Vägmätare, vattenmöllor och astronomiska instrument

Om kugghjulets äldsta historia

Av Örjan Wikander

Det är inte någon slump att Tekniska Museet till sitt emblem valt ett kugghjul – om än inte ett vanligt kugghjul utan ett spärrhjul för frammatning, hämtat från Christopher Polhems manufakturverk vid Stjärnsund. Kugghjulet betecknar sedan gammalt teknisk och industriell tillväxt: när hjulen snurrar, blomstrar ekonomien. "Kuggarna i maskineriet" är ett annat uttryck, som vill visa vad det är som håller verksamheten i gång. Än i dag bevarar kugghjulet sitt symbolvärde, och enbart en symbol är det heller inte. Vi stöter ständigt på kugghjul i vårt dagliga liv: när vi tittar på klockan (om än i konkurrens med modernare digitalteknik); när vi tar fram vår gamla vevförsedda gräddvisp; när vi stiger på vår cykel; när vi lägger in en växel i vår bil; osv.

Vad är det då som gör kugghjulet så viktigt? Det överför rörelse, men det gör mer än så. Det kan ändra rörelsens hastighet, och det kan ändra dess riktning. Vi talar normalt om kugghjul som om det vore ett entydigt begrepp, men de uppträder i själva verket i många olika varianter. Det finns hjul med radiellt utstående, triangulära kuggar, hjul med radiellt eller vinkelrätt utstående piggar, och stavdrev; ett kugghjul kan vidare kombineras med en evighetsskruv (snäckväxel), en kuggstång eller en kedja – för att nu bara nämna några av de vanligast förekommande varianterna.

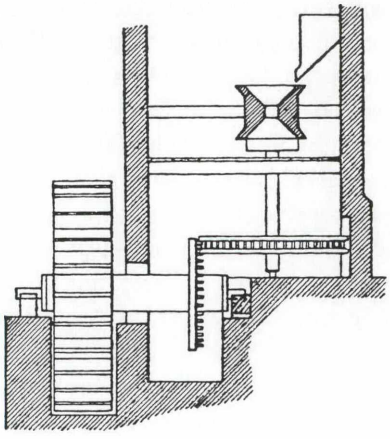
Länge har kugghjulets skrivna historia i realiteten börjat under högmedeltiden, där 1200- och 1300-talens urverk var utgångspunkt för den fortsatta utvecklingen. I och för sig har man hela tiden vetat att uppfinningen stammar från antiken, men kunskaperna om dess äldsta historia har varit näst intill obefintliga. Vi får en tydlig bild av problematiken genom att studera den bok som länge utgjorde ett ständigt citerat standardverk, Conrad Matschoss' *Geschichte des Zahnrades* (1940). Här behandlas den antika utvecklingen på mindre än tre sidor,[1] där vi i korthet får veta att Aristoteles (384–322 f Kr)

nämner kugghjul i sin skrift *Mekaniska problem*, att Archimedes (287–212 f Kr) kände både vanliga kugghjul och evighetsskruven, att Heron av Alexandria teoretiskt visat hur stora tyngder kan lyftas med hjälp av en snäckväxel, att Vitruvius kort före Kristi födelse beskrev dels en kugghjulsutväxlad vägmätare (hodometer) och dels en vattenmölla, samt att det i Athens Nationalmuseum förvaras resterna av en kugghjulsförsedd kalendermekanism av brons.

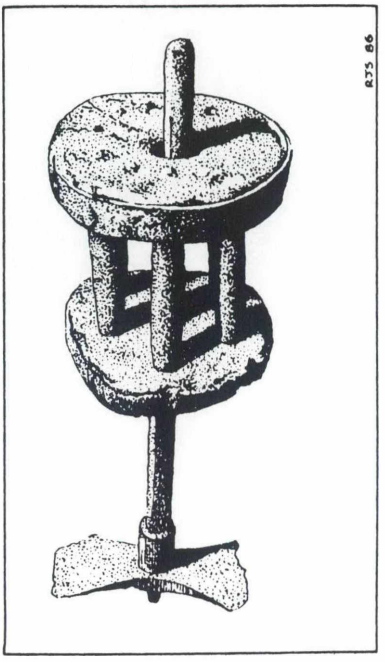
De punkter Matschoss tog upp var kända långt tidigare, men då Archimedes ansågs ha varit helt ointresserad av praktiska uppfinningar, Herons maskiner sågs som rena skrivbordskonstruktioner, och vattenmöllan påstods ha slagit genom först i tidig medeltid, kunde kugghjulet självfallet inte uppfattas som något väsentligare inslag i den antika civilisationen. Först de senaste decenniernas forskning har tillfört väsentlig ny information. Matschoss' punkter utgör än i dag kärnan i vår kunskap om antikens kugghjul,[2] men medan man tidigare knappast alls ägnat dem en kritisk analys, har de nu alla blivit föremål för detaljerade studier. Även om en syntes av resultaten mig veterligen fortfarande saknas,[3] har vi nu förutsättningar att åtminstone grovt skissera det antika kugghjulets historia, och den bild vi skymtar är inte bara mer detaljrik utan skiljer sig också på många punkter i grund från tidigare etablerade uppfattningar.

En av våra viktigaste antika textkällor är Vitruvius' beskrivning av den vattendrivna kvarnen (Fig 1):

"Enligt samma princip vrids också vattenmöllor, i vilka allt är detsamma, förutom att ett tandat hjul är fäst i ena änden av axeln. Men detta, som är placerat lodrätt på högkant, vrids tillsammans med vattenhjulet. Närmast detta är placerat ett större horisontellt hjul, också det tandat, av vilket det hålles fast. Genom att driva på tänderna på det horisontella hjulet tvingar således tänderna på det hjul som är fäst vid axeln kvarnstenarna att bedriva sin cirkelrörelse..."[4]



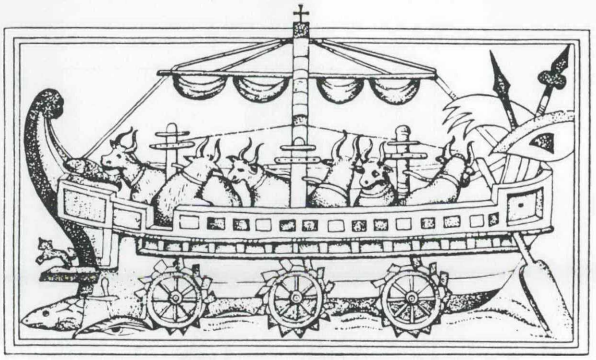
1. Rekonstruktion av Vitruvius' vattenmölla. Från Matschoss (not 1), fig 11.

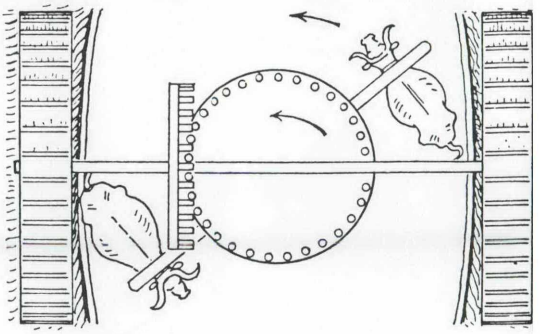


2. Kvarnjärn med stavdrev från Zugmantel. Från R J Spain, "The Roman water-mill in the Athenian Agora", *Hesperia* 56, 1987, s 341, fig 5.

Vi torde utan vidare kunna utgå ifrån att de stora kugghjul det här är fråga om varit gjorda av trä, så som de nästan undantagslöst varit i senare tiders vattenmöllor ända in i vårt eget århundrade. Det är sålunda knappast ägnat att förvåna att inga arkeologiska rester bevarats av det vertikala kugghjulet, men vi kan ändå uttala oss med relativ säkerhet om dess utseende. Kuggarna har i senare tid alltid placerats vinkelrätt mot själva hjulet, varigenom de utsatts för en avsevärt mindre påfrestning än om de suttit radiellt. Att samma förhållande gällde redan i antiken, bekräftas av två arkeologiskt undersökta vattenmöllor, där de vertikala kugghjulen råkat sitta snett och följaktligen lämnat tydliga spår i möllegravens tegelvägg.[5]

Det horisontella kugghjulet ersattes troligen ganska snart av ett stavdrev, och ett sådant – sammansatt av två cirkelformade träskivor och sex järntenar (Fig 2) – har faktiskt påträffats intakt i det romerska kastellet Zugmantel vid den germanska gränsen, nära Frankfurt am Main (100- eller tidigt 200-tal e Kr). Det härrör knappast från en vattenmölla, men väl från en hästdriven kvarn med samma form av utväxling – en kvarntyp som spelade en viktig roll i europeiska städer ännu i förra hälften av 1800-talet.[6] Hästmöllans genombrott, åtminstone sedan det andra århundradet e Kr,[7] visar på ett annat användningsområde för stora, vinkelställda träkugghjul. Ett ytterligare, åtminstone teoretiskt sådant, representeras av idén att bygga oxdrivna skovelfartyg, som framlades av en anonym författare i andra hälften



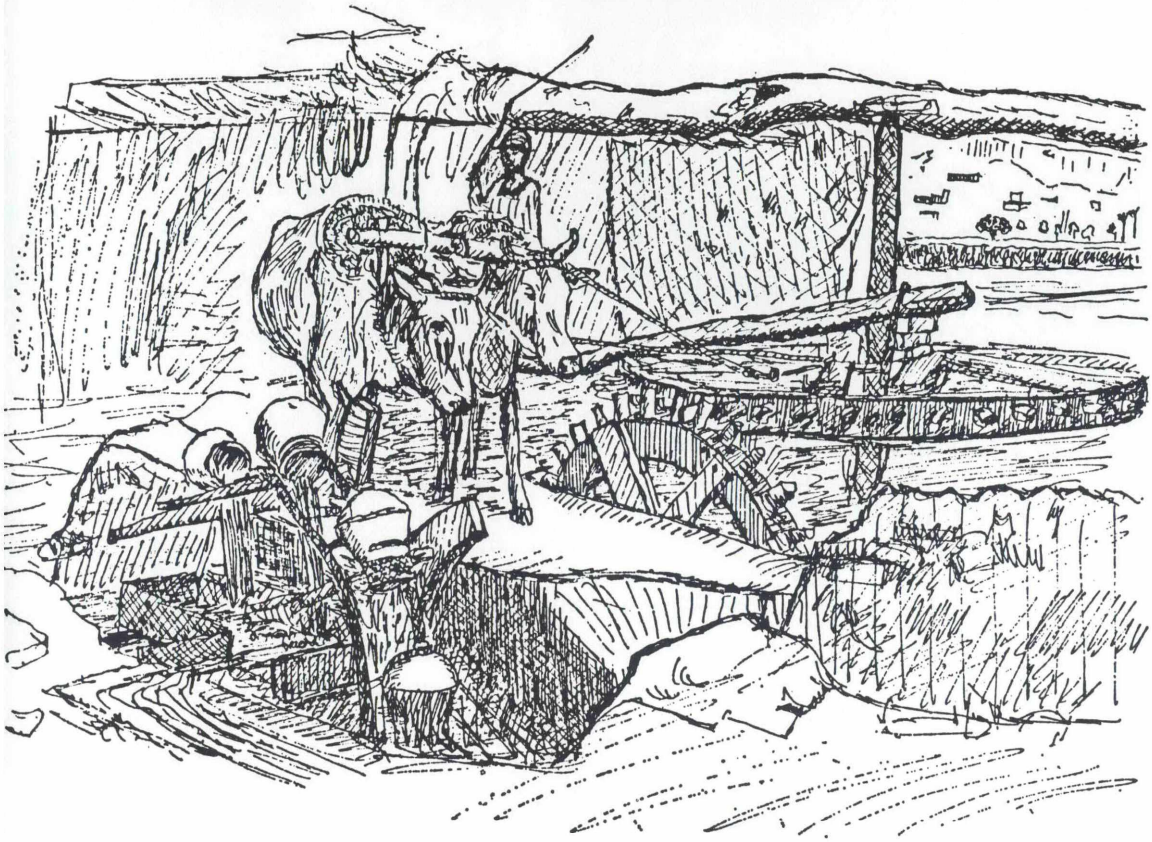


3–4. Anonymus Byzantinus' oxdrivna skovelfartyg, enligt handskriftsillustration (till vänster) och i rekonstruktion (till höger). Från *A History of technology*, Vol II, Oxford 1956, s 606, fig 549, respektive J G Landels, *Engineering in the ancient world*, London 1978, s 16, fig 1.

av 300-talet e Kr – även om den med all säkerhet aldrig kom till utförande (Fig 3–4).[8]

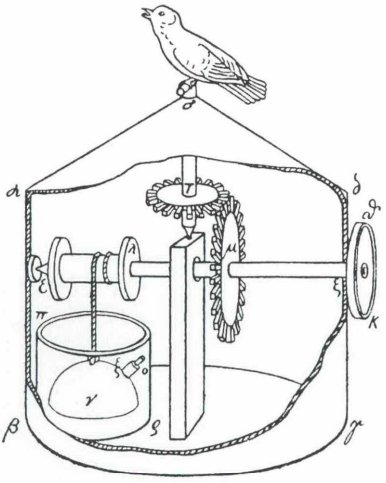
Vattenmöllan uppfanns sannolikt under det första århundradet f Kr,[9] men det är inte givet att dess kugghjulsväxel är av samma datum. En nära nog identisk konstruktion förekommer i ännu en antik maskin, som förefaller vara något äldre. Sāqiyan, som den brukar kallas med en arabisk term, är ett vattenuppfordringsverk bestående av en paternoster-kedja driven av oxar eller andra djur med hjälp av en rätvinklig kugghjulsväxel (Fig 5). Redan Matschoss misstänkte att sāqiyan hade antika anor men kunde inte dokumentera sitt antagande. Först år 1973 presenterade Thorkild Schiøler en ingående historisk studie av denna för senare tiders konstbevattning så viktiga maskin. Hans arbete har fortsatts av John P Oleson, och genom dessa båda forskares insatser är vi nu tämligen väl förtrogna med sāqiyans konstruktion, utveckling och spridning under antiken.[10] Uppfinningen stammar med all sannolikhet från det östra Medelhavs-området, men det äldsta exempel vi för ögonblicket känner har påträffats i Cosa i Italien och låter sig dateras till ca 100 f Kr.[11]

Vår mest rikhaltiga antika källa rörande apparater med kugghjul är den tidigare nämnde Heron av Alexandria, vars verksamhetstid numera kan säkert bestämmas till tiden kring 62 e Kr. Av honom har vi en rad skrifter med tekniskt innehåll bevarade, några på grekiska, andra endast i arabisk översättning. Den normerande utgåvan av hans verk publicerades kring sekelskiftet i fem band,[12] men trots den centrala plats de intar i vår kunskap om antik teknologi, har de varit föremål för förhållandevis få moderna studier. Ett avgörande steg framåt togs år 1963, då Aage G Drachmann publicerade en kritisk studie över en rad antika texter, fr a Heron. Drachmann kunde visa att vår uppfattning om Herons apparater i många avseenden byggt på felaktiga förutsättningar. Framför allt påvisade han att de renritningar

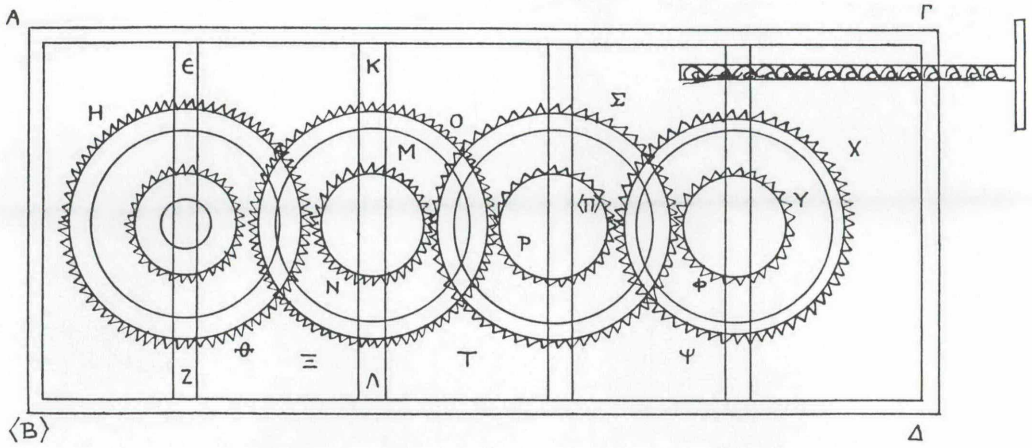


5. Sāqiya nära Konungarnas dal i Egypten. Från Schiøler (not 10), fig 67.

av de medeltida manuskriptens illustrationer, som publicerats i den normerande tyska upplagan och därifrån reproducerats i senare teknikhistorisk litteratur, långt ifrån alltid ger en rättvisande bild av originalen.



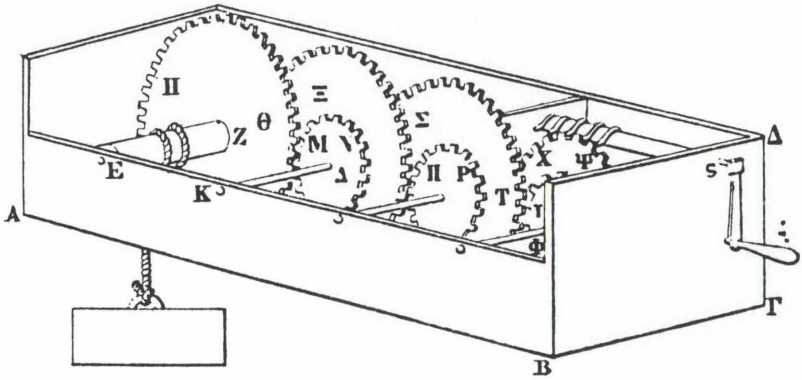
6. Den sjungande fågeln; ett automaton av Heron av Alexandria. När man vrider på ratten, snurrar fågeln och sjunger. Från Hero Alexandrinus (not 12), Vol I, s 301.



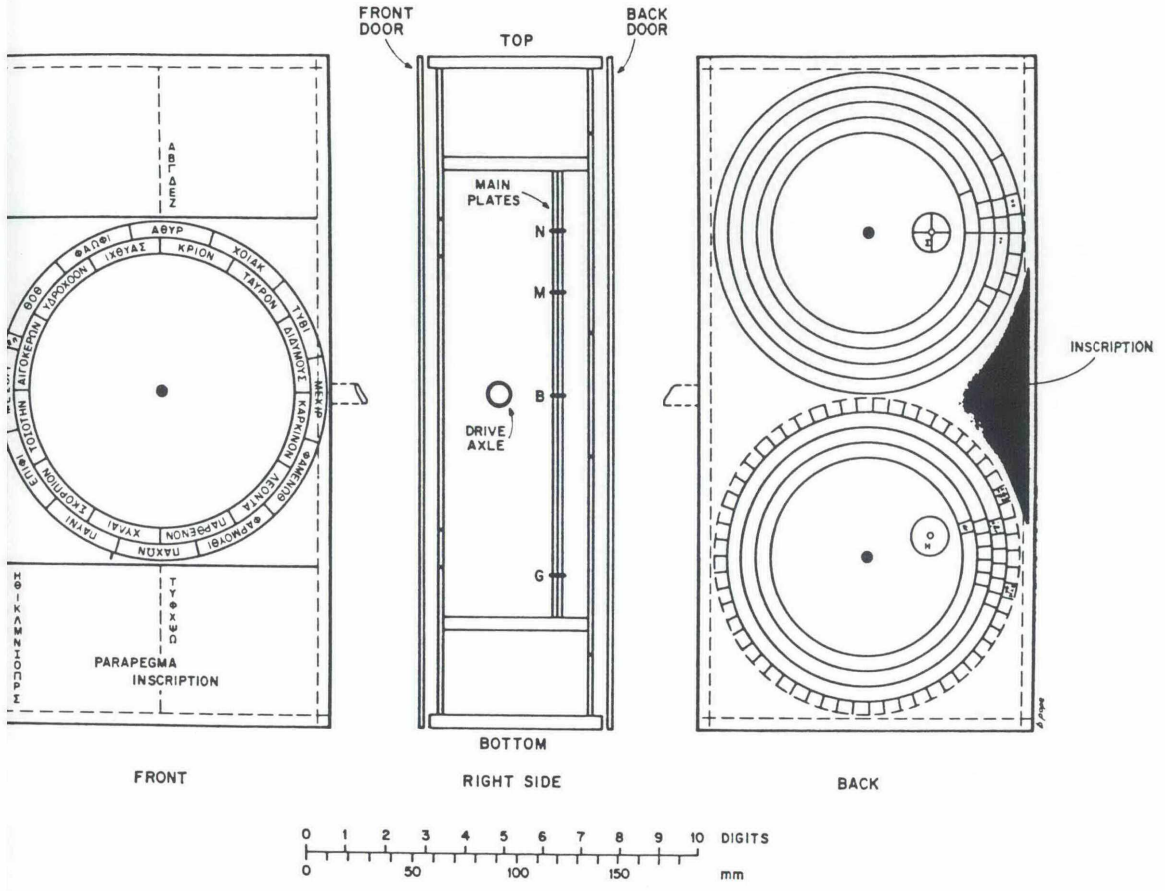
7. Herons *barulkos*; medeltida handskriftsillustration. Från Drachmann 1963, fig 6.

Heron ägnar påfallande stort intresse åt skruven, och de flesta av hans kugghjulsapparater innefattar en snäckväxel,[13] i allmänhet kombinerad med parallella kugghjul. Vi möter också parallella hjul ensamma, kugghjul i kombination med kuggstänger, och i ett fall rätvinkligt engagerade kugghjul (Fig 6).[14] 1800- och 1900-talens teknikhistoriker har framför allt intresserat sig för hans *barulkos*, en apparat som med hjälp av en snäckväxel och upprepade parallella kugghjulsväxlar skall kunna lyfta 2 000 talenter (ca 52 ton) med en kraft av bara fem (ca 130 kg) (Fig 7–8).[15]

Drachmann förklarar upprepade gånger att han inte tror att maskinen fungerat i verkligheten – antagligen med rätta. Problemet att lyfta stora tyngder med en begränsad kraftinsats löstes både enklare och effektivare med block och talja. Frågan har emellertid en vidare räckvidd. Man har tenderat att över huvud taget se Herons apparater



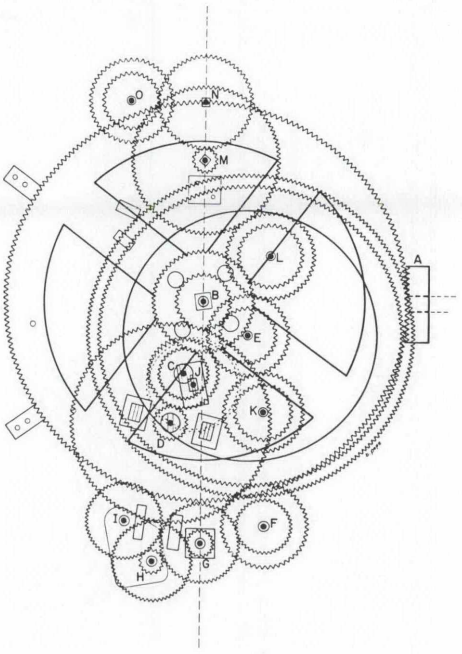
8. Herons *barulkos*; rekonstruktion av Schoene. Från Drachmann 1963, fig 63 e.



9. Rekonstruktion av Antikythera-mekanismens hölje. Från Price 1974, fig 7.

som leksaker eller rent teoretiska spekulationer, och som en följd av detta har hans beskrivningar av olika slags kugghjulsväxlar, liksom den tekniska och finmekaniska kompetens de förutsätter, aldrig tagits riktigt på allvar.

Redan år 1900, då resterna av den s k Antikythera-mekanismen påträffades i ett romerskt skeppsvrak söder om Peloponnesos, fick man åskådliga bevis på graden av detta kunnande. Antikythera-fyndet nämns sedan dess regelmässigt i teknikhistoriska översikter (t ex av Matschoss), men i realiteten kom inte heller det att påverka den etablerade inställningen, förrän det långt om länge fått sin definitiva vetenskapliga presentation år 1974.[16] Derek J de Solla Price började arbeta med de fyra oformliga bronsklumparna, som låg relativt obeaktade på Athens Nationalmuseum, redan i början av 1950-talet. Genom noggrant studium, med bl a röntgenundersökningar, kunde han presentera en tydning av instrumentet och dess detaljer, som på det hela taget torde komma att stå sig.[17]



10. Antikythera-mekanismen. Rekonstruktion av kugghjulssystemet. Från Price 1974, fig 29.

Instrumentet var inneslutet i en rektangulär låda av trä och metall, 30 cm lång, 15 cm bred och 7,5 cm hög (Fig 9). Det bestod av 31 parallella kugghjul av brons med mellan 15 och ca 225 kuggar var (Fig 10), med vars hjälp man kunde genomföra komplicerade astronomiska beräkningar. Resultaten avlästes på tre visartavlor på instrumentets fram- och baksida. Här kunde man jämföra solår med månår och synodiska månader, och därmed förutsäga sol- och månförmörkelser, avläsa olika stjärnbilders upp- och nedgång, osv. Price betonar att vi här inte, som ofta tidigare hävdats, har att göra med ett navigationsinstrument som tillhörde skeppets ordinarie utrustning. Det är ett instrument vars vetenskapliga och tekniska komplexitet – bl a omfattande en differentialväxel – vida överstiger det för sådana praktiska ändamål rimliga. Det är i stället ett dyrbart lyxföremål, snarast jämförbart med de grekiska bronsstatyer som skulle fraktas till Rom på samma skepp. Vraket kan dateras tämligen noga till tiden omkring 80 f Kr, en period då vi vet att medlemmar av den romerska överklassen visade intresse för tekniska uppvisningsstycken av detta slag.[18]

Price nöjer sig inte med att rekonstruera Antikythera-instrumentet; han sätter också in det i dess teknikhistoriska sammanhang. Astrolabia av enklare konstruktion var kända först inom det arabiska kulturområdet tusen år senare, men mekanismen från Antikythera hör utom varje tvivel hemma i den hellenistisk-grekiska världen. Slutsatsen kan bara bli en: våra kunskaper om antikens teknik är inte bara ofullständiga – de är i många avseenden över huvud taget icke existerande.

Antikythera-instrumentet är inte en tillfällig uppfinning fristående från den tekniska utvecklingen i övrigt. Dess konstruktion förutsätter en lång och omfattande utveckling av teoretisk såväl som praktisk finmekanisk art. Sambandet framåt i tiden har nyligen bekräftats genom upptäckten av ett byzantinskt astrolabium från ca 500 e Kr,[19] medan existensen av komplicerad kugghjulsapparatur redan före Antikythera-instrumentet har kunnat beläggas genom André W Sleeswyks studier kring Vitruvius' hodometer.

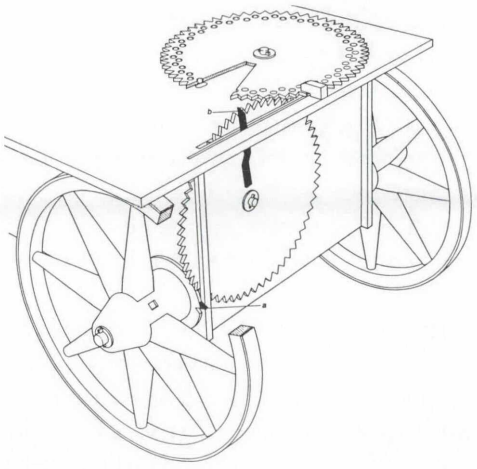
Antika vägmätare (för bruk både till lands och till havs) beskrivs även av Heron,[20] men Vitruvius' beskrivning är av större tekniskt intresse:

"Vår avhandling skall nu behandla en nyttig och högst genial uppfinning, förmedlad till oss av våra föregångare, som gör det möjligt för oss, när vi sitter i en vagn på vägen eller seglar på havet, att veta hur många mil av resan vi tillryggalagt. Det går till på följande sätt. Låt vagnens hjul ha en diameter av fyra fot, så att om ett hjul har ett märke på sig och börjar röra sig framåt från detta märke..., kommer det att ha passerat en sträcka av precis tolv och en halv fot, när det når det märke där det började snurra.

Låt sedan... ett tympanum [= massivt trähjul] med en enda tand stickande ut utanför omkretsen fästas ordentligt vid hjulnavets innersida. Låt sedan däröver ordentligt fästa en låda vid vagnskroppen, som innehåller ett roterande tympanum ställt på högkant och fäst vid en axel. På dettas yta sitter 400 tänder, placerade med jämna mellanrum och i kontakt med tanden på det undre tympanum. Det övre tympanum har dessutom en tand, som är fäst vid dess sida och som sticker ut längre än övriga tänder.

Sätt sedan däröver ett horisontellt tympanum, tandat på samma sätt och inneslutet i en annan låda, med tänder i kontakt med tanden på sidan av det andra typanum, och låt göra så många hål i detta [tredje] tympanum som ungefär... motsvarar det antal mil[21] som en vagn kan förflytta sig på en dagsresa. Låt placera en liten rund sten i vart och ett av dessa hål, låt göra ett hål i behållaren som innehåller detta tympanum och fäst därvid ett litet rör, genom vilket stenarna i tympanum, när de når denna punkt, kan falla en och en ned i ett bronskärl placerat undertill i vagnskroppen.

Således, då hjulet vid sin rörelse framåt för med sig det understa tympanum, och då tanden på detta vid varje varv slår emot tänderna på det övre tympanum och får det att röra sig, blir följden den att det övre tympanum rör sig ett varv för 400 varv på det understa och att tanden som fästs vid dess sida trycker fram en tand på det horisontella tympanum. Eftersom det övre tympanum sålunda kommer att snurra ett varv mot 400 för det nedersta, kommer sträckan man passerat att bli 5 000 fot eller en mil. Följaktligen kommer varje sten, som ger ett klingande ljud ifrån sig då den faller, att ge besked att vi förflyttat oss



11. Rekonstruktion av Vitruvius' hodometer. Från Sleeswyk 1981 (not 23), s 166.

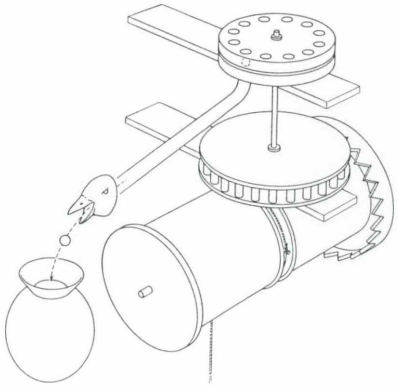
en mil. Antalet stenar som samlas ihop undertill och räknas kommer att visa hur många mil man tillryggalagt under dagens resa."[22]

Beskrivningen är detaljerad, men inte helt lättförståelig. Det förvånar knappast, att Lionardo da Vinci fascinerades av den och försökte återskapa Vitruvius' maskin vid ritbordet. Två väsentligen olika lösningar finns bevarade av hans hand, men båda avviker på avgörande punkter från förlagan, och senare Vitruvius-uttolkare har genomgående resignerat inför problemets olöslighet. Ännu Drachmann (1963) menade att det måste röra sig om en ren skrivbordskonstruktion.

Sleeswyk's lösning är helt baserad på Vitruvius' beskrivning.[23] I motsats till Lionardo avviker han inte från texten på någon punkt, även om han tillgriper mindre konventionella lösningar i fråga om vissa detaljer där Vitruvius inte lämnar någon information. Att konstruktionen faktiskt fungerar, har han visat med hjälp av en modell i skala 1:4. I den tecknade rekonstruktionen (Fig 11) har för tydlighets skull antalet kuggar på kugghjulen drastiskt reducerats, men principen förblir densamma. Den största svårigheten – att få hjulaxelns enda kugg att engagera det lodräta kugghjulet utan att vare sig slira eller fastna – löste Sleeswyk genom att dels göra ett litet urtag bakom den ensamma kuggen, dels låta hjulen mötas ca 30° under horisontalplanet.

Sleeswyks lösning förefaller övertygande, och den ger oss en ytterligare inblick i antikens finmekaniska kunnande. Men än mer intressant blir det, när han går vidare och frågar, vilka de "föregångare" var som Vitruvius nämner som förmedlare av kunskapen om vägmätaren – för även om vi av hävd brukat kalla maskinen "Vitruvius' hodometer", visar texten otvetydigt att vi har att göra med en äldre uppfinning.

I sitt resonemang utgår Sleeswyk från en detalj, obetydlig men



12. Rekonstruktion av Archimedes' vattenur. Från Sleeswyk 1981 (not 23), s 168.

kanske avslöjande. Det gäller systemet med efter hand nedfallande kulor, som inte sällan förekommer i den islamska världen, men som för antikens del är betygad endast i ett annat fall – ett vattenur som enligt ett arabiskt manuskript skall ha konstruerats av Archimedes (Fig 12). Vattnet i en behållare rinner långsamt ut, varvid en flottör sjunker och drar ned ett rep, vars övre del är uppvirat kring en trumma. I dennas ena ände sitter ett kugghjul med vinkelställda kuggar, som engagerar ett stavdrev, på vars lodräta axel också sitter en rund skiva med hål för kulor, liknande den på hodometern.[24]

Attributionen av vattenuret till Archimedes är långt ifrån säker, men Sleeswyk bygger under sin teori med ytterligare argument. Det kanske viktigaste gäller själva motivet för skapandet av hodometern. Vilket rimligt syfte kan man ha haft att förse en vagn med en så komplicerad (och säkert ytterst dyrbar) vägmätare,[25] när de romerska huvudvägarna normalt var försedda med milstenar på ett inbördes avstånd av endast en och en halv kilometer? Sleeswyk argumenterar övertygande för att sammanhanget i själva verket var det omvända: romarna behövde hodometern, när de började sätta ut milstenar på 250-talet f Kr. Vid det laget var Archimedes en man i 30-årsåldern, redan högt ansedd för sin vetenskapliga begåvning och verksam vid hovet hos tyrannen Hieron II av Syrakusa, en av Roms nära allierade i det första puniska kriget. Inget kunde vara naturligare för romarna än att vända sig till Hieron med bön om teoretisk hjälp med detta praktiska problem, ingenting naturligare för Hieron än att beordra Archimedes att bistå dem med en lösning.

Om Sleeswyks teori är riktig, och mycket talar för att så är fallet, skänker den oss inte bara en bättre förståelse av hodometerns konstruktion och bakgrund. Den skulle också ge oss anledning till en helt ny uppskattning av Archimedes som teknisk innovatör. I och för sig känner vi namnet på åtminstone en skrift av hans hand med tekniskt innehåll, liksom beskrivningar av hans verksamhet som konstruktör

av krigsmaskiner under romarnas belägring av Syrakusa 212 f Kr. Men hans tekniska skrifter har gått förlorade, och hans insatser under kriget har förringats med hänvisning till uppgiften att han "ansåg ingenjörskonsten och över huvud taget all verksamhet som syftade till dagliga behov lågsinnad och tarvlig".[26] I dag förknippas hans namn främst med matematiska och geometriska problem.

Ändå är Sleeswyks teser inte helt uppseendeväckande. Till Archimedes' äldsta bevarade skrifter hör "Cirkelns dimension", där han bestämmer pi till ett värde mellan $3\frac{10}{70}$ och $3\frac{10}{71}$[27] – ett studium som mycket väl skulle kunna sättas i samband med hans eventuella, ungefär samtidiga, arbete med hodometern, för vars funktion ett någorlunda korrekt värde för pi är av avgörande betydelse. Dessutom har flera viktiga innovationer med mer eller mindre direkt samband med kugghjulsmekanismer sedan gammalt förknippats med hans namn. Såsom mannen bakom "Archimedes' skruv"[28] är det knappast förvånande att han länge betraktats som upphovsman till evighetsskruven, men väl så viktiga slutsatser kan dras utifrån de skildringar som bevarats av hans planetarium. Den intressantaste lägger Cicero i munnen på L Furius Philus, konsul 136 f Kr och en av tidens ledande statsmän:

"Jag minns att C Sulpicius Gallus, som ni vet en ytterst lärd man, då ... han råkade vara hos M Marcellus som varit konsul tillsammans med honom, bad denne ta fram den [himmels-]glob som Marcellus' farfader fört hem efter erövringen av det rika och sköna Syracusae. Fastän jag till följd av Archimedes' berömmelse mycket ofta hört talas om denna glob, blev jag inte över måttan imponerad av dess utseende; ty den glob som samme Archimedes tillverkat och samme Marcellus låtit sätta upp i Virtus' tempel var vackrare och mera berömd. Men sedan Gallus mycket initierat börjat förklara dess funktion, insåg jag att den berömde siculen ägt större genialitet än vad som föreföll möjligt för en människa. Ty Gallus berättade, att den andra solida och massiva globen var en gammal uppfinning, som först tillverkats av Thales från Miletos...

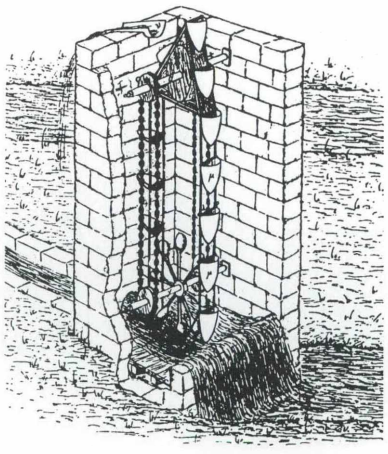
Men den här sortens glob, sade han, som visade solens och månens rörelser och de fem stjärnors som kallades irrande och liksom kringströvande [dvs planeterna], innehöll mer än vad som rymdes på den solida globen, och däri var Archimedes' uppfinning beundransvärd, att han tänkt ut hur en och samma vridning skulle kunna hålla samman föränderliga och olikartade rörelser med helt skilda hastigheter. Då Gallus satte denna glob i rörelse, inträffade det att månen följde efter solen med lika många vridningar på den där bronsmodellen som dagar på själva himmelen, varigenom också samma solförmörkelse inträffade på globen [som på himmelen], och månen kom till den gräns som jordens skugga utgjorde, just då solen från... [*lucka i texten*]"[29]

Varken denna beskrivning eller andra ger oss en helt klar bild av apparatens funktion, men det ligger närmast till hands att föreställa sig någonting liknande de tredimensionella solsystemsmodeller som för inte länge sedan förekom i våra skolor, där man genom att vrida på en vev fick en åskådlig förevisning av planeternas rörelse kring solen och månens kring jorden. Även om ingenting uttryckligen sägs om kugghjul i Archimedes' planetarium, måste vi utgå ifrån att det var sådana som förmedlade rörelsen till planetariets olika delar. Det är i och för sig sant att rörelse i antiken oftare tycks ha förmedlats med block och talja, släta hjul o dyl,[30] men man kan inte med dessa metoder uppnå den exakthet som är en grundförutsättning för planetariets funktion.

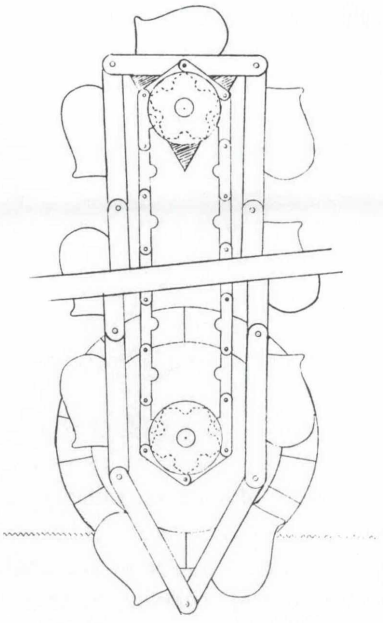
Archimedes' betydelse för kugghjulets tidigaste utveckling kan alltså knappast överskattas. Flera av dess viktigare varianter kan med större eller mindre sannolikhet föras tillbaka på honom. Men han var ändå inte den som först utnyttjade kugghjulets princip. Redan ett par decennier innan Archimedes inledde sin uppfinnarbana har vi att datera det äldsta någorlunda tillförlitliga omnämnandet av en kugghjulsmekanism: Ktesibios' vattenur, i vilket kombinationen kugghjul-kuggstång spelade en avgörande roll.[31]

I början av 1980-talet publicerade Vernard Foley och tre andra engelska forskare en studie rörande kugghjulets ursprung,[32] där de tar fasta på förhållandet att de äldsta exempel vi känner inte består av vanliga sammankopplade kugghjul utan av kugghjul och kuggstång (Ktesibios, ca 280 f Kr) respektive kugghjul och evighetsskruv (Archimedes, ca 260 f Kr). Med utgångspunkt från detta föreslår de att kombinationen kugghjul och kedja kanske också kan ha tillhört denna tidigaste utvecklingsfas.

Det är ett sedan länge erkänt faktum, att Carra de Vaux' i teknikhistorisk litteratur ofta reproducerade rekonstruktion av Philons av



13. Philons av Byzantion vatten-uppfordringsverk; rekonstruktion av Carra de Vaux. Från Foley *et al* (not 32), fig 1, t v.

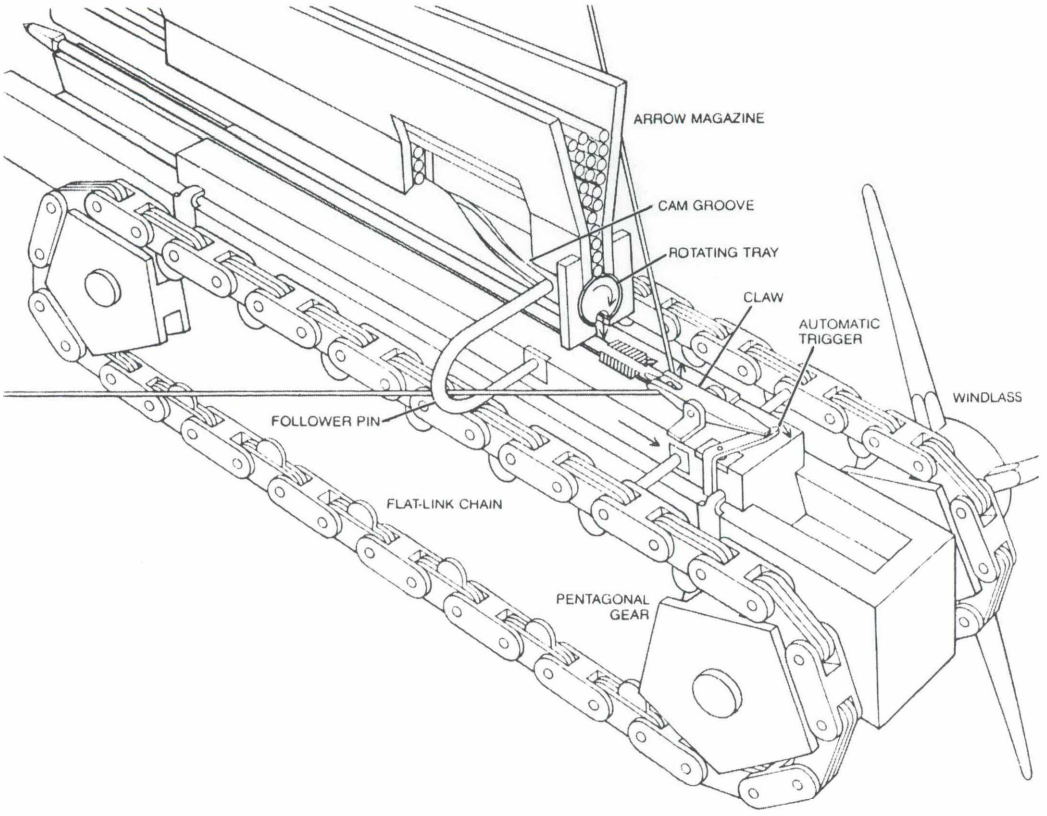


14. Philons av Byzantion vatten-uppfordringsverk; rekonstruktion av Foley *et al* (not 32), fig 1, t h.

Byzantion vattenuppfordringsverk, daterbart ca 220 f Kr (Fig 13), måste revideras. Foley och hans medförfattare påpekar speciellt att drivkedjan inte kan ha löpt på släta hjul utan snarare på femsidiga prismor med ett mindre urtag i varje sida för att undvika glapp (Fig 14). Samme Philon beskriver en repeter-katapult konstruerad, sannolikt ca 300 f Kr, av en viss Dionysios av Alexandria, med användning av kedja och pentagonala prismor (Fig 15). Om det femsidiga prismat förses med urtag på varje sida för att gripa säkrare tag i kedjan, är steget inte långt till ett verkligt kugghjul.

Teorien är bestickande och bör åtminstone kunna bidra till att förklara kugghjulets ursprung. Huruvida alla dess varianter sedan är att föra tillbaka på en och samma uppfinning, är en annan fråga. Det femsidiga prismat leder naturligt över till hjul med triangelformade kuggar, medan de med utstående piggar mycket väl skulle kunna ha ett annat, ungefär samtida men självständigt, ursprung. För ögonblicket skulle våra kunskaper om kugghjulets äldsta historia kunna sammanfattas som följer:

Ca 300 f Kr började man förmedla rörelse med hjälp av ett femsidigt prisma kombinerat med en över detta löpande kedja (Dionysios); efter hand effektiviserades kopplingen genom att prismats sidor försågs med urtag. Ca 280 kombinerades en kuggstång med ett tandat hjul (Ktesibios). Ca 260 möter vi snäckväxeln och på 250-talet vanliga kugghjul som engagerar varann såväl parallellt som rätvinkligt (Archimedes).



15. Rekonstruktion av Dionysios' av Alexandria repeter-katapult. Från Foley *et al* (not 32), fig 4.

Efter mindre än ett halvt århundrade, kanske redan på ett par decennier, hade man alltså avancerat från ingenting till en hel repertoar av kugghjulsväxlar. Utvecklingen var intensiv och av allt att döma främst baserad på rent teoretiskt tänkande, bland vetenskapsmän i Alexandria och Syrakusa. Hur långt utanför deras kretsar nyheten hunnit spridas kring mitten av 200-talet, kan vi inte säga någonting säkert om. Däremot kompliceras bilden av ett förvirrande faktum: ca 230 f Kr är kugghjul belagda i en helt annan del av världen, i Kina.[33] Denna relativa samtidighet skulle naturligtvis kunna skyllas på slumpen, om det vore så att kugghjulets spridning varit ett isolerat fenomen; men detta är alltså inte fallet. En rad grundläggande innovationer från de sista århundradena f Kr låter sig beläggas ungefär samtidigt i Kina och i Medelhavs-världen; förutom kugghjulet gäller detta t ex vridkvarnen och vattenkraften. Att uppfinningar på något sätt kunnat snabbt förmedlas från ena änden av den Eurasiska kontinenten till den andra, kan knappast betvivlas,[34] men hur detta har gått till

saknar vi fortfarande möjlighet att bedöma. Däremot kan man med fog ställa frågan: är det rimligt att tänka sig att kunskapen om kugghjulet nått Kina (eller möjligen hämtats därifrån – tidsskillnaden är för liten för att vara helt avgörande) utan att den samtidigt fått en vidare spridning i länderna kring Medelhavet?

Det måste dock betonas, att intet av de användningsområden vi hittills känner för kugghjulet under 200-talet f Kr är av det slag som kan tänkas ha spritts utanför en mycket liten, exklusiv krets av vetenskapsmän och aristokratisk överklass. En förändring i detta avseende kommer först med sāqiyan och vattenmöllan under de båda sista århundradena f Kr. Sambandet mellan dessa maskiners kraftiga träkugghjul och den äldre finmekaniken är inte uppenbart, men vi måste rimligen postulera att det finns. En självständig uppfinning, utan bakgrund i den tidigare utvecklingen, förefaller mindre sannolik, även om den för ögonblicket inte kan helt uteslutas.

Rätvinkligt engagerade kugghjul mötte oss redan hos Archimedes, men hur har då denna exklusiva, strikt vetenskapliga kunskap kommit att appliceras på så uppenbart praktiskt inriktade maskiner som sāqiyan och vattenmöllan? Knappast genom en hellenistisk vetenskapsmans insatser, utan snarare – så som jag skisserat i en tidigare artikel i Daedalus – genom förmedling av en ingenjör eller tekniker "med tillräckliga teoretiska kunskaper för att förstå vetenskapsmännens resonemang, med tillräckliga kunskaper om det praktiska livet för att förstå dess behov, och med tillräcklig kreativ begåvning för att koppla samman dessa båda sfärer".[35] Sådana begåvningar möter vi före 1800-talets mitt framför allt inom krigsmakten, som redan i antiken hade behov av kvalificerade ingenjörsförband för att bygga befästningar och broar och lösa andra uppgifter av strategisk eller försörjningsmässig natur. Till de problem en hellenistisk ingenjör kan ha ställts inför hör – inte minst i Egyptens och Sydvästasiens ökentrakter – upphissandet av tillräckliga mängder färskvatten ur djupa brunnar, en uppgift som mycket väl kan ha varit den för sāqiyan ursprungliga, innan den övergick till att främst bli ett medel för konstbevattning.[36]

I fortsättningen delar sig kugghjulets historia i två: å ena sidan den finmekaniska, som från Antikythera-mekanismen löper via byzantinska och arabiska astrolabia till högmedeltidens klockverk, och å den andra det grova kvarnhantverket, som skulle förändras föga under kommande århundraden. Dessa båda utvecklingslinjer förenades på nytt i den begynnande industrialismen, där de utgjorde "kuggarna i maskineriet" tills andra metoder för kraftöverföring kunde ta över.

* Denna artikel är en vidareutveckling av ett föredrag avhållet vid sammankomster med Föreningen Svenska Atheninstitutets Vänner i Malmö och Göteborg 5/5 1988 respektive 20/3 1989. Översättningarna av de klassiska texterna är mina egna. Oftare citerade verk förkortas enligt följande:

Drachmann 1963 = A G Drachmann, *The mechanical technology of Greek and Roman antiquity: A study of the literary sources,* Copenhagen 1963.
Oleson 1984 = J P Oleson, *Greek and Roman water-lifting devices: The history of a technology* (Phoenix, Suppl vol 16), Toronto 1984.
Price 1974 = D J de Solla Price, *Gears from the Greeks. The Antikythera mechanism – A calendar computer from ca 80 B C* (Transactions of the American Philosophical Society, n s 64:7), Philadelphia 1974.

Noter

1. C Matschoss, *Geschichte des Zahnrades.* Nebst Bemerkungen zur Entwicklung der Verzahnung von K Kutzbach, Berlin 1940, s 6 och 8–9.
2. Med undantag för Aristoteles-texten, som dels inte är författad av Aristoteles själv utan av en okänd lärjunge (ca 280 f Kr), dels med största sannolikhet inte alls handlar om kugghjul. Se Drachmann 1963, s 13–14 och 201.
3. Drachmanns sammanfattning (1963, s 200–203) innebar ett stort steg framåt jämfört med Matschoss, men är också den i dag föråldrad på många punkter. Jfr även Price 1974, s 53–60.
4. Vitruvius, *De architectura* X 5,2.
5. A W Parsons, "A Roman water-mill in the Athenian Agora", *Hesperia* 5, 1936, s 83, med not 3, fig 10; Th Schiøler & Ö Wikander, "A Roman water-mill in the Baths of Caracalla", *Opuscula Romana* 14, 1983, s 53–54, fig 7 och 10.
6. H Jacobi, "Römische Getreidemühlen", *Saalburg Jahrbuch* 3, 1912, s 89–90, fig 44, Taf XVII; L A Moritz, *Grain-mills and flour in Classical Antiquity*, Oxford 1958, s 125, Pl 14c.
7. Ö Wikander, *Exploitation of water-power or technological stagnation? A reappraisal of the productive forces in the Roman Empire* (Studier utgivna av Kungl Humanistiska Vetenskapssamfundet i Lund, 1983–1984:3), Lund 1984, s 35–36.
8. Anonymus Byzantinus, *De rebus bellicis* 17. För närmare detaljer, se *A Roman reformer and inventor, being a new text of the treatise De rebus bellicis.* With a translation and introduction by E A Thompson, Oxford 1952, s 50–54, 81 och 119–120.
9. De äldsta skriftliga beläggen för vattenmöllan härrör alla från augusteisk tid; inget kan med säkerhet dateras tidigare än det sista decenniet före Kristi födelse. Uppfinningens tillkomst kan alltså mycket väl ligga så sent som 50/20 f Kr. Se Ö Wikander, *Vattenmöllor och möllare i det romerska riket*, Lund 1980, s 98–102. De äldsta arkeologiska fynden stammar från det andra århundradet e Kr.
10. Th Schiøler, *Roman and Islamic water-lifting wheels*, Odense 1973, passim; Oleson 1984, i synnerhet s 370–385.
11. Oleson 1984, s 201–204 (Cosa 2), 371 och 378.
12. Heronis Alexandrini *Opera quae supersunt omnia*, Vol I–V, Leipzig 1899–1914 (med tysk översättning).
13. Drachmann 1963, s 22–24, fig 5 (*Mechanika* I 1); s 24–26, fig 6 (*Dioptra* 37); s 43–46, fig 11–12 (*Mechanika* I 19); s 59–61, fig 18a–b (*Mechanika* II 6); s 76–79, fig 28a–d (*Mechanika* II 18); s 89–91, fig 32 (*Mechanika* II 29); s 159–165, fig 62a–b (*Dioptra* 34); s 165–170, fig 63a, e–f (*Dioptra* 38); s 197–198 (*Dioptra*).
14. Parallella: *Mechanika* II 21–22 (Drachmann 1963, s 82–86, fig 29a–c); kuggstång: *Mechanika* I 15 (Drachmann 1963, s 33–37, fig 8a–d), *Pneumatika* I 34, II 36; rätvinkliga: *Pneumatika* II 32.
15. Heron, *Mechanika* I 1, *Dioptra* 37; Pappos, p 1 060. Se Drachmann 1963, s 22–32.
16. Price 1974. En sammanfattning av Price's resultat lämnas av G Pipping, "Redan de gamla grekerna... Antikytherafyndet i teknikhistoriens ljus", *Polhem* 4, 1986, s 202–213.
17. På vissa punkter korrigeras Price av A G Bromley, "Notes on the Antikythera mechanism", *Centaurus* 29, 1986, s 5–27.
18. Jfr Ciceros entusiastiska beskrivning av det planetarium som just vid samma tid konstruerats av hans lärare Poseidonios på Rhodos: *De natura deorum* II 34,88.
19. J V Field & M T Wright, "Gears from the Byzantines: A portable sundial with calendrical gearing", *Annals of Science* 42, 1985, s 87–138, idem, *Early gearing. Geared mechanisms in the ancient and mediaeval world*, Science Museum, London 1985.

20. Heron, *Dioptra* 34 och 38. Jfr ovan not 13.
21. En romersk mil är 1 480 m.
22. Vitruvius, *De architectura* X 9, 1–4.
23. A W Sleeswyk, "Vitruvius' waywiser", *Archives Internationales d'Histoire des Sciences* 39, 1979, s 11–22 (fransk översättning i *Pour la science* [Paris] 1981, no 50, s 13–21). I mera populär form presenterar Sleeswyk sina rön i "Vitruvius' odometer", *Scientific American* 245, 1981, no 4, s 158–171.
24. D R Hill, *On the construction of water-clocks*, London 1976.
25. Därtill också väl stor och klumpig att placera på en vagn avsedd för andra ändamål. Detta är ett av Drachmanns argument mot hodometerns verklighetsunderlag (1963, s 158–159, med fig 61).
26. Plutarchos, *Marcellus* 17,4. Plutarchos levde emellertid mer än 300 år efter Archimedes, och det har påpekats att han här kanske gör sig till tolk för sin egen inställning snarare än för Archimedes'.
27. W R Knorr, "Archimedes and the elements: Proposal for a revised chronological ordering of the Archimedean corpus", *Archive for History of Exact Sciences* 19, 1978, s 211–290.
28. De tvivel som framförts rörande hans upphovsmannaskap tillbakavisas av A G Drachmann, "The screw of Archimedes", *Actes du VIII^e Congrès International d'Histoire des Sciences*, 9), Paris 1958, s 940–943.
29. Cicero, *De re publica* I 14, 21–22. Övriga antika texter återges (i engelsk översättning) och kommenteras av Price 1974, s 57.
30. Jfr ovan not 2 rörande Pseudo-Aristoteles' *Mekaniska problem* 1. Anmärkningsvärt är att Herons hela "automatiska teater" fungerade på detta sätt, utan kugghjul: Heronis Alexandrini *Opera quae supersunt omnia*, Vol I, Leipzig 1899, s 334–453.
31. Vitruvius, *De architectura* IX 8,5.
32. V Foley, W Soedel, J Turner & B Wilhoite, "The origin of gearing", *History of Technology 7*, 1982, s 101–129.
33. J Needham, *Science and civilisation in China.* Vol IV:2, *Mechanical engineering*, Cambridge 1965, s 85–89.
34. Beträffande problematiken i stort, se J Needham, *Science and civilisation in China.* Vol I, *Introductory orientations*, Cambridge 1954, s 150–248.
35. Ö Wikander, "Vetenskapsmän och ingenjörer. Om kunskapsspridande i den antika världen", *Daedalus* 1986, s 16–27.
36. Det är härvid inte utan intresse att konstatera, att vårt äldsta skriftliga belägg för sāqiyan beskriver hur den egyptiska armén hissade upp havsvatten i samband med striderna mot Caesar år 48 f Kr (Hirtius, *De bello Alexandrino* 6,1). Jfr Oleson 1984, s 54–55 och 371.

Odometers, water-mills and astronomic instruments. On the earliest history of gearing

Summary

The development of ancient gearing has recently been the subject of intense study. New facts have been added, and the general picture emerging diverges considerably from earlier views.

As early as about 300 BC, movement was transmitted by the use of pentagonal prisms and chains (the repeating catapult of Dionysios of Alexandria); ca 280 a rack was combined with a toothed wheel (the waterclock of Ktesibios). Ca 260 we find evidence of the worm gear and shortly afterwards of ordinary cog-wheels engaging in parallel or at right angles (the odometer and planetarium of Archimedes).

The advance from nothing to a large repertoir of gears was, thus, achieved in less than half a century. How far this knowledge had spread beyond strictly scientific circles, we cannot say. The picture is complicated by a disturbing fact: ca 230 BC, cog-wheels are in evidence in another part of the

world, China. A number of important innovations from the last centuries BC appear almost contemporaneously in China and in the Mediterranean world; besides the cogged wheel, this is true, for instance, of water-power and the rotary quern. How ever it was achieved, new inventions obviously spread rather quickly from one end of the Eurasian continent to the other.

In the third century BC, we know of no application of the cog-wheel that is likely to have been used outside a small circle of scientists and the aristocratic upper class. These conditions did not change until the introduction of the sāqiya and water-mill during the last two centuries BC. The connection between the heavy wooden gearing of those machines and the earlier "mathematical" gearing is not obvious, but we must reasonably postulate its existence: a separate invention, with no background in earlier developments, is even less probable.

Right-angle gears were already known to Archimedes. The transfer of this strictly scientific piece of knowledge to heavy machinery was hardly the work of Hellenistic scientists, but rather of engineers with education enough to understand scientific writings, with enough knowledge of practical life to understand its needs, and with enough creative gifts to connect those fields. Before the middle of the nineteenth century, such persons were mostly to be found in the army. One problem which a Hellenistic military engineer may have encountered – not least in the desert areas of Egypt and south-west Asia – was the lifting of great amounts of drinking water from deep wells, a purpose that may well be the original one of the sāqiya rather than irrigation which was later to dominate completely.