	<20 mm					Humus	Jäm				Salter
1170		287		0	92	<input type="checkbox"/> Hydrometer <input checked="" type="checkbox"/> Slagtrapp <input type="checkbox"/> Pipett	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	21			

Prov nr	Beräkning av material <input type="checkbox"/> <60 mm <input checked="" type="checkbox"/> <20 mm	Tjällpostimering enligt <input type="checkbox"/> avseende laboratorier och <input type="checkbox"/> till observation	Anmärkning
	<i>mu sa site</i>		<i>ORG-HALT 2.5%</i>

Ärende	Provnr	Borrhål eller provgrop	Provsigtning
<i>K1 Stålpåle korrosion</i>	<i>ARREAB6</i>		<i>0,2 m</i>

SGFs laboratoriekommitté  
Laboratorieanvisningar del 2 o. 4

*Diagram 3*

*1318* Bilaga 3  
*1-9412-5999*  
Kornfördelning  
Fraktionsindelning 198