

U.D.C. 697.922.2:697.9.003

OPTIMALE SNELHEDEN IN LUCHTKANALEN

ir. H.B. Bouwman

I N H O U D

1. INLEIDING
2. NADERE ANALYSE VAN HET PROBLEEM
 - 2.1. De benodigde transportenergie
 - 2.2. De kanaalwandkosten
 - 2.3. De kosten van warmte-of koudeverliezen door de kanaalwand
 - 2.4. De ruimtekosten
 - 2.5. De totale jaarkosten
3. DE BEREKENINGEN
 - 3.1. De invoergegevens
 - 3.2. De wijze van berekening
4. RESULTATEN
 - 4.0. Inleiding
 - 4.1. De invloed van de kWh-prijs
 - 4.2. De invloed van het ventilatoraggregaatrendement
 - 4.3. De invloed van het aantal bedrijfsuren per jaar
 - 4.4. De invloed van een hogere kanaalwrijvingscoëfficiënt
 - 4.5. De invloed van de kWh-prijs, het aantal bedrijfsuren t_b , het ventilatoraggregaatrendement η en de kanaalwrijvingscoëfficiënt λ_0
 - 4.6. De invloed van de kanaalprijs
 - 4.7. De invloed van warmte- of koudeverliezen
 - 4.8. De invloed van de ruimtekosten
 - 4.9. De invloed van de kanaalvorm
 - 4.10. De invloed van geluiddempende maatregelen
 - 4.11. De invloed van aftakkingen
 - 4.12. De invloed van de luchthoeveelheid, de kanaalkosten, de gebouwkosten en de warmte- of koudeverliezen
 - 4.13. De invloed van de amortisatie-percentages voor kanaalkosten en ruimtekosten

5. DE INVLOED VAN HET AANLEGGEN VAN EEN ANDER CRITERIUM
 6. DE INVLOED VAN DE KEUZE VAN EEN ANDERE SNELHEID DAN DE OPTIMALE SNELHEID
 7. VERGELIJKING VAN DE OPTIMALE SNELHEDEN MET DE SNELHEDEN IN DE HANDBOEKEN
 8. LITERATUUR
-

SAMENVATTING

Voor een luchtkanaal kan men de luchtsnelheid steeds zo kiezen dat de totale jaarkosten minimaal zijn. De grootte van deze optimale snelheid, het minimum van de totale jaarkosten en de bijbehorende kostenverdeling hangen af van een groot aantal parameters.

Getoond wordt welke de invloed is van deze parameters op de optimale snelheid, de jaarkosten en de kostenverdeling.

Voor een aantal parametercombinaties zijn de optimale snelheden, de totale kosten en de kostenverdeling in grafieken samengevat.

1. INLEIDING

Bij de dimensionering van luchtkanalen kan men op grond van praktijkwaarden en getallen uit de handboeken de snelheden kiezen.

Het is van belang om te weten welke snelheden economisch verantwoord zijn en wat de kostenconsequenties zijn bij een afwijkende snelheidskeuze.

Deze vraag is naar voren gekomen bij de bestudering van projecten met een bruto inhoud van meer dan 600.000 m^3 . Indien een dergelijk project gemiddeld drie maal per uur wordt geventileerd moeten er ca. 2 miljoen m^3/h lucht worden toegevoerd en afgevoerd. De investering voor dit systeem aan kanalen met de ervoor benodigde ruimte komt zeker in de orde van 10 miljoen gulden. Daarbij is te verwachten dat de energiekosten daarin een belangrijke rol zullen spelen.

Dat in het algemeen de kanalen een belangrijk aandeel van de installatie innemen moge ook blijken uit fig. 1 waarin grafisch een kostenopsplitsing is gemaakt. Van de post mechanische ventilatie zal ongeveer de helft uit de kanalenpost bestaan.

Het is duidelijk dat het voor dergelijke projecten van belang is om te weten op welke wijze de verschillende factoren de totale kosten en de kostenverdeling beïnvloeden. Zonder deze kennis is het niet mogelijk een goed en goedkoop ontwerp te maken. Van de verworven kennis kan ook bij de opzet van kleinere projecten worden geprofiteerd.

2. NADERE ANALYSE VAN HET PROBLEEM

Wij beschouwen alle kosten voor een bepaald luchttransport over een afstand van 1 meter. De uitkomsten voor een grotere afstand zijn daarmee evenredig.

2.1. De benodigde transportenergie

Wanneer men een bepaald luchttransport moet onderhouden, kan men dit doen met verschillende snelheden. Kiest men een bepaalde snelheid, dan ligt de vereiste netto doorsnede vast.

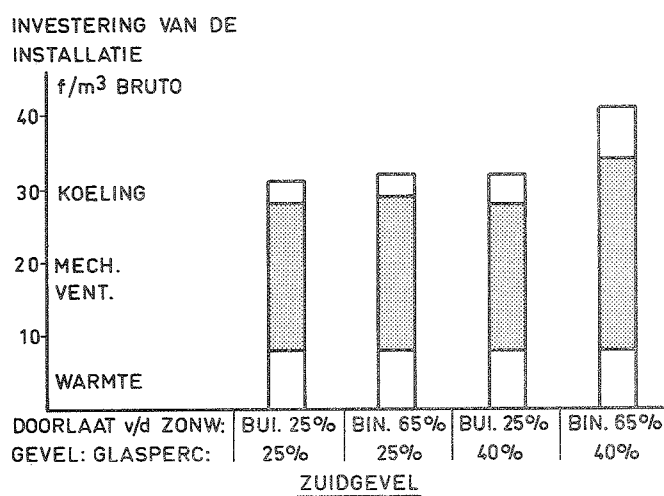


FIG.1

Als de kanaalvorm bekend is liggen daarmee tevens de kanaalafmetingen vast. De snelheid in het kanaal, de kanaalafmetingen en de kanaalruwheid bepalen de weerstand. De weerstand, het aantal bedrijfsuren per jaar, de kWh-prijs en het ventilatorrendement, inclusief dat van motor en overbrenging, bepalen de energiekosten per jaar voor het luchttransport.

2.2. De kanaalwandkosten

Bij een bepaald luchttransport, een gekozen snelheid en een gekozen kanaalvorm liggen de kanaalafmetingen vast. Deze bepalen het vereiste kanaalwandoppervlak. Is de globale vierkantemeter-prijs voor geheel gemonteerde en eventueel geïsoleerde kanalen bekend, dan is de investering voor één meter kanaal compleet gemonteerd en eventueel geïsoleerd bekend. Bij bekende rente, afschrijving en onderhoud zijn dan de kosten voor de gemonteerde kanalen per jaar bekend.

2.3. De kosten van warmte- of koudeverliezen door de kanaalwand

Ook geïsoleerde kanalen geven warmte af of nemen warmte op. Het warmteverlies van kanalen behoeft niet altijd als verlies te worden gezien. In onze berekeningen nemen wij echter aan dat de warmteverliezen door de kanaalwand als geheel verloren moeten worden beschouwd. Indien warme- en koude-luchtkanalen in eenzelfde ruimte liggen zullen de warmteverliezen van het warme-luchtkanaal de koude lucht in het koude-luchtkanaal opwarmen. Men zou dus niet alleen het warmteverlies zelf, maar ook de kosten van de daardoor veroorzaakte koudeverliezen moeten meetellen.

Hoewel dit effect zeker niet altijd gering is, hebben wij dit bij-effect in onze berekeningen verwaarloosd. Desgewenst kan men zelf een toeslag bepalen om dit effect bij de berekeningen mee te nemen.

De kosten voor de warmte- en koudeverliezen per m^2 kanaalwand worden bepaald door het aantal bedrijfsuren, het over de bedrijfstijd gemiddelde temperatuurverschil tussen de lucht in het kanaal en de omgeving, de k-waarde en de kosten voor een bepaalde hoeveelheid warmte resp. koude.

Strikt genomen zal de k-waarde enigszins variëren bij het kiezen van verschillende snelheden. De variaties in de k-waarde zijn daarbij echter gering; bij het optimaliseren is in de berekeningen de k-waarde constant verondersteld.

2.4. De ruimtekosten

Om het kanaal te kunnen onderbrengen is ruimte nodig. In een aantal gevallen kan men de kanaalafmetingen kiezen zonder dat dit bouwkundige veranderingen vereist. Dit kan b.v. het geval zijn ingeval een luchtkanaal in een ruime hal moet worden opgehangen. In dit geval kan de kubiekemeter-prijs buiten beschouwing blijven en moet men bij de optimalisering de kubiekemeter-prijs nul stellen.

Anders is de situatie indien er bouwkundige voorzieningen worden vereist welke duurder zijn naarmate de kanalen dikker gekozen zouden worden. Hierbij moet de ruimte, die rondom het kanaal beschikbaar moet zijn voor de montage en het eventueel isoleren worden meegeteld.

Voor de bepaling van de optimale snelheid moet niet met de gemiddelde kubiekemeter-prijs van het gebouw worden gerekend, maar met de kubiekemeter-prijs die geldt voor de verandering van de eventueel benodigde ruimte, als het kanaal iets groter of kleiner gekozen wordt.

Deze kubiekemeter-prijs kan zowel hoger als lager liggen dan de gemiddelde kubiekemeter-prijs van het gebouw.

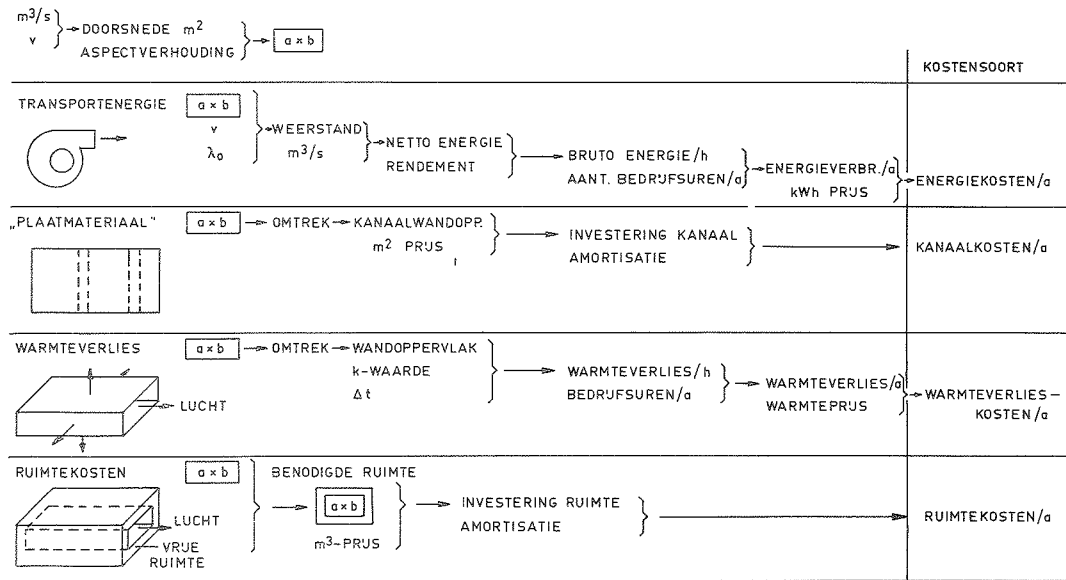
2.5. De totale jaarkosten

De totale jaarkosten zullen dus bestaan uit tenminste twee van de volgende kostenposten:

- energiekosten voor het luchttransport
- rente, afschrijving en onderhoud voor het kanaalstelsel
- warmteverliezen of koudeverliezen
- rente, afschrijving en onderhoud voor de ruimte voor het onderbrengen van de kanalen.

De factoren welke de kosten bepalen zijn in het schema samengevat.

SCHEMA VAN DE HERKOMST VAN KOSTENSOORTEN



Bij het groter kiezen van de snelheid nemen de energiekosten bij eenzelfde luchtstroom zeer snel toe (ongeveer met de snelheid tot de macht $2\frac{1}{2}$); daarbij nemen de kanaalkosten, de eventuele warmte- of koudeverliezen en de eventuele ruimtekosten betrekkelijk langzaam af. Er zal dus een snelheid te vinden zijn waarbij de totale kosten minimaal zijn.

De kosten voor geluiddemping zullen bij het kiezen van hogere snelheden kunnen toenemen. Deze kosten zullen hier echter niet getalmatig in de beschouwingen worden betrokken.

3. DE BEREKENINGEN

3.1. De invoergegevens

Voor een aantal verschillende parametercombinaties zijn de optimale snelheid, de totale jaarkosten en de kostenverdeling berekend.

De parameterwaarden welke daarbij gevarieerd zijn, om de specifieke invloed daarvan na te gaan, zijn daarbij tussen haakjes vermeld.

- Luchttransport 0,1 - 1 - 10 - 100 m³/s
- De kanaalvorm (rond) - vierkant - (rechthoekig 1 op 4)
- Kanaalkosten f 50 - f 80 en f 128/m²
- Amortisatie van de kanaalkosten inclusief onderhoud 14%/a
- Ruimtekosten f 0 - (f 150) - f 300/m²
- De vrije ruimte om het kanaal 30 cm ingeval de ruimtekosten $\neq$ 0
- Amortisatie van de ruimtekosten inclusief onderhoud 11%/a
- Elektriciteitsprijs f 0,05 (en f 0,10)/kWh
- Ventilatorrendement (inclusief motor + aandrijving) 0,75 (en 0,375)
- Aantal bedrijfsuren 8760 h/a (en 4380 h/a)
- Kanaalwrijvingscoëfficiënt $\lambda_0 \cdot (10^5/Re)^{0,2}$ waarin $\lambda_0 = 0,02$ (en 0,04)
- De warmteprijs f 20/10⁶ kcal
- Temperatuurverschil warme-luchtkanaal $\Delta t_w = 20^\circ\text{C}$
- De k-waarde k_w van de isolatie van het warme-luchtkanaal 2 kcal/m²h °C
- De koudeprijs f 80/10⁶ kcal
- Temperatuurverschil koude-luchtkanaal $\Delta t_r = 10^\circ\text{C}$

- De k-waarde k_r van de isolatie van het koude-luchtkanaal $1 \text{ kcal/m}^2\text{h } ^\circ\text{C}$
- De kosten voor eventueel benodigde geluiddemping zijn in de beschouwingen niet in aanmerking genomen.

3.2. De wijze van berekening

Door volgens een bepaald schema de snelheden te variëren en voor elke snelheid de totale kosten te bepalen en daaruit het minimum op te zoeken, vindt men de optimale snelheid.

De berekeningen zijn verricht door het Instituut voor Wiskunde, Informatieverwerking en Statistiek TNO te 's-Gravenhage.

4. RESULTATEN

4.0. Inleiding

Het algemene verloop van de kosten in het eenvoudigste geval (alleen transportenergie en kanaalkosten) is gegeven in fig. 2. De minimale jaarkosten worden bereikt als de energiekosten 17% van de totale kosten bedragen. Dit blijkt ook voor andere parameterwaarden op te gaan ingeval alleen deze twee kostensoorten aanwezig zijn. De algemene geldigheid van deze regel bleek ook wiskundig te kunnen worden bewezen. De in onderstaande paragrafen gegeven aanbevelingen gelden slechts zolang bij het hoger worden van de optimale snelheden geen bijverschijnselen optreden die kosten veroorzaken welke nog niet meegerekend zijn, zoals b.v. voor geluiddempende maatregelen.

Bij het bespreken van de invloed van een aantal parameters zijn wij meestal uitgegaan van een luchttransport van $1 \text{ m}^3/\text{s}$. De waarden van de betrokken parameters zijn bij de figuren bijgeschreven.

De figuren zijn vooral bedoeld om de principes te verduidelijken, hetgeen niet wegneemt dat de getallen en schalen juist zijn.

De besproken parametercombinaties zijn bovendien in de tabel samengevat.

Met de in de tekst gegeven regels kan de lezer ook andere parametercombinaties vinden waarvoor de figuren onveranderd gelden.

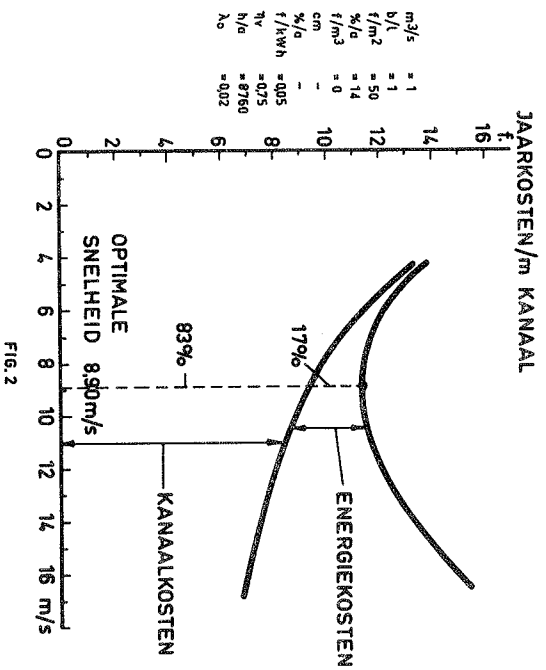


FIG. 2

OVERZICHT VAN DE COMBINATIES, BESPROKEN IN DE VERMELDE PARAGRAFEN AAN DE HAND VAN DE
GENOEMDE FIGUREN

INVLOED	m/s	kWh PRUS	η_v	h/a	λ_o	f/m ²	WARMTE OF KOUDE VERLIES	f/m ³	KANAAL VORM	AFTAK- KINGEN	DIVERSE COMBINATIES				VERG. HANDB.
FIGUUR	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	13	13a	13b	13c	14
PARAGRAAF	4.0	4.1	4.2	4.3	4.4	4.6	4.7	4.8	4.9	4.11	4.12	4.12	4.12	4.12	7
m ³ /s	1	1	1	1	1	1	1	1	10	0,5-0,1/1-0,1	0,1-1-10-100	0,1-1-10-100	0,1-1-10-100	0,1-1-10-100	0,1-1-10-100
b/l	1	1	1	1	1	1	1	1	ϕ -1-4	1	1	1	1	1	1
f/m ²	50	50	50	50	50	50-80-128	(50)80	50	50	50	50-80 (128)	50-80 (128)	50-80 (128)	50-80 (128)	50-80 (128)
%/a	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
f/m ³	0	0	0	0	0	0	0	0	0-150-300	0-300	0-150-300	0	150	300	0-300
cm	-	-	-	-	-	-	-	30	30	-	30	30	30	30	30
%/a	-	-	-	-	-	-	-	11	11	-	11	11	11	11	11
f/kWh	0,05	0,05/0,10	0,05	0,10	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
η_v	0,75	0,75	0,75-0,375	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
h/a	8760	8760	8760	4380-8760	8760	8760	8760	8760	8760	8760	8760	8760	8760	8760	8760
λ_o	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02-0,04	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
f/Gcal							20/-				20/-	20/-	20/-	20/-	20/-
Δt_w °C							20/-				20/-	20/-	20/-	20/-	20/-
kw							2/-				2/-	2/-	2/-	2/-	2/-
f/Gcal							-/80				-/80	-/80	-/80	-/80	-/80
Δt_r °C							-/10				-/10	-/10	-/10	-/10	-/10
kr							-/1				-/1	-/1	-/1	-/1	-/1

4.1. De invloed van de kWh-prijs

In figuur 3 is het kostenverloop weergegeven voor een kWh-prijs van f 0,05 en f 0,10. Bij 5 ct/kWh ligt de optimale snelheid bij 8,90 m/s. Bij verdubbeling van de kWh-prijs neemt de optimale snelheid af tot 7,01 m/s. Hierbij zijn de energiekosten wederom ca. 17% van de totale kosten. Dit betekent dat bij het nieuwe optimum het aantal kWh bijna tot de helft is teruggedrongen. De energiekosten zelf zijn nauwelijks toegenomen. De stijging van de totale kosten wordt vrijwel geheel in de stijging van de kanaalkosten gevonden. Omgekeerd laat zich hieruit concluderen dat bij optimaal dimensioneren een halvering van de energieprijs het energieverbruik sterk gaat toenemen (tot bijna het dubbele), dat de energiekosten nauwelijks dalen en dat de besparing vrijwel geheel komt uit de kleinere kanalen die dan gekozen kunnen worden.

4.2. De invloed van het ventilatoraggregaatrendement

Een slechter rendement heeft dezelfde uitwerking als een verhoging van de energieprijs. Dit is in fig. 4 verduidelijkt. Wordt het rendement gehalveerd dan nemen bij optimale dimensionering van de kanalen de energiekosten nauwelijks toe. De hogere kosten zitten bij optimale berekening vrijwel geheel in de hogere kanaalkosten die gemaakt moeten worden omdat de optimale snelheid bij een slechter rendement blijkbaar lager gekozen moet worden.

4.3. De invloed van het aantal bedrijfsuren per jaar

De invloed van een halvering van het aantal bedrijfsuren is aangegeven in fig. 5. De uitwerking hiervan is dezelfde als het halveren van alleen de kWh-prijs, of het verdubbelen van het rendement (als dat mogelijk zou zijn). De energiekosten bij de optimale snelheid zijn ook hier steeds 17% van de totale kosten. Bij verdere verkorting van het aantal bedrijfsuren komt de optimale snelheid steeds hoger te liggen, de totale kosten nemen steeds af. De energiekosten in elke nieuwe situatie zijn bij de nieuwe optimale snelheid steeds 17% van de totale kosten.

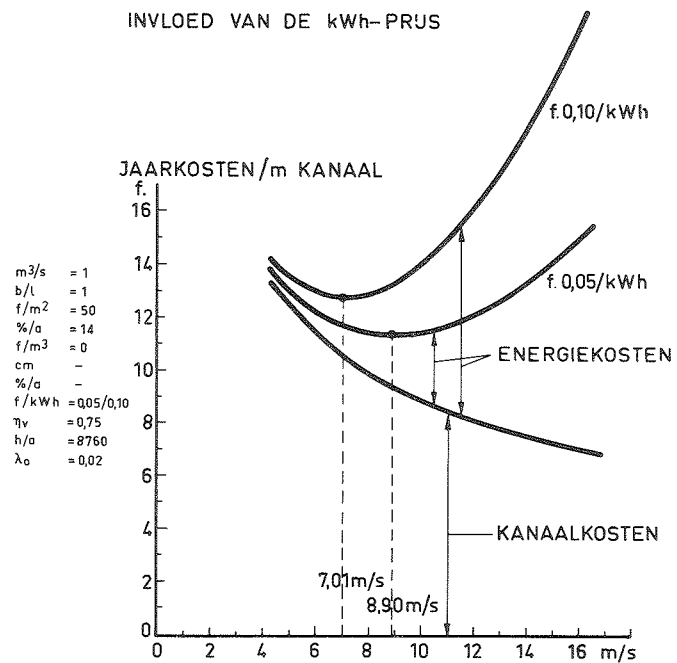
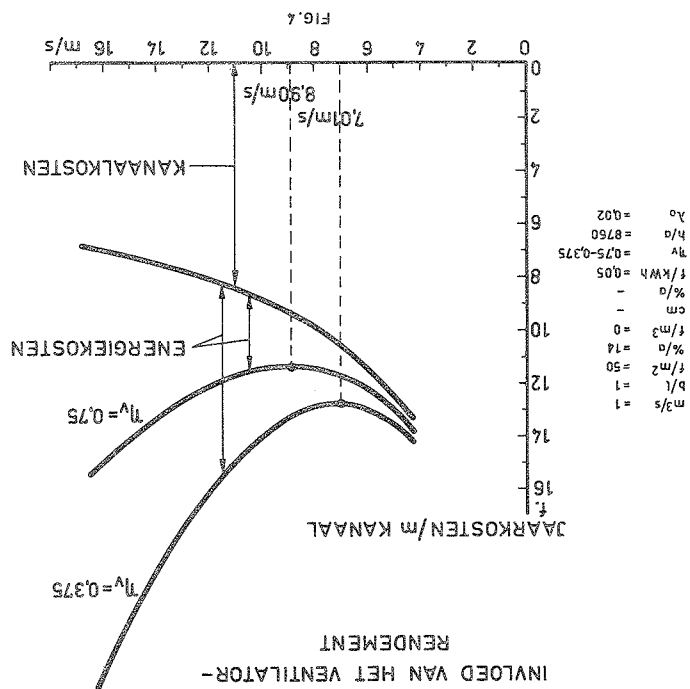


FIG. 3



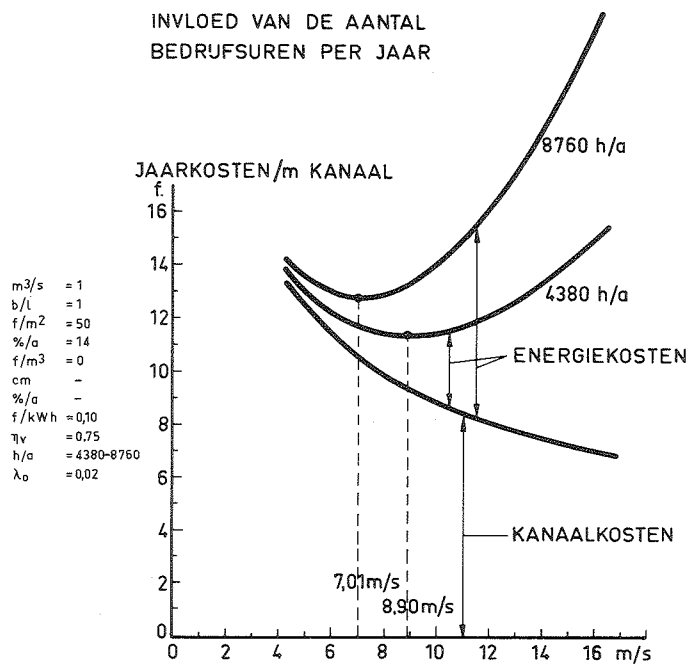


FIG. 5

4.4. De invloed van een hogere kanaalwrijvingscoëfficiënt

Als de kanaalwrijvingscoëfficiënt bij de keuze van een ander kanaalmateriaal (bij dezelfde kanaalprijs per m^2) tweemaal zo hoog is, zouden bij onveranderde snelheid de weerstandsverliezen, en dus de transportkosten tweemaal zo hoog worden. Dit is aanschouwelijk gemaakt in fig. 6. Optimale aanpassing van de doorsnede van het kanaal met de hogere wrijving levert een lagere optimale snelheid waarmee de totale kosten wat hoger worden dan eerst, maar lager dan bij het niet aanpassen van de snelheid het geval zou zijn geweest.

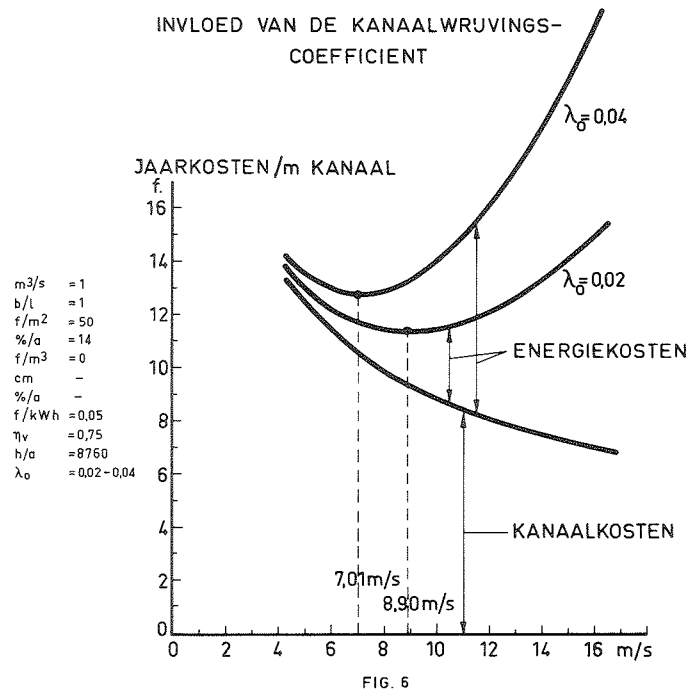
4.5. De invloed van de kWh-prijs, het aantal bedrijfsuren t_b , het ventilatoraggregaatrendement η en de kanaalwrijvingscoëfficiënt λ_0

De gezamenlijke invloed laat zich in één parameter P_1 samenvatten.

$$P_1 = \frac{(\text{kWh-prijs}) \cdot (\text{aantal bedrijfsuren}) \cdot (\text{kanaalwrijvingscoëfficiënt})}{\text{ventilatoraggregaatrendement}}$$

Als men alleen deze vier parameters variëert zonder dat P_1 verandert, veranderen ook de optimale snelheid, de totale jaarkosten en de kosten-samenstelling niet. Hiervan kan men gebruik maken om ook voor een groot aantal andere parametercombinaties over de uitkomsten te beschikken zonder dat het nodig is de gecompliceerde iteratieberekeningen te herhalen. Zo geldt fig. 2 o.a. voor de volgende vijf parametercombinaties:

Combinatie	1	2	3	4	5
kWh-prijs ct/kWh	5	10	5	5	8
aantal bedrijfsuren per jaar	8760	4380	4380	4380	3504
ventilatoraggregaatrendement	0,75	0,75	0,375	0,75	0,60
kanaalwrijvingscoëfficiënt λ_0	0,02	0,02	0,02	0,04	0,025
combinatieparameter, P_1	1168	1168	1168	1168	1168



4.6. De invloed van de kanaalprijs

Deze invloed is in fig. 7 aanschouwelijk gemaakt. Stijgt de kanaalprijs van f 50/m² naar f 80/m² dan wordt een hogere optimale snelheid gevonden: 10,46 m/s in plaats van 8,90 m/s. Bij verdere stijging van de kanaalprijs blijven de optimale snelheid en de totale kosten stijgen. De regel dat bij de optimale snelheid de energiekosten 17% van de totale kosten uitmaken, blijft gelden.

Uit fig. 7 blijkt dat men in geïsoleerde, dus de duurdere warme- en koude-luchtkanalen (ca. f 80/m²), op grond van economische overwegingen een hogere snelheid moet kiezen dan in ongeïsoleerde kanalen (ca. f 50/m²). Hierop moet echter nog een toeslag worden gegeven welke in paragraaf 4.7. wordt besproken.

4.7. De invloed van warmte- of koudeverliezen

De jaarlijkse kosten door warmte- of koudeverliezen door de kanaalwand worden bepaald door het over de bedrijfstijd gemiddelde temperatuurverschil tussen de lucht in het kanaal en de omgeving, de k-waarde, de warmte- of koudekosten per b.v. 10⁶ kcal en het aantal bedrijfsuren per jaar.

De berekeningen zijn uitgevoerd voor het volgende geval:

$$8760 \text{ h/a}$$

$$k_w = 2 \text{ kcal/m}^2\text{h } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_w = (\text{lucht in het kanaal t.o.v. omgeving}) = 20^\circ\text{C}$$

$$\text{warmteprijs f } 20/10^6 \text{ kcal}$$

Het resultaat is in fig. 8 weergegeven.

Hieruit blijkt dat door de aanwezigheid van de warmteverliezen de snelheid niet alleen als gevolg van de hogere kanaalwandprijs moet worden verhoogd van 8,90 m/s naar 10,46 m/s, maar bovendien nog van 10,46 m/s naar 12,30 m/s om de warmteverliezen verder te beperken.

Koudekosten zijn hoger dan warmtekosten; men zal daarom wellicht voor koude luchtkanalen een wat betere isolatie kiezen, b.v. $k_r = 1 \text{ kcal/m}^2\text{h } ^\circ\text{C}$. Ook het temperatuurverschil met de omgeving zal wat lager zijn, b.v. 10°C.

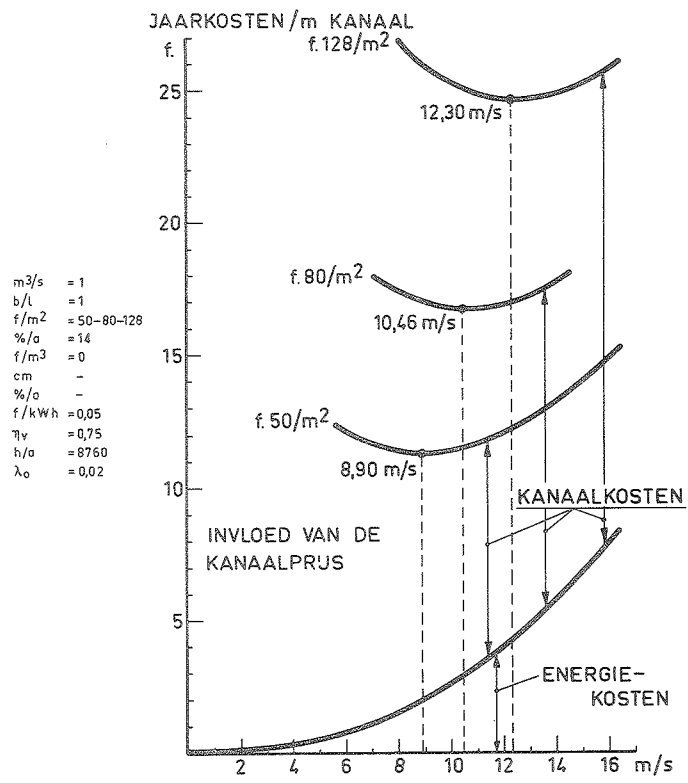
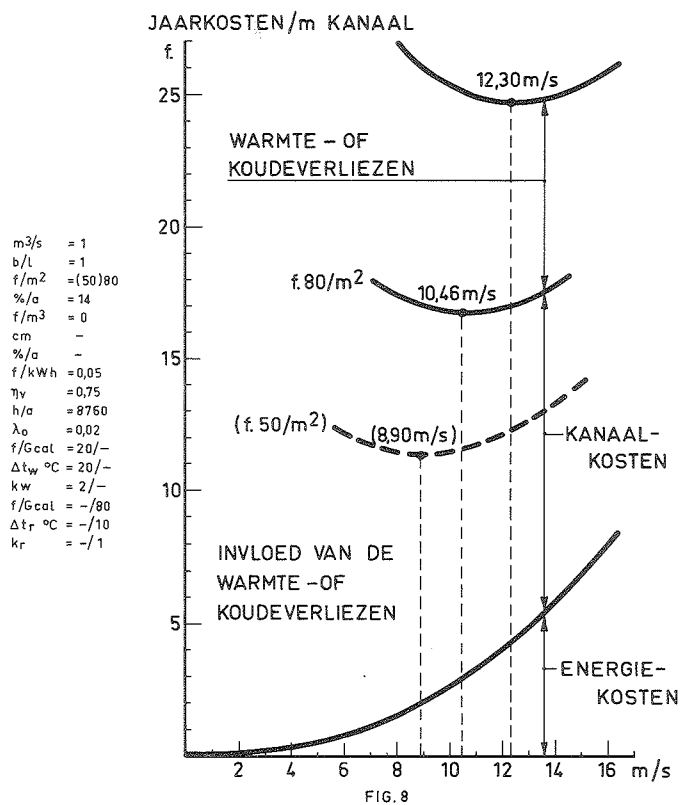


FIG. 7



Bij een koudeprijs van $f\ 80/10^6$ kcal komt men dan juist op dezelfde kosten voor het koudeverlies als in bovenstaand voorbeeld voor het warmteverlies.

Voor de genoemde parameters kan dus de snelheid van 12,30 m/s zowel voor de warme-lucht- als voor de koude-luchtleidingen gelden.

Als bepalende parameter kan men P_2 hanteren, volgens:

$$P_2 = \frac{(k\text{-waarde}) \cdot (\text{temp.verschil}) \cdot (\text{warmteprijs}) \cdot (\text{bedrijfsuren per jaar})}{\text{amortisatiefaktor voor de kanalen}}$$

P_2 heeft de dimensie van f/m^2 . P_2 kan als toeslag op de kanaalprijs worden ingevoerd.

De afleiding van de economische isolatiedikte kan men desgewenst in de literatuur vinden [3].

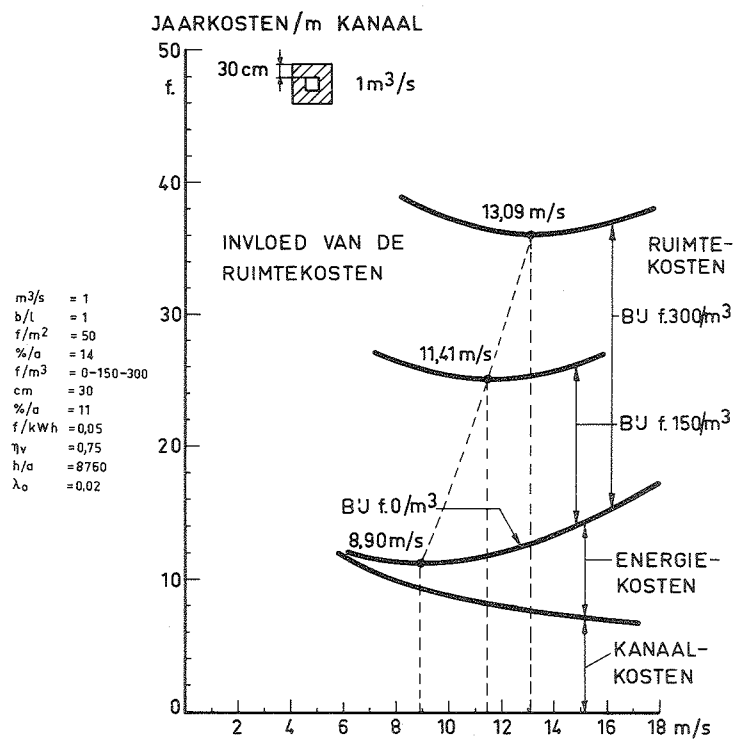
4.8. De invloed van de ruimtekosten

Een zekere vrije ruimte om het kanaal zal om een aantal redenen altijd nodig zijn:

- a) de buitenwerkse maten van een luchtleiding kunnen reeds aanzienlijk groter dan de inwendige maten zijn, b.v. als er sprake is van flensverbindingen en/of warmte-isolatie;
- b) er moet ruimte zijn om het kanaal te kunnen ophangen;
- c) ingeval de isolatie na het ophangen moet worden aangebracht, is ruimte nodig als armsglag voor de isoleerder;
- d) andere leidingen (b.v. water, gas, elektriciteit) welke in de buurt liggen moeten bereikbaar blijven.

Zoals reeds eerder opgemerkt is, moet bij het optimaliseren met een kubiekemeter-prijs nul worden gerekend als men vrij is om de kanaalafmetingen te kiezen zonder dat dit bouwkundig-financiële consequenties heeft.

Is de kubiekemeter-prijs niet nul, dan moet men niet met de gemiddelde kubiekemeter-prijs van het gebouw rekenen, maar met de prijs die geldt voor een kleine verandering van de voor het kanaal benodigde ruimte. Beide gevallen (kubiekemeter-prijs nul en kubiekemeter-prijs niet nul) zijn in fig. 9 aangegeven.



$m^3/s = 1$
 $b/l = 1$
 $f/m^2 = 50$
 $\%/a = 14$
 $f/m^3 = 0-150-300$
 $cm = 30$
 $\%/a = 11$
 $f/kWh = 0,05$
 $\eta_v = 0,75$
 $h/a = 8760$
 $\lambda_o = 0,02$

Deze figuur geldt voor de situatie met een relatief grote vrije ruimte om het kanaal. De kanaalmaat is ongeveer 30 x 30 cm, terwijl ook de vrije ruimte rondom 30 cm genomen is. Indien de vrije ruimte 10 cm genomen zou zijn, zouden de ruimtekosten dus ongeveer een faktor $(10 + 30 + 10)^2 / (30 + 30 + 30)^2 = \text{ca. } 0,3$ kleiner zijn.

De consequenties hiervan op de optimale snelheid en de kosten kunnen in de figuur vrij goed worden geschat.

Indien de ruimtekosten niet nul zijn gaat de regel dat bij het optimum de energiekosten 17% van de totale kosten zijn, niet meer op. Het percentage ligt dan meestal enkele procenten hoger; het getal ligt meestal tussen 18 en 23%.

4.9. De invloed van de kanaalvorm

De berekeningen zijn behalve voor vierkante kanalen ook gemaakt voor ronde kanalen en kanalen met een aspectverhouding van 1 op 4. In fig. 10 zijn de lijnen gegeven zowel voor een ruimteprijs van $f 0/m^3$ als voor een ruimteprijs van $f 300/m^3$. Bij een ruimteprijs van $f 0/m^3$ zijn reeds bij een gelijke vierkantemeter-prijs ronde kanalen duidelijk het goedkoopst; de rechthoekige kanalen zijn duidelijk duurder dan de vierkante.

Bij een ruimteprijs van $f 300/m^3$ leiden ronde en vierkante kanalen bij dezelfde kanaalwandprijs tot ongeveer gelijke totale kosten: dit is het gevolg van het feit dat men met ronde kanalen vaak met meer ruimteverlies moet rekenen, omdat men ronde kanalen meestal toch in een rechthoekige of vierkante ruimte moet wegwerken. Een en ander is in fig. 11 verduidelijkt. Rechthoekige kanalen met een aspectverhouding 1 op 4 zijn reeds aanmerkelijk duurder dan vierkante kanalen. Ook voor dit geval is de ruimtebehoefte voor rechthoekige kanalen groter dan voor vierkante kanalen.

4.10. De invloed van geluiddempende maatregelen

Het kan voorkomen dat een optimale snelheid, die bepaald is zonder rekening te houden met geluiddempkosten, zo hoog wordt, dat geluiddempende maatregelen nodig zouden zijn. Bij het toenemen van de gekozen snelheid nemen de vereiste geluiddempkosten dan nog verder toe.

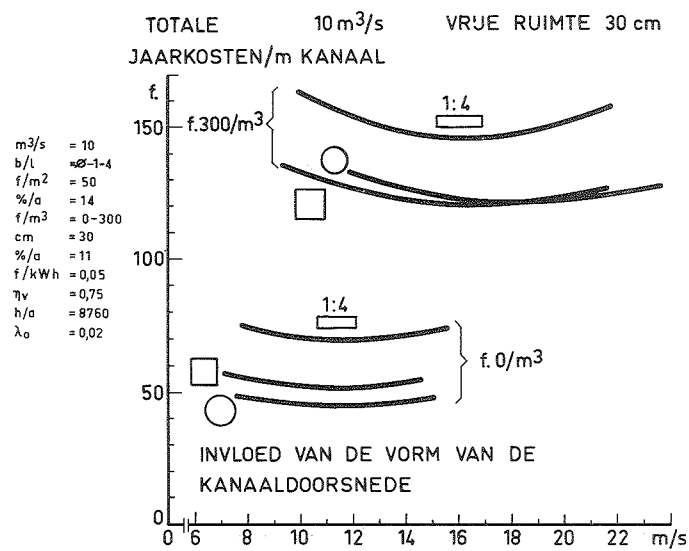
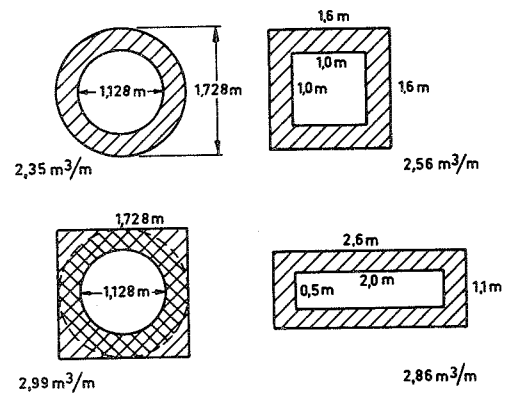


FIG. 10



BENODIGDE RUIMTE
VOOR $1m^2$ DOORSTROOM OPPERVLAK

FIG. 11

Als men de keuze heeft tussen het toepassen van de optimale snelheid - al of niet met een zekere geluiddemping - of een hogere snelheid met gelijkwaardig geluidresultaat (dus méér geluiddemping), zal het laatstgenoemde alternatief altijd duurder zijn.

Het is dus (vrijwel) nooit mogelijk door het aanvaarden van meer geluiddempkosten, een totale besparing te verkrijgen t.o.v. een ontwerp waarin reeds optimale snelheden, bepaald zonder rekening te houden met geluiddemping, zijn verwerkt.

4.11. De invloed van aftakkingen

De afgeleide optimale snelheden gelden voor het luchttransport door leidingen zonder vertakkingen. Voor een leiding met spruiten, door welke telkens een klein deel van de oorspronkelijke hoofdstroom aftakt, moeten lagere snelheden worden gekozen. De snelheid moet lager worden gekozen naarmate men in de hoofdleiding meer aftakkingen is gepasseerd.

De weerstand van de laatste leidingstukken leidt ter plaatse van de voorgaande spruiten tot hogere drukken dan nodig zijn; als men overal zoveel mogelijk dezelfde drukken wil hebben, moet dit teveel aan druk worden weggesmoord. De totale luchthoeveelheid aan het begin van de leiding komt daardoor op een hogere druk dan eigenlijk nodig zou zijn en de energieverliezen zijn dan hoger dan nodig is.

De juiste snelheden waarmede dit effect wordt ondervangen vindt men door met een fictieve kWh-prijs te rekenen. Bij gelijke aftakstromen op gelijke aftakafstanden moet de fictieve kWh-prijs een faktor

$$\frac{\text{luchtstroom (m}^3/\text{s in hoofdkanaal aan het begin van de leiding)}}{\text{luchtstroom (m}^3/\text{s in hoofdkanaal in het betreffende verderop gelegen kanaalstuk)}}$$

hoger genomen worden dan de werkelijke kWh-prijs.

Indien per spruit een luchtstroom van $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ aftakt, vindt men voor een aftakleiding met 5 spruiten en een met 10 spruiten de snelheden zoals in fig. 12 is aangegeven.

OPTIMALE SNELHEDEN IN VERTAKTE
LEIDINGEN

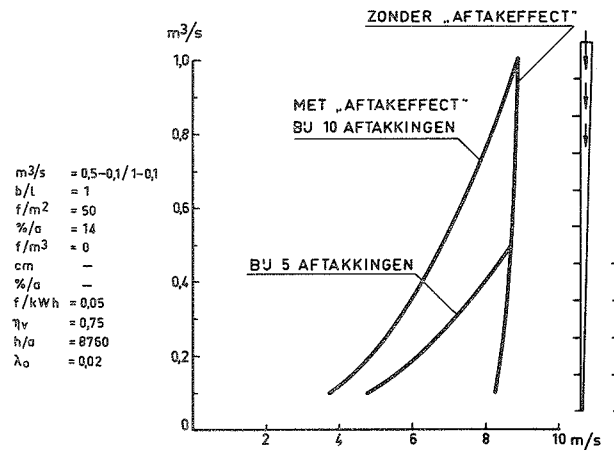


FIG. 12

Duidelijk is te zien dat vooral in de laatste einden van de hoofdleiding de snelheden aanzienlijk lager komen te liggen dan bij verwaarlozing van het aftakeffekt het geval zou zijn.

Voor een vertakte leiding, met fictieve kWh-prijzen berekend, blijken de energiekosten weer 17% van de totale kosten te bedragen.

Rekening houdend met het "aftakeffekt" zijn de jaarkosten bij 5 aftakkingen 5,6% lager dan zonder het "aftakeffekt". Bij 10 aftakkingen is de besparing op de jaarkosten reeds 8,4%.

Voor een gebouw van meer dan 600.000 m^3 zal de investering in het kanaalsysteem ca. f 10 miljoen kunnen bedragen. De daarbij behorende jaarkosten zijn ca. f 1,5 miljoen. Een besparing van 7% betekent dan een jaarlijks terugkerende besparing van ruim f 100.000,--. Deze besparing wordt alleen reeds verkregen door met het aftakeffekt rekening te houden.

Voor meervoudig vertakte kanaalsystemen is de berekening ingewikkelder. Hierop gaan wij thans niet verder in.

4.12. De invloed van de luchthoeveelheid, de kanaalkosten, de gebouwkosten en de warmte- of koudeverliezen

In fig. 13 zijn de totale jaarkosten uitgezet boven de bijbehorende optimale snelheden. Deze gelden voor onvertakte transportleidingen. Voor vertakte leidingen moeten lagere waarden worden gekozen zoals in paragraaf 4.11. is uiteengezet.

Terwille van de overzichtelijkheid is het diagram in fig. 13 nog gesplitst in de drie figuren 13^a , 13^b en 13^c , resp. voor een ruimteprijs van f $0/\text{m}^3$, f $150/\text{m}^3$ en f $300/\text{m}^3$.

De warmteverlieskosten zijn erin verwerkt voor een P_2 -waarde van f $48/\text{m}^2$ (zie paragraaf 4.7.).

4.13. De invloed van de amortisatie-percentages voor kanaalkosten en ruimtekosten

Indien het amortisatie-percentage een bepaalde faktor kleiner of groter gekozen wordt heeft dit dezelfde invloed als wanneer de betreffende kanaalprijs of de betreffende ruimteprijs eenzelfde faktor kleiner of groter gekozen wordt. Men kan de invloed van het amortisatie-percentage dus door interpolatie in de grafieken vinden.

TOTALE JAARKOSTEN /m KANAAL

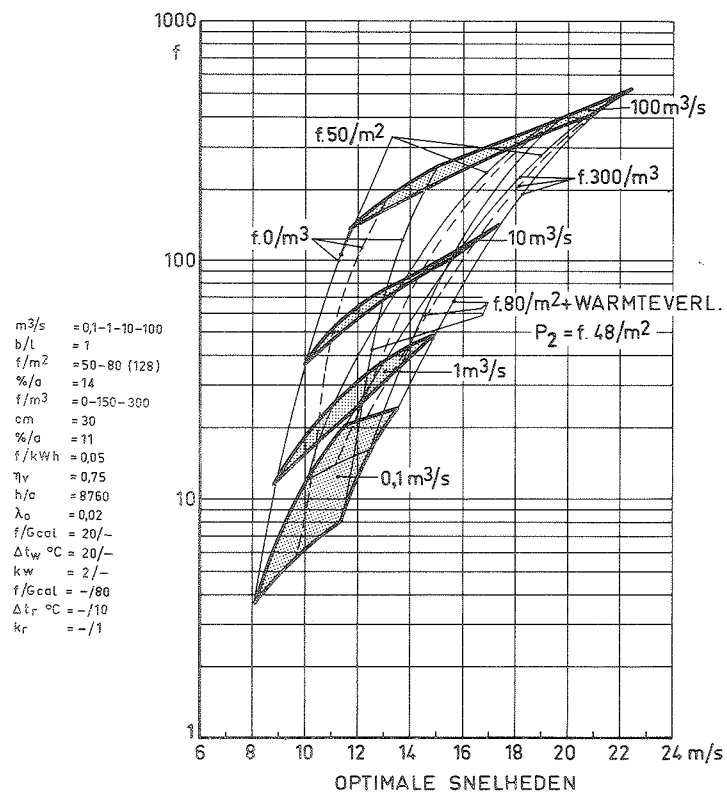


FIG. 13

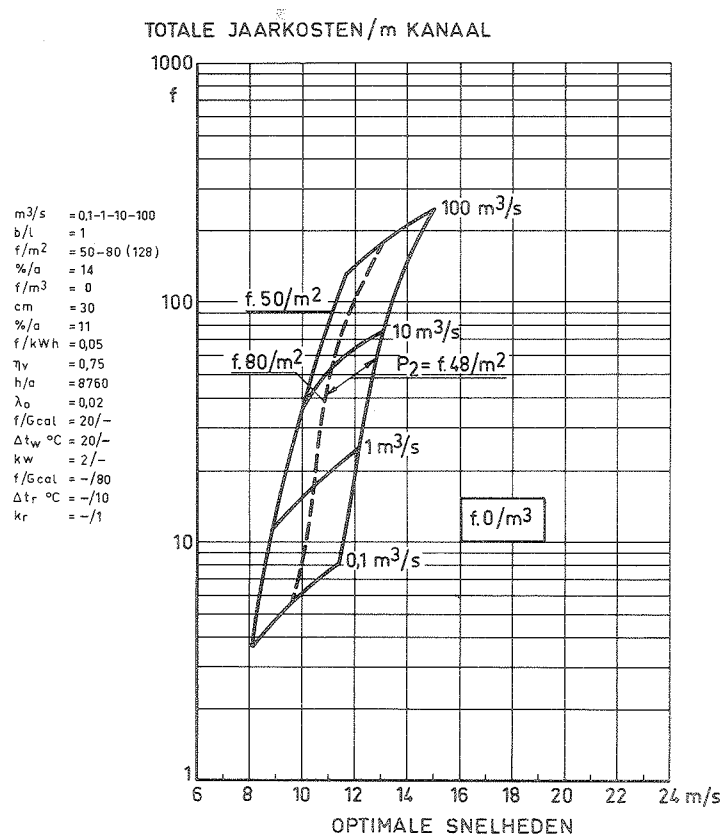


FIG. 13a

TOTALE JAARKOSTEN/m KANAAL

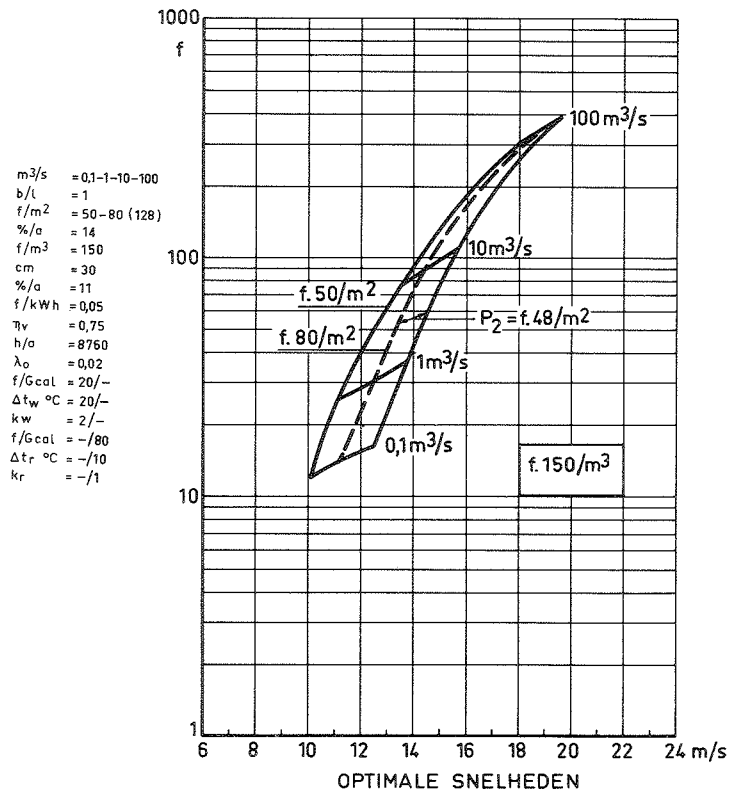


FIG. 13b

$m^3/s = 0.1-1-10-100$
 $b/l = 1$
 $f/m^2 = 50-80 (128)$
 $\%a = 14$
 $f/m^3 = 150$
 $cm = 30$
 $\%a = 11$
 $f/kWh = 0.05$
 $\eta_v = 0.75$
 $h/a = 8750$
 $\lambda_o = 0.02$
 $f/Gcal = 20/-$
 $\Delta t_w \text{ } ^\circ C = 20/-$
 $k_w = 2/-$
 $f/Gcal = -/80$
 $\Delta t_r \text{ } ^\circ C = -/10$
 $k_r = -/1$

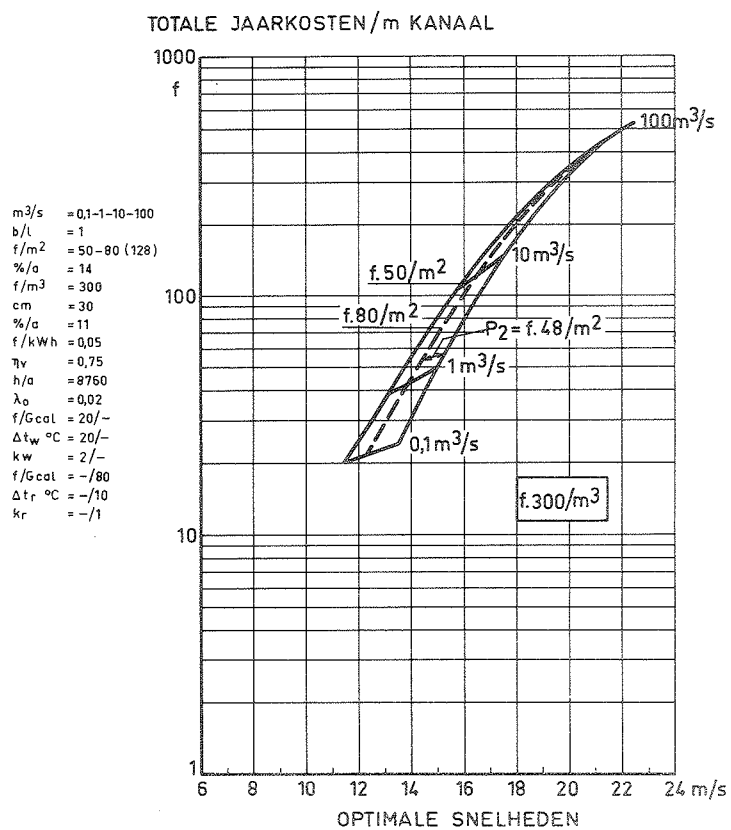


FIG. 13c

Een lagere rentevoet zal leiden tot een iets hogere investering, lagere optimale snelheden en lagere totale kosten.

5. DE INVLOED VAN HET AANLEGGEN VAN EEN ANDER CRITERIUM

Bij het hiervoor gehanteerde criterium "minimale jaarkosten" is stilzwijgend aangenomen, dat de jaarkosten welke gelden gedurende de afschrijvingstermijn ook na de afschrijvingstermijn dezelfde waarde houden. Dit is uiteraard in werkelijkheid niet het geval. Daarom zou het juister zijn om te werken met het criterium "alle kosten gekapitaliseerd op nú minimaal", (criterium 2).

Met dit criterium wordt niet alleen rekening gehouden met het feit dat er tijdens de bouwperiode een faseverschuiving is tussen de te betalen termijnen voor de bouw en de te betalen termijnen voor de installaties, maar ook dat na de afschrijvingstermijn de energiekosten doorlopen, terwijl de afschrijvingen van gebouw en installaties zijn afgelopen. Voor utiliteitsprojecten met een levensduur van tientallen jaren komt met criterium 2 meer nadruk op de energiekosten, waardoor de te kiezen optimale snelheid iets lager komt te liggen dan bij het criterium "minimale jaarkosten". Het verschil in optimale snelheid zal vermoedelijk slechts in de orde van 5% liggen.

Voor kortlopende industriële projecten, d.w.z. waarvoor slechts enkele jaren of zelfs één jaar levensduur wordt gerekend, is het gewicht van de energiekosten met criterium 2 relatief lager en zal men met het criterium 2 op wat hogere optimale snelheden uitkomen dan met criterium 1.

6. DE INVLOED VAN DE KEUZE VAN EEN ANDERE SNELHEID DAN DE OPTIMALE SNELHEID

Wanneer men de lijn van de totale jaarkosten als functie van de snelheid beziet (fig. 2) constateert men dat bij het kiezen van een snelheid die iets groter is dan de optimale, de investering merkbaar daalt. Een kleine verschuiving naar een iets hogere snelheid lijkt dus wel verantwoord.

De verleiding is groot daarmee vrij ver te gaan, maar dit blijkt onjuist als men zich realiseert dat de projecten niet alleen gebouwd maar ook in bedrijf gehouden moeten worden en betaald uit inkomsten die de gemeenschap opbrengt.

Denken wij aan een ziekenhuis dat mede gefinancierd wordt door de Overheid, dan worden die kosten niet alleen bestreden uit belastinggeld, maar ook uit de ziekenhuiskosten die veelal via ziekteverzekeringen worden betaald.

Kan men bij de optimale snelheid v_0 voor 100 geldeenheden per jaar (83 eenheden amortisatie, 17 eenheden luchttransport) een dergelijk projekt bouwen en in bedrijf houden, dan zal men bij $v = 1,2 v_0$ per jaar 104 geldeenheden nodig hebben (76 eenheden voor amortisatie en 28 eenheden voor luchttransport). Heeft men 104 geldeenheden beschikbaar dan kan men bij $v = 1,2 v_0$ slechts één projekt bouwen en in bedrijf houden, terwijl men bij de keuze $v = v_0$ niet alleen het projekt kan bouwen en in bedrijf houden, maar men ook nog 4 eenheden voor andere investeringen overhoudt.

Er is nog een aantal argumenten om geen snelheden toe te passen, die hoger zijn dan v_0 . Een ervan is de toename van de geluidproblemen. Een ander argument is dat er bij een hoger energieverbruik meer geïnvesteerd moet worden in het elektrische net met zijn transformatoren, kabels, verdeelkasten en beveiligingen.

Tenslotte noemen wij nog dat ter vermindering van de thermische vervuiling van het oppervlakte-water reeds thans gestreefd moet worden naar beperking van energieverbruik, vooral als dit verbruik nog on-economisch is ook.

Het werken met snelheden welke duidelijk hoger zijn dan v_0 lijkt ons dus onjuist.

Essentiëel is niet hoeveel projekten men per gulden kan realiseren, maar hoeveel projekten men per gulden kan realiseren en in bedrijf houden.

7. VERGELIJKING VAN DE OPTIMALE SNELHEDEN MET DE SNELHEDEN IN DE HANDBOEKEN

De gegevens in fig. 13 zijn in iets gewijzigde groepering samengevat in fig. 14. Hierin is voor één parametercombinatie ook de invloed van het "aftakeffect" (besproken in paragraaf 4.11) weergegeven voor 5 en 10 aftakkingen. Voor andere combinaties van f/m^2 en f/m^3 vindt men voor leidingen met aftakkingen relatief evengrote verlagingen van de optimale snelheid. In fig. 14 zijn tevens de snelheden zoals men deze vindt in de handboeken [1 en 2] met balkjes aangegeven.

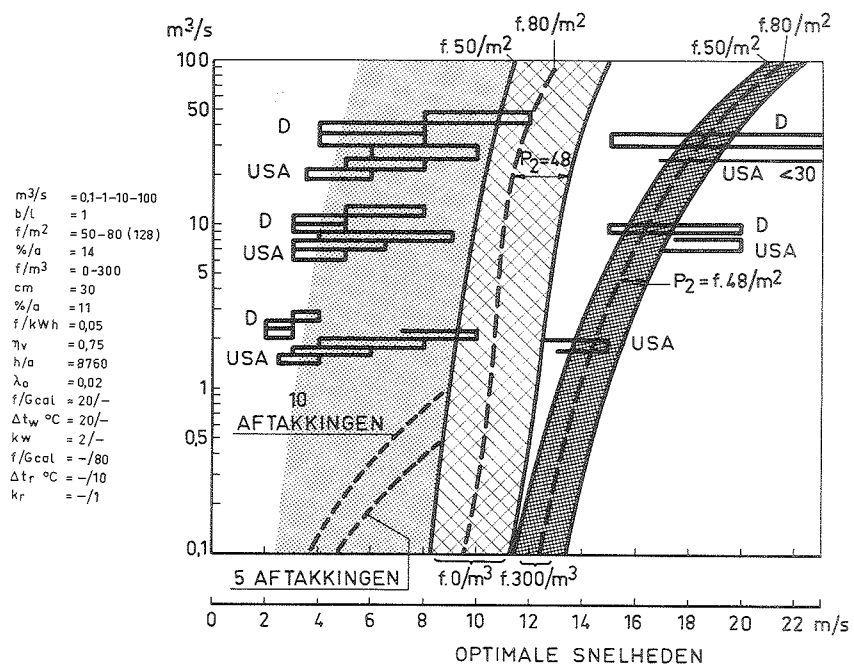
Men vindt hierin enigszins terug dat in dunne leidingen, d.w.z. in de laatste delen van aftakkende leidingen, de snelheid lager gekozen moet worden dan de optimale snelheid zonder "aftakeffect".

Het rechterdeel van de figuur, waarin de lijnen voor een ruimteprijs van $f \ 300/m^3$ zijn gegeven, kan geacht worden ongeveer te gelden voor zgn. hogedruk-installaties. Het linkerdeel van de figuur geldt voor lagedruk-installaties.

In de meeste handboeken vindt men geen kwantitatieve aanwijzingen hoe men op economische gronden tot een snelheidskeuze kan komen voor de verschillende soorten kanalen in verschillende omstandigheden.

BESLUIT

De studie verschaft inzicht in de snelheden in luchtkanalen welke men op economische gronden zou moeten kiezen. Keuze van een hogere dan de economische snelheid moet in de meeste gevallen als onjuist worden beschouwd.



8. LITERATUUR

- [1] ASHRAE Guide and Data Book 1969
- [2] Recknagel Sprenger, Taschenbuch für Heizung, Lüftung und Klimatechnik 1970
- [3] Blakeley, e.a.
Thermal Insulation for Heating Ventilating and Air-conditioning
pipework, plant and equipment
J. Inst. Heat. Vent. Engrs., dec. 1968, p. 278/286

