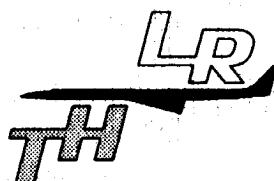


TECHNISCHE HOGESCHOOL DELFT

LUCHTVAART- EN RUIMTEVAARTTECHNIEK



TECHNISCHE HOGESCHOOL DELFT
LUCHTVAART- EN RUIMTEVAARTTECHNIEK

Memorandum M-324

BEPALING VAN HET GETAL VAN MACH VAN
DE TRANSSONE STROMING IN DE TST 27
WINDTUNNEL MET DICHTTE WANDEN

door

W.J. Bannink en P.G. Bakker

Delft - Nederland
maart 1979

1911

1912

1913

WOORD VAN DANK

De schrijvers zijn in hoge mate dank verschuldigd aan Henk Lenselink voor zijn aandeel in de voorbereiding van de metingen en aan Nico Lam voor de verzorging van het tunnelbedrijf en de uitvoering van de meetopstelling.

SAMENVATTING

In dit memorandum zijn statische drukmetingen in transsone stroming beschreven die zijn uitgevoerd langs de hartlijn van de TST 27 wind-tunnel. De metingen, verricht met een verplaatsbare buis die van de sus-kamer tot in de diffusor reikte, betreffen de stroming zonder model en langs een model van 2 cm dikte en een koorde van 10 cm. Het model was over de volledige hoogte van het tunnelkanaal op een van de zijwanden van de meetplaats bevestigd.

Het doel van de metingen is de bepaling van een reproduceerbare stromings-configuratie (getal van Mach van de aanstroming) in aanwezigheid van een model in een tunnel met dichte wanden.

Uit de meetresultaten zijn referentieposities bepaald, die dusdanig ver stroomopwaarts van het model liggen dat geen invloed van het model meer wordt ondervonden. Met behulp van de referentiedrukken wordt het getal van Mach van de aanstroming bepaald.

INHOUD

	<u>blz.</u>
Woord van dank	1
Samenvatting	2
Symbolenlijst	4
1. Inleiding	5
2. Experimentele opstelling	6
3. Regeling van het getal van Mach in de windtunnel	8
4. Calibratieresultaten	10
5. Bepaling van het getal van Mach van de aanstroming in de tunnel met model	12
6. Korte beschrijving van de werkwijze en conclusies	15
Tabellen	
Figuren	

SYMBOLENLIJST

- $A(x)$: doorsnede van het tunnelkanaal t.p.v. x
- $A(0)$: doorsnede van het tunnelkanaal t.p.v. $x = 0$
- A_{ch} : doorsnede van de chokesectie
- A_m : frontaal oppervlak van het model
- A^* : kritische aerodynamische doorsnede
- A_1^* : kritische aerodynamische doorsnede van stroming in lege tunnel
- A_m^* : kritische aerodynamische doorsnede van stroming met model
- M : getal van Mach
- $M(0)$: getal van Mach t.p.v. $x = 0$ (in lege tunnel)
- a_n, b_n, c_n, d_n : coëfficiënten in resp. vgl. (5), (6), (7), (8)
- h : gemiddelde hoogte van de verstelbare kammen in de chokesectie
- p : statische druk
- p_t : totale druk = suskamerdruk
- s : chokestand op meter
- x : afstand langs horizontale hartlijn van de tunnel, $x = 0$ hart van de meetplaats, $x > 0$ stroomopwaarts van de meetplaats

1. INLEIDING

Het voornemen bestaat om onderzoek te verrichten aan het stromingsveld boven een transsoon aangestroomd profiel. De nadruk komt daarbij te liggen op de studie van het ingesloten supersone gebied dat wordt begrensd door een deel van de profielcontour, de sonische lijn en de afsluitende schokgolf aan de stroomafwaartse kant van het gebied.

Omdat het onderzoek zich in het bijzonder zal richten op de aansluiting tussen de sonische lijn en de afsluitende schokgolf en er fundamenteel geen redenen zijn aan te geven die een speciaal profiel met de daarbij behorende stroming vereisen, is besloten het onderzoek uit te voeren aan een cirkelboog profiel in een tunnel met dichte wanden; de tunnel is voor dit doel eerst gecalibreerd.

De calibratie is uitgevoerd bij subsone getallen van Mach van de aanstroming, zonder en met aanwezigheid van een cirkelboogmodel met een dikte van 20%. Door de aanwezigheid van het model zal de stroming in de tunnel vóór het model worden beïnvloed. De metingen met een model in de meetplaats zijn verricht om na te gaan hoe ver de invloed van het model zich stroomopwaarts doet gevoelen.

Er is een vrij dik model gekozen omdat dit een bovengrens voor het getal van Mach aangeeft in verband met blokkeren van de tunnel. Het laatste wil zeggen dat een lokaal supersone gebied boven het model zich uitstrekt tot aan de tegenoverliggende wand, waardoor verdere verhoging van het aanstroomgetal van Mach niet meer mogelijk is.

Uit de vergelijking van de metingen zonder en met model volgt dat de stroomopwaartse invloed van het model na een bepaalde afstand niet meer merkbaar is binnen zekere nauwkeurigheidsgrenzen. In het gebied waar dit het geval is kan dan met behulp van referentiedrukmetingen de tunnelstroming worden ingesteld op een gedefiniëerd getal van Mach, hetgeen het doel van de calibratiemetingen is.

2. EXPERIMENTELE OPSTELLING

De calibratie is uitgevoerd in de TST 27 windtunnel van de Afdeling der Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek. De tunnel is uitgerust met verstelbare boven- en onderwand; een schematische voorstelling van het tunnelkanaal is gegeven in Fig. 1. Tijdens de experimenten is het tunnelkanaal vanaf de keel licht divergerend ingesteld en wel zodanig dat in de meetsectie een constante statische druk wordt bereikt in een stroming zonder model. Deze vorm van het kanaal is voor alle proeven (ook met model) dezelfde gebleven (meterstand: kokos 2740).

De statische drukverdeling langs het hart van het tunnelkanaal is gemeten met een buis (ϕ 18 mm), die loopt vanuit de suskamer tot in de diffusor. De buis is verschuifbaar langs een kabel die in de suskamer en in de diffusor is bevestigd. Langs de gehele lengte van de buis zijn aan de zijkant drukgaatjes aangebracht, waarvan de posities in Fig. 1 zijn aangegeven.

Gedurende een proef kan de buis in axiale richting in stappen langs de hartlijn van de tunnel bewegen, de minimaal toegepaste stapgrootte is 3,75 cm. De totale axiale verplaatsing van de buis is zodanig dat de positie van een drukgaatje die van een voorafgaand of opvolgend gaatje kan overlappen.

Op een van de zijwanden van de meetsectie kan over de volledige hoogte van de meetsectie een model worden bevestigd. Het gebruikte model heeft een cirkelboogprofiel met een koorde van 10 cm en een dikte van 2 cm, het is met de vlakke onderkant op de tunnelzijwand gemonteerd en bevindt zich geheel binnen de grenslaag van de wand (grenslaagdikte \pm 3,5 cm). In de tegenover gelegen zijwand bevindt zich i.p.v. een glazen ruit een stalen ruit voorzien van drukgaatjes langs de horizontale hartlijn.

In de situatie zonder model is de drukverdeling op de zijwand waar het model geplaatst kan worden gemeten met behulp van een strip van 10 tegen elkaar gelegen buizen (meetlint); elk van de buizen heeft een diameter van 2 mm en is voorzien van een drukgaatje. De drukgaatjes zijn, in stromingsrichting gezien, diagonaalsgewijs zodanig over het meetlint aangebracht, dat de x-posities corresponderen met de x-posities van de drukgaatjes in de tegenovergelegen wand (stalen ruit).

De drukgaatjes in de buis, het meetlint en de tunnelwand zijn aangesloten op een drukopnemer die door middel van een drukafaster worden

afgetast. In totaal zijn aldus per stap van de buis 34 drukken verwerkt: 14 van de buis, 10 van de stalen ruit in de zijwand en, in de meetopstelling zonder model, 10 van het meetlint in de andere zijwand. De metingen zijn uitgevoerd bij een suskamerdruk van $2 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ nominaal, resulterend in een getal van Reynolds, gebaseerd op de koorde-lengte van het model, van $3 \cdot 10^6$.

Worden de drukken, gemeten met het meetlint, vergeleken met die van de tegenovergelegen wand, dan blijken de verschillen nietgroter te zijn dan 0,9%. Gezien de reproduceerbaarheid van de drukverschillen bij ver-schillende getallen van Mach kunnen ze worden toegeschreven aan de imperfectie van het meetlint. Verwacht wordt dat drukmetingen met een zorgvuldig ver-vaardigd meetlint belangrijk nauwkeuriger resultaten zullen opleveren, waardoor een betrouwbaar instrument voor wanddrukmetingen in transsone stroming is verkregen.

3. REGELING VAN HET GETAL VAN MACH IN DE WINDTUNNEL

Voor het regelen van de tunnelstroming bij hoogsubsonische getallen van Mach (0,6 - 0,85) is een andere werkwijze toegepast dan bij supersonische stroming gebruikelijk is. De procedure zal worden toegelicht aan de hand van Fig. 2, waarin een schematische voorstelling is gegeven van het tunnelkanaal tot een eind voorbij de meetplaats. In principe betreft het hier een supersonische windtunnel waarvan de keel een weinig geknepen is. Door de aanwezigheid van de grenslaag op de tunnelwanden is het effectieve verloop van de doorsnede van het kanaal dusdanig dat over een afstand van -20 cm tot +30 cm, gemeten t.o.v. het hart van de tunnelruit, een statische druk is gemeten die constant is met een nauwkeurigheid van 0,2%.

De hoogte van de meetplaats bedraagt 25,3 cm en de breedte 28 cm. In de keel ($x \approx 170$ cm) is de stroming subsonisch, terwijl in de chokesectie, stroomafwaarts van de meetplaats ($x \approx -110$ cm), een supersonisch gebied bestaat.

De chokesectie bevat zowel in de boven- als in de onderwand 4 verticaal verstelbare kammen, waardoor de doorstroom geregeld kan worden. De verhouding tussen de geometrische doorsnedes van de chokesectie, A_{ch} , en van de meetplaats in $x = 0$, $A(0)$ is gegeven door:

$$\begin{aligned} \frac{A_{ch}}{A(0)} &= 1,22530 - 0,00390 h \quad (\text{zonder meetbuis}) \\ &= 1,22972 - 0,00391 h \quad (\text{met meetbuis}) \end{aligned} \tag{1}$$

waarin h de gemiddelde hoogte van de kammen in de chokesectie is (Fig. 3). Met een model waarvan de maximale dikte 2 cm is en dat over de volledige hoogte van de meetplaats tegen de tunnelzijwand is gemonteerd bedraagt de geometrische doorsnede verhouding:

$$\begin{aligned} \frac{A_{ch}}{A(0) - A_m} &= 1,31955 - 0,00420 h \quad (\text{zonder meetbuis}) \\ &= 1,32447 - 0,00422 h \quad (\text{met meetbuis}) \end{aligned} \tag{2}$$

waarin A_m het frontale oppervlak van het model is. De hoogte h van de kammen is via een lineair systeem gekoppeld aan een meter, aflezing s

(200 < s < 300). De vergelijkingen (1) en (2) zijn dan om te vormen tot:

$$\begin{aligned} \frac{A_{ch}}{A(0)} &= 0,03531 + 0,003807 s \quad (\text{zonder meetbuis}) \\ &= 0,03545 + 0,003821 s \quad (\text{met meetbuis}) \end{aligned} \quad (3)$$

en

$$\begin{aligned} \frac{A_{ch}}{A(0) - A_m} &= 0,03803 + 0,004100 s \quad (\text{zonder meetbuis}) \\ &= 0,03818 + 0,004116 s \quad (\text{met meetbuis}) \end{aligned} \quad (4)$$

Door A_{ch} te wijzigen door middel van de beweegbare kammen bestaat in principe de mogelijkheid om het getal van Mach in de meetplaats te regelen. T.g.v. de aanwezigheid van het model, de grenslagen op de tunnelwanden en een eventuele losgelaten stroming over het model, kan met bovenstaande betrekkingen het getal van Mach niet nauwkeurig bepaald worden, maar moet dit via ijking gebeuren. In paragraaf 5 is beschreven hoe uit drukmetingen de bepaling van het getal van Mach in de stroming met model geschiedt.

In principe zijn de drie stromingssituaties, geschetst in Fig. 2, gec calibreerd:

- a) de stroming zonder model;
- b) de stroming met model en een lokaal supersoon gebied op het model;
- c) de stroming met model, terwijl het lokale supersone gebied de tegenoverliggende tunnelwand treft.

4. CALIBRATIERESULTATEN

Voor een aantal discrete standen van de kammen, overeenkomend met de meteraflezingen $s = 225,5, 231, 236, 250$ en 254 , zijn drukmetingen in de lege tunnel langs de tunnelhartlijn uitgevoerd met de statische buis. De drukverdeling bij elk van de chokestanden is door middel van een polynoomstroking vastgelegd als functie van de afstand x langs de hartlijn van $x = -20$ cm tot $x = 170$ cm.

Om het drukverloop nauwkeurig te krijgen binnen $0,002$ in het gemeten getal van Mach is de drukcurve opgedeeld in drie delen. Door elk van de delen is met de kleinste kwadraten methode een polynoom gestrookt waarvan de graad zodanig is dat aan de gestelde nauwkeurigheidseis wordt voldaan. Per chokestand s volgen dan drie functies:

$$\frac{p}{p_t} = 0,5 + \sum_{n=0}^4 a_n \left(\frac{x}{800} \right)^n \quad (5)$$

voor $-20 \text{ cm} \leq x \leq 60 \text{ cm}$,

$60 \text{ cm} \leq x \leq 120 \text{ cm}$ en

$120 \text{ cm} \leq x \leq 170 \text{ cm}$.

De waarden van de coëfficiënten a_n zijn gegeven in Tabel 1.

Uit de voor elk van de zes chokestanden s gevormde polynoomcurven kan nu een drukverdeling worden berekend voor een willekeurige chokestand binnen het interval van s -waarden waarvoor de metingen zijn verricht.

Dit is geschied door voor $x = \text{constant}$ ($-20 \text{ cm} \leq x \leq 170 \text{ cm}$) een N^e graads polynoom voor $\frac{p}{p_t}$ als functie van s te bepalen (met de kleinste kwadraten methode). De algemene vergelijking van de polynomen is:

$$\frac{p}{p_t} = \sum_{n=0}^N b_n \left(\frac{s - 225}{150} \right)^n, \quad N \leq 5 \quad (6)$$

In Tabel 2 zijn de coëfficiënten van deze polynomen weergegeven voor $-20 \text{ cm} \leq x \leq 170 \text{ cm}$ met stappen van $\Delta x = 10 \text{ cm}$.

In Fig. 4 zijn de gemeten drukverdelingen uitgezet, ook de polynoomwaarden zijn aangegeven. Het getal van Mach M is constant met een nauwkeurigheid van $\pm 0,02$ in een gebied $-20 \text{ cm} \leq x \leq 30 \text{ cm}$.

De waarden van M in $x = 0$ zijn uitgezet tegen de chokestand s in Fig. 5; de getalwaarden kunnen worden gevonden in Tabel 5, 2e en 3e kolom. De statische drukverdeling in aanwezigheid van het model zijn gegeven in Fig. 6. De metingen zijn uitgevoerd bij dezelfde chokestanden als in het geval zonder model, met uitzondering van $s = 231$ waarvoor nu $s = 230$ in de plaats komt.

De drukgaatjes in de statische meetbuis bevinden zich aan de kant van het model.

In de situatie met model blijkt de tunnel geblokkeerd te zijn bij een chokestand $s = 250$. Voor een hogere waarde van s , $s = 254$, is de drukverdeling stroomopwaarts van het supersone gebied boven het model vrijwel identiek aan die voor $s = 250$. Er is een lichte afwijking in de druk tussen de posities $x = 40$ cm en $x = 120$ cm. De afwijking resulteert in een verlaging in getal van Mach van 0.003, hetgeen mogelijk een gevolg is van een verandering van het gedrag van de grenslaag over het model. De drukverdelingen zijn, evenals in het geval van de lege tunnel, benaderd door drie kleinste kwadraten polynomen per chokestand s , door middel van de functies:

$$\frac{p}{p_t} = 0,5 + \sum_{n=0}^N c_n \left(\frac{x}{800} \right)^n, \quad N \leq 4 \quad (7)$$

De coëfficiënten c_n zijn gegeven in Tabel 3.

5. BEPALING VAN HET GETAL VAN MACH VAN DE AANSTROMING IN DE TUNNEL MET MODEL

Zoals uit vergelijking van de figuren 4 en 6 blijkt is bij een vaste choke-instelling het drukniveau ver voor het model (tot in de keel) verschillend van het niveau in de lege tunnel. Dit is te wijten aan een wijziging van de kritische doorsnede A^* van de stroming. Afhankelijk van de stromingsconfiguratie in de tunnel met model kan een wijziging van A^* op verschillende manieren worden veroorzaakt. In het geval van een stromingsconfiguratie geschetst in Fig. 2b treedt de kritische doorsnede op t.p.v. de chokesectie. De verandering van de kritische doorsnede A^* wordt in dit geval te weeg gebracht door het zog dat van het model afkomt waardoor in de chokesectie een vermindering van de effectieve doorsnede optreedt. In de stromingstoestand waarbij het lokaal supersone gebied t.p.v. het model zich tot de tegenovergelegen wand uitstrekt, Fig. 2c, wordt de kritische doorsnede gevonden in de meetsectie. In dat geval zal een verdere vergroting van de chokedoorsnede geen invloed meer kunnen uitoefenen op de stroming vóór het model (Engels: "choked flow"), zodat de kritische doorsnede (t.p.v. het model) constant blijft. Uit de metingen van de statische druk ver vóór het model en de meting van de druk in de lege tunnel in dezelfde x positie is nu de verhouding $\frac{A_m^*}{A_1^*}$ van de gewijzigde t.o.v. de oorspronkelijke kritische doorsnede te bepalen (de index m slaat op de situatie met model en de index 1 op die van de lege tunnel).

Op grond van de in het voorgaande genoemde effecten is het niet zonder meer mogelijk om de stroomopwaartse modelinvloed te bepalen uit een loutere vergelijking van de drukverdelingen. Het is echter redelijk om te verwachten dat stroomopwaarts van het model de aerodynamische doorsnede van het tunnelkanaal nauwelijks verandert door de aanwezigheid van het model. De modelinvloed stroomopwaarts kan dan bepaald worden door het verloop van $\frac{A_m^*}{A_1^*}$ te beschouwen. Indien nl. $\frac{A_m^*}{A_1^*}$ bepaald wordt uit dat gedeelte van de drukverdeling dat niet door het model wordt beïnvloed, dan zal $\frac{A_m^*}{A_1^*}$ per chokestand een constante waarde aannemen, hier aangeduid met $\left(\frac{A_m^*}{A_1^*}\right)_\infty$. Wordt bij een chokestand de waarde van $\frac{A_m^*}{A_1^*}$ bepaald uit een door het model beïnvloede druk dan zal deze waarde afwijken van $\left(\frac{A_m^*}{A_1^*}\right)_\infty$ bij deze chokestand. De invloed

van het model op de stroomopwaartse drukverdeling is dus af te leiden uit het verloop van $\frac{A_m^*}{A_1^*}$ als functie van x .

De berekende verhoudingen $\frac{A_1^*}{A(x)}$, $\frac{A_m^*}{A(x)}$ en het quotiënt van beide is als functie van de x posities vóór het model getabelleerd in de Tabellen 4a t/m e voor de chokestanden 225,5, 236, 245, 250 en 254.

Voor $\left(\frac{A_m^*}{A_1^*}\right)_{\infty}$ is het gemiddelde gekozen van $\frac{A_m^*}{A_1^*}$ in $x = 150, 160$ en 170 cm. Het verloop van $\frac{A_m^*}{A_1^*}$ als functie van x is weergegeven in Fig. 7. In Fig. 8 zijn de resultaten samengevoegd in die zin dat de afwijking Δ van $\frac{A_m^*}{A_1^*}$ t.o.v. de constante waarde $\left(\frac{A_m^*}{A_1^*}\right)_{\text{gem}}$ is uitgezet als functie van de plaats x in het tunnelkanaal. Als maat voor de afwijking Δ is gekozen:

$$\Delta = \frac{\frac{A_m^*}{A_1^*} - \left(\frac{A_m^*}{A_1^*}\right)_{\text{gem}}}{\left(\frac{A_m^*}{A_1^*}\right)_{\text{gem}}} \times 100\%$$

Uit Fig. 8 blijkt dat voor $x \geq 140$ cm Δ kleiner is dan 0,05%, hetgeen voor het getal van Mach in de meetplaats een fout betekent van minder van $2^0/\infty$. De gemeten drukverdeling voor $x > 140$ cm is daarmee voldoende vrij van modelinvloeden, zodat de statische druk daar geschikt is om als referentiedruk te dienen.

In Fig. 9 is $\left(\frac{A_m^*}{A_1^*}\right)_{\text{gem}}$ weergegeven als functie van de chokestand s . De figuur lijkt te bestaan uit twee takken die t.o.v. elkaar een tegengestelde kromming hebben. De overgang van de ene naar de andere tak komt overeen met de wijziging van de stromingsconfiguratie (Fig. 2b, 2c).

Het verband tussen het getal van Mach in de meetplaats $M(0)$ en de statische druk in $x = 140, 150, 160$ en 170 cm is gegeven in Fig. 10. De krommen in deze figuur zijn bepaald uit meetpunten volgens kleinste kwadraten polynomen:

$$M(0) = 0,65 + \sum_{n=0}^2 d_n \left(0,75 - \frac{p}{p_t}\right)^n \quad (8)$$

De coëfficiënten d_n zijn voor elk van de x waarden gegeven in Tabel 6.

De feitelijke bepaling van het getal van Mach van de aanstroming in de tunnel met model geschiedt als volgt. Met behulp van Fig. 5 wordt de chokestand afgelezen bij het nominaal gewenste getal van Mach. Deze chokestand wordt ingesteld en tijdens een meting met model wordt de **druk op de referentiepositie** bepaald. De referentiedrukverhouding levert dan met vgl. (8) (of Fig. 10) het getal van Mach met een nauwkeurigheid van $\pm 0,002$.

In de praktijk zal de referentiedruk gemeten worden met behulp van drukgaatjes in de zijwanden van de tunnel op $x \geq 140$ cm. Het is dan noodzakelijk om de zijwanddrukken te ijken tegen de referentiedruk gemeten met de axiale statische buis.

6. KORTE BESCHRIJVING VAN DE WERKWIJZE EN CONCLUSIES

In dit memorandum is een methode beschreven om uit statische drukmetingen langs de tunnel hartlijn het getal van Mach van de transsonie stroming in een windtunnel met dichte wanden te bepalen.

Hier toe is de volgende werkwijze toegepast:

1. de tunnel is zodanig ingesteld dat de kritische doorsnede A^* van de stroming in de lege tunnel ontstaat in de chokesectie stroomafwaarts van de meetplaats;
2. de statische druk is gemeten langs de tunnel hartlijn bij verschillende instellingen van de doorsnede van de chokesectie, in de lege tunnel en met een twee-dimensionaal model (kooorde 10 cm, dikte 2 cm);
3. uit de verhouding $\frac{p}{p_t}$ van de statische druk en de totale druk is de doorsnede verhouding $\frac{p}{p_t} \frac{A(x)}{A^*}$ bepaald ($A(x)$ aerodynamische koorsnede tunnelkanaal t.p.v. x , A^* kritische aerodynamische doorsnede van de stroming);
4. onder de veronderstelling dat ver vóór het model $A(x)$ niet beïnvloed is door de aanwezigheid van het model is $\frac{A_m^*}{A_1^*}$ berekend uit de verhoudingen van punt 3 (m = met model, 1 = lege tunnel);
5. in het gebied op een afstand groter dan 140 cm voor het hart van de meetplaats is $\frac{A_m^*}{A_1^*}$ constant (door zoginvloeden van het model is deze verhouding < 1 , bovendien kan de tunnel geblokkeerd zijn waardoor A_m^* t.p.v. het model optreedt);
6. in het gebied genoemd in punt 5 is geen model invloed meer aanwezig, zodat hier p/p_t een maat is voor het getal van Mach van de aanstroming van het model;
7. de gemeten getallen van Mach reiken van 0,65 - 0,85 met een nauwkeurigheid van $\pm 0,002$.

s	x cm	a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄
225,5	-20 ≤ x ≤ 60	0,23807	0,00752	- 0,88391	9,5747	- 100,95
	60 ≤ x ≤ 120	0,27397	-1,2605	15,3070	- 87,8104	193,01
	120 ≤ x ≤ 170	-0,16223	9,0124	- 74,6486	266,91	- 356,77
231	-20 ≤ x ≤ 60	0,21685	0,00250	- 0,90173	18,5362	- 257,06
	60 ≤ x ≤ 120	0,19686	0,73046	- 11,5177	71,1555	- 156,86
	120 ≤ x ≤ 170	-0,31385	10,9639	- 82,4458	262,43	- 303,68
236	-20 ≤ x ≤ 60	0,20176	0,02001	- 1,8320	16,5976	- 114,27
	60 ≤ x ≤ 120	0,18117	1,1292	- 21,9448	158,24	- 397,32
	120 ≤ x ≤ 170	0,25955	-2,0772	23,9259	-117,22	195,51
245	-20 ≤ x ≤ 60	0,16693	0,02017	- 0,75999	- 10,2509	18,9759
	60 ≤ x ≤ 120	0,13020	1,9089	- 34,9296	242,78	- 582,63
	120 ≤ x ≤ 170	-1,3284	32,4069	-260,51	917,47	-1211,2
250	-20 ≤ x ≤ 60	0,14403	0,02870	- 1,1587	- 13,5640	50,1443
	60 ≤ x ≤ 120	0,04353	4,4080	- 71,5077	469,70	-1088,1
	120 ≤ x ≤ 170	-1,0655	25,9182	-205,342	709,84	- 924,85
254	-20 ≤ x ≤ 60	0,12630	0,04383	- 1,3878	- 26,0907	154,70
	60 ≤ x ≤ 120	-0,04525	7,3929	-117,38	766,61	-1778,5
	120 ≤ x ≤ 170	-1,4974	35,3121	-286,04	1022,4	-1392,4

Tabel 1. Coëfficiënten a_n in vgl. (5).

x cm	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅
-20	0,7371	-0,5830	1,282	4,655	-147,2	400,8
-10	0,7378	-0,6562	4,563	-40,13	95,99	-
0	0,7381	-0,6524	4,608	-41,16	99,89	-
10	0,7380	-0,6475	4,520	-40,50	98,45	-
20	0,7378	-0,6455	4,342	-38,39	90,26	8,174
30	0,7374	-0,6528	4,396	-38,55	91,59	-
40	0,7368	-0,6436	3,579	-25,50	12,63	159,9
50	0,7359	-0,6758	4,634	-39,81	92,18	-
60	0,7345	-0,7405	6,730	-65,55	224,4	-248,2
70	0,7334	-0,7060	5,135	-44,10	101,7	-
80	0,7327	-0,6754	4,044	-35,21	78,84	-
90	0,7320	-0,5813	0,1129	18,34	-219,8	585,4
100	0,7313	-0,5710	-0,2189	22,58	-241,6	627,4
110	0,7306	-0,5620	-0,6846	30,19	-283,9	709,3
120	0,7300	-0,6304	-2,397	-19,19	36,22	-
130	0,7276	-0,5337	-2,324	53,79	-420,4	981,1
140	0,7247	-0,6968	4,145	-35,44	76,57	-
150	0,7217	-0,7275	4,751	-40,62	86,75	-
160	0,7187	-0,7131	3,934	-33,27	62,40	-
170	0,7158	-0,6265	1,339	-11,49	-	-

Tabel 2. Coëfficiënten b_n in vgl. (6).

s	x cm	c ₀	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄
225,5	20 ≤ x ≤ 60	0,24441	0,11449	- 5,7962	98,1188	- 622,42
	60 ≤ x ≤ 120	0,26482	- 0,74562	9,5759	- 59,324	138,00
	120 ≤ x ≤ 170	0,85590	-13,9902	120,599	-465,85	669,53
230	20 ≤ x ≤ 60	0,22580	0,46245	- 12,4844	133,16	- 576,33
	60 ≤ x ≤ 120	0,17405	2,2285	- 32,5792	201,37	- 457,61
	120 ≤ x ≤ 170	-0,68212	20,4571	-169,65	614,55	- 830,37
236	20 ≤ x ≤ 60	0,21868	- 0,14488	6,5662	-127,59	741,61
	60 ≤ x ≤ 120	0,26769	- 1,8915	25,2013	-151,59	334,84
	120 ≤ x ≤ 170	0,06162	3,6323	- 30,1747	102,69	- 129,76
245	20 ≤ x ≤ 60	0,18804	0,80204	- 24,6137	313,87	-1514,0
	60 ≤ x ≤ 120	0,20971	- 0,36622	2,9060	- 9,7179	-
	120 ≤ x ≤ 170	-0,47040	15,3685	-129,99	475,70	- 649,01
250	20 ≤ x ≤ 60	0,18712	0,28578	- 8,0065	97,0514	- 495,49
	60 ≤ x ≤ 120	0,18144	0,20189	- 1,3884	-	-
	120 ≤ x ≤ 170	-0,27887	10,9727	- 93,3034	339,07	- 458,17
254	20 ≤ x ≤ 60	0,18948	0,09431	- 0,99710	- 10,9082	126,013
	60 ≤ x ≤ 120	0,21507	- 0,88838	11,7454	- 65,8067	111,92
	120 ≤ x ≤ 170	0,35264	- 2,9816	21,8586	- 81,3872	114,59

Tabel 3. Coëfficiënten c_n in vgl. (7).

x cm	P/P _t	A(x)/A ₁ [*]	P/P _t	A(x)/A _m [*]	A _m [*] /A ₁ [*]	Δ %
	lege tunnel		met model			
20	0,7378	1,1148	0,7449	1,1243	0,9915	-0,04
30	0,7374	1,1143	0,7445	1,1237	0,9916	-0,03
40	0,7368	1,1135	0,7440	1,1231	0,9915	-0,04
50	0,7359	1,1124	0,7434	1,1222	0,9912	-0,07
60	0,7343	1,1103	0,7420	1,1204	0,9910	-0,09
70	0,7334	1,1092	0,7413	1,1194	0,9909	-0,10
80	0,7327	1,1083	0,7405	1,1183	0,9910	-0,09
90	0,7320	1,1074	0,7398	1,1174	0,9911	-0,08
100	0,7313	1,1066	0,7391	1,1165	0,9911	-0,08
110	0,7306	1,1057	0,7384	1,1156	0,9912	-0,07
120	0,7303	1,1054	0,7378	1,1148	0,9916	-0,03
130	0,7276	1,1021	0,7350	1,1112	0,9918	-0,01
140	0,7247	1,0987	0,7322	1,1077	0,9919	0
150	0,7217	1,0952	0,7293	1,1041	0,9919	0
160	0,7187	1,0919	0,7263	1,1006	0,9921	+0,02
170	0,7158	1,0887	0,7239	1,0978	0,9917	-0,02

$$\left(\frac{A_m^*}{A_1^*} \right)_{\text{gem}}$$

Tabel 4a. Afwijking Δ van de berekende chokedoorsnede t.g.v. invloed model

$$\Delta = \left\{ \frac{A_m^*}{A_1^*} - \left(\frac{A_m^*}{A_1^*} \right)_{\text{gem}} \right\} \left(\frac{A_1^*}{A_m^*} \right)_{\text{gem}}$$

chokestand s = 225,5

x cm	p/p_t	$A(x)/A_1^*$	p/p_t	$A(x)/A_m^*$	A_m^*/A_1^*	$\Delta \%$
	lege tunnel		met model			
20	0,7013	1,0740	0,7179	1,0910	0,9844	-0,10
30	0,7006	1,0733	0,7171	1,0901	0,9846	-0,08
40	0,6996	1,0723	0,7163	0,0893	0,9844	-0,10
50	0,6981	1,0709	0,7155	1,0884	0,9840	-0,14
60	0,6965	1,0694	0,7145	1,0876	0,9837	-0,17
70	0,6947	1,0678	0,7133	1,0860	0,9832	-0,22
80	0,6931	1,0664	0,7124	1,0851	0,9828	-0,26
90	0,6921	1,0655	0,7115	1,0842	0,9828	-0,26
100	0,6915	1,0650	0,7106	1,0833	0,9831	-0,20
110	0,6909	1,0644	0,7098	1,0823	0,9834	-0,20
120	0,6900	1,0638	0,7087	1,0814	0,9837	-0,17
130	0,6871	1,0612	0,7052	1,0777	0,9846	-0,08
140	0,6840	1,0585	0,7018	1,0744	0,9852	-0,02
150	0,6803	1,0556	0,6984	1,0712	0,9854	0
160	0,6762	1,0524	0,6950	1,0681	0,9853	-0,01
170	0,6726	1,0496	0,6916	1,0650	0,9855	+0,01

Tabel 4b. Vervolg: s = 236.

x cm	p/p_t	$A(x)/A_1^*$	p/p_t	$A(x)/A_m^*$	A_m^*/A_1^*	$\Delta \%$
	lege tunnel		met model			
20	0,6668	1,0454	0,6970	1,0699	0,9771	-0,15
30	0,6661	1,0449	0,6971	1,0700	0,9766	-0,20
40	0,6649	1,0441	0,6964	1,0693	0,9764	-0,22
50	0,6630	1,0428	0,6955	1,0685	0,9759	-0,28
60	0,6604	1,0411	0,6945	1,0676	0,9751	-0,36
70	0,6583	1,0397	0,6936	1,0668	0,9746	-0,41
80	0,6563	1,0384	0,6923	1,0656	0,9744	-0,43
90	0,6552	1,0377	0,6915	1,0649	0,9744	-0,43
100	0,6549	1,0375	0,6904	1,0640	0,9751	-0,36
110	0,6552	1,0377	0,6890	1,0628	0,9764	-0,22
120	0,6549	1,0375	0,6872	1,0612	0,9776	-0,10
130	0,6511	1,0352	0,6831	1,0578	0,9786	0
140	0,6460	1,0321	0,6791	1,0546	0,9787	+0,01
150	0,6404	1,0290	0,6750	1,0514	0,9787	+0,01
160	0,6347	1,0260	0,6710	1,0485	0,9786	0
170	0,6288	1,0231	0,6670	1,0456	0,9785	-0,01

Tabel 4c. Vervolg: s = 245.

x cm	p/p_t	$A(x)/A_1^*$	p/p_t	$A(x)/A_m^*$	A_m^*/A_1^*	$\Delta \%$
	lege tunnel		met model			
20	0,6438	1,0309	0,6906	1,0642	0,9687	-0,25
30	0,6429	1,0304	0,6907	1,0642	0,9682	-0,30
40	0,6412	1,0295	0,6904	1,0640	0,9675	-0,37
50	0,6388	1,0282	0,6898	1,0635	0,9668	-0,44
60	0,6358	1,0266	0,6891	1,0629	0,9659	-0,54
70	0,6326	1,0250	0,6883	1,0622	0,9650	-0,63
80	0,6301	1,0237	0,6876	1,0616	0,9643	-0,70
90	0,6289	1,0232	0,6865	1,0606	0,9647	-0,66
100	0,6289	1,0232	0,6852	1,0596	0,9656	-0,57
110	0,6298	1,0236	0,6829	1,0577	0,9678	-0,34
120	0,6302	1,0238	0,6804	1,0556	0,9698	-0,13
130	0,6249	1,0213	0,6759	1,0519	0,9709	-0,02
140	0,6185	1,0185	0,6716	1,0489	0,9710	-0,01
150	0,6112	1,0155	0,6673	1,0458	0,9711	0
160	0,6034	1,0127	0,6630	1,0428	0,9711	0
170	0,5953	1,0100	0,6587	1,0399	0,9712	+0,01

Tabel 4d. Vervolg: s = 250.

x cm	p/p_t	$A(x)/A_1^*$	p/p_t	$A(x)/A_m^*$	A_m^*/A_1^*	$\Delta \%$
	lege tunnel		met model			
20	0,6262	1,0219	0,6909	1,0644	0,9600	-0,37
30	0,6249	1,0213	0,6913	1,0648	0,9592	-0,46
40	0,6227	1,0203	0,6911	1,0646	0,9581	-0,57
50	0,6196	1,0189	0,6907	1,0642	0,9574	-0,64
60	0,6157	1,0173	0,6903	1,0639	0,9562	-0,77
70	0,6123	1,0159	0,6898	1,0635	0,9553	-0,86
80	0,6091	1,0147	0,6891	1,0629	0,9547	-0,92
90	0,6075	1,0141	0,6880	1,0619	0,9550	-0,89
100	0,6079	1,0143	0,6863	1,0605	0,9564	-0,75
110	0,6094	1,0148	0,6838	1,0584	0,9588	-0,50
120	0,6097	1,0150	0,6804	1,0556	0,9615	-0,22
130	0,6039	1,0128	0,6763	1,0524	0,9624	-0,12
140	0,5959	1,0102	0,6716	1,0489	0,9631	-0,05
150	0,5863	1,0075	0,6669	1,0455	0,9636	0
160	0,5750	1,0048	0,6632	1,0429	0,9635	-0,01
170	0,5617	1,0024	0,6591	1,0402	0,9637	+0,01

Tabel 4e. Vervolg: s = 254.

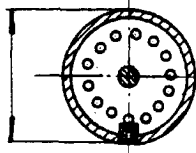
s	p/p_t x = 0	M(0)	p/p_t			
			x = 140 cm	x = 150 cm	x = 160 cm	x = 170 cm
225,5	0,7378	0,6736	0,7247	0,7217	0,7187	0,7158
231	0,7169	0,7063	0,7016	0,6979	0,6946	0,6920
236	0,7019	0,7295	0,6840	0,6803	0,6762	0,6726
245	0,6666	0,7838	0,6460	0,6404	0,6347	0,6288
250	0,6440	0,8184	0,6185	0,6112	0,6034	0,5953
254	0,6263	0,8457	0,5959	0,5863	0,5750	0,5617

Tabel 5. Referentiedrukken p/p_t voor x-posities ver stroomopwaarts van de meetplaats als functie van het getal van Mach M(0).

x cm	d_0	d_1	d_2
140	-0,01462	1,51133	-0,92802
150	-0,01933	1,52681	-1,28014
160	-0,02424	1,55230	-1,66353
170	-0,02914	1,59141	-2,08637

Tabel 6. Coëfficiënten d_n in vgl. (8).

18 mm



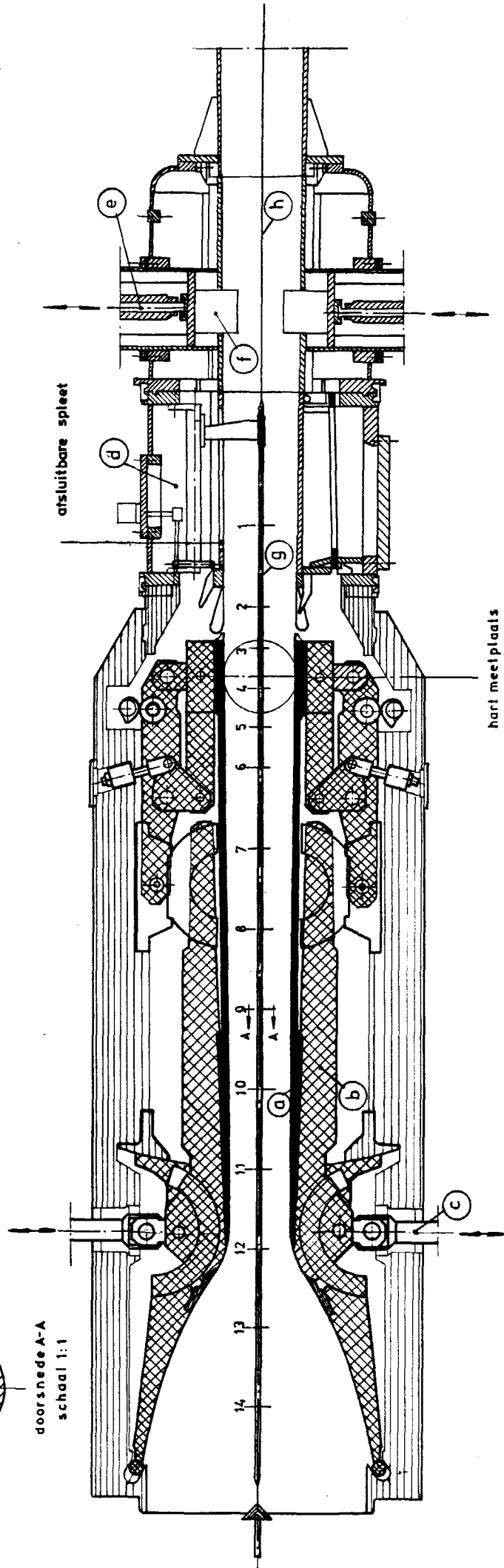
onderlinge afstand drukgaatjes

1 - 2 en 6 t/m 14; 30 cm

2 t/m 6 ; 15 cm

doorsnede A-A
schaal 1:1

schaal 0 0.5 1m



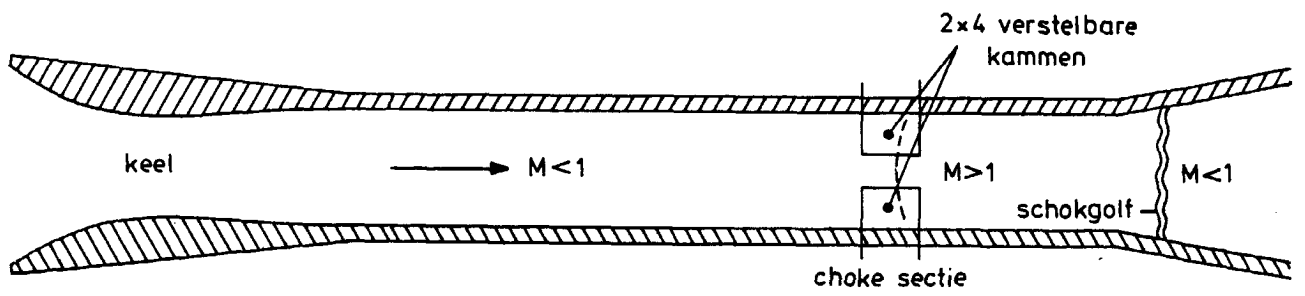
afsluitbare spleet

harl meelplaats
X = 0

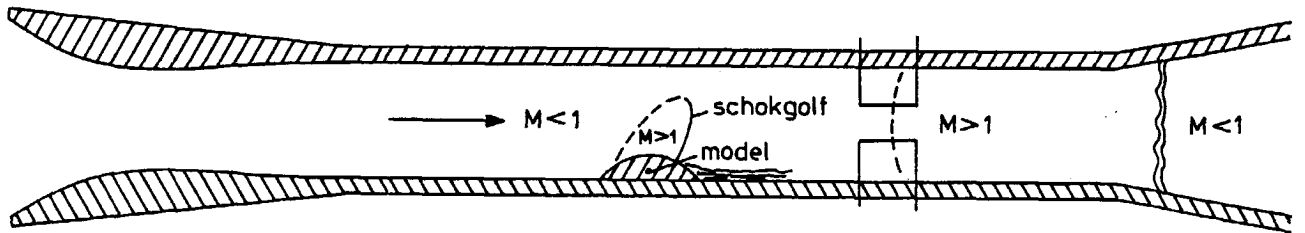
- a. Flexibele plaat
- b. Keelblok
- c. Verstelmechanisme keelblok
- d. Verstelmechanisme buis
- e. Verstelmechanisme choke sectie
- f. Kammen
- g. Axiale statische buis
- h. Spandraad

Fig. 1: Schema van tunnelkanaal TST 27 met axiale statische buis

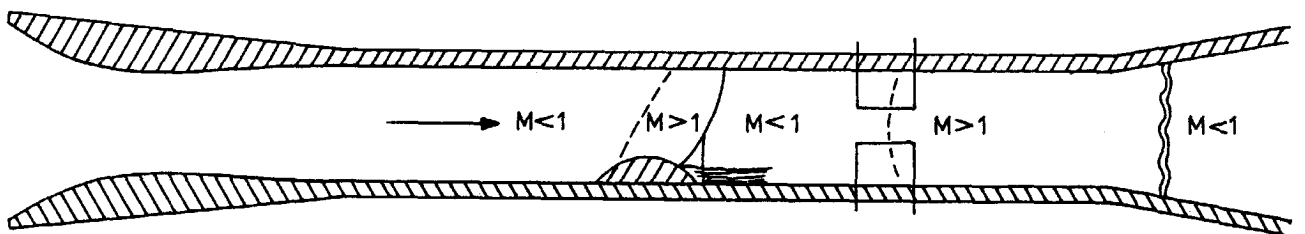
Meetplaats H x B = 25,3 cm x 28 cm



a) stroming zonder model.



b) met model en lokaal superson gebied.



c) met model en lokaal superson gebied tot tegenoverliggende wand (geblokkeerde tunnel)

Fig. 2: Transsone stroming in een supersone windtunnel.

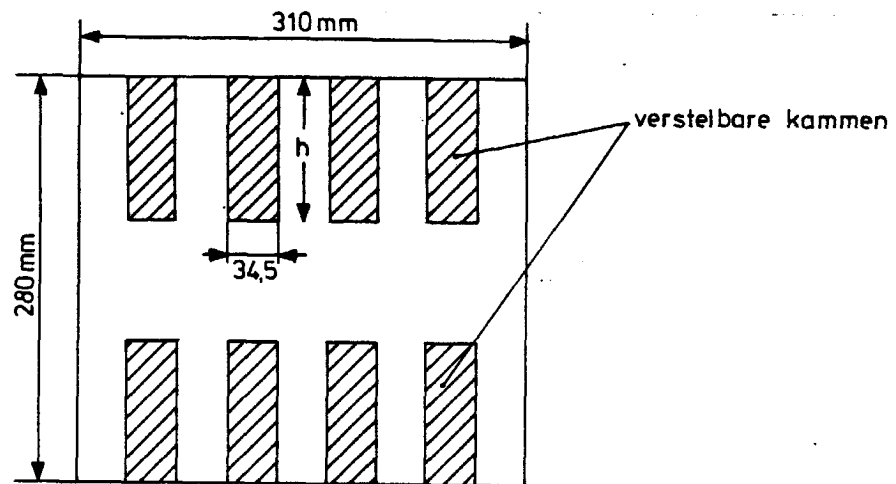


Fig. 3 : Schematische voorstelling van de doorsnede van de choke sectie.

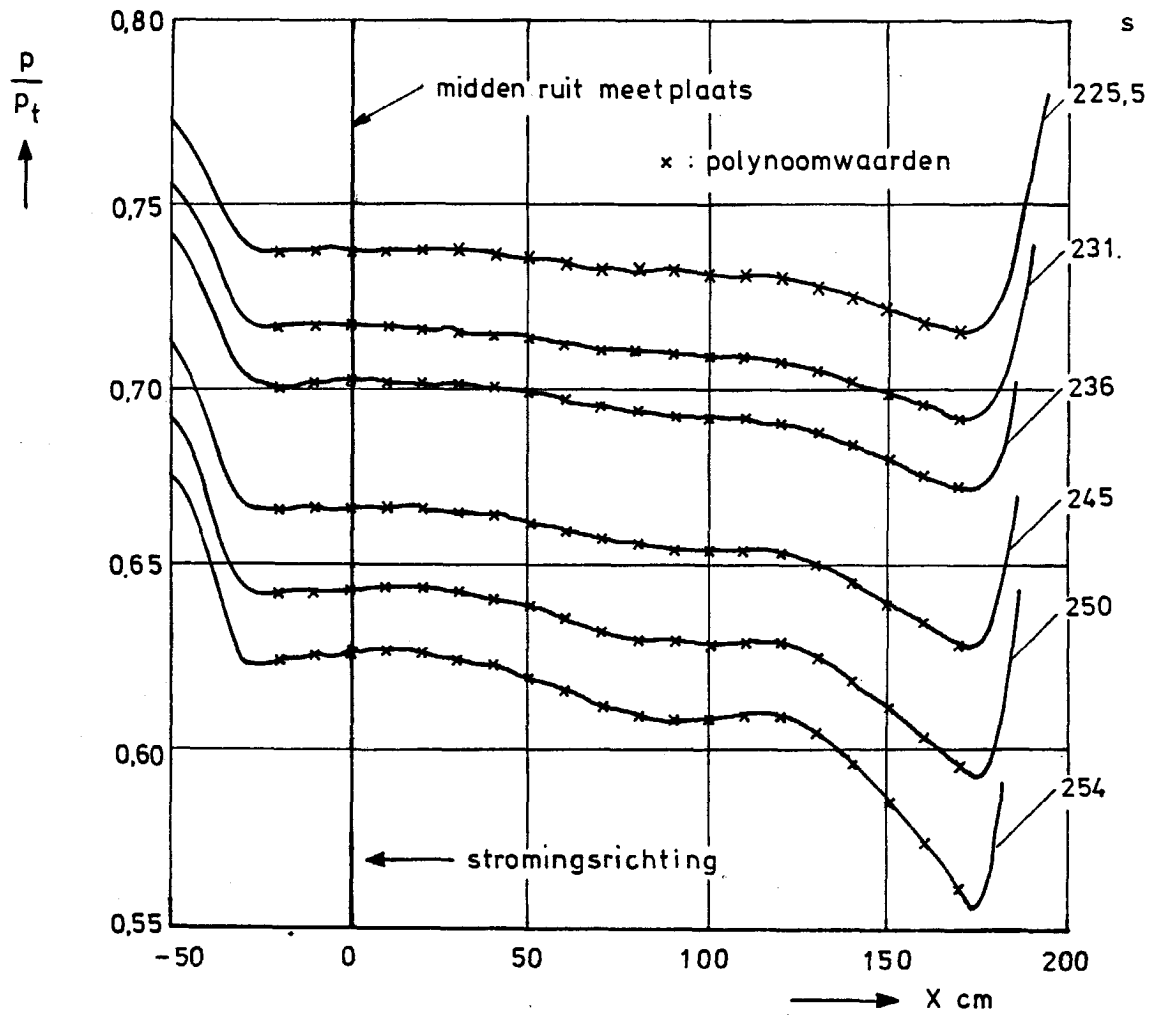


Fig. 4: Drukverdeling langs tunnelas voor verschillende chokestanden (lege tunnel)

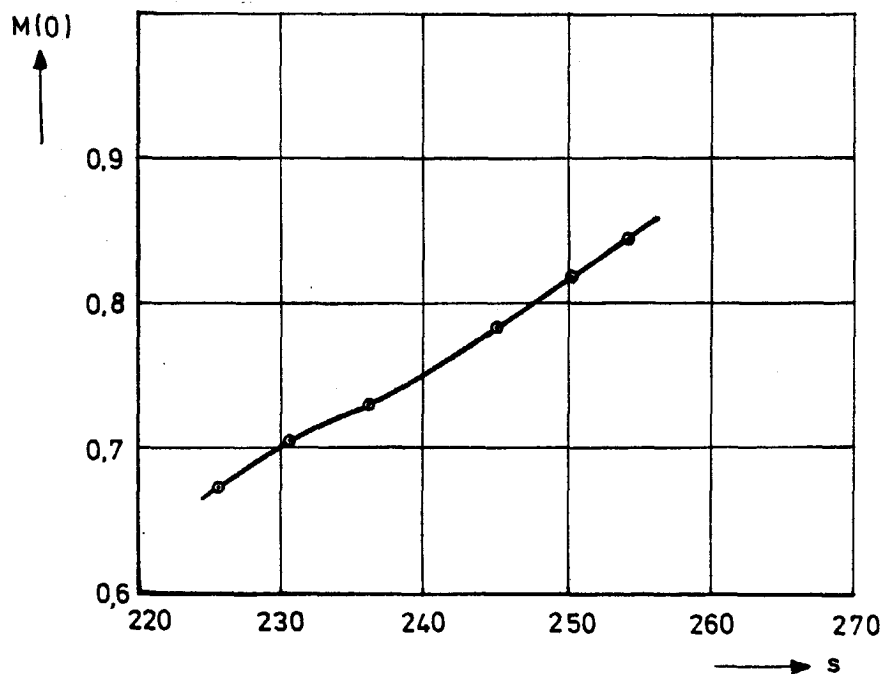


Fig. 5: Getal van Mach in $X=0$ als functie van de chokestand.

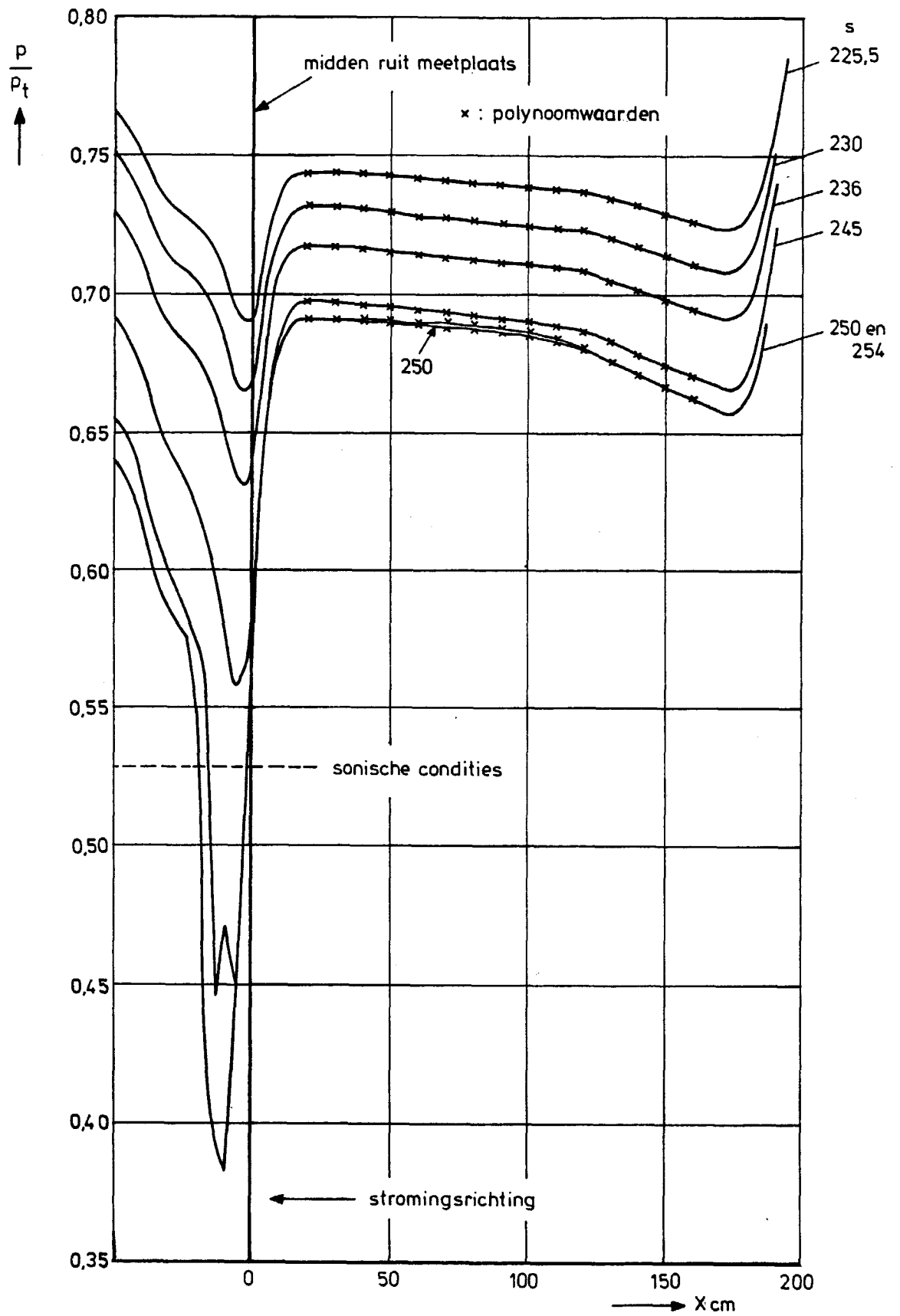


Fig. 6 : Drukverdeling langs tunnelas voor verschillende chokestanden.
 (met cirkelboog model : $-5 \text{ cm} \leq X \leq 5 \text{ cm}$)

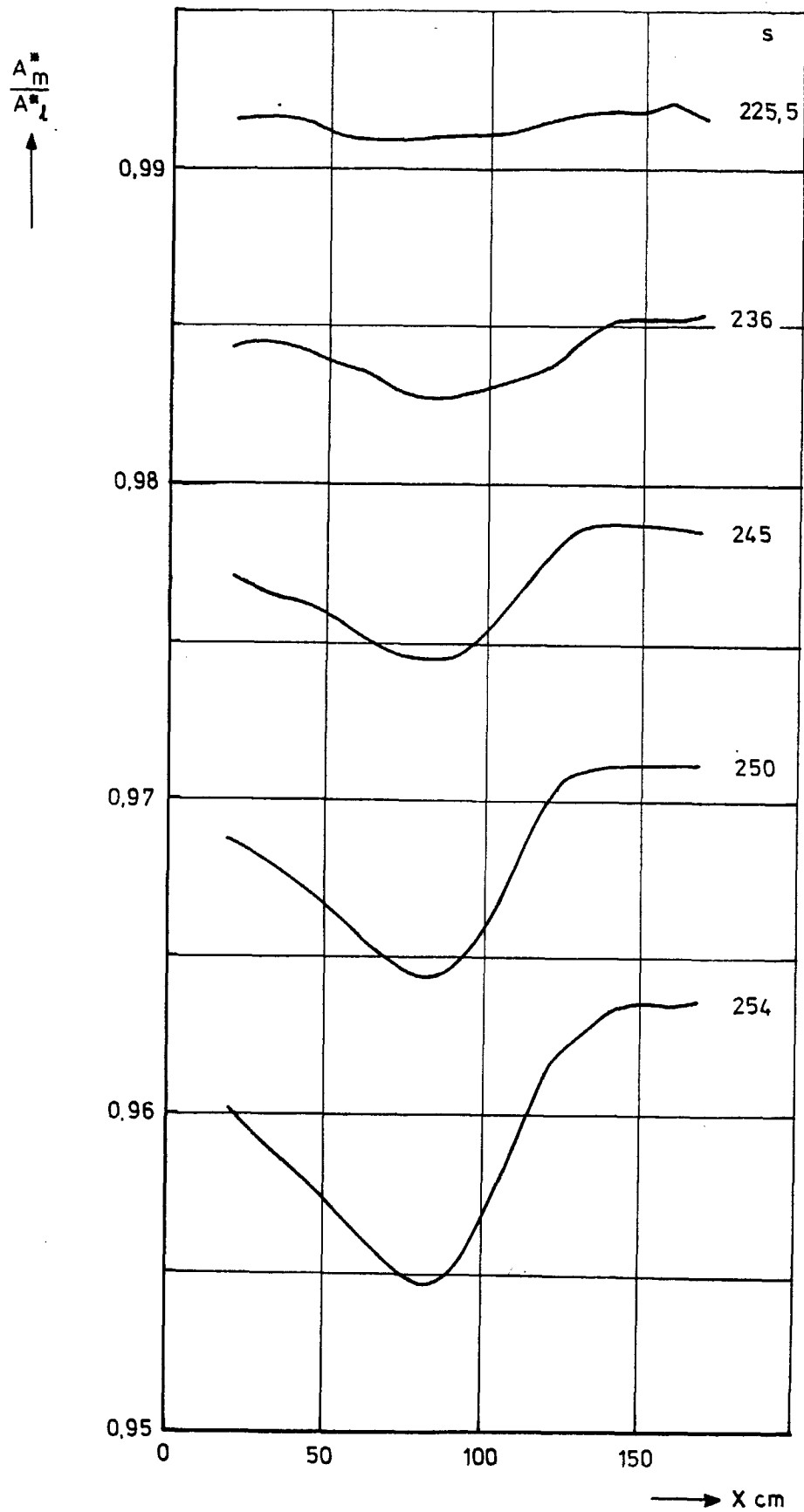


Fig. 7 : Verhouding van kritische doorsneden met en zonder model, berekend volgens de gemeten drukverdeling.

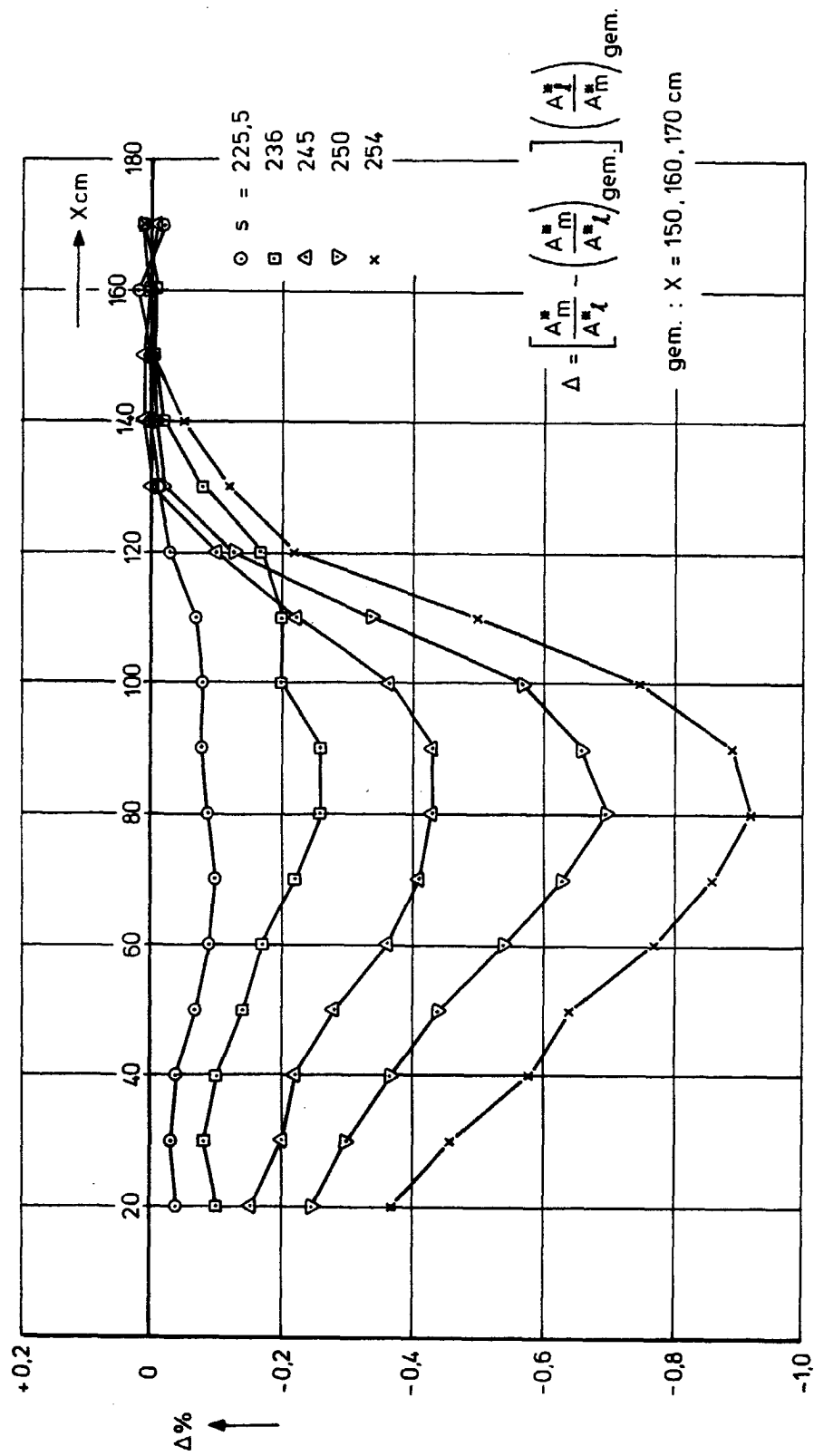


Fig. 8 : Afwijking van de volgens de gemeten drukverdeling berekende kritische doorsnede door de invloed van het model.

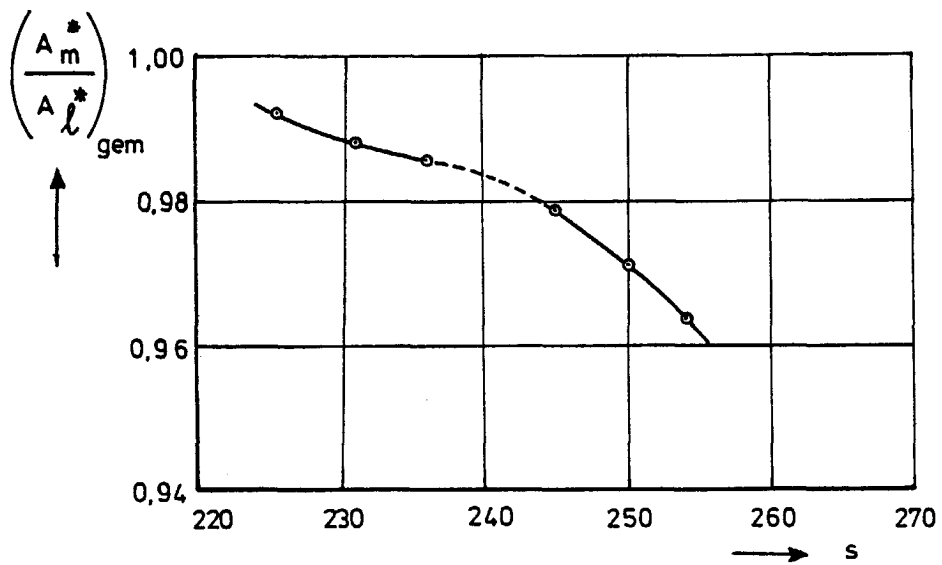


Fig. 9: Verhouding van kritische doorsnede met en zonder model berekend uit de gemiddelde gemeten drukken ver vóór de meetplaats ($X=150, 160, 170$ cm)

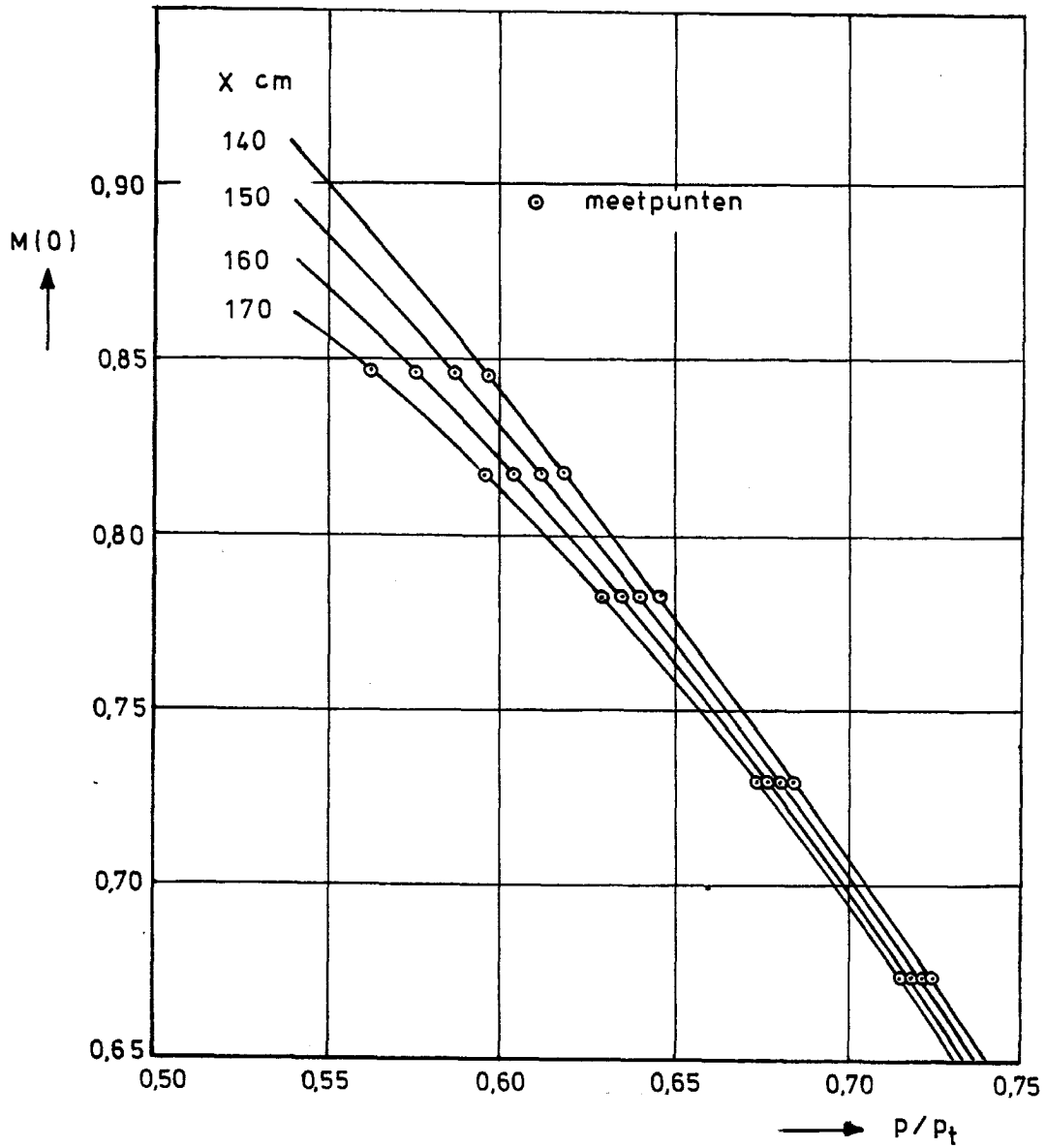


Fig. 10: Getal van Mach in de meetplaats ($X=0$) als functie van de referentie drukverhouding ver vóór de meetplaats

Memorandum 324



60142011073