

LOCOMOTIEVEN

LOCOMOTIEVEN



Het collegedictaat
van
Prof. Ir. F. Westendorp

bewerkt en aangevuld met nieuwe ontwikkelingen uit een
evolutie van een eeuw in de locomotiefbouw

door
J. Simons

Brave New Books
2014

Vormgeving: Toon Stein

Foto omslag achterzijde: © Stein Koevoets, Breda 2014

J. Simons
Locomotieven
Brave New Books – Amsterdam
2014

411 pag. – 26 x 19 cm
ISBN: 978 94 02 1243 16

© 2014, J. Simons

Behoudens de uitzonderingen in of krachtens de Auteurswet van 1912 mag niets uit deze uitgave worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch door fotokopieën, opnamen of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de auteur.

Hoewel bij de realisatie van deze uitgave een zo groot mogelijke nauwkeurigheid en correctheid werd nagestreefd, kunnen aan de inhoud geen rechten of aanspraken worden ontleend. De auteur en/of de uitgevers wijzen iedere aansprakelijkheid voor eventuele (druk)fouten, onvolkomenheden en onvolledigheden van de hand.

“Legt U Uw wapen daar maar neer.” *

Foto omslag voorzijde: origineel algemeen plantekening van het SS 700 ontwerp van Prof. Ir. F. Westendorp, zoals uitgevoerd door Beyer Peacock te Manchester, 1910. Tekening Beyer Peacock, Coll. auteur.

Foto vorige pagina: statiefoto van de eerste Staatsspoorlocomotief no. 701. De foto hing jarenlang, niet zonder trots, op het kantoor van Prof. Ir. F. Westendorp, de ontwerper van deze mooie serie. Foto coll. Stichting Railpublicaties.

* Deze even hilarische als geveugelde woorden richtte Prof. Ir. F. Westendorp tot W.A.C. Pont, de tekenaar van de schetsen in zijn collegedictaat, toen deze in het ceremoniële tenue, inclusief sabel, behorende bij de rang van officier van de Koninklijke Landmacht op zijn diploma-uitreiking verscheen. Ondanks alle hilariteit had de wat excentrieke Pont het volste recht om in dit tenue te verschijnen al deed het wel wat vreemd aan. Deze woorden zijn opgetekend uit de mond van Ir. F. Oudendal, de latere locomotiefontwerper bij Werkspoor, welke bij die gelegenheid ook zijn diploma ontving.

Voorwoord

Dit boek draag ik op aan alle familieleden van mijn moederszijde, die werkzaam waren bij Machinefabriek “BREDA” voorheen Backer & Rueb en de Staatspoorwegen, van wie ik de interesse en kennis in locomotief- en ketelbouw met de paplepel binnen heb gekregen (en dat waren nogal wat familieleden!)

Ik voel me eigenlijk niet de auteur van dit werk. Die eer komt nog steeds toe aan Ir. Westendorp en -ook- Ir. Pont. Ik acht me eerder co-auteur door dit honderd jaar oude collegedictaat aan te vullen met eigen nieuwe ervaringen, ontwikkelingen, constructiemethoden en onderzoeksresultaten, die dit collegedictaat na een eeuw actueler maken dan het nog steeds was voordat het door mij bewerkt werd.

Om het concept van het dictaat zo origineel mogelijk te houden en ook om aan de niet geringe bijdrage van Ir. Pont eer te doen heb ik zijn enorme aantal schetsen in originele vorm opgenomen. Op deze keuze verwacht ik veel kritiek; ik geef toe dat de tekeningen soms om een betere weergave vragen Een betere weergave was niet mogelijk. Er was een alternatief aanwezig door de tekeningen uit de bewerking van Ir. King te gebruiken. Het zou onrecht aan het werk van Pont en de authenticiteit van het manuscript gedaan hebben.

Het bewerken leverde nog twee dilemma's op.

Het eerste betrof de vraag wat ik moest doen met het vaak archaïsch en negentiende-eeuwse taalgebruik van Westendorp om het geheel leesbaar en begrijpelijk te maken. Ik heb met zo weinig mogelijk ingrepen gepoogd om het in de 21e eeuw prettig te doen lezen en verder te gebruiken.

Het tweede dilemma ging dieper; met een licht eufemistische ondertoon kan gezegd worden dat het Internationale Stelsel van Eenheden in de laatste honderd jaren “ietsje” veranderd is. Ik heb de formules en eenheden zoals ze in het originele concept gebruikt zijn gehandhaafd omdat een converteren naar het nu gebruikte stelsel een Babylonische spraakverwarring zou geven waarin men door de bomen het bos niet meer zou zien. Dit geldt ook voor de gevallen waarin Engelse “Imperial” maten gebruikt worden. Tenslotte zijn deze maten en de eindresultaten van rekenformules met moderne middelen eenvoudig naar de tegenwoordig gebruikte eenheden te converteren.

Rest nog een antwoord op de vraag waarom ik dit werk het licht heb doen zien. Ook hier is het antwoord tweeledig.

Nederland kent in tegenstelling tot de ons omringende landen geen echte cultuur op het gebied van (stoom-)locomotiefbouw. Er zijn vrijwel geen wetenschappelijke werken geschreven of is onderzoek gedaan van het formaat zoals dat bijvoorbeeld in Duitsland en Engeland gebeurde. De enige onderzoeken van enige importantie die zijn uitgevoerd waren die van Dr. Ir. F. C. Huygen en in mindere mate die van Ir. P. de Gruyter en betroffen de exhaustwerking van locomotieven. Doordat Prof. Westendorp hoogleraar werd, ontstond ineens behoefte aan een werk in het Nederlands. Het is het enige werk in het Nederlands en daarnaast betreft het tevens de ontwikkeling van Nederlandse locomotieven. Om deze reden is het gewenst dit werk opnieuw en in een actuele vorm te publiceren.

De tweede reden is dat een trend aanwezig is om nieuwe stoomlocomotieven te bouwen. Helaas bestaan er geen regels om nieuwbouw stoomlocomotieven te laten voldoen voor gebruik op hoofdlijnen. Ik hoop dat dit werk daaraan kan bijdragen.

Voordat Ir. Westendorp zijn collegedictaat het licht deed zien moesten geïnteresseerden in de locomotiefbouw te rade bij buitenlandse publicaties. In Nederland bestonden alleen maar de werken van Harterink en Mook en die van Gatsonides en Labrijn, welke de werking van diverse onderdelen van een stoomlocomotief beschreven en hoe ermee om te gaan als deze onderdelen te samen een stoomlocomotief hadden gevormd. Daarom vindt U in dit werk geen beschrijvingen van locomotiefonderdelen en hun werking: daarvoor moet U bij die auteurs zijn. Dit boek gaat over de fase die daar aan vooraf ging.

Het proces waarin de vraag ontstaat naar een locomotief en via een schetsje en berekeningen uiteindelijk een uit het niets nieuw gebouwde stoomlocomotief op de rails verschijnt wordt in dit werk eerst in theorie uit de doeken gedaan en aan het eind van dit werk toegepast in de praktijk zoals dit bij de SS serie 1200 gebeurde.

Tenslotte een vermaning aan diegenen die zich afgeschrikt menen te voelen door de (vele) formules die in dit collegedictaat “opgelepeld” worden. Het is geen hogere wiskunde die gebruikt wordt en zelfs bij gebrek aan wiskundige gaven leest men tussen de regels door hoe diverse locomotiefseries gebouwd werden en zelfs waarom bepaalde types een minder goede reputatie hadden.

Het maakt daarom dit boek een werk dat voor iedereen bereikbaar en te bevatten is en daarom wens ik al die lezers een heel plezierig te verkrijgen inzicht toe in hoe een (stoom-)locomotief gebouwd wordt.

Dit voorwoord is natuurlijk onvolledig zonder een woord van dank aan diegenen die een bijdrage aan dit werk hebben verleend.

Op de eerste plaats moet ik Paul Henken noemen. Met hem is niet alleen bij mijn publicaties maar ook bij die van hem een vorm van samenwerking ontwikkeld die perfect te noemen is en die al veel vruchtbare resultaten heeft afgeworpen. Ik dank ook Henk de Jager van de Stichting Railpublicaties voor het ter beschikking stellen van een aantal foto's. De tekeningen kwamen beschikbaar dankzij de medewerking van de heren Peter-Paul de Winter en Wil Al van het Nederlands Spoorwegmuseum. Ceri Forster en Jan Hicks van het Museum of Science of Industry te Manchester waren mij behulpzaam om de documenten van Beyer Peacock ter beschikking te stellen. Hertzelfde geldt ook voor Andrew Hardy en Andrew Croxton van het National Railway Museum te York. Documenten van Beyer Peacock kwamen ook uit de archieven van Peter Manning en wijlen Joe Lloyd.

Tot slot dank ik Toon Stein voor adviezen betreffende zijn kritische juridische blik op de regelgeving en de hulp bij de opmaak en de uitgave van dit boek.

Breda, december 2014.

John Simons

Inhoudsopgave

Voorwoord	1
Inleiding	
De meester: ir. F. Westendorp	7
De leerling: Ir. W.A.C. Pont	11
Bepaling van de hoofdafmetingen	
De trekkracht	13
Cilindertrekkracht	13
Adhesiegrens	18
Stoomproductie en verbruik	21
Het stoten van de machine	28
Weerstand	35
Loopweerstand	36
De gedreven as	36
De getrokken as	37
De geremde as	38
Tapwrijving	39
Baanweerstand	41
Luchtweerstand	42
Hellingweerstand	47
Boogweerstand	48
De locomotief als railvoertuig	
Het ontwerpen	51
Gang van de constructie	57
Algemene eigenschappen	65
Verbranding	74
Voedingswatervoorverwarming	76
Warmteverliezen	76
De locomotief als tractiemiddel	81
Methoden van onderzoek van locomotieven	89
De locomotief als vervoerbare ketel	
Het ketelontwerp en berekening	101
De ketel	101
De vuurkist	102
De binnenvuurkist	111
De verankering der vuurkisten	116
Berekening van steunbouten	117
Bijzondere vuurkistvormen	123
De exhaustwerking	127
Het moderne ketelontwerp	135
Deel 1	136
Deel 2	138
De vuurkist	142
Pijpenplaat en vuurkistwand	143
Berekening van de langsankers	144
Dakpanconstructies voor de korte ketel en vuurkist	146
Spanningsvrij maken van de ketelconstructies	146

De locomotief als tractievoertuig

De machine	149
De krachtenwerking in de machine	150
Het kruk- en drijfstangmechanisme	151
Het aanzetten van de locomotief	158
De krachtenwerking bij constante snelheid	161
De scheendrukken	161
Storende werkingen bij volle snelheid	167
Grootte van rukkende krachten	175
Momenten	176
Getallenvoorbeeld	184
Ronddraaiende massa's	184
Heen- en weergaande massa's	185
Bepaling van de sikkkel	187
Invloed van rukkende krachten en slingermomenten	191
Constructieve uitvoering van onderdelen	193
Cilindergietstuk	193
Cilindergietstuk bij buitenliggende cilinders	199
Viercilinder machines	201
Driecilinder locomotieven	208
Stoomschuiven	210
Cilinderdeksels	214
Zuigerschuif	214
Zuigerstang	215
Spiegat	215
Spie	216
Stopbussen	216
Leibanen	218
Kruiskop	219
Smering	222
Drijfstang	223
Koppelstangen	223
Draagpotten	235
Lagering	239
Rollagering van andere onderdelen	240
Het draagraam (frame)	243
Draagveren	246
Gewichtsverdeling	250
Machine op drie assen	253
Het lopen door bogen	259
Vier vaste assen	265
Cortazzi-as	269
Radiaal as	269
Bisseltruck	274
Twee-assig draaistel of bogie	277
De Garratt-locomotief	281
Remvermogen	285

Ondersteunende delen

Condition Monitoring	289
Automatische Treinbeïnvloedingssystemen	291
Autostop	293
Dubbele uitvoering van energieproductie	295

Verlichting	296
Simulatie	297
Toe te passen materialen	300
Regelgeving	303
Algemeen	303
Goedkeuringseisen	303
Comptabiliteitseisen	304
Keuringsprocedure	304
Structuur/leeswijzer	305
Duurzame brandstof	307
Praktijktoeepassingen	
Werkplaatspraktijk	313
De grote herstelling	314
Diverse speciale werkmethoden en uitgevoerde verbeteringen	315
Algemene voorschriften betreffende herstelling	321
Constructiepraktijk	367
Inleiding	361
Het ontwerp	368
Berekeningen	371
Tweede categorie	398
Tot besluit	405
Geraadpleegde bronnen	
Publicaties	407
Manuscripten	410
Briefwisseling	411
Websites	411

Inleiding

De meester: Ir. F. Westendorp

Professor Ir. F. Westendorp, van 1901 tot 1916 Ingenieur bij de Dienst van Tractie van de maatschappij tot Exploitatie van Staatsspoorwegen, staat hoofdzakelijk bekend als de ingenieur, die de ontwerpen van de succesvolle locomotiefserie SS 700, welke tot de laatste dag van de stoomtractie in Nederland het beeld heeft bepaald, verder uitwerkte. Hij deed dit als assistent van Ir. S.E. Haagsma in nauwe samenwerking met de Engelse locomotiefabriek Beyer Peacock, die de eerste leveringen van deze fraaie serie fabriceerde.



Prof. Ir. Frans Westendorp
(5 januari 1880 – 29 maart 1969)

De jonge Frans Westendorp kwam in 1901 als 21-jarige in dienst bij de SS in een tijd dat men bij deze maatschappij naarstig op zoek was naar sterke locomotieven die enerzijds de plaats zou kunnen innemen van de “mailtrein”- locomotieven van de SS serie 995 – 999, die reeds bij hun productie een mislukking bleken te zijn en anderzijds tenderlocomotieven, die het groeiende kolenvervoer in Limburg aan zouden kunnen.

De Noord-Brabants Deutsche Spoorweg Maatschappij was in 1904 de Staatsspoor voor met het op de baan brengen van een uiterst elegante 2C sneltreinlocomotief, welke van een voor Nederland nog ongekend ontwerp was. Daarmee was de NBDS de wegbereider voor het succes van Westendorp want de Staatsspoor ging, alweer samen met Beyer Peacock, die ook het NBDS ontwerp gebouwd had, de “Blauwe Brabanders” verder ontwikkelen totdat een ontwerp voor een 4-cilinder locomotiefontwerp ontstaan was.

In zijn periode als Ingenieur bij de Dienst van Tractie was Frans Westendorp naast die van de serie SS 700, ook betrokken bij de bouw van de Staatsspoor locomotiefseries 1100 en 1200. Het is daarom niet zo verwonderlijk dat hij met name de locomotieven van de SS series 995, 700, 1100 en 1200 alsmede de HSM en NCS machines uit dezelfde periode zoals de series HSM 500 en NCS 71 in zijn collegedictaat als voorbeeld gebruikt. De serie 1200 zou vanwege zijn tenderuitvoering met binnenliggende cilinders de meest rustig rijdende machine op het Nederlands spoorwegnet worden. Het is tevens de laatste serie die door Beyer Peacock voor Nederland werd gebouwd.

In 1916 overleed Ir. Haagsma vrij plotseling. Het was logisch dat hij zou zijn opgevolgd door Westendorp, maar deze werd met zijn 36 jaar nog wat jong voor de functie geacht.

In plaats daarvan benoemde de Staatsspoor de toen 48-jarige Ir. I. Franco, die al een carrière bij de Staatsspoor achter de rug had voordat deze hoogleraar in de Algemene Werktuigbouw aan de Technische Hogeschool te Delft was geworden.

Er volgde nu een soort “boompjeverwisselen”; Franco kreeg de post van Haagsma en Westendorp kreeg die van Franco. Hiermee was Westendorp een van de jongste hoogleraren aan de TH.

Het had geen gelukkiger keuze kunnen zijn!

Het eerste wat de energieke Westendorp deed, was lijn in het onderwijs en in het onderwijsmateriaal brengen. Een van de redenen tot instelling van de afdeling locomotiefbouw aan de TH was, dat men vond dat het onderwijs te theoretisch was en er daardoor weinig aansluiting was met de praktijk. Tot het aantreden van de jonge Westendorp werd uitsluitend gebruik gemaakt van buitenlandse literatuur en publicaties, gebaseerd op onderzoeken, waardoor het opleidingsmateriaal onsamenhangend was. Hij besloot een collegedictaat te schrijven met de eenvoudige titel "Locomotieven", welke in 1919 in typemachineschrift verscheen met tekeningen en schetsen van W.A.C. Pont, de latere ontwerper onder Ir. P. Labrijn, van de laatste NS- sneltreinlocomotief serie 3900.

In 1921 bewerkte H.C. King, als medewerker van Westendorp, het collegedictaat om in gedrukte vorm uit te geven, echter zonder de "Autographiën" en met de tekeningen van Pont in gestileerde vorm.

Er bestaat een "vervolg" op het collegedictaat in de vorm van een bewerking van het collegedictaat "Constructie van het Spoorwegmaterieel" van Ir. W.R.G. van den Broek, de zwager van Westendorp. Het manuscript is niet te traceren, maar het werk bevat een samenvatting van "Locomotieven", gevolgd door de behandeling van hoofdzakelijk motormaterieel.

Westendorp was zich wel bewust van het feit dat de schetsen van Pont aanvulling behoeften en publiceerde vanuit de TH zijn "Autographiën", een serie van overzichtstekeningen van bepaalde locomotiefonderdelen welke aan de praktijk ontleend waren. Met zijn collegedictaat "Locomotieven" vormen de "Autographiën" het enige Nederlandse werk dat gewijd is aan het construeren van een (stoom-) locomotief.

Dit is de grootste dienst, die door welke constructeur dan ook, de Nederlandse locomotiefbouw ooit bewezen is. Zonder dit collegedictaat zou de opleiding tot locomotiefconstructeur geen structuur hebben gehad.

Westendorp voerde ook een uniforme manier van het tekenen van locomotieven in, die door zijn studenten, welke later bij de Nederlandsche Spoorwegen zijn opvolgers zou worden, is overgenomen. Dit gold niet alleen voor toekomstige ontwerpen maar ook de voornaamste series die al in dienst waren werden en geheel opnieuw op papier werden gezet. Alle locomotieftekeningen toonden een algemeen plan tekening, die een doorsnede in zij aanzicht en twee gecombineerde helften van bovenaanzichten liet zien. Rondom dit algemeen plan werden diverse andere tekeningen geplaatst die voor- en achteraanzichten en verschillende dwarsdoorsnedes, al of niet in combinatie met elkaar, toonden.

Voor Beyer Peacock was de wisseling tussen Westendorp en Franco bij de Staatsspoor minder gunstig. Door zijn uitgesproken voorkeur voor motortractie had Franco meer zakelijke contacten in Duitsland dan in Engeland. Voeg daarbij het feit dat locomotieven van Hohenzollern en later van Schwarzkopf en Henschel toch goedkoper waren dankzij Duitse exportfaciliteiten en het pleit was ten nadele van Beyer Peacock beslist; Hohenzollern nam de fakkel van Beyer Peacock over.

Nog tot in de twintiger jaren deed Beyer Peacock pogingen om weer stoomlocomotieven aan Nederland te leveren. Men bezocht zelfs Westendorp in Delft op 30 juni 1923.

Het was nutteloos, want men was bij Westendorp aan het verkeerde adres; als hoogleraar had hij hierop weinig invloed. Beyer Peacock had bij de Nederlandse overheid moeten zijn die in

die tijd verwoede pogingen ondernam om meer opdrachten voor nieuwe locomotieven bij de Nederlandse industrie te doen plaatsen. Een van de laatste officiële optredens van Westendorp aan de TH, betrof het verlenen van een eredoctoraat aan Dr. Ir. W. Hupkes, zijn tegenhanger bij

de HSM en ontwerper van onder andere de HSM serie 500, in 1946. Dit was niet zozeer om Hupkes te eren als locomotiefontwerper maar eerder voor hetgeen hij voor NS gedaan had sinds de spoorwegstaking.

Voordien was Westendorp van 1929 tot 1930 Rector Magnificus van de TH te Delft.

Toekomstige locomotiefontwerpers nam Westendorp met een vooruitziende blik als zijn assistenten. Pont, Oudendal, King en Van den Broek waren lovend over zijn bescheidenheid en zijn aimabele omgang met hen; vaak kreeg je bij hem om elf uur 's morgens onder het genot van een kop koffie een privé- college locomotiefbouw dat wel anderhalf uur kon duren. Minder opgezet was Westendorp met de stroomlijning van de NS locomotieven 380-3805. Dit onderwerp was maar beter bij hem niet aan te roeren. Hij was wel geporteerd voor de beslissing om aan enkele van "zijn" 3700-en de nieuwe vier-assige scheepstenders te koppelen. Met Labrijn (en daarmee ook zijn "leerling" Willem Pont) kon hij het daarentegen tot zijn laatste snik nooit eens worden omtrent het ontwerp van de 3900 en 6300-en.

Professor Ingenieur Frans Westendorp overleed te Delft in 1969 op 89 jarige leeftijd.

De leerling: Ir. W. A. C. Pont

Willem Anton Christiaan Pont werd op 25 juni 1895 te 's Gravenhage geboren. Hij had al vroeg interesse in het spoorbedrijf en in stoomlocomotieven in het bijzonder.

Van 1916 tot 1921 studeerde de jonge Pont bij Prof. Ir. Frans Werstendorp locomotiefbouw als onderdeel van de algemene werktuigbouw. In zijn studietijd maakte hij de schetsen die Werstendorp gebruikte in zijn manuscript voor het collegedictaat "Locomotieven", die in deze bewerking van het collegedictaat in al hun eenvoud, maar getuigend van een capaciteit om tekeningen van een hoge tekenkwaliteit te maken.

Willem Pont komt als adjunct ingenieur in dienst bij de Centrale Werkplaats van de NS te Haarlem waar anno 1925 nog de HSM geest rondwaarde. In 1930 wordt hij onder Pieter Labriijn aangesteld als Ingenieur bij de Dienst van Materieel en Werkplaatsen van NS; hij had dan al de ontwikkeling van de NS series 3900 en 6300 als taak. Helaas wordt teveel onterechte kritiek op Pont uitgeoefend aangaand constructieve tekortkomingen in het ontwerp.



Ir. Willem A.C. Pont (25 juni 1895 – 10 maart 1975) op de bok van "zijn" stoomlocomotief 6317 nadat deze het Spoorwegmuseum was binnengereden en opgenomen in de collectie. Utrecht, 15 oktober 1959. Foto NSM, coll. P. Henken

Deze kritiek is erg goedkoop en misplaatst omdat dit gebeurt met de kennis van nu. Pont werd bij het verschijnen van deze twee series juist geprezen vanwege zijn toepassingen van voor Nederland nieuwe constructies. Via promoties tot hoofdingenieur en Chef Locomotiefbouw van NS ging Pont in 1960 met pensioen. Hij had de stoomtractie letterlijk tot het allerlaatste moment meegemaakt toen hij op 15 oktober 1959, enkele maanden voor zijn pensioen tenderlocomotief 6317, welke hij had ontworpen vanuit Roosendaal naar het spoorwegmuseum in het Maliebaanstation in Utrecht bracht.

Met Ir. W.A.C. Pont op 10 maart 1975 overleed ook de laatste echte locomotiefbouwer van de Nederlandse Spoorwegen.

Bepaling van de hoofdafmetingen.

De trekkracht.

Het vermogen van de locomotief wordt begrensd door de hoeveelheid stoom, die per tijdseenheid door de ketel kan worden geleverd en dus in de eerste plaats door de hoeveelheid brandstof, die per tijdseenheid op het rooster kan worden verstookt.

De verbranding wordt aanzienlijk opgevoerd wanneer de trek op het vuur vergroot wordt, hetgeen het geval is, wanneer per tijdseenheid het door de exhaustpijp afgeblazen gewicht aan hoeveelheid stoom toeneemt.

Er bestaat dus bij de locomotief een wisselwerking tussen machine en ketel: hoe meer stoom wordt verwerkt des te heviger is de verbranding en des te meer stoom wordt er gevormd.

Het ontwerp van een locomotief voor een bepaald vervoersdoel omvat de vaststelling van de hoofdafmetingen van de ketel en van de machine met het drijfwerk, waarmee de vereiste trekkracht en het nodige vermogen wordt bereikt. Daarbij is het in bijzonder te letten op het onderling verband tussen de werking van de machine en van de ketel, terwijl bovendien het totale gewicht van de locomotief op de gewenste wijze over de assen moet worden verdeeld.

Om over te kunnen gaan tot het bepalen van de hoofdafmetingen behoren eerst afzonderlijk de volgende onderwerpen bestudeerd te worden; de trekkracht en het vermogen van de machine; de stoomproductie van de ketel; de weerstanden van het materieel en de eigenschappen van de locomotief in bedrijf.

De cilinder trekkracht.

De door de stoom aan de drijfwielomtrek geleverde omtrekskracht kan worden berekend door de arbeid, die gedurende een omwenteling in de cilinders wordt verricht, gelijk te stellen aan de arbeid die in die tijd aan het bedrijf wil omtrek wordt geleverd, met inachtneming van het nuttige effect van het bedrijf werk deze arbeidsvergelijking luidt voor een twee-cilinder-locomotief met enkelvoudige expansie.

$$\frac{\pi d^2}{4} p_m \times 2l \times 2 \times \zeta \times Td \times \pi D$$

Waarin:

d = de cilinderdiameter in centimeters,

l = de zuivere slag in centimeters,

p_m = de gemiddelde geïndiceerde druk in de cilinder in kilogram per vierkante centimeter,

ζ = het nuttig effect van het drijfwerk,

D is de drijfwiel middellijn in centimeters en

Td is de omtrek aan de drijfwielomtrek in kilogram, zodat:

$$Td = \zeta \frac{p_m d^2 l}{D}$$

Gewoonlijk voert men in plaats van p_m de keteldruk p in door te stellen:

$$\zeta P_m = c p$$

waardoor de uitdrukking wordt:

$$T_d = c \frac{p d^2 l}{D}$$

Voor de verschillende locomotief typen krijgt deze uitdrukking enigszins andere coëfficiënten, namelijk voor types met enkelvoudige expansie bij een

$$\text{twee – cilinder locomotief: } T_d \pi D = \zeta \frac{\pi d^2}{4} P_m \times 2 l \times 2 \text{ en } T_d = c \frac{p d^2 l}{D}$$

$$\text{drie – cilinder locomotief: } T_d \pi D = \zeta \frac{\pi d^2}{4} P_m \times 2 l \times 3 \text{ en } T_d = c \frac{3 p d^2 l}{2 D}$$

$$\text{vier – cilinder locomotief: } T_d \pi D = \zeta \frac{\pi d^2}{4} P_m \times 2 l \times 4 \text{ en } T_d = c \frac{2 p d^2 l}{D}$$

Waarin de coëfficiënt bij machines met enkelvoudige expansie ongeveer 0,65, is bij een “normale” snelheid. Onder “normaal” wordt hierbij de maximaal toegelaten snelheid verstaan. Berekening bij de ontwerpsnelheid is nutteloos omdat men dan een trekkracht zou berekenen die niet haalbaar is vanwege de lagere maximaal toegelaten maximum snelheid. De bepaling van deze coëfficiënt is een resultaat van uitgebreide proefnemingen door August Friedrich Wilhelm von Borries (* 27 januari 1852 in Niederbecksen, Kreis Minden i. W. D.; † 14. februari 1906 in Merano, It.) in de laatste vijftien jaren van de negentiende eeuw.

Zodat hieruit volgt

$$T_d = \frac{0,65 p d^2 l}{D}$$

Behalve slechts enkele locomotieven die voor Nederland en Nederlands-Indië gebouwd zijn, kende Nederland geen traditie in het bouwen en gebruik van compoundlocomotieven.

Daarom wordt voor de volledigheid wel de formules gegeven voor de berekening van de trekkracht van compoundlocomotieven zonder verder op de afleidingen hiervan in te gaan.

Voor de volgende locomotieftypen met compoundwerking geldt:

voor een met twee cilinders uitgevoerde locomotief:

$$\begin{aligned} T_d \pi D &= \zeta \left\{ \frac{\pi d h^2}{4} P_m + \frac{\pi d l^2}{4} P'_m \right\} \times 2 l \\ &= \zeta \frac{\pi d l^2}{4} \times \left\{ P_m \frac{d h^2}{d l^2} + P'_m \right\} \times 2 l \\ &= \zeta \frac{\pi d l^2}{4} P_{m_r} \times 2 l \text{ en } T_d = c_1 \frac{\pi d l^2 l}{2 D} \end{aligned}$$

en voor een met vier cilinders uitgevoerde locomotief:

$$T_d \pi D = \zeta \frac{\pi d l^2}{4} P_{m_r} \times 2 l \times 2 \text{ en } T_d = c_1 \frac{p d l^2 l}{D}$$

hierin is c_1 te stellen op ongeveer 0,42.

De trekkracht T_d is dus de kracht die door de stoom aan de drijfwielomtrek wordt te voorschijn gebracht. Indien men de locomotief van de spoorstaven op zou lichten, zou deze kracht kunnen

worden benut door om de drijfwielen een riem te leggen die, naar een transmissie-as voert. Men zou dan de locomotief hebben veranderd in een gewone landmachine met een stilstaand frame.

De trekkracht T_d aan de drijfwerkomtrek, die op de spoorstaven werkt in een richting, tegengesteld aan die van de beweging, is in verband te brengen met de in de cilinders geïndiceerde trekkracht T_i :

$$T_i = \frac{l}{r} T_d$$

$$T_i = \frac{c}{r} \times \frac{p d^2 l}{D}$$

Deze methode om de omtrekskracht te berekenen geeft, omdat zij gebaseerd is op de arbeid vergelijking slechts de gemiddelde waarde van de omtrekskracht gedurende een omwenteling.

Zij geeft ook geen inzicht in de wijze waarop de krachten van de cilinders naar de spoorstaven en naar de trekhaak achter aan de machine wordt overgebracht.

Daarvoor is het nodig dat de rijdende locomotief wordt beschouwd bij een bepaalde krukstand. Om de krachtsoverbrenging op een eenvoudige wijze na te kunnen gaan neemt men aan dat het drijfwerk, draagpotten wielen en spoorstaven in een verticaal vlak liggen.

Dit zogenaamde vlakke drijfwerk is aangegeven in figuur 1.

De locomotief trekt de trein uiteraard met de trekhaak en deze haak is verend bevestigd aan het draagraam van de locomotief. Het komt er dus op aan om de krachten te vinden die in horizontale richting op het draagraam werken.

P_0 is de druk, die door de stoom op de zuiger en dus ook op het cilinderdeksel wordt uitgeoefend. De deksel druk wordt direct door het cilinder gietstuk op het frame overgebracht en is dus een van de krachten die de machine zullen trachten te verplaatsen.

Als de kruiskopdruk aangeduid wordt als P , dan is

$$P = P_0 \pm m \frac{d^2 x}{dt^2} = p_0 \pm m r \omega^2 (\cos \alpha \pm \frac{r}{l} \cos 2 \alpha)$$

Waarin

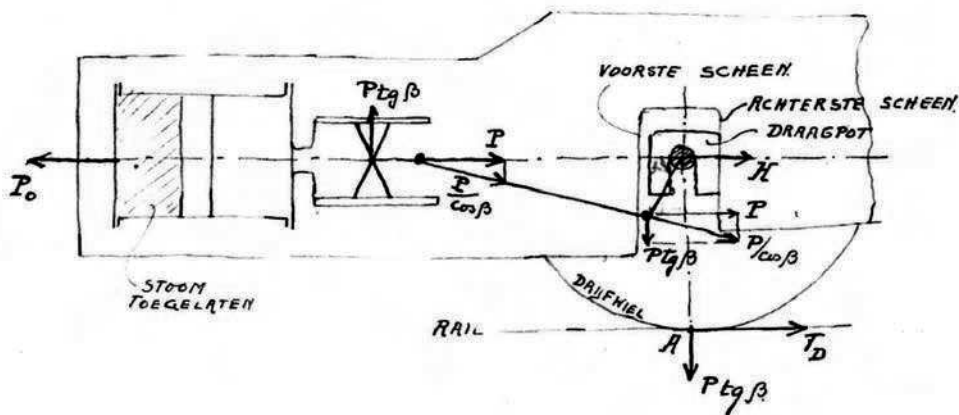
$$m \frac{d^2 x}{dt^2}$$

de kracht is, nodig voor versnelling of vertraging van de heen en weer gaan de massa's. In de drijfstang werkt een kracht

$$\frac{P}{\cos \beta}$$

die overgebracht wordt naar de krukpen; terwijl een druk op de lijbaan van $P \tan \beta$ wordt uitgeoefend.

Wordt de kracht op de lijbaan horizontaal en verticaal ontbonden, dan treedt weer P op. De verticaal ontbonden $P \tan \beta$ gaat door kruk en wiel naar de spoorstaven; wordt de schuif van de drijfstang buiten beschouwing gelaten, dan blijft alleen de horizontale kracht P over.



Figuur 1

De kruk wordt verondersteld in de getekende stand met de verticale spraak van het wiel een stijf geheel te vormen, dat door P in horizontale richting wordt belast. De steunpunten worden geleverd door het frame en de spoorstaven, de reacties op het wiel in die steunpunten zijn dus gelijk en tegengesteld aan de getekende scheendruk H en de horizontale rail drukking T_d . H en T_d volgen uit de evenwicht voorwaarden voor het wiel:

$$T_d = P \frac{r \sin \alpha}{R}$$

Maar moet eigenlijk het moment ten opzichte van het middelpunt van de asdoorsnede zijn:

$$T_d R = P r \sin \alpha + P \tan \beta \cdot 2 \cos \alpha$$

en:

$$H = P - T_d = P \left\{ 1 - \frac{r}{R} \sin \alpha \right\}$$

Op het frame werken nu in horizontale richting, P_0 (tegen het deksel van de cilinder) en H (tegengesteld aan P_0 , tegen de schenen), welke krachten niet in evenwicht zijn, zodat beweging optreedt ten gevolge van een vrije kracht:

$$T_1 = P_0 - H$$

$$T_1 = P_0 - P + P - \frac{r}{R} \sin \alpha$$

$$T_1 = T_d \pm m \frac{d^2 x}{dt^2}$$

T_1 is de trekkracht, die op het frame werkt en niet de trekkracht aan de tenderhaak, omdat een gedeelte van T_1 wordt gebruikt voor voortbeweging van de locomotief zelf.

De laatste formule geeft T_1 als functie van de krukstand. In de dode punten, voor

$$\alpha = 0^\circ \text{ of } 180^\circ \text{ en } \sin \alpha = 0 \text{ is } T_d = 0$$

levert de stoom druk geen omtrekskracht aan de drijfwiellomtrek. In dit geval is echter volgens 3.:

$$T_1 = \pm m \frac{d^2x}{dt^2}$$

Er werk dus in de dode standen wel een vrije kracht op het frame, doch deze is niet afkomstig van de stoomdruk maar van de massa krachten van de heen en weer gaande machinedelen. Deze krachten werken afwisselend in, en tegengesteld aan, de bewegingsrichting van de locomotief en hebben een storende invloed op haar gelijkmatige beweging. De invloed van deze oprukkende krachten worden beperkt wanneer zij op een grote massa werken. Bijvoorbeeld bij locomotieven met een strak gekoppelde sleeptender is de storende werking veel kleiner.

Opmerkingen:

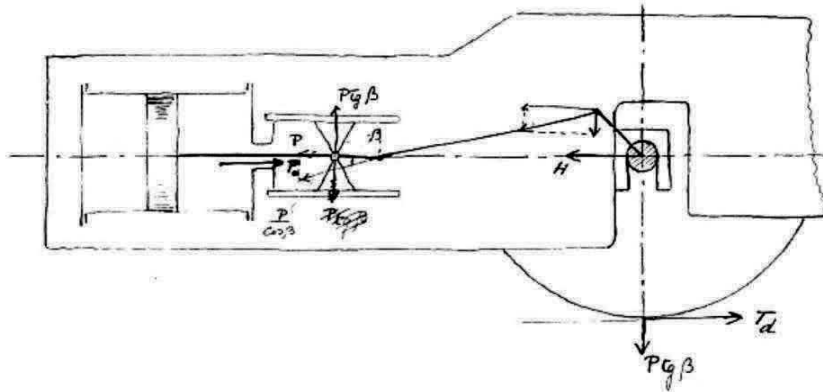
- 1) in de voorgaande paragrafen zijn de leibaandruk $P \tan \beta$ die een gevolg is van de eindige drijfstang- lengte en haar invloed op de raildrukkingen en op het draaiend koppel buiten beschouwing gebleven. Voor de drijfstang geldt $P / \cos \beta$. Deze is aan de kruk ben weer te ontbinden (horizontaal en verticaal). De vertikaal ontbondene geeft met de leibaan een druk-koppel, dat de locomotief een verticale beweging tracht te geven. Dit is een storend koppel; het veroorzaakt de zogenaamde galopbeweging, die we hier verder buiten beschouwing laten.
- 2) volgens 3 toont dat de trekkracht om maar die de translatie beweging van de locomotief en trein veroorzaakt, gelijk is aan de trekkracht aan de drijfwiellomtrek, op de massa krachten na.
- 3) plaatst men de kruk in een stand boven de harde lijn van de machine dan werkt T_d in dezelfde, H in tegengestelde en T_1 weer in dezelfde richting als in figuur 1 aangegeven. De uitkomsten veranderen dus niet.
- 4) wanneer de machine draait met afgesloten stoom, dan is $P_0 = 0$ en de vergelijking uit de vorige paragraaf geeft dus ook de krachtswerking aan gedurende het uitlopen.
- 5) bij de uitgaande zuigerslag wordt het gedeelte van frame tussen cilinder en drijf wiel op trek belast, bij de ingaande slag op druk.
- 6) omdat het drijfwerk in werkelijkheid niet vlak is, veroorzaken de massakrachten behalve het drukken ook nog een draaiende beweging van de locomotief om een verticale as; het zogenaamd slingeren.

Adhesiegrens

Een andere afleiding van de trekkracht:

als de dekseldruk weer gesteld wordt op P_0 , dan is de kruiskropdruk

$$P = P_0 \pm m \frac{d^2x}{dt^2}$$



Figuur 2

P wordt in V en D ontbonden. Daarbij werkt D ook aan de krukpen. Door D naar de as over te brengen en te ontbinden krijgt men een koppel D en de componenten P en V . Dan werkt:

1. op het frame: het koppel V , dat de locomotief aan de voorkant oplicht en de krachten P_0 en P die op de massareacties na, aan elkaar gelijk zijn. P_0 en P veroorzaken alleen materiaal spanningen (inwendige krachten), terwijl

$$m \frac{d^2x}{dt^2}$$

als vrije kracht overblijft (rukken en slingeren)

2. Op de as: het koppel B zal de as doen draaien.

Tot zover is alles gelijk als bij een stationaire machine.

Op het wiel werkt echter ook nog de spoorstaafreactie, die, in de veronderstelling dat het wiel niet sleept, opgewekt is door het koppel B ; het moment van T_d moet er dus evenwicht mee maken.

Breng ook T_d over naar de as. Het koppel T_d heft D op en er blijft dus een kracht P_B over, naar voren gericht, die als vrije kracht op het frame werkt.

Samen met de massareacties van de heen en weer gaande delen levert de kracht T_d de kracht T_1 op, die volgens de vorige afleiding is gevonden als oorzaak van de translatie beweging.

De voorwaarde voor de translatie beweging is, dat de wrijving op de rails de reactie T_d kan opleveren, anders slaat het wiel door.

De maximale adhesiekracht is $f G$, waarbij G het gewicht op de spoorstaaf en f de wrijvingscoëfficiënt is..

Deze f is afhankelijk van de toestand van de rails. Men rekent $1/4$ à $1/5$; bij vochtige rails $1/7$, bij trams $1/15$. T_d kan dus niet groter zijn dan $f G$.

Bij sterke hellingen is er ook nog een horizontale component van G, die een reactie vormt. Bij hellingen is de grens $1/7,6 = 130/1000$ of 130 kg/ton.

Bij zeer sterke hellingen mag men hierop rekenen, maar er is niet boven te gaan. Hiervan moet men de weerstand voor het voortbeweging van de locomotief aftrekken bijvoorbeeld 15 kg/ton. Er blijft dus 115 kg/ton locomotiefgewicht over voor het trekken van de trein. Als de helling 115 ‰ is, dan zou de locomotief alleen nog maar naar boven kunnen gaan.

Zeer sterke hellingen worden niet door locomotieven bereden, wel door elektrische trams. We hebben daar echter een ander geval; de lading wordt door de wagen zelf gedragen. De steilste helling voor locomotiefbedrijf ligt bij Zürich 70 ‰ (tandradbaan voor toeristen verkeer met een exploitatie van een locomotief met één wagen).

Voor normaal spoor is de grootste helling in Zwitserland aanwezig bij de Rigi Bahn met 50 ‰ en bij andere Alpen banen met 40 ‰.

Voor normaal spoor is de maximale helling 35 ‰ welke vroeger bij Genua voor kwam.

In Nederland is de steilste helling 16,6 ‰, deze komt voor op de lijn Heerlen – Valkenburg.

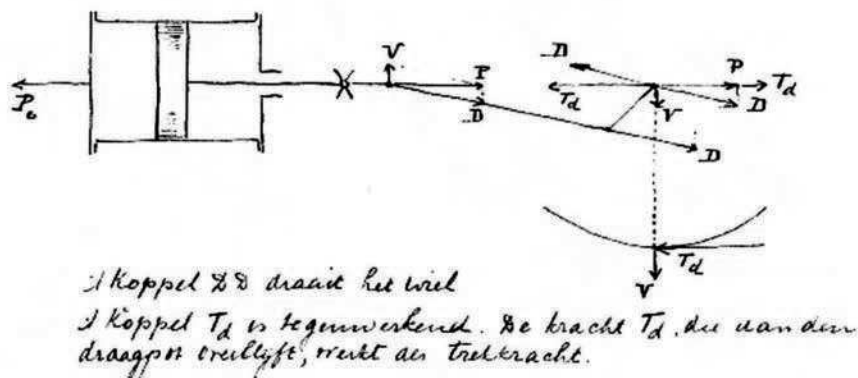
In België komen hellingen van 32 ‰ voor.

Wij hebben dus:

$$T_d = c \frac{p d^2 l}{D} \leq fG$$

cilinder trekkracht adhesie trekkracht
of adhesiebelasting.

Hierbij is de adhesie coëfficiënt f ongeveer 0,2 en G de som der raildrukkingen van de aangedreven assen en fG dus het maximum waartoe de trekkracht kan worden opgevoerd. Bij sneltrein en personentrein locomotieven wordt dit maximum alleen bereikt bij het aanzetten wanneer met ingehouden vulling en geringe snelheid wordt gereden bij goederentreinlocomotieven op berglijnen worden deze waarden ook bereikt gedurende de rit.



Figuur 3

Met het bepalen van de cilinder trekkracht en adhesiebelasting zijn hiermee de eerste twee grenzen aan de trekkracht gesteld. Voor Nederland kan men stellen dat de in ons land voorkomende helling, hetzij in natuurlijke vorm, hetzij in kunstmatige vorm zoals in brugopritten en zogenaamde “fly-overs” voor deze grenzen bepalend zijn. Deze grenzen gelden uiteraard voor stoomlocomotieven; doordat motoren met groot vermogen ontwikkeld werden, gelden andere grenzen voor de trekkracht. Deze grenzen liggen aanmerkelijk hoger.

De derde grens die aan de trekkracht wordt gesteld is de capaciteit van de stoomketel.

Stoomproductie en verbruik

Wanneer een locomotief ontworpen moet worden voor een bepaald vervoer moet eerst met aantal I.P.K dat daarvoor vereist is berekend worden en daarna moeten de cilinder afmetingen zodanig gekozen dat dit vermogen met een vulling van 25 á 30% wordt bereikt. Deze vulling neemt men zo klein mogelijk omdat anders de stoom niet voldoende expandeert.

Bij het in gang zetten van een trein is de vulling groter (circa 80%) omdat de treinmassa versneld moet worden en omdat bij een kleinere vulling teveel ongunstige krukstanden voorkomen waarin de geringe effect trekkracht ontwikkeld wordt om de trein aan te trekken.

Wanneer de snelheid stijgt neemt het aantal omwentelingen dus ook het aantal cilindervullingen en het stroomverbruik toe. Ten slotte komt er dus een ogenblik waarop meer stoom wordt gebruikt dan de ketel kan leveren. De machinist moet dan de vulling verkleinen naar achtereenvolgens 50%, 40%, 30% of 20%, naargelang de verplichte vereiste snelheid en het gewicht van de trein.

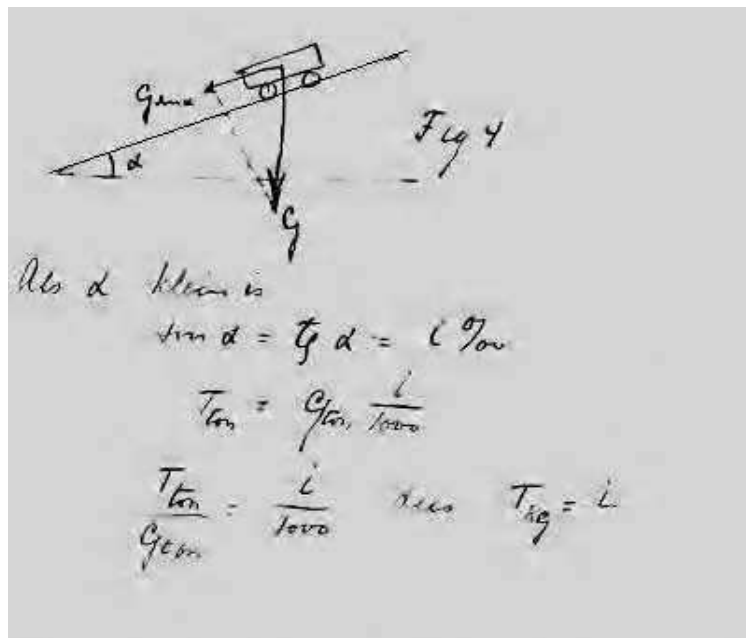
Is de locomotief gebouwd voor V km/ uur of η omwentelingen per seconde en is de maximum stroomproductie van de ketel Q kg. stoom / uur, dan is bij de snelheid voor een tweecilinder locomotief met enkelvoudige expansie per cilindervulling hoogstens

$$\frac{Q}{3600 \times \eta \times 4} \text{ kg. stoom beschikbaar}$$

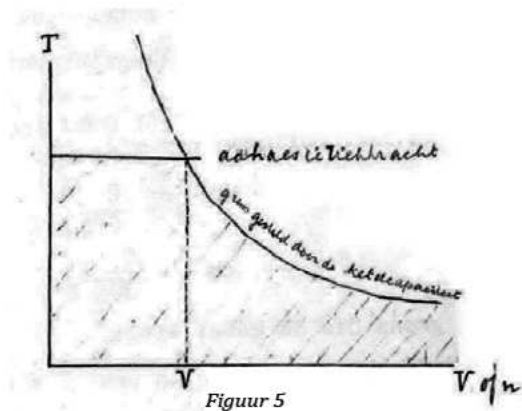
Deze gewichtshoeveelheid stoom bepaalt de gemiddelde nuttige zuigerdruk P_m zodat een grotere P_m niet kan worden bereikt, althans niet worden onderhouden.

Hieruit volgt dat de trekkracht T bij stijgende snelheid moet afnemen en dus niet alleen door de adhesie maar ook door de ketelcapaciteit wordt begrensd, vandaar dat men van ketel-trekkracht kan spreken.

Zet men T als functie van V of η Uit dan ontstaat door vereniging van de waargenomen voorwaarden het TV diagram.



Figuur 4



Figuur 5

De twee lijnen stellen de grenzen voor, die aan de trekkracht worden gesteld door ketel capaciteit en adhesie gewicht (de laatste is een horizontale rechte lijn).

Het product TV stelt een vermogen voor. Was het vermogen constant, dan zou TV constant zijn en was de eerste lijn een hyperbool. Dit is niet het geval want het 1 PK vermogen is zelf een functie van V .

Met inachtneming van de eenheden is

$$1 \text{ PK} = \frac{T_i \times V \frac{\text{km}}{\text{u}} \times 1000}{3600 \times 75}$$

$$\text{Of: } 1 \text{ PK} = \frac{T_i V}{270}$$

Alle waarden die in het gearceerde gebied liggen zijn bestaanbaar; bij elke V behoort een maximumwaarde van T .

Boven de snelheid V kan de adhesie trekkracht niet meer worden benut beneden deze V kan de maximum ketelcapaciteit niet worden bereikt.

Voor goederentreinlocomotieven op hellingen zoals een berglocomotief moet T zo groot mogelijk zijn en blijft de snelheid kleiner of gelijk aan V . Voor sneltreinlocomotieven moet V zo groot mogelijk zijn en wordt T max alleen door de ketel bepaald. Goederentreinlocomotieven worden dus met veel gekoppelde assen uitgevoerd (D-, E- en F- gekoppelde locomotieven.) Snelreïnmachines worden liefst met zo weinig mogelijk gekoppelde assen uitgevoerd (A-), B- en C- gekoppelde locomotieven.) Bij uitzondering worden op berglijnen snelreïnen vervoerd door locomotieven met vier gekoppelde assen. Is de snelreï locomotief eenmaal op snelheid, dan speelt het adhesiegewicht geen rol meer en beheerst de stoomproductie van de ketel het vermogen.

B = specifieke verbrandingsnelheid in $\text{km}/\text{m}^2/\text{RO}/\text{uur}$

Hoe Q verloopt bij verandering van B is aangegeven in figuur. 6.

Praktisch gaat men met deze niet boven de 600 meestal ligt deze tussen 405 150. Een hogere B kan, alleen bij proeven, met bijzondere middelen zoals versterkte exhaustwerking, bereikt worden.

Bij het hoge opvoeren van B ziet men:

1. Het rendement verminderd omdat de verdamping achteruitgaat.

$$\eta = \frac{\text{aantal calorieën in de stoomkracht aanwezig}}{\text{aantal calorieën op het rooster ontwikkeld}}$$

voor locomotieven ketels is η ongeveer 0,64

2. De kleine kooldeeltjes gaan zweven, komen in de rookkast terecht en geven gevaar voor brand bij ontwijken uit de schoorsteen. Bovendien verstopt de rookkast door stibbe.

3. De stoker kan het niet bijhouden. Sommige ritten duren wel vier uur en dan is dergelijk geforceerd stoken onmogelijk tenzij men vloeibare brandstof gebruikt.

Eén stoker kan hoogstens 1500-2000 kg brandstof per uur in de vuurkist brengen.

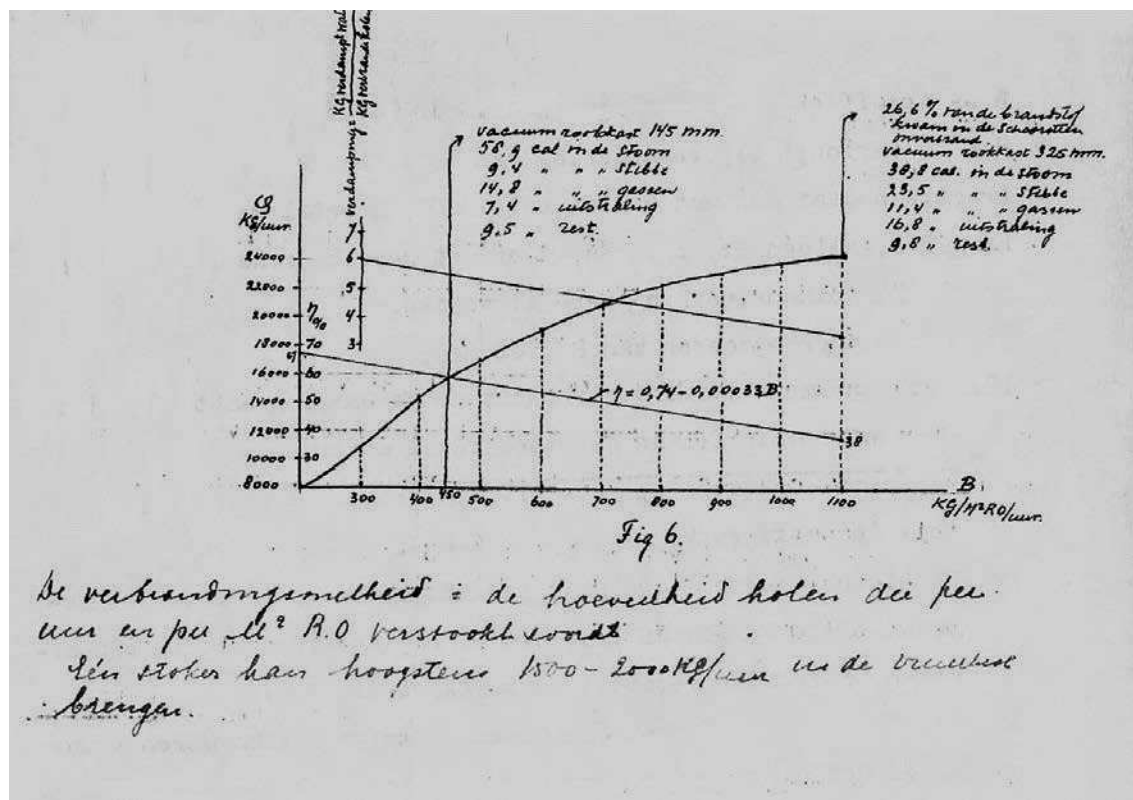
Mechanische stookinrichtingen geven geen bezuiniging, men zet dan beter twee stokers in. De temperatuur in de vuurkist is 1500-1600 °C en in de rookkast 300-400 °C.

De snelheid der gassen is zeer verschillend, in de vlampijpen is ze over het algemeen zeer groot (inkomend 800 m, uitgaand 30 m.).

Bij een vlampijplengte van 4 m. Doorlopen de gassen in de ketel in minder dan 1/10 seconde. En daarom daalt de temperatuur snel; de rookgassen hebben een temperatuur van 350 à 400 °C.

Is de verbrandingswarmte van de kolen h , dan is $B h R$ (RO) = totaal aantal calorieën dat op het rooster ontwikkeld wordt, dus $B h R \eta = Q \lambda$ (warmte functie) of $Q = \eta \frac{B h}{\lambda} R$ in het algemeen te stellen als: $\eta = \varphi (B)$.

Voor η is geen zuivere formule te vinden, $\eta = 0,84 - 0,0004B$ komt vrij goed uit, $h = 6800 \text{ cal.} (28,4024 \text{ kJ})$ (gemiddeld) . λ is uit tabellen te vinden, wanneer de temperatuur van ketel en voedingwater bekend zijn.



Figuur 6

Een andere manier om φ te vinden.

Bij sneltrein machines kan men rekenen op 57-63 kg stoom per vierkante meter verwarmd oppervlak per uur (maximum blijvend). Als tijdelijk maximum is te rekenen met 65-70 kg stoom op bijvoorbeeld hellingen die 1-2 km lang zijn.

Bij goederentrein machines en rekenen we met 40 kg stoom per vierkante meter verwarmd oppervlak per uur.

Er zijn echter bezwaren tegen het uitdrukken van Q in kilogram per vierkante meter verwarmd oppervlak want de vierkante meters verwarmd oppervlak zijn niet gelijkwaardig.

1 m ² V.O. boven de vuurkist levert	360 kg per uur
1 m ² van de eerste meter rond lengte levert	100 kg per uur
1 m ² van de tweede meter rond lengte levert	35 kg per uur
1 m ² van de derde meter rond lengte levert	16 kg per uur
1 m ² van de vierde meter rond lengte levert	10 kg per uur

Het heeft dus weinig zin om een extra lange ketel te maken. Ketels langer dan 4 m werken weinig economisch. De maximale lengte is 5 m. Men maakt de vuurkist niet groter dan voor het roosteroppervlak nodig is, omdat de vuurkist constructie veel zwaarder en duurder is dan vlampijpen. (Dit was één van de blunders bij de ontwikkeling van de Staatsspoor "mailtrein" - locomotieven).

Men kan Q beter uitdrukken bij vierkante meter roosteroppervlak ter uur.

Deze waarde wordt uit proeven gevonden. Deze proeven werden uitgevoerd door

Sanzin	met waarden tussen 2800 en 3300
Strahl	3500
Nadal	4000

De waarden die Strahl en Nadal vonden zijn zeer hoog, immers volgens Strahl zou bij

$$6,5 - \text{voudige verdamping } B = \frac{3500}{6,5} = 550 \text{ kg brandstof nodig zijn.}$$

Onnodig te zeggen dat de door Nadal gevonden waarde zeker te hoog is want een waarde van 3500 geeft al een zeer geforceerde trek.

Desondanks wordt toch de door Georg Strahl (1861 – 1922) ontwikkelde formule gehanteerd. Deze formule is echter niet toepasselijk bij oververhitting.

De formule luidt:

$$\frac{Q}{R} = \frac{a}{1 + b \frac{R}{VO \text{ stoom}}}$$

Hierin is $a = 4150$ voor locomotieven met verzadigde stoom met een keteldruk van 12 atm (12 bar) en 10% voedingswater.

Strahl gebruikt deze formule wanneer $\frac{VO}{R} > 56$

$$\frac{Q}{R} = 63 \frac{VO_{\text{stoom}}}{R} \quad \text{als} \quad \frac{VO}{R} < 56$$

Past men een voedingwatervoorwarmer toe, dan kan a belangrijk groter worden genomen.

Zonder voorwarmer is λ bijvoorbeeld 640 cal. met een voorwarmer tot 90 °C is λ 560 cal.

$$\text{Dan wordt } a = \frac{4150 \times 640}{560} = 4750$$

De hoeveelheid Q is natte stoom, dat een watergehalte van 10-30% bevat, afhankelijk van keteldruk en ketelconstructie zoals onder andere het oppervlak dat door het water beïnvloed wordt. Bij klein aantal oppervlak komt veel water in de stoom terecht en wordt meegesleept door de stoombellen bij het opborrelen.

Per uur mag men vierkante meter wateroppervlak hoogstens de volgende hoeveelheden stoom passeren;

bij Lancashire ketels	100 kg stoom
bij scheepsketels	500 kg stoom
bij locomotiefketels	1000 kg stoom
bij waterpijpketels	5000 kg stoom

Verder is van invloed de kwaliteit van het water (hardheid, kans op opkoken, enzovoort). Middelen om het water te reinigen helpen wel wat om de stoomproductie te verhogen. De toe te voegen hoeveelheid van deze middelen wordt bepaald door het aantal vierkante meters verwarmd oppervlak.

De plaats van stoomdom en reguleur (kattetekop) heeft invloed op het watergehalte. Boven de vuurkist is de stoom zeer nat door de snelle stoom productie daar ter plaatse. Voorop de ketel heeft het bezwaar dat de gehele hoeveelheid stoom over de waterspiegel moet strijken en dus waterdruppels meeneemt. Daarom zet men meestal de dom midden op de langsketel. Ook past men wel twee dommen toe welke door in horizontale pijp zijn verbonden. Deze constructie komt voornamelijk voor in Oostenrijk en Beieren. De reguleur moet zo hoog mogelijk in de dom worden aangebracht. Men geeft hem een wijde opening om kleine stroomsnelheid in de pijp te krijgen en daardoor dus minder water. De machinisten openen de reguleur zo weinig mogelijk. Door dit "smoren" komt achter de schijf een (geringe) drukvermindering voor waardoor het vocht in de stoom verdampt en dus de stoom droger wordt.

Ook kan men een waterafscheider toepassen door de stoom enige malen scherp te laten ombuigen of een stoomdroger toepassen waarbij de stoom om de eerste halve meter van de van vlampijp te voeren. De oververhitting van de stoom is dan wel onvoldoende maar de stoom wordt wel iets droger. Dit principe van de stoomdroging wordt toegepast in de oververhitter van Verhoop, welke de naam van oververhitter maar ten dele terecht draagt.

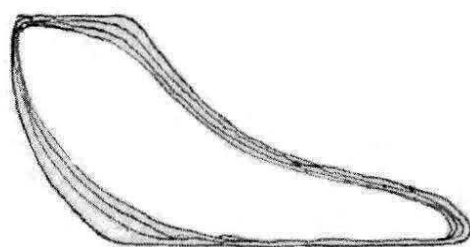
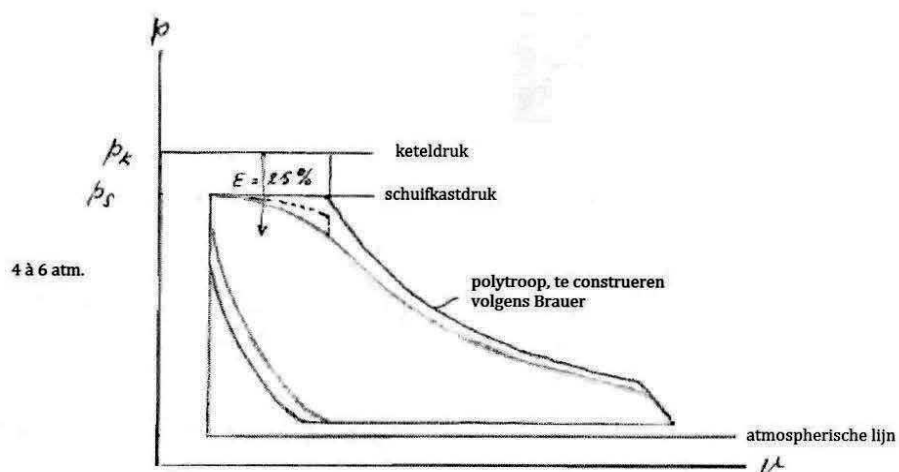
Het beste middel is dus oververhitting. Hierbij voert men de stoom in de ketel tot dichtbij de vuurkist. Zij wordt dan verwarmd tot 350 °C. Dit is een praktische grens welke ook ten dele is bepaald door de ter zake geldende regulering betreffende drukvaten, want zo werkt stoom van een hogere temperatuur dan 350 °C een ontbinding van de smeermiddelen in de hand en tast de stoom van een hogere temperatuur het koperwerk aan.

Oververhitting is goed voor alle soorten locomotieven, ook voor de rangeer- en goederentreinmachines, als men maar zeker is dat werkelijk direct oververhitte stoom in de cilinder komt.

Bij het ontwerpen van een ketel kan de volgende tabel een houvast bieden.

asind.	1B	2C	2B1	D1
SS serie	300	700	900	1100
NS serie	1300	3700	2000	62000
tot. inh. in lit.	4485	8180	6760	7480
stoomruimte in lit.	1303	2748	2060	2220
waterruimte in lit	3182	5432	4700	5260
verhouding stoom/waterruimte	1:2,44	1:1,98	1:2,28	1:2,37

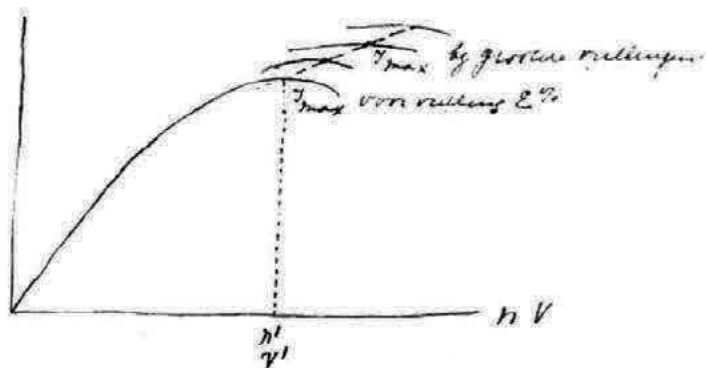
Hoe worden nu het aantal Q kilogram stoom in de cilinders in arbeid omgezet?



Figuur 7

Tekenen we een theoretisch indicatordiagram voor een vulling $\Sigma = 25\%$ (fig. 7a) Al meteen valt een terugval te zien tussen de keteldruk en de druk van de schuifkast door het passeren van reguleteur en stoompijp. Deze drukval is ongeveer $1\frac{1}{2}$ atm. (bar). Bij geringe snelheid zal het met inkt getekende diagram met enige hoekafronding voorkomen.

Bij grotere snelheid wordt de stoom door de bewegende schuif "geknepen", dus krijgt men al gauw een drukval gedurende de toelaat. Deze terugval is groter bij toename van het aantal omwentelingen. Ook bij de compressie zal "knijping" optreden, waardoor de compressie iets eerder intreedt en dus ook sterker



Figuur 8

oploopt. Er gaat dus van het diagram een heleboel af. Laat men de indicateur doorschrijven, dan zal men bij een toenemende snelheid, een hele bundel lijnen zien. (fig. 8).

Men tracht het "knijpen" kleiner te maken door grote zuigerschuiven toe te passen. De breedte van de schuif moet zo gemaakt worden, dat bij opening beslist het hele kanaal open is. Dit is dus anders dan bij andere stoommachines. Vaak gebruikt men ook "Trick-sche" schuiven; dat zijn dubbel ladende schuiven. Is de machine goed geconstrueerd dan is een normale eis bij 90 km/u

bij een machine met enkelvoudige expansie: $P_m = 3,6 \text{ kg/cm}^2$

bij een machine met compoundwerking: $P_m = 3,4 \text{ kg/cm}^2$

Onderstaand staatje geeft aan de NO de nuttige druk waarop de rekening is bij een keteldruk van 12 atm (bar) in een locomotiefketel met verzadigde stoom.

		Cilindervulling in %							
	omw./sec	20	25	30	35	40	45	50	55
Sneltrain loc.	4	2,9 5	3,55	4,2	-	-	-	-	-
	5	2,1 5	2,75	3,3	-	-	-	-	-
Goederentrein loc.	1	-	-	-	-	-	7,3	7,7	8,0
	1½	-	-	-	-	-	7,3	7,4	7,7
	2	-	-	-	-	6,4	6,8	7,2	-
	3	-	-	5,0	5,5	6,0	-	-	-
	4	-	3,6	4,1	4,7	-	-	-	-

De niet ingevulde cijfers zijn gevallen, die zich in de praktijk niet voor doen. Is de keteldruk bijvoorbeeld 15 atm, dan zijn deze getallen te vermenigvuldigen met 15/12.

Bij iedere bepaalde vulling zal de machine bij een zekere snelheid een maximum vermogen kunnen ontwikkelen, ondanks het feit dat de ketel desnoods meer stoom zou kunnen leveren.

Bij een grotere vulling ligt dat maximum ook bij een grotere snelheid. (zie tabel 1, met de handtekening van Ir. W.A.C. Pont, constructeur van de NS stoomlocomotief serie 3900).

Aantal I. P. K. (benaderd) α_i , in de cilinders gemeten, per m² verwarmd oppervlak W . (zonder oververhitter)

$$\text{I. P. K.} = N_i = \frac{T_i V}{270} = \alpha_i W.$$

$$\text{E. P. K.} = N_e = \eta N_i.$$

TYPE.	$\frac{W}{R}$	α_i bij aantal omwentelingen van de drijfas per sec.									
		1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	
Snelrein- Locomotieven.	2-ling verzadigd.	4,25	4,75	5,10	5,25	5,35	5,35	5,25	5,10	4,90	Ver- zadigd.
	2-cil. comp. "	5,05	5,00	6,—	6,25	6,40	6,40	6,30	6,10	5,80	
	4-cil. " "	5,15	5,75	6,20	6,50	6,70	6,80	6,80	6,70	6,50	
	2 en 4-ling oververhit.	7,—	7,75	8,35	8,80	9,10	9,20	9,20	9,10	8,90	Over- verhit.
	2 cil. comp. "	7,25	8,—	8,60	9,—	9,25	9,35	9,35	9,25	9,—	
	4 cil. " "	7,50	8,30	8,90	9,40	9,70	9,85	9,85	9,75	9,50	
Goederentrein- Locomotieven.	2-ling verzadigd.	3,90	4,30	4,55	4,70	4,70	4,65	4,5	—	—	Ver- zadigd.
	2-cil. comp. "	4,65	5,10	5,40	5,55	5,60	5,50	5,35	—	—	
	4-cil. " "	4,80	5,25	5,60	5,80	5,90	5,85	5,70	—	—	
	2 en 4-ling oververhit.	6,50	7,05	7,50	7,85	8,—	7,95	7,80	—	—	Over- verhit.
	2 cil. comp. "	6,70	7,25	7,70	8,—	8,15	8,10	7,95	—	—	
	4 cil. " "	6,95	7,55	8,05	8,40	8,50	8,50	8,35	—	—	

*) gebaseerd op de formules van STRAHL, voorkomende in diens artikel in „Glasers Annalen“, jaargang 1913, band 73.

N.B. De waarden van α_i hebben betrekking op een keteldruk van 12 kg/cm². Voor elken atmosfeer hooger keteldruk, neemt het vermogen met ongeveer 4% toe, nl. 1% door meerdere stoomproductie en 3% door hooger gemiddelden druk in den cilinder, dus $\alpha'_i = 1,04 (p'-12) \alpha_i$.

$$\left\{ 1 + 0,04 (p' - 12) \right\} \alpha_i$$

DRLFT, Febr. 1916.
F.

Tabel 1

Omgekeerd is bij een bepaalde snelheid het maximum vermogen gerelateerd aan een zekere vulling; dat is dan de gunstigste vulling bij die snelheid. We moeten trachten de locomotief te gebruiken bij de gunstigste snelheden in verband met de vullingen. Omdat het vermogen afhangt van Q en Pm zal echter ook de stoomproductie van de ketel invloed uitoefenen. Er bestaat dus verband tussen de ketel en de machine.

Strahl heeft uit vele proeven de volgende formule gevonden;

$$1 \text{ PK} = \alpha V$$

Voor de waarde van α , zie tabel 1.

Het stoten van de machine

Later zal weliswaar het stoten van de machine nogmaals aan de orde komen bij de bespreking van de invloed van het verenspel. Desondanks kan hier reeds dieper ingegaan worden op enige voorname oorzaken van het hinderlijke stoten.

Een oorzaak van "stoten" kan een te kleine vooropening van de schuif zijn.

Een locomotief van de serie 3900 moest op een vulling van 15% gereden zolang dat mogelijk was. Loopt een 3900 op de grote schuif 15% te hard dan moet de stoom met de reguleur geknepen worden, desnoods op de kleine schuif. Onnodig rijden met een grotere vulling op de kleine schuif dit wil zeggen tot 110 km/h is altijd fout. Bij een nog grotere snelheid bestaat de kans dat de schuif zo snel beweegt dat de tijd van opening bij 15% te gering is, om de stoom door te laten. Bij een 3900 is dit bij 110 km/h nog niet het geval.

Het effect van de "kleine schuif" is het afsmoren van de stoom van bijvoorbeeld 14 bar tot ± 11 bar bij een snelheid van een 3900 van bijvoorbeeld 50 km/h en 10 á 9 bar bij 100 km/h.

Tekenen we twee diagrammen over elkaar van ongeveer gelijke inhoud, dus met levering van gelijke arbeid (figuur a.).

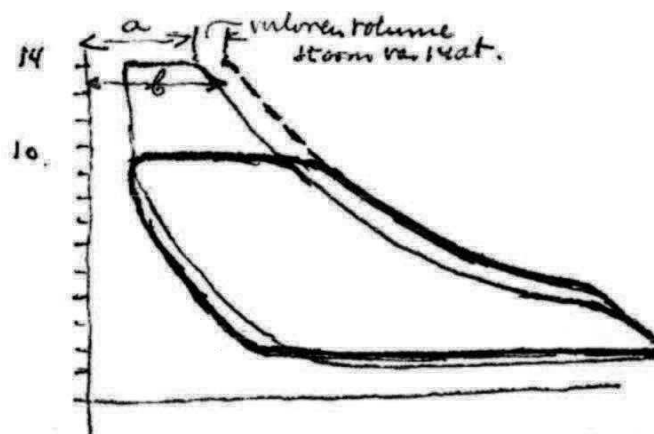


Fig. a

De dikke lijn begint met 10 bar (kleine schuif) en een grote vulling. Door de grotere vulling, bij dezelfde aangenomen snelheid leren praktisch genomen diagrammen dat de tegendruk iets hoger is en de compressie natuurlijk iets lager. De stippellijn geeft aan het verlengde van de expansielijn naar boven.

In het diagram voor de volle schuif van de reguleur is een volume stoom van 14 bar nodig, evenredig aan de afstand a, in dat van de geknepen stoom een volume, evenredig aan de afstand b. Door het onnodig knijpen is dus per cilindervulling en volume $(b - a) \frac{\pi d^2}{4}$ méér verbruikt.

Dit kan dus niet zuinig zijn!

Een 3700 kan ook niet met minder dan 20% gereden worden dus op dit gebied locomotiefseries met elkaar vergelijken is uit den boze!

Na deze inleiding zal blijken dat het type stoomverdeling ook van toepassing is op het "stoten".

Bij een Stephenson stoomverdeling, zoals die met zogenaamde "open" stangen op locomotieven wordt toegepast, wordt de vooropening bij kleinere vulling groter, maar daardoor wordt de tegendruk niet groter en is dit geen aanleiding tot stoten. Omgekeerd is zoals boven vermeld dit wel het geval. Hier gaan we dieper op in.

De Stephenson heeft nog een andere onaangename eigenschap doordat de scharen geen vast draaipunt hebben. Dit wil zeggen dat de excentrieken die op de krukas zitten niet afgeveerd zijn. De cilinder iis natuurlijk wel afgeveerd.

Ten gevolge van het verenspel verplaatst zich de schuif ook zonder dat het wiel draait. De ogenblikkelijke doorbuiging van de veren heeft dus invloed op de schuifopening en zelfs zoveel, dat onder omstandigheden soms aan één cilinderzijde de vooropening momenteel = 0 gesteld kan worden, gelijktijdig dan aan de andere zijde (teoretisch groter) maar dat kan bij de volgende omwenteling al weer anders zijn. De werkelijke grootte van de vooropening wijkt diensgevolge nogal sterk (en wisselend) af van de bij het stellen van de schuif bepaalde opening.

Bij de Walschaerts stoomverdeling is de vooropening theoretisch constant en doordat het draaipunt van de schaar eveneens verend is opgehangen is de invloed van het verenspel praktisch nihil.

De volgende diagrammen illustreren dit.

Het theoretisch diagram (figuur b.).

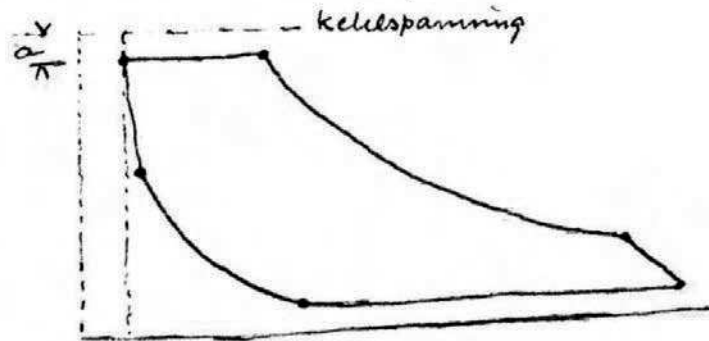


Fig. b

A= drukval tussen ketel en cilinder, meestal is dit ± 1 bar. Praktisch worden in een diagram de hoeken afgerond en treedt er vooral een drukval op in de periode van de toelaat, ten gevolge van de knijpverliezen in de stoompoorten. De val is groter bij een hogere snelheid. Om dezelfde reden is de tegendruk bij hogere snelheid groter (natuurlijk ook bij grotere vulling en constante snelheid, omdat er meer stoom in dezelfde tijd door dezelfde opening moet wegvloeien).

Een goed diagram is figuur c.

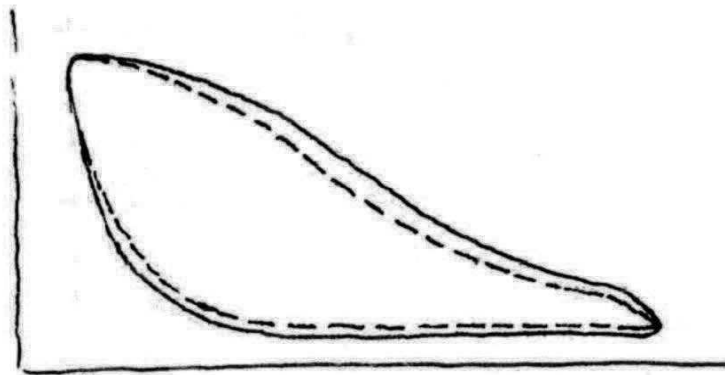


Fig. c

Het betreft dezelfde vulling, twee snelheden; de getrokken lijn voor de kleinere en de gestippelde lijn voor de grotere snelheid.

Het effect van een te kleine vooropening is te zien in figuur d.

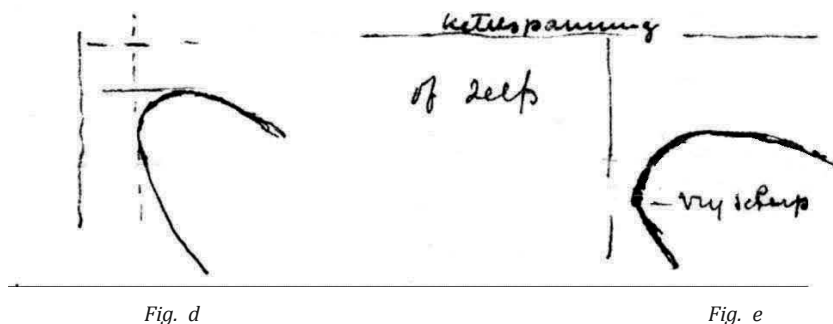


Fig. d

Fig. e

Bij het dode punt is de compressie nog niet tot schuifkastspanning opgelopen. De schuifopening wordt betrekkelijk (ten opzichte van de zuigersnelheid) langzaam groter en de cilinder krijgt pas de grotere schuifkastdruk als de zuiger al weer naar de andere kant loopt, dus zo waarbij de hoogste druk in het diagram beduidend lager blijft dan bij een juiste vooropening. Het gevolg is dat om evenveel arbeid te krijgen met een te kleine vooropening, met een grotere vooropening moet worden gereden.

Het diagram in figuur e. laat de zeer ongunstige situatie zien bij een gebrek aan vooropening, zoals dit het geval was met NS stoomlocomotieven die rond de jaren 1920 ontworpen zijn met te nauwe stoomkanalen. Het gevolg waren een vrij hoge tegendruk en een vrij hoog oplopende compressie. De vooropening werkt dan praktisch heel prettig om de te hoog oplopende compressie tegen te gaan omdat de toelaatruimte van de schuifkast dan al opent.

Deze ongunstige situatie is overdreven getekend in figuur f. want bij een onvoldoende vooropening ontstaat dan een lus die de negatieve arbeid weergeeft.

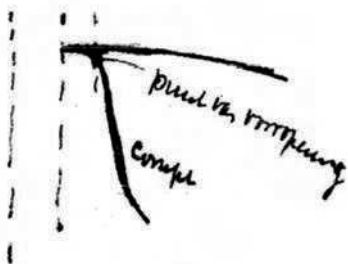


Fig. f

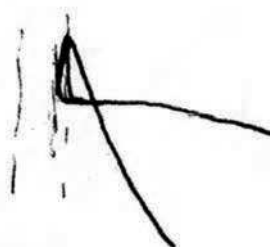


Fig. g

Een gunstiger geval blijkt uit het diagram uit figuur g. Dit geval kwam bij de meeste NS stoomlocomotieven voor. Loopt de compressie dan wat erg hoog op, wat door de geringe poortopening bij grote snelheid en kleine vulling nogal eens het geval zal zijn, dan ziet het diagram er vaak zo uit dat het een slingering vertoont die door de injecteurveer overdreven wordt (fig h). Er ontstonden zelfs diagrammen waar de slingering van de injecteurveer de gehele expansieperiode onzichtbaar maakte (fig. i)

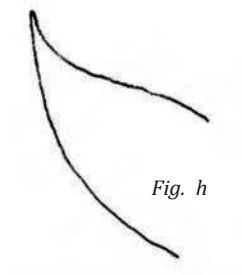


Fig. h

De compressie kan door verschillende oorzaken nogal eens te hoog oplopen, met pieken van 15 tot 17 bar dus dan is het niet vreemd dat daaruit ernstige stoten in de machine kunnen optreden.

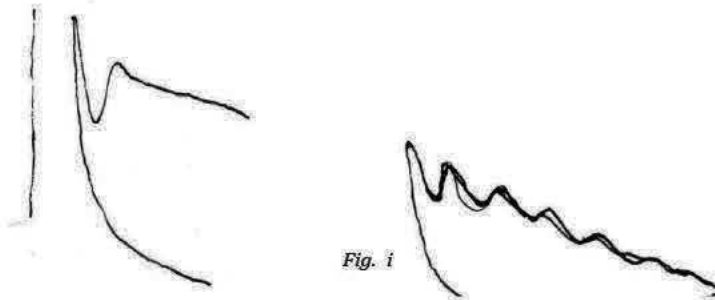


Fig. i

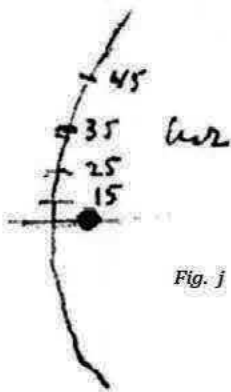


Fig. j

Het stoten bij kleine vullingen zoals vooral bij de Stephenson schaarbeweging het geval is, heeft ook als reden, dat het schaarblokje dan zo kort bij de middenstand staat en niet altijd volkomen zuiver staat. Bovendien is de afstand voor het blokje tussen 75 en 80% veel langer dan bijvoorbeeld tussen 15 en 20%. De verdeling is afgebeeld in figuur j.

Komt er dan zoals bij de Stephenson stoomverdeling nog de invloed van het verenspel bij, dan komt bij een kleine vulling het blokje momenteel of zelfs dóór de middenstand heen en is stoten natuurlijk het logische gevolg. Hierdoor is ook het gebruikelijke minimum van een 20% vulling ontstaan, hetgeen inderdaad bij de meeste oudere machines de praktische minimum vulling was.

De tweede methode.

Deze methode is ontwikkeld door de Franse ingenieur van de Chemins de Fer de l'Etat, J. Nadal.

Als $Q = \text{gebruikte stoom per } \frac{\text{IPK}}{\text{uur}}$, dan is $\frac{Q}{q} = \text{IPK}$.

Het vermogen aan het drijfwiel gemeten, wordt dan:

$$Q \frac{P_k}{D_r} = \frac{Q}{q} \times 0,93 \text{ (gerekend op een verlies van 7 à 10% in de stangen)}$$

De waarden van q lopen niet veel uiteen. Strahl geeft de volgende waarden bij een spanning van 12 atm. (bar).

Locomotieftype	q in kg stoom/IPK/uur voor I max bij V' Pm = 3,4 voor verz. Stoom Pm = 3,6 voor oververhitte stoom	b in kg brandstof/IPK/uur bij 6-voudige verdamping
2 cil. enkelv. exp. verz. stoom	12 à 11	2 à 1,8
2 cil. verz. stoom compound	10 à 9,5	1,7 à 1,58 *
4 cil. Verz. stoom. compound	9,6 à 9,2	1,6 à 1,53 *
2 cil. oververh. enkelv. Exp.	7 à 6,5	1,17 à 1,08
4 cil. oververh. compound	6,4 à 6,2	1,07 à 1,43

* deze waarden komen niet veel meer voor.

Voor een hogere stoom druk kan men van deze cijfers 1% aftrekken per atm., dus voor 15 atm. > 0,97 q of aangezien $1 \text{ pk} = \frac{Q}{q}$ wordt EPK = $0,9 \frac{Q}{q}$, zo kan men van tevoren ruwweg de EPK opgeven.

De twee methoden die hier zijn aangegeven, geven uit de aard der zaak niet precies gelijke uitkomsten.

Daar resultaten die behaald zijn op proefstanden en uit dynamo meter waarnemingen.

Een combinatie van deze geheel verschillende soorten proeven geeft aanleiding tot onzuiverheden.

Is het verlangde vermogen van de locomotief bekend dan moet men terugrekenen naar Q en daarmee de VO en RO van de ketel bepalen, maar om het vermogen te bepalen moet men eerst de trein weerstanden kennen.

Weerstand

We hebben gezien dat de trekkracht eerst wordt beheerst door de cilinder, adhesie en daarna door de ketelcapaciteit. Op elk ogenblik bepaald de kleinste van deze drie waarden de grootte van de beschikbare trekkracht.

Moet men een trein, met het gewicht G vervoeren over een weg die L lang is, dan zou men geneigd zijn te zeggen dat een arbeid $G \times L$ zou moeten worden verricht.

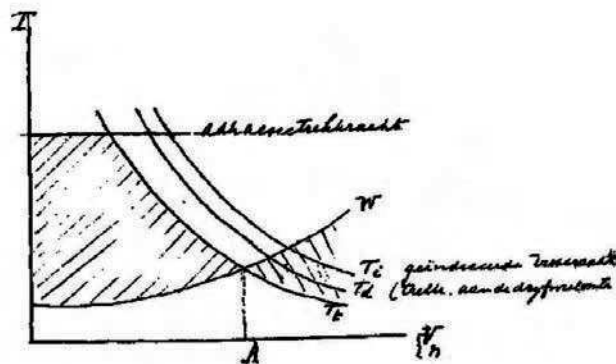
Helaas is dit echter niet het geval.

De op een vlakke weg te overwinnen weerstand neemt toe met het kwadraat van de snelheid. Nu is blijkbaar de beschikbare trekkracht aan de trekhaak van de tender:

$$T_t = T_d - \text{locomotief weerstand}$$

Bij de vraag naar het verlangde vermogen moet dus eerst T_t worden berekend. Zetten we de weerstanden uit in een TV diagram (fig. 9). Het met //// gearceerde deel is telkens het overschot aan trekkracht boven de weerstanden en kan dus voor versnelling van de trein gebruikt worden. Bij A is er geen overschot voor versnelling meer aanwezig en wordt de beweging dus eenparig. Stijgt de snelheid (bijvoorbeeld op een helling naar beneden) boven A dan komt er dus een vertraging, omdat de weerstand groter wordt dan de trekkracht.

We moeten dus trachten de weerstandlijn W te vinden.



Figuur 9

De totale weerstand kan men verdelen in:

- de rollende wrijving van de wielen op de spoorstaven;
- de slepende wrijving in machine delen, tappen, schenen enzovoorts;
- oneffenheden in de weg;
- de luchtweerstand;
- de helling weerstand;
- boog weerstand.

De eerste vier weerstandoorzaken worden samengevat onder de naam loopweerstand.

De weerstanden drukt men uit in kilogram ter ton gewicht.

Loopweerstand

Wanneer een as over de spoorstaven rolt, zonder te glijden treden in de aanrakingspunten met de spoorstaven als gevolg van de daar werkende verticale en tangentiële krachten, vormveranderingen op, die op elk punt van de spoorstaven opnieuw moeten worden teweeggebracht. Het arbeid verlies, dat daarvan het gevolg is wordt toegeschreven aan de rollende wrijving, die op de loopvlak in de contactpunten optreedt en een weerstand biedt tegen de voortbeweging van de as. Men voert de rollende wrijving gewoonlijk in als een weerstand biedend koppel, bijvoorbeeld door de verticale railreactie niet in het raakpunt, maar op een afstand f' daarvoor te laten aangrijpen. Omdat er in het reactiepunt geen glijden plaats heeft kunnen er namelijk geen vrije horizontale krachten zijn, (zie figuur 14. e.v.)

$G \times f'$ vormt nu een koppel dat het voortrollen van het wiel belemmert, en de lengte f' wordt zo gekozen dat dit koppel in grootte overeenkomt met het praktisch waargenomen weerstand-biedend koppel van de rollende wrijving. De weerstand van de rollende wrijving is de kracht, die in het hart van de as moet worden aangewend om het weerstand biedend koppel te overwinnen.

We moeten hierbij onderscheid maken tussen drie soorten van voertuigassen: de gedreven as, de getrokken as en de geremde as.

De gedreven as.

Deze wordt gedreven door een moment $M = P \times R$ en krijgt daardoor een snelheid v , die constant wordt gedacht, terwijl de as tevens de trekkracht T uitoefent mits de spoorstaaf voldoende adhesie oplevert. De verticale raildruk is G . Verder werk nog op het wiel: de horizontale rail reactie T_1 , tegengesteld aan de richting van het drijvend koppel, (voorwaarde voor het ontstaan van de translatie beweging), de verticale rail reactie G , aangrijpend voor de verticale hartlijn, zodat nog optreedt: het weerstand biedend moment $G \times f'$, tegengesteld aan M gericht. f' is een lengte en worden genoemd de coëfficiënt de rollende wrijving voor de gedreven as. Voor het evenwicht is nodig dat:

$$G = G$$

$$T_1 = T$$

$$P R - T_1 - f' G = 0$$

dus:

$$T_1 = P - \frac{f' G}{R} = T$$

de horizontale railreactie is dus gelijk aan de trekkracht en is op de rollende wrijving

$$\left\{ W_r = \frac{f' G}{R} \right\}$$

na gelijk aan de ingeleide omtrek kracht P .

Is $T = 0$, wordt het ingeleide moment $P \times R$ alleen gebruikt om de rollende wrijving te overwinnen, want dan is de horizontale weerstand van de baan op de rollende wrijving na gelijk aan de omtrekstrekkraft en is:

$$T_1 = 0$$

$$P = \frac{f' G}{R}$$