

V.T.H. rapport 36

Handleiding voor het ijken van
stijgsnelheidsmeters

Technische Hogeschool
Vliegtuigbouwkunde

Delft

Rapport 36

Handleiding voor het ijken van stijgsnelheidsmeters

Inhoud	blz.
1. Inleiding	1
2. Notaties	1
3. Principe van de stijgsnelheidsmeter	2
4. Het verband tussen de stijgsnelheid en de snelheid waar- mede de statische druk in de atmosfeer verandert	2
5. Typen van stijgsnelheidsmeters	2
6. De stijgsnelheidsmeterijkinstallatie	4
7. De ijking van de stijgsnelheidsmeterijkinstallatie en van de te ijken instrumenten	6
8. De aan stijgsnelheidsmeters te stellen eisen en ijkvoor- schriften	7
9. Bepaling van de traagheid van stijgsnelheidsmeters	8
10. Opdracht	8
11. Literatuurlijst	9

September 1951.

D.v.d.G.

1. Inleiding

De stijgsnelheidsmeter (variometer) wordt gebruikt om stijg- of daalsnelheden van vliegtuigen te meten. Bij vliegen in het algemeen, en in het bijzonder voor het blind- en zweefvliegen, is het van belang deze snelheid van het vliegtuig min of meer nauwkeurig te kennen, terwijl dit tevens het geval kan zijn voor vliegproeven.

2. Notaties

g	versnelling van de zwaartekracht
H	volume van de lucht die per seconde door de capillair stroomt
h	hoogte in de atmosfeer
l	lengte van de capillair
m	massa van de lucht in het reservoir (capaciteit)
P	druk van de lucht in de atmosfeer
P'	druk in het reservoir (capaciteit)
p	$P' - P$ (P' betrokken op het reservoir van de stijgsnelheidsmeter)
p'	$P' - P$ (P' betrokken op het reservoir van de ijkinstallatie)
R	gasconstante, betrokken op de eenheid van massa
r	diameter van de capillair
S	$\frac{l}{P} \frac{dP}{dt}$
T	temperatuur van de lucht in de atmosfeer
T_y	temperatuur waarbij geijkt wordt
T_s	temperatuur, welke volgens de standaardatmosfeer behoort bij de druk waarbij gemeten wordt
V	volume van het reservoir van de stijgsnelheidsmeter
V'	volume van het reservoir van de ijkinstallatie
w	stijgsnelheid
w_s	stijgsnelheid welke gemeten wordt indien de atmosfeer overeenkomt met de standaardatmosfeer
W	weerstand van de capillair, tuit o.d. van een stijgsnelheidsmeter
W_{15}	waarde van W bij 15° C
W'	weerstand van de capillair van de ijkinstallatie
W'_{15}	waarde van W' bij 15° C
α	traagheidsconstante, zie formule 22
β	ijkfactor, zie formule 22
η	dynamische viscositeit van de lucht
ρ	dichtheid van de lucht in de atmosfeer
ρ'	dichtheid van de lucht in capillair en reservoir (Bij de berekeningen kan van deze dichtheid worden verondersteld, dat zij overal dezelfde waarde heeft)

3. Principe van de stijgsnelheidsmeter

De heden ten dage in gebruik zijnde stijgsnelheidsmeters berusten alle op hetzelfde principe. Zij bestaan uit een reservoir (capaciteit), dat via een nauwe opening (bij voorbeeld een spleet of capillair) met de buitenlucht is verbonden. Tijdens stijgen of dalen zal de druk van de buitenlucht veranderen en een drukverval over de verbinding van het reservoir met de buitenlucht ontstaan, dat weer verdwijnt, zodra enige tijd op constante (druk)hoogte wordt gevlogen. Het verschil tussen de druk in het reservoir en de druk van de buitenlucht (statische druk) wordt nu gebruikt als maat voor de stijg- of daalsnelheid.

4. Het verband tussen de stijgsnelheid en de snelheid waarmee de statische druk van de atmosfeer verandert.

Zolang geen verticale luchtstromingen in de atmosfeer optreden geldt de betrekking $dP = - \rho g dh$ (1)

waarin P , ρ , g en h resp. de statische druk, de luchtdichtheid, de versnelling van de zwaartekracht en de hoogte ter plaatse voorstellen.

Uit de formule $P = \rho RT$ (2)

waarin T de absolute temperatuur voorstelt en R de gasconstante, betrokken op de eenheid van massa, en formule (1) volgt voor de stijgsnelheid

$$w = \frac{dh}{dt} :$$
$$w = - \frac{RT}{g} \frac{1}{P} \frac{dP}{dt} = - \frac{RT}{g} S \quad (3)$$

waarin $S (= \frac{1}{P} \frac{dP}{dt})$ de relatieve snelheid is, waarmee de statische druk verandert. Het drukverval over de verbinding van het reservoir van een stijgsnelheidsmeter met de buitenlucht is afhankelijk van de snelheid waarmee de statische druk verandert en kan dus gebruikt worden als maat voor de stijgsnelheid.

5. Typen van stijgsnelheidsmeters

a. De stuwschijfvariometer (zie fig.1)

De stuwschijfvariometer bestaat uit een ronde trommel, waarin een stuwschijf draaibaar is bevestigd. De stuwschijf wordt naar zijn middenstand getrokken door een veer. De ruimte aan de ene zijde van de schijf staat in verbinding met de buitenlucht, die aan de andere zijde met de capaciteit. Buitenlucht en capaciteit staan met elkaar in verbinding via de nauwe spleet die de stuwschijf aan de rand openlaat. De stand van de schijf is afhankelijk van het verschil tussen de druk van de buitenlucht en de druk in het reservoir en dus een maat voor de stijgsnelheid.

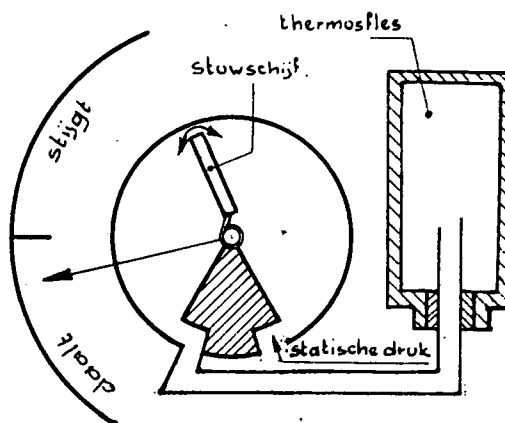


Fig.1 Stuwschijfvariometer.

Indien de omstandigheden tijdens de meting afwijken van die tijdens de ijking, dienen op de aanwijzing van het instrument correcties te worden aangebracht, welke voor dit type experimenteel moeten worden bepaald.

In zweefvliegtuigen wordt, terwille van zijn grote gevoeligheid en kleine traagheid, meestal van dit type stijgsnelheidsmeter gebruik gemaakt.

b. De membraanvariometer (zie fig. 2)

Bij de membraanvariometer wordt het verschil p tussen de druk van de buitenlucht en de druk in het reservoir met behulp van een membraandoos gemeten. De lucht in het reservoir staat in verbinding met de buitenlucht via een capillair, tuit of porceleinen prop. Een uitvoerige afleiding en bespreking van het verband tussen de aanwijzing van een stijgsnelheidsmeter en de stijgsnelheid wordt gegeven in lit. 1

Voor het geval dat gebruik wordt gemaakt van een capillair, waarin de luchtstroom een Poisseuille stroom is en waarbij wordt afgezien van de invloed van de instroomopening, geldt voor het volume van de lucht die per tijdseenheid door de capillair stroomt:

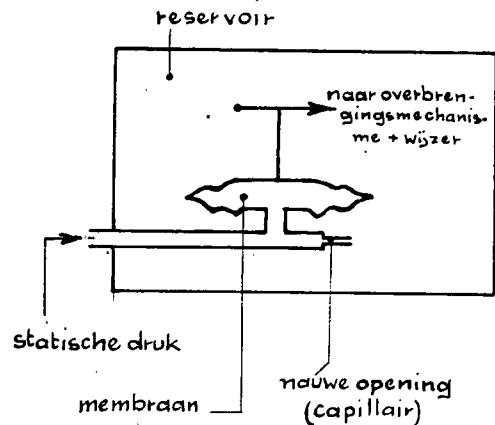


Fig. 2. Membraan variometer

$$H = - \frac{p}{W} \quad (4)$$

of

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m} = \frac{-\rho' p}{W} \quad (5)$$

Hierin is

$$m = \rho' V \quad \text{de massa van de lucht in het reservoir.} \quad (6)$$

Indien het volume van het reservoir en de temperatuur van de lucht in het reservoir niet veranderen, geldt:

$$\frac{\dot{m}}{m} = \frac{\dot{P}'}{P'} \quad (7)$$

Tenslotte geldt nog:

$$P' = P + p \quad (8)$$

Aangezien steeds

$$P = p \quad (9)$$

zal zijn, volgt uit (5), met behulp van (6) t/m (9):

$$p + W V S + \frac{WV}{P} \dot{p} = 0 \quad (10)$$

In stationnaire toestand ($\dot{p} = 0$) geldt dus:

$$p = -W V S \quad (11)$$

Het verband tussen de aanwijzing van het instrument (p) en de stijgsnelheid (w) volgt uit de formules (11) en (5):

$$p = \frac{WV}{RT} g w \quad (12)$$

Dit verband is dus in de eerste plaats afhankelijk van de temperatuur T van de buitenlucht. Compensatie geschiedt door uit te gaan van een vast verband tussen deze temperatuur en de statische druk P in de atmosfeer (standaardatmosfeer). Met behulp van een membraandoos, welke de druk P opneemt, wordt dan b.v. de lengte van de capillair zodanig beïnvloed, dat de verhouding $\frac{W}{T}$ constant is indien de werkelijke atmosfeer overeenkomt met T de standaardatmosfeer. Ook wordt vaak gebruik gemaakt van een tuit, welke parallel aan of in serie met de capillair wordt geschakeld. Door een juiste dimensionering van de tuit kan worden bereikt, dat de combinatie van capillair en tuit een verband tussen stijgsnelheid en aanwijzing geeft, dat vrijwel onafhankelijk is van de hoogte in de standaardatmosfeer.

Indien de werkelijke temperatuur T afwijkt van de temperatuur T_s , welke volgens de standaardatmosfeer behoort bij de druk P waarbij gemeten wordt, dan dient nog een correctie te worden aangebracht op de aanwijzing van het instrument en wel:

$$\Delta w = \frac{\Delta T}{T_s} w_s \quad (13)$$

waarin $\Delta T (= T - T_s)$ de afwijking van de temperatuur is en w_s de aangewezen stijgsnelheid.

De weerstand W van de capillair is afhankelijk van de viscositeit van de lucht en dus afhankelijk van de temperatuur van de lucht in de capillair. Voor verandering van deze temperatuur, welke vrijwel overeenkomt met de instrumentale temperatuur, wordt veelal gecorrigeerd door middel van een bimetalen strip, welke de opening van de capillair min of meer afsluit.

De laatste term van formule (10), $\frac{WV}{P} p$, kan worden opgevat als een traagheid. Deze traagheid hangt van W en V af, dus van de dimensionering van de stijgsnelheidsmeter, van de instrumentale temperatuur (invloed op W) en van de druk P .

Toenemen of afnemen van de instrumentale temperatuur geeft in eerste instantie ook een aanwijzing van het instrument, aangezien de druk van de lucht in het reservoir zal veranderen. Teneinde temperatuurvariaties van de lucht in het vat te voorkomen of althans zeer langzaam te doen plaats vinden, wordt het reservoir wel als vat van Dewar (thermosfles) uitgevoerd. Ook wordt wel gebruik gemaakt van houtskool (met water en alcohol), dat de eigenschap heeft grote hoeveelheden lucht af te geven of op te nemen, naar gelang de temperatuur stijgt of daalt (lit.2)

6. De stijgsnelheidsmeterijkinstallatie

Met behulp van de stijgsnelheidsmeterijkinstallatie moet het verband kunnen worden bepaald tussen de stijgsnelheid en de aanwijzing van een stijgsnelheidsmeter. Voor een schets van de stijgsnelheidsmeterijkinstallatie wordt verwezen naar fig.3, blz. 9. De installatie bestaat uit een vat, waaruit de lucht met behulp van een pomp kan worden weggezogen. Aan het vat zijn capillairen aangesloten, via welke de lucht in het vat met de lucht in een reservoir (capaciteit) in verbinding staat. Dit reservoir is gevuld met koperspons (55g/liter) teneinde een zoveel mogelijk isotherme toestandsverandering te verkrijgen (lit.3)

De werking van de ijkinstallatie komt in principe geheel overeen met die van de membraanvariometer. Voor de meting van het drukverschil over de capillair(en) wordt gebruik gemaakt van een differentiaaldrukmeter met een meetgebied van - 25 mm tot + 25 mm water. Teneinde het meetgebied te kunnen variëren zijn de capillairen uitwisselbaar gemaakt. In onderstaande tabel volgt een overzicht van de aanwezige capillairen.

Capillair no.	Lengte (mm)	inwendige diameter (mm)	meetgebied bij een max. drukverschil van 25 mm H ₂ O (m/sec)		
1	160	1,145	- 18	-	+ 18
2	190	1,264	- 22	-	+ 22
3	220	0,959	- 6	-	+ 6
4	220	1,661	- 45	-	+ 45
5	140	0,986	- 9	-	+ 9

Met behulp van de regelkranen kan een bepaalde snelheid van drukverandering worden ingesteld, welke dus overeenkomt met een bepaalde stijgsnelheid. Het verband tussen het drukverschil over de capillair(en) en de snelheid van drukverandering in het vat is voor een stationnaire toestand:

$$p' = - W'V' \frac{1}{P} \frac{dP}{dt} = - W'V'S \quad (14)$$

waarin:

$$W' = \frac{8\eta l}{\pi r^4} \quad (15)$$

Bij kamertemperatuur is η bij benadering evenredig met de temperatuur, zodat voor W kan worden geschreven:

$$W' = W'_{15} \cdot \frac{T_y}{288} \quad (16)$$

en dus voor p' :

$$p' = - W'_{15} V' \frac{T_y}{288} S \quad (17)$$

Met behulp van (3) en (17) wordt het verband tussen de stijgsnelheid in de standaardatmosfeer en de aanwijzing van de differentiaaldrukmeter:

$$p' = W'_{15} V' \frac{T_y}{288} \frac{g}{RT_s} w_s \quad (18)$$

Op dit verband, dat afhankelijk van T en dus van de hoogte (druk) in de standaardatmosfeer is, wordt de ijkinstallatie geijkt.

Uit (11) en (17) volgt het verband tussen de aanwijzing van de differentiaaldrukmeter van de ijkinstallatie en het drukverschil over de capillair van een in het vat van de ijkinstallatie opgestelde stijgsnelheidsmeter :

$$p' = \frac{W'_{15}}{WV} V' \frac{T_y}{288} p \quad (19)$$

Indien de stijgsnelheidsmeter is gecompenseerd voor veranderingen van de hoogte in de standaardatmosfeer en de instrumentale temperatuur geldt voor W :

$$W = W_{15} \frac{T_s}{288} \quad (20)$$

en dus:

$$p' = \frac{W'_{15}}{W_{15}} \frac{V'}{V} \frac{T_y}{T_s} p \quad (21)$$

Door na te gaan hoe het verband tussen p' en p van de druk in het vat van de ijkinstallatie afhangt, kan worden vastgesteld of de stijgsnelheidsmeter gecompenseerd is voor de hoogte in de standaardatmosfeer.

7. De ijking van de stijgsnelheidsmeterijkinstallatie en van de te ijken instrumenten

In principe is het mogelijk voor de diverse capillairen het verband te berekenen tussen de met een bepaalde stijgsnelheid overeenkomende afname van de druk in het vat en de aanwijzing van de differentiaaldrukmeter. Eenvoudiger is het echter dit verband te bepalen met behulp van een precisiehoogtemeter en een tijdmeter. De hoogtemeter wordt in het vat opgesteld en de aanwijzing van de differentiaaldrukmeter wordt met behulp van de regelkranen op een bepaalde waarde ingesteld en gehouden. Vervolgens wordt met behulp van een stophorloge of een chronograaf de tijd gemeten, welke nodig is om de hoogtemeter een bepaald hoogteverschil te doen doorlopen. Hieruit kan de stijgsnelheid worden berekend, welke bij deze aanwijzing van de differentiaaldrukmeter behoort. De ijking is echter afhankelijk van de drukhoogte in het vat en van de instrumentale temperatuur van de ijkinstallatie. Het resultaat van de ijkingen is bij de ijkinstallatie aanwezig.

De te ijken instrumenten worden in het vat opgesteld, tezamen met een hoogtemeter. In het algemeen wordt die capillair van de ijkinstallatie gebruikt, waarvan het meetgebied het best overeenkomt met het meetgebied van de te ijken instrumenten. Nadat de pomp is aangezet kan met behulp van de regelkranen het drukverschil op de differentiaaldrukmeter worden ingesteld, dat overeenkomt met de stijgsnelheid, waarbij moet worden geijkt. Dit drukverschil, dat afhankelijk is van de hoogte waarbij moet worden geijkt en van de instrumentale temperatuur (T_y), is voor verschillende stijgsnelheden, hoogten en temperaturen, gegeven in tabellen, welke bij de ijkinstallatie aanwezig zijn. Normaal wordt geijkt bij drukken, welke overeenkomen met hoogten in de standaardatmosfeer tussen de 200 en de 2000 m. Hiervoor kan met voldoende nauwkeurigheid gebruik worden gemaakt van de gegevens, welke gelden voor 1000 m hoogte. De temperaturen waarvoor de gegevens gelden zijn zo gekozen, dat hiervoor niet hoeft te worden geïnterpoleerd, maar dat kan worden volstaan met die gegevens, welke behoren bij de temperatuur die het meest met de werkelijke temperatuur overeenkomt. Mocht het wenselijk zijn bij stijgsnelheden te ijken welke niet op de tabel voorkomen, dan kunnen de in te stellen drukverschillen direct door interpolatie worden gevonden.

Nadat de stationnaire toestand zich heeft ingesteld, kunnen de te ijken instrumenten worden afgelezen.

8. De aan stijgsnelheidsmeters te stellen eisen en ijkvoorschriften

Ijkvoorschriften voor en eisen te stellen aan bedrijfsinstrumenten worden gegeven in het N.L.L. rapport V 1594 en in de mededelingen van de Rijksluchtvaartdienst van September 1947. Het navolgende is hieraan ontleend.

In het algemeen wordt het instrument bij een temperatuur van ca. 15° C geijkt, met de wijzerplaat in verticale stand. Voor iedere aflezing moet het instrument aan een lichte trilling worden onderworpen, of er moet even licht tegen het instrument worden getikt. Bij drukmeters mag echter nooit tegen het glas worden getikt.

Voor het instrument aan een ijking wordt onderworpen, wordt nagegaan of het goed functioneert, door het zijn gehele meetgebied te laten doorlopen. De beweging van de wijzer mag bij regelmatige drukverandering geen onregelmatigheden vertonen.

Teneinde de dichtheid van het huis te beproeven, wordt aan de statische zijde van het instrument een druk teweeggebracht van ca 195 kg/m² (b.v. met behulp van de snelheidsmeterijkinstallatie; de druk komt dan overeen met een snelheid van 200 km/h), waarbij de wijzer niet meer dan 3/4 van het meetgebied mag aanwijzen. Indien een instrument is voorzien van een capaciteit, wordt deze aan het aanwijsinstrument aangesloten. Na het toevoegen van bovengenoemde druk wordt de verbinding met het instrument afgesloten. In deze toestand mag de aanwijzing niet meer bedragen dan 0,25 m/sec (50 ft/min).

Het instrument wordt geijkt bij stijgsnelheden welke in onderstaande tabel zijn aangegeven. De miswijzing mag daarbij niet groter zijn dan de in deze tabel gegeven waarden. De ijkingen moeten plaats vinden bij drukken overeenkomende met hoogten tussen 200 m en 2000 m in de standaardatmosfeer.

Waarden waarbij stijgsnelheidsmeters moeten worden geijkt, met de daarbij behorende maximaal toelaatbare miswijzingen.

Stijg- of daalsnelheid in		Toegestane miswijzing bij heenijking in		Toelaatbaar verschil tussen heen- en terugijking in	
m/sec	ft/min	m/sec	ft/min	m/sec	ft/min
0	0	0,2	40	0,1	20
2,5	500	0,3	60		
5,0	1000	0,3	60	0,2	30
10,0	2000	0,5	100	0,2	30
15,0	3000	0,7	140		

Stijgsnelheidsmeters met een meetgebied kleiner dan van -15m/sec tot +15m/sec (-3000 ft/min tot +3000 ft/min) moeten bij de terugijking in twee punten ongeveer in het midden van het meetgebied worden geijkt. Voor de toleranties gelden dezelfde waarden als in bovenstaande tabel.

9. Bepaling van de traagheid van stijgsnelheidsmeters

De aanwijzing van de stijgsnelheidsmeter wordt in eerste instantie beheerst door de formule

$$\alpha p = -\beta w + p = 0 \quad (22)$$

(Vergelijk formule 10))

De factor β wordt bij het ijken bepaald. Is α , de parameter die de traagheid beheerst, bekend, dan kan in elk willekeurig geval de stijgsnelheid w worden bepaald uit het verloop van p . α wordt bepaald door op de statische zijde van het instrument een overdruk, resp. onderdruk (ca 100 mm H₂O) aan te brengen. De over-, resp. onderdruk wordt dan plotseling weggenomen, ten gevolge waarvan de uitslag van de wijzer plotseling snel toeneemt om daarna weer af te nemen. Tijdens dit afnemen wordt de "0,1" tijd ($t_{0,1}$) gemeten. Dit is de tijd, die de wijzer nodig heeft om van een bepaalde stijg- of daalsnelheid tot het tiende deel daarvan terug te lopen.

Uit vergelijking (22) volgt:

$$p = \beta w + A e^{-t/\alpha} \quad (23)$$

waarin A een integratieconstante is. Zodra de stijgsnelheidsmeter weer met de constante druk van de buitenlucht is verbonden ($w=0$) geldt:

$$p = A e^{-t/\alpha} \quad (24)$$

Nu geldt voor de "0,1" tijd :

$$1/10 = e^{-t_{0,1}/\alpha} \quad (25)$$

en dus

$$\alpha = 0,43 t_{0,1} \quad (26)$$

Indien men afziet van de traagheid van de statische leiding, kan nu de stijgsnelheid w worden berekend.

10. Opdracht

1. Controleer een punt van de ijktabel van de door U te gebruiken capillair.
2. IJk een tweetal stijgsnelheidsmeters volgens de ijkvoorschriften.
3. Geef Uw oordeel over de door U geijkte stijgsnelheidsmeters, aan de hand van de aan stijgsnelheidsmeters te stellen eisen.
4. IJk de stijgsnelheidsmeters bij drukken welke overeenkomen met hoogten tussen in de standaardatmosfeer.
5. Ga na of de stijgsnelheidsmeters gecompenseerd zijn voor de hoogte in de standaardatmosfeer.
6. Schat de miswijzing van een stijgsnelheidsmeter na correctie voor de temperatuur in de standaardatmosfeer, indien de temperatuur van deze temperatuur afwijkt en wel voor een normale afwijking en voor een extreme afwijking.
7. Bepaal de traagheidsconstante van de door U geijkte stijgsnelheidsmeters.
8. Geef aan, hoe met behulp van de ijkfactor en de traagheidsconstante van de stijgsnelheidsmeter het verloop van de stijgsnelheid uit het verloop van de aanwijzing van het instrument kan worden bepaald.

11. Literatuurlijst

1. D.P.Johnson : Aircraft rate-of-climb indicators
NACA report nr. 666 1939
2. A.F.Werner : Aircraft instrument maintenance 1948
3. De stijgmeter. Aanwijzingen voor de constructie van een standaard-instrument voor de ijking van bedrijfsstijgmeters.
N.L.L. rapport V 1239 1940

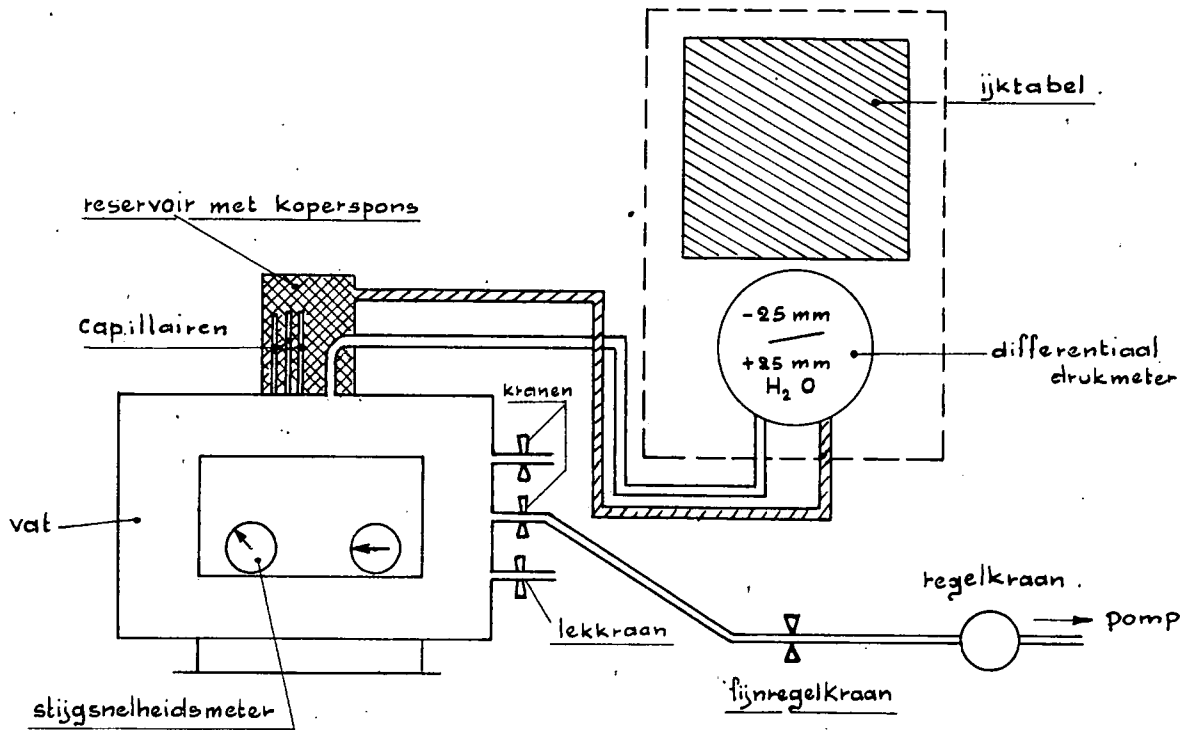


Fig. 3 . Stijgsnelheids meter ijkinstallatie .