

Dricksvatten och korrosion – en handbok för vattenverken

Andra utökade upplagan

***Ann Elfström Broo
Bo Berghult
Torsten Hedberg***



0•12

Utgiven av VAV AB

**VA-FORSK
RAPPORT
2000 • 12**

 **VA-FORSK**

VAV

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 och intresset från kommunernas sida har varit mycket stort. Nästan alla kommuner är med i programmet, vilket innebär att budgeten årligen omfattar drygt åtta miljoner kronor.

VA-FORSK initierades gemensamt av Kommunförbundet och VAV. Verksamheten påbörjades år 1990. Programmet lägger tonvikten på tillämpad forskning 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 utsetts gemensamt av VAV och Kommunförbundet. Kommittén är underställd VAVs styrelse. För närvarande har kommittén följande sammansättning:

Ola Burström, ordförande	Skellefteå
Peter Balmér	GRYAAB, Göteborg
Roger Bergström	VAV
Bengt Göran Hellström	Stockholm Vatten AB
Pär Jönsson	Östersund
Sören Larsson	Hallsberg
Peeter Maripuu	Lysekil
Stefan Marklund	Luleå
Åsa Möller	Sundsvall
Peter Stahre	VA-verket Malmö
Jan Söderström	Sv kommunförbundet

Asle Aasen, adjungerad	NORVAR, Norge
Maria Vink, sekreterare	VAV

Författarna är ensamma ansvariga för rapportens innehåll, varför detta ej kan åberopas såsom representerande VAVs ståndpunkt.

VA-FORSK
VAV AB
101 53 STOCKHOLM
Tel: 08-677 25 70
Fax: 08-677 25 75

VAV AB är servicebolag till Svenska Vatten- och Avloppsverksföreningen

Dricksvatten och korrosion – en handbok för vattenverken

Andra utökade upplagan

***Ann Elfström Broo
Bo Berghult
Torsten Hedberg***

Utgiven av VAV AB

**VA-FORSK
RAPPORT
2000 • 12**



VAV

Rapportens titel:	Dricksvatten och korrosion - en handbok för vattenverken, 2:a upplagan
Title of the report:	Drinking Water and Corrosion - A Guide for the Water Works, 2nd Edition
Rapportens beteckning Nr i VA-FORSK-serien:	2000•12
ISSN-nummer:	1102-5638
ISBN-nummer:	91-89182-49-9
Författare:	Ann Elfström Broo, VBB VIAK AB, Bo Berghult, VBB VIAK AB, Torsten Hedberg, CTH, Vatten - Miljö - Transport
Utgivare:	VAV AB
VA-FORSK projekt nr:	97-109
Projektets namn:	Vattenkvalitetens betydelse för korrosion på dricksvattenledningar av rostfritt stål
Projektets finansiering:	VA-FORSK, BFR, Avesta Sandvik Tube AB, Avesta Sheffield AB, BM NOCOR AB
Rapporten beställs från:	AB Svensk Byggtjänst, Litteraturtjänst, 113 87, Stockholm, tfn 08-457 11 00
Rapportens omfattning Sidantal:	88
Format:	A4
Upplaga:	1200
Sökord:	Dricksvatten, distribution, korrosion, järn, koppar, rostfritt stål, ledningar, rörmaterial
Keywords:	Drinking water, distribution, corrosion, iron, copper, stainless steel, network, pipe material
Sammandrag:	Rapporten beskriver dricksvattenkvalitetens betydelse för korrosion på ledningsmaterialen järn, koppar och rostfritt stål. Med hjälp av fältmätningar, laboratorieundersökningar, pilotskaleförsök och försök i full skala har modeller framtagits som väl beskriver korrosionssituationen på rörmaterialen som funktion av vattenkvalitetsparametrarna.
Abstract:	The report describes The report describes the impact of drinking water quality on the corrosion of the pipe materials iron, copper and stainless steel. By applying field measurements, laboratory investigations, pilot plant studies and full scale tests models were developed. The corrosion situation on the different pipe materials are described as a function of the water quality parameters.
Målgrupper:	Kommunala VA-sektorn, industrin, konsulter
Utgivningsår:	2000
Pris 2000:	200 kr, exkl moms

SAMMANFATTNING

Invändig korrosion i dricksvattenledningar resulterar på många håll i allvarliga kvalitetsstörningar på dricksvattnet. På grund av att många olika rörmaterial används och att dessa rörmaterial var och ett behöver olika dricksvattenkvalitet om tillskottet av korrosionsprodukter till vattnet ska minimeras, är problemställningen kring korrosionen i distributionsnäten synnerligen komplex.

I denna handbok behandlas de båda vanliga rörmaterialen järn och koppar och också ett alternativt material för inomhusinstallationer, nämligen rostfritt stål. Korrosionen och tillskottet av korrosionsprodukter till vattnet har undersökts som funktion av de vanliga dricksvattenkvalitetsparametrarna pH, alkalinitet, kalciumhalt, kloridhalt, sulfathalt och också som funktion av halten naturligt organiskt material och redoxpotentialen. Med hjälp av fältmätningar, elektrokemiska undersökningar, kupongförsök, pilotskalestudier och fullskaleförsök har modeller för korrosionsprocesserna framtagits under antagandet att merparten av korrosionen sker under stagnanta förhållanden. Mot bakgrund av dessa modeller diskuteras effekten av vattenkvalitetsförändringar.

Korrosionen på järn och också mängden korrosionsprodukter i vattnet bestäms av ytkomplexbildning. Korrosionen avtar med sjunkande pH och ökande alkalinitet. Vid låga pH-värden ökar korrosionen med ökande halt naturligt organiskt material, medan effekten är den motsatta vid höga pH-värden. Klorid- och sulfathalterna har i normala dricksvattenkoncentrationer liten inverkan på allmätkorrosionen på järn, medan en ökad kalciumhalt reducerar korrosionen vid höga pH-värden och låg alkalinitet. Korrosionen tilltar också vid låga redoxpotentialer, till exempel efter långa uppehållstider.

Halten koppar i nattståndet vatten bestäms av jämvikter mellan den meta stabila fasta fasen koppar(II)hydroxid och lösliga kopparkomplex. Halten ökar med sjunkande pH, ökande alkalinitet och ökande halt naturligt organiskt material, medan halten klorid, sulfat och kalcium i normala dricksvattenkoncentrationer har mycket liten effekt. Korrosionshastigheten på koppar, som inte är relaterad till halten koppar i nattståndet vatten ökar med ökande halt koldioxid och naturligt organiskt material i vattnet. Kloridhalten har också stor betydelse i initialfasen.

Det rostfria materialet SS 2347 uppvisar goda korrosionsegenskaper med extremt låg korrosionshastighet och utlösning av korrosionsprodukter i svenska dricksvattenkvaliteter. Massbalansberäkningar visar att mycket låga halter av de i materialet ingående tungmetallerna kan förväntas tillföras avloppsvattnet. Mot bakgrund av detta och en jämförande studie av installationskostnaderna mellan rostfria rör och kopparrör ter sig rostfritt stål av denna kvalitet som ett alternativ för inomhusinstallationer som bör övervägas.

SUMMARY

Drinking water degradation is often a result of internal corrosion of the distribution network. Since several different pipe materials are used, each one putting different demands on the drinking water quality for by-product release minimisation, a complex situation concerning corrosion in the distribution networks prevails.

In the present handbook the two most common pipe materials iron and copper are discussed and also an alternative material for indoor installations, stainless steel. The corrosion and the by-product release have been investigated with respect to the drinking water parameters pH, alkalinity, calcium content, chloride content, sulphate content, and also the content of natural organic matter and redox potential. By applying field measurements, electrochemical investigations, coupon tests, pilot plant studies and full scale tests, models were developed under the assumption that most of the corrosion occurs under stagnant conditions. The effect of changing the drinking water quality is discussed in the light of the models.

Both the corrosion and the by-product release of iron are determined by surface complexation. The corrosion decreases with decreasing pH and increasing alkalinity. At low pH values the corrosion increases with increasing content of natural organic matter while the effect is the opposite at high pH values. Chloride and sulphate concentrations in the normal drinking water range have little effect on the uniform corrosion of iron while an increased calcium content decreases the corrosion rate at high pH values in low alkalinity waters. The corrosion increases at low redox potentials, e.g. after long retention times.

The copper content in water after one night of stagnation is determined by equilibria between the meta stable solid phase cupric hydroxide and dissolved copper complexes. The copper content increases with decreasing pH, increasing alkalinity and increasing content of natural organic matter. The contents of chloride, sulphate and calcium in normal drinking water concentrations have very little effect. The copper corrosion rate is not related to the copper content in stagnant water. The corrosion rate increases with the content of carbon dioxide and natural organic matter in the water. The chloride content is of large importance during the initial phase.

Stainless steel SS 2347 (EN 1.4401) shows good corrosion resistance properties with extremely low corrosion rate and by-product release in Swedish drinking water qualities. Very low contributions to the sewage water of heavy metals present in the material are to be expected according to mass balance calculations. This together with an investigation comparing installation costs for stainless steel and copper piping for indoor installations show that stainless steel of the present quality is an alternative for indoor installations worth considering.

FÖRORD

1997 utkom första upplagan av "Dricksvatten och korrosion – En handbok för vattenverken". I den presenterades delvis nya teorier för vattenkvalitetens betydelse för järn- och kopparkorrosion och för vattenkvalitetsförändringar till följd av denna korrosion. I denna nya upplaga har resultaten kompletterats med effekten av naturligt organiskt material, samt med en undersökning av rostfritt stål för användning i inomhusinstallationer. Som tidigare har ambitionen varit att göra resultaten tillgängliga och tillämpliga i va-verksamheten, varför rapporten fått formen av en handbok snarare än en vetenskaplig rapport. För den som så önskar finns resultaten rapporterade också i vetenskaplig form i ett antal publikationer, se referenslistan, appendix A6.

Ett stort tack till de olika kommuner som deltagit, och till deras medarbetare som visat stort engagemang och välvilligt assisterat vid provtagningarna. Ett särskilt tack till VA-FORSK, BFR, Avesta Sandvik Tube AB, Avesta Sheffield AB och BM NOCOR som tillsammans med kommunerna finansierat verksamheten och därmed gjort projektet möjligt.

Göteborg i oktober 2000

Ann Elfström Broo Bo Berghult Torsten Hedberg

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1. Inledning	1
Vattenkvalitet och rörbrott.....	4
Slamanvändning inom jordbruket.....	4
Mikrobiologisk aktivitet.....	5
Kungörelsen – ett mål i sig?	5
”Framtidens distribution av dricksvatten”	6
Vilka parametrar studerades?	7
2. Mer än bara vatten	9
pH och sånt... ..	9
Olika vattenkvalitet, men inte bra eller dåliga.....	12
Dricksvatten berett av ytvatten	12
Dricksvatten berett av grundvatten	13
Inte bara ytteligheter	13
Vattnets kvalitet förändras under distributionen.....	13
3. Att kontrollera korrosion.....	15
Erfarenheter och utveckling av korrosionskontroll vid svenska vattenverk.....	15
Var står vi Sverige idag?	17
4. Korrosion i dricksvattenledningar.....	21
Hur sker korrosionen?	22
Korrosion i dricksvattenledningar av järn	22
Korrosion i dricksvattenledningar av koppar	28
Innan den maximala halten uppnåtts	30
Korrosion i dricksvattenledningar av rostfritt stål	33
Lokala korrosionsangrepp	38
Komplexa rörsystem med många material.....	39
5. Framtidens dricksvattendistribution – kan vi dra nytta av kunskapen.....	45
Vilken vattenkvalitet skall man välja om man har järn- och kopparrör i distributionsnätet?	46
Rostfritt stål – ett alternativ till koppar för inomhusinstallationer?	51
Vad kostar det då?	51
6. Att komma ihåg.....	55

Appendix:

A1. Grundläggande korrosion.....	57
A2. Hur gjordes försöken?	61
A3. Korrosionsparametrarna.....	65
A4. Beräkningsmatriser	67
A5. Ordlista.....	71
A6. Referenser.....	75

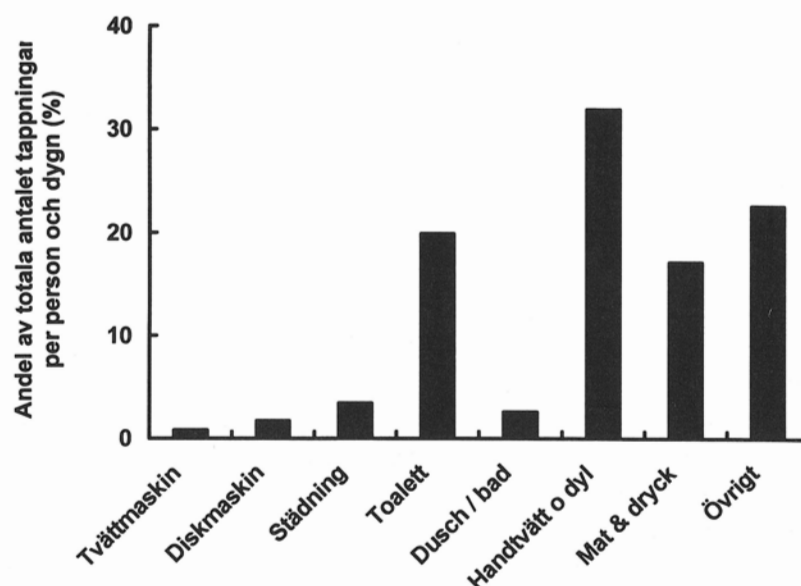
1. INLEDNING

Vattnet vi dricker är inte bara vatten. Tvärtom är det just innehållet av annat än vatten i vattnet som ger det mycket av dess egenskaper och som endera gör det extra nyttigt och gott eller rent av ohälsosamt. I sitt kretslopp genom vår natur har vattnet en helt avgörande betydelse för allt liv. Med vattnet transporteras näringsämnen och mineraler, men också gifter och ämnen som på olika sätt hamnat på fel plats i vårt samhälle.

Dricksvattenproducentens uppgift är att stödja naturen och göra vattnet drickbart och gott och förmedla det till konsumenten. Vattenberedningsprocessen ska vara sådan att vattnet upprätthåller sin balans av ingående ämnen och att onödiga eller giftiga ämnen avlägsnas. Eftersom vattnet ska transporteras i ett distributionsnät måste samspelet mellan vattnet och rören vara sådant att föroreningar inte tillsätts eller balansen störs. Detta har naturligtvis hälsomässiga och ekonomiska orsaker, men tillförs ämnen som naturligt inte ska finnas i vattnet störs också naturens kretslopp. Det är uppenbart att en lång rad krav ställs på dricksvattenproducenten.

Men vad använder vi vårt dricksvatten till? I en liten enkätundersökning fick ett 10-tal hushåll under två vardagar och två helgdagar ange vad dricksvattnet de tappade skulle användas till. Hushållen bestod av ensamstående, två personer eller av barnfamiljer boende i lägenhet eller villa.

Resultatet framgår av figur 1, där antalet tappningar i procent av det totala antalet tappningar per person och dygn är angivet för de olika användningsområdena. Vid utvärderingen togs hänsyn till att vattenanvändningen skiljer sig något mellan helg- och vardagar.

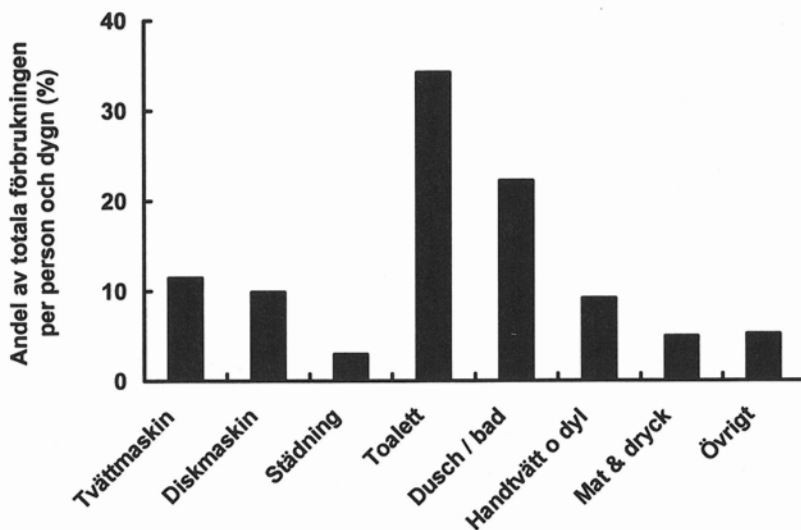


Figur 1. Resultat från enkätundersökningen: Så fördelar sig tappningarna.

Från diagrammet framgår att grovt räknat var en tredjedel av tappningarna för handtvätt, medan mat och dryck, toalett och övrigt stod för vardera cirka en femtedel. De resterande knappt tio procenten fördelade sig på de övriga kategorierna.

Av undersökningen framgick också att varje person använde ca 90 liter vatten per dag. (Detta är sannolikt en mycket låg förbrukning. Den genomsnittliga hushållsförbrukningen per person och dygn enligt VAV:s statistik är ca 190 liter). Om man, enligt nedan, schablonmässigt anger en trolig vattenförbrukning per gång för varje typ av tappning kan också fördelningen av förbrukningen uppskattas, figur 2.

- Tvättmaskin 50 l
- Diskmaskin 20 l
- Städning 3 l
- Toalett 6 l
- Dusch / bad 30 l
- Handtvätt och dylikt 1 l
- Mat och dryck 1 l
- Övrigt 0,8 l



Figur 2. Resultat från enkätundersökningen: Så fördelar sig vattenförbrukningen.

Med schablonen och enkätundersökningen som underlag, kan man således dra slutsatsen, att vill man spara vatten är lågspolande toaletter och duschdisciplin framkomliga områden. Det bör påpekas, att undersökningen gjordes under en årstid då trädgårdsbevattning inte var aktuell, varför posten "övrigt" sannolikt är något lågt räknad på årsbasis.

De krav vi ställer på dricksvattnet är i första hand relaterade till dryck och matlagning. Mindre än 5 % av hushållsvattnet används för detta ändamål. I takt med att vi skärper kraven på vårt dricksvatten kan man fråga sig om det längre är relevant att rena allt vatten till en allt högre grad för att sedan distribuera det långa sträckor, där korrosion och mikrobiologisk aktivitet kvalitetsmässigt verkar i motsatt riktning.

För att distributionsnäten ska korrodera så lite som möjligt har man under många år vidtagit åtgärder som gemensamt kan benämnas korrosionskontroll. Det kan röra sig om allt från enkla pH-justeringar till mer komplicerade processer som innefattar alkalinitets- och hårdhetsförändringar eller reduktion av organiskt material.

För att kunna besvara frågan om vilken korrosionskontrollåtgärd som är lämpligast när man vill komma till rätta med korrosionsproblem i ett distributionsnät måste frågan vara formulerad på ett sätt så att entydiga svar kan ges.

Vilken åtgärd som skall väljas beror på vilket mål man vill uppnå.

Åtgärden kan vara avsedd att:

- förbättra vattenkvaliteten för konsumenten.
- minska antalet rörbrott.
- ge ett avloppsslam med lägre halter av korrosionsprodukter.
- minska risken för mikrobiologiskt inducerad korrosion.
- uppfylla dricksvattenkungörelsens rekommendationer.

Även om var och en av dessa orsaker kan vara skäl nog att införa korrosionskontrollåtgärder, är säkert kombinationer vanligast.

Vattenkvalitet och rörbrott

Svenska korrosionskontrollåtgärder i mjuka vatten har historiskt sett syftat till att förbättra dricksvattenkvaliteten för konsumenten, att motverka rött vatten. I Norge genomförs idag liknande åtgärder men med det primära syftet att motverka läckage till följd av invändig korrosion på järnrör. Att samma åtgärd (alkalinitets-, pH- och hårdhetshöjning) kan användas för helt olika syften har sitt skäl i att vattenkvaliteten före åtgärden skiljer sig åt avsevärt. Den dricksvattenkvalitet som man i båda fallen eftersträvar är erfarenhetsmässigt framtagen och har i de flesta fall lett till förbättringar.

En annan vattenkvalitetsåtgärd, avhårdning, har varit ämnad att minska utfällningen av kalciumkarbonat i hårda vatten. Även om denna åtgärd inte i första hand syftat till att motverka korrosion, har den bland annat inneburit att lokala korrosionsangrepp på varmvatteninstallationer minskat.

Slamanvändning inom jordbruket

Användningen av avloppsslam som jordförbättringsmedel på åkrarna anses av många som en förutsättning för det hållbara samhället. Detta skärper renhetskraven på slammet. Flera undersökningar har visat att så mycket som 70 % av den koppar som återfinns i slammet härrör från kopparledning för dricksvattendistribution. I områden med hårda vatten är kopparhalterna ofta mycket höga, vilket fått till följd att korrosionskontrollåtgärder också börjat införas för att motverka denna korrosion. Dessa åtgärder går delvis i motsatt riktning mot de åtgärder som vidtas för att begränsa järnkorrosionen. Med allt mer skärpta krav på avloppsslammets kopparhalter uppstår

en konflikt mellan de olika korrosionskontrollåtgärderna.

Alternativa tillvägagångssätt kunde vara att antingen utvinna de värdefulla substanserna, främst fosfor, ur slammet som sedan kan brännas eller att på sikt begränsa användningen av koppar som ledningsmaterial.

Det bör påpekas att koppar inte är den enda föroreningen i slammet.

Mikrobiologisk aktivitet

Mikrobiologisk aktivitet kan påvisas i alla distributionssystem för dricksvatten. I vissa fall kan den mikrobiologiska aktiviteten inducera korrosionsangrepp. Miljön under biofilmen är avgörande för denna korrosionstyp och kan under vissa omständigheter bli extrem med t.ex. mycket låga pH-värden eller syrefattiga förhållanden. Idag diskuteras beredningsprocesser för att åstadkomma biostabila vatten, processer som också skulle minska risken för mikrobiologiskt inducerad korrosion. Ett mål i sådana beredningsprocesser är att minska mängden naturligt organisk material och på så sätt minska näringstillförseln till mikroorganismerna. Förekomsten av organiskt material kan dock i vissa fall minska allmänkorrosionen på järn, varför även denna problemställning är komplex.

Kungörelsen – ett mål i sig?

Det är viktigt att korrosionskontrollåtgärder vidtas utifrån den aktuella distributionssituationen, behov av korrosionskontroll, vattenkvalitet, distributionsnät, befolkningssituation etc. Det som i en kommun är relevant, behöver inte vara överförbart till en annan. I distributionsnäten finns många olika material och dessa kräver var och ett olika vattenkvalitet för att korrosionen ska minimeras.

Livsmedelsverkets dricksvattenkungörelse är för närvarande under omarbetning för att regelverket skall anpassas till gällande EG-regler. Eftersom vare sig den gamla eller nya dricksvattenkungörelsen kan omfatta en utförlig redogörelse för vattenkvalitetens förhållande till alla olika rörmaterial och kombinationer av dessa bör kungörelsens rekommendationer vad gäller korrosion inte användas som lag. Självfallet måste dock regelverket uppfyllas och vattnets kvalitet anpassas så att

det uppfyller ställda krav med avseende på alla reglerade parametrar.

Denna handbok syftar till att klarlägga några av de samband som finns mellan vattenkvaliteten och korrosionsprocesserna på olika rörmaterial för dricksvattendistribution.

"Framtidens distribution av dricksvatten"

1997 publicerades rapporten "Dricksvatten och korrosion – en handbok för va-verken" (VA-FORSK:s rapportserie, 1997-7). I rapporten presenterades resultat från ett forskningsprojekt där vattenkvalitetens betydelse för korrosion på dricksvattenledningar av järn och koppar undersökts under 5 år. Modeller för såväl järn- som kopparkorrosion som funktion av de oorganiska vattenkvalitetsparametrarna presenterades. Tre av slutsatserna från detta projekt var:

1. Det går inte att samtidigt optimera dricksvattenkvaliteten med avseende på korrosionen på de båda materialen järn och koppar.
2. Koppar som ledningsmaterial kan ifrågasättas om avloppsslam skall användas som jordförbättringsmedel.
3. Modellerna för järn- och kopparkorrosion behövde kompletteras med inverkan av naturligt organiskt material.

Det nu avslutade forskningsprojektet har haft som mål att komplettera det tidigare projektet i konsekvens med dessa punkter. Arbete har således nedlagts på att utreda betydelsen av naturligt organiskt material för korrosionsprocesserna på järn och koppar, samt att utreda möjligheten att använda rostfritt stål som ersättningsmaterial för koppar i inomhusinstallationer.

Projektet har drivits från Göteborgs universitet, institutionen för kemi – oorganisk kemi och Chalmers tekniska högskola, Vatten – Miljö – Transport (före detta institutionen för va-teknik) med aktiv medverkan från ett antal kommuner. Projektet har finansierats av Svenska vatten- och avloppsverksföreningens (VAV) forskningsråd (VA-FORSK), Byggforskningsrådet (BFR), Avesta Sheffield AB, Avesta Sandvik Tube AB och BM NOCOR AB.

Resultaten från det föregående projektets *fältmätningar, laboratoriestudier, pilotskalestudier och fullskaleförsök* har

utnyttjats och kompletterats med ytterligare *fältmätningar*, *laboratoriestudier* och *pilotskalestudier*. Ambitionen har alltså, som tidigare, varit att så långt möjligt undersöka de situationer som verkligen förekommer i våra distributionsnät och kombinera detta med studier under kontrollerade former för att kunna skapa en helhetsbild och beskriva denna med välgrundade teorier.

Vilka parametrar studerades?

En lång rad parametrar har betydelse för korrosionen på dricksvattenledningar:

- Syrehalten
- pH
- Alkaliniteten (karbonatsystemet)
- Kalciumhalten
- Halten av oorganiska salter, främst sulfater och klorider
- Halten av naturligt organiskt material
- Mikrobiologisk aktivitet
- Halten av desinfektionskemikalier
- Temperaturen

Några av dessa parametrar, syrehalten, halten av oorganiska salter, halten av desinfektionskemikalier och temperaturen är samtliga sådana, att de av olika skäl inte förändras i större utsträckning. Den mikrobiologiska aktivitetens inverkan på korrosionsprocessen är ett område som av omfattningsskäl utesluts ur projektet. pH, alkalinitet, kalciumhalt och halten av naturligt organiskt material blev därför huvudparametrar i studiet av korrosionsprocessernas vattenkvalitetsberoende.

Som ett av resultaten av projektet visade det sig att korrosionsprocesserna, så som de förekommer i de undersökta distributionsnäten, i stort kan beskrivas som funktion av detta val av parametrar. Läsaren bör dock vara medveten om följande begränsningar:

- Endast järn- och kopparmaterial, samt en kvalitet av rostfritt stål, SS2347, har studerats.
- Endast kallvatten och effekten av parametrarna pH, alkalinitet, kalciumhalt och naturligt organiskt material, samt i någon mån sulfat och klorid har studerats.

- Modellerna för korrosion av järn-, koppar- och rostfria rör är baserade på antagandet att korrosionen i huvudsak sker under stagnanta förhållanden. De komplicerade distributionsnät som idag är vanliga i våra kommuner där många olika rörmaterial använts och nya material ständigt introduceras innebär stora osäkerheter.
- Att en vattenkvalitet är bra med avseende på de studerade parametrarna och materialen innebär inte nödvändigtvis att denna kvalitet också är bra under andra förutsättningar, till exempel vid andra temperaturer, eller om vattnet är extremt i andra avseenden, till exempel om kloridhalten är mycket hög.

2. MER ÄN BARA VATTEN

Smaken på vattnet vi dricker är viktig för oss. Säkert har de flesta av oss ett favoritvatten som smakar särskilt bra. Lika säkert är att våra favoritvatten är olika. Konsumtionen av buteljerat vatten ökar också och detta är en sed vi övertagit från Sydeuropa och länder där man inte självfallet dricker det kommunalt distribuerade vattnet. Där är således dricksvattnet inte dricksvatten.

Det kommunala dricksvattnet i Sverige är ur ett internationellt perspektiv genomgående bra eller mycket bra ur såväl smak- som hälsosynpunkt. Eftersom vi har gott om sjöar och vattendrag med förhållandevis rent vatten och ett ringa påverkat grundvatten är förutsättningarna goda för enkla och tillförlitliga beredningsprocesser. Kunnandet inom va-sektorn är genomgående högt och vattenkvaliteten utvecklas ständigt mot allt högre ställda förväntningar.

Men vi har många olika vattenkvaliteter. I Sverige är merparten av dricksvattnet berett av ytvatten, det vill säga vatten från sjöar och andra vattendrag, men vi har också områden där grundvatten är råvattentäkt. Innan vi tittar närmare på vad som karakteriserar dessa vatten, kan det vara skäl att först definiera de vanligaste dricksvattenparametrarna.

pH och sånt...

Ett analysprotokoll för dricksvatten kan te sig nog så förvirrande med parametrar vars namn och enheter, likt ett läkarutlåtande bara ger information för den invigde. Följande sammanställning syftar därför till att ge ett stöd för den fortsatta diskussionen.

pH-värdet

är ett mått på vattnets surhetsgrad eller innehåll av vätejoner, H^+ . Ju lägre pH desto surare vatten. Ett neutralt vatten har $pH = 7$.

pH – är en logaritmisk storhet och ett mått på vattnets surhetsgrad eller innehåll av vätejoner, H^+ . Ju lägre pH-värde desto fler vätejoner och surare vatten. I ett vatten finns både vätejoner och hydroxidjoner, OH^- . Medan vätejonerna är sura, är hydroxidjonerna basiska. Finns det mycket vätejoner, finns det lite hydroxidjoner och omvänt. Ett neutralt vatten (med lika mycket väte- och hydroxidjoner har $pH = 7$, medan ett dricksvatten vanligen har ett pH-värde mellan 7,5 och 9.

Eftersom många korrosionsprodukter är basiska (innehåller hydroxid eller oxidjoner) blir ofta korrosionsprodukterna mer lösliga vid låga pH-värden.

Alkalinitet

är ett mått på vattnets förmåga att motstå förurning. Begreppet är släkt med buffertförmågan. Vanligen är alkaliniteten ungefär lika med totalhalten karbonat i vattnet.

Alkalinitet – är ett mått på vattnets förmåga att motstå förurning och mäts i enheten $mg/l HCO_3^-$ (vätekarbonat). Begreppet är släkt med buffertförmågan. I ett dricksvatten är alkaliniteten vanligen ungefär lika med totalhalten karbonat och används också så, eftersom analysen är enkel. Alkaliniteten hos svenska dricksvatten varierar mellan 20 och 350 $mg/l HCO_3^-$.

Totalhalten karbonat är vattnets samlade innehåll av koldioxid (CO_2), kolsyra (H_2CO_3), vätekarbonatjoner (HCO_3^-) och karbonatjoner (CO_3^{2-}). Karbonatinnehållet fördelar sig mellan sina olika former beroende på pH:

aq

är en förkortning för aqua som betyder vatten, d.v.s. vattenlösning.



Den första jämvikten är kraftigt förskjuten åt vänster, vilket innebär att man i realiteten kan anta att formen kolsyra inte finns. När beteckningen kolsyra används syftar man alltså på koldioxid. Eftersom vätejoner (H^+) ingår i jämviktsuttrycken, finns det vid låga pH-värden mera koldioxid, vid höga mera karbonatjoner. I pH-intervallet 6,5 till 10 dominerar vätekarbonatjonerna i vattnet.

Höga totalhalter av karbonat gör vattnet stabilt och motståndskraftigt mot pH-förändringar. Tillsammans med kalciumjoner kan karbonatjonerna bilda den svårslösliga föreningen kalciumkarbonat ($CaCO_3$), vilken speciellt i hårda vatten kan vara ett stort problem med igenkalkningar av utrustning och lokala korrosionsangrepp på värmeväxlarytor som följd. Koldioxiden tycks ha stor betydelse ur korrosionssynpunkt.

Hårdhet – är i ett dricksvatten vanligen det samlade innehållet av kalcium- (Ca^{2+}) och magnesiumjoner (Mg^{2+}). Hårdheten mäts ofta i mg/l Ca^{2+} och då har innehållet av magnesium räknats om till kalciumekvivalenter. En annan enhet är tyska hårdhetsgrader ($^{\circ}\text{dH}$), vilken betecknar innehållet av hårda joner i 1 dl vatten omräknat till kalciumoxidekvivalenter (CaO). Dividerar man hårdheten mätt i mg/l Ca^{2+} med 7,1 får man hårdheten uttryckt i tyska grader. Hårdheten i svenska dricksvatten varierar mellan 10 och 150 mg/l Ca^{2+} .

Som tidigare nämnts innebär höga kalciumhalter en risk för utfällning av kalciumkarbonat (CaCO_3). Innehållet av magnesium i vattnet anses vara nyttigt. Man har sett positiva samband mellan sannolikheten att tillfriskna efter hjärtinfarkt och magnesiumhalten i dricksvattnet.

Halterna av klorid- och sulfatjoner – Förutom kalcium, magnesium och karbonatsystemet innehåller vattnet många olika joner från upplösta salter. Ur korrosionssynpunkt är de viktigaste sulfat- och kloridjonerna, men ur till exempel en mikrobiologisk synvinkel är vattnets innehåll av fosfor- och kväveföreningar också mycket betydelsefulla. Halten av sulfat respektive kloridjoner i svenska vatten kan variera mellan några enstaka mg/l till 100 mg/l eller mer.

COD_{Mn} eller TOC – är båda parametrar för bestämning av mängden naturligt organiskt material i vattnet. I COD-analysen oxideras det organiska materialet med hjälp av permanganat och enheten för denna analys är mg/l O_2 (syre). TOC-analysen är vanligen termisk och de organiska kolföreningarna bryts ner till koldioxid. Enheten för denna analys är mg/l C (kol). I svenska dricksvatten är halten organiskt material mätt som COD_{Mn} vanligen lägre än 4 mg/l O_2 och mätetalet för TOC är ungefär detsamma fast uttryckt i mg/l C.

Naturligt organiskt material (NOM) är ett samlingsbegrepp för en stor mängd organiska molekyler med varierande storlek och fysikaliska / kemiska egenskaper och med olika funktionella grupper. Halten av NOM i naturliga vatten varierar mellan 0,05 mg/l upp till cirka 20 mg/l räknat som totalt organiskt kol (TOC). NOM består av nedbrytningsprodukter från naturen, såsom lignin, garvämnerna och humusämnerna. Humusämnerna består av humus- och fulvosyror och anses vara de viktigaste substanserna av NOM vad gäller påverkan vid vattenbehandling och för korrosionen på olika rörmaterial.

Fulvosyrorna innehåller flera funktionella grupper och har därför en högre laddningstäthet jämfört med humussyrorna.

Hårdhet

är i dricksvattnet vanligen lika med summan av halterna kalcium (Ca^{2+}) och magnesium (Mg^{2+}). Hårdhet mäts i mg/l Ca^{2+} eller i tyska hårdhetsgrader ($^{\circ}\text{dH}$) som är ungefär mg/l $\text{Ca}^{2+}/7,1$.

Naturligt organiskt material

förkortas NOM och är ett samlingsbegrepp för en stor mängd organiska molekyler. Mäts som COD_{Mn} (organisk syreförbrukning, mg/l O_2) eller TOC (totalt organiskt kol, mg/l C).

Funktionella grupper

är delar av kemiska föreningar med speciella egenskaper.

Ozon

är en kraftigt oxiderande syreförening med den kemiska beteckningen O_3 .

Polära grupper

är molekyldelar med ojämn laddningsfördelning.

Aromatiska ämnen

är föreningar innehållande omättade kolväteringar.

Som en konsekvens av detta är fulvosyrorna svårare att neutralisera och flocka bort i en reningsprocess vilket leder till att andelen fulvosyror ökar i behandlat vatten. Vattenberedningen påverkar även NOM till såväl struktur som storleksfördelning. Flockning med järn anses ge en bättre reducering av organiskt material än aluminium och oxidation med ozon bryter ner fraktioner med hög och låg molekyylvikt samt ökar andelen polära grupper.

Naturligt organiskt material från grund- och ytvattentäkter skiljer sig något till sin karaktär. Bland annat är syrehalten och färgen lägre i grundvatten, men bindningsförmågan till metalljoner skiljer sig inte nämnvärt åt mellan de båda NOM-typerna.

En metod för att karakterisera NOM är att dels bestämma det totala organiska kolinnehållet (TOC-halten) och förmågan att absorbera ultraviolett ljus vid våglängden 254 nm, UV_{254} . Kvoten av dessa två bestämningar ger den specifika UV absorptionen, SUVA. Empiriskt har det visats att ett högre värde på SUVA motsvarar mer aromatiska humusämnen.

Det är viktigt att poängtera att man ännu idag inte vet hur NOM ser ut i sin helhet. I de undersökningar som hittills har gjorts behandlas det organiska materialet utifrån sina kemiska och fysikaliska egenskaper medan den molekylära strukturen inte diskuteras nämnvärt.

Olika vattenkvaliteter, men inte bra eller dåliga...

Eftersom olika råvattentäkter med skilda vattenkvaliteter används för dricksvattenberedning, får också det färdiga dricksvattnen skillnader i kvalitet. Ordet kvalitet används i detta sammanhang inte i sin värdeladdade betydelse. Det är alltså inte så att kvaliteten är bra eller dålig, utan beskrivs med hjälp av mätetalen för de olika dricksvattenparametrarna.

Dricksvatten berett av ytvatten

Som regel har ytvatten låg hårdhet och alkalinitet. Innehållet av NOM är ofta betydande i råvattnet och beredningen måste då innefatta en process för minskning av detta innehåll. Vidare är ytvattnen ofta påverkade av samhällets föroreningar och den mikrobiologiska aktiviteten kan vara hög. Tillsammans innebär detta, att beredningsprocessen måste innehålla flera steg för att ett bra dricksvatten ska kunna tillverkas.

Dricksvatten berett av grundvatten

På många håll används istället grundvatten som råvatten. Där är vattnets hårdhet oftast högre än för ytvatten, liksom även alkaliniteten. Innehållet av andra oorganiska salter är också ofta högre, medan innehållet av NOM kan vara relativt lågt. Det är vanligt att grundvatten distribueras utan eller efter endast en enklare beredningsprocess.

Inte bara ytterligheter

Det finns emellertid inte bara två olika vattenkvaliteter i landet. Mellan dessa ytterligheter finns grundvatten med betydligt lägre hårdhet och alkalinitet. Dessa vatten kan vara naturliga grundvatten eller konstgjort infiltrerade. Det finns också ytvatten vars hårdhet och alkalinitet är högre på grund av kalkrik berggrund i tillrinningsområdet. I så kallade korrosionskontrollerade vatten har hårdheten och alkaliniteten förändrats i vattenberedningsprocessen. Korrosionskontroll har tidigare uteslutande tillämpats på ytvatten och syftet har varit att uppnå en vattenkvalitet som erfarenhetsmässigt givit mindre korrosionsproblem på distributionsnätet. Denna vattenkvalitet har vanligen kännetecknats av:

pH: ca 8
Alkalinitet: ca 60 mg/l HCO_3^-
Hårdhet: ca 20 – 30 mg/l Ca^{2+}

På senare tid har även korrosionskontrollåtgärder införts på vattenverk med grundvatten som råvattentäkt. Det är då fråga om att istället sänka alkalinitet och hårdhet.

Dagens diskussioner om processer för att åstadkomma biostabila vatten med mycket låga halter av NOM kan också ses som korrosionskontrollåtgärder, eftersom mikrobiologisk aktivitet också kan ge upphov till korrosion. NOM kan dessutom aktivt delta i korrosionsprocessen.

Vattnets kvalitet förändras under distributionen

När vattenberedningen är klar lämnar vattnet vattenverket för att transporteras i ett distributionsnät innan det når konsumentens tappkran. Distributionsnätet består av många olika rörmaterial, såsom, järn med eller utan cementbruksinfordring eller andra beläggningar, olika plastmaterial, betong, koppar och rostfria material. Dessutom kan vattnet mellanlagras i vattentorn av betong eller andra material och ibland med färgbeläggningar. Alla dessa material bildar tillsammans den miljö vattnet utsätts för, ofta under ganska lång tid. Gemensamt för alla materialen är att de inte är stabila i den form de

förekommer, utan kommer med tiden att brytas ner, korrodera, och avsöndra korrosionsprodukter till dricksvattnet.

Korrosionsprocesserna som sker på rörmaterialen är i högsta grad beroende av dricksvattnets kvalitet. De estetiska och hälsomässiga krav vi ställer på vattnet är dessvärre inte tillräckliga för att minimera korrosionen, utan vi har anledning att ställa ytterligare krav på vårt dricksvatten och dessa krav beror av vilka material vattnet skall passera på sin väg till konsumenten.

Som en ytterligare komplicerande faktor har vi de senaste åren uppmärksammat behovet av det hållbara samhället. Ämnen, bland annat fosfor, som är livsviktiga och begränsade i vår natur återfinns i slammet från avloppsreningsverken och måste återföras till jordbruket. Om korrosionsprocesserna i distributionssystemet för dricksvatten ger tillskott av föroreningar i avloppsslammet som begränsar slammets användning, har vi anledning att ställa nya krav på dricksvattnet och dess distribution.

3. ATT KONTROLLERA KORROSION

Korrosionskontroll är ett allmänt begrepp som innebär att man behärskar korrosionsprocesser och kan minimera korrosion på olika material. I större eller mindre utsträckning korroderar de flesta material i kontakt med vatten. Korrosionshastigheten i ett ledningsnät är beroende på vattnets sammansättning och temperatur, dess strömningshastighet och uppehållstid i ledningarna. Vi vet också att om korrosionen ska minimeras på olika material krävs helt olika vattenkvaliteter och det är därför särskilt olyckligt att det finns så många olika rörmaterial i systemen att ta hänsyn till. Frågan är egentligen om man inte vetat detta mycket länge, men ändå inte förmått att välja rörmaterial rationellt utan varit styrd av ekonomiska, tekniska och estetiska förhållanden vars långsiktiga konsekvenser helt enkelt inte tagits i beaktande.

Inte heller idag medger de ekonomiska villkoren att man utan vidare kan byta material. Istället måste man kompromissa i valet av vattenkvalitet för att minimera korrosionen så att vattnet blir så bra som möjligt för konsumenten. Detta val försvåras ytterligare av de långsiktiga miljömål som måste vägas in.

Funktionen - att leda fram i stort sett opåverkat dricksvatten - måste vara det väsentligaste kriteriet vid val av material för framtiden. Särskilt betydelsefullt är att utvärdera de åtgärder som vidtagits inom korrosionsområdet de senaste åren, dra slutsatser av nya forskningsresultat och därefter forma strategier för framtiden.

Erfarenheter och utveckling av korrosionskontroll vid svenska vattenverk

Under många år före 1960 användes pH-justerings och oorganiska inhibitorer i svenska kommuner med mjukt vatten för att minska problem med rött vatten.

På 60-talet fokuserades intresset på korrosionsangrepp i varmvattenberedare av koppar. För att åtgärda detta problem

Korrosion

är en vanligen oönskad reaktion mellan ett material och dess omgivning. Upplösning av metaller sker genom elektrokemisk korrosion.

Korrosionskontroll

är en samlad beteckning på åtgärder ämnade att begränsa korrosion eller korrosionens återverkningar.

Inhibitorer

är tillsatskemikalier (oorganiska eller organiska) som har till uppgift att förhindra korrosion genom att skydda ytan. Exempel: silikat- och fosfatjoner.

Punktkorrosion

är en korrosionstyp som på kort tid kan orsaka perforering av konstruktionsmaterialet med mycket små hål. Orsaken till punktkorrosion är dåligt känd, men defekter i passivskiktet spelar stor roll. Kan ge omfattande läckageskador men inte nödvändigtvis höga halter av korrosionsprodukter.

Erosionskorrosion

orsakas av att det strömmande vattnet med eventuella partiklar "slipar" bort skyddsskikt på insidan av rörväggen i böjar och förträngningar och frilägger ytan för fortsatt korrosion. Uppträder om rördimensionen orsakar för höga strömningshastigheter.

Langeliers index (LSI)

Indikerar om vattnet är övermättat med avseende på kalciumkarbonat eller inte.

föreslogs att vattnets alkalinitet skulle höjas. Ett tiotal år senare upptäcktes på vissa platser två typer av lokala korrosionsangrepp / punktkorrosion i kallvattenrör av koppar. Den ena typen orsakades av kopparrörens framställningssätt och den andra typen relaterades till vattenkvaliteten. Denna senare typ har inte blivit klarlagd, men anses kunna motverkas med hjälp av en alkalinitetshöjning. Genom åren har många fall av lokala korrosionsangrepp och erosionskorrosion rapporterats och inte heller idag är man fri från dessa problem.

På 60-talet diskuterades också den positiva hälsomässiga effekt som ett hårt vatten ansågs ha på tillfrisknandet efter hjärtinfarkter. Detta ledde fram till ett ökat intresse för hårdhetshöjning, ett begrepp som blev vanligt också i samband med korrosionskontroll. I andra länder, bland annat Tyskland, användes ett så kallat jämviktsindex, Langeliers index, som ett korrosionsindex. Om detta var uppfyllt skulle korrosionen på olika material minska. Senare forskning har visat att detta var fel, men indexet försenade ändå kunskapsutvecklingen om korrosionsprocesserna.

I flera svenska kommuner med olika vatten utfördes under 70- och 80-talen undersökningar av vattenkvaliteten och dess samband med eventuella korrosionsproblem. Resultatet var tydligt. I hårda vatten dominerade kopparkorrosion, i mjuka järnkorrosion. Detta initierade ny forskning, men trots ofullständig förståelse av korrosionsprocesserna kom hårdhetshöjning i ropet som metod att kontrollera korrosionen i mjuka vatten. Kopparkorrosionen ansågs då inte vara ett stort problem i dricksvattenssammanhang. Man kunde ju spola ut 5-10 liter vatten före användning och därmed hålla kopparhalterna i schack.

De första vattenverken i Sverige som tillämpade hårdhetshöjning var Varberg och Karlskrona. Tiden var tidigt 70-tal. På 80-talet följde många vattenverk efter, men åtgärderna anpassades på olika sätt och begreppet "hårdhetshöjning" började ersättas med "korrosionskontroll". Vattenkvalitetsmålet som man strävade mot för att minimera korrosion på både järn och koppar var:

- 1 mmol HCO_3^-/l (60 mg/l)
- 3-4 tyska hårdhetsgrader (20-30 mg/l Ca^{2+})
- $\text{pH} \approx 8$

Uppföljningen av de relativt omfattande och kostsamma åtgärderna i vattenverken var vanligen mycket begränsad och ordentliga redovisningar finns bara i ett fåtal fall.

I samband med en kampanj mot surt vatten som Naturvårdsverket drev på 80-talet installerades alkaliska filter efter många privata vattentäkter. I första hand skulle pH-värdet höjas så att kopparkorrosionen minskade, men målet var också att höja vätekarbonathalten för att åstadkomma ett förhöjt förhållande mellan vätekarbonathalten och sulfathalten för att undvika punktkorrosion på koppar. Att detta samband tagits fram för varmvatten glömdes bort i många fall, liksom att kunskapen var bristfällig om hur en förhöjd vätekarbonathalt påverkar allmänkorrosion på koppar i kallvatten. På senare tid har intresset fokuserats på tungmetaller och eftersom kopparkhalten i många avloppsslam överskrider gällande gränsvärden för slamanvändning inom jordbruket är utvecklingen mot ett långsiktigt bärkraftigt samhälle idag ett tungt skäl för att minimera korrosionen i dricksvattenledningarna.

Var står vi i Sverige idag?

För några år sedan sändes en enkät ut till de cirka 100 vattenverk som har någon form av korrosionskontroll (utöver en enkel pH-justering) för att i första hand få en uppfattning om levererad dricksvattenkvalitet och hur väl de korrosionsförebyggande kemikalierna utnyttjas.

Av de 47 vattenverk som svarade på enkäten var 87 % ytvattenverk. För den kemiska fällningen använde 58 % aluminiumsulfat, 10 % Ekoflock, övriga aluminiumpolymerer och aluminiumklorid. Metoderna för korrosionskontroll var följande:

- | | |
|---|-------------|
| • Kalk i kombination med kolsyra | 73 % |
| • Lut i kombination med kolsyra | 9 % |
| • Alkaliska filter i kombination med kolsyra | 9 % |
| • Bikarbonat i kombination med kolsyra | 9 % |

22 % av de svarande kommunerna uppgav att de endast doserade före det kemiska fällningssteget, medan 15 % endast doserade efter. 55 % doserade såväl före som efter fällningssteget. Dosering före fällningssteget medför vanligen att större mängd fällningskemikalier måste doseras (aluminiumsulfatens pH-sänkande effekt motverkas av ökad buffertförmåga hos vattnet), men det finns också rapporter om att effektiviteten hos fällningsprocessen förbättras.

Dricksvattenkvaliteten vid svenska vattenverk med korrosionskontroll framgår av tabell 1:

Allmän korrosion

innebär att korrosionsprocessen sker jämnt fördelad över hela ytan. Ger sällan upphov till läckage, men kan orsaka höga halter av korrosionsprodukter i vattnet.

Parameter	Medelvärde	Variation
pH	8,16	7,6 - 8,6
Vätekarbonathalt (mg/l)	63,5	36 - 120
Kalciumhalt (mg/l)	20,9	7,5 - 31,5
Fri kolsyra (mg/l)	0,99	0,27 - 2,7
Sulfat (mg/l)	20,4	4 - 44,5

Tabell 1. Dricksvattenkvalitet vid svenska vattenverk.

Internationellt sett finns det många olika rekommendationer för en ur korrosionssynpunkt lämplig vattenkvalitet. Dessa är ofta angivna i respektive länders anvisningar och riktlinjer för dricksvatten. Lämplig vattenkvalitet för olika material har också diskuterats vid ett par korrosionsseminarier, ett i Oslo 1990 och ett i Göteborg 1995.

I följande tabell har svenska rekommendationer sammanställts med riktlinjerna från mötet i Oslo och holländska KIWA:s rekommendationer. I tabellen har angivits hur väl *vattenverken som svarat på enkäten* uppfyller rekommendationerna.

Parameter	Mål	Ref	Verk som inte uppfyller målet
pH	7,5-9,5	S	0
	>7,8	NL	1
	<8,3	NL	12
	>0,38TIC+1,5SO ₄ ²⁻ +5,3	NL	0
HCO ₃ ⁻ mg/l	>36	N	0
	>60	S	15
	>120	NL	44
HCO ₃ ⁻ /SO ₄ ²⁻ mg/l	>0,8	N	0
	>1	S	0
HCO ₃ ⁻ /(2SO ₄ ²⁻ +Cl ⁻)	>1,5	SF	6
	>1	NL	6
Ca ²⁺ mg/l	>10	N	1
	20-60	S	11

S = SLV:s dricksvattenkungörelse

N = Rekommendationer från korrosionsmötet i Oslo 1990

NL = KIWA:s rekommendationer

SF = Finska riktlinjer

TIC = Totalt oorganiskt kol

Tabell 2. Rekommendationer för att minimera korrosion och hur vattenverken uppfyller dessa.

Utifrån tabellen kan konstateras att de flesta vattenverk valt pH i enlighet med rekommendationerna, medan många vattenverk ligger lågt i alkalinitet enligt Livsmedelsverkets och i synnerhet enligt de holländska rekommendationerna.

Slutsatsen måste ändå bli att svenska vattenverk med korrosionskontroll i stort levererar ett dricksvatten som borde vara bra ur korrosionssynpunkt, förutsatt att rekommendationerna är rätt satta. Utifrån de resultat som framkommit inom detta projekt och med hänsyn till de låga kopparhalter som kan tolereras i Naturvårdsverkets krav för slamavskiljning inom jordbruket är det möjligt att en revidering av normerna är nödvändig. Vid årsskiftet 1999-2000 skärptes kraven ytterligare i det att gränsvärdet 600 mg/kg torr substans kompletterades med ett sänkt gränsvärde för belastningen på åkermarken (300 g/ha och år), vilket i realiteten innebär en sänkt gräns för halten i slammet motsvarande ca 400 mg/kg torrsubstans. I appendix A3 finns olika länders rekommendationer för dricksvatten med avseende på korrosion sammanställda.

4. KORROSION I DRICKSVATTENLEDNINGAR

Korrosion på ett material är, utom i undantagsfall, långsamma processer som bryter ner materialet och gör det obrukbart. Samtidigt bildas korrosionsprodukter som förorenar materialets omgivning. Även om korrosionshastigheten är tillräckligt låg för att materialet skall ha en lång livslängd, kan förekomsten av korrosionsprodukter göra materialet obrukbart för en viss tillämpning. För dricksvattenledningar kan korrosionen vara ett problem i båda dessa avseenden, det vill säga både begränsa rörets livslängd och förorena vattnet i ledningen med korrosionsprodukter. Vad gäller invändig korrosion av rörledningar är det dock, åtminstone i Sverige, korrosionens påverkan på dricksvattenkvaliteten som tilldrar sig det primära intresset.

Eftersom korrosionsprocesserna är långsamma, tar det också lång tid att studera dem. Att efter några månaders laboratoriestudier förutsäga vad som händer med ett material efter hundra års användning är självfallet omöjligt. Likaså är det mycket svårt, att förutsäga vattenkvalitetens förändring till följd av korrosion i ett komplext sammansatt distributionsnät, där många material finns närvarande och där uppehållstiderna varierar såväl dygnvis som säsongvis och där också vattenkvaliteten från vattenverket i viss mån varierar. Ändå är det bland annat dessa frågor som är intressanta när man studerar korrosionsprocesserna. Det är uppenbart, att beskrivningarna av korrosionsprocesserna och deras konsekvenser måste bli förenklade och övergripande.

Generellt sett kan man säga, att ju mer vattenkvaliteten ut från vattenverket varierar över tiden och ju komplexare distributions-situationen är, med olika material och varierande förbrukning, desto svårare är det att förutsäga korrosionssituationen. Desto större är också sannolikheten, att korrosionen ställer till med problem. Det är alltså värt att sträva efter ett distributionsnät med så få olika material som möjligt – att välja material utifrån vad som redan finns i nätet – och att vinlägga sig om att ha en så stabil beredningsprocess som möjligt.

Men även om vattenkvaliteten är stabil, kan korrosionen bli betydande. Beroende på vilken vattenkvalitet som distribueras kan korrosionen på olika material variera avsevärt. Redan små variationer i pH kan ge betydande skillnader i korrosionshastighet. Även vattenkvaliteten måste alltså väljas utifrån det aktuella distributionsnätet.

Men vilken vattenkvalitet ska man då välja? För att kunna besvara den frågan är det bäst att först diskutera korrosionsprocesserna på våra vanligaste rörmaterial.

Hur sker korrosionen?

När metaller korroderar är det fråga om elektrokemiska reaktioner, inte olika de som sker i batterier. Metallen oxideras, förlorar elektroner, samtidigt som något annat ämne, ofta syrgas, tar upp dessa elektroner. Oxidationen (korrosionen) kallas anodreaktion och reduktionen kallas katodreaktion. För att korrosionen skall kunna ske, behövs också elektrisk ledningsförmåga mellan anod- och katodstället så att elektronerna kan transporteras och det behövs jonledningsförmåga, det vill säga ledningsförmåga i vattnet, så att den elektriska kretsen sluts. Trots att bilen har en kraftfull motor, kan man inte köra hur fort som helst på trånga gator eller i rusningstrafik. På samma sätt är det ofta inte heller själva korrosionsprocessen som bestämmer korrosionshastigheten. Transporten av det som ska eller har reagerat ibland genom trånga oxidskikt kan också vara avgörande. Mer om elektrokemisk korrosion finns beskrivet i appendix A1 och hur försöken gjordes i appendix A2.

Korrosion i dricksvattenledningar av järn

Järn är ett konstruktionsmaterial som är ganska oädelt. Att det ändå kan användas för bland annat dricksvattenledningar, beror på att det bildas ett lager av järnoxid på ytan av metallen. Detta lager skyddar mot fortsatt korrosion. Det är då lätt att tänka sig, att beskaffenheten hos denna oxid är avgörande för korrosionshastigheten. Ytkomplexe teorin tar fasta på detta.

På en järnoxidyta i kontakt med vatten bildas komplex bestående av sönderdelat vatten. Hydroxidjoner, OH^- , fäster på järnjonerna i oxidstrukturen, medan vätejoner, H^+ , fäster på syrejonerna. Detta innebär, att hela ytan blir täckt med hydroxidjoner, figur 3a.

Joner, eller andra partiklar i vattnet, kan också bilda ytkomplex. Dessa byter då helt eller delvis ut hydroxidgrupperna. På så

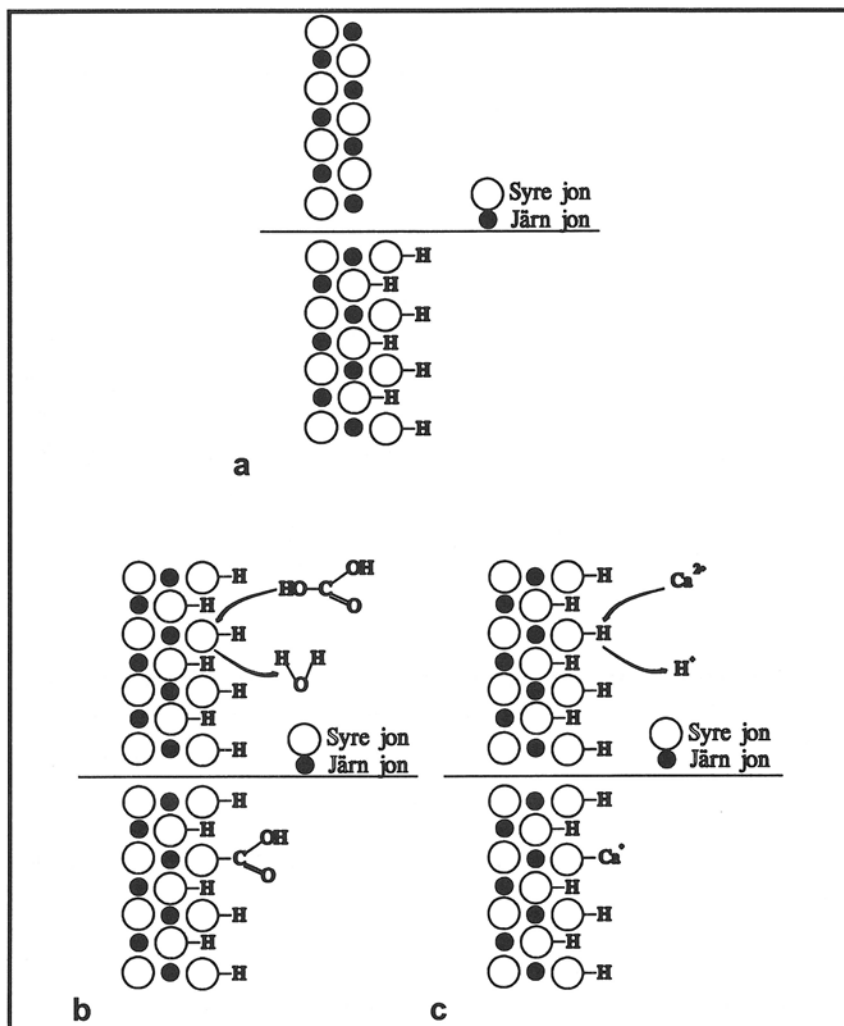
Anod- och katodreaktion

är de oxidations- och reduktionsreaktioner som tillsammans utgör en elektrokemisk cell, till exempel en korrosionscell eller ett batteri.

Ytkomplex

är en förening mellan molekyler på ytan och i lösning. Ytkomplex liksom komplex i lösning är inte fasta föreningar och finns inte kvar i samma form om vattnet torkas bort.

sätt kan ytan delvis täckas av andra ytkomplex, till exempel dem som bildas med kolsyra eller med kalciumjoner, figur 3b och 3c. Vilka komplex som bildas bestäms av jämvikter mellan vattnet och ytan. Jämvikter är i sin tur beroende av halterna av de ingående partiklarna. Således kan ytan vara täckt med helt olika komplex i olika vatten.



Figur 3. Schematisk beskrivning av ytkomplexbildning på en järnoxidyta, **a)** komplexbildning med vatten, hydroxidjoner binder in till järnjoner och vätejoner binder in till syrejoner, **b)** kolsyra binder in till ytan, ersätter där hydroxidjoner och vatten lämnar ytan **c)** kalciumjoner binder in till ytan och ersätter vätejoner som lämnar ytan.

Dessbättre har ytkomplexbildningen på en järnoxidyta studerats också för andra tillämnningar och det finns i de flesta fall väl bestämda komplexkonstanter för systemet. Det har alltså varit möjligt, att beräkna vilka ytkomplex som finns närvarande i en viss vattenkvalitet och att ställa dessa i relation till korrosionssituationen.

Redoxpotential

är den potential som inrättar sig som ett resultat av systemets oxiderande och reducerande egenskaper. Kan översättas till vattnets innehåll av syre och andra oxiderande kemikalier.

Mekanism

är en beskrivning av reaktionsförloppet.

Hur inverkar då ytkomplexen på korrosionsprocessen? Man kan tänka sig två olika möjligheter:

1. Ytkomplexen kan lösa upp oxiden och därmed skapa en järnhalt i jämvikt med ytan vid rådande redoxpotential. Denna process kan också frilägga ytan för fortsatt korrosion. I samband med syresättning kan järnet sedan delvis falla ut som partiklar i vattnet.
2. Ytkomplexen kan rent fysiskt hindra materialtransport genom defekter i oxidskiktet.

För båda fallen gäller, att processerna varierar med vilka ytkomplex som bildas och ytkomplexen är i sin tur en funktion av vattenkvaliteten. Det är svårt att avgöra, vilken av dessa mekanismer som är bestämmande för järnhalten i vattnet, men sannolikt är den första mekanismen mycket betydelsefull. Två tunga skäl talar för detta:

- Modellen korrelerar inom och mellan olika kommuners distributionsnät oavsett utseende.
- Modellen korrelerar också mot viktnedskningen av järnkuponger i laboratorieförsök där vattnet med jämna mellanrum regelbundet syresätts.

De järnkorrosionsprodukter som frigörs vid korrosionen kan antingen falla ut som partiklar i vattnet, falla ut på rörväggen igen, eller fortfarande i upplöst form transporteras vidare. Det är rimligt att anta, att endast en liten del faller ut på rörväggen igen, vilket bekräftas av kupongförsöken. Merparten av järnet transporteras alltså vidare till konsumenten, antingen i partikulär eller upplöst form. Av detta följer också, att de järnhalter som på ett kontrollerat sätt uppmäts i ett distributionsnät är ett relativt gott mått på korrosionshastigheten.

Eftersom vattnet innehåller många olika ämnen som kan bilda komplex både i lösning och på ytan blir systemet mycket omfattande. Det är således omöjligt att definitivt avgöra vilka ytkomplex som styr upplösningen av oxidytan. Med de experimentella försöken och fältmätningarna som utgångspunkt har några ytkomplex framstått som mera betydelsefulla och dessa innefattar: $>\text{FeOH}$, $>\text{FeOFe}^+$, $>\text{FeOFe}^{2+}$, samt $>\text{FeUH}$, där det sistnämnda ytkomplexet är ett av två modellkomplex för det naturliga organiska materialet. Den använda beräkningsmatrisen återges i appendix A4. På basis av beräkningarna

> (tecknet för ytkomplex)

indikerar bindningen till ytan.

går det att urskilja ett antal vattenkvalitetsparametrar som är viktigare än andra ur korrosionssynpunkt. Dessa parametrar och deras inverkan på järnkorrosionen beskrivs översiktligt nedan:

- *pH* – Det har länge varit känt att vattnets pH-värde är centralt för korrosionssituationen i distributionsnäten. Vattenverk utan övrig behandling har ofta en pH-justering av vattnet och inte sällan innebär denna justering att pH-värdet höjs till 8 eller däröver. En av orsakerna till detta är, att det länge ansetts betydelsefullt, att vattnet är övermättat med avseende på kalciumkarbonat och detta kan ofta åstadkommas genom en rimlig pH-höjning. Idag vet vi att pH spelar roll för många fler betydelsefulla jämvikter i vattensystemet. pH:s roll är därmed långt mer komplicerad än att en enkel höjning alltid innebär en förbättring. Ur järnkorrosionssynpunkt är tvärtom ett lågt pH att föredra. Om vattnet innehåller en del naturligt organiskt material kan dock även ett högt pH ge lägre järnkorrosion.
- *Karbonatsystemet* – vattnets samlade innehåll av koldioxid, vätekarbonat och karbonatjoner – är betydelsefulla komponenter i vattnets jämviktssystem. Förhållandet mellan de olika komponenterna bestäms av pH. En högre alkalinitet är nästan alltid bättre än en lägre ur järnkorrosionssynpunkt. Till detta finns åtminstone två skäl. Dels bildar karbonatsystemet starka ytkomplex, dels stabiliserar karbonatsystemet vattnet för kraftiga svängningar i pH, det ökar vattnets buffertförmåga. En hög buffertförmåga gör också att utfällningen av järns korrosionsprodukter sker långsammare och mer kontrollerat. I vatten med låg buffertförmåga sker utfällningen snabbt och rostpartiklar bildas i vattnet till olägenhet för konsumenten.
- *Kalciumhalten* – Betydelsen av kalcium för korrosionsprocesserna har diskuterats mycket genom åren. Alltsedan Langeliers undersökningar på 1930-talet har man ansett att utfällningar av kalciumkarbonat skyddar ytan mot fortsatt korrosion. Nyare undersökningar bekräftar denna iakttagelse. Emellertid är samtliga dessa resultat baserade på undersökningar i kontinuerligt strömmande vatten, något som är sällsynt i våra distributionsnät. Vid stagnation går det inte att påvisa någon positiv effekt av kalciumkarbonatutfällningar. Däremot har kalcium en korrosionsdämpande effekt i lågalkalina vatten med höga pH-värden.
- *Klorid och sulfat* – Vattnets innehåll av oorganiska salter är möjligen inte betydelsefulla för bildning av ytkomplex. Likväl

Övermättnad

uppträder om halterna i vattnet av respektive ingående joner i ett fast salt överstiger lösligheten av saltet.

Buffertförmåga

är ett mått på systemets känslighet för tillsatser av baser och syror. Hög buffertförmåga innebär att vattnets pH förändras lite vid en sådan tillsats.

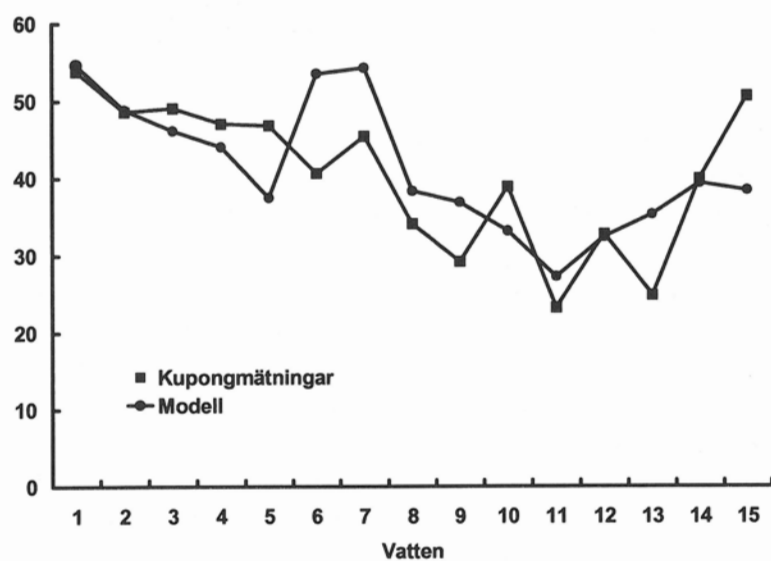
är speciellt kloridjonen känd i korrosionssammanhang för dess egenskap att störa vid bildningen av passiverande oxidskikt. Höga kloridhalter bör alltså undvikas av detta skäl. Sulfat kan tänkas ge upphov till liknande effekter, men i lägre grad.

- *Naturligt organiskt material (NOM)* – Vattnets innehåll av naturligt organiskt material har stor inverkan på såväl järnkorrosionen som på vattnets löslighet av korrosionsprodukter. Eftersom NOM innehåller många olika sorters organiska föreningar, finns där gott om grupper som kan bilda starka komplex både i lösning och på ytan. Det har visat sig att NOM:s inverkan på järnkorrosionsprocessen kan vara både positiv och negativ, beroende på framför allt vattnets pH-värde. Vid låga pH-värden ökar korrosionen till följd av NOM medan den minskar vid höga. Ur järnkorrosionssynpunkt kan man alltså inte entydigt säga om det är bra eller dåligt med NOM.
- *Redoxpotentialen* – vattnets innehåll av syre och andra oxiderande kemiska föreningar påverkar också korrosionsprocessen. Man skulle lätt kunna tänka sig, att ju högre redoxpotentialen är, det vill säga ju högre innehåll av syre eller till exempel hypoklorit vattnet har, desto mer skulle järnröret korrodera. Så är dock inte fallet och skälet till det är, att oxidskiktet är stabilare när redoxpotentialen är hög. Ytkomplexen som bildas är mindre benägna att lösa upp järnoxiden än de som bildas vid lägre redoxpotential. Denna effekt är särskilt stor vid låga pH-värden.

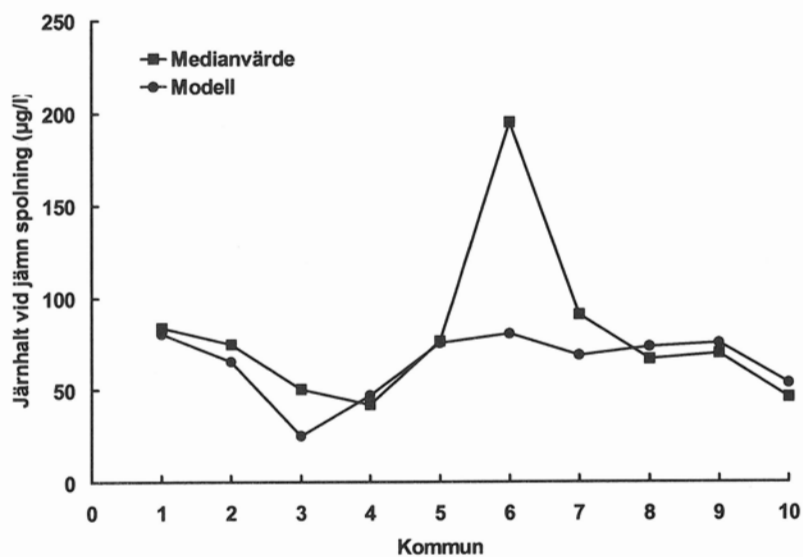
Hypoklorit

är en av flera desinfektionskemikalier använda i dricksvattenssammanhang för att begränsa den mikrobiologiska aktiviteten.

Järnkorrosionen bestäms således i första hand av beskaffenheten hos oxidlagret på järnytan, vilken i sin tur är beroende av många olika parametrar. Överensstämmelsen mellan modellberäkningar enligt ytkomplext teorin och laborieförsök redovisas i figur 4, medan överensstämmelsen med fältmätningar i olika kommuner redovisas i figur 5. En kommun avviker dramatiskt från beräknat värde, men skillnaden får i detta fall tillskrivas distributionsstörningar under mätperioden.



Figur 4. Korrosionshastighet från kupongförsök i olika dricksvatten tillsammans med modellberäkningar.



Figur 5. Medianvärde av järnhalten vid jämn spolning från fältmätningar i tio svenska kommuner tillsammans med modellberäkningar.

Korrosion i dricksvattenledningar av koppar

Jämfört med järn är koppar ett ädelt material med betydligt lägre korrosionshastighet i dricksvatten. Sedan många år är koppar det i särklass vanligaste rörmaterialet för inomhusinstallationer i vårt land. Liksom i fallet med järn är beläggningen av korrosionsprodukter på insidan röret avgörande för såväl korrosionshastigheten som för mängden korrosionsprodukter som tillförs vattnet och också i kopparfallet är det med säkerhet ytkomplexbildning som är avgörande för vad som sker på ytan. Men där upphör egentligen likheterna.

Medan järn till stor del bildar stabila fasta korrosionsprodukter som i partikulär form följer med vattnet, kan halten upplöst koppar i vattnet efter några timmars stillestånd bli betydande. Att denna halt blir så pass hög (ibland flera mg/l) har att göra med jämvikter som ställer in sig mellan vattnet och dess innehåll av olika komplexbildare och fasta korrosionsprodukter på ytan. I själva verket är det inte de mest svårösliga fasta föreningarna som begränsar kopparinnehållet i vattnet. Dessa är samtliga stabila inom relativt begränsade redoxpotentialområden, figur 6. Redoxpotentialen kan översättas till vattnets innehåll av syre och andra oxiderande kemikalier, till exempel hypoklorit.

Kuprit –

koppar(I)oxid

Malakit –

koppar(II)hydroxokarbonat

Tenorit –

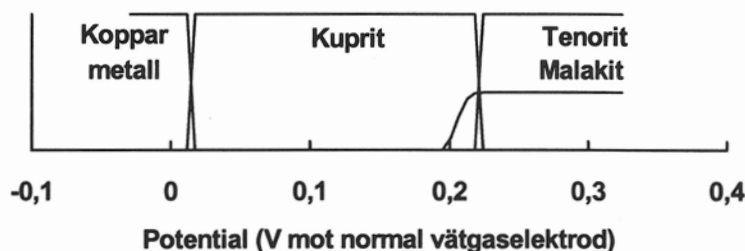
koppar(II)oxid

(II)

betecknar jonens laddning, i detta fall + 2.

Meta stabil fas

Meta betyder mellan. En fas är meta stabil om den existerar endast under ett övergångsskede.



Figur 6. Olika fasta fasers stabilitet i ett hårt dricksvatten som funktion av potentialen.

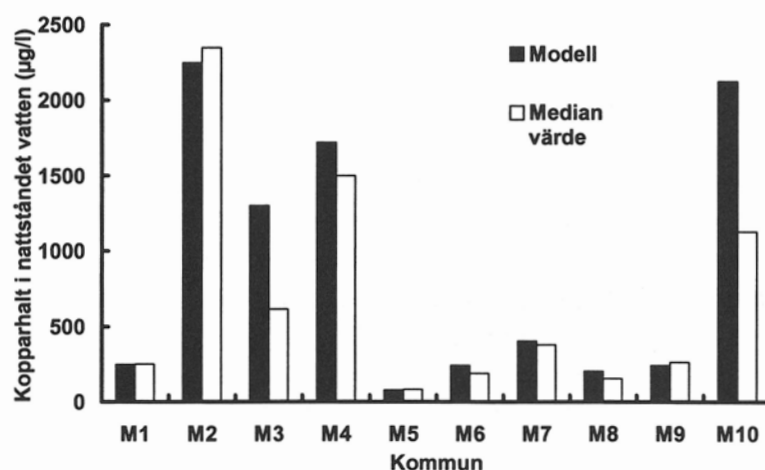
Till följd av ytkomplexbildning och variationer i vattnets syrehalt löser de fasta korrosionsprodukterna delvis upp sig och bestämmande för halten av koppar i vattnet blir istället den meta stabila fasta fasen koppar(II)hydroxid. Det är alltså inte korrosionshastigheten som bestämmer kopparhalten i vattnet efter några timmars stillestånd, utan dessa jämvikter. Massbalansmässigt motsvarar dock själfallet den totala mängden upplöst koppar och utfällda korrosionsprodukter korrosionshastigheten i det aktuella vattnet över tiden.

Eftersom vattnet innehåller många olika joner och föreningar blir jämviktssystemet relativt komplext. Med datorns hjälp finns det ändå möjlighet att beräkna vilken kopparhalt man kan förvänta sig efter en tids stillestånd i en viss vattenkvalitet. Beräkningsmatrisen återges i appendix A4. En översiktlig genomgång av några av de viktigaste dricksvattenparametrarnas inverkan på kopparhalten i vattnet efter några timmars stillestånd kan se ut enligt följande:

- *pH* – Tvärtemot vad som gäller för järn ökar kopparhalten med minskande pH. De traditionellt relativt höga pH-värden som används vid våra vattenverk är visserligen inte optimerade för att passa kopparrören, och även om Langeliers teorier i första hand var avsedda för att minska järnkorrosionen har effekten blivit att kopparhalterna blir jämförelsevis låga.
- *Karbonatsystemet* – Eftersom koppar bildar lösliga komplex med karbonationen, ökar kopparhalten i vattnet med ökande halt total karbonat vid ett givet pH-värde. Denna effekt är särskilt påtaglig vid högre pH-värden, men oberoende av pH är det alltid bättre med en lägre alkalinitet än en högre för att kopparhalten skall bli så låg som möjligt.
- *Kalciumhalten* – Jämfört med pH och karbonatsystemet är kalciumhalten av mindre betydelse. Utfällningar av kalciumkarbonat på till exempel värmväxlarytor av koppar kan dock medföra lokala korrosionsangrepp.
- *Klorid och sulfat*– De oorganiska salternas inverkan på de här diskuterade jämviktssystemen saknar betydelse. Liksom för järn kan dock höga halter av sulfat och klorid förorsaka punktkorrosion.
- *Naturligt organiskt material (NOM)* – Eftersom NOM har många funktionella grupper med god komplexbindande förmåga påverkas kopparhalten i hög grad av vattnets innehåll av NOM. Det är således betydelsefullt att hålla NOM-halten så låg som möjligt för att även kopparhalten ska vara låg.
- *Redoxpotentialen* – Som tidigare nämnts är redoxpotentialen – vattnets innehåll av syre och andra oxiderande kemikalier – av stor betydelse för upplösningen av de annars svårlösliga fasta korrosionsprodukterna. Att hålla syrehalten hög i inomhusinstallationer är i det närmaste omöjligt till följd av den ojämna förbrukningen över dygnet.

Därmed är redoxpotentialen en parameter som, om än betydelsefull, är svår att påverka.

Tvärt emot vad som är önskvärt när det gäller järn är det alltså fördelaktigt att välja högt pH och låg alkalinitet om man vill ha låga halter koppar i vattnet efter stillestånd. Halten av NOM bör också hållas så låg som möjligt. Medianvärden av kopparhalterna i nattståndet vatten i några kommuner framgår av figur 7.



Figur 7. Medianvärde av uppmätta kopparhalter i nattståndet vatten i tio svenska kommuner och modellberäkningar.

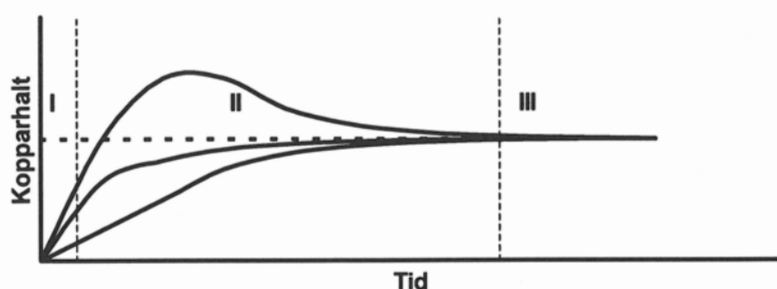
I samma figur finns också modellberäkningar för de olika vattnen redovisade. I två kommuner avviker modellen betydligt från de uppmätta värdena. En rimlig förklaring till detta är, att en natts stillestånd inte varit tillräcklig i dessa vatten för att kopparhalten skulle uppnå jämviktsnivån. Vattenkvaliteten påverkar alltså inte bara jämviktshalten, utan också hastigheten med vilken denna uppnås.

Innan den maximala halten uppnåtts

Kopparhaltens ökning till följd av korrosion kan schematiskt beskrivas som i figur 8 för tre olika vattenkvaliteter.

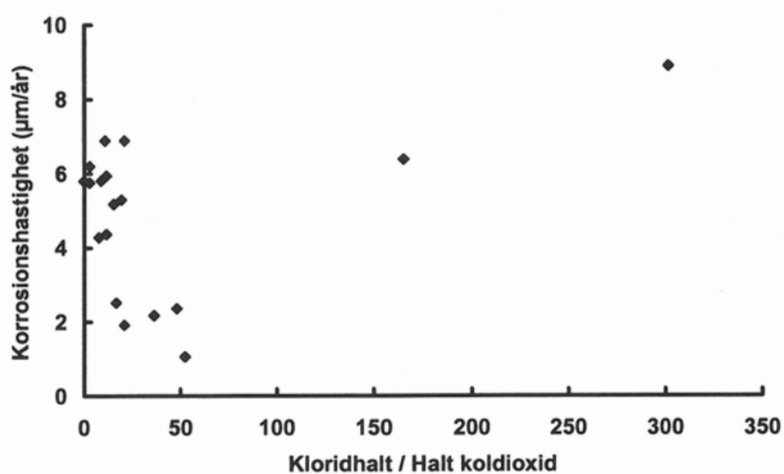
Efter en initial fas (I), där halten av koppar tillväxer linjärt med tiden, det vill säga korrosionshastigheten är konstant, följer en fas (II) där korrosionshastigheten avtar med tiden och mot slutet kan halten till och med falla. Under nästa fas (III) uppnås jämvikten med den meta stabila fasta fasen koppar(II)hydroxid. I figuren har jämviktshalten av koppar markerats med en

horisontell streckad linje. Denna har för överskådlighetens skull gjorts lika för de tre fallen, men beror självfallet av vattenkvaliteten.



Figur 8. Schematisk beskrivning av kopparhaltens variation med tiden för tre olika vattenkvaliteter i stillastående vatten.

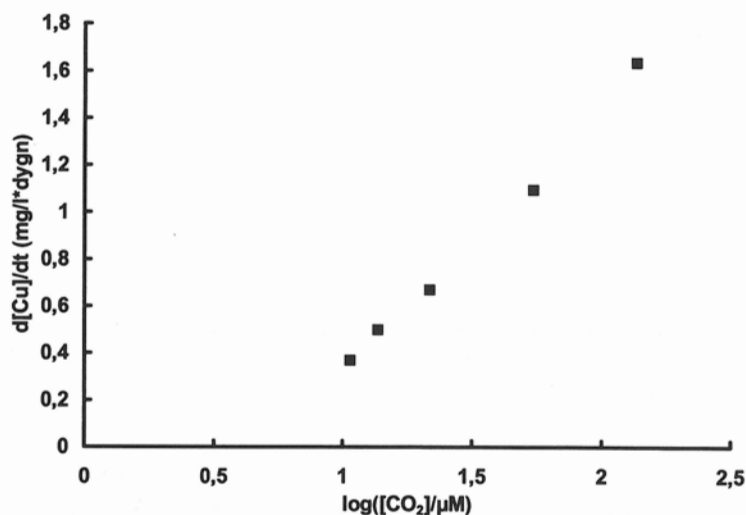
Under den initiala fasen (I) är klorid tillsammans med halten koldioxid mycket viktiga parametrar, figur 9. Förhållandet mellan klorid och koldioxid i molära enheter ska, för låg korrosionshastighet, vara i storleksordningen 50.



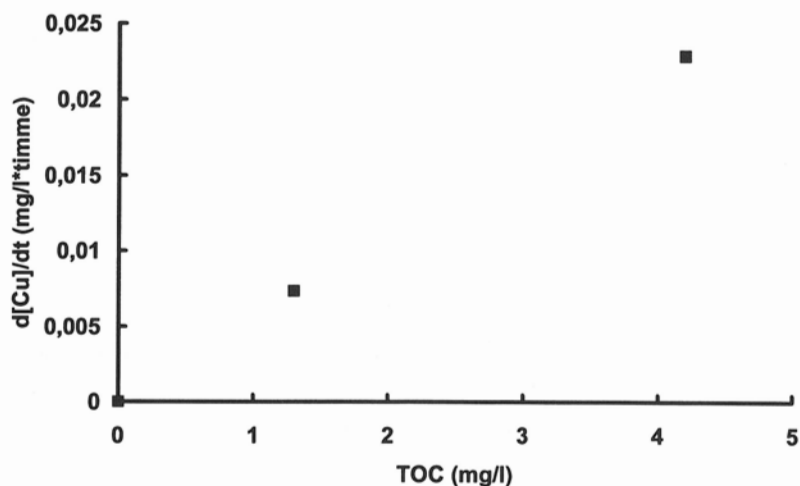
Figur 9. Den initiala korrosionshastigheten som funktion av kvoten mellan kloridhalten och halten koldioxid.

Under den andra fasen (II) blir andra parametrar viktiga för korrosionsprocessen. I frånvaro av naturligt organisk material är korrosionshastigheten proportionell mot logaritmen av vattnets innehåll av koldioxid (CO_2), figur 10.

I vatten med naturligt organisk material blir korrosionshastigheten högre och är efter det att bidraget från koldioxiden dragits bort, direkt proportionell mot NOM-halten, figur 11.



Figur 10. Korrosionshastighet, mätt som ökning i kopparhalt, som funktion av logaritmen av halten koldioxid från kupongmätningar.



Figur 11. Korrosionshastighet, mätt som ökning i kopparhalt, som funktion av NOM-halten (uttryckt i TOC) från kupongmätningar efter det att effekten av koldioxiden dragits bort.

Inverkan av det organiska materialet kan förklaras med att man får en ytkomplexbildning där det organiska materialet löser upp

bildade korrosionsprodukter och frilägger ytan för fortsatt korrosion. Kopparen som löses upp bildar lösliga komplex med det organiska materialet. Detta innebär att den andel av det organiska materialet som är bundet till kopparjoner i lösning inte längre är tillgängligt för ytkomplexbildning. Sammanfattas korrosionsprocessen i fas (II) kan den beskrivas med ekvationen:

$$d[\text{Cu}] / dt = k_1 * \ln[\text{CO}_2] + k_2 * [\text{NOM}]_{\text{aktiv}} [\text{I}]$$

k_1 och k_2 är proportionalitetskonstanter som bland annat innehåller systemets fysikaliska egenskaper. k_2 är också kopplad till det organiska materialets ursprung, om det kommer från ett yt- eller grundvatten. $[\text{NOM}]_{\text{aktiv}}$ är halten av det organiska material som fortfarande finns tillgängligt, dvs. inte har bildat lösliga komplex med kopparjoner. Det kan inte uteslutas att de båda termerna i ekvationen kan vara kopplade, men uttrycket som det står stämmer väl överens med försöksresultaten.

Tiden till dess att fas (III) i figur 8 inställt sig med kupongförsök kan vara betydande. För att denna fas skall inträda, krävs att kopparytan täckts med ett skikt av korrosionsprodukter med vilket jämvikten med lösningen kan ställa in sig och som är tillräckligt tjockt för att hålla tillbaka korrosionsprocessen. Även nyinstallerade kopparrör i distributionsnäten behöver ofta en avsevärd tid innan jämviktssituationen inträtt och detta innebär, att i sådana system kan man ibland uppmäta kopparhalter i nattståndet vatten som skiljer sig betydligt från dem man skulle förvänta sig enligt jämviktberäkningarna.

Korrosion i dricksvattenledningar av rostfritt stål

Rostfritt stål är ett samlingsnamn på ett stort antal material. Gemensamt för dessa är att järn legerats med minst 12 % krom. Kromets roll är att tillsammans med järn bilda passiverande oxider på stålets yta så att korrosionen inte kan fortsätta. De passiverande oxidskikten är också självläkande så, att om oxiden förstörs till exempel genom mekanisk påverkan, kommer ett nytt oxidskikt att bildas. Andra vanliga legeringsämnen i rostfritt stål är nickel, molybden och kväve och för särskilda applikationer kan även till exempel volfram och kisel tillsättas. Liksom andra material måste också de rostfria väljas utifrån den miljö de är tänkta att användas i. Väljs fel material kan det få förödande konsekvenser. Därför lider de rostfria materialen av just deras samlingsnamn – rostfria stål. Man kan lätt få för sig att materialen verkligen är rostfria i alla miljöer.

Rostfritt stål

är ett samlingsnamn på ett stort antal material där järn legerats med minst 12 % krom och som passiverar till följd av kromoxidbildning.

Passivering

innebär en blockering av den elektrokemiska reaktionen, till exempel genom skyddsskiktets bildning.

Det material som studerades i denna undersökning har beteckningen SS 2347, och är enligt branschen den kvalitet som bäst lämpar sig för dricksvatten i inomhusinstallationer. Materialet är ett så kallat syrafast stål med följande sammansättning:

- krom 16,9 %
- nickel 11,0 %
- molybden 2,1 %

Att mäta korrosionshastigheten på rostfria material är komplicerat av flera skäl. Korrosionsströmmarna vid allmänkorrosion är mycket låga, varför rent mättekniska problem uppstår. Dessutom, om rostfria material inte kan användas, beror det i första hand på lokala angrepp (punktkorrosion) och dessa typer av korrosion är mycket svåra att studera.

Liksom i fallet med järn- och även kopparkorrosion, är det sannolikt att ytkomplexbildning är betydelsefull för stabiliteten hos oxidskiktet och därmed också för korrosionshastigheten. För järn diskuterades två möjligheter för ytkomplexens inverkan:

- Ytkomplexen kan lösa upp den skyddande oxiden på metallytan och därmed frilägga ytan för fortsatt korrosion.
- Ytkomplexen kan hindra materialtransport genom defekter i oxidskiktet.

Liksom för järn är sannolikt också det första alternativet relevant för det rostfria stålet. I detta fall finns ett väl täckande kromoxidskikt på metallytan som effektivt skyddar mot korrosion. Detta skikt har väsentligt mindre yta än järns oxidskikt och är uppenbart mera svårupplöst. Korrosionshastigheten avtar under lång tid, vilket talar för att nybildningshastigheten av det skyddande skiktet är snabbare än den ytkomplex-inducerade upplösningen.

Laboratiemässiga studier med hjälp av elektrokemiska metoder gjordes för att studera vattenkvalitetens inverkan på korrosionen av det rostfria stålet. De parametrar som studerades, pH, total karbonathalt, kalcium-, klorid- och sulfathalt, samt halten av naturligt organiskt material, varierades inom de intervall som framgår av tabell 3. Trots att halterna av de undersökta parametrarna varierades inom stora intervall som täcker in de vattenkvaliteter som förekommer i Sverige uppmättes mycket låga korrosionshastigheter.

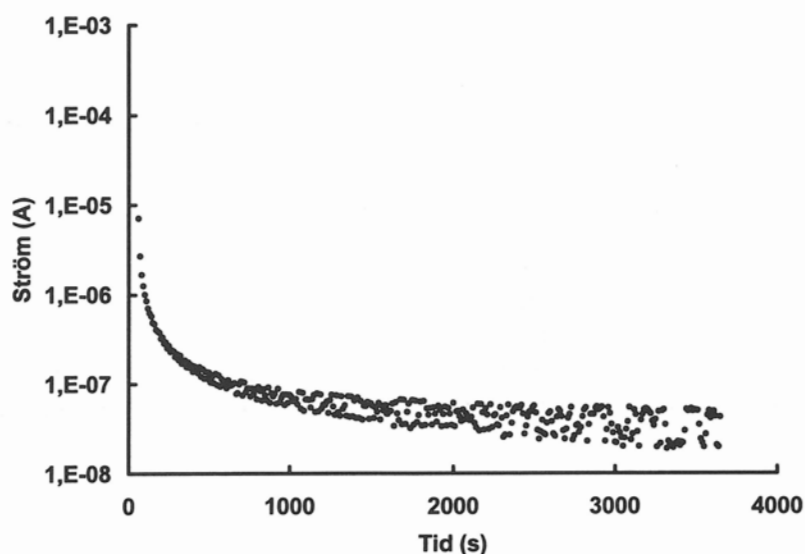
Parameter	Lägsta värde (mg/l)	Högsta värde (mg/l)
pH	6	9
Total karbonathalt	30	300
Kalciumhalt	10	80
Kloridhalt	10	70
Sulfathalt	10	70
COD(Mn)	0	5

Tabell 3. Intervall inom vilka vattenkvalitetsparametrarna varierades i försöken.

För att överhuvudtaget, med tillgänglig teknik, kunna mäta korrosionshastigheten, fick ytan poleras, varefter strömmen mättes som funktion av tiden vid en potential strax över vilopotentialen. Redan efter en timme hade ett passivskikt bildats på ytan, tillräckligt väl täckande för att strömmarna skulle vara i samma storleksordning som mätnoggrannheten, figur 12. Extrapoleras strömmens tidsberoende över en längre tidsperiod, exempelvis ett år, erhålles korrosionshastigheter i storleksordningen 10 nm/år ($10 \cdot 10^{-9}$ m/år).

Vilopotential

är den potential som ett material naturligt antar i en viss omgivning.



Figur 12. Strömmen som funktion av tiden för rostfritt stål, SS 2347, i ett korrosionskontrollerat svenskt dricksvatten. Observera att strömaxeln är logaritmisk.

Eftersom korrosionshastigheten generellt är så låg, oberoende av vattenkvalitet, blir utvärderingen av de enskilda parametrar-

nas inverkan och följande summering av resultaten närmast av akademiskt intresse.

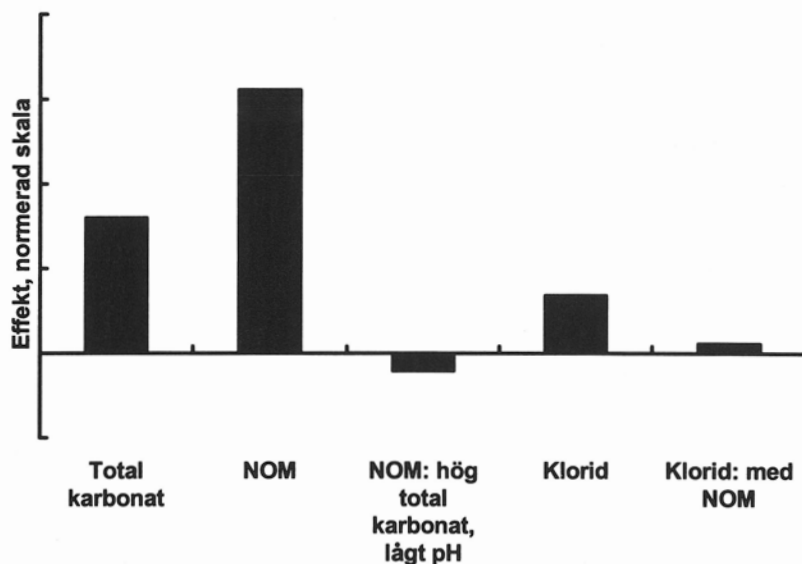
Eftersom pH bestämmer syra / bas-förhållandena för såväl karbonatsystemet som NOM, kommer denna parameter också att i viss mån bestämma vilka ytkomplex som bildas på ytan.

I figur 13 presenteras skillnaden i korrosionshastighet när parametrarna förändras från sitt högsta till sitt lägsta värde enligt tabell 3. Korrosionen ökar med ökande totalhalt karbonathalt. Om NOM finns närvarande ökar korrosionen också till följd av detta. Vid låga pH-värden och hög totalhalt karbonat konkurrerar karbonatsystemet ut NOM vid ytkomplexbildningen och effekten av NOM försvinner.

Effekten av klorid kan inte diskuteras i termer av ytkomplexbildning, utan snarare på basis av kloridens egenskap att störa kristallisationsprocessen vid bildning av passivskikt. De i jämförelse med andra miljöer låga kloridhalter som finns i dricksvatten uppvisar en ytterst liten effekt på korrosionshastigheten hos det rostfria stålet. I närvaro av NOM minskar effekten ytterligare. Ingen effekt av kalcium- eller sulfathalt kunde iaktas.

Kristallisationsprocess

är den process som sker när ett fast salt bildas.



Figur 13. Effekten som skillnaden i korrosionshastighet mellan högnivån och lågnivån för respektive parameter enligt tabell 3.

Förutom de laboriemässiga studierna undersöktes det rostfria materialet i svenska dricksvatten. Testriggar ställdes ut i ett antal kommuner med olika dricksvattenkvalitet, tabell 4.

Parameter	Kommun 1	Kommun 2	Kommun 3	Kommun 4
pH	8,3	7,8	8,2	7,3
Alkalinitet (mg/l HCO_3^-)	48	62	59	330
Kalcium (mg/l)	21	30	28	90
Klorid (mg/l)	11	21	13	64
Sulfat (mg/l)	22	28	49	15
COD(Mn) (mg/l O_2)	1,1	1,9	3,7	2,2

Tabell 4. Dricksvattenkvalitet i de kommuner där testriggar placerats.

Vattengenomströmningen i riggarna reglerades för att efterlikna normal konsumtion med lång stilleståndstid och en kortare spoltid. Analyser med avseende på metallinnehåll och de vanligaste vattenkvalitetsparametrarna gjordes på vattnet efter stilleståndstiden. Motsvarande analyser gjordes på ingående vatten. Försöksperioden varade 9-12 månader och analyser gjordes regelbundet under denna tid.

I figur 14 redovisas resultaten från metallanalyserna som medianvärden av differensen mellan utgående och inkommande metallhalt. Ett positivt värde innebär en utlösning av metallen medan ett negativt värde innebär en utfällning i röret.



Figur 14. Medianvärden av utgående minus inkommande metallhalter i testriggar i fyra svenska kommuner.

Detektionsgräns

är den lägsta koncentration av ett ämne som med given sannolikhet kan bestämmas med en specificerad metod.

Medianvärdena för samtliga uppmätta metallhalter låg under eller strax över detektionsgränsen för respektive analys och inte vid något tillfälle ändrades de övriga vattenkvalitetsparametrarna i utgående vatten jämfört med ingående i någon nämnvärd utsträckning. Vid ett fåtal tillfällen i inledningsskedet av undersökningen överskred halten av nickel Livsmedelsverkets gränsvärde. Förhöjda nickelhalter under de första månaderna efter nyinstallation av rostfritt stål har rapporterats även i andra undersökningar. Efter denna period har halterna sjunkit till mycket låga värden och inga förhöjda halter har uppmätts vid senare tillfällen.

Intressant att notera är, att där järn finns närvarande i inkommande vatten, fastnar detta i röret snarare än att mera järn löses ut från det rostfria materialet. Vidare, molybden påträffades inte i mätbara halter i någon av kommunerna och endast i en kommun var medianvärdet för skillnaden i kromhalt över detektionsgränsen.

Insidan av rören undersöktes en gång under försöksperioden, samt efter avslutade försök. Ytanalyserna visade att rörytorna var täckta av skyddande järn- och kromoxidskikt, oberoende av vilken vattenkvalitet som rören varit exponerade för, och inga lokala korrosionsangrepp kunde detekteras. Förutom de skyddande skikten fanns områden med förhöjda kolhalter, vilka kan härröra från utfällningar av naturligt organiskt material. Under dessa partiklar hade ytan samma sammansättning som det ursprungliga materialet och inte heller här fanns några antydningar till lokal korrosion. Dock var utseendet på oxidskiktet något annorlunda med en något mer porös struktur.

Lokala korrosionsangrepp

Både järn, koppar och rostfritt stål kan under ogynnsamma omständigheter drabbas av lokala korrosionsangrepp. Dessa kan vara av flera olika typer och uppstå bland annat till följd av ojämna beläggningar på rörväggarna.

Lokala korrosionsangrepp på järn är relativt ovanliga i de svenska distributionsnäten för dricksvatten, men vanligare i Norge. Detta faktum kan tas som en inteckning för, att de extremt låga pH-värden (<7) som är vanliga i Norge, lättare framkallar lokala angrepp.

Det är sedan länge känt att lokala angrepp på koppar kan uppstå om rören från början har en invändig kolfilm på väggarna. Sulfat- och kloridhalten i vattnet anses också bety-

delsefull, speciellt för varmvatten, där kvoten mellan alkaliniteten och dessa båda jonslag bör hållas hög. Under projektens gång har det blivit uppenbart, att lokala korrosionsangrepp på koppar i kallvatten förekommer i mycket skiftande vattenkvaliteter, allt från mycket mjuka till mycket hårda.

Rostfria material är känsliga för höga kloridhalter, men för att angrepp till följd av klorid skall uppstå krävs sannolikt avsevärt högre halter än de som normalt förekommer i dricksvatten. Sulfatjoner har visat sig försvåra kloridinducerade lokala korrosionsangrepp. Om det rostfria materialets sammansättning förändras, till exempel genom svetsning utan skyddsgas så att svetsoxider bildas kan också lokala angrepp uppstå.

Oavsett material är de skyddande korrosionsproduktskikten på rörväggarna företrädevis oxider, vilkas löslighet sjunker med stigande pH-värde. Om pH-värdet är extremt lågt och redoxpotentialen är likaledes låg kan oxiden på rörväggen eventuellt lösas upp. En sådan miljö kan till exempel uppstå under en beläggning av organiskt material där en aktiv mikrobiologi är en påskyndande omständighet. I sådana miljöer har pH-värden under 1 uppmätts närmast ytan. Det omkringliggande materialet, med betydligt större yta, blir då plats för syrgasreduktion och detta innebär att tiden till dess ett hål i röret uppstått kan vara kort.

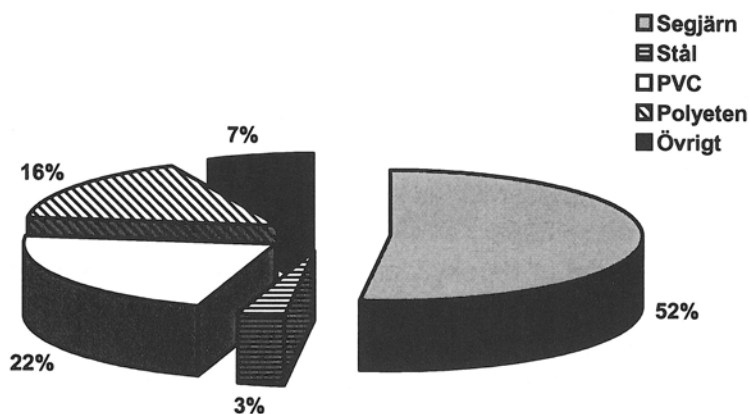
Generella åtgärder för att motverka lokala korrosionsangrepp kan vara att undvika alltför höga sulfat- och kloridhalter, att undvika höga halter av NOM, att undvika varierande vattenkvalitet och att sörja för god vattenomsättning.

Självfallet bör kopplingar mellan olika metalliska material undvikas, speciellt om de är olika ädla. Läckströmmar och magnetfält kan troligen också i speciella fall leda till angrepp.

Komplexa rörsystem med många material

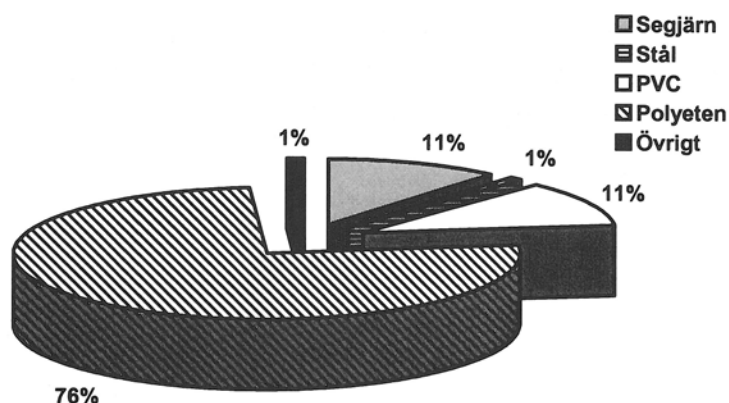
Att studera de olika materialens korrosionsegenskaper i förhållande till utgående dricksvattenkvalitet från vattenverken är inte tillräckligt för att få en fullständig bild av vad som händer i ledningsnäten. Även om systemens komplexitet felaktigt ofta tas som ett argument för att inget eller mycket lite kan göras åt situationen, är en väl underbyggd förutsägelse om effekten av en processförändring beroende av vilka material vattnet transporteras genom och också av dessa materials inbördes ordning.

Medan inomhusinstallationerna till mycket stor del består av koppar, är de markförlagda ledningsnäten uppbyggda av rör av många olika material. I VAV:s översiktsstatistik för 1997 över kommunernas vattenledningsnät fördelar sig 37 % (de nät i vilka man känner rörmaterialen) av ledningarna enligt följande, figur 15.



Figur 15. Fördelning på olika material i kommunernas ledningsnät (1997).

I kategorin övrigt ingår till exempel markförlagda kopparrör, rostfria rör, betongledningar och andra plastmaterial. Om man istället tittar på nylagda ledningar är fördelningen av material en annan, vilket framgår av figur 16.



Figur 16. Fördelning på olika material i kommunernas nya markförlagda ledningar (1997).

Att döma av detta kommer ledningsnätens materialfördelning att successivt förändras avsevärt. Med den utbyteshastighet som för närvarande råder och som innebär att ledningsnäten kommer att vara utbytta om i genomsnitt 240 år har vi dock anledning att ta hänsyn till den nuvarande situationen också för vattenkvalitetsförändringar inom en relativt avlägsen framtid.

Hur påverkar då olika rörmaterial dricksvattenkvaliteten? Av följande sammanställning framgår några processer som man måste ta hänsyn till:

Korrosionsprocessen: Motreaktion till metallupplösningen är vanligen syrgasreduktion. Denna process ger ett tillskott av hydroxidjoner, vilka höjer vattnets pH-värde. Eftersom hydroxidjonerna vanligen också åtgår för att bilda svårslösliga salter av metalljonerna från korrosionsprocessen är pH-höjningen till följd av syrgasreduktion i idealfallet mycket liten. Kinetiken för utfällningsreaktionen kan dock vara långsam och vattnet transporteras vidare i ledningen. Detta innebär att korrosionsprocessen lokalt kan ge upphov till såväl pH-höjningar som pH-sänkningar. Om vattnet är väl buffrat, det vill säga har en hög alkalinitet, blir pH-förändringarna mindre. När korrosionsprocessen sker förbrukas syrgas och detta borde leda till att korrosionen avtar. Emellertid kan bristen på syrgas också leda till att de skyddande korrosionsproduktskikten på insidan rören löses upp och frilägger ytan för fortsatt korrosion.

Galvanisk korrosion: Med detta avser man vanligen den korrosion som uppstår om två metalliska material av olika ädelhet står i kontakt med varandra. En liknande korrosionstyp inträffar om joner av ett relativt ädelt material finns i vattnet över ett mindre ädelt material. Om således ett kopparrör föregår ett järnrör (det behöver inte vara elektrisk kontakt mellan rören) kan kopparjonerna från korrosionen på kopparröret reduceras på järnytan och åstadkomma en ökad järnkorrosion. Detta innebär att kopparmetall bildas när järn går i lösning.

Ytkomplexbildning: En effekt som är nära relaterad till korrosionsprocessen är bildningen av ytkomplex som diskuterats i tidigare avsnittet. Beroende på vattnets sammansättning kan ytkomplexen ge upphov till såväl pH-höjningar som -sänkningar. Denna effekt är dock av mindre betydelse än den som orsakas av syrgasreduktion.

Utlösning från rörmaterialet: Även om materialet inte är metalliskt kan det ge upphov till pH-förändringar till följd av ut-

Syrgasreduktion

När en metallatom går i lösning måste den först oxideras, d.v.s. avge elektroner och därmed bli jon. Elektronerna som bildas ska på något vis förbrukas och det sker ofta genom att syrgas reduceras och tar upp elektroner. Av syrgasen och vatten bildas då hydroxidjoner (OH^-).

lösning från materialet. Exempel på sådana material är betongrör och cementbruksinfodrade rör. Lättlösliga och måttligt svår-lösliga basiska föreningar tillförs efterhand vattnet som därmed får en pH-höjning. Om vattnet innehåller karbonatjoner i tillräcklig mängd brukar dessa rör med tiden få en beläggning av kalciumkarbonat i gränsytan mot vattnet och därmed reduceras utlösningshastigheten.

Mikrobiologisk aktivitet: Effekten av mikrobiologisk aktivitet på korrosionsprocesserna har inte studerats inom projektet. Biofilmens sammansättning varierar beroende på vattenkvalitet och rörmaterial och kan ge upphov till pH-sänkningar och även direkt korrosion. Lokala kraftiga korrosionsangrepp har ibland tillskrivits mikrobiologisk aktivitet. Hur de organiska rörmaterialen (såsom plast och gummi) påverkar den mikrobiologiska aktiviteten behöver utredas ytterligare, liksom mikrobiologins roll i samband med bland annat lokala angrepp och punkt-korrosion på olika material. Syrehalten i vattnet förbrukas vid mikrobiologisk aktivitet, vilket kan medföra att efterföljande korrosion minskar, men också att skyddande korrosions-produktskikt löses upp.

Ett exempel på vad föregående materials vattenpåverkan har för inverkan på korrosionen kan hämtas från en undersökning som gjordes inom projektet och som hade till syfte att belysa servisledningens betydelse för korrosion på kopparrör i en fastighet.

I en testrigg monterades servisledningar av olika material. Material och dimension framgår av tabell 5.

Material	Φ_i (mm)
Cement	100
Galvaniserat järn	41,8
Järn	41,8
Koppar	51,0
PVC	43,6
Polyeten, PE	40,8
Polypropen, PP	51,4

Tabell 5. Material i servisledningar och deras dimensioner.

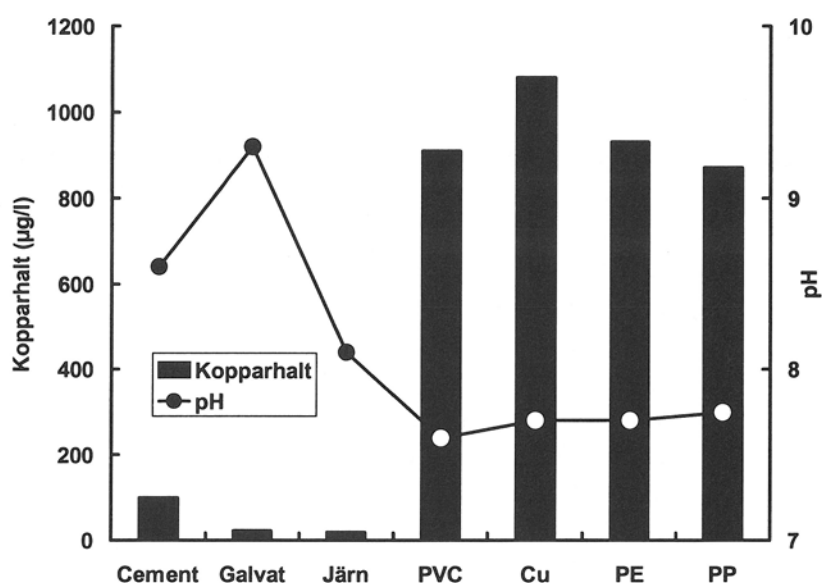
Den efterföljande kopparledningen, som anslöts så att normal galvanisk korrosion undveks, hade 10 mm innerdiameter. Innan försöken startades åldrades servisledningarna under 3 månader med stillastående vatten under 47 timmar och spolning med låg hastighet under 1 timme. Detta gäller samtliga rör utom cementröret, som varit i drift och uppvisade en jämn och låg ut-

lösningshastighet av alkaliska föreningar. Före försökets start kopplades nya kopparrör till respektive servisledning. Försöket tillgick så, att vatten som stått i servisledningen under ett dygn tillfördes kopparröret där det åter fick ett dygns stillestånd. Därefter analyserades kopparhalten. Den inkommande vattnet från Lackarebäckverket i Göteborg hade en kvalitet som framgår av tabell 6.

Parameter	Analysresultat
pH	7,6
Alkalinitet	54 mg/l HCO_3^-
Kalciumhalt	12 mg/l
Kloridhalt	10 mg/l
Sulfathalt	26 mg/l
COD(Mn)	2 mg/l O_2

Tabell 6. Inkommande vattenkvalitet.

Under stilleståndstiden i servisledningen förändrades pH i vattnet och tillsammans med uppmätta kopparhalter redovisas detta i figur 17.



Figur 17. Kopparhalt och pH i vattnet efter olika servisledningar.

Av figuren framgår, att helt olika kopparhalter uppmättes efter att vattnet stått stilla i kopparrören. Vattnet som stått i servisledningar av plast eller koppar uppvisar relativt höga kopparhalter, medan det vatten som stått i endera cementrör, galvaniserat rör, eller järnrör uppvisar avsevärt lägre halter. Det är dock felaktigt att tro, att plast- eller kopparrören skulle medverka till en ökad kopparkorrosion. Servisledningen av koppar

ger omedelbar utlösning av koppar och efter plastledningarna är vattnet i stort sett opåverkat. Skillnaderna står istället att söka i vattenpåverkan från de övriga servisledningarna.

En uppenbar anledning till skillnaderna är vattnets pH-värde. Som framgått av kapitlet om kopparkorrosion, avtar kopparhalten i vattnet med ökande pH. pH-höjningen i cementröret orsakades av alkaliläckage från rörmaterialet. Den kraftiga pH-höjningen i det galvaniserade röret hade sannolikt sitt ursprung i omfattande zinkkorrosion, medan järnrörets mera måttliga pH-höjning kan relateras till att järns korrosionsprodukter fallit ut som rost och på det viset bundit upp en del av hydroxidjonerna i vattnet.

Ytterligare ett skäl till de mycket låga kopparhalterna är sannolikt att det naturliga organiska materialet i vattnet komplexbands med andra metalljoner än koppar innan det nådde kopparrören, i cementröret kalciumjoner, i det galvaniserade röret zink- och järnjoner och i järnröret järnjoner. Samma situation förelåg i servisledningen av koppar, men eftersom den ena kopparjonen inte kan skiljas från den andra, blir inte effekten uppenbar i detta fall.

Eftersom syre konsumeras under korrosionsprocesserna, kan brist på tillgängligt syre vara ytterligare en orsak till lägre kopparhalter i vattnet från det galvaniserade röret och järnröret. Kopparrören var nya vid försökstillfället och därför var tillgången på skyddande korrosionsproduktskikt begränsad och rörytan relativt fri för korrosion.

Exemplet illustrerar med stor tydlighet att en viss vattenkvalitet inte ger en viss korrosionssituation oberoende av distributionsnätets utseende. Vid val av rörmaterial måste alltså såväl det enskilda materialets korrosionsegenskaper i relation till dricksvattenkvaliteten, som föregående materials vattenpåverkan bedömas.