



# KRAFTVERKSKEMI I SVERIGE

## Sammanfattning

Denna rapport beskriver den utveckling som har skett inom kraftverkskemin, härmed avses ång- och vattenkemi, under 1900-talet med tyngdpunkt på de senaste 20 åren. De viktigaste drivkrafterna för FoU avhandlas liksom de aktörer som spelar en ledande roll inom området.

De grundläggande vattenkemiproblemen och de vanligen förekommande åtgärderna att komma till rätta med dessa presenteras övergripande.

Rapporten behandlar i huvudsak Sverige och konventionella kraftverk, kärnkraftens vattenkemiproblem med tillhörande FoU beskrivs endast översiktligt. Slutligen ges också en tolkning till den ekonomiska och politiska påverkan på kraftverkskemin som skett samt ett försök till framtidsanalys vart kraftverkskemin är på väg.

## Innehållsförteckning

	Sida
1. Inledning	3
2. Grundläggande kemiska förhållanden	3
3. Problemställningar inom vattenkemi	7
3.1 Beläggningar	8
3.2 Korrosion	9
4. Vattenkemi kärnkraft	13
5. Internationell FoU-verksamhet	14
6. Branschorgan för FoU inom Kraftindustrin	15
7. Förändrade marknadsförutsättningar	17
8. Framtida FoU – en blick i kristallkulan	18
9. Slutsatser	19
10. Referenser	20

## 1. Inledning

*"Science owes more to the steam engine than the steam engine owes to science"*  
L.J. Henderson 1917

Intresset för innehållet i vattnet i ångmaskiner växte fram under 1800-talet i takt med alltmer avancerade konstruktioner med ökade panntryck. Det klassiska problemet med pannsten vid värmeöverförande ytor vållade problem med minskad effekt och dålig verkningsgrad. Till detta skall också läggas de problem med ångpanneexplosioner som orsakades av otillräcklig vattenkvalitet. Det var dessa olyckor som var grunden till den organisation för övervakning av tryckkärl som sedermera blev Ångpanneföreningen[1].

Problemet åtgärdades oftast med avhjälpande underhåll när problemen blev för stora. I eldrörspannor kunde pannstenen knackas loss (mekanisk rengöring) men i samband med tillkomsten av vattenrörspannor så omöjliggjordes denna typ av rengöring. Intresset riktades då mot kemisk rengöring och förbehandling av matarvattnet till ångpannorna.

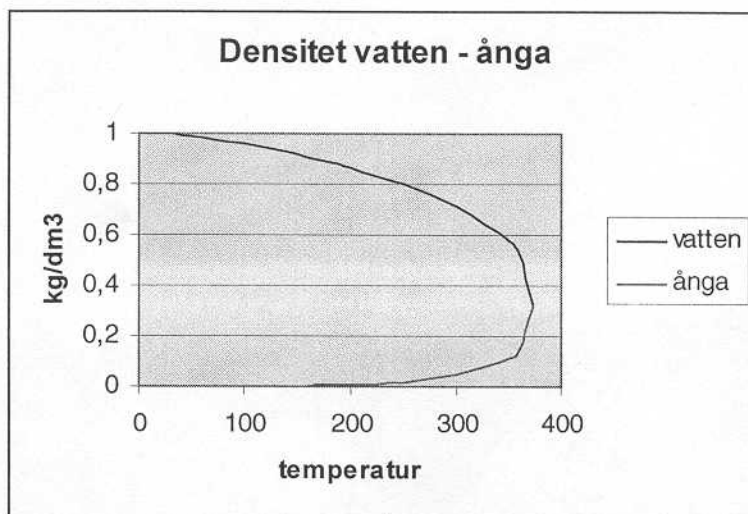
Man hade tidigt insett att det kondensat som återvanns var av betydligt bättre beskaffenhet och kunde därmed med fördel användas som matarvatten till ångprocessen. På så vis mildrades pannstensproblemet men försvann ej helt då en viss mängd tillsatsvatten, spädvatten, måste tillföras ångcykeln. För att kunna borttaga den pannsten som ändå bildades etablerades kemiska rengöringsmetoder. I och med detta så påbörjades den forskning som syftar till att förstå kemin i ångcykeln.

Idag är inte kraftverkskemi enbart en fråga om vattenkemin i kraftverken. Verksamheten har alltmer fokuserats på utsläppen av gasformiga föroreningar till omgivningen. Detta har accentuerats än mer de senaste decennierna i samband med avgifter på bland annat svavel- och kväveoxider. För den skull har inte problemen inom vatten-ångsidan försvunnit och fortfarande finns det ett hundratal personer i Sverige som har detta som en viktig del i sysselsättningen.

## 2. Grundläggande kemiska förhållanden

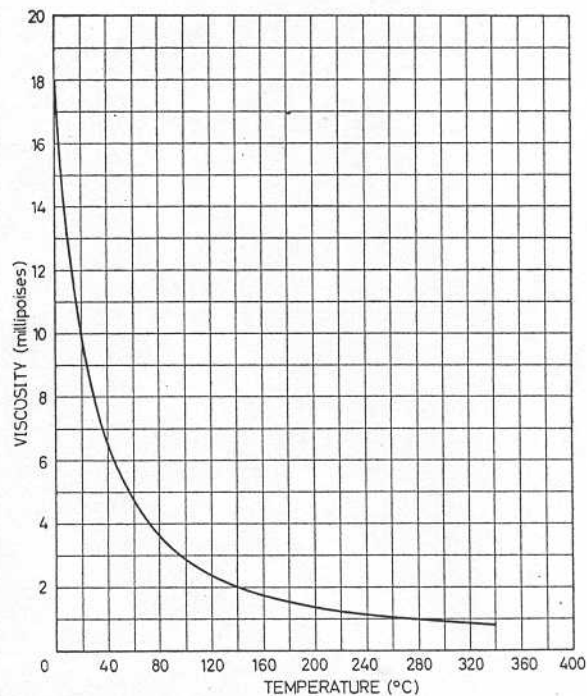
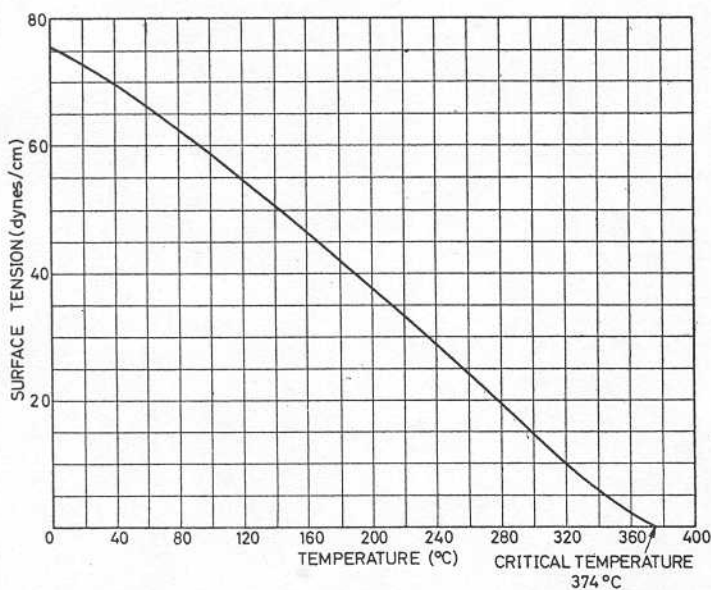
Vid de tryck och temperaturer som råder i en ångpanna skiljer sig de fysikaliska och kemiska egenskaperna sig mycket från de egenskaper som är vid rumstemperatur och atmosfärstryck (STP) [2,3,4,5]. Dessa skillnader ställer i många fall till problem för driften av ånganläggningar. Förutom de rent fysikaliska skillnaderna i vattenfasen vid dessa tryck måste också fasövergången vatten till ånga tas i beaktande.

Av de fysikaliska skillnader som föreligger mellan STP och driftförhållanden är följande av störst betydelse; densitet, ytspänning och viskositet. Skillnaden mellan densiteten på vatten och den i jämvikt stående ångan sjunker ju högre temperaturen är, se fig 1. Vid den kritiska punkten försvinner skillnaderna och det är inte längre relevant att tala om två olika faser. Innebörden av detta blir att det allt svårare att separera ångan från vattnet i pannans topp och att det finns stor risk att de salter som finns i pannvattnet följer med ångan till överhettare och turbin och ger upphov till skador, se kapitel 3.1.



Figur 1. Densitetsskillnad mellan ånga och vatten som funktion av temperaturen.

Problemen med den minskande ytspänningen (fig. 2) och minskningen av viskositeten med stigande temperatur (fig. 3) ger i princip samma effekter som för densitetsskillnaden, det vill säga svårigheter med att avskilja pannvatten från ånga.



Figur 2 Ytspänning som fkn av temperatur[5].

Figur 3 Viskositet som fkn av temperatur[5].

Vid de höga temperaturer som föreligger i en kraftverksångpanna så skiljer även kemin, såväl termodynamiskt som kinetiskt. Då jämviktsekvationen för en rektion kan skrivas

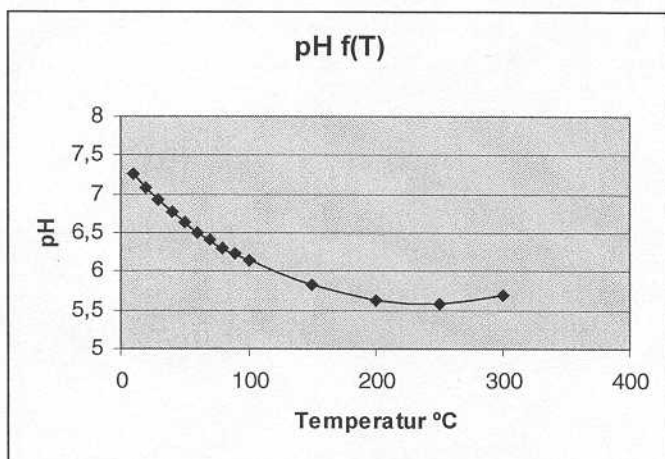
$$(1) \quad -\Delta G = RT \ln k$$

ser vi att temperaturen kommer in som en parameter. I vissa fall är reaktioner ej termodynamiskt möjliga vid STP men vid drifttryck i en ångpanna kan de ske. För att de skall ske måste också kinetiken vara gynnsam. Reaktionshastigheten ges av Arrhenius samband.

$$(2) \quad k = b \exp(-E_A/RT)$$

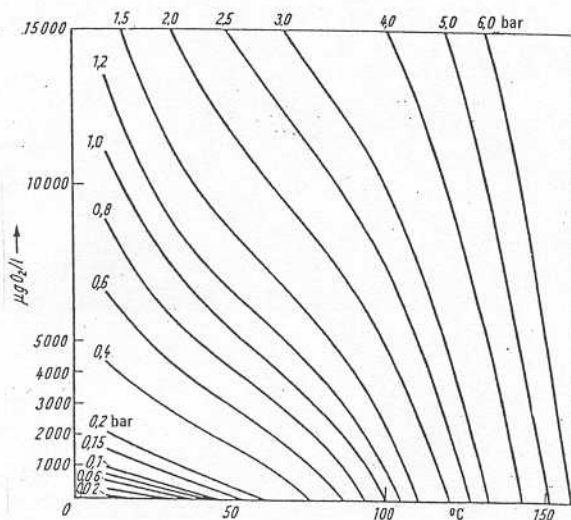
En tumregel är att en fördubbling av reaktionshastigheten sker var tionde grads höjning. Detta medför att vissa reaktioner t ex korrosionsförlopp som kanske sker med knappt mätbar hastighet i rumstemperatur sker mycket snabbt i en ångpanna.

Vattnets jämviktprodukt är även den temperaturberoende. Ökande temperatur att  $pK_w$  minskar, detta i sin tur medför att pH i rent vatten kommer att sjunka med stigande temperatur, se fig. 4.



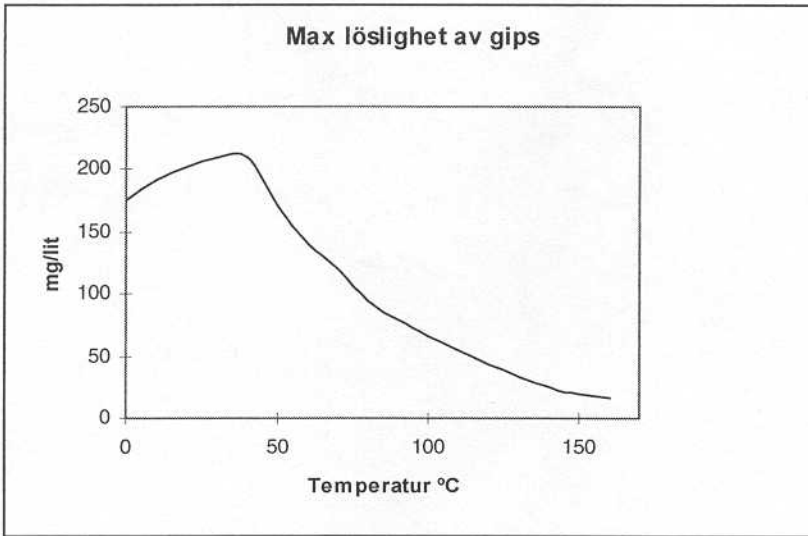
Figur 4. pH som funktion av temperaturen.

Lösligheten i vatten för de flesta ämnen ökar med stigande temperatur och tryck. Detta är i de flesta fall ur kraftverkssynpunkt gynnsamt men inte alltid. Ett sådant ämne är syre, se fig. 5. Den ökade lösligheten av syre ställer till problem i form av korrosion. Detta beskrivs utförligare i kapitel 3.2.



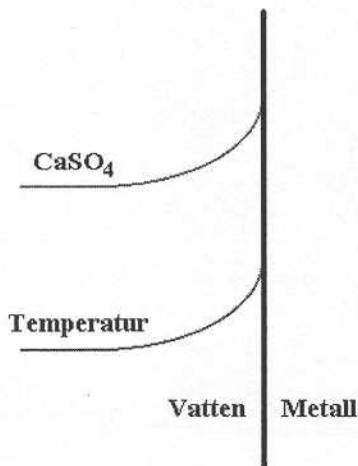
Figur 5. Löslighet av syre som funktion av trycket[6].

Några av de ämnen som avviker från regeln med ökad löslighet ju högre temperatur, är de ämnen som ger upphov till pannsten. Dessa ämnen är framför allt kalcium- och magnesiumföreningar. Ett exempel är kalciumsulfat (se fig. 6). Problemen med beläggningar beskrivs närmare i kapitel 3.1.



Figur 6. Löslighet av gips  $\text{CaSO}_4$  som funktion av temperaturen.

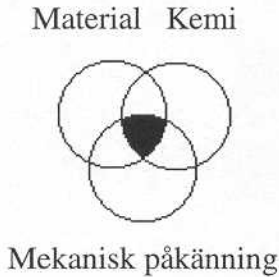
Förhållandena i en ångpanna låter sig inte beskrivas så lätt då även en fasövergång från vätska till ånga förekommer. Detta ger komplicerade strömningsberäkningar för att förstå hur olika species uppträder i ångcykeln. En förenklad bild (fig. 6) över hur koncentrations- och temperaturgradienter ser ut vid gränsen mellan vatten och metall, dvs vid tubytan. I denna enkla modell är det endast vattenfasen närvarande. Vid tubytan är temperaturen högre vilket ger en konvektion som också medför en masstransport av de i vattnet lösta ämnena t ex  $\text{CaSO}_4$ . Detta medför att löslighetsmaximat för gips lätt uppstår vid metallytan och ger upphov till beläggningar.



Figur 7. Temperatur- och koncentrationsgradienter vid tubyta.

### 3. Problemställningar inom vattenkemi

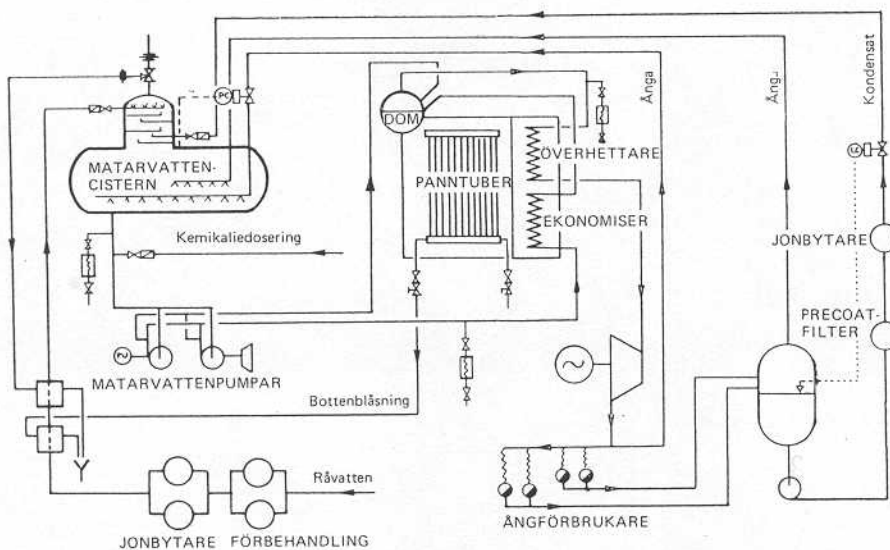
De problem som matarvattenkemin har stått inför sedan tillkomsten av ångpannor är framför allt beläggningar och korrosion. Dessa båda problem har accentuerats ju mer avancerade ångpannorna blivit. Den avancerade designen på ångpannor kräver allt bättre kemi i ångcykeln. Dessa problem hänger intimt samman med driftbetingelserna och materialvalen kraftverkskomponenterna (se fig.8).



Figur 8. Designparametrar för kraftverkskomponenter

Ju högre tryck och temperatur anläggningen körs vid desto högre krav på material och renhet i vatten och ånga. Det är denna "treenighet" som sätter gränsen för hur hög elverkningsgrad man kan erhålla. För att mildra inverkan av kemin så har forskningen inriktats mot att eliminera orsakerna till korrosion och beläggningar.

För att förstå vikten av kemins betydelse i ångkraftverk har ett antal läroböcker i ämnet utgivits [5,6,7,8,9,10]. Många av dessa är tämligen ålderstigna och ett behov av en ny lärobok är stort. Värmeforsk har lagt ut ett uppdrag till ÅF Energikonsult att ta fram en ny svensk bok som skall beskriva ämnesområdet [11]. För betydelsen av fackuttryck förekommande i ångkrafttekniken och i denna text rekommenderas referens 10. Från samma referens är figur 9 som ger en del av den nomenklatur som används inom kraftverkstekniken.

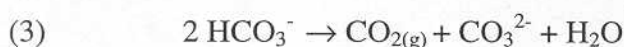


Figur 9. Vatten-ångcykel i en industriell ånganläggning

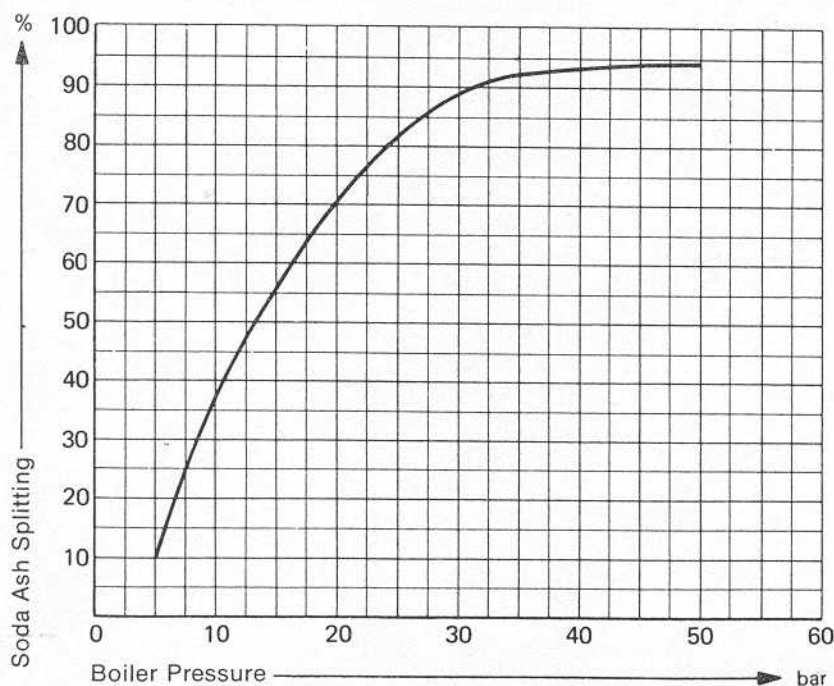
Internationellt pågår flera olika arbeten som syftar till att ta fram nya riktlinjer för vattenkemin i ångkraftverk. Det finns ett flertal olika riktlinjer idag och tendensen går mot överstatliga, standardiserade normer utgivna av organisationer som EU, ASME, IEC eller Unipede. Sverige tar idag inte en aktiv del i detta arbete utan deltar endast som remissinstans.

### 3.1 Beläggningar

Den grundläggande orsakerna till beläggningarna på värmeöverförande ytor är att vissa ämnen har en löslighet som sjunker med stigande temperatur (se fig. 6). Det ämne som ställer till störst problem är kalciumkarbonat,  $\text{CaCO}_3$ , detta pga  $\text{Ca}^{2+}$  och  $\text{CO}_3^{2-}$  är vanligt förekommande i de naturliga vatten som är källan till det spädvatten som används i ångcykeln. Karbonatjonen uppträder i sig inte förrän vid pH 9 pga syrabasjämvikten mellan karbonat och bikarbonat  $\text{HCO}_3^-$  (pKa 10,1). I de naturliga vattnen är bikarbonat dominerande. Vid de höga temperaturer som är i en panna spjälkas dock bikarbonaten till karbonatjoner och kolsyra enligt följande:



Denna spjälkning är tryck- och temperaturberoende (se fig.10) och sker nära nog fullständigt vid ett panntryck över 40 bar.



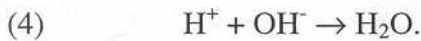
Figur 10. Spjälkning av bikarbonat till kolsyra och karbonat [8].

Den därvid uppkomna karbonaten bildar tillsammans med kalciumjoner pannsten. Dessutom ger den bildade kolsyran enligt (3) ger en pH-sänkning i condensatet som ger upphov till korrosion på lågtrycksturbinskovlar och condensatberörda stålytor.

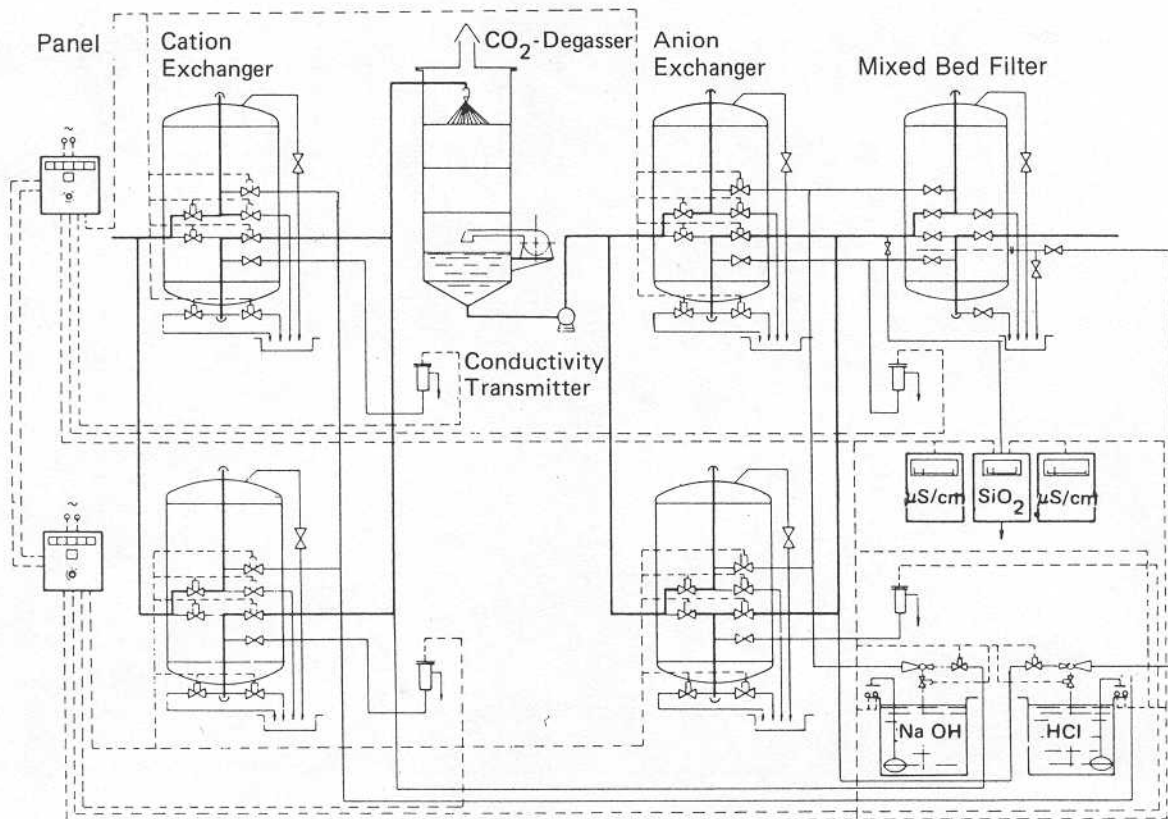
Av de övriga ämnen som ger upphov till beläggningar uppträder vanligen kisel som silikat tillsammans med framför allt kalcium, magnesium och aluminium. Dessa föroreningar följer ofta med ångan och bildar beläggningar i pannans överhettare och i lågtrycksturbinens skovlar. Även detta problem ökar med ökande tryck och temperatur, dels beroende på att densitetsskillnaden mellan ånga och pannvatten minskar och dels beroende på att lösligheten i ånga för silikater ökar med stigande temperatur.

Den tekniska lösning som vanligen används för beläggningsproblemen är att eliminera alla salter i matarvattnet. Vid anläggningar med låga ångdata kan avhärdning vara tillräckligt, dvs att man eliminerar kalcium och magnesium. De tekniker som står till buds för avsaltning är jonbyte och omvänd osmos (RO).

I jonytestekniken tas först alla katjoner upp i en katjonbytare och byts ut mot vätejoner. Därefter leds vattnet in i en anjonbytare där anjonerna byts ut mot hydroxidjoner. Dessa reagerar mycket snabbt med vätejonerna och bildar vatten enligt



Jonbytestekniken är en mogen teknik som funnits kommersiellt tillgänglig i drygt 50 år. En typisk jonbytesanläggning för ett kraftverk återfinns i fig 11.

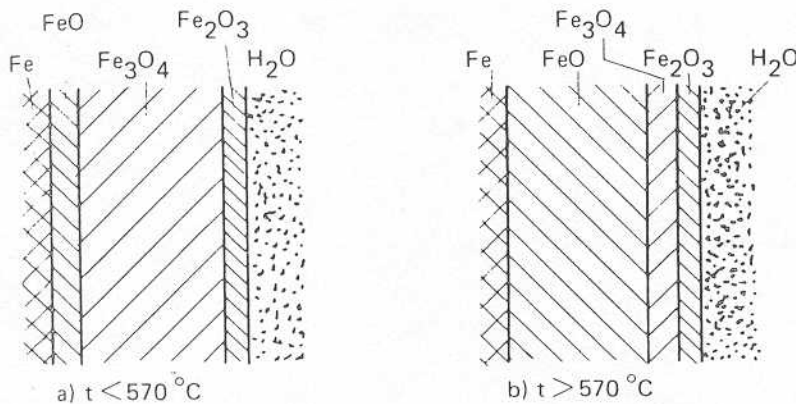


Figur 11 Avsaltningsanläggning av jonbytande för kraftverk [8].

Membrantekniken etablerades på allvar under 60-talet då de första storskaliga applikationerna installerades. Dessa användes i huvudsak för att avsalta havsvatten till dricksvatten i områden med sötvattensbrist, t ex Persiska viken. För beredning av spädvatten till ångprocesser dröjde det ytterligare ett tiotal år innan de första anläggningarna kom till Sverige. Tekniken bygger på att i vattnet lösta salter ej kan passera membranerna emedan vattenmolekylerna går igenom. Denna avskiljning är inte fullständig, typiskt följer 1-5% av salterna med i permeatet. De senaste åren har RO-anläggningar populäraste alternativet när ny avsaltningsutrustning skall upphandlas [12].

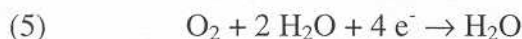
### 3.2 Korrosion

Det finns flera olika typer av korrosion som kan inträffa i de olika metaller och legeringar som ingår i ett kraftverk [13]. Ett annat stort problem som drabbar kraftverkskomponenter är korrosion. Korrosion i kraftverkssammanhang beräknas kosta 4 miljarder dollar årligen i USA[14]. Korrosion är det termodynamiskt stabila förloppet för de vanligen förekommande konstruktionsmaterialen hos kraftverkskomponenter. Problemet får alltså vändas till att kinetiskt hindra materialen att korrodera bort. För det vanligaste materialet i en panna, kolstål, löses detta genom att ett tätt skikt av magnetit bildas i gränsskiktet mellan grundmaterialet och vattnet. Magnetit,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , har en mycket låg löslighet och god vidhäftningsförmåga på basmaterialet. Detta skikt är stabilt upp till ca  $570^\circ\text{C}$ , vid högre temperatur omvandlas magnetit till wüstit,  $\text{FeO}$ , som har betydligt sämre vidhäftningsförmåga och leder till att materialet korroderar bort. Se figur 12.

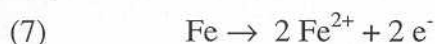


Figur 12. Oxidskikt vid olika temperaturer på kolstål i vattenmiljö [8].

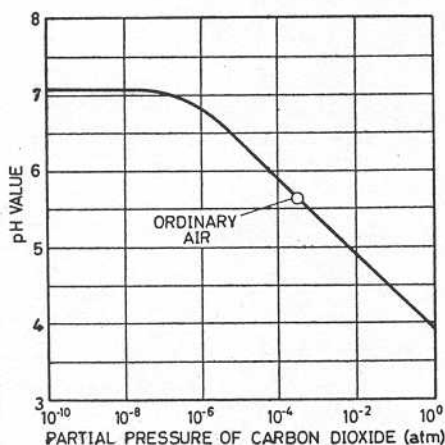
Katodreaktionen i en korrosionsprocess är antingen syrgasreduktion eller vätgasutveckling. Se (6) och (7). Korrosionen kan vara av båda typerna samtidigt, t ex vid ett luftinläckage i en kondensor med surt kondensat, vilket än mer accelererar korrosionen.



Som anodreaktion sker då upplösning av järn,



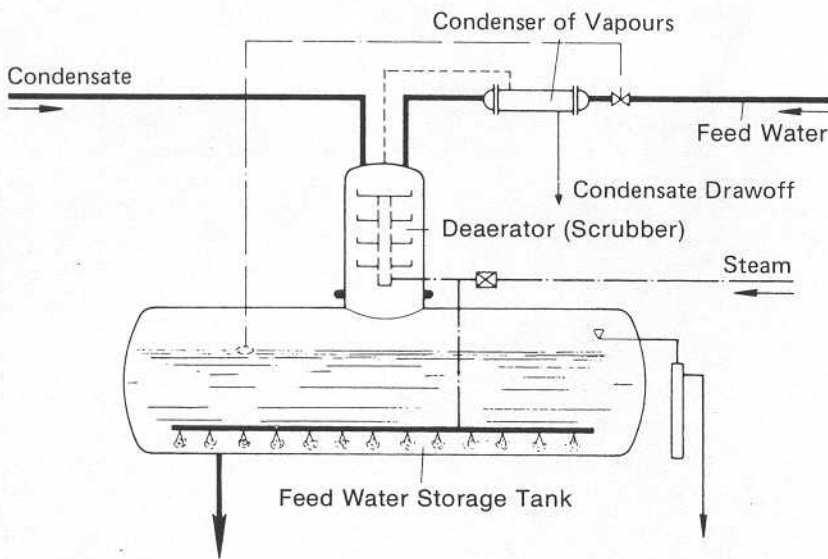
För att minska korrosion kan man alltså eliminera syrgas löst i vatten eller höja pH till ett värde där  $[\text{H}^+]$  är mycket låg. Det optimala pH-värdet i en ångcykel ligger i intervallet 9-10. Vid högre pH-värden riskerar man andra typer av korrosion, t ex alkalisk spänningskorrosion och korrosion på kopparhaltiga material. Då pH för rent avsaltat vatten är temperaturberoende (se fig. 4) och ger ett allt för lågt pH i ångcykeln doseras alkaliseringskemikalier. Dessutom så ger luftens koldioxid en pH-sänkning då koldioxiden löser sig i vattnet och ger kolsyra. Se figur 13.



Figur 13. pH i rent vatten som funktion av koldioxidhalt i atmosfär vid jämvikt [5].

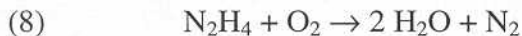
De vanligaste alkaliseringskemikalierna är ammoniak och fosfat. Ammoniak följer med ångan och ser till att rätt pH erhålls i ånga och kondensat. Fosfat däremot stannar kvar i pannvattnet och upprätthåller rätt pH-värde, dessutom så binder fosfat eventuell resthårdhet (Ca, Mg) i ett hydroxylapatitslam som avlägsnas genom bottenblåsning.

Den syrgasförbrukande korrosion begränsas genom att den i vattnet lösta syrgasen tas bort, antingen fysikaliskt eller kemiskt. Den fysikaliska avgasningen av syre utförs vanligen i en så kallad avgasare som placeras på matarvattentanken. Se figur 14.



Figur 14. Matarvattentank med avgasare[8].

Avgasaren fungerar som en silbottenkolonn där det syrehaltiga vattnet får möta ett ångflöde. Ångan rycker då med sig syret och leds ut via en avluftning. Den kemiska avgasningen sker med reduktionsmedel, t ex sulfid, hydrazin eller askorbinsyra. Reaktionen mellan hydrazin och syre kan skrivas



Reaktionen ger alltså endast vatten och kvävgas som restprodukt. Hydrazin kan dessutom verka som ett alkaliseringskemikalie enligt



Hydrazin har dock klassats som cancerframkallande och användningen har kraftigt minskat i Sverige. Det har dock varit problem med att finna en tekniskt likvärdig produkt varför många anläggningar tvekar om att gå ifrån hydrazin. Sveriges största förbrukare av hydrazin är Ringhals kärnkraftverk.

#### 4. Vattenkemi kärnkraft

Fram till mitten av seklet så bedrevs vattenkemiforskningen inom kraftverkstekniken framför allt med syfte att mildra betingelserna för korrosion och beläggningar. Behoven av nya metoder för att rena vatten ökade i takt med att ångpannornas tryck höjdes. Inriktningen ändrades dock radikalt kärnkraftsepoken inleddes. Den svenska linjen bestod av anrikat vatten (tungt vatten) och naturligt uran. Det finns två sätt att genomföra fission av uran för kraftgenerering, antingen genom att anrika uranet och använda vanligt vatten eller att anrika vattnet till tungt vatten,  $D_2O$ , och använda naturligt uran. Den första svenska reaktorn i kommersiell drift var Ågesta. Ågestareaktorn, belägen i Stockholms södra utkanter, var i drift åren 1964-1974. Vid driften av tungvattenreaktorer är det viktigt att minimera läckaget av  $D_2O$ , dels av säkerhetsskäl och dels av ekonomiska skäl. Sekundärsidan med ångturbין och kondensator liknar i hög grad en konventionell ångcykel. Den svenska linjen med tungvattenreaktorer övergavs i samband med misslyckandet av Marvikenprojektet [15]. Efter nedläggningen av Marvikenprojektet så gick även Sverige över till det förhärskande tekniken med lättvattenreaktorer. Den första lättvattenreaktorn i Sverige var Oskarshamn 1 (O1) som togs i drift 1972. O1 är en sk kokareaktör, BWR, levererad av ASEA-ATOM. Två år senare togs den första tryckvattenreaktorn, PWR, i drift vid Ringhals. Det svenska kärnkraftsprogrammet byggdes sedermera ut till tolv reaktorer, varav tre stycken PWR av Westinghousedesign. De övriga BWR-anläggningarna levererades av ASEA-ATOM.

De problem som rör vattenkemin i kärnkraftverk är dels av samma typ som i fossileldade kraftverk, dels den speciella problematiken med radioaktiv strålning. Den strålning som förekommer i vattnet och ångan kan dels härstamma direkt från bränslet från en sk bränsleskada och dels indirekt via att partiklar följer med matarvattnet in i härden och genomgår kärnreaktioner och bildar ämnen som  $60-Co$  och  $59-Fe$ . Eftersom dessa ämnen till stor del härstammar från korrosionspartiklar som bestrålas består största delen av en BWR av rostfritt material. För en PWR-anläggning är detta problem något mindre då vattnet är uppdelat i en primärsida som passerar härden och en sekundärsida som i normalfallet ej innehåller radioaktiva partiklar.

Forskningen inom kärnkraften i Sverige har kännetecknats av att vara branschgemensam med alla aktörer som deltagare. I Sverige är det kärnkraftverken genom Vattenfall, Forsmarks Kraftgrupp (FKA), Oskarshamns Kraftgrupp (OKG) och Sydkraft tillsammans med ABB-ATOM och Studsvik. Forskningsprojekten har ofta också delfinansierats av statliga myndigheter som SKI och SSI. Många projekt har också varit internationella med insatser framför allt från EPRI och sk Owners Group-samverkan [16,17,18].

Inom PWR-området har mycket forskning inriktats mot att erhålla så rent vatten som möjligt på sekundärsidan. Detta är viktigt då föroreningar där ger upphov till skador i ånggeneratorerna. De svenska forskningsinsatserna på PWR-sidan har bekostats av Vattenfall eftersom de övriga kraftbolagen endast har kokareaktorer. Forskningsarbetet har till stor del skett tillsammans med Studsvik. Inom Studsviksområdet har goda laboratorieresurser byggts upp, bl a finns ett antal autoklaver för att kunna simulera vattenmiljön på sekundärsidan. Arbetet har framför allt inriktats på att undersöka sprickbildning i ånggeneratormaterial [19]. Studsvik har också framgångsrikt arbetat inom analysområdet för redoxmätningar med egenutvecklade elektroder [20,21].

## 5. Internationell FoU-verksamhet vattenkemi

Forskningen inom vattenkemin är intimt ihopkopplad med materialfrågor och driftbetingelser. I detta sammanhang brukar man tala om Material, Kemi och Drift som viktiga frågor att ta hänsyn till vid nya koncept för ångproduktion. Det är dessa parametrar som sätter gränserna för hur långt man praktiskt kan nå i elverkningsgrad. Den generella tumregeln gäller att ju högre verkningsgrad desto större krav ställs på processvattnen. Kraven som ställs på processvattnen och analystekniken har gått hand i hand på så sätt att så snart som detektionsgränsen för en parameter har pressats nedåt så har kraven på de tekniska specifikationerna på processvattnen i ångcykeln skärpts.

Mycket av den forskning som pågår idag inom vattenkemin ingår som ett stöd till det område som brukar beskrivas som "avancerade ångcykler". Med detta menas ångcykler som arbetar i det överkritiska området och med temperaturer över 600 °C. Intresset för sådana anläggningar är stort utomlands t ex inom EU-länderna.

Danmark är ett av de länder som ligger längst fram i fronten vad gäller sådana anläggningar [22]. Drivkraften för de danska kraftbolagen är att minska CO<sub>2</sub>-utsläppen i enlighet med Kyotoöverenskommelsen. Detta låter sig göras om man kan öka elverkningsgraden på kraftverken. För Danmark är det extra viktigt då en stor del av deras elproduktion baseras på kol. I Sverige saknas denna drivkraft då den allmänna uppfattningen inom svensk kraftindustri är att det råder en överkapacitet på produktionstillgångar. I Avedøre strax utanför Köpenhamn, uppför NESA tillsammans med Vattenfall ett kombikraftverk med 600° C ångtemperatur och 350 bar drifttryck. För att klara dessa höga tryck och temperaturer i ångcykeln krävs ett mycket rent vatten och en bra analysövervakning. Inom detta område har de danska kraftbolagen satsat tämligen mycket forsknings- och utvecklingsresurser som gör att de ligger långt framme även på kemikunnandet i avancerade ånganläggningar [23,24,25].

I USA har intresset de senaste åren framför allt riktats mot ny membranteknik t ex elektroavjonisering, bearbetande av riktvärden och slutning av processerna, så kallad "zero liquid discharge". En nyckelteknologi för att lyckas med processlutning av vattensystemen är membranteknik. På många håll i USA är vattensituationen ansträngd vilket gör att myndigheterna ställer stora krav på processindustrierna att återanvända vattnet. Detta har drivit fram en mängd olika innovativa lösningar på problemen- Den framtagna teknologin, framför allt inom membrantekniken, håller på att överföras till Europa. I övrigt så är intresset mycket stort i USA för vad man kallar "asset management", vilket också börjar komma till Sverige i form av outsourcing.

I övriga EU-länder så bedrivs FoU inom området mest i Belgien, Nederländerna, Italien och Tyskland. De formerar sig gärna i EU-projekt och får på så vis en delfinansiering av projekten. Även här riktar många projekt in sig på avancerade ångdata som ett sätt att minska de specifika koldioxidutsläppen. Frankrike har en mycket forskning inom kärnkraftskemi via det statliga kraftbolaget EdF.

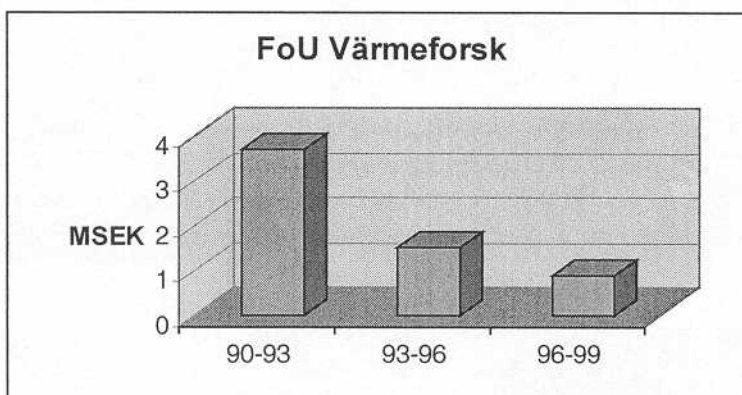
## 6. Branschorgan för FoU inom Kraftverkskemi

Forskning inom vattenkemi i kraftverkssammanhang i Sverige har framför allt bedrivits som branschforskning där olika företag och institutioner deltagit. Inom kärnkraften kallas den "Branschforskningen" och har funnits sedan 80-talet. Den verksamhet som bedrivits där beskrivs närmare under kapitel 5, Vattenkemi kärnkraft.

Inom den konventionella ångtekniken har det mesta av FoU bedrivits under Värmeforsks ramprogram. Värmeforsk bildades 1972 med svenska staten, kraftindustrin, skogsindustrierna samt en del tillverkande industri som stiftare. Målet var att ta fram forskningsresultat med en tillämpning inom fem år, långsiktigare mål bedrevs inom högskolans ram. Inom just vattenkemin har dock mycket lite forskning bedrivits på högskolor och universitet som har varit kraftverksanknuten. Värmeforsk organiserades som ett antal forskningsgrupper varav kemiteknik var en. Staten via Nutek har stått för 40 % finansiering av forskningsverksamheten, de övriga 60 % delades av de övriga företagen varav Statens Vattenfallsverk stod för 25% fram till och med 1992. Den statliga finansieringen idag sker via Energimyndigheten.

I forskningsgruppen för Kemiteknik beslutades de projekt som rörde vattenkemi i kraftverk. Forskningen inom Värmeforsk har haft några avgränsade områden i första hand. Mycket av arbetet har haft inriktning mot membranteknik [26,27,28,29] samt korrosion och alkalisering av ånga och kondensat[30,31,32,33]. Dessutom har en del projekt med stark miljöprofil drivits, bland annat med syfte att ta bort freoner och hydrazin [34,35,36]. De företag som var de mest aktiva utförarna under de första decennierna var Studsvik och Ångpanneföreningen. Under det senaste decenniet har även de andra medlemsföretagen varit aktivare i genomförandefasen, t ex Sydkraft, Vattenfall och ABB-STAL.

De politiska besluten att avreglera elmarknaden och att senarelägga kärnkraftavvecklingen tillsammans med lågkonjunkturen 1992 gjorde att intresset för ny elproduktion närmast obefintligt. Detta smittade av sig till Värmeforsk och medförde inriktningen på verksamheten ändrades mot livslängdsfrågor. Detta drabbade i stor utsträckning kemiverksamheten. Kemiteknik upplöstes 1993 och bildade tillsammans med Materialteknik en gemensam grupp. Från och med 1996 heter gruppen enbart Materialteknik och bedriver i huvudsak materialrelaterade projekt. Kemifrågorna har på detta vis nästan försvunnit helt från Värmeforsks intressesfär. Detta kan tydligt följas i figur 15 som visar budgeten för kemiprojekt under 90-talet [11]



Figur 15. Forskningsanslagen för kemiteknikrelaterade projekt under 90-talet.

1987 bildades Matarvattensektionen som är en intresseorganisation för vattenkemi inom kraftverk. Organisationen medlemmar kommer från industrin (framför allt cellulosa och papper), från kraft- och fjärrvärmesidan, leverantörer och konsulter och konsulter inom branschen. Matarvattensektionen anordnar årligen ett symposium som är det enda forum där alla dessa aktörer träffas. Antalet deltagare brukar var ca 100 stycken vilket väl täcker företrädare för branschen i Sverige. Matarvattensektionen har de senaste åren avsatt medel för forskning inom området delvis på grund av de nedskärningar som Värmeforsk har gjort. För att uppmuntra studenter att verka inom området kommer Matarvattensektionen att dela ut pris för bästa examensarbete inom disciplinen. Första priset kommer att delas ut år 2000 i samband med det årliga matarvattensymposiet.

Inom Norden har ett samarbete skett inom den organisation som kallas Nordel. Nordel har ett kemiutskott som träffas vartannat år för att dryfta kemifrågor. Förutom vattenkemi så behandlas även miljöfrågor på dessa möten. Dessa möten har framför allt en funktion för att utbyta drifterfarenheter.

Övriga organisationer som i ringa utsträckning har sponsrat FoU inom området har varit Stiftelsen för Membranteknisk Forskning och Åforsk.

Kraftbolagen själva har drivit en viss FoU-verksamhet. Vattenfall har av tradition varit det företag som varit mest aktiva med egen forskning. En del av den forskning har skett i gränslandet mellan material och kemi [37,38,39,40], ett område som inte alltid har haft en klar hemvist i branschorganisationerna. Dock har denna verksamhet minskats de senaste åren på grund av den avreglerade marknaden tillsammans med den uppskjutna kärnkraftsvecklingen.

I övrigt så arbetar kraftbolagen med att förbättra sin miljöimage genom att sluta processerna och att ta bort miljöfarliga kemikalier, framför allt hydrazin. De insatser som har varit de senaste åren har varit att få bort hydrazin som doseringskemikalie hitta alternativ till hydrazin som syrereduktionskemikalie. Hydrazin har kommit upp på B-listan över hälsovådliga kemikalier. Detta medför att de flesta kraftverk snarast möjligt vill ta bort hydrazin. Birka Energi har t ex startat ett projekt på 3 MSEK för att ta bort produkten från sina anläggningar. Denna typ av projekt är kraftbranschen beredd att lägga ner medel då dessa har en stark miljöprofil.

## 7. Förändrade marknadsförutsättningar

I början av 90-talet skedde en del händelser i omvärlden som kom att påverka omfattningen av verksamheten inom kraftindustrin. Två av dessa var politiska händelser medan den tredje var den recession som kom 1992. Riksdagen beslutade om en avreglering av elmarknaden skulle ske från 1996 och beslöt även att skjuta på tidplanen för kärnkrafts-avvecklingen. Det "oåterkalleliga" beslutet att stänga ett antal reaktorer under decenniet sköts än en gång upp vilket medförde att kraftbolagens intresse för ny elproduktionsteknik markant avtog.

Riksdagens beslut om att avreglera elmarknaden fick långtgående konsekvenser för Kraft-Sverige. För första gången skulle man på allvar konkurrera om kunderna. Erfarenheter från Norge och Storbritannien hämtades hem i möjligaste mån och företagens management förändrades. För Vattenfalls del var denna omställning antagligen större än för de övriga kraftbolagen då affärsverket haft ett myndighetsansvar. Vattenfall hade i början av decenniet ett flertal projekt på gång som syftade till ny elproduktion i samband med kärnkrafts-avvecklingen och en förväntad tillväxt. Samtliga kraftbolag hade vid denna tid som princip att kunna producera sin egen kraft och förlita på andra bolag. För Vattenfalls del kom paradigmskiftet 1992 när man för första gången frångick denna princip och ingick ett långsiktigt köpavtal av norsk kraft. Detta tillsammans med den lågkonjunktur som nu rådde medförde att också luften gick ur de projekt som drevs av Vattenfall.

Erfarenheterna från England visade att avregleringen medförde en stark konsolidering av tillgångarna i kraftföretagen. För att förbättra nyckeltal som soliditet och vinstmarginal så skars FoU kraftigt ner. Detta var en medveten strategi för att öka intäkterna vid börsintroduktionen av de nya kraftbolagen. En stor del av forskningsingenjörerna lämnade England och flyttade till USA eller till kontinenten. I Sverige skedde detta inte alls i samma utsträckning som i England men även här ströps FoU-medlen i viss omfattning. Detta märktes dels inom kraftbolagens egna utvecklingsenheter men även på andra företag och institut t ex Studsvik. Under 90-talet har de flesta svenska kraftbolag kraftigt förbättrat sin finansiella situation och ökat produktiviteten på ett remarkabelt sätt.

Det självklara förhållningssättet att redovisa de FoU-projekt och drifterfarenheter som man erfor synades i kanten och den tidigare mycket öppna anda som rådde mellan kraftverken började sakta men säkert slutas. Till detta kom också de förändringar av kraftindustrin som tidigare varit en mycket trög bransch. Nu började företag att säljas, köpas och fusioneras. Utländska aktörer kom in i Sverige och svenska företag köpte utomlands. Försiktigheten spädades på av de omorganisationer som skedde inom industrin. Kemiverksamheten som tidigare varit en integrerad del av driften kom på många anläggningar att omfattas av ett köp-och-säljsystem internt inom kraftbolagen. Detta hade det vällovliga syftet att synliggöra kostnader men hade i många fall till följd att en förvirring utbröt. De interna beställarna var inte vana i sina nya roll och i många fall rädda för att handla upp kemitjänsterna. I flera av de stora företagen har man idag skilt produktionsenheten från utförarenheten i två olika aktiebolag. Detta för att enklare i driftentreprenadform kunna sälja tjänster externt men även för att öka produktiviteten.

## 8. Framtida FoU – en blick i kristallkulan

I och med den avreglerade elmarknaden har kraftbolagen satts under prispress och kostnadssidan är under ständig översyn. Detta har medfört att även kemisternas roll har granskats. Detta har inte i samma utsträckning skett i fjärrvärmebranschen där monopol-situation ännu råder. För kraftbolagen gäller det nu att finna nya tillämpningar av kemisternas kompetens genom att få in dem i industrins ånganläggningar eller i kommunernas värmeanläggningar. Detta brukar vanligen benämnas outsourcing och har tilldragit ett mycket stort intresse både från kraftbolagen och från industrin. Outsourcingkonceptet är ännu i sin linda men verksamheten kommer med största sannolikhet att öka rejält under de närmaste åren. För kemisterna kommer detta antagligen att innebära att allt fler av dem inte kommer att vara stationerade bara på en anläggning utan i arbetsuppgifterna kommer också att ingå att serva andra närliggande anläggningar. En del av denna verksamhet kommer kanske att kunna klaras av med IT i form av att mätdata från kontinuerliga mätinstrument övervakas från en driftcentral där kemisten sitter. Man kan också förvänta sig en viss branschglidning på så vis att kemisterna också kanske kommer att serva kommunal vatten- och avloppsvverk med analys och övervakning.

I Sverige kommer det troligen inte att byggas några anläggningar med avancerade ångdata inom den närmaste tioårsperioden. Behovet av ny elproduktion i Sverige bedöms som mycket litet, den produktion som tillkommer kommer antagligen bestå av vindkraft och biobränsleeldade kraftvärmeverk. De bioeldade kraftverken har inte samma behov av höga ångdata då elverkningsgraden inte prioriteras. Dessutom drabbas dessa anläggningar av stora materialproblem på rökgassidan vid eldning av biobränslen vilket sätter gränsen för hur höga ångtemperaturer som tillåts. Av dessa anledningar kommer ej stora resurser satsas på forskning med inriktning mot höga ångdata. Den FoU som man kan förvänta inom vattenkemin är en slutning av processflödena. I USA har begreppet ”zero liquid discharge” myntats för att beskriva de alltmer hårdnande krav på vattenresurserna för kraftindustrin. Även om vi Norden inte har vattenbrist kan man förvänta sig att kraven kommer att bli hårdare även i Sverige. Ett område där dessa tankebanor har börjat slå rot är inom rökgaskondenseringen där det finns några förstudier påbörjade med inriktning mot att återanvända rökgaskondensatet, efter lämplig rening, som t ex spädvatten för ångcykeln.

För första gången i kärnkraftens historia är även deras kemistbemanning ifrågasatt. Här finns dock en stor försiktighet med att göra nedskärningar då allmänhetens förtroende för kärnkraften ej får försämrats. Till detta kommer också de myndighetskrav som SKI och SSI ställer på kärnteknisk verksamhet. I dagsläget räknar Vattenfall med att göra en nedskärning på ca 10% av kemisterna. Detta löses framför allt med pensionsavgångar som ej nytillsätts. Även här räknar kraftbolagen med att automatisering och IT skall stödja verksamheten så att ingen kvalitetsförsämring skall ske. Inom Sydkraft har man på Barsebäck har infört en anställningsgaranti på fem år för att ej förlora den nyckelkompetens som behövs för att driva block 2 vidare. Detta kan kanske också ses som ett politiskt argument i förhandlingarna med staten om nedläggning av Barsebäck.

## 9. Slutsatser

Kemisternas roll i kraftverkssammanhang har förändrats de senaste decennierna, ifrån att ha varit rena vattenkemister har fokus flyttats över mot miljöfrågor. Denna ändring av arbetet har naturligtvis starka ekonomiska drivkrafter då miljöskatter på t ex  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$  och  $\text{CO}_2$  tillkommit under de senaste decenniet. För att i möjligaste mån klara koncessioner och minimera skatter har kemisterna skolats om till att kunna genomföra avancerade analyser på rökgaser och bränslen. Denna omskolning har möjliggjorts genom att mycket av det tidigare manuella analysarbetet på processvattnen i ångcykeln har automatiserats [41]. Antalet kraftverkskemister är ganska konstant under den här tidsperioden men arbetsuppgifterna har breddats betydligt med sådana typiska arbetsuppgifter som rökgasanalyser, skrivande av miljörapporter och kvalitetscertifiering.

FoU-verksamheten inom den konventionella kraftverkskemin har under de senaste decenniet skurits ner. Detta beror till största delen på den förändrade elmarknad som vi nu ser. Det är också svårare nu att se vilken utvecklingsverksamhet som verkligen då företagen har blivit alltmer förtegnade om sin verksamhet. Man kan väl förvänta sig att den svenska kraftindustrin alltmer kommer att driva två linjer, en intern som anses som strategisk och ej offentlig, och en linje där man söker samarbetspartner inom t ex EU. Det troliga från svensk sida är en satsning på processlutning.

Det har sedan kärnkraftsomröstningen 1980 stått klart att inga nya kärnkraftverk utöver de tolv befintliga kommer att byggas inom överskådlig framtid i Sverige. Detta har inneburit att FoU-resurserna har haft en klar och tydlig inriktning mot att minimera aktivitetsupbyggnad i stationerna och att förlänga livslängden på kraftverkens komponenter. Aktörerna har visat en stor öppenhet gentemot varandra och erfarenhetsutbytet har varit stort. Kärnkraftens speciella karaktär har medfört att det bildats en gemenskap mot den "yttre fiende" som finns i samhället. Branschen har därför inte i FoU-sammanhang påverkats i lika hög grad som inom det fossila området av den avreglerade elmarknaden. De krympande marginalerna på elförsäljningen har dock medfört att kraftbolagen ser över samtliga sina kostnader och därmed även FoU-insatserna inom kemiteknik.

## 10. Referenser

1. Teknisk Tidskrift. No.13. 30 mars 1895.
2. Hägg G.: "Allmän och oorganisk kemi" Almqvist & Wiksell, Stockholm, 1963. ISBN 91-20-06123-4.
3. Perry R. Green D.: Perry's Chemical Engineers' Handbook. 1984. ISBN 0-07-Y66482-X.
4. Stumm W. Morgan J.: "Aquatic Chemistry" John Wiley & Sons New York, NY, 1996. ISBN 0-471-51184-6.
5. Hamer P. Jackson J. Thurston E.F.: "Industrial Water Treatment Practice" Butterworths, London, 1961.
6. Steinmüller: Taschenbuch Wasserchemie. Vulkan Verlag Essen, 1990. ISBN 3-8027-2509-3.
7. Nordell E.: "Water Treatment for Industrial and Other Uses" Reinhold Publ Corp, New York, NY, 1951.
8. Deutsche Babcock Anlage AG: Water Manual Vulkan Verlag Essen, 1982.
9. Vattenteknik AB: Vattenbehandlingsmetoder. 1992. ISBN 91-630-1072-0.
10. Ångpanneföreningen: "Matarvatten del 2", Stockholm, 1974.
11. Privat korrespondens Jüri Tavast.
12. Wik A.: "Tekniska och ekonomiska överväganden vid ny avsättning" Matarvattensymposium. 1995.
13. Wranglén G.: "Metallers Korrosion och Ytskydd" Almqvist & Wiksell, Stockholm, 1967.
14. EPRI Conference proc.: "Boiler Tube Failures in Fossil Power Plants" November 1987. ISBN 08033-5018-X.
15. Brynielsson H.: "Utvecklingen av svenska tungvattenreaktor 1950-1970". Daedalus 1989/90. ISBN 91-7616-020-3.
16. Ljungberg L.: "BWR Water Chemistry Impurity Studies, Volume 1". EPRI Project RP 2293-1
17. Beverskog B. Puigdomenech I.: "Solubility of Fuel Crud in BWR". BNES 1996.
18. Hermansson H-P. Arvidsson P.: "Hide-out and Micro Chemistry on Oskarshamn 3 Fuel Cladding". SFEN/ENS Conference. Nice, April 1994.
19. Molander A. et al.: "Studies of Titanium Additions to PWR Secondary Systems" BNES Conference, Bournemouth. October 1996.
20. Andersson P-O.: "Plant experience from ECP Measurements in PWR Condensate and Feedwater System at Ringhals Units 3&4". EPRI Plant Chemists Meeting, Florida. November 1995.
21. Molander A. et al.: "Electrochemical Measurements in the secondary system of Ringhals 3 PWR". EPRI Plant Chemists Meeting, California. November 1992.
22. www.elsam.dk "Elsam Forskning og Udvikling 1998"
23. Daucik K.: "Evaluation of Consequences of Chemical Excursions". Steam Chemistry EPRI-VGB International Conference. Freiburg, June 1999.
24. Thomsen K. Moeller H. Daucik K.: "Technology for Field Measurement of Condensed Steam in LP Turbines". Steam Chemistry EPRI-VGB International Conference. Freiburg, June 1999.
25. Jensen J P. Bursik A.: "Solubility of Sodium Salts and Related Deposition Processes" Steam Chemistry EPRI-VGB International Conference. Freiburg, June 1999.
26. Falk I. Svenson J.: "Tillämpning av membranteknik för behandling av processvatten vid energiproduktionsanläggningar". Värmeforskrapport nr 434. Maj 1992.
27. Ramsbäck B.: "Membranteknik vid olika anläggningar". Värmeforskrapport nr 473. Juni 1993.

28. Hellman Mats.: "Avgasning av spädvatten med membranteknik". Värmeforskrappport nr 523. December 1994.
29. Pehrsson S.: "Provtagning med membranteknik som anrikningsmetod samt framställning av ultrarent vatten för analysändamål". Värmeforskrappport nr 581. Augusti 1996.
30. Falk I.: "Alkalisering av ånga och kondensat". Värmeforskrappport nr 503. April 1994.
31. Falk I.: "Alkalisering av ånga och kondensat med butanolamin och hydrazin". Värmeforskrappport nr 571. April 1996.
32. Tavast J.: "Skademekanismer i värmekondensorer". Värmeforskrappport nr 500. April 1994.
33. Tavast J.: "Korrosionsutmattning i ångturbinskovlar – Erfarenheter, inverkan och möjliga åtgärder". Värmeforskrappport nr 595. April 1994.
34. Falk I.: "Termisk stabilitet hos köldmedierna R22 och R134a". Värmeforskrappport nr 451. November 1992.
35. Wik A.: "Köldmedieläckageövervakning med hjälp av akustisk emission" Värmeforskrappport nr 511. April 1994.
36. Falk I.: "Korrosion i turbin- och kondensatsystem – Termisk stabilitet hos organiska tillsatsmedel". Värmeforskrappport nr 617.
37. Wik A.: "An Expert System for Cycle Chemistry Monitoring". Int. Water Conference, Pittsburgh, PA. 1993.
38. Wik A.: "Membrane Applications in the Power Industry". Membrane Technology Seminar, LTH, Lund. 1993.
39. Wik A. Bredhe K.: "Hot Corrosion in a Water Injected Gas Turbine". CORROSION'93, paper no 229. NACE, Houston, TX. 1993.
40. Wik A. Tavast J.: "Field test of with 15-5 PH Steel LP Turbine Blades". 4<sup>th</sup> Int. Charles Parsons Turbine Conference. The Institute of Materials, London, UK. 1997.
41. Arvidsson L-G. Wik A.: "Stjärnvik kraftstation, från malpåse till baslast" Matarvattenssymposium 1996.