

## De indicator in scheepsvoortstuwingsmachines Gerard van Gelswijk

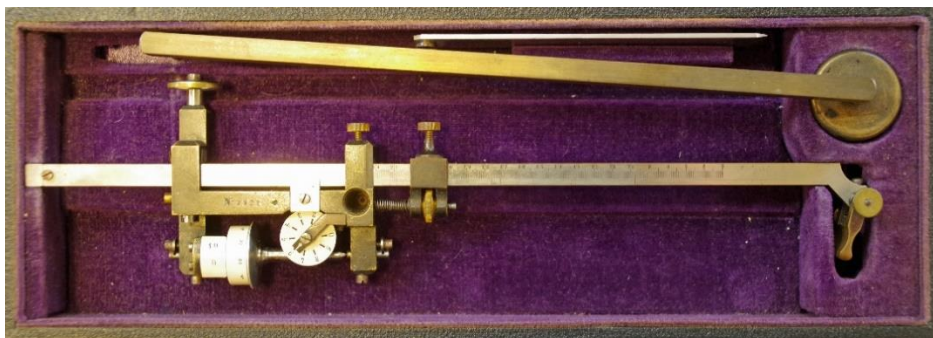
### Vermogensberekening

In het begin van de ontwikkeling van het calorische werktuig was men natuurlijk al blij als er werkelijk iets positiefs, bijvoorbeeld water uit een mijn pompen, mee gebeurde. Men vond echter al gauw manieren om de primitieve, atmosferische machine te verbeteren. Die werd zo genoemd omdat er onderdruk in de stoomcilinder werd gecreëerd, waardoor de zuiger door de buitenlucht weggedrukt werd.

De bekendste persoon in die ontwikkeling was *James Watt*. Door allerlei maatregelen slaagde hij er in het rendement van de atmosferische machine omhoog te brengen, van nauwelijks 1% tot ca. 3%.

Hij definieerde een vermogenseenheid: de paardenkracht, het paard was namelijk al eeuwenlang de universele krachtbron. Merkwaardig is wel dat de eenheid voor het vermogen kracht werd genoemd. Een paardenkracht (in metrische eenheden) was het vermogen dat ontwikkeld werd als een massa van 75 kilogram in 1 seconde 1 meter werd opgetild, oftewel  $1 \text{ pk} = 75 \text{ kgm/s} = 736 \text{ W}$ .

Door het definiëren van een vermogenseenheid werd het mogelijk om stoommachines objectief met elkaar te vergelijken. Het probleem was echter het bepalen van de kracht op de zuiger. Weliswaar was de diameter bekend, maar zeker toen men expansie van de stoom ging toepassen, was de stoomdruk in de cilinder niet meer constant en dus moeilijker te bepalen. James Watt bedacht een instrument om het drukverloop in de cilinder, gedurende de slag van de zuiger, te meten, het z.g. *indicator toestel*. Zie de foto in figuur 3.



*Fig. 1. Een poolplanimeter, waarmee de oppervlakte van een indicatordiagram kan worden opgemeten.*

Met dit toestel kan een indicateurdiagram opgetekend worden dat het drukverloop in de cilinder tijdens de slag van de zuiger weergeeft. Daarmee bepaalt men in wezen de in de cilinder verrichtte arbeid, namelijk het product van een kracht en een bepaalde weg waarover die wordt uitgeoefend.

De indicateurkraan kende drie standen waardoor er achtereenvolgens een diagram van de topzijde van de cilinder, van de bodemzijde van de cilinder en van de atmosferische druk gemaakt konden worden.

Een scheepsmachine was vrijwel altijd uitgerust met een condensor waardoor de stoom in de LD cilinder kon expanderen en een druk kreeg beneden de druk van de atmosfeer. Hierdoor ontstonden op het indicateurdiagram twee horizontale lijnen. Voor de bepaling van de gemiddelde druk in de LD cilinder moest gerekend vanaf de laagste horizontale lijn. De oppervlakte van het indicateurdiagram was een maat voor de arbeid die in de cilinder ontwikkeld was. Zie figuur 4.

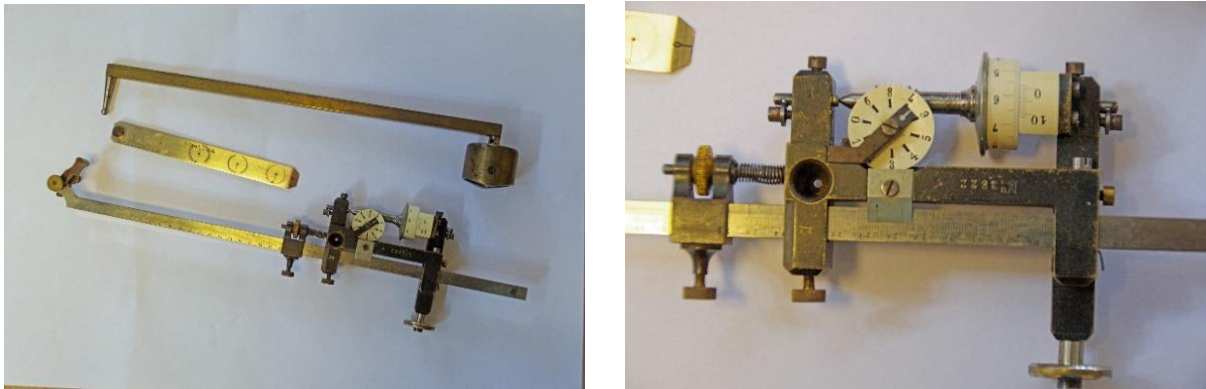


Fig. 2. Onderdelen van een planimeter.

De lengte van dit diagramoppervlak was eenvoudig te bepalen, maar het oppervlak, weergegeven door de grillige lijn, was een andere opgave. Vaak werd deze grafisch opgelost met een methode die ik, door een oude HWTK, rankiniseren heb horen noemen, eigenlijk een basale vorm van integreren. Het diagram werd verticaal in een aantal smalle stroken van gelijke breedte verdeeld. Van deze stroken wordt dan de gemiddelde lengte bepaald door de strook in het midden op te meten en de gezamenlijke gemiddelde lengte van deze stroken te delen door het aantal stroken. Op deze wijze bepaalt men dan de gemiddelde hoogte, en dus de gemiddelde druk, weergegeven als  $p_{gem}$  in de cilinder. In het algemeen zullen de  $p_{gem}$  van de top- en bodemzijde van een stoomcilinder verschillend zijn. Bepaalt men echter het gemiddelde van deze drukken, dan kan men voor het ontwikkelde vermogen in de desbetreffende cilinder de volgende formule gebruiken:

$$N = \frac{p_{gem} \cdot \frac{1}{4} \pi d^2 \cdot s \cdot n}{60 \cdot 75} \text{ pk}$$

Hierin is:

- $d$  de zuigerdiameter in m
- $s$  de zuigerslag in m
- $n$  het aantal omwentelingen per minuut.

Voor het bepalen van de oppervlakte van het indicateurdiagram kon ook doorzichtig mm-papier gebruikt worden. Men telde gewoon het aantal vierkantjes dat binnen het getekende diagram viel.

Met een poolplanimeter (zie figuren 1 en 2) kon men nauwkeuriger de oppervlakte van het indicateurdiagram bepalen. Of dit in de praktijk veel gebeurde is mij niet bekend.



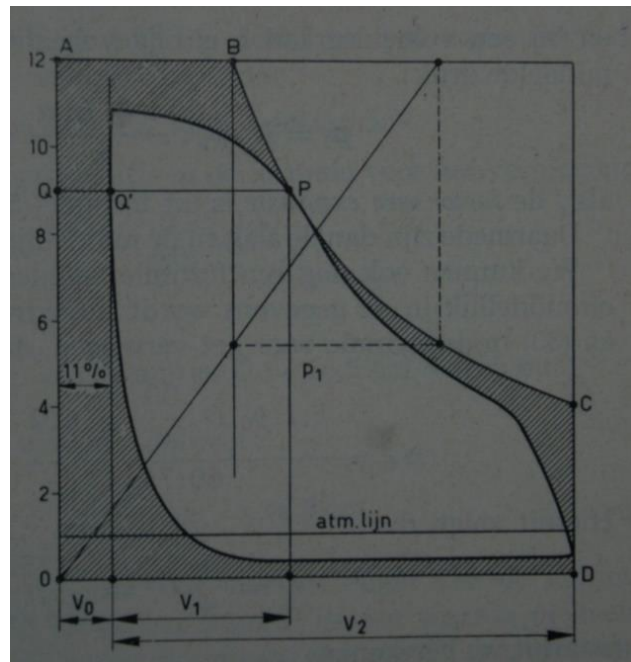
Fig. 3. Indicateur.

Het op deze wijze berekende vermogen werd nadrukkelijk in ipk uitgedrukt, omdat er gebruik gemaakt werd van een, m.b.v. een indicateurtoestel bepaalde,  $p_{\text{gem}}$  in de cilinder. Er kon dus geen rekening gehouden worden met mechanische en andere verliezen.

Voor het gemak en de nauwkeurigheid werd vaak gebruik gemaakt van een rekenliniaal, zoals in figuur 5

De hoofdmachine van een schip werd in de fabriek beproefd. De omstandigheden bij bijvoorbeeld het geleverde maximale vermogen werden vastgelegd. Dat vermogen werd apk of rempk (bhp) genoemd, omdat dit vermogen daadwerkelijk beschikbaar was voor de voortstuwing. De resultaten van de metingen op de proefstand en tijdens de proefvaart, waarbij o.m. de snelheid in knopen (zeemijlen per uur) werd bepaald, waren de waarden waarmee de conditie en prestaties van de voortstuwingsinstallatie gedurende zijn levensduur werden vergeleken. Tegenwoordig zou men deze waarden *nulmeting* noemen.

Fig. 4. Een indicateurdiagram.



Toen de voortstuwing van schepen met zuigermachines plaatsvond, voldeed deze methode, omdat men feitelijk alleen geïnteresseerd was in een verslechtering van de prestaties van de installatie. Door het z.g. trekken van indicateurdiagrammen kon de conditie van hoofdmachine(s) in de gaten houden worden. Voor de rest was het voornamelijk een kwestie van goed preventief onderhoud.

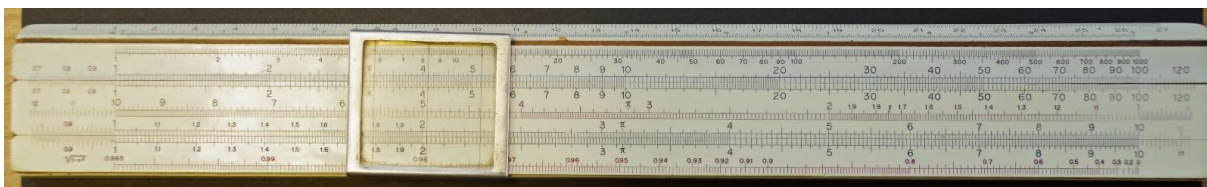


Fig. 5. Rekenliniaal, gebruikt bij het bepalen van het oppervlakte van een indicateurdiagram.

### Vermogensmeting

Anders werd het toen men stoomturbines als voortstuwingsmachine ging gebruiken. Immers men kan het vermogen van een turbine wel op de proefstand bepalen, maar men kan geen indicateurdiagrammen maken en daarmee het in de machine ontwikkelde vermogen bepalen.

Er moest dus een andere weg bewandeld worden. Men ging uit van de gedachte dat er bij de voorstuw-  
wing van een schip vermogen van de hoofdmachine, via de schroefas, overgebracht wordt op de schroef. Deze ondervindt weerstand van het water waardoor de schroefas enigszins getordeerd wordt. Die *tordering* is klein en wordt veroorzaakt door het koppel dat de as moest overbrengen. Een vuistregel was dat die maximaal 1/4 graad per meter as-lengte mocht bedragen. De tordering kon worden gemeten met een *torsie- of wrongmeter*. De tordering en het toerental van de as gaven samen het vermogen voor de scheepsvorstuw-  
wing.

Allereerst moest dus bepaald worden wat het koppel was bij een bepaalde tordering. Hiervoor werd het wegneembare gedeelte van schroefas over ongeveer 1,5 m spiegelglad gedraaid en nauwkeurig op eenzelfde diameter gebracht. Daarna werd dit gedeelte van de schroefas, vlakbij de verbindingsflenzen, horizontaal opgelegd. Een flens werd onwrikbaar aan een vast punt vastgezet en werd aan de andere flens, op een afstand ongeveer gelijk aan het glad gedraaide gedeelte, een hefboom bevestigd, aan het einde waarvan gewichten konden worden opgehangen. Zodoende kon een tabel worden gemaakt die het verband weergaf tussen het koppel (belasting en lengte van de hefboom), en de zeer geringe hoekverdraaiing van de as.

Tijdens de afbouw van het schip werd o.m. de schroefasleiding aangebracht, uitgelijnd en de torsiemeter gemonteerd door op de voorgeschreven afstand van elkaar en op het glad gedraaide gedeelte van de as, de twee delen van de torsiemeter te bevestigen en af te stellen. Tijdens het varen kon men de hoekverdraaiing van de as meten en m.b.v. de formule:

$$N = \frac{1,138 \cdot d^5 \cdot \alpha \cdot n}{L} \text{ pk}$$

het aan de schroef geleverde vermogen.

Hierin is:

- $d$  de diameter van de schroefas in cm.
- $\alpha$  de gemeten tordering in radialen.
- $n$  het toerental van de schroefas in omwentelingen per minuut.
- $L$  de afstand tussen de twee delen van de torsiemeter in cm.
- 1,138 een constante bepaald door het materiaal waaruit de schroefas vervaardigd is.

### Voorbeeld

Dit voorbeeld laat zien dat de hoek  $\alpha$  (in radialen), erg klein is en nauwelijks 10% van een graad bedraagt. Uitgaande van een schroefasdiameter van 600 mm, een schroeftoerental van 108,5 omw/min en een vermogen van 26.000 pk komt men, na enig rekenwerk, op 0,001656 radiaal. Dat is 5,7 boogminuten, oftewel ca. 54 mm gemeten aan de omtrek van de schroefas bij een afstand tussen de meetpunten van 100 cm. Deze kleine waarde is lastig waar te nemen. Daarom vergroot men op de een of andere wijze de aflezing zodat men een nauwkeuriger aflezing verkrijgt.

Omdat het koppel bij een turbine constant is, maar bij zuigermachines fluctueert, moet men bij dit soort aandrijvingen eerst een grafiek vervaardigen om het gemiddelde koppel vast te stellen, voordat men de aanwijzing van de torsiemeter kan gebruiken om het opgenomen vermogen te kunnen bepalen.

Torsie- of wringingsmeters zijn in vele uitvoeringen op de markt gebracht, dit is echter niet de plaats om dieper op de constructies van deze meters in te gaan, maar het zijn alleszins mooie staaltjes van fijnmechanische techniek.