

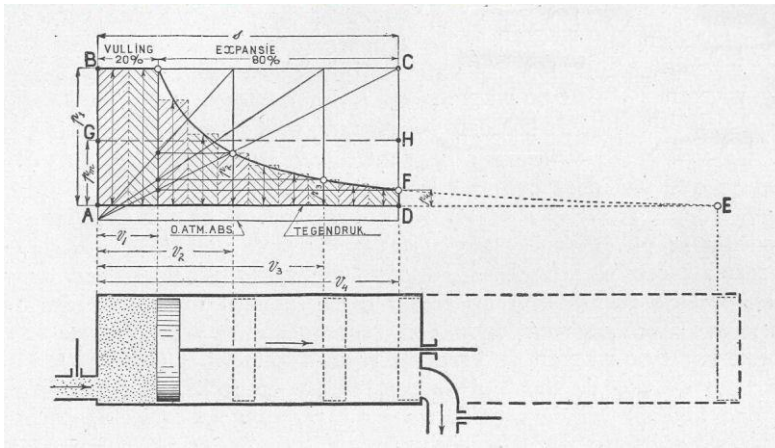


## Compound machines

**Woesj.....Woesj.....Woesj... Prachtig, dat geluid van een vertrekkende stoomlocomotief. Stoten stoom, vermengd met zwarte rook, de gebruikte stoom jaagt de trek aan, het vuur in de vuurkist laait op... Wat we hier ook horen is het verlies van energie.**

### expansie

Dat vraagt om een uitleg en dat doe ik aan de hand van Koos, een machine uit een baggermolen. Koos is een volledrukmachine. Dat wil zeggen dat de stoomtoevoer is geopend tot het einde van de slag. Stel, dat de druk 6 bar is, dan laat de machine aan het eind van de slag de gebruikte stoom onder die druk weglopen. Dat is zonde van de energie. Nu is Koos een kleine machine, dus ook het verlies is niet zo groot. Maar bij grote machines betekent het een behoorlijk verlies, zeker als ze onder hogere stoomdrukken werken. Vandaar dat er al in de 18<sup>e</sup> eeuw werd nagedacht om meer energie aan de stoom te onttrekken. Het geheim is de *expansie* van stoom. Bij expansie wordt de stoomtoevoer (de vulling) beperkt. Bijvoorbeeld tot een vijfde of een kwart van de slag.



In dit diagram uit "Krachtwerktuigen" zien we de stoomdruk, afgezet tegen de slaglengte van de zuiger. Na een vijfde van de slag, of 20%, wordt de stoomtoevoer afgesloten. Dan begint de expansie van de stoom, waarbij het volume steeds groter wordt en de druk afneemt. Maar over de resterende 80% van de slag wordt er nog steeds energie aan de stoom onttrokken. In theorie zou men bij een tweemaal langere machine het laatste restje energie kunnen onttrekken (punt E in het diagram), maar ten eerste win je dan maar een heel klein beetje energie terug en ten tweede wordt de machine dan veel groter en duurder. Daarom voert men op zeker moment de stoom af. In de grafiek is dat moment rechts te zien in het stukje F-D. In dit voorbeeld levert de machine door de expansie van die 20% stoomvulling 2,5 maal zoveel vermogen uit die hoeveelheid stoom. Locomotieven werken ook met expansie, maar die is over een groot gebied regelbaar (van 0 tot 80%). Bij het optrekken is het bijna een volledrukmachine.

### compound

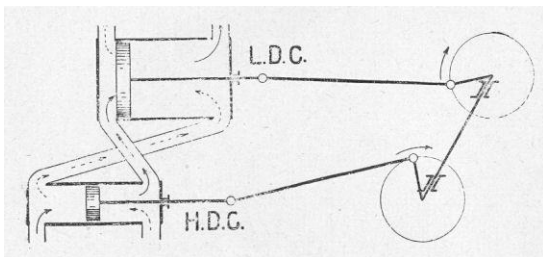
Compound machines zijn meervoudige expansiemachines. Bij een expansie machine komt de verse -verzadigde- stoom de cilinder binnen bij een bepaalde druk en temperatuur en wordt meestal afgevoerd naar een condensor, waar een lage druk en lage temperatuur heerst.

Tijdens het expanderen van de stoom wordt de druk dus lager. Dat is de *spanningsval*. Tegelijkertijd wordt ook de temperatuur lager en dat is de *warmteval*. Tijdens de warmteval daalt de temperatuur. De warmteval kan verergerd worden door een aantal oorzaken. Ten



eerste het contact tussen de verse stoom en de koelere cilinderwand, waardoor de temperatuur daalt. Ten tweede door de *schadelijke ruimtes*. Dat zijn de kleine ruimtes tussen de zuiger en de cilinderdeksels en in de toevoerkanalen tussen de stoomschuiven en de cilinderhelften. Die worden met stoom gevuld, maar leveren geen energie. Erger nog, ze koelen de stoom alleen maar af.

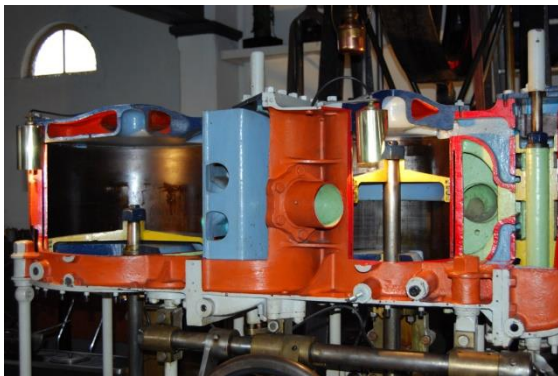
Als we de stoomdruk verhogen, wordt ook de warmteval groter en dan kan er begincondensatie ontstaan. Verzadigde stoom die condenseert, levert geen vermogen meer op. Dus de verhoging van de stoomdruk wordt dan teniet gedaan door de begincondensatie. Als de stoom vervolgens wordt afgevoerd naar de condensor daalt de temperatuur van de stoom sterk. Het gecondenseerde water dat is neergeslagen op de relatief warme cilinderwand verdampt weer, wat warmte onttrekt aan de cilinderwand. Bovendien was het gietijzer van de cilinder ook niet erg bestand tegen die snelle temperatuurwisselingen.



Een van de oplossingen was om de warmteval over twee cilinders te verdelen. In de tekening zien we twee dubbelwerkende cilinders die elk met een kruk verbonden zijn. De stoom die uit de hogedrukcilinder (**HDC**) komt gaat via twee buizen naar de lagedruk cilinder (**LDC**).

In werkelijkheid zit er maar één buis tussen beide cilinders en de stoomschuiven bepalen aan welke kant van de lagedruk cilinder stoom wordt toegevoerd. Zo'n buis heet *receiver* en is bij elke compound duidelijk te zien. Je zou het ook "wachtkamer" kunnen noemen, want de stoom uit de HDC kan niet onmiddellijk in de LDC gebruikt worden.

In dit voorbeeld is een scheepsmachine getekend. De twee krukken staan t.o.v. elkaar onder een hoek van 90 graden. De machine kan daardoor nooit in een dood punt komen te staan en loopt dientengevolge altijd aan. En twee cilinders geven ook nog eens een gelijkmatiger gang, heel prettig voor een schip. We kunnen het goed zien bij de opengewerkte compound machine, "Jet", die in het museum staat. Wie goed kijkt, ziet ook stoommantels rond de cilinders om ze te verwarmen en condensatie tegen te gaan.



Als bij de machine op de tekening de stoomdruk in de HDC 6 bar is, dan ontvangt de LDC nog maar een druk van 0,5 bar. Vandaar dat het zuigeroppervlak van de LDC veel groter is om zodoende toch een gelijke kracht op beide zuigers te krijgen.

Scheepscoumpoundmachines hebben bijna altijd een condensor en die creëert een vacuüm van ongeveer 0,2 bar absoluut, zodat de spanningsval in de LDC toch nog bijna 1,5 bar



bedraagt. Dit verhoogt dus het totale vermogen. Een ander woord voor compound machine is “tweevoudige expansiemachine”.

Op een aantal andere kleinere exemplaren na, zijn alle machines in het museum van het expansietype. Zelfs het oudje, de Everdingen & Evrard uit 1851. Maar die werd in 1890 pas omgebouwd tot expansiemachine.

De compoundmachines zijn goed te herkennen, want dat zijn de verticale zeevaart machines met cilinders van verschillende grootte. Op de kleine Bellis & Morcom na, want die werd gebruikt om bij de spoorwegen elektriciteit op te wekken. De “Vlaanderen” in het museum is zelfs een *triple* expansiemachine, omdat de stoom nog voor een derde keer wordt gebruikt. Daarom heeft deze machine een hogedruk-, middendruk- en lagedrukcilinder en is dus een drievoudige expansiemachine.

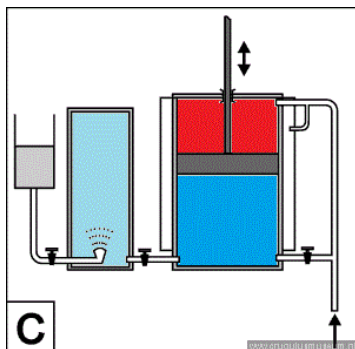
Toch zijn er in het museum machines die ook een grote spanningsval hebben en toch geen meervoudige expansiemachine zijn. De warmteval kan ook op een andere manier verkleind worden, door er voor te zorgen dat de schadelijke ruimtes zo klein mogelijk zijn. Dat kan door i.p.v. stoomschuiven kleppen te gebruiken. Het gebruik van oververhitte stoom helpt ook, zoals bij de Backer & Rueb. Dat is een *gelijkstroom* machine die op 13 bar werkt. Het probleem is daar mede opgelost door de inlaatkleppen en de uitlaatopeningen ver van elkaar verwijderd te houden. En die uitlaatopeningen hebben geen schadelijke ruimte.

### de patenten van James Watt

Zie voor het leven en werk van James Watt Nieuwsbrief 81 of de pagina:

<http://www.hansonline.eu/artikelen/>

We gaan terug in de tijd. Die patenten hebben een belangrijke rol gespeeld in het verhaal van de compoundmachines. Tot de zomer van 1800 maakten deze patenten het voor anderen onmogelijk om een betere machine te bouwen.



Het patent van Watt uit 1769, dat een enkelwerkende machine beschreef, omvatte een aantal belangrijke punten (zie ook tekening C):

- 1 de cilinder is aan de bovenzijde gesloten
- 2 de verse stoom drukt de zuiger omlaag
- 3 er bevindt zich een stoommantel rond de cilinder om afkoeling tegen te gaan
- 4 een Watt machine heeft een aparte condensor
- 5 een Watt machine heeft een lucht(-condensaat) pomp
- 6 de zuigerstang loopt door een pakking in het bovenste cilinderdeksel

Hier is goed over nagedacht en vooral punt 4, de condensor, vormde voor anderen een hindernis om een zuinige machine te bouwen. Het monopolie werd achtereenvolgens



bedreigd door Jonathan Hornblower jr., Edward Bull en William Symington, met 7 jaar aan rechtszaken tot gevolg.

Let op de evenwichtsbuis -met klep- tussen de onderzijde en de bovenzijde van de cilinder. Als de zuiger omhoog gaat, door het gewicht van de waterpompen aan de andere kant van de balans, wordt de stoom boven de zuiger via de evenwichtsbuis weggedrukt naar de onderzijde, waarna die uiteindelijk in de condensor verdwijnt. Onder de zuiger heerst dus een vacuüm.

Dit lijkt al een beetje op de Cornwall machine. De uiteindelijke Cornwall machine ontstond in de 1830's en eigenlijk is het de machine van James Watt uit 1769, maar dan met expansie, mogelijk gemaakt door een extra klep en hogere stoomdruk. Bij een Cornwall machine is de vulling doorgaans 50%, dus de helft van de slag.

### **Watt en de expansie**

Al in 1769 schrijft Watt aan zijn vriend Dr. Small over zijn plan om het effect van de stoom te verdubbelen door de energie van de stoom te gebruiken die anders in de condensor stroomt. Zijn plan is om slechts over een kwart van de slag stoom toe te laten. Dit idee is niet van hemzelf, want in de Newcomen machines werd de stoom soms vroegtijdig afgesloten om te voorkomen dat de balans, de houten balk die zuigerstang en pompstang verbond, op de stootveren zou slaan. Hier zat dus geen economisch motief achter. Met een aanpassing aan de klepbediening kon de timing van het afsluiten van de stoomtoevoer en de opening van de uitlaat naar de condensor goed geregeld worden.

In 1777 past Watt expansie toe in zijn tweede machine die op de Soho works van Matthew Boulton werd gebouwd. Het ding, "Beëlzebub" (duivel) genoemd, maakte een hels kabaal vanwege de flinke stoten die de machine gaf. Met wat aanpassingen werd het de rustig lopende "Old Bess", die nu in het Londense Science Museum staat.

Daarna verliest Watt zijn interesse in expansie maar als Jonathan Hornblower junior in 1781 met zijn compound machine komt, dient Watt een patent in dat de expansie beschrijft. In de specificaties van dit patent wordt ook een "compound" of "double engine" beschreven. Maar vreemd genoeg bouwt hij in 1782 zijn machine op uit twee cilinders van gelijke afmetingen, waarbij de ene de stoom van de andere ontvangt. Deze machine kon ook werken als twee aparte stoommachines en als zodanig werd hij ook de rest van zijn bestaan gebruikt, want als compound machine was het geen succes.

James Watt was ontzettend bang om stoom onder hoge druk te gebruiken. Angst zat toch al diep in zijn systeem gebakken. Vandaar dat hij nooit verder durfde te gaan dan zo'n 1,5 bar overdruk en bij die druk heeft het gebruik van expansie weinig zin.

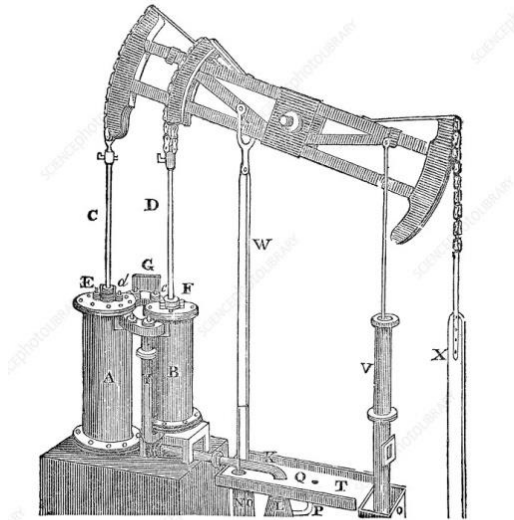
### **de Hornblowers**

Dat was een familie van technici uit Cornwall. Vader Jonathan (1717-1780) en zijn zoons Jonathan jr. (1753-1818) en Jabez (1744-1814) waren betrokken bij het oprichten van een groot aantal Newcomen machines. James Watt kon met de oude Hornblower goed opschieten, maar junior en Jabez waren een nagel aan zijn doodkist. Jonathan jr. werd vooral bekend van de compound machine en Jabez is in ons land bekend als oprichter van de eerste Newcomen stoommachine voor een stoomgemaal op Nederlandse bodem. In 1775 richtte Jabez de machine van het gemaal bij de Oostpoort in Rotterdam op.

Jonathan jr. had, onafhankelijk van James Watt, een plan om een compound machine te bouwen waarbij de tweede cilinder qua capaciteit groter was dan de andere. In 1776, Hornblower was toen 23 jaar, maakte hij een model van zijn machine. Zijn vader dacht dat het afdichten van de bovenzijde van de cilinders in de praktijk voor problemen zou kunnen zorgen. Niet lang daarna zag Jonathan hoe Watt dit had opgelost bij de eerste Boulton &



Watt machines die in Cornwall werden opgericht. Hij bouwde nu een groter model en zijn idee werkte. Hij kreeg er in 1781 patent op. En eerlijk is eerlijk: Jonathan Hornblower jr. wordt hiermee de uitvinder van de compoundmachine! De uiteindelijke machine krijgt cilinders van 48 en 61 cm diameter en de bijbehorende slagen zijn 183 en 244 cm.



(Hornblower's Engine. 1781.)

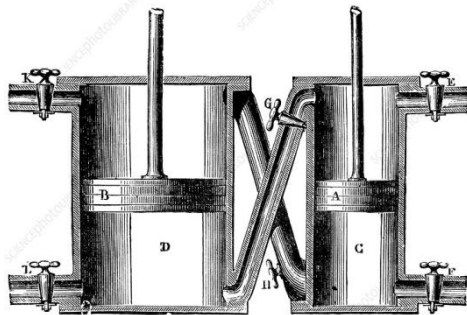
Deze machine kwam in de Radstock mijn bij Bath te staan. Watt wees de mensen van Radstock erop dat in hun machine patenten zaten die geschonden waren door Hornblower. Die kon geen aparte condensor gebruiken, dus had een oppervlakte condensor onderin de cilinder aangebracht. Dat was een kwetsbare plaats, daarom rustte hij de machine vervolgens met een geperforeerde bodemplaat uit, dus een valse cilinderbodem. Onder die plaat zat een waterinjector om het vacuüm te krijgen. Toen de zaak al een tijdje sleepte verving Hornblower de waterinjector door een aparte condensor en daarbij moest hij nu ook een luchtpomp gebruiken. Duidelijk schendingen van het Watt patent. Hangende deze zaak kwamen er weinig orders bij Hornblower binnen en uiteindelijk moesten de gebruikers van een Hornblower machine royalty's aan Boulton & Watt betalen.

### Roentgen, Woolf en Harvey

In de zomer van 1800 loopt het patent van Boulton & Watt af. Bevrijd van alle beperkingen kan iedereen zich uitleven op allerlei typen machines. Richard Trevithick bouwt in 1801 al een machine die op een hoge stoomdruk werkt. Juist door de hoge druk kan de machine klein zijn en dat is precies wat hij nodig heeft om stoomkracht in een voertuig en een locomotief te gebruiken.

Arthur Woolf (1766-1837) combineert de hoge stoomdruk van Trevithick met de compound machine van Jonathan Hornblower. Hij experimenteert en komt op zeker moment tot een compound machine die uit 9 cilinders bestaat. Zijn stoomdruk was ongeveer 4 bar. Uiteindelijk bouwt hij een "normale" compound machine met twee cilinders.





Woolf verbindt de beide zuigerstangen aan een krukas, zodanig dat beide zuigers in fase bewegen (dus 0 graden verschil). Voor de toevoer van de stoom naar de LDC heeft hij echter een heel lange leiding nodig. Met beide zuigers 180 graden in tegenfase is de leiding veel korter maar het probleem blijft dat beide zuigers ook hier in een dood punt kunnen staan. Dat betekent dat de machine niet zonder hulp gestart kan worden. Dat is lastig bij een machine die voor de scheepvaart bedoeld is. De Woolf machine is daardoor niet geschikt om mee te manoeuvreren.

Toch is het een interessante machine en Moritz Roentgen (1795-1852), geboren in Oost-Friesland (Duitsland) neemt deze machine als uitgangspunt voor zijn latere proeven.

Roentgen (of Röntgen) is een intrigerende man. Op 13 jarige leeftijd komt hij naar Nederland en meldt zich in 1808 bij het Koninklijk Instituut der Marine in Enkhuizen, waar hij als adelborst wordt opgeleid tot zeeofficier. In 1810, op 15-jarige leeftijd, komt hij in dienst bij de Marine, die door de bezetting in Franse handen is. In 1813 is Nederland bevrijd. Roentgen ontsnapt en meldt zich bij de Nederlandse Marine. Hij maakt snel carrière en mag in 1818 in Engeland de moderne scheepvaart bestuderen. In 1823 raakt Koning Willem I in hem geïnteresseerd en mag hij als adviseur “voor zaken van werktuigkunde” van de Koning gaan spioneren in Groot-Brittannië. Hij wordt geridderd door de Koning en zijn rapport leidde tot modernisering van de Nederlandse scheepsbouw.

In 1823 is hij betrokken bij de oprichting van de Nederlandse Stoomboot Maatschappij (NSBM) en wordt de eerste technisch directeur. Hij zorgt voor de bouw van “Etablissement Fijenoord”. Dat is een scheepswerf en Roentgen bouwt er bovendien een machinefabriek. Dit was de plek waar zijn eerste compoundmachine het levenslicht zag.

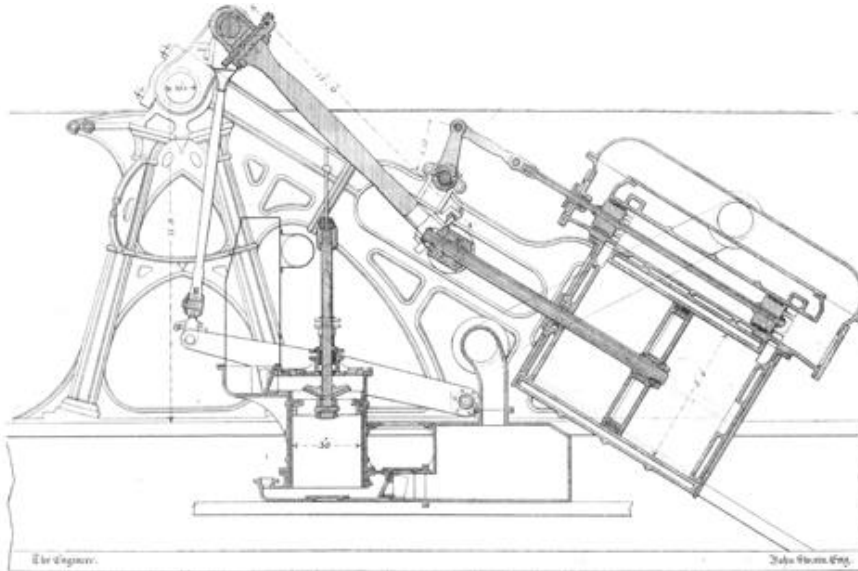
Zoals eerder gezegd, gaat Roentgen uit van de machine van Woolf. Een belangrijke stap hierbij was de aanstelling van N.O. Harvey, die de technische leiding kreeg over het bouwen van de machines. Hij had met Woolf gewerkt en kwam ook vaak bij zijn oom, H. Harvey die eigenaar was van de *Hayle Foundry* in Hayle, Cornwall. Dit bedrijf bouwde ook de grootste stoommachine ter wereld: die van het gemaal Cruquius. Een tante van N.O. Harvey was getrouwd met Richard Trevithick. Kortom, Harvey kon van jongs af aan met de grootste Engelse ingenieurs werken.

In 1828 was men al volop bezig met het bouwen van machines en Richard Trevithick die in dat jaar een bezoek bracht aan “Fijenoord” was zeer onder de indruk van de capaciteiten van deze jonge werf.

Aangezien het in die tijd verboden was om hoge-drukmachines te gebruiken in passagiersschepen en marineschepen (vanwege eventuele voltreffers in de stoomketel!), richtten Roentgen en Harvey zich op een sleepboot. Daarvoor golden de beperkingen niet. Men was vanaf 1825 bezig met het bouwen van de sleper “Hercules”, die maar niet wilde vorderen. Roentgen nam vanwege de tijdsdruk een bijzondere beslissing: hij liet een machine uit een andere sleper halen. Dat was een hogedruk machine met twee cilinders, die



afzonderlijk werkten. Die werd voorzien van een lage-drukcilinder uit weer een ander schip. Samen werden deze machines gecombineerd tot een compound machine. En natuurlijk paste deze oplossing niet meteen. De LDC was in feite te klein, dus niet alle stoom kon meteen in de LDC gebruikt worden. Door een tandwiel constructie liet men de LDC sneller draaien en toen was het probleem opgelost. Technisch nog niet zo fraai, maar het werkte. In elk geval hadden de zuigers verschillende fasen, dus de manoeuvreerbaarheid was in orde.



*De tekening toont de HDC (verticaal) en de LDC (schuin) uit de "Batavia" uit 1840. Omdat de stoom uit de HDC niet meteen in de LDC kan worden gebruikt, is er een wachtkamer of receiver gebruikt. Die is rechts van de HDC te zien. Roentgen gebruikt geen vliegwiel. Door de opstelling van de cilinders kunnen de zuigerstangen nooit in fase of tegenfase zijn. Het probleem van de manoeuvreerbaarheid is hiermee opgelost. De receiver is overigens geen uitvinding van Roentgen.*

Dankzij de ontwikkeling van de compound machines kon de NSBM concurrerend werken. De machines werden vooral ingezet op schepen die in de binnenwateren voeren en dat is misschien de reden dat de compoundmachine in de zeevaart in die jaren nog niet wijd verspreid was.

Bovendien gebruikten stoompassagierschepen op zee tot in de 1870's stoom onder lage druk wat compounding uitsloot. De stoom werd opgewekt in vierkante of rechthoekige ketels. Men gebruikte al wel condensoren van het injectie type. Hierbij werd de stoom met koud water gecondenseerd en vervolgens werd watermengsel als voedingswater naar de ketel gepompt. Voor elke kilo stoom werd tot wel 30 liter water gebruikt. Aangezien men voor een lange tocht niet genoeg zoet water kon meenemen, moest men hiervoor wel zeewater gebruiken. De ketel bevatte dus zeewater en dat was behoorlijk zout. Dat betekende dat de temperatuur in ketel onder de 144 graden moest blijven, anders kristalliseerde het zout in de ketel. Dus voor dit punt bereikt werd, moest het pekewater geloosd worden. De Britse ingenieur Brunel had in die tijd al een patent op een oppervlakte condensor, waarbij het zeewater gebruikt werd om dit buisjes systeem te koelen, maar dat leverde nog lange tijd problemen op met de afdichting van de kleine buisjes. Zeewater in de ketel was tot in de 1870's gebruikelijk.

Het is heel bijzonder dat in Nederland ruim 40 compound machines zijn gebouwd



Hans Walrecht

en dat dit zo onbekend is gebleven, zelfs bij de Engelsen. Pas in de 1870's en 1880's worden ze algemeen toegepast. Onze Jet is daarvan een voorbeeld. Zij is in 1878 gebouwd in Delfshaven en vormde de halve aandrijving van een rivierkanonneerboot uit de *Isala* klasse. Het kanon kon niet worden gedraaid, dus door met de twee compounds "te spelen" kon men het hele schip draaien om zo het kanon te kunnen richten.

### Enkele voorbeelden van compoundmachines

Het type kwam vooral veel voor in de zeevaart en de industrie, maar ook in locomobielen. In de laatste twee decennia van de 19e eeuw waren compound locomotieven ook populair, maar kennelijk niet in Nederland. Het bleek dat de oververhitting van stoom ook prima werkte om condensatie te voorkomen en de machines waren daardoor eenvoudiger en goedkoper.

Er zijn verschillende uitvoeringen van een compound expansiemachine. Zie hier een opsomming:

CROSS compound - de beide cilinders bevinden zich aan weerszijden van het vliegwiel:



Deze 80 pk sterke *Robey* uit 1935 laat een cross compound zien. De machines van ijzergieterij de Prins van Oranje die in 1897 in het hulpstoomgemaal werden geplaatst had de beide cilinders aan één zijde van het vliegwiel. Waarschijnlijk was het zo eenvoudiger om de koppeling met de Allen centrifugaalpomp te maken.

TANDEM compound - de beide cilinders bevinden zich op één as:



Bovenstaande foto is van de 2500 pk sterke Trencherfield Mill machine in Wigan, bij Manchester. Links zien we een tandem met de hogedruk- en de middendrukcilinder. Rechts

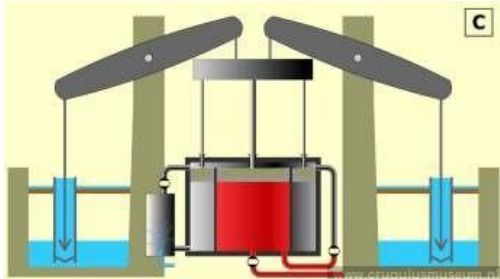




Hans Walrecht

zien we de twee gelijke lagedrukcilinders in een andere tandem. Het is dus een combinatie van cross compound en tandem compound.

TELESCOPIC compound - de twee cilinders bevinden zich in elkaar:



Met als voorbeeld de machine van het Cruquius gemaal, uit 1849. De HDC bevindt zich in het midden, de LDC eromheen. Die LDC heeft dus een ringvormige zuiger. De Engelsman *James Sims* heeft tussen 1830 en 1840 een verticale tandem (of "steeple") compoundmachine draaien, met de HDC bovenaan. Harvey's uit Hayle schuift die machine in elkaar en nu zit de HDC midden in de LDC. Bovendien wordt de werking omgekeerd. Zie voor uitgebreide informatie de beschrijving door Robert Gisolf: <http://cruquiuseum.nl/stoom-cyclus/> en ik wil Robert nog bedanken voor de twee plaatjes C.

Er resteren nog enkele gebouwen van de Hayle Foundry in het gelijknamige plaatsje. Op de buitenmuur van het kantoor is een grote cirkel geschilderd met een diameter van 144 inch, of 366 cm. Dat is de diameter van de LDC van de Cruquius machine. Na 170 jaar is men er nog steeds trots op!

Hans Walrecht