

Genomfrätningar på kopparrör

– orsaker, undersökningsmetoder och
motåtgärder

Tor-Gunnar Vinka



VA-Forsk

VA-Forsk är kommunernas eget FoU-program om kommunal VA-teknik. Programmet finansieras i sin helhet av kommunerna, vilket är unikt på så sätt att statliga medel tidigare alltid använts för denna typ av verksamhet. FoU-avgiften är för närvarande 1,05 kronor per kommuninnevånare och år. Avgiften är frivillig. Nästan alla kommuner är med i programmet, vilket innebär att budgeten årligen omfattar drygt åtta miljoner kronor.

VA-Forsk initierades gemensamt av Kommunförbundet och Svenskt Vatten. Verksamheten påbörjades år 1990. Programmet lägger tonvikten på tillämpad forskning och utveckling inom det kommunala VA-området. Projekt bedrivs inom hela det VA-tekniska fältet under huvudrubrikerna:

Dricksvatten
Ledningsnät
Avloppsvattenrening
Ekonomi och organisation
Utbildning och information

VA-Forsk styrs av en kommitté, som utses av styrelsen för Svenskt Vatten AB. För närvarande har kommittén följande sammansättning:

Ola Burström, ordförande
Roger Bergström
Bengt Göran Hellström
Staffan Holmberg
Pär Jönsson
Peeter Maripuu
Stefan Marklund
Peter Stahre
Jan Söderström

Skellefteå
Svenskt Vatten AB
Stockholm Vatten AB
Haninge
Östersund
Vaxholm
Luleå
VA-verket Malmö
Sv kommunförbundet

Asle Aasen, adjungerad
Thomas Hellström, sekreterare

NORVAR, Norge
Svenskt Vatten AB

Författaren är ensam ansvarig för rapportens innehåll, varför detta ej kan åberopas såsom representerande Svenskt Vattens ståndpunkt.

VA-Forsk
Svenskt Vatten AB
Box 47607
117 94 Stockholm
Tfn 08-506 002 00
Fax 08-506 002 10
E-post svensktvatten@svensktvatten.se
www.svensktvatten.se

Svenskt Vatten AB är servicebolag till föreningen Svenskt Vatten.

Rapportens titel:	Genomfrätningar på kopparrör – orsaker, undersökningsmetoder och motåtgärder
Title of the report:	Corrosion damage on copper pipes – causes, investigation methods and preventive measures
Rapportens beteckning Nr i VA-Forsk-serien:	2003-26
ISSN-nummer:	1102-5638
ISBN-nummer:	91-89182-90-1
Författare:	Tor-Gunnar Vinka, Korrosionsinstitutet, Stockholm
VA-Forsk projekt nr:	95-123
Projektets namn:	Korrosionsförlopp och utveckling av biofilm på kopparrör i dricksvatten
Projektets finansiering:	VA-Forsk, Nutek, Outokumpu Copper AB, Sävsjö kommun
Rapportens omfattning Sidantal:	26
Format:	A4
Sökord:	Kopparrör, tappvatten, korrosion, gropfrätning, biofilm, lödning
Keywords:	Copper pipes, tap water, corrosion, pitting corrosion, biofilms, brazing
Sammandrag:	Rapporten behandlar genomfrätningar på kopparrör på grund av korrosion. Orsaker till korrosionsangrepp, undersökningsmetoder av skadefall och motåtgärder tas upp. Olika typer av gropfrätning, erosionskorrosion och korrosionsutmattning beskrivs. Undersökningsmetodiken för skadefall beskrivs och olika analyser av kopparrör tas upp. I rapporten redogörs för motåtgärder mot korrosionsangrepp. Inverkan av bland annat vattnets sammansättning och temperatur samt täthetsprovning och lödning av rörssystem behandlas.
Abstract:	Corrosion damage on copper pipes is discussed in the report. Causes of corrosion attack, investigation methods for damage cases and preventive measures are considered. Different pitting types, erosion corrosion, and corrosion fatigue are described. Routines and methods for investigation of corrosion damage on copper pipes, and different analyses for copper pipes as well as preventive measures against corrosion are presented. The influence of water composition and temperature, and test for leaks, as well as of brazing of the pipe system is discussed.
Målgrupper:	Förvaltare av vattenledningsnät i byggnader, VA-tekniker, VA-konsulter, VA-entreprenörer, tillverkare av kopparrör, försäkringsbolag
Omslagsbild:	Frätgrop på kopparrör. Foto Mats Linder, Korrosionsinstitutet
Rapporten beställs från:	Finns att hämta hem som PDF-fil från Svenskt Vattens hemsida www.svensktvatten.se
Utgivningsår:	2003
Utgivare:	Svenskt Vatten AB © Svenskt Vatten AB

Sammanfattning

Koppar används i mycket stor omfattning som material i vattenledningsrör. Detta gäller i stora delar av världen och i hög grad i Sverige. En av anledningarna är kopparens mycket goda korrosionshårdighet i vattenledningssystemen. Med tanke på den sammanlagda längden installerade kopparrör är antalet korrosionsskador litet, men under vissa betingelser kan genomfrätningar och sprickor uppstå i kopparrör.

I rapporten behandlas genomfrätningar på kopparrör på grund av korrosion. Orsaker till korrosionsangreppen, undersökningsmetoder av skadefall och motåtgärder taggs upp.

Följande korrosionsskador beskrivs: traditionell gropfrätning, ovanlig gropfrätning, gropfrätning orsakad av olämplig lötning, lokala korrosionsangrepp under avlagringar, erosionskorrosion och korrosionsutmattning. Under de senaste åren har man i ökad omfattning observerat gropfrättningsfall i samband med så kallad biofilm i kopparrör samt i kopparrör med hög halt kisel i korrosionsprodukterna eller med en silikatfilm på insidan av rören. Dessa nya och ganska ovanliga gropfrätningstyper behandlas också i rapporten.

Undersökningsmetodiken för skadefall på kopparrör beskrivs ingående. Olika analyser av kopparrör taggs upp: bestämning av koltal och förekomst av kolfilm, förekomst och analys av biofilm samt förekomst av andra filmer på rörytan, till exempel silikatfilm.

I ett särskilt kapitel i rapporten redogörs för motåtgärder mot korrosionsangrepp. Här behandlas: krav på kolmängd på insidan av kopparrör, rekommenderad sammansättning hos vattnet, täthetsprovning av rörsystem, temperatur hos vattnet samt lötning och installation av kopparrör. Inverkan av vattnets sammansättning och temperatur och täthetsprovning och lötning av rörsystem betonas.

Summary

Copper is widely used for water pipes in large parts of the world and particularly in Sweden. The high corrosion resistance of copper in tap water is one reason for this. Considering the total length of installed copper pipes, cases of corrosion damage are rare, but in certain circumstances pitting and cracking of copper pipes may occur.

The report discusses pitting damage due to corrosion on copper pipes. The causes of the corrosion attack, investigation methods for damage cases and preventive measures are considered.

The following corrosion damage cases are described: traditional pitting corrosion, extraordinary pitting, pitting due to unsuitable brazing, localized corrosion under deposits, erosion corrosion and corrosion fatigue. During the last few years cases of pitting corrosion have been observed to a growing extent in connection with so-called biofilms in copper pipes, and in copper pipes with a high content of silicon in the corrosion products, or with a silicate film on the inside of the pipes. These new and less common types of pitting are also included in the report.

Routines and methods for investigation of cases of damage on copper pipes are described in detail. Different analyses for the copper pipes are reviewed: determination of carbon number and the presence of carbon films, the presence and analysis of biofilm and the occurrence of other films on the pipe surface, e. g. silicate films.

Preventive measures against corrosion are presented in a separate chapter, covering: restrictions on the amount of carbon on the inside of copper pipes, recommended water composition, testing the pipe system for leaks, water temperature, and brazing and installation of copper pipes. Particular emphasis is laid on the effect of water composition and temperature and brazing and leak-proofing of pipe systems.

Förord

Koppar har mycket god korrosionshårdighet i vattenledningsvatten. Antalet korrosions-skador är litet med tanke på den stor sammanlagda längden installerade kopparrör i fastigheter. Trots den goda korrosionshårdigheten kan dock genomfrätningar och sprickor uppstå i kopparrör.

Under de senaste åren har det i ökad omfattning observerats gropfrättningsfall i samband med så kallad biofilm i kopparrör samt i kopparrör med hög halt kisel i korrosionsprodukterna eller med en silikatfilm på insidan av rören. Vidare har det på senare år uppstått skadefall med gropfrätning i närheten av lödfogar vid såväl mjuk- som hårdlödning. Vid mjuklödning orsakas angreppet av flussmedlet och vid hårdlödning beror angreppet på bildad högtemperaturoxid (termisk oxid). En annan orsak till korrosionsproblemet, som genomfrätningar och problem med kopparhaltigt vatten, är kvarvarande och stillastående vatten i rör efter täthetsprovning. Det har inträffat ett antal sådana skadefall i större byggnader i Sverige under de senaste åren.

I rapporten behandlas genomfrätningar på kopparrör på grund av korrosion. Orsaker till korrosionsangreppen, undersökningsmetoder av skadefall och motåtgärder beskrivs.

Olika typer av gropfrätning som traditionell och ovanlig gropfrätning samt gropfrätning orsakad av olämplig lödning beskrivs. Vidare behandlas lokala korrosionsangrepp under avlagringar, erosionskorrosion och korrosionsutmattning. Undersökningsmetodik för skadefall på kopparrör beskrivs ingående. I ett särskilt kapitel i rapporten redogörs för motåtgärder mot korrosionsangrepp som krav på kolmängd på insidan av kopparrör, rekommenderad sammansättning hos vattnet, täthetsprovning av rörsystem, temperatur hos vattnet samt lödning och installation av kopparrör.

Rapporten bygger på fältförsök med kopparrör i Vrigstad och på litteraturundersökningar. Vidare har infogats erfarenhet från tidigare forskningsprojekt och undersökningar av skadefall vid Korrosionsinstitutet.

Stort tack riktas till anslagsgivarna VA-Forsk, Nutek, Outokumpu Copper AB och Sävsjö kommun samt till Mats Linder, Korrosionsinstitutet för goda råd och synpunkter samt givande och trevliga diskussioner.

Stockholm i mars 2003

Tor-Gunnar Vinka

Innehållsförteckning

1	Inledning	1
1.1	Definition av korrosionstyper.....	1
2	Gropfrätningstyper i kopparrör	3
2.1	Traditionell gropfrätning	3
2.1.1	Gropfrätning typ I.....	3
2.1.2	Gropfrätning typ II.....	4
2.2	Ovanlig gropfrätning	5
2.2.1	Gropfrätning typ III	5
2.2.2	Undersökning av gropfrätning typ III i Vrigstad.....	5
2.2.3	Gropfrätning i samband med biofilm	6
2.2.4	Gropfrätning samband med silikatfilm.....	9
3	Gropfrätning orsakad av olämplig lödning	10
4	Övriga korrosionsformer.....	11
4.1	Lokala korrosionsangrepp under avlagringar.....	11
4.2	Erosionskorrosion.....	11
4.3	Korrosionsutmattning.....	11
5	Undersökningsmetoder	12
6	Motåtgärder	15
6.1	Kolmängd i kopparrör	15
6.2	Vattnets sammansättning.....	15
6.3	Täthetsprovning av rörsystem	16
6.4	Temperatur	16
6.5	Lödning	16
6.6	Installation	17
7	Referenser	18
8	Rekommenderad litteratur.....	20

1 Inledning

Koppar används i mycket stor omfattning som material i vattenledningsrör. Detta gäller i stora delar av världen och i hög grad i Sverige. En av anledningarna är kopparens mycket goda korrosionshårdighet i vattenledningsvatten. Med tanke på den sammanlagda längden installerade kopparrör är antalet korrosionsskador ringa, men under vissa betingelser kan genomfrätningar och sprickor uppstå i kopparrör. Följande korrosionsskador kan uppträda:

- Traditionell gropfrätning
- Ovanlig gropfrätning
- Gropfrätning orsakad av olämplig lödning
- Lokala korrosionsangrepp under avlagringar
- Erosionskorrosion
- Korrosionsutmattning.

Vidare kan det i sällsynta fall uppstå spänningskorrosion i fosfordesoxiderad koppar.

1.1 Definition av korrosionstyper

Jämn korrosion (tidigare kallad allmän korrosion): Korrosion som sker med ungefär samma hastighet över hela den metallyta som exponeras för ett korrosionsmedium, till exempel vatten.

Lokal korrosion: Korrosion som sker med särskilt hög hastighet på begränsade delar av den för korrosionsmedium utsatta metallytan.

Gropfrätning, punktfrätning eller punktkorrosion: Lokal korrosion som resulterar i frätgropar.

Erosionskorrosion eller turbulenskorrosion: En process som består i samtidig korrosion och erosion.

Spänningskorrosion: En process som består i samtidig korrosion och belastning av metallen till följd av mekaniska dragspänningar; spänningskorrosion leder ofta till sprickning.

Korrosionsutmattning: En process som består i samtidig korrosion och växlande mekanisk belastning hos metaller; korrosionsutmattning leder ofta till sprickning.

Avzinkning av mässing: Korrosion hos mässing innebärande selektiv utlösning av zink.

Selektiv korrosion: Korrosionsformen förekommer hos legeringar och innebär att legeringskomponenterna löses ut (korroderar) med olika hastighet.

Bimetallkorrosion (galvanisk korrosion): Bimetallkorrosion uppkommer genom verkan av en bimetallcell, det vill säga en galvanisk cell, där elektroderna består av olika metaller eller andra elektronledare, till exempel grafit. Bimetallkorrosion kallas ofta för galvanisk korrosion. Galvanisk korrosion har dock en vidare betydelse och innefattar också korrosion genom verkan av andra galvaniska celler, till exempel koncentrationsceller.

2 Gropfrätningstyper i kopparrör

2.1 Traditionell gropfrätning

Tre huvudtyper – gropfrätning typ I, II och III – av gropfrätning förekommer. Gropfrätning typ III är tämligen sällsynt och har därför inordnats inom gruppen ovanlig gropfrätning. För en översikt av gropfrätningstyperna i kopparrör, se **tabell 1**.

Tabell 1. Gropfrätningstyper på kopparrör [1].

Typ	Ledningstyp i vilken gropfrätning uppträder	Hårdhetstillstånd hos rören	Korrosionsorsak	Motåtgärder
I	Kallvatten	Glödgade eller halvhårda	Vanligtvis invändig kolfilm i röret	Använd typgodkända rör eller rör med max 0,2 mg kol per dm ² inneryta
II	Varmvatten	Oberoende av tillstånd	Olämplig vattensammansättning, dvs. pH < 7,4 och $[\text{HCO}_3^-] / [\text{SO}_4^{2-}] < 1$ (halterna anges i mg/l)	Ändring av vattensammansättning, dvs. pH ≥ 7,4 och $[\text{HCO}_3^-] / [\text{SO}_4^{2-}] \geq 1$
III	Kallvatten	Oberoende av tillstånd	Inte helt klarlagt	Ändring av vattensammansättning, dvs. alkaliniteten > 70 mg HCO ₃ ⁻ /l

2.1.1 Gropfrätning typ I

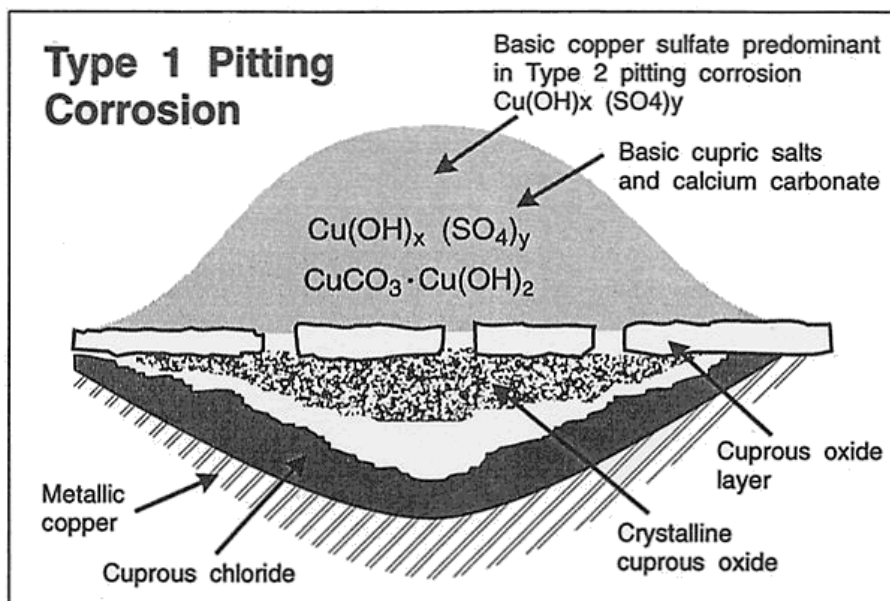
Gropfrätning typ I i kallvattenledningar uppträdde epidemiartat i slutet av 1940-talet och början av 1950-talet i England. Gropfrätningen förekom framförallt i medelhårda till hårda vatten med hög alkalinitet och sulfathalt [2, 3, 4]. Angreppen kunde kopplas samman till att man börjat blankglödga mjuka och halvhårda rör i reducerande ugnsatmosfär.

Huvudorsaken till gropfrätning är närvaron av en sammanhängande invändig kolfilm på rörytan [5]. Kolfilmen på mjuka och halvhårda rör bildas i regel genom sönderfall av dragsmörjmedel vid glödning av rör i reducerande atmosfär vid tillverkningen. Bildningen av kolfilmen motverkas numera vid tillverkningsprocessen.

Frätgroparna är halvsfäriska med relativt jämn inneryta i gropen. På botten av frätgroparna brukar oftast koppar(I)kloriden nantokit CuCl vara utfälld. I gropmynningen är porös koppar(I)oxid kuprit Cu₂O utfälld. Groparna täcks av ett mer eller mindre intakt

membran av kuprit och en krusta av kopparhydroxidkarbonat i form av malakit $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$ och kalciumkarbonat CaCO_3 , **figur 1**.

Tiden till genomfrätning kan vara så kort som några månader och är vanligen kortare än fyra år. Gropfrätning typ I uppstår i regel i vatten från grundvattentäcker med hårt vatten. Att denna gropfrätningstyp vanligen inte uppstår i ytvatten beror på att det i vatten från ytvattentäcker kan finnas naturliga organiska inhibitorer som förhindrar gropfrätningen.



Figur 1. Schematisk bild av frätgrop på kopparrör vid gropfrätning typ I och II. Figur från Geesey med flera [11].

2.1.2 Gropfrätning typ II

Gropfrätning typ II i varmvattenledningar (temperatur över 60°C) har framförallt uppträtt i Sverige, men skadefall har också rapporterats från de andra skandinaviska länderna och från dåvarande Västtyskland [2].

Gropfrätningen har undersökts av Mattsson & Fredriksson [6]. Gropfrätningen förekom i mjukt till medelhårt vatten med lågt pH-värde (5–7) och låg alkalinitet (i allmänhet mindre än $50 \text{ HCO}_3^-/\text{l}$). Sulfathalten $[\text{SO}_4^{2-}]$ varierande mellan 20–70 mg/l. Gropfrätning förekom inte i vatten med pH-värde större än eller lika med 7,4 och alkaliniteten 100–300 mg HCO_3^-/l samt med förhållandet $[\text{HCO}_3^-]/[\text{SO}_4^{2-}] \geq 1$, halterna anges i enheten mg/l och vätekarbonathalten $[\text{HCO}_3^-]$ motsvaras av alkaliniteten i enheten mg HCO_3^-/l . Gropfrätningen orsakas av olämplig vattensammansättning.

Frätgroparna har oregelbunden form. I groparna är kuprit Cu_2O utfälld. Frätgroparna är täckta av en krusta av olika kopparhydroxidsulfater $\text{Cu}_4(\text{OH})_6\text{SO}_4$, **figur 1**. Tiden till genomfrätning är vanligen längre än för gropfrätning typ I.

2.2 Ovanlig gropfrätning

2.2.1 Gropfrätning typ III

Under 1970-talet började ett stort antal genomfrätningar i kopparrör i kallvattenledningar uppträda i två svenska kommuner. Gropfrätningstypen var då okänd i Sverige, men efter undersökningar vid Korrosionsinstitutet karaktäriserades den som gropfrätning av typ III. Senare uppstod likadan gropfrätning i en tredje kommun. Korrosionsinstitutets undersökningar klargjorde att orsaken till genomfrätningarna var ändrad vattensammansättning [7, 8].

Gropfrätning typ III upptäcktes först i dåvarande Västtyskland [9], men de flesta gropfrätningfallen har förekommit i Sverige. Gropfrätning typ III uppträdde i mjukt till medelhårt renvatten med högt pH-värde ($\text{pH} \approx 8$), låg alkalinitet 20–40 mg HCO_3^-/l och låg halt av sulfat- och kloridjoner. Den enda vattenbehandling som företagits var alkalisering av råvattnet med natriumhydroxidlösning. Den kortaste tiden till genomfrätning var 3 år och den genomsnittliga tiden 6 år räknat från installationsdatum av kopparrör i fastigheten.

Korrosionsangreppet kan karaktäriseras som lokal korrosion inom begränsade områden med talrika frätgropar med halvsfärisk form och släta innerväggar i frätgropen. Frätgroparna var fyllda med kuprit Cu_2O och över frätgroparna fanns också en grovkristallin film av Cu_2O . På hela det angripna området fanns en voluminös blå-grön beläggning bestående av olika kopparhydroxidsulfater $\text{Cu}_4(\text{OH})_6\text{SO}_4$.

Efter omfattande undersökningar vid Korrosionsinstitutet föreslog Linder & Lindman [7, 8] alkalinitetshöjning hos renvattnet som motåtgärd mot gropfrätningen. Det visade sig att en höjning av renvattnets alkalinitet till 70 mg HCO_3^-/l med bibehållet pH-värde 8–8,5 gav remarkabla resultat: skadefallsfrekvensen minskade drastiskt och förbättringen skedde med utomordentlig snabbhet.

Som kort sammanfattning av undersökningen kan sägas att botemedlet – som också kan ges i förebyggande syfte mot gropfrätning typ III – är känt. Den lyckade behandlingen mot gropfrätning typ III indikerar också att vattensammansättningen har stor betydelse för uppkomsten av gropfrätning typ III, men orsaken till gropfrätning typ III är inte fullt klarlagd.

2.2.2 Undersökning av gropfrätning typ III i Vrigstad

Under 1981 började genomfrätningar ske i kallvattenledningar av koppar i Vrigstad, Sävsjö kommun. Vattnet i Vrigstad luftades och pH-justerades med natriumhydroxidlösning. Genomfrätningarna av kopparrören karaktäriserades av Korrosionsinstitutet som gropfrätning typ III. Korrosionsinstitutets undersökningar klargjorde att orsaken till genomfrätningarna var ändrad vattensammansättning. 1983 påbörjades i Vrigstad alkalinitetshöjning av vattnet genom behandling med natriumkarbonat. Alkalinitetshöjningen till cirka 70 HCO_3^-/l med bibehållet pH-värde visade sig vara ytterst verksamt i Vrigstad och antalet skadefall på kopparrör minskade även här drastiskt.

För att mera i detalj undersöka korrosionsförloppet på kopparrör påbörjades i Vrigstad en ny fältundersökning i början av 1990-talet av Korrosionsinstitutet. Kopparrör exponerades för enbart pH-justerat grundvatten, det vill säga samma vatten som orsakat de tidigare genomfrätningarna, i en provningsrigg. Kopparrör plockades ut från provriggen efter 0,5, 1,1 och 2,2 år.

Efter 2,2 års exponering upptäcktes en tunn, icke sammanhängande och icke heltäckande biofilm som lossnade från rörytan som små flagor vid upplösning av korrosionsprodukter och andra beläggningar i utspädd saltsyra vid undersökning av biofilmsförekomst enligt Chamberlain med flera [10]. Någon biofilm upptäcktes inte efter kortare exponeringstid vid upplösning i utspädd saltsyra. Biofilmen innehöll polysackarider, proteiner och kiselsyreföreningar. I biofilmen detekterades också följande grundämnen: kol, syre och kisel och i lägre halter koppar och aluminium. Med IR-spektroskopi detekterades dock små mängder av kolhydrater och kiselsyreföreningar efter 1,1 års exponering. Detta indikerar tillväxt av biofilm på rörytan.

Tre skadefallsrör från Vrigstad undersöktes också. På alla rören fanns biofilm som innehöll polysackarider, proteiner och kiselsyreföreningar. Korrosionsprodukterna på skadefallsrören var uppbyggda i tre skikt: längst in kuprit Cu_2O , därefter biofilm och längst ut en blå-grön beläggning av kopparhydroxidsulfaterna brochantit $\text{Cu}_4(\text{OH})_6\text{SO}_4$ och posnjakit $\text{Cu}_4(\text{OH})_6\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$.

Från undersökningarna kunde konstateras att biofilmen på kopparrörens insida bildas och tillväxer långsamt (storleksordningen år). Bildningen av det yttre blå-gröna skiktet av kopparhydroxidsulfater på rörytan är en relativt långsam process. Skiktet är först amorft, men blir långsamt kristallint (storleksordningen ett par år).

Förekomst av biofilm på rörytan antyder mikrobiellt betingad korrosion. Det är därför troligt att gropfrätning typ III också omfattar mikrobiella delsteg. Gropfrätning typ III uppvisar likheter med gropfrätning som satts i samband med biofilm: gropfrätning typ 1½ och ”pepper pot pitting”.

Det är inte förvånande om gropfrätning typ III och gropfrätningstyperna som satts i samband med biofilm är varianter av samma gropfrätningstyp. Det är nog så att vid undersökning av gropfrätning på kopparrör har olikheter mellan olika gropfrätningstyper betonats allt för mycket och att man sett för lite på likheterna mellan gropfrätningstyperna.

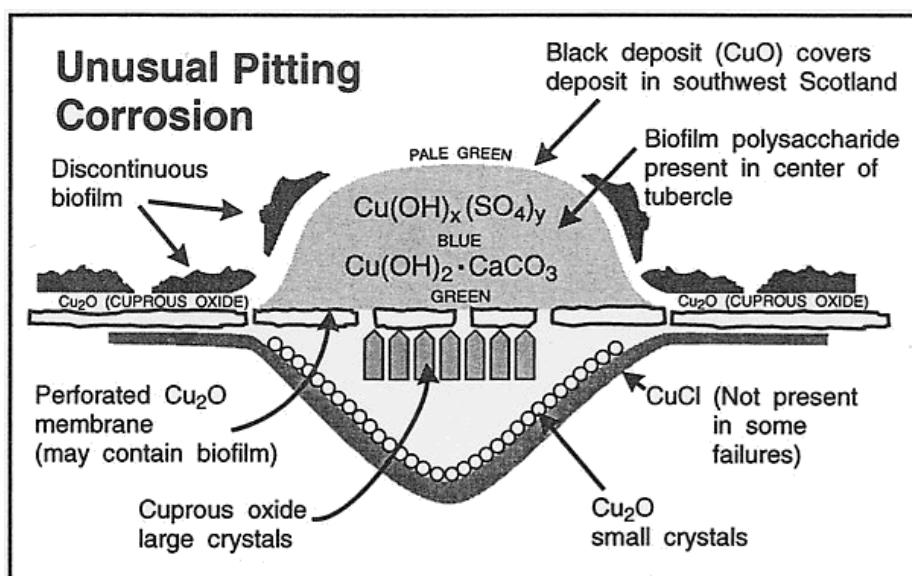
2.2.3 Gropfrätning i samband med biofilm

Under 1980-talet uppträdde flera fall av ovanlig gropfrätning i ledningssystemen i sjukhus i dåvarande Västtyskland, i Skottland, England och Saudiarabien. Man brukar tala om två ovanliga gropfrätningstyper [11]:

- Gropfrätning typ 1½
- ”Pepper pot pitting” (pepper pot = pepparströare, pitting = gropfrätning)

Gropfrätningen typ 1½ har uppträtt i både kall- och varmvattenledningar och gropfrätningen har drag av både gropfrätning typ I och II. Gropfrätningen påminner om grop-

frätning typ I eftersom frätgroparna är halvsfäriska och fyllda av porös kuprit Cu_2O med varierande mängd utfälld koppar(I)klorid CuCl på botten av frätgropen. Groparna täcks av ett mer eller mindre intakt membran av kuprit. Gropfrätningen typ 1½ har drag av gropfrätning typ II genom att den också uppträder i varmt vatten och att korrosionsprodukterna på rörytan mellan frätgroparna i huvudsak består av koppar(II)oxiden tenorit CuO . Krustorna över frätgroparna består i allmänhet av kopparhydroxidsulfater $\text{Cu}_4(\text{OH})_6\text{SO}_4$, **figur 2**.



Figur 2. Schematisk bild av frätgrop på kopparrör vid gropfrätning i samband med biofilm. Figur från Geesey med flera [11].

Det första fallet med gropfrätningen typ 1½ uppstod 1985 i länsjukhuset i Lüdenscheid-Hellersen i det forna Västtyskland [12, 13, 14]. I samband med skadefallen i det västtyska länsjukhuset sattes för första gången förekomst av biofilm och mikrobiellt betingad korrosion i samband med gropfrätning. Det som skilde skadefallen från tidigare känd gropfrätning var [13, 14]:

- Förekomst av svarta skikt av koppar(II)oxid CuO på kopparytan
- Samtidig jämn korrosion av kopparytan och gropfrätning
- Förekomst av extracellulära polymerer (EPS) under beläggningar
- Förekomst av kraftigt kopparhaltigt dricksvatten under sporadiska och icke regelbundna episoder inom begränsade områden av ledningsnätet
- Samtidiga skadefall i både kall- och varmvattenledningar.

Den andra ovanliga typen – ”pepper pot pitting” – påminner om gropfrätning typ III med ett stort antal frätgropar under en krusta av korrosionsprodukter bestående av olika kopparhydroxidsulfater $\text{Cu}_4(\text{OH})_6\text{SO}_4$. Membranet av kuprit över groparna är perforerat

på ett oregelbundet sätt och har ett flertal små hål ("pepper pot holes"). Denna gropfrätningstyp har uppträtt i ledningar på sjukhus med ytvatten med låg buffertkapacitet och pH-värdet 7,4–9,3 samt innehållande relativt hög halt av lösta organiska föreningar och suspenderade partiklar samt mikroorganismer.

"Pepper pot pitting" har också uppträtt i både kall- och varmvattenledningar och ett flertal små hål har uppstått inom ett avskilt och begränsat område på rören. "Pepper pot pitting" upptäcktes först på sjukhus i Glasgow i Skottland. Denna gropfrätningstyp har inte bara lokaliserats till sjukhus i Glasgowområdet utan har uppstått på andra stora byggnader i området: hotell, skolor, industribyggnader och på ett fängelse.

De båda ovanliga gropfrätningstyperna har med ett undantag uppstått i mjukt vatten (totalhårdheten 10–16 mg Ca/l) med låg alkalinitet (12–24 mg HCO₃⁻), låg kloridhalt (15–20 mg/l) och låg sulfathalt (10–30 mg/l).

På senare år har teorier för mikrobiellt betingad korrosion eller mikrobiellt inducerad korrosion, från engelskans "microbially influenced corrosion", MIC, på kopparrör framförts. Karaktäristiskt för den mikrobiellt betingade gropfrätningen är förekomsten av så kallad biofilm på rörytan. Huvudbeståndsdelarna i biofilmen är mikrobiologiska celler och så kallade extracellulära polymerer, som produceras av många bakteriearter.

Biofilm består av celler immobiliserade (fixerade) vid ett substrat. Cellerna är ofta inlagrade i ett organiskt material (en polymermatris) av mikrobiologiskt ursprung. I det enklaste fallet består biofilmen av mikrobiologiska celler samt sekretionsprodukter från dessa, så kallat extracellulära polymerer (EPS). Denna biofilm är porös och har utomordentligt stor absorptionsförmåga. I biofilmen kan även ingå betydande fraktioner av oorganiska eller abiotiska (icke-biologiska) substanser, som sammanbinds av den biotiska (biologiska) polymermatrisen. Biofilmen innehåller polysackarider och proteiner i betydande omfattning.

Här är det befogat med ett påpekande: gropfrätningarna i sjukhus beror inte på särskilt aggressiva sjukhusbakterier utan har att göra med att sjukhus är en stor byggnad med lång sträcka kopparrör. Förutom vattenkvaliteten har följande faktorer haft inverkan på gropfrätningen:

- Sjukhus och andra stora byggnader byggs ofta i etapper. Täthetsprovning av kopparrör sker därför vid olika tillfällen och vattnet blir sedan oftast stående i rören utan någon vattenomsättning.
- Lång rörsträcka och oftast också långa sträckor med horisontella kopparrör.
- Rörsträckor med mycket låg vattenomsättning och partier med nästan helt stillastående vatten.

Vid skadefallen i varmvattenledningar i Skottland och England visade det sig att vattentemperaturen var för låg, ofta var temperaturen under 50°C. Det är alltså mycket viktigt att varmvattentemperaturen är tillräckligt hög för att undvika gropfrätning på kopparrör orsakad av mikrobiellt betingad korrosion.

2.2.4 Gropfrätning i samband med silikatfilm

Under de senaste åren har man i ökad omfattning observerat att skadefall inträffat med kopparrör med hög halt kisel i korrosionsprodukterna och i somliga fall också med en silikatfilm på insidan av röret. I ett par fall har också hög kopparhalt i vattnet påvisats.

Inverkan av silikatfilm på gropfrätning har varit känd sedan länge, men det förefaller som om den underskattats och att gropfrätning orsakad av denna film ibland felaktigt tillskrivits andra orsaker. Orsaken till gropfrätning och/eller kopparhaltigt vatten i samband med silikathaltiga korrosionsprodukter eller silikatfilm är inte klarlagd. För att förstå korrosionsförloppet och finna motåtgärder krävs forskning.

3 Gropfrätning orsakad av olämplig lödning

I närheten av lödfogar vid såväl mjuk- som hårdlödning av kopparrör kan gropfrätning uppstå. Vid mjuklödning orsakas angreppet av flussmedlet och vid hårdlödning beror angreppet på bildad högttemperaturoxid (termisk oxid).

Flussmedlen är till sin natur aggressiva mot metaller. Trots att mjuklödning används relativt sparsamt i Sverige uppstår läckage genom gropfrätning orsakade av flussmedel i kopparrören i ett icke försumbart antal. För mjuklödning i vattenledningsrör används så gott som uteslutande tenn-silverlod med 3 mass-% silver. Däremot förekommer ett stort antal flussmedel. Exempel på flussmedel är [15]:

- Zinkklorid med olika tillsatser bland annat av ammoniumföreningar
- Andra metallklorider
- Hartser
- Organiska syror
- Varianter och blandningar av ovanstående.

Vid mjuklödning bör man använda sparsamt med flussmedel och se till att flussmedlet inte hamnar på insidan av rör eller rördelar. Flussmedlet stryks endast på rörändens utsida och inte på insidan av rörfogarna.

Det har på senare år konstaterats både genom praktisk erfarenhet och systematiska fältprovningar att den högttemperaturoxid som bildas i kopparrör i samband med hårdlödning och varmbockning ibland gör rören känsliga för gropfrätning i kallvatten. Angreppen som orsakas av termisk oxid brukar ibland hänföras till gropfrätning typ I, vilket bland annat innebär att de främst uppstår i kallt grundvatten.

Det har också visat sig att koppar-fosfor-silverlod med 2 mass-% silver som används vid hårdlödning ibland ger upphov till bimetallkorrosion i kopparrör. Det är kopparen bredvid lodet som då angrips.

4 Övriga korrosionsformer

4.1 Lokala korrosionsangrepp under avlagringar

Avlagringar av mangandioxid (MnO_2) eller magnetit (Fe_3O_4) i kopparrör och varmvattenberedare kan ge upphov till lokala korrosionsangrepp på den underliggande kopparytan. Korrosion av denna typ brukar främst uppstå i varmvatten. Mangandioxid och magnetit är elektrokemiskt ädla och angreppet på kopparen torde snarast vara av typen bimetallkorrosion.

Korrosionsskador som orsakas av avlagringar brukar ibland uppträda i nya installationer. När ett nybyggt bostadsområde eller en ny större byggnad ansluts till vattenledningsnätet kan detta innebära en stark förändring av strömningsförhållandena i de kommunala ledningarna. Ökad strömningshastighet och tryckslag kan medföra att gamla avlagringar av till exempel magnetithaltiga rostpartiklar rycks loss. Med tiden avtar transporten av lösryckta partiklar och korrosionsproblemen upphör.

Generellt kan sägas att eventuella avlagringar i kopparrör ökar risken för gropfrätning i både varmt och kallt vatten. Det bör dock tilläggas att problem orsakad av avlagringar är relativt sällsynta.

4.2 Erosionskorrosion

Erosionskorrosion uppstår när vattnets strömningshastighet är så hög att skyddande beläggning ständigt avlägsnas från metallytan. Detta sker lättast där turbulensen är hög. Korrosionstypen kallas därför ibland också turbulenskorrosion. Angreppen uppstår i första hand på ställen där strömningen är störd, till exempel vid olämpligt utformade påstick, kopplingar eller rörböjar. Skadorna är oftast skarpt avgränsade och har blank botten som är helt fri från korrosionsprodukter. I vissa fall bildas gropar med hästskeform.

Angreppet gynnas av hög vattentemperatur och lång varaktighet hos strömningen. Skadetyper är följaktligen vanligast i cirkulationsledningar för varmvatten där strömningen är kontinuerlig.

4.3 Korrosionsutmattning

Korrosionsutmattning som leder till sprickning uppkommer i varmvattenledningar av koppar om ledningen är olämpligt inspänd. Till följd av temperaturvariationer kan under sådana förhållanden växlande mekaniska dragspänningar uppstå i rörväggen. Sprickningen är inte enbart mekanisk utan förutsätter inverkan av vattnet.

På raka rörpartier går sprickorna vinkelrätt mot rörens längdriktning. I rörböjar däremot löper sprickorna på böjens båda sidor i en båge längs rörens centrumlinje. Sprickorna är raka och oförgrenade. Brottet orsakas av en huvudspricka som på båda sidor omges av parallella mindre sekundärsprickor.

5 Undersökningsmetoder

En undersökning av skadefall kan indelas i olika moment:

- Insamling av bakgrundsfakta
- Studium av analysprotokoll över renvattnets sammansättning
- Undersökning av skadade rörprov eller rördelar
- Utförande av olika kemiska analyser på röret.

Insamlandet av bakgrundsmaterial tar ofta längre tid än man tror. Här gäller det att få uppgifter om var och när skadan inträffat, var själva skadeområdet är lokaliserat i rörsystemet, antalet skador och när installationen gjordes samt renvattnets sammansättning och om vattnets sammansättning ändrats.

Att känna till vattnets sammansättning är viktigt vid skadefallsundersökning. Vid rutinundersökningar är det följande vattenanalyser som är av intresse: pH-värde, alkalinitet, totalhårdhet, sulfathalt och kloridhalt. Vidare måste man ta reda på om vattnets sammansättning är relativt konstant eller om renvattnets sammansättning har ändrats. Exempel på ändringar som kan påverka vattnets sammansättning är:

- Ändrad vattenbehandling i vattenverket
- Byte eller ändring av vattentäkt
- Blandning av vatten från olika vattentäkter eller olika vattenverk.

Vid undersökning av ett skadat rörprov måste man lokalisera skadeområdet:

- Har skadan inträffat vid eller i rördelar till exempel koppling och grenrör
- Har skadan inträffat vid rörkrökar eller rörfogar
- Har skadan inträffat vid lödningar
- Har skadan inträffat på ett horisontellt eller vertikalt rör.

Skadade rörprov granskas, förutom genom okulärbesiktning med blotta ögat, i stereomikroskop. För att kunna göra en säker bedömning vid undersökning av skadade rör krävs emellertid erfarenhet: man måste ha sett olika rörsador tidigare.

Vid skadefallsutredningar är det ofta nödvändigt att analysera följande parametrar från rörets insida:

- Koltal
- Förekomst av kolfilm
- Förekomst av biofilm
- Förekomst av andra filmer.

Gropfrätning i kopparrör i kallvattenledningar förknippas vanligen med förekomst av kolfilm i rören. Vid undersökningar av gropfrättningsfall på kopparrör är bestämningen av kolfilmen på rörytan alltid en rutinåtgärd. Man använder då VTR:s koltalsprov [3, 4] och kolfilmsprov enligt svensk standard SS-EN 1057 [16].

Under de senaste åren har man i ökad omfattning observerat gropfrättningsfall i samband med så kallad biofilm i kopparrör samt i kopparrör med hög halt kisel i korrosionsprodukterna eller med en silikatfilm på insidan av rören. Det har också noterats att traditionell kolbestämning (koltal och kolfilm) kan ge fel värden vid närvaro av biofilm eller silikatfilm i rören.

Vid VTR:s koltalsprovning (metoden utvecklades 1960–61 på Visseries et Tréfileries Réunion, Mechelen, Belgien) behandlas rörprov med en innerarea av 20 cm² med en lösning av salpetersyra, fluorvätesyra samt vätmiddel. Efter behandlingen filtreras lösningen genom ett filter med bestämd storlek och porositet. Filtrets svärtning jämförs därefter med likarprov som framställts genom filtrering av lösningar innehållande bestämda mängder kolpulver. Resultaten anges som koltal i en skala från 0 till 8 där koltal 0 representerar ingen kolmängd och koltal 8 den största kolmängden [3, 4]. Med hänsyn till risken för gropfrätning typ I i kallvattenledningar bör rören ha ett koltal som är högst 4, men helst 0–3 [2].

Vid BN:s kolfilmsprovning (metoden utvecklades på British Non-Ferrous Metals Research Association, London) läggs ett rörprov i salpetersyra. Provingen kallas därför ibland för HNO₃-test. Ett 25 mm långt rörprov med rengjord utsida genom filning läggs ned i 25 mass-% salpetersyra medan man betraktar innerytan med mikroskop. Eventuell kolfilm frigörs genom syrans betande inverkan och flyter upp till vätskeytan. Kolfilmsprovningen beskrivs i svensk standard SS-EN 1057 [16]. För godkänt prov får inte kol förekomma i filmform [16].

Vid undersökningar vid Korrosionsinstitutet har det framkommit att ett felaktigt resultat erhålls med båda metoderna för kolbestämning (koltalsprovning och kolfilmsprovning) om samtidigt biofilm eller silikatfilm föreligger på rörytan. Biofilmen på kopparrören innehåller bland annat polysackarider och proteiner och indikerar mikrobiellt betingad korrosion. Om bio- eller silikatfilm förekommer kan de förväxlas med kolfilm vid kolfilmsprovningen och ge ett för högt koltal. Man kan alltså förledas att tro att korrosionsorsaken är en invändig kolfilm på rörytan från tillverkningen och därigenom dra felaktiga slutsatser om rökvalitetens inverkan. Vid förekomst av andra filmer på rörytan än kolfilm måste man därför vara försiktig vid tolkning av resultatet från koltalsprovningen.

Att bestämma kolmängden för ett använt kopparrör med förbränningsanalys, enligt svensk standard SS-EN 723 [17], för att utröna om det finns kolfilm på rörytan är ingen enkel och rekommenderad metod. I ett använt kopparrör kan det finnas kol i biofilm, som innehåller organiskt kol, och i karbonathaltiga korrosionsprodukter, till exempel kopparhydroxidkarbonatet malakit Cu₂(OH)₂CO₃, och beläggningar, till exempel kalciumkarbonatet kalcit CaCO₃. Vid en förbränningsanalys av ett begagnat rör måste man säkerställa att resultatet inte innefattar kol från biofilm och karbonathaltiga korrosionsprodukter och beläggningar. Att särskilja olika kolformer vid förbränningsanalys är mycket svårt.

Förekomst av biofilm undersöks genom behandling av rörprovet med saltsyra eller salpetersyra. Korrosionsprodukter och andra beläggningar löses upp i utspädd saltsyra eller salpetersyra. Upplösningsförloppet följs i stereomikroskop. Baksidan av rörprovet rengörs noggrant genom filning innan röret läggs ned i syran. Eventuell biofilm lyfter från rörytan oftast som tunna genomskinliga eller vitaktiga flagor [10]. Biofilm på insidan av kopparrör bildas och tillväxer långsamt. Om biofilm börjar bildas verkar det ta minst två år innan filmen kan detekteras med upplösning i utspädd saltsyra eller salpetersyra.

Om det finns biofilm på insidan av kopparröret, brukar man undersöka biofilmen med PAS-test (från engelskans Periodic acid – Schiff's reagent). PAS-testet används för att påvisa kolhydrater, speciellt polysackarider. Vid PAS-testet oxideras den rengjorda och torkade biofilmen i ortoperjodsyra och kolhydrater påvisas med Schiff's reagens. Positivt utslag, det vill säga det finns kolhydrater i biofilmen, ger lila färg [10].

Vid misstänkt förekomst av andra filmer kan dessa frigöras på samma sätt som för biofilm och därefter analyseras med svepelektronmikroskop med energidispersiv röntgenspektroskopi (SEM-EDS).

6 Motåtgärder

6.1 Kolmängd i kopparrör

På insidan av nya kopparrör får kolmängden vara maximalt 0,20 mg C/dm² röryta och kol får inte finnas som film på rörytan enligt svensk standard SS-EN 1057 [16]. Vid typgodkännandeprovning undersöks kolmängden med förbränningsanalys enligt svensk standard SS-EN 723 [17] och kolfilmsprovning sker enligt svensk standard SS-EN 1057 [16]. För att undvika rör med skadlig kolmängd på rörytan är det viktigt att använda typgodkända kopparrör.

6.2 Vattnets sammansättning

Vattnets sammansättning är viktig för kopparrörens funktion. Det är inte helt enkelt att åstadkomma ett bra vatten ur korrosionssynpunkt, eftersom man måste ta hänsyn till olika korrosionsaspekter och korrosionen hos flera olika material. Ur korrosionssynpunkt måste man betänka följande aspekter:

- Gropfrätning på kopparrör
- Avzinkning av mässing
- Kopparhaltigt vatten
- Järnhaltigt vatten
- Korrosionen på zinksiktet hos förzinkat stål
- Korrosionen på rör och komponenter av kolstål och gjutjärn (gråjärn och segjärn).

Ett rekommenderad sammansättning hos renvattnet för kopparrör framgår av **tabell 2**.

Tabell 2. Rekommenderad vattensammansättning för kopparrör [1].

Parameter	Värde
pH-värde	7,5–9,0
Alkalinitet, mg HCO ₃ ⁻ /l	Minst 70. Alkaliniteten bör inte överstiga 300.
Kvoten [alkalinitet]/[sulfathalt], halterna anges i mg/l	Större än 1
Sulfathalt, mg/l	Mindre än 100
Kloridhalt, mg/l	Mindre än 100

För att undvika groppfrätning i kopparrör har vattnets alkalinitet en nyckelroll. Det är mycket väsentligt att alkaliniteten är tillräckligt hög. Målsättningen bör vara att alkalinitet är minst 70 mg HCO_3^-/l .

När det gäller kopparhaltigt vatten är pH-värdet den enskilda parameter som har störst inverkan. För att samtidigt motverka kopparhaltigt vatten rekommenderas ett pH-värde mellan 8,0 och 9,0, ett pH-värde omkring 8,5 är mycket lämpligt. För att pH-värdet skall kunna höjas i hårda vatten krävs samtidig avhärdning.

6.3 Täthetsprovning av rörsystem

Efter täthetsprovning med vatten måste stillastående vatten i ledningarna undvikas. Systemet bör efter täthetsprovning ha en vattenomsättning som liknar normal drift. Täthetsprovningarna måste därför planeras så att stilleståndstiden hos vattnet i rören minimeras. Detta är särskilt viktigt för stora byggnader som byggs i etapper.

Det är inte tillräckligt ur korrosionssynpunkt att tömma ledningarna på vatten efter täthetsprovningen.

6.4 Temperatur

Biofilm tillväxer i för varmt kallvatten och i för kallt varmvatten. För att undvika problem med biofilm och mikrobiellt betingad korrosion bör man tillse att varmvattentemperaturen är tillräckligt hög. Vid temperaturer under 50°C tillväxer biofilmen, vid 55°C sker en mycket markant minskning av biofilmen och för temperaturer över 60°C kan man räkna med att inte få problem med biofilm och mikrobiellt betingad korrosion. För kallvattenledningar är det väsentligt att tillse att onödigt uppvärmning inte sker av vattnet.

Vattentemperaturerna för undvika biofilm och mikrobiellt betingad korrosion överensstämmer mycket väl med rekommenderade temperaturer för att undvika legionellabakterier i tappvattensystem [18]. För att undvika legionellabakterier bör varmvattentemperaturen vara minst 55°C i rörledningar fram till tappställe. Temperaturen i varmvatten-cirkulationsledningar (vvc) bör vara minst 50°C i hela ledningssystemet. Rekommenderad temperatur i varmvattenberedare är minst 60°C.

6.5 Lödning

Vid mjuklödning bör man använda sparsamt med flussmedel. Det är mycket viktigt att flussmedlet inte förekommer på rör eller rördelar som sedan kommer i kontakt med vatten. Flussmedlet skall påföras endast på rörändes utsida, inte på insidan av rörände.

Vid hårdlödning är det viktigt att inte värma rör eller rördel mer än nödvändigt. För ”mycket” uppvärmning gynnar bildning av den skadliga högtemperaturoxiden (termisk oxid).

6.6 Installation

För att inte vatten skall bli stillastående i rörledningar bör så kallade döda zoner med stillastående vatten och blindledningar undvikas.

För att undvika erosionskorrosion måste man göra en riktig dimensionering av strömningshastigheten och betrakta de strömningpåverkande detaljerna vid installationen. Det är viktigt att ledningen är strömlinjeformad utan onödiga kanter vid påstick, rörskarvar och rörkrökar. Rekommenderad högsta vattenhastighet framgår av **tabell 3**.

Tabell 3. Rekommenderad högsta vattenhastighet i kopparrör [1].

Slag av ledning	Högsta vattenhastighet (m/s)	
	Kallt vatten	Varmt vatten
Inte utbytbar cirkulationsledning	0,8	0,6
Utbytbar cirkulationsledning	2	1,5
Inte utbytbar fördelningsledning	2	1,5
Inte utbytbar kopplingsledning	4	4

Korrosionsutmattning kan motverkas genom att ge ledningen tillräcklig elasticitet mellan de punkter där den är fixerad. Detta kan göras genom lämpligt förlagda rörkrökar i systemet eller genom att använda särskilda expansionsanordningar som expansionslyror, expansionsboxar och bälgkompensatorer.

7 Referenser

1. Mattsson, E: Tappvattensystem av kopparmaterial. Krav på vattenkvalitet, material, installation och drift med hänsyn till korrosionsbeständighet m.m. AB Svensk Byggtjänst, Solna 1990.
2. Mattsson, E: Kopparrör i tappvattensystem har bra korrosionshärdighet. VVS, årgång 53, nr 11, 1982, s. 73–74, 77–78, 81–82.
3. Campbell, H S: A review: Pitting corrosion of copper and its alloys. Miscellaneous Publication No. 574. The British Non-Ferrous Metals Research Association, London 1972.
4. Campbell, H S: A review: Pitting corrosion of copper and its alloys. Localized Corrosion (Staehle, R W & Brown, B F & Kruger, J & Agrawal, A, eds.), s. 625–638. Volume number NACE-3. National Association of Corrosion Engineers, Houston 1974.
5. Campbell, H S: Pitting corrosion in copper water pipes caused by films of carbonaceous material produced during manufacture. Journal of the Institute of Metals 27(1950) s. 345–356.
6. Mattsson, E & Fredriksson, A-M: Pitting corrosion in copper tubes – cause of corrosion and counter-measures. British Corrosion Journal 3(1968) s. 246–257.
7. Linder, M & Lindman, E-K: Investigation of pitting corrosion, type III, in copper pipes. Proc. 9th Scandinavian Corrosion Congress, Copenhagen 1983. Volume 2, s. 569–581. Korrosionscentralen ATV, Glostrup 1983.
8. Linder, M: Gropfrätning av typ III i kallvattenledningar av koppar – orsaker och motåtgärder. KI Rapport 1987:2. Korrosionsinstitutet, Stockholm 1988.
9. von Franqué, O & Gerth, D & Winkler, B: Ergebnisse von Untersuchungen an Deckschichten in Kupferrohren. Werkstoffe und Korrosion 26(1975) s. 255–258.
10. Chamberlain, A H L & Angell, P & Campbell, H S: Staining procedures for characterising biofilms in corrosion investigations. British Corrosion Journal 23(1988) s. 197–198.
11. Geesey, G G & Bremer, P J & Fischer W R & Wagner, D & Keevil, C W & Walker, J & Chamberlain, A H L & Angell, P: Unusual types of pitting corrosion of copper tubes used in potable water systems. Biofouling and Biocorrosion in Industrial Water Systems (Geesey, G G & Lewandowski, Z & Flemming, H-C, eds.), s. 243–263. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida 1994.
12. Fischer, W & Hänßel, I & Paradies, H H: First results of microbial induced corrosion of copper pipes. Microbial Corrosion – 1 (Sequeira, C A C & Tiller, A K, eds.), s. 300–327. Elsevier Applied Science, London 1988.

13. Fischer, W & Paradies, H H & Wagner, D & Hänßel, I: Copper deterioration in a water distribution system of a county hospital in Germany caused by microbially induced corrosion – I. Description of the problem. *Werkstoffe und Korrosion* 43(1992) s. 56–62.
14. Wagner, D & Fischer, W & Paradies, H H: Copper deterioration in a water distribution system of a county hospital in Germany caused by microbially induced corrosion – II. Simulation of the corrosion process in two test rigs installed in this hospital. *Werkstoffe und Korrosion* 43(1992) s. 496–502.
15. Koppar och kopparlegeringar. SMS handbok 8. Tredje upplagan. SIS Förlag AB, Stockholm 2000.
16. Svensk standard **SS-EN 1057**. Utgåva 1, 1996. Koppar och kopparlegeringar – Sömlösa, runda rör av koppar för vatten och gas i sanitets- och uppvärmningsinstallationer. SIS, Stockholm 1996.
17. Svensk standard **SS-EN 723**. Utgåva 1, 1996. Koppar och kopparlegeringar – Förbränningsmetod för bestämning av kol på innerytan av kopparrör och kopplingar. SIS, Stockholm 1996.
18. Stålbom, G & Kling, R: Legionella. Risker i VVS-installationer. VVS-Installatörerna, Stockholm 2002.

8 Rekommenderad litteratur

Allmänt om korrosion:

Einar Mattsson: Elektrokemi och korrosionslära. Bulletin nr 100, andra upplagan. Korrosionsinstitutet, Stockholm 1992.

Korrosion i dricksvattensystem:

Bo Berghult & Ann Elfström Broo & Torsten Hedberg: Dricksvatten och korrosion – En handbok för vattenverken. VA-Forskrapport 2000-1, andra utgåvan. VAV AB, Stockholm 2000.

Korrosion på kopparrör:

Einar Mattsson: Tappvattensystem av kopparmaterial. Krav på vattenkvalitet, material, installation och drift med hänsyn till korrosionsbeständighet m.m. AB Svensk Byggtjänst, Solna 1990.

Rör av koppar. Pärm utgiven av Scandinavian Copper Development Association, Västerås 1992. Kan erhållas från Outokumpu Copper Tubes AB, Västerås.

John F Ferguson & Otto von Franqué & Michael R Schock: Corrosion of copper in potable water systems. Internal Corrosion of Water Distribution Systems. Second edition, s. 231–268. Cooperative Research Report from American Water Works Association Research Foundation and DVGW-Technologiezentrum Wasser. American Water Works Association, Denver 1996.

Kopparhaltigt vatten:

Mats Linder & Claes Taxén: Copper in tap waters. Literature research and equilibrium calculations. KI Report 2002:1E. Korrosionsinstitutet, Stockholm 2002.

Om koppar och kopparlegeringar

Koppar och kopparlegeringar. SMS handbok 8. Tredje upplagan. SIS Förlag AB, Stockholm 2000. (Boken behandlar bland annat framställning, hållfasthetsegenskaper, korrosion, bearbetning, svetsning och lödning.)

Legionella i VVS-installationer:

Göran Stålbom & Rolf Kling: Legionella. Risker i VVS-installationer. VVS-Installatörerna, Stockholm 2002.

Miljöpåverkan av koppar:

Lars Landner & Lennart Lindström: Koppar i samhälle och miljö. En faktaredovisning av flöden, mängder och effekter i Sverige. Miljöforskargruppen, Stockholm och Fryksta 1998. Kan erhållas från Outokumpu Copper Tubes AB, Västerås.



Box 47607 117 94 Stockholm

Tfn 08-506 002 00

Fax 08-506 002 10

E-post svenskvatten@svenskvatten.se

www.svenskvatten.se