Hållfasthetsläran som förutsättning för materialprovning, särskilt i Sverige

av Folke K. G. Odqvist

Folke K. G. Odqvist, professor emeritus i hållfasthetslära vid Kungl. Tekniska högskolan i Stockholm ger här en översikt av den mekaniska materialprovningens begynnande utveckling i Sverige på stålområdet och hur den står i samband med framstegen i hållfasthetslära.

Avhandlingen utgör en bearbetning av ett tal vid presidie nedläggande i Kungl. Vetenskapsakademien 1971.04.14.

Inledning

Att redskap, verktyg och andra nyttigheter gick sönder och blev obrukbara torde ha varit en av människans första erfarenheter i och med att hon började ta omgivande föremål i bruk som jaktvapen eller för sitt uppehälle över huvud taget. Frågor sådana som: varför passar det ena träslaget bättre än ett annat t. ex. för skaft till stenyxor måste så småningom ha blivit aktuella. Eller: vad sorts sten skall jag använda till pilspetsar så att de låter sig klyvas lätt och formas samtidigt som de ger en skarp udd? Att något samband råder mellan deformations- och hållfasthetsegenskaper måste tidigt ha stått klart för dem som sökte lämpligt trä till pilbågar. Ungefär så måste hållfasthetslärans och materialprovningens långa och mödosamma väg ha börjat. Fast vi vet självfallet ingenting bestämt om detta utan är hänvisade till vad vår fantasi kan ge.

För att bilda oss en mera konkret föreställning om detaljerna i denna utveckling är vi förutom till fantasien hänvisade till vad som bevarats fram till vår tid i form av fornfynd, gravinskrifter m. m. Förgängligheten hos de flesta organiska material utgör tydligen ett svåröverstigligt hinder på denna väg med risk för selektivt urval av orsakssammanhangen.

Någon på vetenskapliga metoder grundad dimensionering av t. ex. tempels och broars valv eller av hårt påkända delar av verktyg eller vapen, fordon eller fartyg har väl före mitten av 1600-talet knappast förekommit, vare sig i Europa eller annorstädes. Däremot har man sett fina exempel på vapen, rustningar, byggnader och fartyg som erhållit vackra, "harmoniska" former, som emellertid säkerligen tillkommit hantverksmässigt genom under lång tid vunnen erfarenhet.

Man gick väl i princip tillväga på samma sätt som inom skeppsbyggeriet skett intill vår egen tid. I själva verket har man inom fartygsbygge ett vackert och relativt välkänt exempel på tillvägagångssättet. Där gjorde man precis tvärtemot som det stod i vår tyska elementarbok någon gång vid början av detta sekel: "Die Grundgestalt des Fisches ist die eines Kahnes". Det var i stället båten som så småningom formades mer eller mindre som en fisk för att erbjuda mindre motstånd vid gång genom vattnet. Sålunda uppkom i Egypten och Mesopotamien långsträckta fartyg, avsmalnande mot ändarna. De äldsta kända fartygen var kanske urholkade trädstammar som småningom gjordes avsmalnande mot ändan eller också var de t. ex.

tillverkade av säv. Senare blev de uppbyggda av bräder. Genom årtusenden blev de större och starkare och erhöll alltmer sofistikerade förstärkningar. I Norden gick man delvis en motsatt väg. Båtarna gjordes klinkbyggda, mjuka och deformerbara för att bjuda sjöarna mindre motstånd. Hur som helst, båtarna blev större och förstärtkes efter principen "tål den det, så tål den väl det", i det man ökade byggnadsmåtten en fot här och en där och modifierade materialdimensionerna med en tum här eller där. Eftersom "the proof of the pudding is in the eating" var det väl vanligen slutproduktens lämplighet för sitt ändamål som avgjorde både konstruktionens och materialets användbarhet.

Man kan fråga sig: vad hade de forntida byggmästarna för uppfattning om påkänningarna i sina konstruktioner? Svaret är inte lätt att ge. Men man kände ju de stela kropparnas och vätskornas statik alltifrån antiken. Renässansens arkitekter torde ha haft en principiellt riktig uppfattning om bärverkan i sina byggnader. Så t. ex. Brunelleschi, som byggde domkyrkan i Florens på 1400-talet eller Michelangelo som byggde Peterskyrkan i Rom på 1500-talet. Men redan de egyptiska skeppsbyggmästarna torde långt tidigare haft en klar uppfattning om kraftflödet i sina fartygskonstruktioner d. v. s. i den s. k. skeppsbalken. Annars hade de nog inte förstärkt fartygen med längsgående grova stag, löpande över klykförsedda bottenstöttor och spända så att de aldrig slaknade vid skrovets påkänning i "sagging", d. v. s. den situation som uppkommer då fartygets för och akter vilar på två på varandra följande vågtoppar i grov sjögång, se Fig. 1, återgiven efter en rekonstruktion av Björn Landström (2). Med sådana skepp, uppskattningsvis 25 m långa, kunde Faraos skeppsfolk segla till Punt i Ostafrika vid pass 2500 f. Kr. Liknande fartyg förekom i Medelhavsområdet ännu vid vår tidräknings begynnelse. Därom kan man läsa i Bibeln (1), som skildrar aposteln Paulus resa till Rom, varvid han råkade ut för svåra stormar och slutligen led skeppsbrott på Malta. Bibelns berättelse (enligt Bibelkommissionens upplaga, 1883) säger att skeppsfolket "använde nödhjälpsmedel och ombundo skeppet". Som jag vill minnas först påpekats av Eirik Hornborg, innebär detta att textförfattaren troligen missförstått de längsgående stagens funktion. De var inga "nödhjälpmedel" utan krävdes för att skeppet överhuvud alls skulle fungera. Men de kanske behövde ansättas efter påkänning i svår sjögång. Under flera tusen år torde alltså

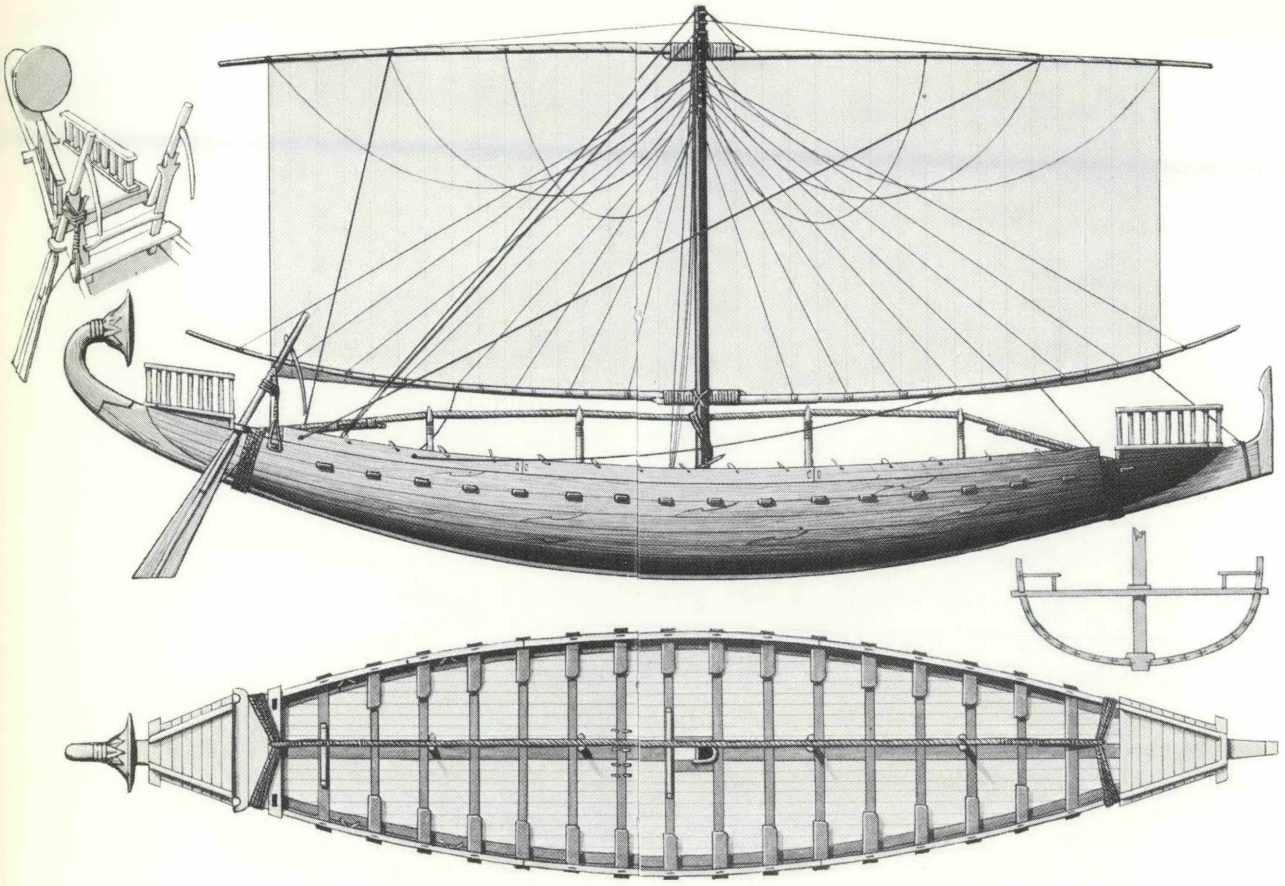


Fig. 1. Egyptiskt fartyg, omkr. 2500 f. K., enligt B. Landström (2).
Egyptian ship, about 2500 B.C., reconstruction by B. Landström (2).

skeppsbyggmästarna ha haft en kvalitativt riktig uppfattning om skeppsbalkens funktion.

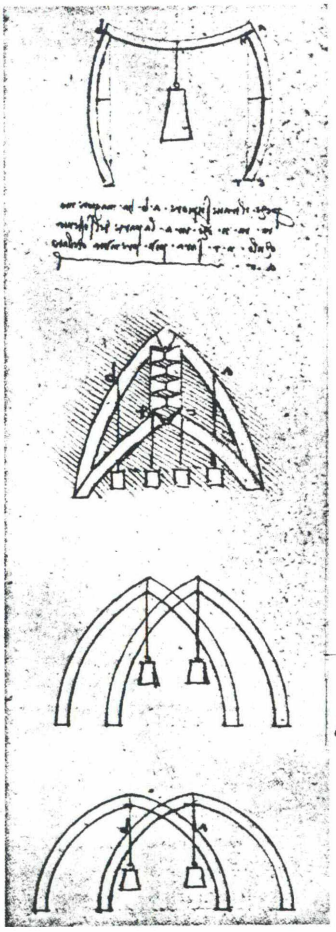
Några skriftliga belägg för existensen av längsgående böjspänningar i en balk har man annars först i Leonardo da Vincis anteckningar, (Fig. 2). Dessa har publicerats först i våra dagar, men ingenting hindrar att de varit kända t. ex. för renässansarkitekterna. (3), (4).

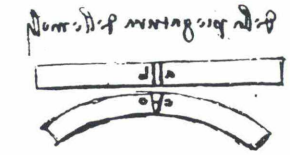
Den första som klädde böjspänningarna i matematisk dräkt och publicerade dem var Galileo Galilei (Fig. 3). Härigenom liksom genom hans lärjungar kom hållfasthetsläran att väckas till liv. De flesta historiska framställningar om hållfasthetslära tar med rätta sin utgångspunkt från Galileis klassiska arbete av 1638. (5), (6), (7), (8), (9), (10).

A. Elasticitets- och hållfasthetslära

Galileis teori

Vid Galileis teori sådan den framställdes i hans publikation av 1638 tänker man sig balken uppdelad i längsgående fibrer och härleder villkor för brott under inverkan av yttre krafter. Den bildar en väsentlig del av grunden för nutida ingenjörsmässig balkteori. Däremot intresserade sig Galilei veterligen icke för balkens deformation vid böjning. Dylik deformation finns kvalitativt beskriven i Leonardo da Vincis anteckningar. För en matematisk beskrivning av balkens deformation vid böjning måste man dessutom känna sambandet mellan balkfibrernas töjning och spänning sådan den exempelvis beskrivs





Of bending of the springs.

If a straight spring is bent, it is necessary that its convex part become thinner and its concave part, thicker. This modification is pyramidal, and consequently there will never be a change in the middle of the spring. You shall discover, if you consider all of the aforementioned modifications, that by taking part a b *in the middle of its length and then bending the spring in a way that the two parallel lines,* a *and* b, *touch at the bottom, the distance between the parallel lines has grown as much at the top as it has diminished at the bottom. Therefore, the center of its height has become much like a balance for the sides. And the ends of those lines draw as close at the bottom as much as they draw away at the top. From this, you will understand why the center of the height of the parallels never increases in* a b *nor diminishes in the bent spring at* c o.

Fig. 2. Engelsk översättning av Leonardos Anteckningar, Om böjning av fjädrar, enl. L. Reti (4).

English translation of Leonardo's Notes, On bending of springs, according to L. Reti (4).



Fig. 3. Galileo Galilei, porträtt enl. Ch. Fremont (6).
Galielo Galilei, portrait reproduced from Ch. Fremont (6).

genom Hooke's lag vars tillkomst och innebörd framgått av Jan Hults föregående uppsats. Galilei synes inte ha haft någon kännedom om Hooke's lag. Den skulle ju f. ö. komma att publiceras först 1678. Man får likväl icke förbise att denna tid hade andra kommunikationsvägar än publicering i bokform. Dåtidens upplysta personer utgjorde ett tunt samhällsskikt som umgicks samtalsvis och per korrespondens. Men Leonardo levde 1452—1519 och Galilei 1564—1642. Det förblir enligt S. Timoshenko en mer eller mindre öppen fråga om Galilei haft någon ingående kännedom om Leonardos upptäckter. Galilei gjorde, så vitt man vet, själv aldrig några experiment till bekräftande av sin balkteori. Den skulle emellertid komma att ligga till grund för efterföljarna i England, Holland och särskilt i Frankrike under 1600- och 1700-talet. Dessa skulle dock till en början komma att mera intressera sig för deformationsberäkningar under inverkan av yttre krafter än för påkänningar och brott i balkmaterialet.

Galilei synes ha varit den förste som medvetet använde den för hållfasthetsläran fundamentala s. k. *snittmetoden*. Denna leder till en

utvidgning av antikens lära om fasta kroppars jämvikt (Aristoteles, Arkimedes etc.). Snittmetoden kan karakteriseras på följande sätt. Betrakta en fast kropp som befinner sig i jämvikt under inverkan av ett system av yttre krafter. Om man då tänker sig ett snitt lagt genom kroppen så att den kommer att bestå av två skilda delar, så skall jämvikt råda för vardera delen mellan de på delen verkande yttre krafterna och de inre krafter som påverkar delen i snittet för att sammanhålla kroppen. Galilei tänker sig balken uppdelad i längsgående fibrer, var och en i jämvikt under inre och yttre krafter. Medelst likformighetsbetraktelser finner han att fibrernas hållfasthet måste kunna härledas ur *bristningslängden,* dvs. längden hos en fritt upphängd tråd belastad enbart av tyngdkraften och så lång att den skulle brista vid upphängningen om den gjordes något längre.

Galilei började med att betrakta ett enkelt specialfall, en konsolbalk av längden l med rektangulär sektion (höjden = h, bredden = b), inspänd i en fast vägg och böjd nedåt av en påhängd vikt P enligt Fig. 4, som är hämtad från hans publikation av 1638. Galilei tänkte sig balkfibrerna enbart upptagande dragspänningar och att dessas resultant i tvärsnittet var belägen på halva balksektionens höjd $h/2$, räknat från dess underkant. Momentet M av resultanten σbh av de inre krafterna i balken med avseende på sektionens underkant är

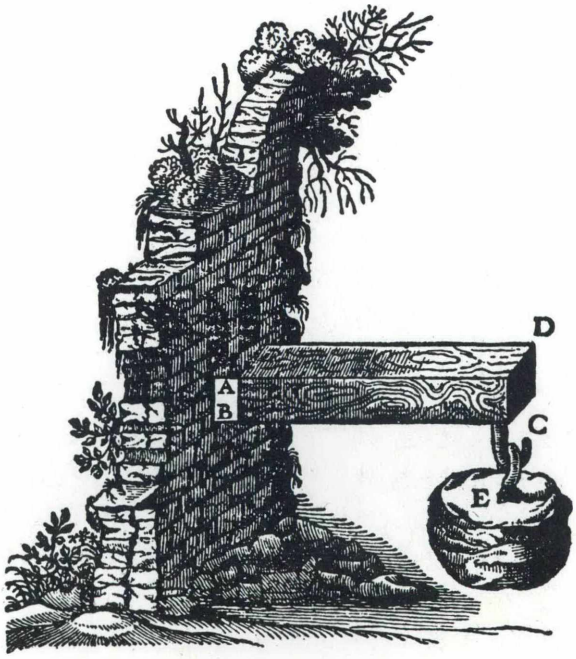


Fig. 4. Galileis konsolbalk, enl. (5).
Galilei's beam, reproduced from (5).

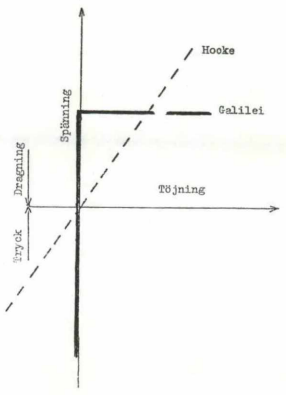


Fig. 5. Spännings-töjningsdiagram enligt Hooke's lag och enl. Galilei.

Stress-strain relationship according to Hooke and to Galilei.

enligt betraktelsesättet vid den ovannämnda snittmetoden lika med momentet av yttre krafter.

$$M = Pl = \sigma bh \cdot \frac{h}{2}$$

om σ är den vid inspänningstvärsnittet över sektionen konstanta balkspänningen. Balken brister enligt Galilei då momentet M, d. v. s. spänningen σ når ett kritiskt värde. Detta innebär i själva verket att Galilei antog ett balkmaterial, oändligt styvt vid tryck men eftergivligt vid dragning. Dess töjning ε, d. v. s. balkfibrernas förlängning per längdenhet vid deformation, skulle då enligt Galilei vara konstant noll vid tryck men vid dragning ha något positivt värde. Teorien bleve fullt korrekt enligt nutida föreställning, om balkmaterialet vid dragning antoges idealplastiskt men vid tryck oändligt styvt, se Fig. 5. Men därom nämner Galilei naturligt nog ingenting.

Galilei kom i fortsättningen av avhandlingen 1638 att intressera sig för jämnstarka balkar, d. v. s. sådana balkar vars sektionsdimensioner varierade längs balken och var så avvägda att det kritiska balkmomentet, då det yttre kraftsystemet ökades på något föreskrivet sätt, samtidigt uppnåddes i alla tvärsnitt. Härigenom uppnådde han tydligen bästa möjliga utnyttjning av balkmaterialets hållfasthet.

Galileis föreställning om balkmaterialet var uppenbarligen rent intuitiv. Den innebar att han förlade balkens "neutrallager" (d. v. s. det fiberskikt i balken som förblir odeformerat vid böjning) till balkens underkant. Till skillnad härifrån antog Galileis närmaste efterföljare under 1600-talet (t. ex. Mariotte) att balkmaterialet i sin helhet skulle följa Hooke's lag såväl i dragning som tryck. Då de emellertid samtidigt försummade att ta hänsyn till yttre och inre krafters jämvikt vid projektion på balkens längdriktning i snittet kom de i

dispyt om var de skulle förlägga neutrallagret. Även under 1700-talet (J. och D. Bernoulli, L. Euler m. fl.) intresserade man sig mera för den s. k. elastiska linjen d. v. s. för balkens deformation i stort under givna krafter. Dessa teorier inskränkte sig till balkar av material lydande Hooke's lag och bortsåg från den verkliga spänningsfördelningen i balktvärsnitten. Den förste som gav en efter moderna krav (enligt S. Timoshenko) tillfredsställande teori för elastisk balkböjning var C. A. Coulomb, 1773. (11).

Därför utgör Hooke's lag jämte Galileis införande av snittmetoden de två grundpelare, som hållfasthetsläran och därmed även utvecklingen av materialprovningen och den ingenjörsmässiga dimensioneringen av konstruktionerna, i dag vilar på.

Elasticitetsteorien

I den matematiska elasticitetsteorien studerar man i första hand kroppar utförda av material lydande en generalisering till treaxliga spänningstillstånd av Hooke's lag vid enaxlig dragning och tryck. Ett grundläggande problem är här att bestämma det inre spänningstillståndet i en godtyckligt formad kropp utsatt för ett yttre kraftsystem i jämvikt. Ävenså intresserar man sig för kroppens deformation lokalt och i sin helhet. Man har här att göra med vad som i den högre matematiska analysen kallas för ett randvärdesproblem. Namnet kommer av att för tvådimensionella plana kroppar, t. ex. en ur en plan plåt utskuren lastkrok, karakteriseras kroppsytan enbart av krokens randkurva. Det yttre givna kraftsystemet kan utgöras av krafter i plåtens plan, fördelade längs randkurvan. Galileis balkböjningsteori är ett speciellt enkelt fall av ett randvärdesproblem, där det givna yttre kraftsystemet i Fig. 4 utgörs av stenens tyngd vid den fria ändan tillsammans med en lika stor men motriktad tvärkraft vid väggen kombinerad med ett där verkande inspänningsmoment.

Ett fullständigt klarläggande av spännings- och deformationstillståndet i ett kontinuum kom först genom de franska matematikerna Cauchy och Navier på 1820-talet, (12). Därvid infördes skjuvspänningsbegreppet och den speciella form av deformation som vi kallar skjuvning, jfr Fig. 8. Först därefter kunde den matematiska elasticitetsteorin föras vidare genom B. de Saint-Venant och andra. Den skulle genom honom komma att publiceras först 1853. Härigenom kunde man exempelvis utvidga balkteorin till att omfatta påkänning genom samtidigt verkande böjning och vridning av en rak prismatisk

balk med godtyckligt tvärsnitt och därvid ge en exakt lösning av problemet, åtminstone för de delar av balken som ligger långt från de tvärsnitt där yttre krafter angriper (Saint-Venants princip).

Den fullständiga lösningen av det elastiska randvärdesproblemet för en godtyckligt formad kropp skulle dröja länge än. I det enklare fallet, då icke de yttre krafterna men väl de elastiska förskjutningarna av kroppsytan är givna gavs lösningen 1900 av den framstående svenska matematikern Ivar Fredholm (1866—1927), (13). Lösningen utvidgades 1915 av tysken H. Weyl (14) till att omfatta även det svårare problemet då ytkrafterna är givna. I båda fallen erhålles lösningen med hjälp av s. k. regulära fredholmska integralekvationer. Man kan sålunda numera komma åt de tekniskt viktiga fall, där spänningskoncentration uppträder, t. ex. vid förekommande hål och urtagningar och exempelvis i princip beräkna formfaktorn vid hålkälar hos axlar. Detta gäller särskilt numera då man i vår tid genom datorer erhållit bättre möjlighet att lösa integralekvationerna numeriskt. Sådana räkningar kan f. ö. också, sedan lösningen till randvärdesproblemet matematiskt fastställts, ofta enklare och snabbare utföras med andra approximativa metoder, t. ex. finita elementmetoden (FEM).

Svenska insatser
Pehr Lagerhjelm

De svenska insatserna inom den teoretiska hållfasthetsläran före 1800-talet är icke särskilt betydande och skall blott omnämnas i sitt sammanhang i ett följande avsnitt. Man kan säga att de börjar med Pehr Lagerhjelm (1787—1856), Fig. 6, se (15).

Lagerhjelm hade en gedigen teoretisk utbildning. Han avlade juridisk examen i Uppsala 1804 och bergsexamen 1807 samt inskrevs samma år som auskultant i Bergskollegium. Åren 1817—1831 var han assessor och 1832—56 fullmäktige i Jernkontoret. År 1812 blev han ensam ägare till Bofors bruk. Genom gifte 1817 blev han därutöver delägare i Rörstrands porslinsfabrik i Stockholm, i vars utveckling han åtminstone till en början tog livlig del. Lagerhjelm var också aktiv politiker och besökte som riddarhusmedlem riksdagarna från 1809. Han tillhörde den konservativa gruppen på Riddarhuset men intog en självständig hållning och var högt aktad också av sina politiska motståndare. I relation till brukshanteringen kan hans inställning närmast karakteriseras som liberal. Han ivrade för folknykterhet och hade många intressen, även konstnärliga. Han var hela livet

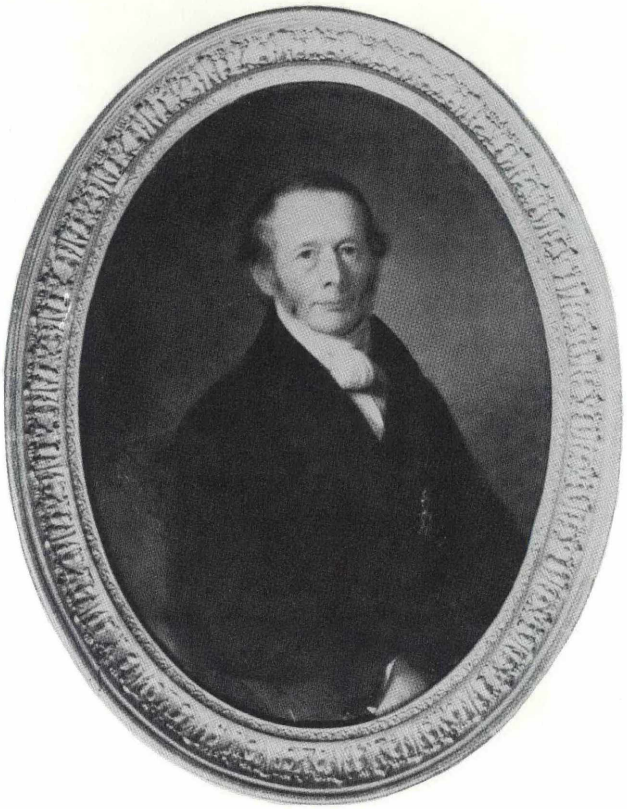


Fig. 6. Pehr Lagerhjelm.

nära vän med många framstående samtida, bl. a. med E. G. Geijer. I en korrespondens mellan kemisten J. J. Berzelius och den kända politikern Hans Järta, som återges av H. G. Söderbaum (16), karakteriserar Järta honom som "mer idealisk än rik på idéer" (sic!). I egenskap av tekniker var Lagerhjelm säkert mera konsekvent målinriktad än romantikens humanistiska akademiker. Känns kanske motsättningarna mellan C. P. Snows båda "kulturer", som påtalats i vår egen tid, igen? Den är tydligen ett arv från den tid då industrien började ta naturvetenskapen i sin tjänst.

År 1815 hade Lagerhjelm blivit ledamot av Kungl. Vetenskapsakademien (KVA). Han synes ha tillgodogjort sig den kunskap som den dåtida kemien och fysiken kunde bjuda. Han ägde även aktningsvärda matematiska kunskaper, vilket skall framgå av det följande. I Todhunter and Pearsons "History of the Elasticity and Strength of Materials" betecknas Lagerhjelm som "Swedish physicist" och ägnas

stort utrymme. Likaså i verk av A. E. H. Love, S. Timoshenko och J. F. Bell.

När frågan om värdet av att införa valsning vid svensk stångjärnsproduktion uppkom, höjdes i bruksägarkretsar röster både för och emot. Lagerhjelm beslöt i samråd med några meningsfränder ta saken i egna händer och låta i England valsa ut härdfärskade smältstycken av svenskt järn från Bofors. Själv övervakade han personligen de första försöken som verkställdes i England sommaren 1825. För jämförande prov mellan svenskt och engelskt järn fordrades emellertid också objektiva provningsmetoder. Dylika existerade icke vid denna tid. Här förelåg om någonsin behov av utvecklingsarbete på provningsområdet. Jag återkommer till den provningsmässiga delen av undersökningen i följande avsnitt och vill här begränsa mig till de principiella och teoretiska synpunkter som framfördes. Undersökningen i sin helhet publicerades i Jernkontorets Annaler, Bd X, senare häftet i 2 delar 1827 och omfattar inalles över 600 sidor. Det är ingen lättillgänglig lektyr helst som korrekturläsningen delvis är bristfällig. Arbetet utkom även i utdrag på tyska i Poggendorfs Annalen, Bd 13, 1828, (17).

För att göra jämförelser mellan provningsresultaten i töjning, böjning, vridning och vridsvängningar (allt inom det elastiska området) behövde Lagerhjelm hjälp av elasticitetsteorin och denna befann sig vid denna tidpunkt i ett tämligen outvecklat skede. Han började med att diskutera Hooke's lag, som tydligen då ännu icke vunnit burskap under sitt nuvarande namn, men likväl till gagnet använts av flera föregångare. Lagerhjelm diskuterar dessa (Tregold, s'Gravesande, Young, Biot, Duleau etc.) utförligt. De inre krafterna återföres på kraften mellan punkter i kroppen som befinner sig på ett avstånd R från varandra, bestämt av att attraktion och repulsion håller varandra i jämvikt. Han betraktar det fall då yttre krafter ändrar avståndet R och utvecklar i Taylorserie samt diskuterar inverkan av termer av högre grad än den linjära, dock utan att göra klart hur krafterna verkar i rymden eller hur man skall tänka sig geometrien vid deformation. Detta blev klart först genom Cauchy's arbeten, som visserligen då var bekanta för en trängre krets, men som skulle publiceras först 1827 och 1828. De var säkert icke kända för Lagerhjelm, lika litet som Navier's vridningsteori. Däremot synes han ha känt till arbeten av Duleau och Barlow som, även de, byggde på Hooke's lag

utan att nämna hans namn. Han återfinner deras resultat vid behandling av nedböjningen f hos en konsolbalk som i Fig. 4 belastas med en tvärkraft P vid den fria ändan. Om böjstyvheten är EI (I = *sektionens* yttröghetsmoment med avseende på en axel vinkelrät mot böjningsplanet genom sektionstyngdpunkten och E = elasticitetsmodulen) blir då

$$f = \frac{Pl^3}{3EI}$$

Här låter sig E sålunda beräknas om övriga storheter är kända. För "spänstighetens gräns", dvs. för elasticitetsgränsen (numera föredras om möjligt sträckgränsen) härleder Lagerhjelm formeln

$$\sigma_{max} = \frac{Ple}{I}$$

där e är avståndet från böjningsaxeln till yttersta fibern. Men dessa f. ö. redan av Mariotte och Jac. Bernoulli på felaktiga grunder härledda och för oss så välkända formler var tydligen icke så för Lagerhjelm. I själva verket var många av hans samtida ännu osäkra om var neutrallagret, dvs. böjningsaxeln skulle förläggas. Lagerhjelm följde den av L. Euler i mekaniken införda analytiska metoden i stället för Newtons tungarbetade geometriska metod. Han undersökte inverkan av ändlig utböjning i jämförelse med infinitesimal dylik. Han förundras över att denna inverkan blir så liten att den vanligen kan försummas. Här har han utfört ett pionjärarbete på det teoretiska området, även internationellt sett.

När det gäller vridningsteorien är han icke lika lyckosam. Eftersom begreppet skjuvspänning ännu ej var känt för Lagerhjelm, försöker han klara sig med sin föreställning om stången som uppbyggd av böjda "fibrer", en föreställning som ju gick tillbaka på Galilei. Lagerhjelms vridningsteori blir på så vis svårgenomskådad och leder till monstruösa räkningar. Han stöter på elliptiska integraler men ryggar inte tillbaka utan värderar ut dem med serieutvecklingar och visar att konvergensen är nöjaktig för hans behov. Det får här räcka med en översiktlig framställning i anslutning till Fig. 7 och 8. Vid studium av förvridningen en vinkel θ av ett homogent, tunnväggigt cylindriskt rör, med radien r och längden l fast inspänt vid väggen i W, tänker sig Lagerhjelm röret uppdelat i strimlor AB, som i Fig. 7, ut-

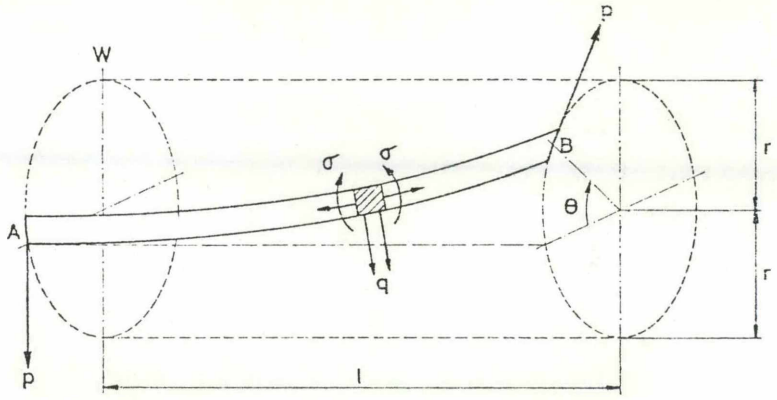


Fig. 7. Lagerhjelms teori för vridning av tunnväggigt rör.
Lagerhjelm's theory on torsion of thin-walled tubes.

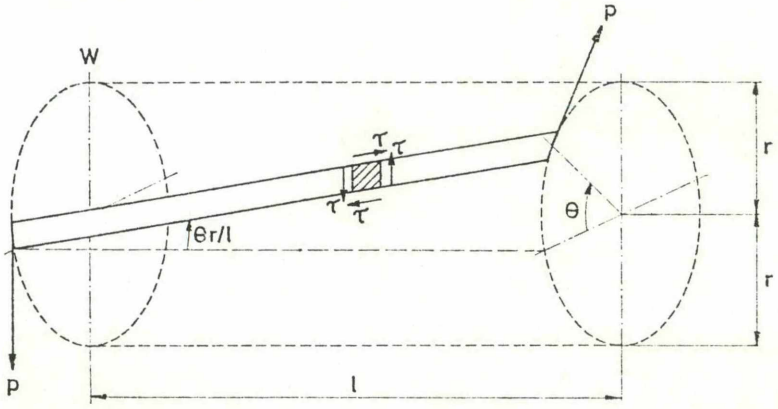


Fig. 8. Naviers teori för vridning av tunnväggigt rör.
Navier's theory on torsion of thin-walled tubes.

satta för böjning som en balk under inverkan av kraften p vid periferien. Det streckade delelementet av AB befinner sig i jämvikt under samtidig inverkan av normalkraften σ och sidokraften q från grannelementen. Observera att Lagerhjelm i sin framställning betecknar q som normalkraften och σ som tangentialkraften i anslutning till föreställningen om strimlans utböjningskurvas normal och tangent. Till skillnad härifrån visar Fig. 8 vår på Navier's byggda föreställning om strimlans deformation (skjuvning vinkeln $\theta r/l$) under inverkan av skjuvspänningar τ. Denna teori som ligger helt inom Cauchys föreställningsvärld har stått sig till våra dagar. Lagerhjelms teori, som bygger på en föreställning om att ett vridet rör förhåller sig ungefär

som om det vore uppbyggt av strimleelement utsatta för böjning i rörets tangentled har numera råkat i glömska.

Lagerhjelm insåg att antagandet om konstanta förhållanden utefter strimlan AB och frånvaron av normalkrafter σ vid strimlans fria ända vid B leder till en motsägelse. Han uppskattar ändeffekten vid B och visar att den är försumbar. Här har han alltså, om än ovetande och med en klumpig metod på sätt och vis föregripit Saint-Venants princip, som skulle publiceras först 1855. Lagerhjelm integrerar verkan av krafterna p på strimlan AB över röret samt över en massiv rundstång, där r varierar från 0 till a och erhåller på så sätt vridmomentet M för rundstången

$$M = \frac{E}{1.453} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \frac{a^4}{l} \cdot \Theta$$

där l = stångens längd, a = dess radie, E = elasticitetsmodulen och Θ vridningsvinkeln. Naviers "exakta" teori skulle under förutsättning av att Poissons koefficient för stål = 0.333 ge:

$$M = \frac{E}{1.333} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \frac{a^4}{l} \cdot \Theta$$

och Lagerhjelms värde är alltså för lågt, dock endast cirka 8 1/2 %. Men mera än så. Vid utvidgning av teorien till massiva stänger med kvadratisk tvärsektion skulle det visa sig att Naviers teori (utan hänsyn till den av Saint-Venant sedermera införda tvärsnittsvälvningen) ger ett värde på vridmomentet som är cirka 19 % för högt medan Lagerhjelms teori i detta fall skulle ge blott cirka 9 % för högt värde jämfört med Saint-Venants. Teorien för vridsvängningar härleder Lagerhjelm korrekt med användning av sina samband mellan vridmoment och vinkelutslag för massiva rund- och fyrkantstänger. Vi återkommer till Lagerhjelms insatser på materialprovningsområdet i ett följande avsnitt.

Knut Styffe

Knut Styffe (1824—1898), (18), Fig. 9, hade en studiegång som i mycket liknar Lagerhjelms. Han studerade vid Uppsala Universitet åren 1841—47 och avlade därmed först hovrättsexamen 1843, därefter bergsexamen 1847. År 1847—48 var han ordinarie elev och stipendiat vid Falu bergsskola och förordnades 1847 till auskultant i Bergskollegium. Han var t. f. bergsfiskal vid Sala silvergruva 1848—52, då

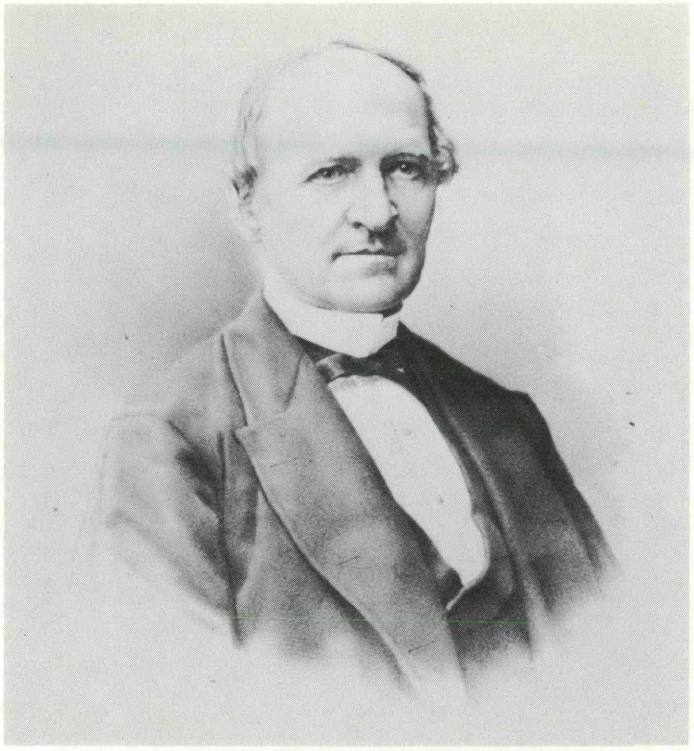


Fig. 9. Knut Styffe.

han utnämndes till kemie laborator vid Teknologiska Institutet i Stockholm. Han skulle komma att göra sin förnämsta insats som föreståndare för detta Institut, och sedermera för Kungl. Tekniska Högskolan (KTH). När sedermera den 12 maj 1876 Teknologiska Institutet blev Kungl. Tekniska Högskolan hade studentantalet under Styffes dittillsvarande egid på 20 år ungefär trefaldigats till inemot 300, fördelade på fem avdelningar och samtidigt hade antalet professorer ökats till 12. En högskolas anseende beror i första hand på kvaliteten hos de där verkande lärarna. Under sin föreståndartid måste Styffe ha haft ett mycket stort inflytande på professorstillsättningarna. Honom bör i hög grad tillgodoräknas förtjänsten att under denna tid så många framstående lärare kom att verka vid institutet. Det är väl ingen överdrift att påstå att ingen enskild man mer än han bidragit till att KTH från att ha varit en ingenjörsskola med begränsade uppgifter lyftes upp till en teknisk högskola av internationell klass. Dylik kvalitetsförbättring är alltid svår att genomföra och är vanligen en smärtsam procedur för berörda parter, i detta fall främst

för lärare och elever. Ett nedrivande av befintlig kvalitet är betydligt lättare att genomföra och kan gå fort nog.

År 1862 skall kung Karl XV ha färdats med ett järnvägståg som spårade ur, enligt en uppgift av H. I. Hannover (30) till följd av ett hjulbandsbrott. Hur som helst, en kunglig kommitté blev tillsatt för att utreda svenskt järns lämplighet för järnvägsmateriel och i kommittén insattes Knut Styffe. Han och hans medarbetare utförde ett tekniskt-vetenskapligt forskningsarbete av för sin tid högsta klass som publicerades i Jernkontorets Annaler Bd 21, 1866 (19) och även utgavs separat. Det blev i sammandrag översatt till tyska 1867 och engelska 1869 och rör sig i huvudsak på materialprovningens område. Jag återkommer nedan till resultaten. Jag har emellertid tagit med Styffe även i detta avsnitt och detta av ett särskilt skäl. Vid genomgång av tidigare forskares resultat i den nyss anförda avhandlingen (19) citerar Styffe på s. 23 ett arbete av tysken Wiedemann, som väl egentligen tar sikte på analogier mellan magnetisering och mekanisk belastning av metaller. Styffe säger där att Wiedemanns försök "visa att böjning icke höjer, utan snarare sänker elasticitetsgränsen för sträckning på den sida, hvarest fibrerna vid böjningen sammantryckas". Han drar sålunda av Wiedemanns experiment en märklig slutsats som uppenbarligen föregriper den s. k. Bauschinger-effekten. Enligt vedertagen uppfattning upptäcktes och beskrevs för första gången denna effekt av J. Bauschinger 1886 (20). Ännu efter snart 100 år står den i centrum för plasticitetsteorien och därmed för materialforskningen. Dess innebörd framgår kanske tydligast av Fig. 10, som må illustrera sambandet mellan töjning ε och spänning σ i de mest påkända yttersta fibrerna hos en balk som först bockas så att dessa fibrer befinner sig på den konkava sidan, huvuddelen OEFG. Därefter, då balken bockas åt motsatt håll kommer fibrerna i fråga att befinna sig på den konvexa sidan och fortsätter att deformera sig längs kurvdelen GHJ. Stångfibrerna tänkes sålunda i Fig. 10 deformerade längs den pilförsedda kurvan från $\sigma = 0$ i punkten O, först med tryckbelastning, dvs. med negativa värden av spänningen σ. Vid den så kallade stukgränsen $\sigma = -\sigma_{St}$ som vid mjuka stål vanligen numeriskt sammanfaller med sträckgränsen σ_{S1} vid jungfrulig dragning, börjar kurvan kröka av i punkten E. Trycket ökas därefter till punkten F, varifrån avlastning sker längs en rät linje FG, i huvudsak parallell med OE. I punkten $\sigma = 0$ dvs. i G, kvarstår permanent

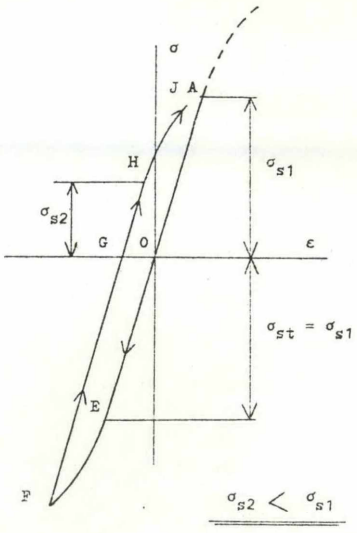


Fig. 10. "Bauschingereffekten", föregripen av K. Styffe.
"Bauschinger effekt", forestalled by K. Styffe.

krökning. Bockas därefter balken åt motsatt håll kommer de betraktade fibrerna att belastas med dragning och deformerar sig längs fortsättningen av den räta linjen FG till punkten H, där en ny sträckgräns σ_{S2} kan iakttagas. Det visar sig att σ_{S2} är mindre än σ_{S1}, ett fenomen som just brukar betecknas som Bauschingereffekt, men som i själva verket först omnämnts av Styffe och därför skulle kunnat benämnas efter honom. Bauschingers publikation ligger 20 år efter Styffes i tiden. Jag återkommer till Styffes avhandling som i övrigt är ägnad åt rena materialprovningsfrågor, i ett senare avsnitt.

Sammanfattningsvis kan sägas att genom Lagerhjelm och Styffe hade hållfasthetslärans grundbegrepp spänning, töjning, elasticitetsmodul, brottgräns, sträckgräns etc., om än med andra benämningar, blivit dels införda i Sverige, dels även internationellt sett skärpts och förfinats. På så sätt hade vägen lagts öppen för en rationell mekanisk materialprovning i vårt land. Samtidigt hade hållfasthetsläran beretts möjligheter att medverka till en rationell dimensionering av ingenjörernas konstruktioner.

B. Materialprovning

Järnvräkeri

När det gäller järn och även andra metaller har Sverige varit ett producerande och exporterande land allt sedan hedenhös, med eller utan vikingatåg. Man vet väl inte så mycket om detaljerna, (21). Enligt nyare undersökningar som bygger på dateringar med hjälp av

C_{14}-metoden och pollenanalys av torvlagren under de äldsta varphögarna vid Falu gruva, har varpen börjat tippas där redan på 1000-talet, alltså vid slutet av vikingatiden, (22). Redan dessförinnan hade man utvunnit järn ur myrmalm i åtskilliga hundra år.

En av våra äldsta kända järnmalmsgruvor är Utö i Stockholms skärgård. Den gruvan har varit i drift från 1100-talet och 700 år framåt i tiden. Malmen smältes först på Gotland (23), senare på bruk i Finland och på Norrlandskusten. Under medeltiden hade man börjat bryta malm ur berg litet var stans i vårt land. Nya tillverkningsmetoder av kontinentalt ursprung vann då insteg. Inflyttade utlänningar, särskilt tyskar, bidrog till livligare handelsutbyte.

Det visade sig att de svenska malmerna, tack vare sin stora renhet hade något extra att bjuda och exporten steg. Ända fram till Napoleonskrigen hade Sverige den största järnexporten i världen. Om nu det var renheten som här spelade största rollen är det klart att denna på något sätt måste kunna visas upp och verifieras när småningom utländska konkurrenter började göra sig gällande.

Utförseln skedde ursprungligen mer eller mindre direkt från producenterna, bönder som hade bergsbruket som binäring. Vikingarna blev forbönder och fortsatte sin järnexport med fredliga medel. Under tidig medeltid uppkom i vårt land köpstäder och dit koncentrerades småningom exporten. Konkurrensen mellan forbönder och köpmän i städerna lär väl ha förekommit även på andra håll men är särskilt känd från Gotland där den avgjordes till forböndernas nackdel 1361 genom Valdemar Atterdags ingripande vid slaget utanför Visby ringmur. Det blev småningom också bruk att märka handelsvarorna, i detta fall träfaten som innehöll det smidda järnet, i likhet med andra exportvaror från sill, pälsverk och tjära till ädla metaller för att köparen skulle tillförsäkras fullgod vara.

Järnet exporterades åtminstone fram till 1500-talets slut som osmundsjärn, men redan på Gustaf Vasas tid infördes stångjärnssmide för export. Tillverkarna ålades att förse sina alster med stämpel eller märke utvisande dess ursprung. Påbud om straff för den som icke följde bestämmelserna utfärdades. Den ostämplade eller eljes underhaltiga varan blev konfiskerad eller "vräkt", som termen löd. Härom kan man läsa hos riksbibliotekarien Erik Wilhelm Dahlgren i hans bok "Järnvräkeri och järnstämpling" (24), men nyare forskning har tillkommit.

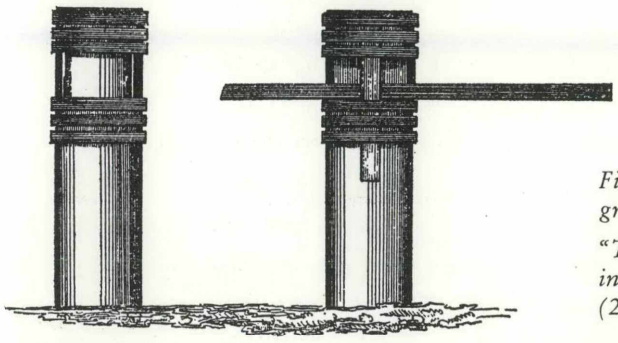


Fig. 11. Provstock enl. E. W. Dahlgren, (24).

"Test pole", primitive Swedish bending test, according to E. W. Dahlgren, (24).

Järnvräkeri synes tidigare ha förekommit sporadiskt, bl. a. i Holland och i hansestäderna, dock aldrig så konsekvent och målmedvetet som i Sverige. Någon större betydelse tycks emellertid järnvräkeriet även i vårt land ha fått först under Vasatiden. Den äldsta kända allmänna förordningen om tillsättande av järnvräkeri tillkom under Karl IX:s tid och följde på ett riksdagsbeslut i Norrköping 1604. Beslutet avsåg "hämmandet av bedräglig handel med osmundsjärn". Syftet med stadgan var tvåfaldigt, dels att förhindra att järn "ut ur riket föres utan att förtullas", dels att hålla uppe kvaliteten. Edsvurna vräkare skulle tillsättas och tillse att "järnet är så hugget som sig bör", samt även att faten med järnet vägs och stadens märke blir inbränt. Om så ej sker skulle de ansvariga, d. v. s. borgmästare, rådmän, tullnärer och vräkare åtalas och höga böter utdömas. Likafullt lär det ha dröjt länge om, innan stadgan blev effektiv. Den förnyades flera gånger med tillägg och detaljföreskrifter, bl. a. om hur odugligt järn skulle kunna undvikas ända från brytningsorten, under smältning och hantering o. s. v. Enligt "Transumt av Kongl. Maj:ts nådiga Resolution och Förklaring på samtlige Borgerskapets andragne besvär angående Järnvräkeriets inrättande i Bergslagen", given i Stockholm den 22 november 1686, bekräftas den tidigare förordningen av 1671 med tillägget att förbrutet järn skall konfiskeras till Kongl. Maj:ts Amiralitet att brukas till ballast. Det var Karl XI:s flottupprustning som satte sina spår.

På 1700-talet började man mera allmänt använda s. k. provstockar eller brytstolpar till provande av järnet, se Fig. 11. Dylika hade beskrivits i Bergskolegii protokoll av 1672, men detta hade tydligen ej blivit

mera allmänt bekant. Precisa bestämmelser för användningen av brytstolpar saknades, så att utrymme för godtycke uppstått. Järnet skulle böjas över stocken "till en halv cirkel, dock intet vidare eller tillbakars" och metoden kom så småningom till användning vid järnvågarna i köpstäderna. Tidigare hade man slagit järnstängerna mot vågtröskeln eller mot en sten, och på sina håll tycks de båda provningsmetoderna ha använts parallellt. Huru som helst, på detta sätt kunde man på sin höjd avslöja otätheter och kallbräcka hos järnet. I övrigt var man hänvisad till järnvräkarens okulärbesiktning och omdöme, vunnet genom erfarenhet. Vi ser här trevande begynnelse till systematisk materialprovning. Men som redan sagts, frånvaron av strikta bestämmelser och därav härflytande godtycke hade givit upphov till missnöje.

Det under envåldstiden tillbakahållna men ingalunda kvävda missnöjet med järnvräkeriet kom under frihetstiden till uttryck redan vid 1720 års riksdag. Ett förslag i Borgarståndet att förlägga provningen "vid hammaren", d. v. s. vid bruken skulle kunna ha lett till att mycken omgång kunnat undvikas. Förslaget blev remitterat till Bergskollegium för yttrande och förhalades så till 1723 års riksdag. Där beslöt man att bibehålla 1671 års stadga om järnvräkeri med vissa modifikationer till motverkande av den värsta byråkratien. Vi har därmed sett hur officiell materialprovning kom i gång i vårt land, i början trevande, så småningom mera målmedvetet.

Järnvräkeriet pågick med smärre modifikationer i Sverige ända till 1855. Stämpeltvånget bibehölls även då. En ny förordning om svenska järn- och ståleffekters stämpling utfärdades 1884 och upphörde först genom tillkomsten av varumärkeslagen av den 2 december 1960.

Järnstämplar och byggnadsjärn

Det har visat sig att järnstämplingen bidragit till studiet av stångjärnsmidets utveckling och användning, särskilt på byggnadsområdet. Ingenjör Bo Molander har sedan mitten av 1950-talet undersökt byggnadsjärn, speciellt murankarjärn (ankarslutare) i både trä- och stenhus från cirka ett tusental svenska fastigheter delvis under pågående rivning (25). Detta har framför allt gällt i våra städers gamla kärnor men har kompletterats med besök i kyrkor, slott och borgarhus. Molander har granskat över 50 000 byggnadsjärn och hopbragt en imponerande samling av över 1 000 stämplade stångjärn. Han har försökt sig på en typologisk åldersdatering av murankarjärn och anser

sig kunna spåra järnets ursprung från bruken. Dessa var ju vitt spridda inom det svenska väldet under den tid från 1600-talets mitt till 1900-talets början, som undersökningen omfattar.

Begynnande materialprovning på kontinenten

Vi har i föregående avsnitt sett hur på ett trevande sätt materialprovningen i Sverige tog sin början från rent praktiska, ekonomiska synpunkter och behov. Syftet var att prova de mekaniska egenskaperna hos materialet i stort sett, inom vida gränser oberoende av vad det skulle användas till. Men det är icke människan från början givet att se problemen i stort. Det var totalstyrkan i en smidd stång som man provade genom att slå den mot vågtröskeln eller mot en sten. För oss är det naturligt intill trivialitet att i stället skära ut en provstav t. ex. ur en plåt eller ur ett gjutet eller smitt ämne, prova staven i en dragprovmaskin och därav dra slutsatser om hur mycket hela plåten eller ämnet kan tåla. Det var icke så för praktikerna, d. v. s. för bergsmän, köpmän eller järnvräkare. Först Galilei betraktade den av tvärkraften böjda balken som uppdelad i fibrer. Han säges av Ch. Fremont ha inspirerats därtill genom att betrakta varvsarbetarnas i Venedig skeppsbyggeri och liknande (6). Galilei anställde likformighetsbetraktelser över skaleffekten då man övergick från modeller i reducerad till full skala och kom så på den vägen fram till sin formel för brottmomentet för en balk. Han utgick därvid från ett gränsfall, bristningslängden för en fritt upphängd tråd, påverkad enbart av tyngdkraften, samt från naturens avsky för tomrummet (horror vacui).

Det skulle bli i Frankrike och Holland som man på empirisk väg fullföljde denna tankegång och gjorde materialprov på trådar (Réaumur) eller utskurna stavar (Musschenbroek) under förra hälften av 1700-talet (26), (27). Galilei hade 1638 uppgivit bristningslängden hos fritt upphängda koppartrådar till 4 801 cubits (alnar), vilket skulle motsvara atmosfärtrycket, omräknat efter kopparns densitet. Réaumur hade redan 1722 publicerat diverse förslag till provningsapparater (jfr Fig. 12). Musschenbroek byggde en dragprovmaskin av besmantyp och undersökte med den en stor mängd material. Han visade att det vi kallar brottgränsen (cohaerentia absoluta) d. v. s. brottslasten, dividerad med ursprungliga tvärsnittsarean, var i stort sett oberoende av provstavens tjocklek. Hans arbete finns översatt till svenska (1747) av matematikern Samuel Klingenstierna, en tid Gustaf III:s

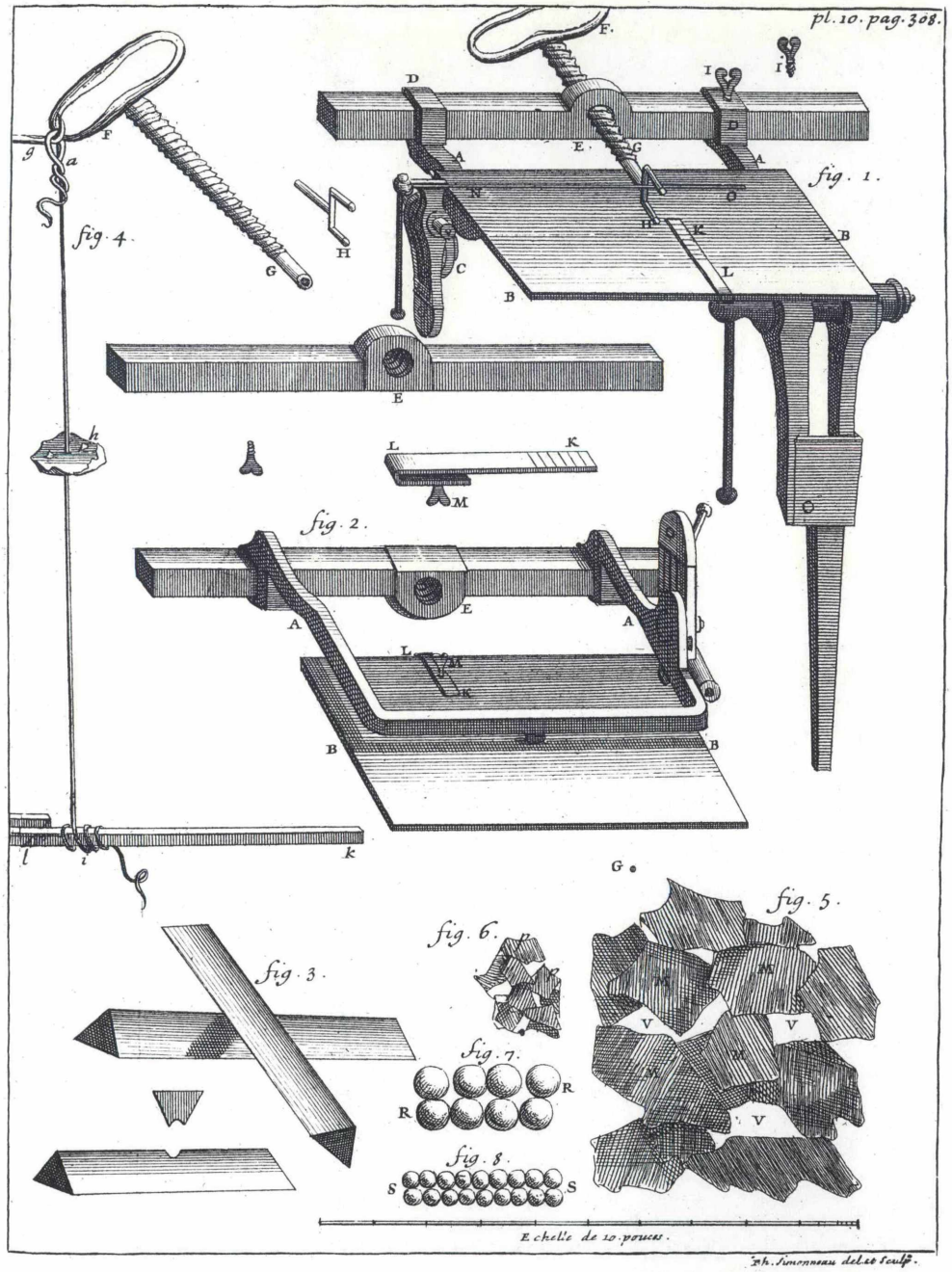


Fig. 12. R.-A. F. de Réaumurs olika anordningar för mekanisk materialprovning, återgivna efter Em. Swedenborg (37).

R.-A. F. de Réaumur's devices for mechanical testing of materials, reproduced from Em. Swedenborg (37). Down below to the left Réaumur's idea of a hardness test.

lärare. Boken innehåller därutöver en översikt av fasta och flytande kroppars mekaniska egenskaper och beskrivning av experiment till deras ådagaläggande, dock mest kvalitativa uppgifter.

Det första sammanfattande verket på området utkom 1798, författat av P. S. Girard, som däri upptog även sina egna omfattande hållfasthetsförsök med olika träslag, och blev mönster för andra dylika långt in på 1800-talet (28).

I Sverige skulle man komma att gå delvis andra vägar än på kontinenten. Förekomsten av koppar och ädla metaller liksom betydelsen av den svenska järnmalmens renhet för stångjärnsmidet gjorde att kemien tidigt fick användning inom hanteringen. Vid sidan om den redan under medeltiden genom järnvräkeriet bedrivna, ovan beskrivna officiella, mera formella sidan av materialprovningen lär redan före 1700-talet även en mera vetenskaplig sida av den mekaniska materialprovningen ha omhuldats. Man skulle med andra ord ha sysslat med vad vi nu kallar metodutveckling på materialprovningsområdet.

Paul von Wirtz

En av de första i Sverige som intresserat sig för materialprovning och hållfasthet var ingen mindre än konung Karl X Gustaf. Han var icke för intet av Wittelsbacharnas fantasibegåvade ätt. Hans intresse för havsisens hållfasthet år 1658 är välkänt. Där var Erik Dahlberg hans man. Mindre känt är att han i sin tjänst tog den i Holstein födda krigaren och diplomaten Paul von Wirtz (även skrivet Würtz, Wurtz eller Wurtzius) (29), se Fig. 13.

Wirtz var född av borgerliga föräldrar i Husum, Holstein 1612. Han var begåvad med otrolig ambition och vetgirighet och genomgick en jesuitskola i Wien. Vid Wallensteins ockupation av Holstein 1628 kom han i kejserlig tjänst och avancerade därunder till löjtnant. Sedermera anställdes han i 30-åriga krigets slutskede som kapten i svensk tjänst. Han avancerade snabbt till överste och kom i nära beröring med dåvarande överbefälhavaren, sedermera kung Karl X Gustaf. Wirtz och Karl Gustaf synes ha haft gemensamma intressen och en intim vänskap uppstod mellan kungen och den 10 år äldre Wirtz. Någon privat korrespondens dem emellan tycks inte vara bevarad. Det här intressanta tidsskedet skulle i så fall varit representerat i den s. k. Stegeborgsamlingen i Riksarkivet, men där finns ingenting bevarat. Wirtz användes av Karl Gustaf även för diplomatis-



Fig. 13. Paul von Wirtz, enl. (29).
Paul von Wirtz, according to (29).

ka uppdrag. Sålunda förmedlade han framgångsrikt frieriet till prinsessan Eleonora av Gottorp, sedermera vår drottning Hedvig Eleonora d. ä.

Mellan 30-åriga kriget och Karl X Gustafs polska krig företog Wirtz vidsträckta resor i Europa och besökte bl. a. Rom och Paris. Därunder torde han ha haft kontakt med den franska arkitekten och matematikern F. Blondel, som varit en av Galileis sista lärjungar. När Karl X Gustaf började sitt polska krig var Wirtz åter i svensk krigstjänst och avancerade snart till generalmajor. Han utmärkte sig vid försvaret av Krakau, utnämndes till generallöjtnant och fick friherrlig värdighet med godset Örneholm i Kexholms län som förläning. Han blev också guvernör i Stettin efter stormningen av Fredriksodde 1657. Känslig för bristen på uppskattning från svenska regeringens sida efter Karl X Gustafs död 1660 övergick han i dansk tjänst och blev dansk fältmarskalk 1665. En tid var han även i holländsk krigstjänst.

Han samlade en stor förmögenhet och bosatte sig 1674 i Hamburg, där han avled 1676. Han ligger begraven i Oude kerk i Amsterdam. Han testamenterade sina ägodelar till sin hushållerska trots att han hade en dotter utom äktenskapet. Testamentet blev protesterat och föranledde rättegång flera hundra år efter hans död.

Den som dragit fram Wirtz ur glömskan är fransmannen Ch. Fremont som på Första internationella materialprovningskongressen i Paris 1900 gav en ambitiös historisk översikt av då kända ansatser till materialprovning. I fråga om Wirtz stöder sig Fremont på P. S. Girards arbete av 1798 (se ovan). Galilei hade ju 1638 publicerat sin teori för sambandet mellan drag- och böjhållfasthet hos balkar samt angivit formen för en jämnstark konsolbalk under vissa enkla förutsättningar om sektionsform och belastning. I Girards arbete återges två brev till Wirtz från den nyssnämnde arkitekten Blondel. Denne hade sedermera publicerat sin korrespondens i franska vetenskapsakademiens "Memoirs", Bd 5, 1666—99. Det första brevet, som är avfattat på latin, bär titeln "Epistola ad P(*aulum*) W(*urzium*) in qua famosa Galilei proposito discutitur". De här tillfogade av mig kursiverade orden har tillfogats i Nouvelle Biographie Generale, Tome 6, Paris 1955, där man tydligen sätter utom tvivel att det just är Wirtz som är skrivelsens anonyme adressat. Den danske professorn H. I. Hannover, chef för statspröveanstalten i Köpenhamn har tagit upp Wirtz' insats till kritisk granskning i ett bidrag till 5:te internationella materialprovningskongressen i Köpenhamn 1909 (30).

Han har låtit översätta Blondels latin till danska. Brevet är ursprungligen skrivet 1657. Av översättningen framgår att det rört sig om skrovdetaljer till ett svenskt örlogsskepp "Leo Hyperboreus" och att Wirtz på grund av sina tidigare experiment (sic!) blivit besviken på Galileis teori för jämnstarka balkar. Wirtz har förmodligen genom tidigare korrespondens med Blondel, med vilken han tycks ha varit mycket intim, fått kännedom om Galileis arbete och speciellt om hans teori för jämnstarka balkar. Blondel har i brevet delgivit Wirtz sina egna funderingar i ämnet som vi här kan förbigå. Han uppmanar Wirtz att meddela honom sin åsikt om saken, "särskilt när du har gjort experiment med din sedvanliga flit och duglighet". Så långt Hannover som i huvudsak ej har mera att meddela om korrespondensen.

Det har varit mig möjligt att med tillgängliga skeppslistor verifiera

att ett svenskt örlogsskepp med namnet "Svenska Lejonet" verkligen byggts av Västerviks skeppsbyggnadscompagnie 1656 samt övertagits av svenska flottan 1658. Det förlorades i kriget mot Danmark 1676. I papperen härom finns dock Wirtz' namn icke nämnt. Om vi erinrar oss att denne vid tidpunkten 1657 befann sig i Polen eller Stettin får man förutsätta att han just då hade föga tid med hållfasthetsexperiment. Hans brev till Blondel måste ha skrivits före polska fälttågets början och de citerade experimenten utförts redan dessförinnan.

Det enda påtagliga beviset för Wirtz' pionjärgärning är sålunda Blondels långrandiga och för oss rätt likgiltiga publikation, varigenom den räddats undan glömskan. Om Wirtz' arbete verkligen utförts måste det betraktas som en enstaka företeelse, en stormsvala som möjligen bådade nya tider för hållfasthetsläran i Sverige.

Chr. Polhem

Redan under 1600-talet började "Nordens Arkimedes" Christopher Polhem (1661—1751) sin verksamhet. Denna kom till allra största delen att beröra andra ting än det som här skall intressera oss, nämligen den mekaniska materialprovningen. Han hade fått kämpa sig upp från samhällets botten. Han lärde sig latin, tidens lärda språk, först vid vuxen ålder. Han var ett apparatsnille och hans geni satt så att säga i fingrarna. Han var i första hand uppfinnare och hans verksamhet skulle få stor betydelse för de svenska bergverken t. ex. för pumpar och uppfordringsverk i gruvor. Även till utlandet sträckte sig denna verksamhet (31). För detta har han lovprisats ända till våra dagar. Han hörde till Kungl. Vetenskapsakademiens första uppsättning av ledamöter men hade då, på 1740-talet, i huvudsak sitt verk bakom sig (32).

Polhems teoretiska kunskaper i mekanik torde ej ha nått mycket utöver Galilei, men han hyste respekt för teorierna. Hans materialkännedom, vunnen genom praktisk erfarenhet och säkert många besvikelser, stod på höjden av sin tid. Något bidrag till utveckling av de mekaniska provningsmetoderna har han veterligen icke givit. Han har aldrig, utom i rena undantagsfall (34), givit några egentliga bidrag till materialforskningen, varken i sina publikationer eller i de brev som publicerats av A. Liljencrantz (33). Ej heller i den brev- och manuskriptsamling (J. G. Gahn m. fl.) som citeras av D. Odqvist (35). På denna punkt har jag ej funnit skäl att frångå min genom

tidigare studier vunna uppfattning (36). Man får dock inte glömma att Sverige just genom Polhem varit icke blott tagande utan även i rikt mått givande, internationellt sett (31). I början av 1700-talet infördes t. ex. hans uppfinningar vid de tyska bergverken i Harz. Han bidrog också till att sprida kunskap om sina uppfinningar genom att han mottog utländska lärjungar samt genom sitt modellbygge och sitt "mekaniska alfabet". Hans undervisningsform var verkligen något vid sidan om det konventionella. Tydligen var dock kretsen av efterföljare i vårt glesbefolkade land otillräcklig för att bygga upp en självförsörjande skola i vårt land, men det kan man knappast lasta Polhem för.

Em. Swedenborg

Den svensk som veterligen först producerat sig i facket är vårt universalgeni, dåvarande assessorn i Bergskollegium, Emanuel Swedenborg (1688—1772) i hans 1734 på latin publicerade verk "De Ferro", översatt till svenska av Hj. Sjögren 1923 (37). Här får man veta allt om järns framställning ur olika malmer i Sverige och i utlandet, kompilerat ur den samtida litteraturen, t. ex. Réaumurs "L'art de convertir le fer . . ." som utkommit 1722 (26). Swedenborg tillfogar också egna kommentarer. Men det rör sig dock mest om kvalitativa egenskaper t. ex. om brottytans utseende vid brustna stänger, där figurerna lånats från Réaumurs arbete. Andra delens fjärde paragraf av detta omfångsrika verk i folioformat handlar om "sätten att probera och utröna kvaliteten hos tackjärn och smidesjärn". Om tackjärnet sägs att det särskilt proberas "genom att efter färskning utsmides till tunna plåtar". Smidesjärnets art och beskaffenhet utrönes genom undersökning av brottytorna. Det talas om kallbräcka och rödbräcka, vilka defekter hänföras till låg, respektive för hög svavelhalt. Som bekant är enligt nutida uppfattning, som tycks härröra från Berzelius, endast rödbräckan beroende av svavelhalten medan kallbräckan anses bl. a. bero på för hög fosforhalt.

Swedenborg redogör för provtagningspraxis och säger sig ta hänsyn till de sätt som användas i Sverige, England och annorstädes. Han säger exempelvis "man tager 2 à 3 stänger av 100 och sticker dem en och en i en skåra, d. v. s. ett hål på en i marken väl fastsatt stock (tydligen den ovannämnda provstocken, Fig. 11), och böjer stången i en lätt båge och återför den sedan till dess raka längdriktning; om stången tål böjningen och på nytt återgår till rak form, är

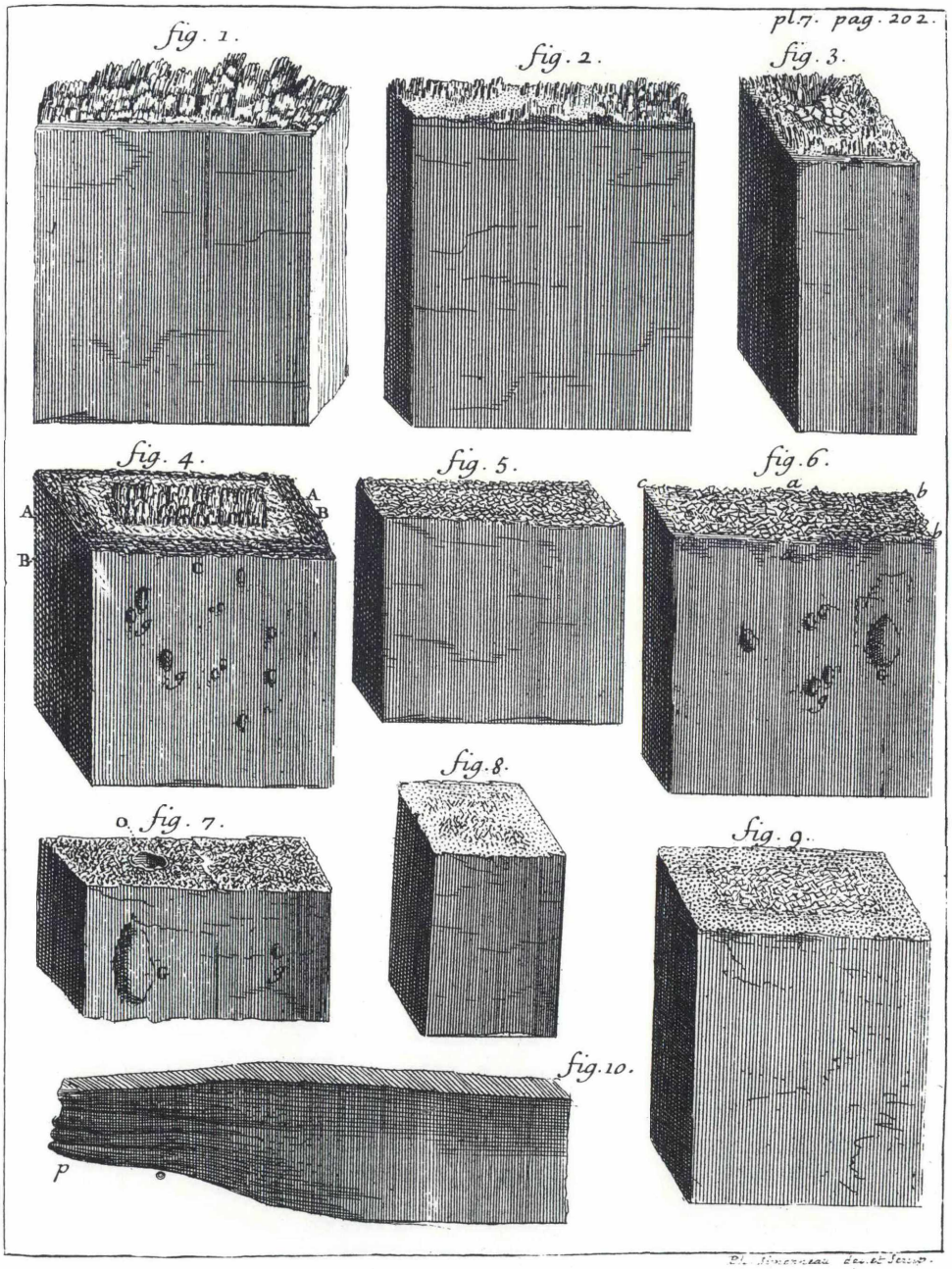


Fig. 14. Brottytor hos R.-A. F. de Réaumur, återgivna hos Em. Swedenborg (37).

Fractured iron and steel bars acc. to R.-A. F. de Réaumur, reproduced from Em. Swedenborg (37).

detta bevis på en viss hållfasthet. På nytt böjes den i en kurva eller till en cirkelbåge; om man kan böja den i flera bågar och sedan tillbaka till rät linje så är detta tecken på önskvärd hållfasthet." Här har Swedenborg tydligen begärt mera än vad man enligt ovan i praktiken använt eller ens i förordningen föreskrivit. Liknande teknologiska prov finns för övrigt omnämnda i Christoffer Polhems "Patriotiska Testamente", nedtecknat 1746, tryckt i Stockholm 1761. Det rör sig som man ser uteslutande om praktiska teknologiska prov, återgivna efter smedernas eller vräkarnas erfarenhet och i förekommande fall illustrerade efter Réaumur.

Femte paragrafen, sid. 325—334 handlar "om stålets kännetecken och egenskaper, enligt herr Réaumur", som bedömes efter brottytans utseende just så som visats i Fig. 14. På s. 330 rekommenderas provning av ståls hårdhet genom att fastställa möjligheten att repa ytan med sju olika hårda material från "1. vanlig fil; 2. bergkristall; 3. hård, genomskinlig kiselsten; 4. agat o. s. v. till och med 7. diamant". Mycket längre har man inte kommit i dag när det gäller vetenskaplig hårdhetsdefinition.

Slutligen har genomgång av Swedenborgs 1716—17 publicerade tidskrift Daedalus hyperboraeus, h. I—VI ej heller givit något som tyder på intresse för de mekaniska materialprovningsmetoderna.

M. Triewald m. fl.

Mot slutet av 1600-talet hade de svenske lärde börjat intressera sig för kontakter västerut mot England. Därtill bidrog med säkerhet tillkomsten av den engelska vetenskapsakademien, Royal Society år 1662. In på 1700-talet hade Em. Swedenborg besökt England. Mest påverkad från detta håll var emellertid sedermera ingenjörcapitainen Mårten Triewald (1691—1747), en av stiftarna till den Kungl. Svenska Vetenskapsakademien (KVA) 1739. KVA:s historiograf, professor Sten Lindroth skriver om förspelet till Vetenskapsakademiens stiftande: "Ingen tvekan råder om att huvudpersonen, den som gick havande med tanken, var Mårten Triewald". Triewald hade vistats längre tid i England och t. o. m. haft personlig kontakt med Newton. Han medförde hem en mängd apparater för fysikaliska experiment och var den förste som byggde en fungerande ångmaskin för ett pumpverk vid Dannemora gruva. Triewald demonstrerade nu experimenten och höll populära föreläsningar för unga adelsmän på Riddarhuset åren 1728—29 (38). Att döma efter de 1735 och 1736 hos

P. J. Nyström i Stockholm tryckta föreläsningarna var dessa mest av kvalitativt slag men säkert instruktiva och stimulerande för åhörarna. De tillfredsställde under Frihetstiden ett aktuellt allmänt behov. Den tryckta skriften är ordrik och innehåller talrika hänvisningar till föregångarna, både de flesta som ovan nämnts och andra, dock utan att citera några publikationer. Ej heller finner man, trots att både Réaumur och Musschenbroek nämns, några uppgifter av intresse för oss.

Föreläsningar (eventuellt med demonstrationer) hölls i viss utsträckning även på andra håll inom Svenska Riket, t. ex. av Daniel Menlös. Då de emellertid icke nådde upp till samma omfattning som Triewalds, lämnas de därhän i detta sammanhang.

Sven Rinman

Assessorn i Bergskollegium Sven Rinman (1720—92) publicerade 1782 sin berömda bok "Försök till Järnets Historia" i två delar, tillägnad Herrar Delägare uti den svenska Bruks-Societeten (39). Rinmans bok är utförligare än Swedenborgs "De Ferro" men går i fråga om materialprovningsmetoder ej mycket utöver denna. Rinman har klart för sig att kallbräcka icke orsakas av för låg svavelhalt men enligt de flesta metallurgers åsikt beror på inblandning av någon "halvmetall". Ur kemisk synpunkt befinner han sig alltjämt på phlogistonteorins ståndpunkt.

Liksom Swedenborg citerar Rinman Réaumurs arbeten och tar fasta på att denne faktiskt varit inne på olika slag av mekanisk provning. Fig. 12, som är hämtad från Réaumurs Pl. X, visar t. v. ("fig. 4") en enkel dragprovanordning för tråd och i övrigt en apparat till bestämmande av sambandet mellan seghet och härdningsgrad hos glödgad ståltråd (fig. "1, 2") där utböjningen tas som ett mått på segheten. Några resultat av försök hade Réaumur dock ej här uppgivit, ej heller Swedenborg eller Rinman.

I paragraf 30 på sid. 91—94 redogöres för järnets spänstighet eller elasticitet som sammanställes med framställningsmetod, täthet och andra egenskaper, dock endast i allmänna ordalag utan kvantitativa uppgifter. Efter utförlig redogörelse för hur smidigt järn framställes kommer Rinman i paragraf 117 på sid. 439 in på av bergmästare Qwist anställda försök till jämförelse mellan olika svenska och utländska järnsorter i vad avser styrkan och segheten, av allt att döma utförda dels enligt Réaumurs metod: "fig. 4" av vår Fig. 12, dels

genom böjning "efter determinerade grader på en därtill lämpad gradbåge". Efter jämförelsen som anses tala till förmån för en i Stockholm tillverkad tråd från ämnesjärn, "sammansmällta av det Spink och Järnskro, som faller hos Hofslagare", hänvisas till Musschenbroeks tidigare omnämnda arbete "Om Kropparnas sammanhållande eller Cohaerentia" (27). De kontinentala framstegen var tydligen på 1780-talet kända i Sverige. Likväl gick det trögt med införandet av mekaniska provmetoder. Kan man våga en förmodan att den höga utvecklingen av svensk 1700-talskemi snarast motverkat utarbetandet av mekaniska metoder? Sedan kom under 1800-talet J. J. Berzelius som, trots att han inte alls var främmande för mekaniska prov, likväl bidrog till kemiens dominans, som skulle verka länge än. Enligt en kommentar av C. S. Smith (engelsk översättare av Réaumurs arbete (26) p. 70, Chicago 1956) uppfanns och utvecklades blåsrörskemien av svenska 1700-talskemister.

Provning av militär materiel

Vapentillverkning har givetvis förekommit i Sverige alltsedan hedenhös. Yxor, knivar, spjutspetsar och svärd tillverkades hantverksmässigt genom medeltiden och långt in på nyare tiden, likaså hjälmar, harnesk och brynjor. Man kan se dem t. ex. i Visby museum, där man bevarat de fallnas vapen från Korsbetningen, massgraven efter slaget utanför ringmuren en varm sommardag 1361.

Man frågar sig om ej leveranserna av vapen och annan materiel för militärens behov, särskilt under vår stormaktstid, kan ha föranlett införande av officiell, normbelagd provning. Så tycks ha varit fallet, dock blott i mycket begränsad omfattning. Man får inte glömma att en viktig förutsättning för normerade prov är existens, åtminstone i viss mån, av serietillverkning utförd i tempon. Sådan förekom endast undantagsvis under hantverkets dagar. Slutproduktens godhet och användbarhet fick ensamt bli avgörande för godkännande av leverans.

I fråga om eldvapentillverkning, vare sig det gäller handeldvapen eller grövre pjäser, befann man sig genom hela 1500-talet enbart på hantverksstadiet (40). Det finare bössmidet var med ett undantag, Arboga faktori, knutet till de kungliga eller enskilda slotten och de där verksamma s. k. rörsmederna. Mot 1500-talets slut uppträder de första "borgerliga" bössmakarna i Stockholm, som då bildade ett skrå. Vid sekelskiftet och under 1600-talets första decennium organi-

seras faktoriverksamheten. År 1657 utfärdas en faktoriordning för Arboga och sedan följde andra slag i slag som en följd av Gustaf II Adolfs krigsrustningar. År 1620 anlades Söderhamns gevärsfaktori och kvarlåg där till 1813, då det flyttades till Eskilstuna under namn av Carl Gustafs stads gevärsfaktori, som ännu består. Man övertog därvid både namn och verkstäder från Carl Gustafs manufakturverk, privilegierat i Eskilstuna år 1654 för Reinhold Rademacher. Någon särskild materialprovning för bössmakeriet torde ej ha förekommit under den beskrivna perioden. Slutproduktens godhet var avgörande för godkännandet, som gjordes beroende av "beskjutning" och inspektion, sedermera stadfäst i Kongl. Maj:ts och Rikets Krigs-Collegii Instruktion för nya Handgevärs med tillhörigheters besigtigande, given Stockholm 29 juli 1830. För dessa uppgifter har jag att tacka bergsingenjör E. Hermelin, Eskilstuna.

Uppkomsten av fabriksmässig tillverkning vid s. k. faktorier aktualiserade emellertid frågan om standardisering av provningsmetoder. Ett berömt exempel är tillverkningen av värjor vid Vira bruk i Roslagen. Den äldsta förordningen är daterad 15 juli 1682 och gäller "Proberingen av the 8 000 wärjor som Kongl. Rådet och Presidenten Wällborne Hr Lars Flemming ägare av Wira sig påtagit till Kongl. Maij:ts tjänst innevarande åhr att lewerera".

Värjklingornas tillverkning finns utförligt beskriven i Rinmans ovan citerade arbete (39), till denna del återgivet av Heribert Seitz i Meddelande nr 18 från Kungl. Armémuseum 1957 (41). De provades dels medels slag med flatan mot en 4 tums furuplanka dels med att böjas "Utj een godh Bugt på hwar sida" och fick därvid varken brista eller "stå efter", d. v. s. icke lämna kvarstående deformation. Provade klingor märktes med ett P.

Ursprungligen krävdes s. k. dubbel bukt, d. v. s. klingan skulle böjas till S-form. Därvid blev emellertid kassationen så stor att man år 1704 tvangs att avstå från denna del av provet. Tydligen hade Karl XII:s polska krig tvingat till forcerad produktion av värjor.

Senare, från och med 1775, då det svenska kavalleriet hade övergått från stickvärja till huggsabel, skulle dessa levereras från Eskilstuna. Rinman beskriver i ovan citerade arbete kontrollproven för svenska arméklingor sålunda:

"Wid Swenska Krono-Leweranser, måste Commis-Klingor utstå det provet, att kunna nedböjas till en tredjedel av klingans längd och

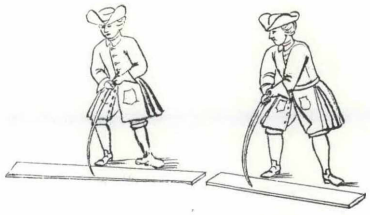


Fig. 15. Svenskt böjprov för klingor, efter H. Seitz (41).

Swedish bending test for sword blades, reproduced from H. Seitz (41). Blades must stand bending deflection to one third of their length without permanent set.

då springa rätt tillbaka, utan att lama, krokna eller brista. Stålets styrka försökes åter med starka hugg twärt öfwer en Björkståck, hwilket Klingan äfwen utan skada måste uthärda innan hon approberas."

Denna formulering är av särskilt intresse då den till skillnad från förut nu *för första gången inför ett kvantitativt krav vid provningen.*

Docent H. Seitz har upplyst mig om att den nytillkomna fordran var betingad av Gustaf III:s upprustning i följd av besvikelser som det svenska kavalleriet utsatts för under sjuårskriget mot Fredrik den Store. Den karolinska kavalleritaktiken användes nu ej längre och klingorna från Vira hade deklinerat i kvalitet. Tyvärr är det ej fullt klart hur bestämmelsen "nedböjes till en tredjedel av klingans längd" tillämpats. Seitz återger i sin ovan citerade skrift "svenskt böjprov 'bugt' enligt J. Möllerheim", se Fig. 15, återgiven efter Seitz. Vidare förefaller det som om den vänstra provaren V i figuren genom att sätta kroppen emot fästet lägger in mera normalkraft Q i klingan medan den högra H böjer den enbart med hjälp av tvärkraft P vid spetsen och moment Pl med tvärkraft P från handgreppet. Docent Seitz anser det mest troligt att man mätte båghöjden a till kordan mellan spetsen och fästet med en pinne.

Man kan under förutsättning att klingan utgöres av en rak prismatisk balk med längden l, och tvärsektionen rektangulär med bredden b och höjden h göra följande enkla kalkyl i anslutning till Fig. 16, där ett koordinatsystem x, y inlagts med origo vid fästet och x-axeln riktad mot klingspetsen och a antar värdena a_V respektive a_H i de båda fallen.

I fallet V gäller att klingan utknäckes enligt Eulers fall II i en sinusbåge $y = a_V \sin \pi x/l$ så att maximimomentet blir $M_V = Qa_V$, där $Q = \pi^2 EI/l^2$ och $I = bh^3/12$. Maximispänningen blir då

$$\sigma_V = \frac{M_V h}{2I} = \frac{\pi^2}{2} \cdot \frac{a_V h}{l^2} E \qquad (V)$$

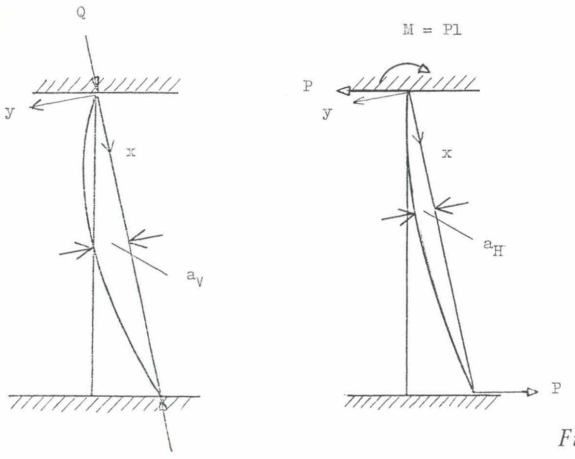


Fig. 16. Deformation vid klingprovning. Bending deflection at sword blade testing.

I fallet H gäller i stället att momentet i en godtycklig punkt x blir $M(x) = P(l - x) = -EIy''$ med villkoren $y(0) = 0$, $y(l) = 0$. Integration ger $-EIy' = P(lx - x^2/2 + C)$ där C = konstant. Vidare $-EIy = P(lx^2/2 - x^3/6 + Cx)$ där $C = -l^2/3$. Här blir $y_{max} = a_H$ och inträffar för $x = l(1 - 1/\sqrt{3})$, alltså $a_H = Pl^3/9\sqrt{3}EI$, så att maximispänningen i detta fall blir

$$\sigma_H = \frac{Plh}{2I} = \frac{9\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{a_V h}{l^2} E \qquad (H)$$

Vid i övrigt lika förhållanden dvs. $a_V = a_H$ erhålles för kvoten $\sigma_V : \sigma_H$

$$\frac{\sigma_V}{\sigma_H} = \frac{\pi^2}{2} \cdot \frac{2}{9\sqrt{3}} = 0{,}63$$

dvs. fall V innebär ett lättare prov än fall H.

Vi har här $a/l \geq 1/3$. Antages t. ex. $h/2l = 1/500$ och $E = 200000$ N/mm² = 20000 kp/mm² får man en fordran

$$\sigma_V \geq \pi^2 \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{500} \cdot 200000 = 1320 \text{ N/mm}^2 \cong 132 \text{ kp/mm}^2$$

medan formel (H) skulle ge

$$\sigma_H \geq 2100 \text{ N/mm}^2 \cong 210 \text{ kp/mm}^2$$

Hursomhelst innebär den under Gustaf III nytillkomna fordran i realiteten en sträckgränsfordran (egentligen stukgräns-) för materialet, intressant därför att det torde vara första gången överhuvudtaget som en dylik förekommer. Det kan tilläggas att detta icke är enda gången som provningsverksamheten fått impulser från militärt håll. Vi återkommer härtill i ett följande avsnitt.

Pehr Lagerhjelm

Vi har i ett tidigare avsnitt sett hur Lagerhjelm gjorde sitt livs bestående vetenskapliga insats med utgångspunkt från en rent praktisk frågeställning: lönar det sig att i Sverige införa den i England utvecklade metoden att varmvalsa stångjärn?

I England hade Lagerhjelm 1825 hos en firma Brunton o. Co, Kättingfabrik, haft tillgång till en hydraulisk dragprovmaskin, vars konstruktion hölls strängt hemlig. Beträffande denna maskin skriver Lagerhjelm i en not på sid. 19 av sin tidigare citerade avhandling "Denna machin var construerad 1813 av Hr Fuller, och sannolikt på samma grund som Brahmas präss". Det har visat sig att engelsmannen Thomas John Fuller sedermera erhöll patenten nr 5859 av 1829.10.28 och nr 5943 av 1830.06.19, "Mechanical Power applicable to machinery of different description". Därmed blir det begripligt att man 1825 i England var återhållsam att meddela något om dess konstruktion.

Efter hemkomsten avgav Lagerhjelm den 1 nov. 1825 rapport till fullmäktige i Jernkontoret. Det hade befunnits att det hammarsmidda järnet var betydligt ojämnare än det valsade. Fullmäktige beviljade nu anslag till fortsatta försök. Lagerhjelm hade trots hemlighetsmakeriet förstått konstruktionsprincipen för den fullerska maskinen och efter anvisningar kunde nu G. Broling konstruera och bygga en maskin för 10 tons maximalbelastning, se Fig. 17. Nödiga medel, 1 000 à 1 500 rdr b:co anvisades och maskinen kunde demonstreras vid Brukssocietetens sammanträde 1826. Man arbetade snabbt. Den 26 febr. samma år godkände Fullmäktige Lagerhjelms plan för försöken och dessa sattes omedelbart i gång under medverkan av V. Hammarskjöld, som även bidragit till maskinens utformning. Dessutom samarbetade Lagerhjelm med andra, särskilt med J. J. Berzelius, E. Rothoff och G. Broling.

Den hydrauliska dragprovmaskinen i Fig. 17 är på sitt sätt märklig. Som framhållits av Timoshenko kom den att stå modell för den maskin som sedan användes av G. Lamé i St. Petersburg vid hans grundläggande experiment till bekräftande av elasticitetsteorien. Därmed blev den också urbilden vid utvecklingen av hydrauliska dragprovmaskiner på kontinenten intill våra dagar.

Lagerhjelm gjorde sålunda sina "försök att bestämma valsadt och smidt stångjerns täthet, jemnhet, spänstighet, smidbarhet och styrka" (17). Jag förbigår här de i avhandlingen medtagna omfattande utred-

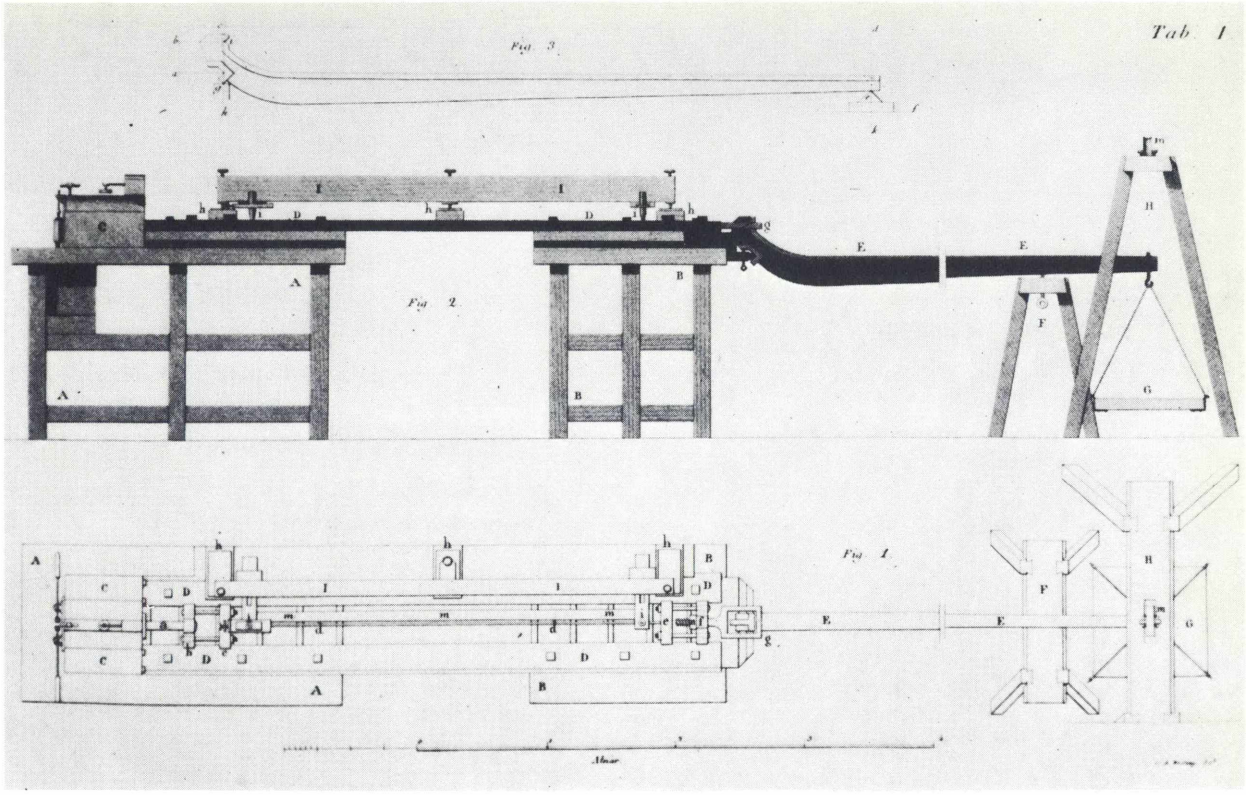


Fig. 17. Lagerhjelms hydrauliska dragprovmaskin.
Lagerhjelm's hydraulic tensile testing machine.

ningarna angående färskning och räckning av försöksmaterialet vid olika svenska bruk och engelska valsverk.

Järnets "spänstighet", d. v. s. elasticitet, undersöktes med statiska försök i töjning (dragning), böjning och vridning inom och utöver elasticitetsgränsen samt dessutom genom vridsvängningar. Töjningsförsöken gjordes i den nämnda hydrauliska dragprovmaskinen på stänger med en mätlängd av 6 fot, d. v. s. c:a 1 800 mm. Förlängningarna uppmättes med mikroskop med 30 gångers förstoring. Härigenom uppnåddes tillfredsställande känslighet vid töjningsmätningar. Böj- och vridningsförsöken ävensom svängningsförsöken gjordes i en särskild rigg, se Fig. 18, där stängerna var fast inspända i ena ändan vid vrid- och svängningsförsöken, fritt upplagda vid böjförsöken. Vid svängningsförsöken var på den fria ändan en svängmassa påsatt.

Redogörelsen för resultaten är ambitiös; man följer grundsatsen: "att nemligen göra Läsaren alldeles oberoende av vårt eget omdöme".

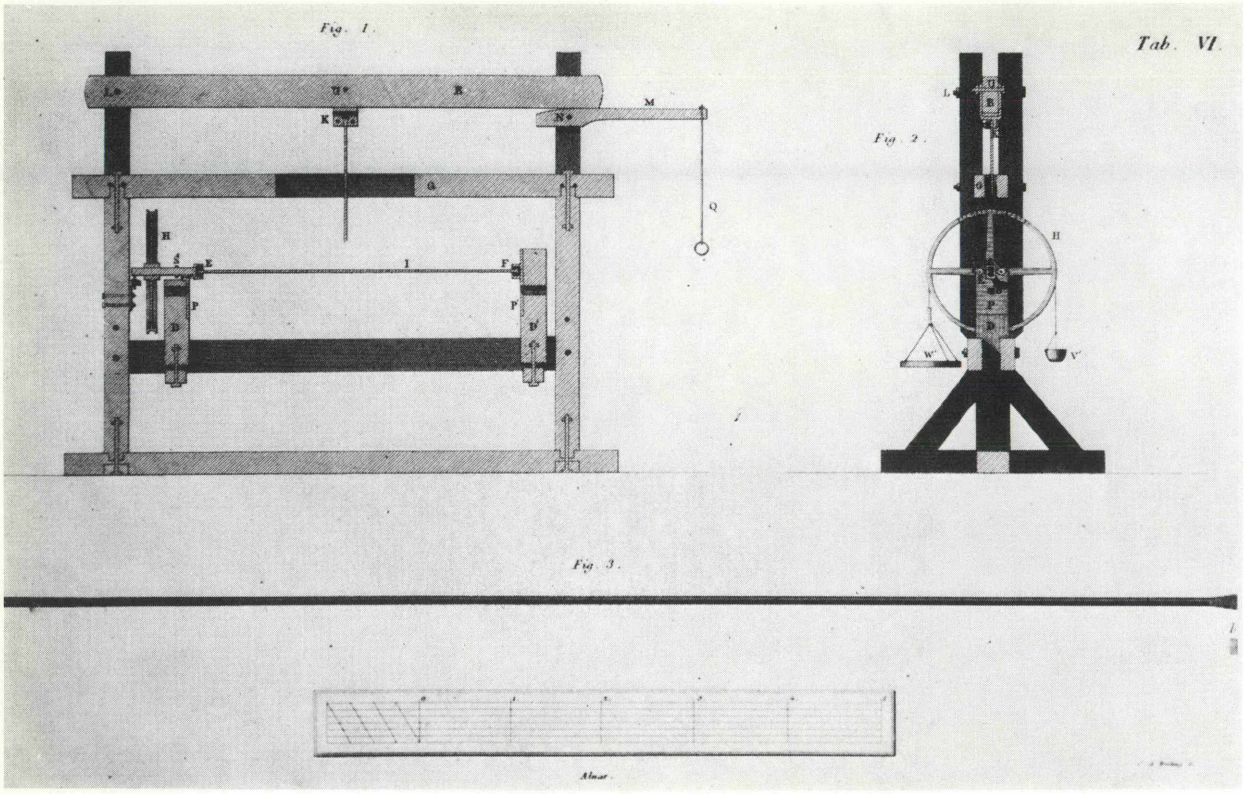


Fig. 18. Lagerhjelms böj- och vridprovmaskin.
Lagerhjelm's testing machine for bending and torsion.

Han börjar med att redovisa spänstighetsförsöken ty spänstigheten är en "egenskap, hvars undersökning icke förändrar jernets tillstånd". Denna del av experimenten utfördes alltså tidsmässigt först.

Sedan elasticitetsteorierna etablerats på sätt som ovan redovisats under A, kunde Lagerhjelm jämföra värdena på elasticitetsmodulen E i de fyra fallen: töjning, böjning, vridning och vridsvängningar. Han fann att värdena på E blev lika inom försöksfelen för 63 undersökta stänger, varav 33 rundstänger och 30 fyrkantstänger. Ej heller kunde någon åtskillnad göras mellan engelskt järn (14 stänger) och svenskt (resten).

Med garvning förstås följande behandling av provstångsämnena: utsmidning, omläggning, hopvällning och förnyad utsmidning, varigenom den effektiva utsmidningsgraden blir betydligt större än vid enbart en gång utsmidd eller valsad stång. Ej heller garvning innebar någon skillnad med avseende på elasticitetsmodulen E. Författaren

jämför sina resultat med andra forskares (Duleau, Tregold), som ej utfört ens tillnärmelsevis så omfattande försök, och finner god överensstämmelse.

Lagerhjelm säger på sid 219 "men deremot draga vi af dessa resultat den följd, att garfningen ökar jernets spänstighet". Detta torde vara en felskrivning. Det framgår av sammanhanget att han avser "spänstighetens gräns", d. v. s. vad vi skulle kalla sträckgränsen eller kanske hellre resttöjningsgränsen. Författaren har jämfört även denna storhet för de försök, där den bestämts (inalles 28) och anser sig icke kunna draga några bestämda slutsatser av för lågt antal prov. Spridningen är också betydande, som man kunnat vänta.

Lagerhjelm går så över till en granskning av de olika undersökta *järnsorternas täthet* och "brakfrihet" och uppför så följande ordningsföljd "då man vill vinna ett homogent järn":

1) garvat och valsat svenskt stångjärn
2) engelskt bästa stångjärn och linjärn (här avses kättingjärn)
3) ogarvat och valsat svenskt stångjärn
4) garvat och smitt d:o
5) ogarvat och smitt d:o

Järnets "skufbarhet" (sic!) undersöktes genom

1) mätning av den förlängning som 1 fot av stången undergått vid brott nedan betecknad δ_{fot}
2) genom mätning av brottytans dimensioner
3) genom prov på smidbarhet, härdning och vridning m. m.

Lagerhjelms skufbarhet är sålunda det vi numera mäter med hjälp av "förlängning och kontraktion", alltså materialets tänjbarhet. Han fann därvid exempelvis följande värden för δ_{fot} som medeltal för 20 prov:

a)	ogarvat och valsat svenskt stångjärn	21.97 procent
b)	garvat och valsat svenskt stångjärn	18.77 "
c)	engelskt stångjärn och linjärn	17.98 "
d)	garvat och smitt svenskt stångjärn	8.76 "
e)	ogarvat och smitt svenskt stångjärn	5.05 "

Järnets "jemnhet" undersöktes därigenom att varje fots sträckning hos provstängerna vid dragprovet blev uppmätt under avslitningen. Därjämte observerades stångens "rakhet, buktighet eller vridna ställning" efter avslitningen jämte brottytans utseende. Som mått på olikformigheten togs förhållandet mellan maximi- och minimiför-

längning hos varje fot av provstången. Ordnade efter växande värde på detta förhållande erhöll Lagerhjelm "följande ordning, då man vill vinna ett homogent jern":

1) garvat och valsat svenskt stångjärn
2) engelskt bästa stångjärn och linjärn
3) ogarvat och valsat svenskt stångjärn
4) garvat och smitt d:o
5) ogarvat och smitt d:o

Den stora spridning i materialegenskaper som härvid ådagalades särskilt hos det ogarvade och smidda svenska stångjärnet ger oss en nyckel till att den mekaniska materialprovningen och särskilt dragprovet tog så lång tid att slå igenom. Det lönar sig icke att söka dimensionera konstruktionerna efter t. ex. brottgränsen, då denna uppvisar stor spridning. I våra dagar upplever vi något liknande när man vill införa hållfasthetsberäkningar för konstruktioner som skall utföras i plastmaterial, där hållfasthetssiffrorna alltjämt uppvisar stor spridning, även om polymerkemisterna gjort åtskilligt för att minska spridningen.

Åtminstone i Sverige hade ingen före Lagerhjelm ens tillnärmelsevis företagit så ingående undersökningar av stålets egenskaper. Först genom honom infördes kvantitativa bestämningar av materialens mekaniska egenskaper. Men även den samtida internationella litteraturen, så långt det varit mig möjligt att följa densamma, visar att Lagerhjelm var en av de främsta på detta område under denna tid.

Knut Styffe

Den ovan nämnda statliga kommittén föreslog 1863 Kungl. Maj:t att en ingående undersökning av olika järn- och stålsorter skulle genomföras (18). Försöken påbörjades av professorn vid Teknologiska Institutet C. A. Ångström, fortsattes av adjunkten vid Uppsala Universitet R. Thalén samt av ingenjören K. Cronstrand. De slutfördes av Knut Styffe med biträde av ingenjörerna K. Cronstrand och P. Lindell (19). Det är Styffe som redogör för hela arbetet. Man undersökte ett stort antal både svenska och utländska stålsorter med olika framställningsmetod, sammansättning och värmebehandling.

Undersökningen utfördes med samma dragprovmaskin som Lagerhjelm enligt ovan använt. Var den därvid stått uppställd har ej varit möjligt att utröna. Den har ej förekommit på Teknologiska Institutet och ej heller i Jernkontorets dåtida lokaler. Allt talar dock för att

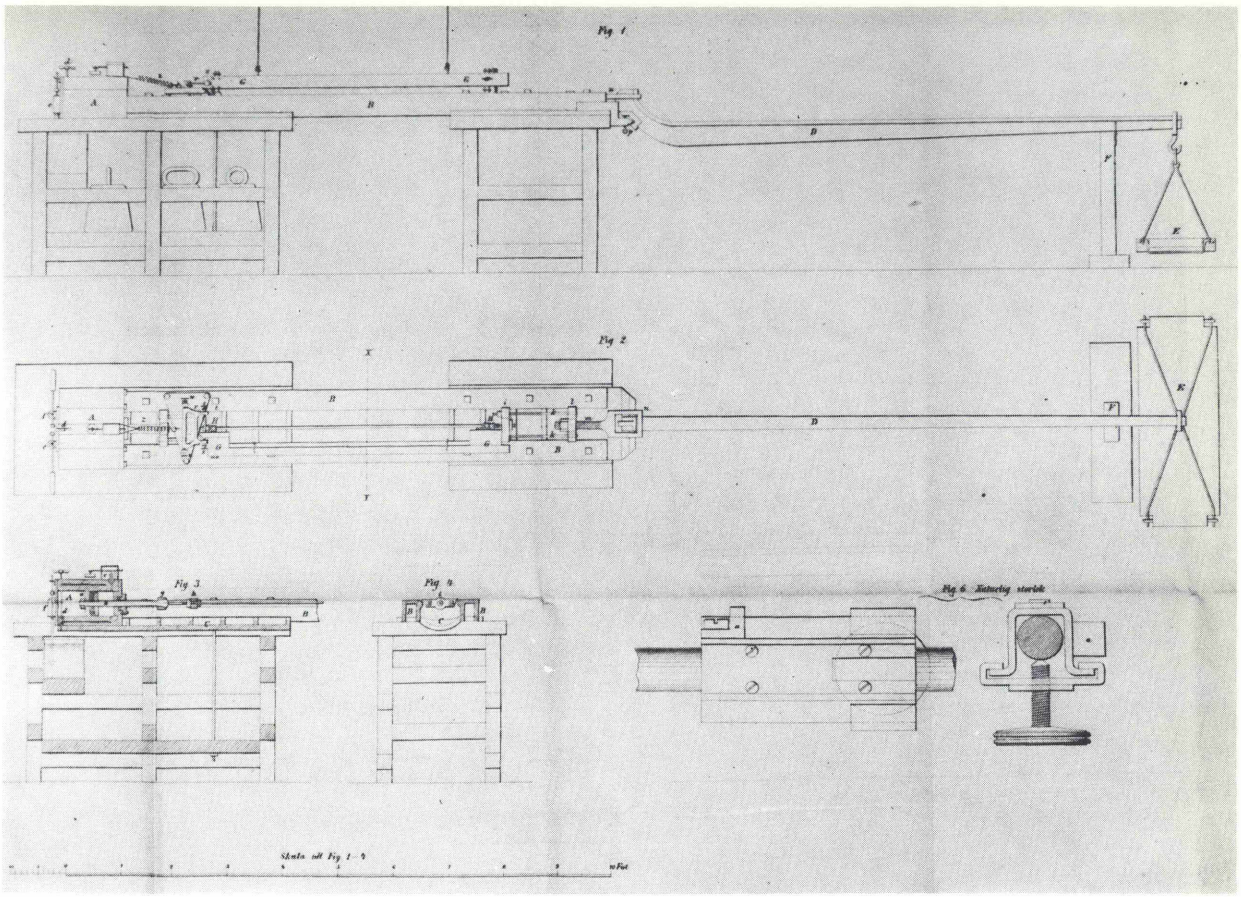


Fig. 19. Styffes förbättrade version av hydraulisk dragprovmaskin.
Styffe's improved version of hydraulic testing machine.

försöken utförts i Stockholm. Efter kritisk granskning av maskinen företog sig nu Styffe att förbättra densamma, se Fig. 19. Han förstärkte därvid stativet, borttog vissa friktioner i gejderna för inspänningshuvudet och förnyade kalibreringen. Han diskuterar felkällor och finner att "näst de fel, som kunna härröra från oriktig bestämning av den elastiska förlängningens storlek, har man att frukta för dem, som kunna begås vid mätningen av stångens genomskärningsarea", ett omdöme som nog står sig alltjämt. Styffe arbetade liksom Lagerhjelm med mätlängder på upp till 6 fot. Han lät justera sina stänger medelst filning, i övrigt förekom ingen maskinbearbetning, lika litet som hos Lagerhjelm. Förlängningsmätningen skedde på samma sätt. Han påpekar att Wertheim, som före honom gjort elasticitetsmodul- och sträckgränsbestämningar, till sina försök använde trådar med 0,3 till

1,5 mm diameter och därigenom visserligen var föga utsatta för fel till följd av deras krökningar. Däremot kunde denne icke med noggrannhet mäta deras genomskärningsarea utan måste uträkna medelarean med ledning av vikten.

Styffe granskar även Wertheims m. fl. definition av "spänstighetens gräns", d. v. s. sträckgränsen och finner att denna, bestämd som resttöjningsgräns blir beroende av den skala i vilken spännings—töjningsdiagrammet blivit uppritat. Styffe har nämligen ambitionen att förlägga resttöjningsgränsen till punkten för diagrammets största krökning. Som ett rationellare mått föreslår han nu den last P för vilken gäller att

$$\frac{\triangle L}{L} = 0{,}01 \frac{\triangle P}{P}$$

där $\triangle L$ är den förlängning av mätlängden L som uppkommer då man vid lasten P får ett tillskott $\triangle P$ under en viss överenskommen tid, vanligen 1 minut. Detta verkar kanske invecklat, men låter sig lätt grafiskt beräknas ur det diagram som man ändock har uppritat. Styffes resultat har på denna punkt kritiserats av J. Bauschinger (1886), men denne forskare synes mig ha underskattat noggrannheten i Styffes mätningar, i det han tycks förbise att denne använde mätlängder på upp till 1 800 mm till skillnad från hans egna som höll sig vid 150 mm.

Proven utfördes dels vid rumstemperatur, dels i köld och värme från —50° till +200°C, en icke föraktlig prestation i anseende till den tidens resurser. Dessutom utfördes böjförsök vid olika temperaturer i en därför särskilt konstruerad apparat.

Av stort intresse är Styffes vid försöken gjorda iakttagelser och övriga reflexioner som redovisas i den citerade rapporten. Han tar upp till kritisk granskning andra forskares resultat (Bauschinger, Wiedemann, Wertheim o. s. v.) och drar slutsatser som blir normgivande för uppfattningen av dessa ting för lång tid framåt. Sålunda uttalar han bl. a. (19).

1) Elasticitetsgränsen, d. v. s. resttöjningsgränsen är otjänlig som karakteristisk materialegenskap enär den beror av mätinstrumentens noggrannhet. Denna iakttagelse var i och för sig icke ny, men Styffe kunde bekräfta den trots att han använde sin ovan anförda förfinade definition av resttöjningsgränsen.

2) Permanenta förlängningen beror av deformationshastigheten.
3) Elasticitetsgräns, tänjbarhet och absolut styrka (d. v. s. brottgränsen) beror av mekanisk och termisk förbehandling på sätt som närmare anges.
4) Fosforhaltens inverkan utredes, en då högaktuell fråga, när Bessemerprocessen höll på att slå igenom.
5) Temperaturberoendet hos elasticitetsgräns, tänjbarhet, absolut styrka och elasticitetsmodul anges inom det studerade temperaturområdet, varvid exempelvis mjukt ståls blåskörhet konstateras, för första gången kvantitativt.

Här gick Styffes resultat delvis emot tidigare forskares. Man hade haft på känn att stålet blev svagare i kyla, t. ex. därför att kätting oftare brister i kyla. Det skulle dröja länge innan slagseghetens temperaturberoende blev klarlagt. Sprödbrottet väntar väl alltjämt på sin fullständiga klarläggning. Nu ansluter sig Styffe till en tidigare av Wertheim framförd uppfattning att t. ex. hjulbandsbrott hos järnvägsmateriel i kyla beror på att markunderlaget då är mycket hårdare och därför stötpåkänningarna större. Denna synpunkt var i och för sig riktig men innehöll väl som sagt icke hela lösningen på problemet.

Styffes skriftliga framställning är mönstergillt klar och välformulerad. Den bär möjligen vittnesbörd om att hans akademiska studier de första åren i Uppsala avsåg en juridisk examen. Ovan har Styffes upptäckt av den s. k. Bauschingereffekten berörts i samband med framstegen i teoretisk hållfasthetslära. Det är tydligt att Styffe på 1860-talet stod på höjden av den dåtida materialforskningen och faktiskt var en av de ledande männen på området under senare delen av 1800-talet. Hans uppgifter i egenskap av överdirektör och föreståndare torde ha utgjort ett effektivt hinder för hans fortsatta forskning, som han tog upp först i pensionsåldern på 1890-talet. Han fungerade som juryman vid världsutställningen i London 1862 och i Paris 1867 och 1878. Presidenten vid den Första Internationella materialprovningskongressen i Stockholm 1897, den kände professor L. v. Tetmajer i Zürich hälsade Knut Styffe som "materialprovningens Nestor, vars försök är klassiska". Styffe avled 1898. Han framstår som en portalfigur för svensk teknisk forskning under senare delen av 1800-talet. Likväl är han numera för de flesta svenska ingenjörer på sin höjd ett namn.

Styffes namn synes även i nyare historisk litteratur ofta vara bort-

glömt. Den omständigheten att Lagerhjelms arbete så ingående refererats av Todhunter and Pearson (8) kan möjligen ha bidragit till att han kommit att spela en framträdande roll i det nutida omfattande historiska verket av J. F. Bell (10) som i övrigt har föga att säga om de svenska bidragen, kanske därför att de publicerats i för författaren svårtillgänglig litteratur. Sålunda saknas Styffe helt hos Bell, medan R. Thalén, som närmast spelade rollen av medarbetare till Styffe finns med. Thalén publicerade emellertid ett mindre arbete i Philosophical Magazine 1865, som citerats. Jag anser S. Timoshenko vara den tillförlitligaste historikern inom vårt område. Hans belästhet är stor och hans överblick utöver nationsgränserna sträcker sig väl fram till andra världskriget.

Brinell

En svensk tekniker vars namn däremot stått sig är Johan August Brinell (1849—1925), se Fig. 20. Han avlade examen vid Borås tekniska läroverk 1871, men var i övrigt enbart självlärd. Han avancerade snabbt inom industrien och var 1882—1903 överingenjör vid Fagersta bruk. Från 1903 till pensioneringen 1914 var Brinell överingenjör vid Jernkontoret. Om hans liv och insatser inom stålets metallurgi som "den siste store metallurgen före metallografiens tillkomst" samt om hans övriga mångsidiga insatser som tekniker kan man läsa i en minnesruna, tecknad av hans efterträdare både i Fagersta och på Jernkontoret, Axel Wahlberg (42).

Brinells namn är internationellt sett knutet till det s. k. brinellprovet på kroppars hårdhet, varvid man mäter storleken av ett kulintryck under viss vikt, verkande under viss tid på provföremålets yta. Med nöje kan man ännu läsa om hur han logiskt kom fram till ett standardiserat dylikt prov i den uppsats i Teknisk Tidskrift 1900, som belönades med Polhemspriset och sedermera också med utmärkelse vid Internationella Materialprovningskongressen i Paris samma år.

Vid brinellprovet mäter man sålunda motståndet mot inträngning i det föremål som skall provas. Idén stammar i princip från Réaumur, som vi kan se i Fig. 12, nere till vänster. Där pressas vinkelrätt mot varandra två kantställda prismor av provmaterialet mot varandra. Brinell pressade i stället en härdad stålkula mot provföremålet under standardiserade förhållanden och uppmätte intryckets dimensioner. Därmed gjorde han, 200 år efter Réaumur, intrycksprovet till ett praktiskt användbart standardprov. Eller, för att uttrycka saken i



Fig. 20. Johan Augusti Brinell.

något modestare form: först så långt efter Réaumur hade tekniken nått en sådan utveckling att man hade någon glädje av hans tanke och kunde tillgodogöra sig densamma. Brinellprovet användes redan från början i viss mån som s. k. oförstörande provmetod. Man har numera övergått från brinellkulan till trubbiga koner eller pyramider som intryckskropp, särskilt vid mätning på hårdare material. Man har också infört s. k. mikrohårdhetsprov, utförda under mikroskop genom att använda belastningar av storleksordningen g i st. f. kg. Likväl kalibrerar man ofta dessa varianter av metoden så att de vid lägre hårdhetstal ger samma hårdhetstal som Brinell. Namnet har sålunda bevarats till eftervärlden.

Sammanfattning

Vi har sett hur den internationella utvecklingen legat före Sverige i vad det gäller elasticitets- och hållfasthetslära. Under 1600- och 1700-talen låg ledningen omväxlande i Italien, England, Frankrike, Schweiz och Holland, men under 1800-talet lyckades vårt land tillkämpa sig en om än blygsam plats på frontvågen. I fråga om materialprovning av metaller och särskilt stål gick vi i Sverige delvis egna vägar, men det tog lång tid innan praktiskt värdefulla metoder kunde utvecklas, d. v. s. metoder som kunde bilda underlag för ingenjörernas dimensionering av konstruktionerna. Fr. o. m. 1800-talet kunde vi ge och ta på jämbördig fot med andra europeiska forskarnationer.

I Frankrike hade krigen under 1600- och 1700-talen stimulerat ingenjörskonsten till kraftansträngningar att bygga vägar, kanaler och fästningar. Detta arbete resulterade som vi sett i P. S. Girards Traité Analytique, som snart skulle följas av den populära Resistance des materiaux av A. Morin (44). Den boken blev översatt till svenska av I. S. Bagge och använd exempelvis vid Falu Bergsskola.

I England började den industriella revolutionen på 1700-talet och kulminerade under 1800-talet under Drottning Victorias regering (45). Där nöjde man sig ofta med enklare handböcker med empiriska formler av typen "A Compendium of Mechanics . . ." av Robert Brunton (46). Liknande böcker fanns också i Tyskland och på övriga håll på kontinenten (47). Dessa handböcker var i regel anpassade till tidens krav. Man får inte glömma bort att det exempelvis inom byggnadskonsten oftast rörde sig om bärande konstruktioner i form av grova träbjälkar och först småningom också gjutjärnsbalkar. För dylika balkar och särskilt för strävor hade man mera nytta av experimentellt grundade empiriska formler, som naturligtvis icke tålde extrapoleras utöver sitt giltighetsområde. Eulers på teoretisk väg härledda knäckningsformler gav dålig approximation. Det skulle komma att bli annorlunda när man gick över till lätta stålkonstruktioner för att nu inte tala om lättmetallkonstruktioner för flygplan och raketer. Härigenom minskades gapet mellan teori och empiri i hållfasthetsläran, men då är vi redan inne på 1900-talet.

Under 1800-talet var det snarast järnvägstekniken och dess krav som blev vägledande för de maximala spänningar som kunde tillåtas eller som det ofta, något oegentligt, brukar uttryckas de "maximalt tillåtna spänningarna". Det var exempelvis tysken Wöhlers undersökningar av orsaken till brott på järnvägsvagnarnas hjulaxlar som

ledde till omfattande provserier och till upptäckten av utmattningsgränsen vid stålaxlar, utsatta för roterande böjning. Den upptäckten underbyggdes vidare av J. Bauschingers, C. Bachs m. fl. omfattande materialprovningar, och ledde till Weyrauchs belastningsfall I, II och III (48) för vilande, pulserande och reverserande last. Motsvarande "maximalt tillåtna spänningar" blev gällande med små modifikationer från 1880-talet och långt in på 1900-talet med hedersplats i sådana ingenjörshandböcker som Hütte och Dubbel, vilka dominerade högskolestudierna för svenska ingenjörer under 1910—1930-talen. Tillämpningen av belastningsfallen I—III vid sammansatt påkänning var under denna tid mera svävande. Man hade visserligen plasticitetsteorin sådan den utvecklats av Saint-Venant och andra kontinentala fysiker. Efter en andhämtningspaus fram till R. von Mises och Th. von Kármán på 1920-talet öppnades sedan av W. Prager och andra vägen till den moderna plasticitetsteorin (49), (50).

För militära ändamål hade sträckgränsen eller stukgränsen, som vi sett ovan, de facto tillämpats i Sverige redan på 1700-talet, åtminstone för klingprovning. Nästa gång sträckgränsen, ävenså då något maskerad, dyker upp är det också i militära sammanhang. Det gällde då provning av ankarkättingar för Flottans behov enligt Reglemente, Svensk Författningssamling no 45, 1835, intagen i Hults bruks historia av Karin Forsberg (51). Där sägs i paragraf 4, s. 2 och 3 att efter valsningen uttaget ämnesjärn vid sträckning skall "anses fullkomligt gott" om det belastas med "hälften av den i bifogade tabell för dess diameter utsatta provvikt utan att avslå glödspån". Vidare "om ämnesjärnet avslår glödspån för 2/5 av provvikten eller brister, detsamma är odugligt till järnkedjors förfärdigande". Glödspån slås av i sådana områden av ett provföremål av mjukt stål, där flytlinjer framtränger till ytan och där sålunda materialet plasticerats, se (52).

Moderna tendenser

Vi har i det föregående visat hur man med elasticitetsteorins hjälp åtminstone i princip kunnat lösa problemet att fastställa de inre spänningarna i en belastad konstruktion. Därefter, likaledes i princip, har man kunnat med plasticitetsteorins hjälp ange när och var materialet når elasticitets- eller sträckgränsen. Mindre framgångsrik har man varit att i mera komplicerade fall förutsäga brottbelastningen, helt enkelt därför att stora deformationer uppträder före brott.

För att komma vidare med hållfasthetsproblemen har därför upp-

märksamheten, sedan man nått fram till bättre materialkännedom, inriktats mot andra håll. Dels har Hooke's lag generaliserats till ickelinjära samband, som gäller t. ex. för konstruktionsmaterialens förhållande vid förhöjd arbetstemperatur. Dels har det visat sig att det man i verkligheten vanligtvis mest fruktar, nämligen att lokalt överskrida materialets brottgräns vid ifrågavarande temperatur, belastningshastighet o. s. v. är ett problem av helt annat slag än det ovan behandlade. Härtill kommer inverkan av upprepade påkänningar, det som brukar betecknas som utmattningshållfasthet.

Till utforskande av dessa olika fenomen har fysiken bidragit med en rad förfinade mätmetoder för observation och registrering. Det har gällt sådana metoder som trådtöjningsgivare, spänningsoptik och elektronmikroskopi, som alla tillkommit under 1900-talet. Brott i materialet, såväl från ytan som inuti, uppstår från svaghetsställen och fortskrider som sprickor och har lett till en ny vetenskapsgren, brottmekanik. Vi har redan tidigare nämnt om utmattningsbrott, som frånsett enstaka iakttagelser först renodlades av tysken Wöhler i mitten av 1800-talet. Vid förhöjd arbetstemperatur beror de fasta kropparnas deformation förutom av töjningen även i hög grad av töjningshastigheten och beter sig i viss mån som en trögflytande vätska. Detta har lett till en annan förgrening, krypmekanik, som har betydelse såväl för metaller över en viss gränstemperatur som även för is t. ex. i jöklar. Icke nog härmed, i många fall uppträder dessa nya fenomen kombinerade. Exempelvis försprödas många material under krypning och ger upphov till mer eller mindre deformationslösa krypbrott, så att vi får en krypbrottsmekanik. Särskilt dessa kombinerade effekter har först på senare år gjorts till föremål för specialundersökningar. Det uppräknade må räcka till för att motivera att denna redogörelse lämpligen kan avslutas vid sekelskiftet 1900.

Källhänvisningar med kommentarer

(1) Bibeln, Nya Testamentet, Apg, Kap. 27, v. 17 (Bibelkommissionens normalupplaga 1883).
(2) Björn Landström, "Seglande skepp", Forum, Stockholm 1969, 183 + 9 ss.
(3) Fritz Stüssi, "Leonardo da Vinci, Erfinder—Maler—Forscher", Stiftung Technorama der Schweiz, anlässlich der Ausstellung Leonardo da Vinci, Winterthur 1971, s. 14—17.
(4) "The Unknown Leonardo", ed. Ladislau Reti, Mc Graw—Hill, N.Y. 1974, p. 212—213.

(5) Galileo Galilei, "Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno à due nuove scienze", Leiden 1638; engelsk översättning, Macmillan Co 1914, Dover Publ., N.Y.: jfr även följande arb. (6). Galileis arbete var känt i Sverige redan 1644 och citerades då av Georg Stiernhielm, se H. Sandblad, Lychnos, Årg. 1942, s. 124.

(6) Ch. Fremont, Congrès International des Méthodes d'Essais, Paris 1900, Communications, Tome I, 1900, p. 351—360.

(7) S. Timoshenko, "History of Strength of Materials", Mc Graw—Hill, New York 1953, 452 pp. Detta förnämliga arbete av den i Tsarryssland utbildade men från 1925 i USA över 40 år verksamme forskaren (1878—1971) har givit honom en överblick och utsikt över nationsgränserna som icke överträffats varken förr eller senare.

(8) Isaac Todhunter and Karl Pearson, "A History of the Theory of Elasticity and the Strength of Materials from Galilei to the Present Time", Vol. I (1639—1850), Cambridge 1886, 924 + 12 pp; Vol. II, 1, 2 (Saint — Venant to Lord Kelvin), Cambridge 1893, 762 + 546 + 12 pp.

(9) A. E. H. Love, "A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity", 4. Ed., Cambridge 1927, 643 pp; särskilt "Historical Introduction", p. 1—31.

(10) J. F. Bell, "Festkörpermechanik", Handb. d. Physik, Bd VI a 1 (Editor C. Truesdell), Springer, New York 1973, 813 pp.

(11) C. Stewart Gillmor, "Coulomb and the Evolution of Physics and Engineering in Eighteenth-Century France", Princeton, New Jersey 1971, 328 pp.

(12) Augustin Cauchy, Bull. d. la Societé philomatique, Paris 1823, p. 9; utgör sammanfattning av en avhandling presenterad för Parisakademien 1822.09.30, som följd av en prisskrift, inlämnad av C.-H. L. Navier, 1820.08.14.

(13) Ivar Fredholm, "Sur les équations de l'équilibre d'un corps solide élastique", Acta matematica, Tome 23, 1900, s. 1—42; se även "Oeuvres Complètes", Malmö 1955.

(14) Hermann Weyl, Rendiconti del circolo matematico di Palermo, Tome 39, 1915, p. 24.

(15) Algot Kronberg, "Pehr Lagerhjelm, vetenskapsman, näringsidkare, politiker", Stockholm 1960, 164 ss.

(16) H. G. Söderbaum, "Jac. Berzelius", Levnadsteckning, Bd II, KVA, Uppsala 1929, s. 113, 209.

(17) Pehr Lagerhjelm, "Försök att bestämma valsadt och smidt stångjerns täthet, jemnhet, spänstighet, smidbarhet och styrka", JKA, Bd 10, senare häftet i 2 delar, 1827; tysk sammanfattning i Poggendorfs Annalen, Bd 13, 1828.

(18) Folke K. G. Odqvist, "Knut Styffe, minnesteckning", föredragen 1970.03.31. Kungl. Vetenskapsakademien, Levnadsteckningar Bd 10, nr 174, Uppsala 1975, s. 259—278.

(19) Knut Styffe, "Om jerns och ståls elasticitet, tänjbarhet och absoluta styrka", JKA Bd 21, 1866, s. 11—142.

(20) Johann Bauschinger, Mitteilungen, mech. -tech. Lab. München, 1886, se även Dinglers Polytech. Journ., Vol. 266, 1886.

(21) Sven Rydberg, "Kring Falu Gruva", Svenska Turistföreningens årsskrift 1972, s. 57—69. Fil. dr Rydberg har välvilligt meddelat mig att han bygger sina uppgifter på en skrift "Falu gruvas ålder i geologisk och arkeologisk belysning", av G. Lundqvist och E. Nordahl, Uppsala 1963, 79 ss.

(22) Alf Grabe, "Den gamla svenska osmundtillverkningen", JKA. Bd 111, 1927, s. 5—61.

(23) John Nihlén, "Äldre järnhantering på Gotland", JKA, Bd 111, 1927, s. 679—725. Jag tackar disponent F. Franzén, Ställbergsverken, för denna dokumentation. Detaljförloppet vid den begynnande brytningen av järnmalm ur berg samt dess bearbetning i hyttor och smedjor är föga känd, men står för närvarande (hösten 1977) i centrum för forskarnas intresse.

(24) Erik Wilhelm Dahlgren, "Järnvräkeri och järnstämpling", Jernkontoret, Stockholm 1930, 343 ss.

(25) Bo Molander, Stångjärnsstämpelsamling, Stenhammarsvägen 11, S-161 52 Bromma. Ingenjör Molander har välvilligt låtit mig ta del av manus till sitt arbete "järn i gamla byggnader", 1976, 55 ss. + 33 fig.

(26) René-Antoine Ferchault de Réaumur, "l'Art de convertir le fer forgé en acier", Paris 1722. Engelsk översättning av C. S. Smith, Univ. of Chicago 1956, 396 pp. + 15 Pl.

(27) Peter van Musschenbroek, "Physica experimentalis geometrica", Leyden 1729; översatt till svenska och med anmärkningar försedd av S. Klingenstierna, "Inledning till Naturkunnigheten . . .", Stockholm och Uppsala, 1747, 610 ss.

(28) Pierre-Simon Girard, "Traité analytique de la résistance des solides", Paris, 1798.

(29) Folke K. G. Odqvist, "Officiell materialprovning i Sverige — en historisk återblick". Statens Provningsanstalt (50 år), Stockholm 1970, 48 ss. Uppgifterna om P. von Wirtz hämtade ur Philander von der Weistritz, "Leben und Thaten des Herrn Paulus von Wirtzen. Köpenhamn och Leipzig, 1756, 135 ss., (översättning från holländskan).
Dansk Biografisk Leksikon, XXVI Band, Köpenhamn 1944, artikeln signerad Rockstroh, p. 363—364.
Nouvelle Biographie Generale, Vol. 6, Blondel (François) Sieur des Croisettes, architecht e mathématicien.

(30) H. I. Hannover, "Om Materialprøvningens Udvikling i Norden . . ." 5. Internationale Kongres for Material . . . undersøgelser, København, 1909, s. 1—22.

(31) Otto Vogel, "Christoffer Polhem und seine Beziehungen zum Harzer Bergbau" Jahrb.d. V.D.I., Bd V, 1913, s. 298—345.

(32) Christopher Polhem, "Om reps hållfasthet", Kongl. Wetenskapsacademiens handlingar, Bd 1.

(33) Axel Liljencrantz, "Christopher Polhems brev", Uppsala 1941—46, 317 ss.

(34) Christopher Polhem, "Efterlämnade skrifter, Del I—IV, särsk. Del I. Teknologiska skrifter, redigerade av Henrik Sandblad, Uppsala 1947, speciellt "Orsaken till det mästa stångjärnets oduglighet här i landet", s. 60.

(35) Dagmar Odqvist, "Förteckning över arkivet, KTH:s Bibliotek", Stockholm 1976, 156 ss.; utgiven i samband med KTH:s 150-årsjubileum. Se särskilt citat av J. G. Gahn m. fl. s. 19.

(36) Folke K. G. Odqvist, Lychnos 1937, s. 148—160. Här citeras Polhems uttalanden om teoriens betydelse.

(37) Em. Swedenborg, "De Ferro . . .", 1734; latin, översatt till svenska av Hj. Sjögren, Stockholm 1923, 477 ss. (folio).

(38) Mårten Triewald, "Är 1728 och 1729 Håldne Föreläsningar på Riddarhuset i Stockholm öfwer Nya Naturkunnigheten . . .", Tryckta hos P. J. Nyström, Stockholm, del I 1735, del II 1736, sammanlagt bortåt 600 ss.

(39) Sven Rinman, "Försök till Järnets Historia . . .", Stockholm 1782, Förra bandet, 471 ss., särskilt s. 439.

(40) Åke Meyersson, "Stockholms Bössmakare", Stockholm 1936.

(41) Heribert Seitz, "Med slag och stickmått", Meddelande nr 18 från Kungl. Armémuseum, 1957, s. 67—79.

(42) Axel Wahlberg, JKA, Bd 109, 1925, s. 645—659.

(43) Johan August Brinell, "Sätt att bestämma kroppars hårdhet jämte några tillämpningar av detsamma", Teknisk tidskrift, årg. 1900.

(44) A. Morin, "Résistance des materiaux . . .", översatt till svenska och försedd med kommentarer av I. S. Bagge, "Morins Handbok i Praktisk Mekanik", Stockholm 1853, 527 ss. + 10 planscher.

(45) S. B. Hamilton, "Sixty Glorious Years: The Impact of Engineering on Society in the Reign of Queen Victoria", Trans. Newcomen Soc., Vol. XXXI, 1958, p. 182—194.

(46) Robert Brunton, "A Compendium of Mechanics or Textbook for Engineers, Mill—Wrights, etc. . . .", 2. ed., Glasgow, 1825, 148 pp.

(47) C. Ar. Ångström, "Konstruktören, en handbok . . .", av F. Reuleaux, bearbetad av förf. Stockholm 1864, 370 ss.

(48) Jacob Weyrauch, "Festigkeits und Dimensionenberechnung der Eisen- und Stahlkonstruktionen . . .", Leipzig 1876, 116 ss., 58 fig.
Förordet börjar med att anföra de utmärkta hållfasthetsundersökningar på järn och stål, som nyligen utförts i Tyskland, England, Sverige och Amerika. De svenska bidrag som avses är tydligen K. Styffes.

(49) W. Prager, "Mécanique des solides isotropes au delà du domaine élastique", Mémorial des Sciences Mathématiques, nr 87, Paris 1937, 66 pp., samt vidare av samma författare "Theory of Perfectly Plastic Solids" (tillsammans med Ph. G. Hodge Jr), New York 1951, 264 pp.

(50) R. Hill, "The Mathematical Theory of Plasticity", Oxford 1950, 354 pp.

(51) Karin Forsberg, "Hults Bruks Historia 1697—1947", Stockholm 1949, 166 ss. Förutom vid Hults Bruk utanför Norrköping tillverkades ankarkättingar vid Furudals Bruk i Dalarna och Hörle Bruk i Småland, båda tillverkningarna igångsatta med stöd av Jernkontoret, se B. Boëthius, Jernkontorets Historia, Del III, 1955, s. 402. Föreskriven provning av ankarkätting utfördes med 100 t hydrauliska provmaskiner av G. Brolings konstruktion.

(52) Folke K. G. Odqvist, "Om sträckgränsen och dess betydelse för hållfasthetsläran", Teknisk tidskrift, Mekanik nr 5, 1933, s. 49—54.

Summary

Solid mechanics as a prerequisite to the development of methods of mechanical testing of materials with special reference to Swedish achievements.

From archaeological findings, beautiful weapons, armour and tools with forms developed during long time are well known. Still, as far as I know, no methods of materials testing have existed before the eighteenth century other than the ancient general rule: the proof of the pudding is in the eating. Early man had to cope with problems of strength as soon as he started to choose stones for arrowheads, wood for bows etc. In the pre-industrial era such choice was determined by the method of cut and try. It took a long time to develop both design and technology.

This may be exemplified by the art of shipbuilding. The naval architects of Pharaoh 2500 B.C. used very much the same design as those twentyfive centuries later who built the ship used by Saint Paul on his voyage to Malta and Rome, as might be inferred from the Bible (Acts *27*, 17). The hulls were strengthened by longitudinal stays to prevent tensile stresses at the bottom when exposed to severe sagging conditions, cf Fig. 1. In other words: Those naval architects must have had some intuitive knowledge of bending stresses in the hulls of seagoing ships.

The principles of statics of rigid bodies were known from Aristotle and Archimedes and still alive through the Middle Ages and the Renaissance. Galileo Galilei, however, seems to have been the first to apply equilibrium conditions for any part, cut out from a rigid body in equilibrium under given external loads.

The cut out part is considered alone with thereupon acting external forces together with the internal forces, acting in the cut and necessary to keep the parts of the body together. This method will be called here, for simplicity, *the method of cuts.*

Galilei, in his wellknown paper of 1638, set out from a simple example of a cantilever beam, see Fig. 4, of length l and rectangular cross section (depth h, width b), clamped into a solid wall at AB and loaded at the free end C with a single downward vertical force P. Applying the method of cuts, he assumes the beam to consist of longitudinal fibres, each taking a constant force σ in its direction per unit of its cross sectional area. The resultant $\sigma.b.h.$ of these forces would then act at mid depth $h/2$ counted from the bottom of the cross section of the beam. Taking moments about the "neutral axis", a horizontal line through B at right angle to BC, he obtained the relation

$$\sigma\, b\, h \cdot h/2 = P \cdot l$$

between the forces in the built-in cross section and the external load P. Adding the rules of similarity, Galilei then expressed the bending strength σ of the beam material in terms of the length of a free hanging wire of the same material, about to break from the action of gravity alone. Thus Galilei was the first to give a mathematical theory of the bending strength of beams. His theory is correct to the present day it the beam material is assumed to follow our diagram, Fig. 5. Galilei, in his fundamental paper, merely had an intuitive conception of the properties of the beam material. His immediate followers in England and on the Continent were mainly interested in the deformation of the beam. They used Hooke's law, without quoting its discoverer, but missed one of the equilibrium conditions for the cut out part of the beam, thus leaving the position of the neutral axis undetermined. So it remained almost through the eighteenth century. The question was settled only through the work of Coulomb and, above all by Cauchy and Navier. The mathematical boundary value problem of the theory of elasticity, i. e. the problem to find stresses and strains in a body of arbitrary shape in equilibrium under given external forces was solved only in this century by the Swede I. Fredholm and the German H. Weyl.

Mechanical testing of materials started in the eighteenth century by Réaumur 1722 and Musschenbroek 1729. Galilei had in 1638 determined the maximum length of a free hanging copper wire to 4 801 cubits, as computed from the atmospheric pressure in proportion to the density of copper. The Dutchman Musschenbroek was the first to use a tensile testing machine built on the principle of the steelyard. He published results of tests on different kinds of metals, wood and other organic substances. These results, together with those of his own and other researchers were published in a book by P. S. Girard at the end of the eighteenth century and thus found their way into the engineering handbooks of the nineteenth century.

In Sweden, few contributions to engineering mechanics were heard of before the nineteenth century. The first remarkable achievement is due to Pehr Lagerhjelm (1787—1856), scientist, politician and factory owner. In order to find out,

if hot rolling, just then developed in England, could be a suitable substitute for the forging used in Swedish bar-iron production at that time, he designed the first hydraulic tensile testing machine, prototype for most continental-built machines of this or similar design, according to S. Timoshenko. Lagerhjelm proved the elastic modules of iron and steel of different hardness as determined from tests in tension, bending, torsion and torsional vibrations to be always the same within the limits of experimental errors. In order to prove this, Lagerhjelm had to solve the mathematical problems of total deformation in bending and torsion of rods of different cross sections. This he did, having no knowledge of the theories of his contemporaries Cauchy and Navier. Particularly his theory of torsion is very complicated indeed, cf Fig. 7. Still his numerical results deviate less from the exact theory of Saint-Venant than Navier's. Lagerhjelms researches were published in Swedish in Jernkontorets annaler 1827. They were translated into German in Poggendorfs Annalen Vol. 13, 1828 and have found their way to most standard works on the history of elasticity and strength of materials.

Forty years after Lagerhjelm, another Swedish scientist Knut Styffe (1824—1898) made series of tests with Lagerhjelms machine, now with improved instrumentation and calibration. In refining the definition of the "elastic limit", he found, as a by-product what is now called the "Bauschinger effect", see Fig. 10, thus forestalling J. Bauschinger by 20 years. He established the unsuitability of the "elastic limit" as a characteristic of the material. The permanent set was found to depend on the speed of loading. The influence of the mechanical and thermal treatment as well as of the ambient test temperature in the range —50°C to +200°C was clarified, further the influence of phosphorus on the properties of steel. Styffe's main achievement though was the creation of the Royal Institute of Technology, Stockholm, where he was Director from 1856 to 1890. Under his leadership this institute was brought up to level with the best foreign technical universities, thus contributing to the solid base for Sweden's modern industrial development. Styffe himself was a highly appreciated authority on metallurgy and materials testing in the late half of the nineteenth century. He served as arbiter or juryman at several international congresses and/or exhibitions in England and on the Continent. Still Styffe's fine scientific achievements seem to have been forgotten in the modern historical texts.

Sweden was the world's largest exporter of iron and steel from the very beginning, even before the viking era and on to about the Napoleonic wars when England took over as a consequence of new inventions in metallurgy. Sweden's superiority had been based upon extremely pure iron ores, plenty of water power and an abundance of charcoal. To begin with, iron was produced in the form of "osmunds", i. e. lumps of malleable iron. Later, from the sixteenth century onwards in the form of forged iron bars. The metal was weighed in at prescribed Swedish staples where it was inspected by certain officials. Thus, already in the Middle Ages, a primitive form of inspection took place. From the sixteenth century on, royal edicts were issued, prescribing weighing, stamping and im-

printing of trade-marks, showing the origine of every barrel, containing Swedish iron or steel bars. In the late seventeenth century a primitive form of materials testing was practiced. Thus a simple form of bending test by means of a "test pole" was used, see Fig. 11. The regulations served a double purpose: to ensure quality and to enable customs-surveillance. They were maintained with but slight modifications until the present time. For special military purposes (sword blades, anchor cables) requirements equivalent to the yield point were prescribed already in the eighteenth and early nineteenth centuries.

In the year 1900 the Brinell hardness test was introduced by the Swedish engineer J. A. Brinell. In fact, as may be inferred from our Fig. 12, he picked up an old idea by Réaumur and modernized it for practical purposes. Modified and completed in different directions, it has retained its value to the present day.

In a short special chapter the development of allowable stresses for engineering structures in the nineteenth century is sketched and commented upon.