



Skeppet Vasas kemi: Ett halvt sekel av naturvetenskaplig forskning

Per Fors

Regalskeppet *Vasa*, som förläste under sin jungfrufärd år 1628, är idag ett av Sveriges viktigaste och mest intressanta museiföremål. *Vasa* bärgades år 1961 och ansågs fullt konserverad år 1990, då hon flyttats in i det nuvarande museet. Efter den omåttligt regniga sommaren år 2000 började gulvita fällningar att synas på skeppets skrov och på flera av de tillhörande träföremålen. Oron över skeppets skick startade ett massivt medialt pådrag. Detta skulle bli starten för tre mycket omfattande naturvetenskapliga projekt som har bidragit med nya insikter inom kemi, mekanik och mikrobiologi. Forskningsresultaten från dessa projekt skulle visa sig vara relevanta inte bara för *Vasa*, utan för många andra vrak som *Mary Rose* i Portsmouth, England och *Batavia* i Freemantle, Australien. Vasamuseet var det första maritima museet i världen att initiera ett naturvetenskapligt forskningsprojekt av den här magnituden och en stor del av det arbete som bedrivits inom ramen för projekten har varit världsledande. Denna artikel redogör för den naturvetenskapliga forskning som har bedrivits kring *Vasa* sedan hon togs upp och försöker beskriva de problem

Per Fors är doktorand på avdelningen för Industriell Teknik vid Uppsala Universitet. Förutom att studera skeppet *Vasa* och de projekt som bedrivits inom ramen för bevarandet av skeppet, har han studerat kunskapsproduktion i form av innovationsprocesser mellan forskare, universitet och företag.

forskarna och konservatorerna stått inför genom åren. Artikelns huvudsakliga fokus ligger på den intensifiering av forskningen som skedde efter den blöta sommaren år 2000.

Trots fjorton år av intensiva studier av skeppets kemi är forskarna ännu inte överens om vilka processer som faktiskt låg till grund för utfällningarna och huruvida dessa processer är aktiva idag. Tidvis har projekten karaktäriserats av ett stort mått av ovisshet och motstridiga teorier, och detta i betydligt större utsträckning än andra konventionella kemi- och mekanikprojekt. Anledningarna till denna ovisshet beror dels på att vattendränkt ekträ är ett mycket heterogent och komplext material, dels på att forskarna inte har kunnat ta tillräckligt många prover ur skeppet för att bevisa sina teorier. Förutom dessa rent metodologiska problem har projektens mycket prestigefulla natur ibland bidragit till viss oenighet mellan de forskarlag som varit delaktiga, vilket ytterligare försvårat processen. Studien har genomförts genom intervjuer med majoriteten av de forskare som varit aktiva inom området de senaste femton åren, samt genom artikel-, arkiv- och protokollstudier.

Legenden om *Vasa* föds

Regalskeppet *Vasa* beställdes år 1625 av kung Gustav II Adolf och skulle bli en viktig tillgång i det pågående kriget mot Sigismund av Polen, där herraväldet över Östersjön var av största vikt. Den svenska flottan bestod vid den här tiden av ungefär 30 större skepp samt en del mindre fartyg, främst galärer och pinasser.¹ De senaste åtta åren hade varit extremt svåra för den svenska flottan, då minst fjorton skepp hade förlist eller övertagits av fienden. Det var alltså mycket viktigt att *Vasa*, som var ett av fyra skepp av en helt ny klass, kunde användas i strid så fort som möjligt. *Kronan*, *Äpplet* och *Scepter* var de tre andra förutom *Vasa* som var utrustade med två batteridäck och 24-pundiga kanoner, till skillnad från de flesta andra skepp i flottan vid den här tiden, som endast hade ett batteridäck. Det betydde att *Vasa* skulle bli ett av de största skeppen hittills att användas i krig.

Vid byggandet av *Vasa* användes, förutom olika sorters trämaterial till skrovet och dess mycket storslagna utsmyckningar, hampa och lingarn till seglen och järn till de tusentals bultar som tillsammans med trädymlingar höll ihop skrovet. Även stora mängder brons användes för de 64 kanoner som skeppet var bestyckat med.² Av furuplankor, som var lätta men ändå mycket hållbara, byggde man delar av underdäck. Gran användes till master och av al tillverkades pumpstockar, eftersom träslaget lämpar sig bra i våta förhållanden. Lind är lätt att forma och passade utmärkt att snida många av de skulpturer som bidrog till skeppets prakt och storslagenhet. Eftersom skeppet skulle användas i krig valde man att tillverka det massiva skrovet och andra hårt utsatta delar av ek, som var bland de hårdaste trämaterial som fanns tillgängliga. De ekar som användes vid byggandet importerades främst från Riga och Königsberg.³

Den 10 augusti 1628 avseglade *Vasa* från Logården nedanför slottet i Stockholm mot Älvsnabben i skärgården för att hämta upp besättning och proviant. Härifrån skulle hon vidare mot antingen Danzig eller Stralsund. Som bekant nådde hon aldrig målet utan kantrade utanför Beckholmen bara cirka 1300 meter från Skeppsbron. Nederlaget var ett faktum och även om majoriteten av besättningen överlevde katastrofen, var det många som miste livet.

Lokalisering och bärgning

Vid tidpunkten för katastrofen fanns knappast de resurser och den teknik som krävdes för att bärga skeppet i sin helhet, men eftersom skeppet och dess föremål var mycket värdefulla gjordes ändå flera bärgningsförsök strax efter olyckan. Dessa försök kunde man fortfarande se spår av vid den slutliga bärgningen år 1961 i form av ankare som satt fast i skrovet. Länge trodde man att dessa ankare var ett resultat av att andra skepp fastnat i *Vasa*, men i själva verket är de spår efter den tidens bärgningsteknik som gick ut på att ett stort antal ankare fästes i skeppets skrov, med avsikt att lyfta det från botten med hjälp av två eller flera bärgningsskepp.⁴ Trots bristfällig bärgningsteknik lyckades Hans Albrecht von Treleben med hjälp av stora tänger och dykarklockor runt år 1660 med bedriften att bärga en stor del

av de värdefulla kanoner som fanns ombord. Dock hade man givit upp tanken på att bärga själva skrovet, dels på grund av tidigare misslyckanden, dels då skeppets trä vid det här laget ändå skulle ha varit för nedbrutet för att kunna användas i strid.

De nästkommande 300 åren låg *Vasa* mer eller mindre orörd på botten av Stockholms ström, men inte bortglömd. Enligt Cederlund gjordes minst fem bärgningsförsök innan man till slut lyckades.⁵ Särskilt intressant blev skeppet efter år 1839 då Anton Ludvig Fahnehjelm introducerade tekniken att dyka med dräkt i Sverige, och kort därefter lyckades återlokalisera skeppet. *Vasa* ansågs värdefullt främst då man trodde att kanonerna fortfarande fanns kvar, samtidigt som det rent historiskt var ett mycket intressant objekt. Dessutom var man också ute efter det vattendränkta ekträ som många av de sjunkna skeppen från den här tiden bestod av, s.k. svartek. Svartek används t.ex. för att tillverka exklusiva möbler och andra inredningsdetaljer och är därför mycket värdefullt. Andra gamla örlogsskepp, till exempel *Riksäpplet*, blev utsatt för den här typen av lyckade bärgningsförsök flera gånger, medan *Vasa* som tur var klarade sig.

Under tidigt 1950-tal började ingenjören Anders Franzén återigen söka efter skeppet. Genom att leta i arkiv efter kartor och rapporter, upptäckte han en särskilt intressant upphöjning på botten utanför Beckholmen. Franzén kontaktade då örlogsvärkets dykeriförman Per Edvin Fälting som blev indragen i sökandet. De började dragga med ett särskilt lod vid upphöjningen som Franzén funnit. Efter att ha dragit upp ”rostiga järnspisar, och damcyklar, julgranar, döda katter och mycket annat”⁶ började de äntligen få upp delar av den välkända svarteken. Skeppet var återfunnet och den här gången skulle bärgningen lyckas.

Avgörande för bärgningsprojektet skulle bli att flottan lät sina tungdykare öva på fyndplatsen där *Vasa* låg och förbereda bärgningen. Bärgningsföretaget Neptun ställde också helt kostnadsfritt upp med pontoner och annan nödvändig utrustning. Den första stora insatsen skedde på hösten år 1956, då bärgningen av den undre delen av förmasten skedde. Vid den här tiden trodde man dock att det var huvudmasten man bärgade, och skeppet beräknades därmed vara något mindre än vad det egentligen var. Det skulle senare visa sig att skeppet var över 60 meter långt och hade vägt nästan 1300 ton. Skeppet var visserligen mindre än vissa andra 1600-talskepp in-

ternationellt, men för ett svenskt örlogsskepp var det stort och framförallt – skulle det visa sig – mycket välbehållet.⁷

De nästkommande fem åren arbetade man intensivt med bärgningen. De sex tunnlarna, vardera 20 meter långa, där stålkablar mellan pontonerna skulle löpa, blev klara år 1959. Anledningen till att det tog så lång tid berodde på att sikten på 32 meters djup där hon låg var mycket dålig, och dykarna kunde endast se en knapp halvmeter i det grumliga vattnet. Samtidigt var det en mycket farlig operation, då man befarade att skrovet kunde öppna sig och begrava dykarna mellan stenbarlasten och lerbotten. Den 20 augusti 1959 började skeppet lyftas mot ytan. De båda pontonerna *Oden* och *Frigg* stod förankrade på varsin sida om skeppet, och grova stålvastrar drogs mellan pontonerna genom tunnlarna. Eftersom ett skepp av den här storleken aldrig hade bärgats tidigare, visste man inte om träet skulle hålla för skeppets egenvikt. Ett annat problem var att leran höll kvar skrovet på botten med en betydande kraft.

Klockan tolv på dagen började pontonerna att lyfta skrovet mot ytan. Fyra timmar senare var hon fri från lerans grepp och började i etapper att bogseras mot stranden vid Kastellholmsviken. Där låg hon på 20 meters djup i ett och ett halvt år medan nya bultar ersatte de ursprungliga som vid det här laget hade rostat bort. Man ville också se till att skeppet var så lätt som möjligt, eftersom hon skulle behöva flyta en kort sträcka efter bärgningen. *Vasa* befriades därför från mycket av det tunga bråte som hamnat över henne vid diverse båtreparationer och vid byggandet av hamnen.

Morgonen den 24 april 1961 visade sig den första relingsstötten, och långsamt höjdes även resten av skeppet ur vattnet. De första som steg ombord på skeppet var Franzén och Fälting, som beskrev känslan att stiga ombord på det över tre hundra år gamla skeppet som fantastisk, men något som de hela tiden trott starkt på skulle inträffa.⁸ Med hjälp av de pumpar som installerats i skrovet fick skeppet tillräcklig flytkraft för att kunna bogseras in i dockan där skeppets skulle undersökas arkeologiskt.



Anders Franzén ombord Vasa för första gången. Foto: Gösta Glase, IMS.

Konservering

Trots att skeppet var i mycket gott skick efter att ha legat under vatten så länge, kunde man inte vara säker på hur det skulle klara sig på land. De ytor som hade varit täckta av lera var välbehållna, medan ytor som inte hade haft samma skydd var något nedbrutna. Forskarna under den här tiden trodde att nedbrytningen av träet berodde på närvaron av svamparter, s.k. mögelröta, som trivs bra under vatten. Däremot hade man aldrig tidigare sett att den här typen av svamp skulle bryta ner virke i någon större utsträckning, och teorin tedde sig således något osannolik.⁹ Vissa trodde istället att vattnet kunde slita på träet och att anledningen till den goda kvaliteten på de lertäckta delarna berodde på att vattnet inte hade kommit åt lika bra där.

En annan iakttagelse som man inte lade särskilt stor vikt vid då men som idag är av stort intresse, var att träet är mycket järnrikt. Där bortrostade järnförband och bultar hade suttit och där kanonkulor hade legat, var järnhalten cirka 0,2 procent, medan halten järn i resten av skrovet var 0,01 procent.¹⁰ De mest järnrika ytorna bedömdes vara minst nedbrutna. Detta tydde på att nedbrytningen inte enbart skett på grund av vattnet, utan att någon annan mekanism troligen låg bakom. Om det nu var mögelröta som hade angripit skeppet, så hade den höga järnhalten troligtvis skyddat träet från den.

Nedbrytningen hade gjort att mycket vatten hade trängt in i träet. På vissa ställen utgjordes mellan 150 och 800 viktprocent av vatten. Om träet tilläts torka skulle det innebära att det skulle krympa, spricka och deformeras. Provstycken som hade fått torka okontrollerat hade krympt med upp till 15 procent. Under bärgningen och under tiden i torrdockan såg man därför till att hela tiden spola vatten på de delar som befann sig i luften. Enligt chefskonservator Lars Barkman var den största utmaningen vid den här tiden just att motverka denna krympning.

Konserveringen av *Vasa* skulle bli en stor utmaning, då skrovets yta uppmättes till 15 000 kvadratmeter och vikten i vått tillstånd var närmare 2000 ton. Något så stort föremål hade aldrig konserverats tidigare och åsikterna om hur det skulle gå till skiljde sig avsevärt. Vissa ansåg att *Vasa* inte skulle behöva någon konservering, då hon var av kärnek, medan andra

ansåg att det var ute med skeppet; hon skulle förvandlas till ett spjälstaket oavsett behandling.¹¹ Innan någon konserveringsmetod valts var det många som kom med förslag på hur skeppets konservering skulle gå till. Vissa föreslog hemgjorda kemikalier som skulle hjälpa mot "allt" medan andra ansåg att man skulle sluta "titta i mikroskop och börja konservera!"¹² Metoder som testades utan tillfredsställande resultat var t.ex. att behandla träet med ett bakteriedödande arsenikpreparat eller med metylcellulosa, dvs. cellulosa som upphettats med lut.

Till det nyligen inrättade Konserveringsrådet hörde konservator Rolf Morén, som var specialist på impregnering av trä. Morén föreslog att ett preparat som Bertil Centerwall på skogsindustrikoncernen Mo och Domsjö AB tagit fram, polyetylenglykol (PEG), skulle kunna fungera som konserveringsmedel. PEG är en polymer med kedjestruktur som beroende på molmassa kan vara trögflytande till vaxartad fast vid rumstemperatur.¹³ Vid relativt låg molmassa, då molekyllängderna är korta, liknar PEG i många avseenden vatten vilket var önskvärt då det skulle ersätta vattnet i träet. Till skillnad från vatten dunstar dock inte PEG, utan stannar kvar och ser till att träet behåller sin ursprungliga form. PEG var inte giftigt som det tidigare föreslagna arsenikpreparatet och verkade sugas upp bättre av träet än metylcellulosan. Efter metodtester på paneler av vattendränkt arkeologiskt trä bestämdes det att skrovet skulle sprutas med PEG löst i vatten, medan mindre träföremål skulle placeras i stora tankar med PEG-lösning. Även om resultaten av metodtesterna såg lovande ut gick det inte att veta hur det skulle fungera för skeppets fulla skala och struktur.

För att förhindra eventuella mikrobiologiska angrepp och för att neutralisera träets surhet tillsattes borsyra i PEG-lösningen. Anledningen var att man gjort parallellförsök i bad med respektive utan denna fungicid och kunde se att stora mängder mikroorganismer började växa i badet utan fungicid.¹⁴ Även denna metod var vid tillfället för konserveringen obeprövad. Besprutningen av skeppet gjordes manuellt fram till år 1965 då en automatiserad anordning introducerades. Medan skeppet besprutades stod det uppställt i det tillfälliga museet Wasavarvet som byggdes mellan åren 1958 och 1961. Nyfikna stockholmare stod ofta utanför varvet och tittade in på skeppet, som saknade både däck och master. De som vågade kunde även gå in i byggnaden och beskåda själva konserveringen på nära håll. Det



Vasa besprutas med PEG-lösning i Wasavarvet år 1970. Foto: Roger Wollstadt.

var dock inte riskfritt, en dimma av konserveringslösning låg hela tiden i luften vilket gjorde det svårt att andas och halt att gå runt på de provisoriska ställningar som omgav skeppet.

Behandlingen av *Vasa* pågick i totalt 17 år. Från politiskt håll kom påtryckningar att avsluta besprutningen och börja fokusera på att färdigställa skeppet för utställning. Att bärga och konservera skeppet hade kostat mycket pengar och för att den verksamheten skulle anses ekonomiskt försvarbar, gällde det att tjäna in pengarna man hade spenderat genom att kunna visa upp skeppet för betalande besökare. Barkman menade dock att skeppet inte var fullt konserverat, och att polyetylenglykolen inte hade trängt in tillräckligt långt i de kraftiga ekplankorna. Den åsikten tog man inte hänsyn till från myndighetshåll, vilket resulterade i att chefskonserveratorn avgick i protest år 1978, ett år innan skeppet skulle börja sin tio år långa torkningsprocess. Tillträdde gjorde istället kemisten Birgitta Håfors som anställdes 1961 när museet insåg att de behövde kemisk kompetens. Hon hade vid det här laget byggt upp en avsevärd kunskap om konserveringsmedlet och konserveringsprocessen, och har varit en av nyckelpersonerna för bevarandet.

Håfors förstod också att skeppet inte var helt konserverat. Vid det här laget hade man tagit ett tusental borrprover från olika delar av skeppet och man kunde tydligt se att konserveringsmedlet inte fyllt upp träet helt längre in än några centimeter från ytan. Anledningen till det var främst att man hade använt PEG med för hög molvikt tidigt i konserveringsprocessen. De långa och otympliga PEG-kedjorna fastnade i ytan av träet och hindrade de kortare från att diffundera in längre. Samtidigt visade det sig att det bakteriedödande medlet, borsyran, bidrog till minskad löslighet, vilket ytterligare försvårade processen.¹⁵

Under konserveringsperioden hade alternativen för var och hur skeppet skulle placeras utretts. Redan år 1971 blev det bestämt att ett museum skulle byggas någonstans på Galärvarvet på Djurgården. Tio år senare bestämdes museets utseende och exakta placering med hjälp av en arkitekttävling som vanns av Månsson & Dahlbäck Arkitektkontor. Utförandet var inte det mest spektakulära men ansågs vara mycket funktionellt, eftersom byggnaden står rakt över Stockholms örlogsvarvs stora torrdocka, i vilken *Vasa* nu vilar. År 1986 påbörjades bygget av Vasamuseet som invigdes år 1990.

Överraskande fläckar drabbar *Vasa*

Det dröjde tio år innan effekterna av den något bristfälliga konserveringen skulle visa sig. Sommaren år 2000 var mycket regnig och besökstrycket på Stockholms museer var stort, inte minst på Vasamuseet. Många dagar uppgick antalet besökare till 6 000-7 000, och timslånga köer av genomblöta besökare ringlade utanför museet på södra Djurgården. Trots den goda publiktillströmningen var detta oroande för många av de som arbetade på museet. Klimatanläggningen, som skulle hålla luftfuktigheten runt 60 procent året om, klarade inte av det extremt fuktiga förhållandet i museet. Även om nivåerna i regel var något högre under sommarhalvåret, uppgick luftfuktigheten nu till över 70 procent.¹⁶ När luftfuktigheten ökar suger det torra träet till sig stora mängder vatten. Detta skulle kunna innebära att bärigheten i träet minskar och vattenlösliga komponenter förflyttas. Att luftfuktigheten skulle bli för hög var inte särskilt oroande vid installationen

av klimatsystemet. Det viktiga var då snarare att luftfuktigheten inte var för låg, eftersom träet riskerade att krympa och spricka om det blev för torrt.

När hösten kom visade sig konsekvenserna av sommarens instabila förhållanden. Ingrid Hall-Roth, dåvarande chefskonservator, och konserveringstekniker Ove Olsen var två av de som upptäckte symptomen först. På flera platser både inuti och utanpå skrovet började fläckar synas. Vissa fällningar var vita, andra gulaktiga och flera av dem skimrade av kristaller. Fläckarna varierade storleksmässigt mellan ett par centimeter i diameter till flera decimeter, och hade ett mycket lågt pH-värde jämfört med obe-fläckade delar av skeppet, på vissa ställen så lågt som 1.¹⁷ Det verkade som att den varierande luftfuktigheten medfört en ökad transport av fukt genom materialet, något som i sin tur hade startat eller förstärkt en eller flera okända processer i träet.

Nya fällningar upptäcktes i princip varje dag och konserveringsrådet började omedelbart diskutera eventuella åtgärder.¹⁸ Trots att man inte hade någon aning om vad som faktiskt hände i skeppet diskuterade man på konserveringsrådsmötet den 8 september år 2000 huruvida klimatsystemet i visningshallen skulle bytas ut. Oavsett vad det är som händer med skeppet, kan det instabila klimatet ha varit en bidragande faktor. Konservatorn Tom Sandström meddelade på samma möte att börvärdet för den relativa luftfuktigheten i hallen hade överskridits med nästan tio procentenheter under åtminstone en fjortondagarsperiod under sommaren.¹⁹ När konserveringen ansågs färdig hade man gjort sig av med all då överflödiga kemisk kompetens och laboratorierna på Beckholmen som byggdes i och med bärgningen av skeppet hade lagts ned. Museiledningen insåg därmed att de var tvungna att ta in extern hjälp för att kunna lösa mysteriet.

Forskningen initieras

I februari år 2001 kallade dåvarande chefskonservator Ingrid Hall-Roth och ordföranden för Konserveringsrådet Björn Varenius till ett krismöte på Vasamuseet. Ett tjugotal experter kallades, dels forskare från Sverige, dels forskare och konservatorer från Danmark, Australien och England, och un-

dersökningarna av träets kemi kunde börja. Magnus Sandström, professor i strukturkemi på Stockholms Universitet och Ingmar Persson, professor i kemi på Sveriges Lantbruksuniversitet, blev snabbt två av nyckelpersonerna. Det ansågs brådskande att utreda vad fällningarna bestod av, om de var skadliga för träet samt om det gick att neutralisera eller stoppa de processer som uppenbarligen skedde eller hade skett.

Den kemiska sammansättningen av fällningarna analyserades parallellt av Sandström och Persson. Sandström hade kontakter vid universitetet i Stanford, där en av världens största synkrotroner finns. Synkrotronstrålning i röntgenområdet användes för svavelspecificering av krossade borrhärnor som tagits från skeppet, eftersom man sedan tidigare visste att sulfatsalter hade utsöndrats från skrovet, fast i betydligt mindre skala. Persson gjorde tillsammans med Ulrik Gelius vid Uppsala Universitet motsvarande analyser med hjälp av ESCA (Electron Spectroscopy for Chemical Analysis), som är användbar för kemiska prover. Resultaten av Sandströms och Perssons analyser var mycket oroväckande.

I juni år 2001 presenterade bland andra Sandström och Persson en artikel vid en konferens i Stockholm, som byggde på resultaten från dessa tester.²⁰ Artikeln beskriver väl synen på problemet i början av 2000-talet, samt vilka åtgärder som man antog skulle behöva tas för att rädda skeppet. De kunde visa att borrhärnorna som tagits från skrovet mycket riktigt innehöll stora mängder reducerade svavelföreningar, vilket tydde på att någon sorts kemisk reaktion hade skett i trävirket. På vissa ställen var svavelhalten så hög att den uppmättes till åtskilliga viktsprocent av träet. Själva fällningarna bestod av sulfatsalter, men lite längre in i träet fanns fortfarande en stor mängd elementärt svavel som potentiellt skulle kunna oxideras. En sådan reaktion skulle kunna innebära att materialet expanderade, vilket i sin tur kunde leda till sprickbildning. Den absolut största farhågan var dock att svavelsyra skulle kunna bildas. Den var med all säkerhet sur nog för att bryta ned både konserveringsmedlet PEG och träets cellulosa-fibrer. Enligt beräkningar skulle mellan fem och sex ton svavelsyra kunna bildas av det svavel som fanns i skeppet. Man antog att om svavelsyra i så stora mängder skulle bildas, skulle skeppets skrov vara helt nedbrutet inom en överskådlig framtid.

Närvaron av järn var också en viktig fråga, inte främst för att järn i sig

antagligen var skadligt för träet, utan för att järn skulle kunna fungera som en katalysator vid oxidationen av svavlet. Närvaron av järn berodde på att de hundratals järnbultar och förband som användes vid byggandet av skeppet hade rostat sönder. Även om järnhalten var särskilt hög nära bortrostade bultar och förband, hade joner spridit sig till resten av skrovet. När järnjoner kommer i kontakt med svavelväte kan pyrit, ofta kallat kattguld, bildas. Pyriten kan i sin tur reagera med syre och vatten och bilda svavelsyra. I ett protokoll från konserveringsrådsmötet den 24 augusti 2001 kan man dock läsa att "det är svavlet som är problemet i *Vasas* skrov – inte järnet".²¹

En rad åtgärder som kunde tas för att lösa detta till synes mycket allvarliga problem presenterades också i samma artikel. För det första måste klimatanläggningen, som förvisso var framtagen för att hålla en jämn luftfuktighet, bytas. Hotet att luften skulle bli för torr, vilket skulle resultera i sprickbildningar i skrovet, var nu inte lika relevant. Istället för att hålla en konstant luftfuktighet på 60 procent, föreslog man en sänkning till 55 procent. Det skulle sannolikt inte stoppa de processer som pågick men kraftigt reducera deras hastighet. Ju mindre vatten som fanns tillgängligt i luften, desto mindre svavelsyra skulle kunna bildas, enligt forskarna.²²

Eftersom järnet kunde spela en roll i oxidationsprocessen, ansåg man också att det var viktigt att försöka få bort så mycket som möjligt av det ifrån träet. Det kunde göras genom att behandla ytorna med s.k. kelatbildare, kemikalier som kunde binda järnet och på så vis få ut det ur träet. Dessa kelatbildare skulle även höja pH-värdet något, men på de allra suraste delarna av skrovet ansåg man att det krävdes mer drastiska åtgärder för att neutralisera surheten. Många sura, ytliga sulfatsalter kunde tas bort genom att tvätta ytan med natriumvätekarbonat löst i en blandning av vatten och PEG. Detta arbete började genast eftersom det var relativt enkelt att utföra. Resultat från tester av ytbehandlingen presenterades på ett konserveringsrådsmöte den 24 augusti 2001, där man slåg fast att behandlingen verkade fungera.²³ De långsiktiga effekterna av denna behandling var dock fortfarande oklara, och metoden övergavs senare eftersom stora mängder vatten tillförs trävirket.

Eftersom mycket fortfarande var osäkert behövdes mer forskning. Hitills hade några forskare redan börjat engagera sig, men det fanns fler as-

pekter av problemet som inte hade börjat undersökas. För att ha råd med detta behövdes pengar och rätt kompetens. Museet hade som bekant ingen intern kemisk kompetens, men däremot goda kontakter för forskningsfinansiering. År 2001, när museet och forskarna tillsammans börjat skissa på en projektplan, ansågs projektet för löst definierat och för tvärvetenskapligt för de flesta forskningsfinansiärer. Två år senare däremot, år 2003, när en del mycket framstående forskning redan bedrivits inom ramen för skeppets träkemiska status, lyckades man få ihop tillräckligt mycket pengar för att starta det första officiella forskningsprojektet, *Bevara Vasa*. En viktig anledning till detta var att Sandström med flera hade fått en artikel om skeppets kemiska skick publicerad i *Nature*, en av världens mest ansedda tidskrifter.²⁴ I och med denna extremt inflytelserika publikation förvandlades synen på problemet. Från att ha varit en samling antaganden från en mycket kort forskningsprocess med få undersökta prover, blev nu svavelsyreteorin ett vetenskapligt faktum, något som senare skulle visa sig mycket svårt att försöka motbevisa.

Bevara Vasa

I det första kemiprojektet, *Bevara Vasa*, var det övergripande syftet att "stoppa den pågående förstörelsen av *Vasa*", vilket tydde på att man antog att skeppet var på väg att brytas ned.²⁵ För att lyckas med det var det viktigt att fastställa vilka processer som orsakade nedbrytningen och hur dessa skulle stoppas. Dessutom skulle metoder för att avlägsna svavelsyran som bildats anvisas. Projektet syftade också till att få mer kunskap om järnets roll i matrisen, samt eventuellt avlägsna eller inaktivera även det. Stabiliteten och den eventuella nedbrytningen av PEG skulle också undersökas, samt möjligheterna att stärka konserveringsskyddet. Förutom dessa rent kemiska åtgärder, skulle projektet även utreda om mikrobiologiska processer pågick i trävirket.²⁶

För de forskare som redan var delaktiga i forskningen kring skeppet var det oerhört viktigt att se till att just de fick ta del av pengarna som nu kommit in. Både Sandström och Persson hade anställt doktorander som var beroende av extern finansiering. Yvonne Fors, Sandströms doktorand, hade kommit in mycket tidigt i processen och arbetat med att kartlägga och för-

söka neutralisera de fällningar som uppkommit redan innan och under sitt examensarbete i biokemi. Perssons doktorand Gunnar Almkvist hade varit delaktig i forskningen 2001-2003 men behövde finansieringen för att kunna påbörja sin doktorandtjänst. Fokus för Almkvist var hur de järnföreningar som fanns i skeppet påverkade träet, samt hur dessa eventuellt skulle kunna tas bort från träet utan att skada materialet.

För att hitta rätt vetenskaplig kompetens utöver Persson och Sandström skulle det i enighet med forskningsfinansiärernas direktiv ske en öppen, internationell utlysning av projektansökningar, som sedan skulle granskas av ett oberoende expertråd. Rådet skulle bestå av ett antal experter inom relevanta områden som konservering, kemi och mikrobiologi. I början av år 2003 hade sex personer, främst forskare från Sverige och Tyskland, tackat ja till att ingå i expertrådet. Deras uppgift var att se till att finansiärernas pengar hamnade hos de forskarlag som de ansåg hade störst möjlighet att bedriva forskning av hög kvalitet som hade relevans för skeppets bevarande. Av tolv inkomna ansökningar valdes sex delprojekt enligt tabellen nedan (tabell 1).

Från museets sida tillsattes i juni 2003 även en koordinator som skulle vara länken mellan museet och forskarna. Den rollen erhöll Lars Ivar Elding som var professor emeritus i kemi vid Lunds Universitet och bl.a. hade forskat om metallkatalyserade svaveloxidationer och hade lång erfarenhet från forskningsråd och storinstitutioner. Tillsättandet av Elding innebar ett skifte i hur forskningen på skeppet styrdes, eftersom museet nu hade tillgång till naturvetenskaplig kompetens internt. *Bevara Vasa* hade en budget på 8 miljoner kronor och planerades löpa över fyra år.²⁷ Efter diskussioner bestämde man sig emellertid för att försöka använda pengarna mer effektivt och därmed korta ner projektet till tre år. Projektet delades upp i två faser om 18 månader och efter varje fas skulle en utvärdering göras för att veta exakt vad som skulle prioriteras i nästa fas.

Ansvarig forskare	Institution/organisation	Huvudsakligt fokus
Magnus Sandström	Stockholms Universitet	Kartlägga den kemiska sammansättningen av järn- och svavelföreningar i skrovet.
Ingmar Persson	Sveriges Lantbruksuniversitet	Undersöka järnets roll i trämatrisen och utveckla metoder för att inaktivera eller avlägsna järnet.
Jens Glastrup	Danmarks Nationalmuseum	Kartlägga fördelningen av PEG samt undersöka eventuellt sönderfall av PEG.
Thomas Nilsson	Sveriges Lantbruksuniversitet	Undersöka förekomsten av mikroorganismer i skrovet (endast fas 1). Analysera nedbrytningen av cellulosa samt andra träreenskaper (endast fas 2).
Rod Eaton	University of Portsmouth	Undersöka förekomsten av mikroorganismer i skrovet (endast fas 1).
Magnus Wålinder	SP Träteck Stockholm	Analyser av träreenskaper (främst fas 1). Projektet stött av medel för ny stödvägga.
Tommy Iversen	STFI Packforsk AB	Analyser av träreenskaper (främst fas 2).

Tabell 1. Forskarlagen under Bevara Vasa.

Framsteg under *Bevara Vasa*

Sandströms forskarlag började med att jämföra prover från *Vasa* med prover från andra vrak, främst från *Mary Rose* som bärgades år 1982 och var i konserveringsstadiet, men också från *Bremerkoggen*, *Batavia* och *Kronan*. De kunde se att det fanns både svavel och järn i de flesta av dessa skepp. Vissa av dem hade svavel rakt igenom, medan andra, bland dessa *Vasa*, bara hade problem med svavel i ytskiktet. *Bremerkoggen*, som legat i sötvatten och byggdes så tidigt som på 1380-talet, verkade däremot inte ha samma problem med svavelföreningar i skrovet.²⁸ Det visade sig att skepp som legat i salt eller bräckt vatten under relativt syrefria förhållanden innehöll svavel. Fors ansåg att om man visste hur svavlet hade tagit sig in i skeppet, kanske man också kunde förstå hur det skulle tas ut igen. Detta visade sig inte vara främst ett kemiskt problem utan snarare ett mikrobiologiskt.

Fors undersökte träytans nedbrytning med hjälp från professor Thomas Nilsson och hans kollega Charlotte Björdal från Sveriges Lantbruksuniversitet. Mycket riktigt hade den inträffat till följd av angrepp av mikroorganismer, s.k. erosionsbakterier, som varit aktiva när skeppet låg i vattnet. Dessa bryter ned cellulosa och hemicellulosa men lämnar kvar ett skelett av träets bindämne, lignin. I och med detta kan vatten fylla upp tomrummen som då skapas, vatten som under århundraden varit mycket svavelrikt på grund av kraftiga föroreningar. Det svavelrika vattnet hade även dragit till sig sulfatreducerande bakterier, en grupp anaeroba bakterier som i sin reduktion av sulfat ofta använder sig av restprodukter från andra bakteriegrupperns nedbrytningsprocesser. Forskarna kunde se att dessa sulfatreducerande bakterier troligtvis också vandrat in i skrovet, efter erosionsbakterierna. Bakterierna hade där börjat reducera sulfatjoner till svavelväte. Förutom dessa insikter kunde Sandström och Fors även konstatera att svavlet framförallt var ett ytligt problem. De yttersta centimetrarna av träet innehöll en stor mängd svavel i olika former, medan resten av skrovet verkade rent från dessa föreningar. Samma verkade gälla för de andra undersökta vraken – i de fall där skroven var svårt mikrobiologiskt nedbrutna var svavelhalten hög.

Forskarlaget från Portsmouth, med Rod Eaton som huvudman, hade ett nära samarbete med Nilsson och Björdal på SLU. Även om skeppet anta-

gligen var för torrt för mikroorganismer, ansåg man att det fanns en viss risk att dessa ändå var aktiva i skrovet, och att de kunde spela en viss roll för bildningen av svavelsyra. Forskarlaget från Portsmouth lyckades hitta tecken på stor mikrobiologisk aktivitet i träet,²⁹ något som dock senare visade sig vara ett resultat av ett kontaminerat prov eller en felaktig bedömning. Ytan av skeppet är full av sporer och liv men det visade sig ganska snabbt att trävirkets inre var helt sterilt, vilket också ledde till att detta delprojekt kunde avvecklas efter projektets första fas.

Nilsson och Björdal var synnerligen kompetenta inom såväl mikrobiologi som inom området för trämaterial. Däremot saknade de den tekniska utrustning som krävdes för många viktiga analyser av materialet. Tommy Iversen vid STFI Packforsk AB och Magnus Wålinder vid dåvarande SP Träteknik kunde däremot utföra dessa avancerade analyser, inte minst SEC (Size Exclusion Chromatography), där olika stora komponenter i ett prov separeras. På så vis går det att se vilka ämnen ett prov består av. Tillsammans med kompletterande mikroskopistudier kunde de se att den biologiska nedbrytningen som skett när skeppet låg under vattnet var begränsad till de yttersta 15 millimetrarna av trämatrisen, vilket förklarade varför svavlet endast hittades i skrovets ytskikt. Däremot såg de tecken på annan sorts nedbrytning av cellulosan längre in i träet, något som varken kunde kopplas till biologiska processer eller svavelnärvaro.³⁰

Persson och Almkvist började på hösten 2003 arbetet med att försöka urlaka järnet från träet. Objekt från skeppet utan historiskt värde donerades av Vasamuseet och kunde användas vid dessa experiment. Persson hade 20 år tidigare arbetat med ett företag i Helsingborg som tillverkade mikronäringsämnen till jordbruket, där en förening som binder järn, en ligand, ingick. Kemikalien EDDHMA var utvecklad för att minska risken för järnbrist hos växter i basiska förhållanden. Dessa växter har svårt att få tillgång till rent järn eftersom järnet oxideras i marken och bildar rost. När en kemikalie med järnbindande egenskaper tillsätts, drar den till sig järnet från rosten i marken så att växten kan ta upp det. Företaget hade sedan länge flyttat och slutat tillverka ämnet, men Persson lyckades övertala dem att tillverka ett mindre parti. När träobjekt som innehöll järn placerades i en behållare med EDDHMA, binder de fria järnjonerna i träet till liganden och försvinner på så vis från träet. Det visade sig dock att metoden var



*Konservator Malin Sahlstedt med träföremål från skeppet i bad med DTPA.
Foto: Anneli Karlsson, SMM.*

mycket tidskrävande för större föremål och troligtvis inte praktiskt genomförbar för hela skeppet.³¹

Däremot såg metoden mycket lovande ut för mindre träföremål som baljor, tunnor och träverktyg. Eftersom EDDHMA krävde höga pH-värden för att vara verksam – något som påverkar träet negativt – byttes kemikalien senare ut mot DTPA. Malin Sahlstedt, konservator på Vasamuseet, fick ansvaret att sköta och övervaka den experimentella järnurlakningen i museets lokaler. Efter urlakningen måste föremålen även omkonserveras, eftersom processen urlakar även konserveringsmedlet PEG.

Ett annat viktigt spår som började studeras av Almkvist var surheten i träet. Eftersom de svavelreducerande bakterierna hade varit verksamma i det nedbrutna ytskiktet av trävirket när *Vasa* låg i vattnet, hade merparten av allt svavel samlats där, något som både Sandströms och Nilssons

forskarlag lagt märke till. Detta svavel hade sedan bidragit till att ytskiktet surnat. Almkvist jämförde surheten på ytan med surheten längre in i träet, och märkte till sin förvåning att pH-värdet minskade ju längre in i träet han mätte.³² Detta var något många andra forskare inte kunde acceptera och flera påstod att Almkvist hade mätt fel. Anledningen till det var att de flesta forskare arbetade utifrån teorin om att svavlet och svavelsyran skulle vara den bidragande faktorn till träets surhet, något som i så fall skulle vara helt felaktigt. Utöver det menade Almkvist att han kunde se tecken på nedbruten PEG längre in i träet, eftersom PEG-molekylerna var kortare där. Jens Glastrup med kollegor menade dock att Almkvist kunde ha fel, och att de korta PEG-molekylerna i träets inre kunde vara ett resultat av att de längre molekyler inte hade möjlighet att diffundera in tillräckligt djupt in i träet. De motstridiga resultaten började tära på projektets sammanhållning, och någon konsensus inom dessa frågor verkade inte kunna nås.

Även om de flesta forskare som hade något att göra med skeppet var kopplade till *Bevara Vasa*, fanns det några oberoende forskare som tidigt fått provbitar från skeppet och forskade självständigt. Ulla Westermark var en av dem. Hon var professor i trämaterialteknik vid Luleå Tekniska Universitet och hade fått tillgång till fyra provbitar som hon utfört vissa försök på. Westermark hade gjort ett antal experiment och menade att det skulle vara konserveringsmedlet PEG som bröt ned träet och bildade myrsyra, en stark organisk syra.³³ Detta skulle enligt Westermark vara anledningen till



Järnurlakning med DTPA.

Foto: Anneli Karlsson, SMM.

att pH-värdet längst in i träet var så lågt. Skeppets hälsa påverkades inte nämnvärt av just svavlet, utan av konserveringsmedlet som hade använts. Många forskare kritiserade hennes metoder och slutsatser, som senare skulle visa sig vara felaktiga. Trots detta gav utspelet ytterligare skäl för forskarna att ompröva sina teorier, något som skulle bidra till viktiga insikter för framtida forskning.

En Framtid för Vasa

Inom ramen för *Bevara Vasa* hade Almqvist tidigt insett att det var något som hade skett långt in i träet, där svavelhalten var låg. Almqvist hade konstaterat att pH-värdet var mycket lägre än vad det borde vara och med hjälp av avancerade analysmetoder hade man sett tecken på nedbruten cellulosa djupt in i de tjocka ekplankorna. Det låga pH-värdet verkade bero på förekomsten av organiska syror i träets inre, något som tyder på att antingen PEG eller cellulosa har brutits ned.³⁴ De organiska syror man hittat, främst oxalsyra och myrsyra, verkade vara restprodukter från denna nedbrytning. Dock hade det danska forskarlaget noterat att konserveringsmedlet inte hade brutits ned nämnvärt, och medellängden på molekyllkedjorna var ungefär densamma som de varit vid konserveringen, vilket skulle tyda på att det var nedbrytning av cellulosa som bildat dessa organiska syror. Glastrup jämförde även med andra skepp och såg att framförallt myrsyra, en stark organisk syra, bildas i PEG-behandlade skepp oavsett svavelhalt. I slutet av detta projekt började mycket tyda på att svavlet kanske inte spelade den avgörande rollen för varken träets surhet eller dess nedbrytning.³⁵ Två mycket viktiga frågor hade man dock inte lyckats besvara än; vilka kemiska processer som pågick och hur snabbt dessa processer gick.

Bevara Vasa avslutades hösten 2006 och utvärderades i december.³⁶ Det var sannolikt det mest omfattande grundforskningsprojekt med inriktning på bevarande av marinarknologiskt material som någonsin utförts. Projektet var tvärvetenskapligt och förutsatte stor samarbetsvilja över ämnesgränserna. Dock ansåg många att detta samarbete ibland fungerade mindre väl. Kanske berodde detta på att de olika forskarna ibland kunde stå långt

ifrån varandra åsiktsmässigt, men också på att delprojektens innehåll i stort bestämdes av de externt utvärderade och i förväg formulerade projektbeskrivningarna. Projektets prestigefulla natur, en vilja att skapa rubriker, och ibland även en bristande samarbetsvilja från flera parter bidrog också till denna situation. Baserat på dessa erfarenheter bestämdes innehållet i En Framtid för Vasa därför av museet i dialog med forskarna, men utan öppet ledigförklarande.³⁷ Därigenom skulle arbetet inriktas bättre på exakt de punkter, som bedömdes gynna bevarandet av skeppet.

Eftersom man insett att problemet inte endast är ett ytligt sådant, utan även verkar i träets inre, fruktade man att materialets mekaniska egenskaper skulle påverkas negativt. Tyngdpunkten för detta projekt låg därför på att försöka förstå sambanden mellan skeppets kemiska tillstånd och dess mekaniska egenskaper. En stor förändring var att Sandströms och Fors forskarlag inte längre var med. De senaste sex åren hade de varit mycket tongivande och inflytelserika, men då man valt att gå ifrån svavelproblematiken och istället fokusera på träets mekaniska egenskaper, ansåg museet att denna forskning inte längre kunde prioriteras. Även Nilsson och Björdals forskarlag uteslöts. Det danska forskarlaget bytte deltagare och fokus flyttades från PEG-studier till syremätningar med en ny ansvarig forskare, som delvis finansierades från danskt håll. På detta sätt kunde undersökningarna av tränedbrytningen intensifieras genom att ett forskarlag från KTH involverades och Tommy Iversen knöts närmare projektet. De forskarlag som var aktiva inom ramen för En Framtid för Vasa presenteras i tabellen nedan (tabell 2).

I september 2008 beviljades museet 10,3 miljoner kronor för den detaljerade forskningsplan som tagits fram av forskningskoordinator Elding.³⁸ En Framtid för Vasa skulle löpa över tre år och medräknat museets tillskott uppgick budgeten till totalt cirka tolv miljoner kronor.³⁹

Ansvarig forskare	Institution/organisation	Huvudsakligt fokus
Ingmar Persson	Sveriges Lantbruksuniversitet	Fortsätta urlaka järn från träföremål samt att genom modellförsök undersöka den kemiska sammansättningen i Vasaträ genom impregnering av färsk ek (en icke-förstörande metod).
Lars Berglund	Kungliga Tekniska Högskolan	Koppla samman träets kemiska sammansättning med dess mekaniska egenskaper.
Henning Matthiesen, Martin Nordvig Mortensen	Danmarks Nationalmuseum	Mäta materialets syrekonsumtion för att kartlägga reaktionshastigheter.
Tommy Iversen	Inventia AB, tidigare STFI Packforsk AB	Undersöka nedbrytning av trä på olika djup.
Monica Ek	Kungliga Tekniska Högskolan	Undersöka nedbrytning av trä på olika djup (endast fas 2).

Tabell 2. Forskarlagen under En Framtid för Vasa.

Framsteg och slutsatser under *En Framtid för Vasa*

För att få reda på vilka kemiska processer som påverkat träet och när i tiden dessa processer skett, arbetade Almkvist mycket med att på kemisk väg simulera *Vasas* trä i laboratorium. Där behandlades färsk ek med en lösning bestående av järnklorid och vatten för att sedan PEG-impregneras. När det impregnerade provet utsattes för syrerika förhållanden startade en nedbrytning som verkade likna den som skett i *Vasas* trä. Prover gjordes också där färsk ek behandlades med järnkloridlösningen men utan att impregneras med PEG. Det verkade då som att PEG gjorde nedbrytningen långsammare, vilket kan tyda på att PEG har en skyddande verkan i den här typen av kemiska processer. Organiska syror, som inte funnits i träet från början, verkade också bildas i proverna. I termer av *Vasaträ* skulle det här betyda att de järnjoner som finns i träet började reagera med syret i luften redan när skrovet bärgades. Denna reaktion har sedan bildat restprodukter i form av starka organiska syror som i sin tur utgör ett hot för träet.

Vilken typ av nedbrytningsprocess som skulle vara den huvudsakliga började diskuteras under *Bevara Vasa* men utan resultat. Hittills har man talat om två olika processer. För det första, s.k. sur hydrolysis där vätejoner attackerar stora molekyler och klyver dem. Då faller cellulosan sönder, vilket bidrar till minskad hållfasthet. Här är oxalsyran i träet den främsta orsaken.⁴⁰ Fria radikalreaktioner är den andra huvudsakliga reaktionen. Den skulle bero på närvaron av järn och syre. I den här typen av reaktioner bildas fria hydroxidradikaler, molekyler med oparade elektroner i den yttersta orbitalen, som är mycket reaktiva.⁴¹ Dessa kan attackera cellulosan och bryta ner den. Almkvist och Persson kunde se att närvaron av järn var viktig för nedbrytningsprocessen, och ansåg att den här typen av nedbrytning antagligen var den huvudsakliga.

De prover som Almkvist impregnerat är inte bara intressanta ur kemisk synvinkel utan även mekanisk. Professor Lars Berglunds doktorand, Ingela Bjurhager, jämförde draghållfastheten i prover från *Vasa* med färsk ek och med de prover som Almkvist impregnerat. Hon ville se hur mycket styrka som hade utarmats från skeppets material i och med nedbrytningen, samt hur PEG och järn påverkade hållfastheten i materialet.⁴² Nilsson och Björ-

dal hade tidigare visat att det inte var någon större skillnad i hållfasthet mellan färsk ek och Vasaträ när prover hade krossats.⁴³ I träets tvärriktningar verkade det dock som att draghållfastheten i träet minskat enligt Bjurhages tester. Detta kunde kopplas till närvaron av PEG, som påverkat träets struktur. I färsk ek är kärnan det område som är starkast, eftersom det alltid är mycket torrt. På de ställen PEG trängt in djupt i *Vasas* skrov hade hållfastheten i tvärriktningarna minskat dramatiskt. Det visade sig också stämman när Bjurhager jämförde med Almkvists prover. I den longitudinella riktningen är hållfastheten också mycket lägre. På platser med mycket järn, starka syror och nedbrutna cellulosa molekyler verkade träet i *Vasa* vara mellan 50 och 60 procent försvagat jämfört med färsk ek.⁴⁴

Forskarlaget från Danmark hade till uppgift att mäta träets syrekonsumtion. Syre är mycket reaktivt och möjliggör ofta olika sorters nedbrytningsprocesser. Trettiofem prover, varav de flesta från *Vasa*, placerades i en miljö med jämn luftfuktighet på 50 procent. En optisk fibersond som mätte syrekonsumtionen i realtid användes. Eftersom sonden skulle mäta konsumerat syre var det viktigt att inget nytt syre tillkom, utan att det fanns en exakt mängd som träet hade tillgång till. Provet placerades därför i lufttäta påsar. Resultatet visade att proverna inte konsumerade särskilt mycket syre, i alla fall inte jämfört med färsk ek.⁴⁵ Oavsett vilken typ av nedbrytning som skedde, verkade den gå relativt långsamt. Utöver detta gjordes experiment som visade på att ett instabilt klimat inte nödvändigtvis betydde att materialet fällde ut sulfatsalter. Detta oväntade resultat antydde att det instabila klimatet i skeppshallen kanske inte var den främsta orsaken till de fällningar som upptäcktes hösten år 2000. Sannolikt är detta en något hastigt dragen slutsats och de flesta, forskare såväl som konservatorer, är överens om att klimatet har och har haft stor betydelse för nedbrytningshastigheten.

Tommy Iversen, Dina Dedic och Monica Ek arbetade också med att försöka fastställa vilka kemiska processer som var de huvudsakliga hoten mot träet. Genom SEC-analyser av cellulosa molvikt i olika delar av träets inre samt kvantifiering av järn- och oxalsyrenehåll lyckades de komma fram till två ytterst kontroversiella slutsatser. Den första var bestämningen av huvudsaklig nedbrytningsprocess. Här gick Iversen, Dedic och Ek emot den etablerade teorin och ansåg att den sura hydrolysen var primär. Utöver

det ansåg de sig kunna se att järnet skyddade träet från nedbrytning, då en negativ korrelation mellan järn och oxalsyra kunde observeras. Detta berodde enligt forskarna på att järn neutraliserade träet genom skapandet av järnoxalat, som skulle kunna skydda träet från oxalsyrans hydrolys.⁴⁶ Efter ytterligare tre år, då forskningen alltmer inriktats mot träets mekaniska egenskaper, var forskarlagan fortfarande i många fall oense om skeppets kemiska status. Huruvida järnet var ett hot eller ett skydd, vilken roll det stabila klimatet spelade för utfällningarna, vilka processer som försiggick i träet, samt hur PEG påverkade träet var några frågor man fortfarande inte hade funnit något svar på.

Elding, som var museets representant och kemisk expert, fick i samråd med den nyligen tillsatta museichefen Marika Hedin bestämma hur museet skulle reagera på de spridda bud forskarna kom med. Hedin ansåg att den kemiska grundforskningen som hade bedrivits av museet de senaste tio åren gav tillräcklig information om skeppets status för tillfället. Hon valde också att lita på Almkvist och Perssons teori, eftersom det verkade mest troligt att järnet faktiskt spelade en negativ roll i sammanhanget. Enligt det danska forskarlaget försiggick ingenting dramatiskt i skeppet, och järnet i skrovet gick inte att extrahera på grund av dess storlek. Istället för att försöka påverka skeppets kemi, låg det nu närmare till hands än någonsin att planera ett nytt projekt som främst fokuserade på skeppets mekaniska egenskaper.

Stötta Vasa

När *Vasa* bärgades ställdes hon först i Gustav V-dockan på Beckholmen där skrovet stöttades med timmer. Tre år senare, år 1964, konstruerades en ny, enkel stödvagga som fortfarande används. Vaggan består av åtta stötor på vardera sidan av skrovet, förbundna med längsgående balkar. *Vasa* står därmed uppställd ungefär som en vanlig segelbåt, på kölblock och med jämn stöttning längs båda sidorna. Under tidigt 1990-tal började man märka av effekterna av den bristfälliga stöttningen. Geodetiska mätningar, alltså positionsmätningar på skeppets skrov, visar att hon sjunker ihop något under sin egen vikt. Denna deformation är ojämn, vilket betyder att

skrovets form hela tiden förändras. I och med de nya kunskaperna om kemiska processer i skrovet och nedbruten cellulosa som påverkar skeppets mekaniska egenskaper ytterligare, bestämdes det att skeppets stödstruktur så småningom skulle behöva bytas ut. Den nya stödstrukturen skulle konstrueras utifrån de premisser som framkommit under kemiprojekten och vara anpassad efter den deformation som sker, både av skeppets form och på cellnivå i träet.⁴⁷

Organiseringen av mekanikprojektet *Stötta Vasa* skiljer sig betydligt från tidigare projekt, då endast ett stort forskarlag är direkt kopplat till projektet. Skeppsenhetens chef Magnus Olofsson bär huvudansvaret från museets sida och projektledare för forskningen är Kristofer Gamstedt, professor i tillämpad mekanik vid Uppsala universitet och tidigare verksam på KTH hos Berglund. Bjurhager, som tillsammans med Berglund ansvarade för den mekaniska forskningen under *En Framtid för Vasa*, arbetar nu istället tillsammans med Gamstedt på Uppsala universitet. Till sin hjälp har de ett antal doktorander och forskare som fokuserar på mekaniska egenskaper på olika nivåer, från mikro till makro. Utöver detta forskarlag har ett antal mer perifera forskare knutits till projektet, till exempel Almkvist och hans doktorand Shahin Norbakhsh som kom in under det andra kemiprojektet. Budgeten för mekanikprojektet *Stötta Vasa* uppskattas uppgå till totalt 10,2 miljoner kronor och planeras löpa över fyra år, mellan år 2012 och 2016.⁴⁸

Forskningen under *Stötta Vasa*

Projektet har delats upp i tre steg. Det första handlar om att karaktärisera de tidsberoende mekaniska egenskaperna hos trämaterialiet. Det innebär att de materialegenskaper som är relevanta för de mekaniska egenskaperna ska identifieras. I det andra steget ska indata från steg ett i form av materialegenskaper användas för att utveckla en numerisk modell som kan användas för att förutsäga framtida deformationer av skrovet. I det sista steget ska den numeriska modellen valideras mot verkliga data från de geodetiska mätningarna som pågått sedan år 2000. Själva konstruktionen och produktionen av stödsystemet ryms emellertid inte inom projektet.



Kub av ekrä som används vid hållfasthetstester. Foto: Alexey Vorobyev, UU.

Trä är ett mycket komplext material och vattendränkt arkeologiskt trä är om möjligt än mer komplext. Materialets komplexitet är något som märkts av tydligt inom den kemiska forskningen och som också är viktigt att tänka på inom den mekaniska forskningen. Komplexiteten ligger i att materialet i sig är heterogent, men också i att graden av nedbrytning och föroreningar i form av svavel och järn samt PEG-innehållet skiljer sig stort mellan olika delar. Därför krävs en noggrann karakterisering av vilka parametrar som påverkar hållfastheten. Här kommer samarbetet med Almkvist och Sveriges Lantbruksuniversitet in i bilden. Eftersom de kan förändra de kemiska egenskaperna av träet i laboratorier, kan mekanikgruppen studera hur dessa förändringar i sin tur förändrar de mekaniska egenskaperna i träet. Eftersom experiment av det här slaget t.ex. visat att PEG påverkar hållfastheten, är det viktigt att kunna ta hänsyn till PEG-innehåll i den numeriska modell som tas fram. Även andra faktorer som mikrofiberlutning, fukthalt och densitet är viktiga att kunna anpassa i modellen.⁴⁹

Även om materialets egenskaper spelar stor roll för hållfastheten så säger de inte allt. En annan viktig aspekt är hur de olika delarna sitter ihop med varandra och vilka sorts krafter som påverkar dem. Därför är ett moment fokuserat på att bygga en modell i verklig storlek av en väl vald skeppsdel, för att sedan utföra hållfasthetstester på den. Eftersom modellen rimligtvis inte kan byggas av impregnerat Vasaträ, använder man istället färsk ek. För att hållfasthetstesterna ska bli relevanta för *Vasa* krävs det att dessa testresultat översätts till Vasaträ, vilket görs med hjälp av indata från materialkaraktiseringen. Det man är mest intresserad av i det här steget är att se hur skeppets fogar påverkar och påverkas av de krafter som skeppet utsätts för. Dessa beräkningar, tillsammans med data om vilka materialegenskaper som påverkar hållfastheten, ska sen översättas till en övergripande modell som förklarar egenskaper och rörelser hos hela skeppet. Denna modell är komplex men samtidigt relativt enkel att validera, då data om skeppets faktiska deformation finns tillgänglig. När en modell tagits fram kan man se en prognos över hur skeppet kommer att deformeras i framtiden och vilka punkter som behöver extra stötning, något som är viktigt för konstruktionen av stödvaggan då den måste kunna anpassas efter deformationen. Det finns även förslag på att konstruktionen ska vara så pass flexibel att den ska kunna vända om den deformation som redan skett.

Det kemiska läget idag

Med stöd från forsknings- och utvecklingsmedel från Riksantikvarieämbetet har viss kemisk forskning fortsatt under de senaste åren. Det korta projektet *Reaktionshastigheter i vattendränkt trä* med Almkvist som projektledare har resulterat i de senaste rönen om skeppets kemiska status. Enligt Almkvist och Norbakhsh uppvisar trä som impregnerats med järnklorid alltid nedsatt hållfasthet i dragriktningen hastigt efter att det har utsatts för kontakt med syre.⁵⁰ De menar alltså fortfarande att järn har en katalyserande effekt på oxidationen av trä när syre finns närvarande. Däremot observerades ingen skillnad i draghållfasthet när proverna även impregnerades med PEG, vilket verkar betyda att PEG kan skydda träet mot oxidation. Till skillnad från Iversen och Ek anser Almkvist och Norbak-

hsh att fria radikalreaktioner, förmedlade av järn, är den främsta nedbrytningsmekanismen och att PEG kan fånga in de fria radikalerna som bildas och hindra dessa från att reagera med cellulosan. Tester har gjorts där det visat sig att dessa processer har varit mycket aggressiva direkt när provet utsätts för syre, men att de snabbt avstannat. En ny klimatanläggning, som konservator Emma Hocker ansvarar för, ser till att klimatet är så pass stabilt att inga kemiska processer kan pågå okontrollerat i träet. Utöver detta sker ett byte av gamla järnbultar som potentiellt sett annars skulle kunna öka järnhalten i träet. Även om de processer som skett historiskt har haft stor påverkan på materialets hållfasthet, syns i dagsläget inga tecken på att någon större nedbrytning sker. Det finns mycket som tyder på att mer kemisk forskning behövs och kommer att utföras på skeppet.⁵¹ Många frågeställningar är fortfarande obesvarade, och såväl forskare som konservatorer är intresserade av den kunskap som finns att hämta, fast av olika anledningar.

Sammanfattande diskussion och slutsatser

Rönen om *Vasas* skick har varit många och skiftat snabbt. Ibland har forskarna stått så långt från varandra att de inte har kunnat diskutera, och ibland har de varit rörande överens om teorier som sedan visat sig vara felaktiga. Gamla sanningar, som varit så pass självklara att de inte ens har ifrågasatts, har varit svåra att ändra på trots vetenskapliga bevis. Ett exempel på detta var när svavlets betydelse började ifrågasättas. Även om olika hypoteser undersöktes under den första delen av *Bevara Vasa*, var konsensus de första åren att svavlet var det huvudsakliga hotet. En stor orsak till detta verkar ha varit den viktiga publikationen i *Nature*, som förvandlade rön till fakta. När Almkvist kom fram till att pH-värdet av träet sjönk längre in i träet, var det så osannolikt att han länge fick höra att han mätt fel, trots att pH-mätning är relativt okomplicerat. Även om flera forskare senare kunde visa upp resultat som stred mot den vedertagna bilden, tog det lång tid för nya teorier att accepteras.

När forskarna började enas om att svavlet inte var det huvudsakliga hotet, skiftades fokus till järnets roll för skeppets mekaniska egenskaper. Det-

ta fokusskifte ledde till att svavelproblematiken tonades ned och stora delar av svavelforskningen avbröts. Från att ha diskuterat allt i termer av hur det påverkade produktionen av svavelsyra, pratade man istället om järnet och dess roll för träets hållfasthet. Även om dessa skiften är nödvändiga för att driva forskningen kring konserveringen framåt, kan det samtidigt vara problematiskt. Svavlet och svavelsyran kanske inte påverkar de mekaniska egenskaperna av skeppet eftersom svavlet endast finns i skrovets ytskikt. Däremot finns det fortfarande en viss risk att själva ytan påverkas, eftersom fällningarna till stor del består av just svavel. Ytan är ur ett rent arkeologiskt och historiskt perspektiv en av de mest kommunikativa delarna av skeppet. Färgrester och märken efter sågklingor är avtryck som endast kan ses i ytskiktet, varför det är angeläget att bevara detta intakt.

Samtidigt som vissa forskare har påstått att järn respektive svavel skyddar mot nedbrytning har andra ansett att de båda har negativ verkan på träet. Liknande scenario gäller för konserveringsmedlet PEG. I dessa fall är det viktigt att tänka på att det oftast inte bara finns en förklaringsmodell, utan flera. Skeppet är ett stort pussel, där många delar är mycket olika. Likväl behövs alla dessa delar för att kunna förklara de processer som försiggår och har försiggått i skrovet sedan det sjönk. Tillsammans med det faktum att provtagningen varit och är mycket begränsad, hindrar det möjligheterna att säga särskilt mycket generellt om skeppet. Det de flesta dock verkar vara överens om är att det i dagsläget inte krävs några drastiska åtgärder. Gamla bultar håller på att bytas, ett nytt klimatsystem som håller mer konstant luftfuktighet har installerats, järn extraheras från de föremål som är värst utsatta och en ny stödvägga planeras. Vilka åtgärder utöver dessa som kan behöva övervägas längre fram i tiden är ännu oklart, men i och med att forskningen hela tiden går framåt verkar målet att kunna bevara skeppet i 1000 år inte helt orimligt, trots det alarmerade läget för knappt femton år sedan.

Det är tydligt att kunskapen om skeppets kemiska status aldrig varit eller kommer att bli en stabil entitet, utan något som skapas och förändras i och med de interaktioner mellan forskare, konservatorer och skepp som hela tiden pågår. Även om deras huvudsakliga motiv skiljer sig från varandra – forskarna försöker att driva fram forskningsfronten inom sina respektive områden medan konservatorerna vill hitta metoder för att be-

vara skeppet – behöver de varandra för att lyckas nå sina mål. Forskningen behövs för att öka förståelsen för hur bevarandet ska gå till, samtidigt som forskarna behöver skeppet för sin forskning. Även om vi aldrig kommer att få se någon komplett bild över skeppets kemiska och mekaniska struktur, ökar hela tiden förståelsen för hur hon på bästa sätt ska bevaras.

Summary

The warship *Vasa* is considered to be one of Sweden's most important archaeological finds ever, and the Vasa Museum, where she is kept, is one of Stockholm's biggest tourist attractions with over one million visitors every year. *Vasa* was salvaged in 1961 and considered fully conserved by 1990. Ten years later, in 2000, the conservators started to notice white and yellow stains at the hull of the ship and on some of the related wooden objects. It became apparent that the conservation process had not been completely successful. The stains seemed to consist of mainly sulfur and iron, and some researchers feared that this would cause the ship to produce large amounts of sulfuric acid, which is very corrosive. This caught the attention from both the media and the public, and soon everyone was concerned with the health of the *Vasa*. This was the starting point for three very comprehensive research projects, which would lead to new insights in the areas of mechanics, chemistry and microbiology. The research results would not only be interesting for *Vasa*, but for many other shipwrecks as well, such as *Mary Rose* and *Batavia*. The Vasa Museum was the first maritime museum in the world to initiate such large-scale projects, and much of the research conducted within these three projects has been world-leading.

This article presents the natural science research that has been conducted since the ship was salvaged, and describes certain important problems which the researchers have faced throughout the years. The focus is, however, on the intensification of research which was caused by the precipitations noticed in 2000. Even though the *Vasa* research has been conducted for fourteen years, the researchers are still uncertain about many things, such as what chemical processes caused these precipitations in the first

place. The main reason for this is that waterlogged oak wood is a heterogeneous material and that sampling from the ship has been limited, but also that the projects have been very prestigious, which has led some researchers to exaggerate their results in order to gain publicity. This has also caused the project groups to lack much needed cooperation in favor of disputes and non-rewarding arguments. The study has been conducted through interviews with many of the researchers, who have been active within the area for the last fifteen years, and through studies of articles and protocols.

Käll- och litteraturförteckning

Almkvist, Gunnar & Persson, Ingmar, "Extraction of iron compounds from wood from the Vasa", *Holzforschung*, 2006, vol. 60, s. 678-684.

Almkvist, Gunnar, *The Chemistry of the Vasa – Iron, Acids and Degradation* (Uppsala, 2008). Doktorsavhandling i kemi, Sveriges Lantbruksuniversitet.

Barkman, Lars. "Konserveringen av Wasa", *Tidskrift i Sjöväsendet*, 1962, vol. 125, s. 837-853.

Bjurhager, Ingela, *Effects of cell wall structure on tensile properties of hardwood* (Stockholm, 2011). Doktorsavhandling i Polymerteknologi, Kungliga Tekniska Högskolan.

Cederlund, Carl Olof, "Ett oskrivet kapitel ur Vasas historia", *Forum Navale*, 2012, nr. 68, s. 9-63.

Dedic, Dina et al. "Cellulose degradation in the Vasa: The role of acids and rust", *Studies in Conservation*, 2013, vol. 58, s. 308-313.

Elding, Lars Ivar, "Vasa – Recent Preservation Research". Proc. 11th ICOM-CC Group on Wet Organic Archaeological Materials Conference,

Greenville 2010, s. 371-382.

Elding, Lars Ivar, "Ten Years of *Vasa* Research – Review and Outlook". Proc. International Conference Shipwrecks, Stockholm 2011, s. 86-93.

Franzén, Anders, *Vasa – Regalskeppet i bild och ord* (Stockholm: Norstedt, 1966), tredje upplagan.

Fors, Yvonne, *Sulfur-related conservation concerns in marine archaeological wood: the origin, speciation and distribution of accumulated sulfur with some remedies for the Vasa* (Stockholm, 2008). Doktorsavhandling i strukturkemi, Stockholms universitet.

Garner, David C. et al. "International Evaluation of the A Future for *Vasa* Project" (Stockholm, 2011). Tillgänglig online: http://www.vasamuseet.se/Documents/Forskning_och_bevarande/International_Evaluation_of_the_A_Future_for_Vasa_v2.pdf

Glastrup, Jens et al., "Degradation of PEG in warship *Vasa*", *Macromolecular symposia*, 2006, vol. 238, s. 22-29.

Glete, Jan, "Hur stor var *Vasa*? Något om örlogsskepp under 1600-talets första hälft", *Forum Navale*, 1995, nr. 51, s. 5-15.

Hedin, Marika, *Vasa: historien om ett skepp* (Stockholm: Bonnier Fakta, 2011).

Hocker, Fred, *Vasa* (Stockholm: Medströms, 2011).

Håfors, Birgitta, *Conservation of the Wood of the Swedish warship *Vasa* of A.D. 1628. Evaluation of polyethylene glycol conservation programmes* (Göteborg 2010). Doktorsavhandling i kulturvård, Göteborgs universitet.

Matthiesen, Henning & Nordvig Mortensen, Martin, "Oxygen consumption by conserved archaeological wood", *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2013, vol. 405, s. 6373-6377.

McAuley, Alex et al., "International Evaluation of the Preserve the *Vasa* Project" (Stockholm, 2006). Tillgänglig online:
http://www.vasamuseet.se/Documents/Forskning_och_bevarande/Bevara_Vasa_rapport.pdf

Norbakhsh, Shahin, *Implications of Chemical Deterioration on Mechanical Performance of Wood* (Uppsala, 2014). Doktorsavhandling i kemi- och bioteknologi, Sveriges Lantbruksuniversitet.

Pang, Ka-Lai et al., "Molecular detection of bacteria in the seventeenth century Swedish warship *Vasa*", Proc. 9th ICOM Group on Wet Organic Archaeological Materials Conference, Köpenhamn 2004, s. 243-261.

Sandström, Tom P.A. et al., "Salt Precipitation on *Vasa* Timbers; An Introduction to a Problem", Proc. 8th ICOM Group on Wet Organic Archaeological Materials Conference, Stockholm 2001, s. 55-66.

Sandström, Magnus et al., "Acidity and Salt precipitation on the *Vasa*: the Sulfur Problem", Proc. 8th ICOM Group on Wet Organic Archaeological Materials Conference, Stockholm 2001, s. 67-89.

Sandström, Magnus et al. "Deterioration of the seventeenth-century warship *Vasa* by internal formation of sulphuric acid", *Nature*, 2002, vol. 415, s. 893-897.

Sandström, Magnus et al., "Analysis of sulfur and iron in marine-archaeological wood", Proc. 9th ICOM Group on Wet Organic Archaeological Materials Conference, Köpenhamn 2004, s. 181-199.

Westermarck, Ulla et al., "Impregnation with PEG and Solvolysis of Wood – Reflections from Analysis of the Ancient Warship *Vasa*", Proc. 59th Appita Annual Conference and Exhibition: Incorporating the 13th International Symposium on Wood, Fibre and Pulping Chemistry, Auckland 2005, s. 229-233.

Noter

- ¹ Hedin 2011, s. 14.
- ² Hocker 2011, s. 56.
- ³ Hocker 2011, s. 41-42.
- ⁴ Hocker 2011, s. 159.
- ⁵ Cederlund 2012, s. 9.
- ⁶ Franzén 1966, s. 24.
- ⁷ Glete 1995, s. 7.
- ⁸ Hedin 2011, s. 49.
- ⁹ Barkman 1962, s. 839.
- ¹⁰ Barkman 1962, s. 842.
- ¹¹ Barkman 1962, s. 844.
- ¹² Barkman 1962, s. 844.
- ¹³ Håfors 2010, s. 22.
- ¹⁴ Barkman 1962, s. 846.
- ¹⁵ Håfors 2010, s. 37.
- ¹⁶ Protokoll nr 3/00 från konserveringsrådsmötet den 8 september 2000, s. 1.
- ¹⁷ Sandström, M. et al. 2001, s. 80.
- ¹⁸ Protokoll nr 2/01 från konserveringsrådsmötet den 8 september 2000, s. 3.
- ¹⁹ Protokoll nr 3/00 från konserveringsrådsmötet den 8 september 2000, s. 1.
- ²⁰ Sandström, M. et al. 2001, s. 68.
- ²¹ Protokoll nr 4/01 från konserveringsrådsmötet den 22 mars 2001, s. 2.
- ²² Sandström, M. et al. 2001, s. 84-85.
- ²³ Protokoll nr 4/01 från konserveringsrådsmötet den 22 mars 2001, s. 3
- ²⁴ Sandström, M. et al. 2002, s. 893.
- ²⁵ Brev från Björn Varenius och Ingrid Hall-Roth till Lars Ivar Elding den 3 maj 2003.
- ²⁶ Ur Preliminär projektplan för *En Framtid för Vasa* (2007), s. 1.
- ²⁷ McAuley et al. 2006, s. 7-8.
- ²⁸ Sandström et al. 2004, s. 181.
- ²⁹ Pang et al. 2004, s. 1.
- ³⁰ Alex McAuley et al. 2006, s. 12.
- ³¹ Almkvist & Persson, 2006, s. 683.
- ³² Almkvist 2008, s. 39-41.
- ³³ Westermark et al. 2005, s. 229.
- ³⁴ Glastrup et al. 2006, s. 22-23.
- ³⁵ Glastrup et al. 2006, s. 29.
- ³⁶ McAuley et al. 2006, s. 7-8.
- ³⁷ Garner et al. 2011, s. 7.
- ³⁸ Elding 2011, s. 86-93; Elding 2010 s. 377-378.
- ³⁹ Garner et al. 2006, s. 31.
- ⁴⁰ Dedic et al. 2013, s. 308-309.
- ⁴¹ Almkvist, 2008, s. 74.
- ⁴² Bjurhager 2011, s. 45.

⁴³ Alex McAuley et al. 2006, s. 13.

⁴⁴ Bjurhager 2011, s. 45-52.

⁴⁵ Matthiesen & Mortensen, 2013, s. 6373.

⁴⁶ Dedic et al. 2013, s. 308-309.

⁴⁷ Ur Ett nytt stödsystem för Vasa: Forsknings- och utvecklingsplan (2011), s. 3-6.

⁴⁸ Ur Ett nytt stödsystem för Vasa: Forsknings- och utvecklingsplan (2011), s. 7-8.

⁴⁹ Deltagandeobservation från Konserveringsrådsmötet den 1 april 2014.

⁵⁰ Norbakhsh 2014, s. 51-52.

⁵¹ Deltagandeobservation från Konserveringsrådsmötet den 19 november 2014.